



高レベル放射性廃棄物の 地層処分技術に関する研究開発

－平成15年度報告－

2004年6月

核燃料サイクル開発機構

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184

Japan

© 核燃料サイクル開発機構（Japan Nuclear Cycle Development Institute）

2004

「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成15年度報告－」 の発行にあたって

2003年（平成15年）は、1953年に米国のアイゼンハワー大統領が国連総会で原子力の平和利用宣言の演説を行ってから50周年の年です。この50年で、世界の原子力平和利用は飛躍的な進歩をとげました。日本においても、日本原子力研究所の動力試験炉（JPDR）によってわが国初めての原子力発電が開始されてから40周年にあたり、今では原子力発電は全発電電力量の34%を担い、主要なエネルギー源として国民生活を支えるとともに、二酸化炭素排出量の低減にも大きく貢献しています。最近のわが国の原子力を巡る情勢は、原子力二法人の統合、電力自由化の進展、核燃料サイクルを取り巻く活発な議論など大きく変化してきております。このような動きを受けて、新たな原子力長期計画策定のための準備が進められており、バックエンドも主要な論点となっています。

わが国の高レベル放射性廃棄物の処分対策は、平成14年12月の原子力発電環境整備機構による「高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域」の公募開始、および総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会、原子力安全委員会における安全規制側の検討など、事業側、規制側とも着実に進展しております。

このような状況を踏まえ、わが国における地層処分技術の信頼性をさらに高めるとともに、社会の理解を深めていくことが、今後の研究開発を進める上で肝要です。サイクル機構では、2つの研究開発目標として「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」と「地層処分システムの長期挙動の理解」を掲げ、2つの深地層研究施設やエントリー、クオリティなどの室内試験施設を活用し、国内外の関係機関との役割分担のもと協力しながら効率的に研究開発を進め、処分事業と安全規制の双方の基盤となる技術や情報を整備しております。さらに、これら研究開発を通して、高レベル放射性廃棄物処分に係る人材の育成および技術の継承ならびに国民各層の理解促進に努めております。

地元の皆様のご理解とご協力のもと、各センターおよび事業所での研究開発業務は着実に進展しております。北海道幌延町で進めている幌延深地層研究計画は、研究所設置地区およびその周辺地区のボーリングなどの地上からの調査を実施し、平成15年7月には、研究所用地の造成工事に着手いたしました。岐阜県瑞浪市で進めている超深地層研究所計画では、深層ボーリング調査を進めるとともに、平成15年7月から立坑掘削に着手しました。東海事業所では、エントリー、クオリティなどでの室内試験を中心に、処分技術や安全評価に関する現象解明のデータ取得やモデルの高度化を進めています。平成15年8月には、

国内外の文献やサイクル機構で取得したデータをまとめて熱力学および収着データベースを構築し、サイクル機構のホームページで公開を開始しました。

サイクル機構で実施している研究開発成果については、技術報告書として個別テーマごとに取りまとめるとともに、学会やシンポジウムなどを通して広く情報発信に努めております。今後特に力を入れていく点として、国内外の学術誌へ投稿論文として発表していくことにより、客観性のある成果として提示していく所存です。「第2次取りまとめ」以降の研究開発成果については、年度ごとの報告書として取りまとめるとともに、平成17年度に「地上からの地質環境の調査・評価技術および設計・安全評価手法の整備」報告書として取りまとめる予定です。その一環として、今般、研究開発全体にわたる進捗状況をまとめた「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成15年度－」を作成しました。本報告書は、「第2次取りまとめ」以降の研究成果を年度ごとにまとめた「平成13年度報告書」、「平成14年度報告書」に引き続き、平成15年度の研究開発成果を中心に取りまとめたもので、特に地層処分に関連する分野の専門家や国および関係機関の方々に成果の現状をご理解いただくことを目的としております。

深地層の研究施設をはじめサイクル機構の有する研究資源をわが国全体の研究開発資源として有効に活用していくことが不可欠であり、本報告書によりサイクル機構の研究開発の展開や取り組み状況をご理解いただき、各機関で実施している研究開発に反映し活用していただきたいと考えております。

本報告書が、わが国の地層処分技術の進展に少しでも寄与できればと願うとともに、皆様からの忌憚のないご意見をお寄せいただければ幸いです。

経営企画本部バックエンド推進部長

石川博久

(平成16年6月 記)

高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発 ―平成 15 年度報告―

― 目次 ―

1. はじめに	1-1
2. 研究開発計画と成果の概要	2-1
2.1 地層処分技術に関する研究開発の全体概要	2-1
2.1.1 サイクル機構の役割	2-1
2.1.2 研究開発目標と進め方	2-1
2.1.3 各事業所・センターにおける研究開発の取り組みの現状と当面の計画・課題	2-2
2.2 各研究開発分野における計画と成果の概要	2-6
2.2.1 深地層の科学的研究	2-6
2.2.2 処分技術の信頼性向上	2-24
2.2.3 安全評価手法の高度化	2-34
3. 深地層の科学的研究	3-1
3.1 広域地下水流動研究と超深地層研究所計画の役割と研究の進め方	3-1
3.2 広域地下水流動研究	3-4
3.2.1 研究の概要	3-4
3.2.2 各調査研究の成果	3-7
1) 地質・地質構造に関する調査研究	3-7
2) 岩盤の水理に関する調査研究	3-14
3) 地下水の地球化学に関する調査研究	3-19
3.2.3 調査研究の統合	3-23
3.3 超深地層研究所計画	3-26
3.3.1 計画の概要	3-26
3.3.2 第 1 段階の調査研究	3-30
1) 各分野の調査研究の成果	3-30
1-1) 地質・地質構造に関する調査研究	3-30
1-2) 岩盤力学に関する調査研究	3-33
1-3) 岩盤の水理に関する調査研究	3-37
1-4) 地下水の地球化学に関する調査研究	3-42
1-5) 調査技術開発	3-46
2) 深地層の工学技術の基礎に関する研究	3-48

3) 調査研究の統合	3-61
3.3.3 第2段階の調査研究	3-66
1) 調査研究計画（第2段階前半の計画）	3-66
2) 施設計画の進捗状況	3-70
3.4 幌延深地層研究計画	3-71
3.4.1 役割と研究の進め方	3-71
3.4.2 第1段階の調査研究	3-74
1) 地質環境調査技術開発	3-74
1-1) 地質・地質構造に関する調査研究	3-74
1-2) 岩盤力学に関する調査研究	3-81
1-3) 岩盤の水理に関する調査研究	3-87
1-4) 地下水の地球化学に関する調査研究	3-93
2) 地質環境モニタリング技術の開発	3-96
2-1) ボーリング孔を用いたモニタリング技術開発	3-96
2-2) 遠隔監視システムの開発	3-99
3) 深地層の工学技術の基礎に関する研究	3-100
4) 調査研究の統合	3-106
5) 地質環境の長期安定性に関する研究	3-108
6) 環境調査	3-115
3.4.3 第2段階の調査研究	3-117
3.5 地質環境の長期安定性に関する研究	3-119
3.5.1 研究の概要	3-119
3.5.2 各研究の成果	3-121
1) 隆起・侵食／気候・海水準変動に関する研究	3-121
2) 火山活動に関する研究	3-123
3) 地震・断層活動に関する研究	3-128
4) 研究情報基盤の整備	3-132
4-1) 地質環境の長期安定性に係わるデータベースの整備	3-132
4-2) 次世代の高精度物理探査技術等に係わる基盤研究	3-133
4-3) 活断層帯での地殻活動研究	3-136
3.6 東濃鉱山における調査試験研究	3-137
3.6.1 調査試験研究の概要	3-137
3.6.2 各調査試験研究の成果	3-139
1) ナチュラルアナログ研究	3-139
2) 岩盤の力学的安定性に関する試験研究	3-141
3) 坑道周辺の地質環境に関する調査研究	3-143

4. 処分技術の信頼性向上	4-1
4.1 人工バリアの基本特性データベースの整備	4-1
4.1.1 オーバーパックの基本特性	4-1
1) 炭素鋼オーバーパックの腐食挙動に関する研究	4-1
2) 代替オーバーパック材料の腐食挙動に関する研究	4-5
4.1.2 緩衝材の基本特性	4-9
4.1.3 人工バリアの性能保証に関する基盤情報整備	4-14
4.2 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究	4-17
4.2.1 人工バリア等の変形・変質等の長期挙動に関する研究	4-17
1) 緩衝材／岩盤の力学的変形挙動に関する研究	4-17
1-1) 緩衝材のクリープ現象に関する研究	4-17
1-2) 岩盤の力学的変形挙動に関する研究	4-21
2) 緩衝材の流出・侵入挙動に関する研究	4-26
3) 人工バリアの変質・劣化挙動に関する研究	4-31
4.2.2 熱-水-応力-化学連成挙動に関する研究	4-34
4.2.3 人工バリア性能の維持限界条件に関する研究	4-41
1) 緩衝材ガス透気回復挙動に関する研究	4-41
2) 人工バリアせん断応答挙動に関する研究	4-45
4.2.4 人工バリア等のナチュラルアナログ研究	4-48
4.3 人工バリア等の工学技術の検証	4-50
4.3.1 閉鎖技術の検証試験	4-50
4.3.2 人工材料の開発	4-54
4.3.3 幌延地下水環境下における緩衝材等の力学特性	4-57
4.4 設計手法の適用性確認	4-59
5. 安全評価手法の高度化	5-1
5.1 核種移行データベースの整備	5-1
5.1.1 放射性核種の熱力学データベースの整備	5-1
5.1.2 収着・拡散データベースの整備	5-7
5.2 安全評価モデルの高度化	5-11
5.2.1 岩盤中水理・物質移行モデルの高度化	5-11
1) 結晶質岩中における亀裂ネットワークモデルの改良・高度化研究	5-11
2) 結晶質岩中の移行パラメータの信頼性評価手法の開発研究	5-13
3) 岩盤中の水理・物質移行モデルの信頼性向上研究	5-17
3-1) 単一亀裂に関する室内試験	5-17

3-2) 単一亀裂に関するモデル開発	5-21
3-3) 亀裂ネットワーク・原位置試験（原位置トレーサー試験に対する概念モデルの不確実性解析）	5-26
3-4) 亀裂を有する堆積軟岩の水理特性	5-33
4) 堆積軟岩の不均質性評価手法の研究	5-38
5.2.2 地下水・間隙水水質形成モデルの高度化	5-43
5.2.3 現象論的核種移行モデルの開発	5-47
1) ガラスの長期溶解挙動及び核種の溶解現象に関する研究	5-47
2) 核種の収着・拡散現象に関する研究	5-50
5.2.4 コロイド等の影響評価モデルの開発	5-56
1) コロイドの影響評価モデルの開発	5-56
2) 天然有機物・微生物の影響評価モデルの開発	5-59
2-1) 天然有機物の影響評価モデルの開発	5-59
2-2) 核種移行評価モデルにおける微生物の取扱いに関する検討	5-61
5.2.5 生物圏評価モデル	5-63
5.2.6 天然現象影響評価モデル	5-66
5.3 安全評価手法の整備・高度化	5-70
5.3.1 シナリオ等の安全評価基盤	5-70
1) 安全評価の基本事項の検討	5-70
2) シナリオ開発技術の高度化	5-74
5.3.2 不確実性評価技術	5-76
5.3.3 技術情報統合システム開発の現状	5-81
5.4 安全評価手法の適用性確認	5-84
6. おわりに	6-1
付録 A 平成 15 年度の業務実施体制および各研究開発課題の実施担当組織	
付録 B 平成 15 年度の主な業務実績	
付録 C 国内外の関係機関との研究協力体制と平成 15 年度の協力状況	
付録 D 公開文献リスト(平成 15 年度)	

－ 表目次 －

2. 研究開発計画と成果の概要

表 2. 2. 1-1 4つの課題項目とプロジェクト	2-6
表 2. 2. 1-2 地質環境のモデル化の目標とスケール	2-8
表 2. 2. 1-3 MIZ-1 号孔の調査計画における地質・地質構造の予測深度と実際の分布深度	2-16
表 2. 2. 1-4 解析結果（主立坑の覆工コンクリートの発生応力度： N mm^{-2} ）	2-17

3. 深地層の科学的研究

表 3-1 4つの課題項目とプロジェクト	3-1
表 3. 1-1 地質環境のモデル化の目標とスケール	3-2
表 3. 1-2 反映先別の地質環境のモデル化の目標	3-2
表 3. 2. 1-1 広域地下水流動研究で対象とするスケールと地質環境特性の記述要素	3-5
表 3. 2. 2-1 データ取得仕様一覧	3-8
表 3. 2. 2-2 東濃地域の岩石中の希ガス量	3-20
表 3. 2. 2-3 東濃地域の岩石の希ガス同位体比	3-20
表 3. 3. 1-1 超深地層研究所計画で対象とするスケールと地質環境特性の記述要素	3-27
表 3. 3. 2-1 MIZ-1 号孔の調査計画における地質・地質構造の予測深度と実際の分布深度	3-31
表 3. 3. 2-2 研究用地およびその周辺における岩石コアの室内試験結果	3-34
表 3. 3. 2-3 水理試験の結果	3-39
表 3. 3. 2-4 観測値とモデル予測値の比較	3-44
表 3. 3. 2-5 逆解析結果のまとめ	3-49
表 3. 3. 2-6 解析用の入力物性値	3-57
表 3. 3. 2-7 解析結果（主立坑の覆工コンクリートの発生応力度： N mm^{-2} ）	3-58
表 3. 3. 3-1 第2段階前半での調査内容	3-67
表 3. 4. 2-1 稚内層・声問層・勇知層の岩石学的特徴	3-77
表 3. 4. 2-2 初期応力測定結果	3-83
表 3. 4. 2-3 気象観測機器一覧	3-88
表 3. 4. 2-4 流域特性一覧	3-88
表 3. 4. 2-5 蒸発散量測定手法の検討結果	3-88
表 3. 4. 2-6 岩盤の物理性状・地質環境の特徴	3-100
表 3. 4. 2-7 立坑の諸元	3-100
表 3. 4. 2-8 水平坑道の諸元	3-101
表 3. 4. 2-9 立坑掘削工法の比較検討項目	3-101
表 3. 4. 2-10 地山区分および岩盤物性値	3-102
表 3. 4. 2-11 覆工コンクリートの許容圧縮応力度	3-102

表 3.4.2-12 吹付けコンクリートの許容圧縮応力度	3-102
表 3.4.2-13 鋼製支保工（鋼材）の許容引張応力度	3-102
表 3.4.2-14 挙動予測解析結果・標準支保パターン一覧表（アクセス立坑）	3-103
表 3.4.2-15 挙動予測解析結果・標準支保パターン一覧表（水平坑道：側圧係数 1.2）	3-103
表 3.4.2-16 防爆対象設備一覧表	3-104
表 3.4.2-17 地震記録の最大振幅比較	3-110
表 3.4.2-18 調査概要	3-115
表 3.4.2-19 確認された重要種	3-116
表 3.6.2-1 「水－岩石－微生物」実験に用いた各試料の概要	3-139

4. 処分技術の信頼性向上

表 4.1.3-1 計測技術に関する調査対象項目と調査技術	4-14
表 4.2.1-1 評価モデルに用いるパラメータ	4-17
表 4.2.1-2 検討した地圧測定事例	4-22
表 4.2.1-3 三軸圧縮試験結果（平均値）	4-23
表 4.2.1-4 岩盤物性	4-23
表 4.2.1-5 初期応力	4-23
表 4.2.2-1 国際共同研究 DECOVALEX Ⅲの Task 3 BMT1 に参加した機関および各機関が使用した解析コード	4-35
表 4.2.2-2 国際共同研究 DECOVALEX Ⅲの Task 3 BMT1B の検討結果の総括（連成解析結果と非連成解析結果の比較）	4-36
表 4.2.2-3 「第 2 次取りまとめ」と事例解析結果の比較	4-39
表 4.2.4-1 地下式横穴墳土壌の成分	4-49
表 4.3.1-1 試験条件	4-53
表 4.3.3-1 試験項目と水質条件の整理	4-57
表 4.3.3-2 試験体仕様	4-57
表 4.4-1 人工バリア設計に必要な地質環境データ	4-60

5. 安全評価手法の高度化

表 5.1.1-1 溶解度試験から得られた Np(IV) ヒドロキソ炭酸錯体の安定度定数 $\beta_{n,m}^0$	5-2
表 5.1.1-2 Np(IV) 水和酸化物の溶解度積	5-3
表 5.2.1-1 透水量係数の不均質場とパラメータ	5-28
表 5.2.1-2 決定論的構造の透水量係数と構造内の微視的構造	5-30
表 5.2.1-3 感度解析ケース	5-31
表 5.2.1-4 室内試験内容	5-33
表 5.2.1-5 インタクト試料透水試験結果一覧	5-34

表 5. 2. 1-6 拡散試験結果一覧	5-35
表 5. 2. 1-7 亀裂試料透水試験結果一覧	5-35
表 5. 2. 1-8 トレーサー試験解析結果一覧	5-36
表 5. 2. 1-9 珪藻含有量と孔径中央値の関係	5-39
表 5. 2. 1-10 堆積物種類と堆積様式	5-40
表 5. 2. 2-1 HDB-1, HDB-3 および HDB-6 孔の実測地下水データを基に予察的に推定された研究所設置地区での深部地下水組成幅	5-44
表 5. 2. 2-2 圧縮ベントナイトの深さ方向における間隙水 pH の測定結果	5-45
表 5. 2. 4-1 微生物影響評価モデルの考え方	5-61
表 5. 2. 5-1 パラメータ設定状況の整理の観点	5-64
表 5. 4-1 モデル化の対象とした地質・地質構造	5-86
表 5. 4-2 モデル主要パラメータ値（地表堆積岩）	5-86
表 5. 4-3 モデル主要パラメータ値（土岐花崗岩）	5-86
表 5. 4-4 モデル容量と計算時間の比較（1 ケース当たり）	5-86
表 5. 4-5 設定した透水係数	5-87
表 5. 4-6 逆解析による透水係数推定結果	5-87

－ 図目次 －

2. 研究開発計画と成果の概要

図 2. 1-1 原子力長期計画などに基づく事業段階における研究開発の役割	2-1
図 2. 1-2 2つの目標に向けた研究開発課題	2-2
図 2. 1-3 サイクル機構の研究開発施設	2-2
図 2. 1-4 深地層研究施設計画の各段階における地層処分技術の適用性確認	2-3
図 2. 1-5 地上からの調査研究段階における事業所/分野間の連携のイメージ	2-4
図 2. 2. 1-1 調査研究の繰り返しアプローチ	2-7
図 2. 2. 1-2 統合化データフローのイメージ	2-8
図 2. 2. 1-3 東濃地域の地質概要	2-8
図 2. 2. 1-4 地質構造の概念モデル（断面図）	2-9
図 2. 2. 1-5 ローカルスケールにおける割れ目とリニアメントの長さ別頻度分布	2-9
図 2. 2. 1-6 調査測線図	2-10
図 2. 2. 1-7 測線（Line）Aにおける地質構造解釈断面図	2-10
図 2. 2. 1-8 地下水流動解析結果（水頭分布）	2-10
図 2. 2. 1-9 ボーリング孔での間隙水圧分布	2-10
図 2. 2. 1-10 多変量解析（主成分分析）による地下水の水質分析	2-11
図 2. 2. 1-11 M3 解析手法に基づく地下水混合割合の定量的解析	2-11
図 2. 2. 1-12 試行の流れ	2-11
図 2. 2. 1-13 地下水移行経路の不確実性の例	2-12
図 2. 2. 1-14 研究の実施場所	2-13
図 2. 2. 1-15 研究坑道レイアウトと建設工程のイメージ	2-13
図 2. 2. 1-16 研究用地における第1段階の調査研究の進め方	2-13
図 2. 2. 1-17 サイトスケールモデル化領域と地質構造モデル（ステップ1）	2-14
図 2. 2. 1-18 サイトスケールの地質構造モデル（ステップ2）	2-14
図 2. 2. 1-19 地下水流動解析結果（水頭分布）	2-15
図 2. 2. 1-20 研究所用地周辺の岩盤力学概念モデル	2-15
図 2. 2. 1-21 MIZ-1 号孔のレイアウト	2-15
図 2. 2. 1-22 地山評価のフィードバックフロー案	2-16
図 2. 2. 1-23 一次元成層地盤解析結果の比較	2-17
図 2. 2. 1-24 平面ひずみ解析結果の一例（立坑周辺岩盤のせん断ひずみ分布；主立坑 GL-150m）	2-17
図 2. 2. 1-25 鳴子火山下の地下 35km までの比抵抗構造	2-18
図 2. 2. 1-26 断層変位を考慮した地形シミュレーションの例	2-18
図 2. 2. 1-27 「水－岩石－微生物」反応試験の結果	2-19
図 2. 2. 1-28 ボーリング孔位置とトモグラフィー解析結果	2-20

図 2. 2. 1-29 研究所設置地区	2-20
図 2. 2. 1-30 物理探査 (AMT 法)	2-21
図 2. 2. 1-31 透水係数の深度分布	2-21
図 2. 2. 1-32 地質構造モデル更新の例	2-21
図 2. 2. 1-33 簡易ボーリングにおけるメタン濃度	2-21
図 2. 2. 1-34 幌延町付近での観測機器の設置位置	2-22
図 2. 2. 1-35 北海道北部地の十勝沖地震前後における位置の変化	2-22
図 2. 2. 1-36 塑性領域および最大せん断ひずみ分布	2-22
図 2. 2. 2-1 模擬腐食生成物中 3 価鉄/2 価鉄比と炭素鋼の平均腐食速度の関係	2-25
図 2. 2. 2-2 模擬腐食生成物中 3 価鉄/2 価鉄比と水素発生反応の寄与率の関係	2-25
図 2. 2. 2-3 純銅の平均腐食深さと孔食係数の関係	2-25
図 2. 2. 2-4 イオン強度と固有透過度の関係	2-26
図 2. 2. 2-5 長期圧密試験結果	2-27
図 2. 2. 2-6 変位の経時変化	2-27
図 2. 2. 2-7 侵入距離と乾燥密度分布の関係	2-28
図 2. 2. 2-8 実験結果と解析結果の比較 (固相拡散係数見直し後における評価)	2-28
図 2. 2. 2-9 ニアフィールド連成挙動の事例解析結果	2-29
図 2. 2. 2-10 CT 値分布	2-29
図 2. 2. 2-11 Kozeny-Garman モデルを付加した TOUGH2 コードによるシミュレーション例	2-29
図 2. 2. 2-12 容器に作用する土圧増分とせん断変位	2-30
図 2. 2. 2-13 短甲片の外観と X 線 CT 画像	2-30
図 2. 2. 2-14 ヒータおよび坑道内の温度	2-31
図 2. 2. 2-15 粉体浸漬における HFSC の pH 挙動	2-31
図 2. 2. 2-16 一軸圧縮強度とイオン強度の関係	2-31
図 2. 2. 2-17 処分孔が無支保の場合の解析結果	2-32
図 2. 2. 3-1 高アルカリ性水溶液中における Np(IV) 溶解度の全炭酸濃度依存性	2-35
図 2. 2. 3-2 サイクル機構 熱力学・収着データベースホームページ	2-35
図 2. 2. 3-3 種々の水溶液における砂岩に対する Cs の分配係数 (K_d)	2-36
図 2. 2. 3-4 入れ子式モデル概念図	2-36
図 2. 2. 3-5 亀裂を有する試料に対する定流量透水試験から得られた封圧と透水量係数の関係	2-37
図 2. 2. 3-6 透水量係数と物質移行開口幅	2-37
図 2. 2. 3-7 K_2CO_3 溶液中における $\text{NpO}_2(\text{am})$, $(\text{U}_{0.95}\text{Np}_{0.05})\text{O}_2(\text{am})$, $(\text{U}_{0.05}\text{Np}_{0.95})\text{O}_2(\text{am})$ の実験結果と理想的な固溶体を仮定した計算結果との比較	2-38
図 2. 2. 3-8 Ba をトレーサーとして用いた炭酸塩との共沈試験結果	2-38
図 2. 2. 3-9 CO_3^{2-} , Cl^- , I^- の凝灰岩に対する De の NaNO_3 濃度依存性	2-39
図 2. 2. 3-10 ベントナイトコロイド共存系での Cs の移行に関する実験と解析の比較	2-39

図 2.2.3-11 パラメータの現在の設定状況の整理結果	2-40
図 2.2.3-12 天然現象影響評価の作業手順	2-40
図 2.2.3-13 決定木分析で対象とした総線量の最大値のカテゴリ化の例	2-41
図 2.2.3-14 総線量の最大値のばらつきを特徴付けるパラメータとその定量的条件についての決定木分析の結果例	2-41
図 2.2.3-15 技術情報統合システムの主要な特徴（概念図）	2-42

3. 深地層の科学研究

図 3.1-1 調査研究の繰り返しアプローチ	3-1
図 3.1-2 スケール概念	3-2
図 3.1-3 研究目標/反映先と系統的なデータの流れを記述・整理したフローの一例ー超深地層研究所計画の統合化データフロー（地質・地質構造）ー	3-3
図 3.2.1-1 広域地下水流動研究の研究実施領域	3-4
図 3.2.1-2 東濃地域の地質概要	3-4
図 3.2.2-1 ローカルスケールにおける割れ目とリニアメントの長さ別頻度分布	3-7
図 3.2.2-2 調査測線図	3-8
図 3.2.2-3 各測線における地質構造解釈断面図	3-8
図 3.2.2-4 DH-14 号孔周辺に分布するリニアメントおよび次月断層の分布	3-9
図 3.2.2-5 DH-14 号孔の地質柱状図	3-10
図 3.2.2-6 DH-15 号孔周辺の推定断層	3-10
図 3.2.2-7 DH-15 号孔の地質柱状図	3-10
図 3.2.2-8 高密度電気探査測線およびボーリング位置図	3-11
図 3.2.2-9 高密度電気探査解析結果	3-11
図 3.2.2-10 高密度電気探査再解析結果	3-11
図 3.2.2-11 電気検層の比抵抗値を拘束条件とすることによる解析結果の改善	3-12
図 3.2.2-12 地質構造考察図	3-12
図 3.2.2-13 DH-14 号孔における流体検層結果	3-14
図 3.2.2-14 DH-15 号孔における流体検層および水理試験結果（深度 51～240m）	3-15
図 3.2.2-15 モデル化・解析領域とボーリング孔位置	3-15
図 3.2.2-16 地下水流動解析結果（水頭分布）	3-15
図 3.2.2-17 間隙水圧測定結果	3-16
図 3.2.2-18 水頭分布と水質分布の比較	3-16
図 3.2.2-19 涵養量の違いによる地下水温分布の違い（研究所用地を通過する南北鉛直断面）	3-16
図 3.2.2-20 日吉川流域ならびに河川流量観測位置	3-17
図 3.2.2-21 日吉川河川流量と降水量	3-17
図 3.2.2-22 多変量解析（主成分分析）による地下水の水質分析	3-19

図 3. 2. 2-23 M3 解析手法に基づく地下水混合割合の定量的解析	3-20
図 3. 2. 2-24 東濃地域の地下水中の希ガス同位体組成と水質の相関	3-21
図 3. 2. 2-25 地下水中の塩素同位体比と塩素濃度の相関	3-21
図 3. 2. 3-1 ファジー地球統計学を利用した地質環境モデルに関する不確実性解析の考え方	3-23
図 3. 2. 3-2 対象領域	3-24
図 3. 2. 3-3 解析の流れ	3-24
図 3. 2. 3-4 断層の不確実性	3-24
図 3. 2. 3-5 透水係数の不確実性	3-24
図 3. 2. 3-6 地下水移行経路の不確実性の例	3-25
図 3. 3. 1-1 研究の実施場所	3-26
図 3. 3. 1-2 研究坑道レイアウトと建設工程のイメージ	3-26
図 3. 3. 1-3 研究所用地周辺の地質	3-27
図 3. 3. 1-4 地質構造の概念モデル(断面図)	3-27
図 3. 3. 1-5 調査研究の繰り返しアプローチ	3-28
図 3. 3. 1-6 研究所用地における地表からの調査研究の進め方	3-28
図 3. 3. 2-1 研究所用地における MIZ-1 号孔のレイアウト	3-30
図 3. 3. 2-2 既存の反射断面記録と再処理・解析結果との対比	3-31
図 3. 3. 2-3 研究所用地近傍の岩石コアを用いた DSCA 法による室内試験結果	3-33
図 3. 3. 2-4 研究所用地周辺の岩盤力学概念モデル	3-34
図 3. 3. 2-5 研究所用地およびその近傍における岩石コアの室内試験結果	3-34
図 3. 3. 2-6 坑道天盤の岩盤内変位分布 (MBC 解析、新規き裂は壁面に平行に発生)	3-35
図 3. 3. 2-7 坑道周辺岩盤の透水係数変化の分布 (クラックテンソル・仮想割れ目モデル解析)	3-35
図 3. 3. 2-8 破壊進行に伴う P 波速度分布の変化 (ステレオネットは下半球投影)	3-36
図 3. 3. 2-9 ステップ 1 での地質構造モデル	3-37
図 3. 3. 2-10 地下水流動解析結果 (水頭分布)	3-37
図 3. 3. 2-11 モデルに取込んだ研究坑道の要素分割	3-38
図 3. 3. 2-12 三次元要素分割	3-38
図 3. 3. 2-13 立坑への湧水量の経時変化	3-38
図 3. 3. 2-14 電気伝導度検層の結果 (15 リットル/分での揚水)	3-39
図 3. 3. 2-15 電気伝導度検層と水理試験結果	3-39
図 3. 3. 2-16 北北西走向の断層とボーリング孔位置	3-40
図 3. 3. 2-17 十勝沖地震前後の水圧変化	3-40
図 3. 3. 2-18 採水作業に伴う水圧応答	3-40
図 3. 3. 2-19 採水作業に伴う水圧応答	3-41
図 3. 3. 2-20 研究所用地における地下水の化学組成	3-42
図 3. 3. 2-21 塩化物イオン濃度と各化学成分濃度の相関	3-43

図 3.3.2-22 各鉱物の地下水に対する飽和指数	3-43
図 3.3.2-23 研究所用地における地下水の推定塩素濃度	3-44
図 3.3.2-24 逆解析の結果を入力値とした順解析の結果（安全率の分布）	3-49
図 3.3.2-25 地山評価のフィードバックフロー案	3-49
図 3.3.2-26 突発湧水に対する基本的な考え方	3-50
図 3.3.2-27 グラウト注入の実施フロー	3-51
図 3.3.2-28 グラウト注入孔配置例	3-51
図 3.3.2-29 主立坑および換気立坑における亀裂出現想定深度	3-52
図 3.3.2-30 統計的グリーン関数法概念	3-53
図 3.3.2-31 想定新東海地震の断層モデル	3-53
図 3.3.2-32 地震動の作成例（NS 成分）	3-53
図 3.3.2-33 一次元成層地盤解析（SHAKE）結果比較	3-53
図 3.3.2-34 地震動評価フロー	3-53
図 3.3.2-35 応答加速度の比較	3-54
図 3.3.2-36 水平方向に対する鉛直方向加速度の比率	3-54
図 3.3.2-37 策定した地震動の上下／水平応答スペクトル比：GL-1, 500m	3-54
図 3.3.2-38 抗内情報管理システムの構成とデータの流れ	3-55
図 3.3.2-39 リスクの相関関係	3-56
図 3.3.2-40 イベントツリーによる評価例（突発湧水＋人的災害の例）	3-56
図 3.3.2-41 解析用に作成した地質断面図	3-57
図 3.3.2-42 軸対象解析の結果の一例（岩盤内変位の分布；主立坑 GL-75m, 側圧比 1:1.2）	3-58
図 3.3.2-43 平面ひずみ解析結果の一例（立坑周辺岩盤のせん断ひずみ分布；主立坑 GL-150m）	3-58
図 3.3.2-44 地上施設の計画図	3-58
図 3.3.2-45 地上からの調査予測研究段階の統合化データフロー（水理地質）	3-61
図 3.3.2-46 地質環境モデルの作成・更新状況を例にした繰り返しアプローチの現状－超深地層研究所計画の第1段階(平成15年度末時点)－	3-62
図 3.3.2-47 地質構造モデル鉛直断面図（主立坑および換気立坑を通過する鉛直断面）	3-63
図 3.3.2-48 ステップ1での地下水流動解析の例－パーティクルトラッキング－	3-64
図 3.3.3-1 研究坑道における調査レイアウト	3-66
図 3.3.3-2 立坑坑口上部工の状況（施工中）	3-70
図 3.3.3-3 立坑坑口上部工の状況（完成）	3-70
図 3.3.3-4 研究坑道掘削工事の工程（～H21 末）	3-70
図 3.4.1-1 地層科学研究（幌延深地層研究計画）の成果のイメージ	3-71
図 3.4.1-2 研究所設置対象区域とボーリング調査位置	3-72
図 3.4.1-3 研究所設置地区	3-72
図 3.4.1-4 研究所用地	3-72

図 3. 4. 1-5 調査研究実施位置	3-72
図 3. 4. 2-1 地表地質調査ルート	3-74
図 3. 4. 2-2 声問層と勇知層の地層境界付近における岩相変化	3-75
図 3. 4. 2-3 北進地区の地表浅所のメタン濃度	3-75
図 3. 4. 2-4 南沢で認められる油徴	3-75
図 3. 4. 2-5 声問層地表部の分析・測定結果	3-75
図 3. 4. 2-6 二次元解析比抵抗平面図（標高－100m）	3-76
図 3. 4. 2-7 二次元解析比抵抗断面図	3-76
図 3. 4. 2-8 残差重力異常図	3-77
図 3. 4. 2-9 重力フォワード・モデリング結果	3-77
図 3. 4. 2-10 観測された重力異常を説明できる地質モデル例	3-77
図 3. 4. 2-11 地質柱状図	3-78
図 3. 4. 2-12 割れ目表面の特徴	3-79
図 3. 4. 2-13 反射法地震探査の再解釈結果	3-79
図 3. 4. 2-14 ボーリング孔近傍における割れ目帯の推定分布図(HDB-1 孔の例)	3-79
図 3. 4. 2-15 反射法地震探査データとボーリングデータから比較的明瞭に把握できる割れ目帯の分布推定図	3-80
図 3. 4. 2-16 室内物理・力学試験結果（HDB-6, 7, 8 孔）	3-82
図 3. 4. 2-17 水圧破碎時の測定配置	3-83
図 3. 4. 2-18 水平面内最大・最小主応力および最大主応力方向の深度変化（HDB-1, 3, 6 孔）	3-83
図 3. 4. 2-19 孔壁画像検層結果（HDB-6 孔）	3-83
図 3. 4. 2-20 孔内載荷試験結果（HDB-6 孔）	3-84
図 3. 4. 2-21 原位置およびコアから得られた密度および弾性波速度の比較（HDB-6, 8 孔）	3-84
図 3. 4. 2-22 室内物理・力学試験結果（HDB-6, 7, 8 孔）	3-85
図 3. 4. 2-23 平成 15 年度ボーリング調査までのデータを考慮した岩盤力学的概念モデル	3-86
図 3. 4. 2-24 河川流量観測および気象観測結果（例）	3-87
図 3. 4. 2-25 気象観測所概念図	3-88
図 3. 4. 2-26 樹冠上蒸発散量測定候補エリア	3-89
図 3. 4. 2-27 HDB-6 孔での検層・水理試験結果	3-89
図 3. 4. 2-28 HDB-7 孔での検層・水理試験結果	3-89
図 3. 4. 2-29 HDB-8 孔での検層・水理試験結果	3-90
図 3. 4. 2-30 再設定したモデル化領域	3-90
図 3. 4. 2-31 基本ケースでの各標高の等ポテンシャル線図	3-91
図 3. 4. 2-32 全水頭分布の解析結果と実測値の比較	3-91
図 3. 4. 2-33 塩化物イオン濃度分布の解析結果と実測値の比較	3-91
図 3. 4. 2-34 原位置透水試験結果	3-92

図 3. 4. 2-35 室内透水試験結果	3-92
図 3. 4. 2-36 HDB-3, 4, 5 孔で採水された地下水とコアから抽出した間隙水の水質分布	3-93
図 3. 4. 2-37 ボーリング調査中に採水された地下水とコアから抽出した間隙水の酸素・水素同位体比	3-94
図 3. 4. 2-38 各ボーリング孔の酸素・水素同位体比の深度プロファイル	3-94
図 3. 4. 2-39 掘削水による侵入の影響	3-94
図 3. 4. 2-40 Cl^- 濃度の深度分布	3-95
図 3. 4. 2-41 観測区間 (HDB-1, 2 孔)	3-96
図 3. 4. 2-42 観測区間 (HDB-3, 4 孔)	3-96
図 3. 4. 2-43 SPMP システム概念図	3-97
図 3. 4. 2-44 連続揚水中のモニタリング結果	3-97
図 3. 4. 2-45 地下水水質分析結果	3-98
図 3. 4. 2-46 遠隔監視システムの例	3-99
図 3. 4. 2-47 地下施設のイメージ	3-100
図 3. 4. 2-48 解析上の掘削手順 (立坑・二重支保の場合)	3-102
図 3. 4. 2-49 塑性領域および最大せん断ひずみ分布	3-103
図 3. 4. 2-50 標準支保パターンの例	3-104
図 3. 4. 2-51 火災時通気網解析 (通気制御実施後) の例	3-105
図 3. 4. 2-52 研究目標/反映先と系統的なデータの流れを記述・整理したフローの一例	3-106
図 3. 4. 2-53 地質環境モデル更新の例 (地質構造モデル)	3-107
図 3. 4. 2-54 幌延町付近に設置された地質環境の長期安定性研究に関わる観測点位置図	3-108
図 3. 4. 2-55 上幌延観測点を中心とする半径 100km 北の円内で発生した地震の震源分布	3-109
図 3. 4. 2-56 幌延町内で発生した地震の震源分布	3-109
図 3. 4. 2-57 上幌延観測点において観測された地震の観測記録	3-109
図 3. 4. 2-58 GPS 観測網	3-110
図 3. 4. 2-59 HDB-1 観測点と GEONET 観測点との基線長変化図	3-110
図 3. 4. 2-60 北海道北部地域の十勝沖地震前後における位置座標の変化	3-110
図 3. 4. 2-61 HDB-1 孔観測点の傾斜計データ	3-111
図 3. 4. 2-62 HDB-1 孔における地下水水圧モニタリングデータ	3-111
図 3. 4. 2-63 見掛け抵抗変化図 (周波数 0. 56Hz)	3-112
図 3. 4. 2-64 研究所設置地区の段丘面の分布と構成層	3-113
図 3. 4. 2-65 反射法地震探査断面の解釈図	3-113
図 3. 4. 2-66 幌延町市街地付近の更別層の露頭 (大曲断層の地表推定位置から西に約 2km の地点)	3-114
図 3. 4. 2-67 調査位置図	3-115
図 3. 4. 3-1 第 2 段階調査試験レイアウトの例	3-117
図 3. 5. 2-1 地形変化シミュレーションの結果	3-122
図 3. 5. 2-2 MT 法調査の結果	3-124

図 3.5.2-3 四国地方における $^3\text{He}/^4\text{He}$ 分布	3-124
図 3.5.2-4 実際の坑井温度プロファイルによる解析結果	3-125
図 3.5.2-5 岩脈モデルによる確率分布（富士山の例）	3-126
図 3.5.2-6 鳥取県西部地震震源域の活断層・推定地震性線状地形分布と単成火山群の分布	3-128
図 3.5.2-7 中国地方の活断層・推定地震性線状地形分布と火山岩の分布	3-129
図 3.5.2-8 活断層周辺の地殻変動速度	3-130
図 3.5.2-9 「坑井温度データベース」の表示例	3-132
図 3.5.2-10 長期観測結果の例	3-133
図 3.5.2-11 跡津川断層帯に沿う微小地震活動	3-136
図 3.6.1-1 東濃鉱山における調査試験研究の実施領域	3-137
図 3.6.2-1 「水－岩石－微生物」反応試験の結果	3-139
図 3.6.2-2 坑道周辺岩盤の変位速度	3-141
図 3.6.2-3 坑道周辺岩盤の変位計測結果と実測をもとにした大久保モデルによる解析結果との比較	3-141
図 3.6.2-4 崩壊岩塊の累計体積	3-142
図 3.6.2-5 地表レーダー計測結果	3-143
図 3.6.2-6 ボーリング孔位置とトモグラフィ解析結果	3-143
図 3.6.2-7 間隙水圧計測結果	3-144

4. 処分技術の信頼性向上

図 4.1.1-1 還元性雰囲気下、緩衝材中における炭素鋼の平均腐食深さの経時変化	4-1
図 4.1.1-2 試験後試験片表面の SEM 観察結果	4-2
図 4.1.1-3 模擬腐食生成物中 3 価鉄／2 価鉄比と炭素鋼の平均腐食速度の関係	4-2
図 4.1.1-4 模擬腐食生成物中 3 価鉄／2 価鉄比と水素発生反応の寄与率の関係	4-3
図 4.1.1-5 成長皮膜厚さから算出したチタンの腐食速度の経時変化	4-5
図 4.1.1-6 水素チャージ後の純チタン試料の断面ミクロ組織	4-6
図 4.1.1-7 炭酸水素イオンと塩化物イオンの共存下における純銅の平均腐食速度	4-6
図 4.1.1-8 ベントナイト中における純銅の平均腐食速度の固液比依存性	4-7
図 4.1.1-9 大気雰囲気における純銅の最大腐食深さ（実機最大値の推定値）の経時変化	4-7
図 4.1.1-10 純銅の平均腐食深さと孔食係数の関係	4-7
図 4.1.2-1 有効粘土密度と膨潤応力の関係	4-9
図 4.1.2-2 スケール効果による膨潤応力および供試体成形圧	4-10
図 4.1.2-3 スケール効果による膨潤応力および供試体成形圧（正規化）	4-10
図 4.1.2-4 有効粘土密度と固有透過度の関係	4-10
図 4.1.2-5 イオン強度と固有透過度の関係	4-10
図 4.1.2-6 熱伝導率の測定結果（ケイ砂混合体）	4-11
図 4.1.2-7 熱拡散率の測定結果（ケイ砂混合体）	4-11

図 4. 1. 2-8 比熱の実験値と予測値の比較（ベントナイト単体）	4-11
図 4. 1. 2-9 比熱の実験値と予測値の比較（ケイ砂混合体）	4-12
図 4. 1. 2-10 データファイル取り扱い方法	4-13
図 4. 1. 3-1 検討の手順	4-14
図 4. 1. 3-2 膨潤試験装置の概略図	4-15
図 4. 1. 3-3 密度分布の測定位置	4-15
図 4. 1. 3-4 横置き方式での供試体の断面 D, E における密度分布の経時変化	4-15
図 4. 1. 3-5 横置き方式での模擬廃棄体の中心位置の経時変化	4-16
図 4. 2. 1-1 圧密試験に基づく膨潤指数の設定	4-17
図 4. 2. 1-2 解析より得られるオーバーパック沈下	4-18
図 4. 2. 1-3 解析より得られるオーバーパックに作用する土圧	4-18
図 4. 2. 1-4 CU 試験に対する改良モデルと従来型モデルの解析結果	4-19
図 4. 2. 1-5 模型試験用試験体と載荷部	4-19
図 4. 2. 1-6 ピストン貫入時の載荷応力と変位の関係	4-19
図 4. 2. 1-7 正規化応力と正規化変位の関係	4-20
図 4. 2. 1-8 長期圧密試験結果	4-20
図 4. 2. 1-9 短期から長期への検証方法概念図	4-21
図 4. 2. 1-10 主応力線上に描いた地圧測定例	4-22
図 4. 2. 1-11 応力-ひずみ曲線	4-22
図 4. 2. 1-12 クリープひずみ-時間曲線	4-23
図 4. 2. 1-13 クリープひずみ速度-時間曲線	4-23
図 4. 2. 1-14 2次元長期解析モデルおよび水平断面位置	4-23
図 4. 2. 1-15 変位の経時変化	4-24
図 4. 2. 1-16 剛性低下領域の経時変化	4-24
図 4. 2. 1-17 主応力比の経時変化	4-24
図 4. 2. 1-18 最大主応力比と剛性低下領域境界の経時変化	4-24
図 4. 2. 1-19 経過時間と侵入距離の関係	4-26
図 4. 2. 1-20 経過時間と侵入距離の関係	4-26
図 4. 2. 1-21 X線 CT による断面画像の一例	4-27
図 4. 2. 1-22 侵入距離と乾燥密度分布の関係	4-27
図 4. 2. 1-23 実験結果と解析結果の比較	4-28
図 4. 2. 1-24 粘度測定結果の外挿	4-28
図 4. 2. 1-25 粘性係数の推定値	4-28
図 4. 2. 1-26 粘性係数の再設定	4-28
図 4. 2. 1-27 実験結果と解析結果の比較（固相拡散係数見直し後における評価）	4-29
図 4. 2. 1-28 解析結果の一例	4-29

図 4. 2. 1-29 経過時間とコロイド濃度の関係	4-29
図 4. 2. 2-1 ニアフィールドの熱-水-応力-化学連成挙動の模式図	4-34
図 4. 2. 2-2 連成モデルの検証・確認に関する取り組み	4-34
図 4. 2. 2-3 国際共同研究 DECOVALEX Ⅲの Task 3 BMT1A で実施された釜石粘土充填・熱負荷試験の連成解析結果の比較	4-35
図 4. 2. 2-4 連成試験設備 COUPLE の模式図	4-36
図 4. 2. 2-5 連成試験における試験体中の温度分布（試験開始後 90 日）	4-37
図 4. 2. 2-6 連成試験におけるモルタル反応溶液の pH の経時変化	4-37
図 4. 2. 2-7 連成試験における緩衝材の含水比および pH の経時変化	4-37
図 4. 2. 2-8 連成試験終了後の緩衝材サンプリング試料の pH の計測結果	4-38
図 4. 2. 2-9 ニアフィールド連成挙動の事例解析条件	4-38
図 4. 2. 2-10 ニアフィールド連成挙動の事例解析結果	4-39
図 4. 2. 3-1 ガス移行試験装置の概要	4-41
図 4. 2. 3-2 圧力及びガス透気流量の経時変化	4-41
図 4. 2. 3-3 圧力とガス有効浸透率の経時変化	4-42
図 4. 2. 3-4 有効粘土密度と有効浸透率の関係	4-42
図 4. 2. 3-5 X 線 CT 装置の概観	4-42
図 4. 2. 3-6 試料のスキャン画像	4-42
図 4. 2. 3-7 CT 値分布図	4-43
図 4. 2. 3-8 MX-80 ベントナイトに対する GAMBIT-GWS モデルの適用例	4-44
図 4. 2. 3-9 Kozeny-Carman モデルを付加した TOUGH2 コードによるシミュレーション例	4-44
図 4. 2. 3-10 気象庁マグニチュードと断層地表出現率	4-45
図 4. 2. 3-11 気象庁マグニチュード(M)と断層変位速度(U/τ)	4-45
図 4. 2. 3-12 模型（断層模擬）試験装置	4-46
図 4. 2. 3-13 容器に作用する土圧増分とせん断変位	4-46
図 4. 2. 3-14 解析による間隙水圧増分の分布	4-46
図 4. 2. 4-1 短甲片の外観と X 線 CT 画像	4-49
図 4. 3. 1-1 ヒータ及び坑道内の温度	4-50
図 4. 3. 1-2 坑道内の温度分布	4-50
図 4. 3. 1-3 コンクリートプラグを通過する湧水	4-51
図 4. 3. 1-4 粘土プラグを通過する湧水	4-51
図 4. 3. 1-5 蒸発散量測定試験結果	4-51
図 4. 3. 1-6 トレーサ解析の入力条件	4-52
図 4. 3. 1-7 メッシュの違いによる比濃度分布図（330 日後）	4-52
図 4. 3. 1-8 埋め戻し材の設置される坑道の時間変遷	4-52
図 4. 3. 1-9 試験装置概観図	4-52

図 4.3.1-10 有効粘土密度と隙間体積に対する充填体積の割合の関係	4-53
図 4.3.2-1 粉体浸漬における HFSC の pH 挙動	4-54
図 4.3.2-2 ブロック浸漬における HFSC の pH 挙動	4-55
図 4.3.2-3 HFSC のスランプフローの変動	4-55
図 4.3.3-1 試験に用いた幌延地下水の成分 (HDB-6) (GL-300m 付近)	4-57
図 4.3.3-2 一軸圧縮強度とイオン強度の関係	4-58
図 4.3.3-3 弾性係数とイオン強度の関係	4-58
図 4.3.3-4 圧密試験結果	4-58
図 4.4-1 見直しによる設計全体のフロー	4-59
図 4.4-2 オーバーパックの設計フロー	4-59
図 4.4-3 空洞安定解析のステップ	4-61
図 4.4-4 試験孔が無支保の場合の解析結果	4-61
図 4.4-5 試験孔の壁面変位	4-61
図 4.4-6 支保工の応力状態	4-61
5. 安全評価手法の高度化	
図 5.1.1-1 高アルカリ性水溶液中における Np(IV) 溶解度の全炭酸濃度依存性	5-1
図 5.1.1-2 Np(IV) 水和酸化物の溶解度	5-2
図 5.1.1-3 高アルカリ性水溶液中における U(IV) 溶解度	5-3
図 5.1.1-4 サイクル機構 熱力学・収着データベースホームページ	5-4
図 5.1.2-1 種々の水溶液における砂岩に対する Cs の分配係数 (K_d)	5-8
図 5.1.2-2 砂岩に対する Cs の分配係数 (K_d) の平衡 Cs 濃度 ($[Cs]_{eq.}$) 依存性 (pH: 約 8.5)	5-8
図 5.1.2-3 更新前, および更新後の収着データベースのヒストグラムの比較例	5-9
図 5.2.1-1 亀裂ネットワークモデルと等価不均質連続体モデルの入れ子式モデル概念図	5-11
図 5.2.1-2 連続体要素に含まれる亀裂の幾何情報から透水テンソルを求める手法の概念図	5-12
図 5.2.1-3 亀裂ネットワークモデルと連続体モデルの接合部概念図	5-12
図 5.2.1-4 MIU1~3 孔の鉛直分布模式図と推定地表境界線	5-13
図 5.2.1-5 各地層で異なる確率場としたときの透水場予測結果	5-14
図 5.2.1-6 任意点からの地下水流れの模式図	5-15
図 5.2.1-7 移行到達点の期待値および移行到達範囲を楕円形と仮定した予測範囲	5-15
図 5.2.1-8 確率有限要素法とモンテカルロ法による流速ベクトルおよびその分散の分布	5-16
図 5.2.1-9 特定移行経路における移行距離の不確実性評価の一事例	5-16
図 5.2.1-10 岩体研削のイメージ	5-18
図 5.2.1-11 研削による亀裂中央点座標データ	5-18
図 5.2.1-12 研削による亀裂開口幅分布データ	5-18
図 5.2.1-13 フラッシング機構を採用したトレーサー注入方法	5-19

図 5.2.1-14	トレーサー試験でのブレイクスルーカーブの一例	5-19
図 5.2.1-15	写真撮影によるトレーサー移行状況	5-20
図 5.2.1-16	接触式三次元測定器を用いた開口幅算出方法	5-20
図 5.2.1-17	質量流量の計算値と理論値の比較	5-22
図 5.2.1-18	質量流量の計算値と開口幅の関係	5-22
図 5.2.1-19	亀裂開口幅分布 (Case01)	5-23
図 5.2.1-20	+x 方向の流速ベクトル分布	5-23
図 5.2.1-21	+x 方向のトレーサ濃度分布 (注入濃度 50%到達時)	5-23
図 5.2.1-22	各開口幅 ($b_h \cdot b_t \cdot b_m$) と亀裂破面高さ標準偏差 σ_s の関係	5-24
図 5.2.1-23	各開口幅 ($b_h \cdot b_t \cdot b_m$) と亀裂開口幅標準偏差 σ_a の関係	5-24
図 5.2.1-24	Feature A の位置	5-27
図 5.2.1-25	Feature A を貫通する STT-1b トレーサー試験のボーリング孔配置	5-27
図 5.2.1-26	移行経路の概念モデル	5-27
図 5.2.1-27	キャリブレーションにより選択されたリアライゼーションでの Sr-85 の破過曲線	5-27
図 5.2.1-28	パラメータの異なるモデルの性能評価流速での挙動比較	5-28
図 5.2.1-29	タスク 6B2 の境界条件	5-28
図 5.2.1-30	ケース 1 の透水量係数の不均質場	5-29
図 5.2.1-31	ケース 2 の透水量係数の不均質場	5-29
図 5.2.1-32	ケース 3 の透水量係数の不均質場	5-29
図 5.2.1-33	ケース 4 の透水量係数の不均質場	5-29
図 5.2.1-34	Am-241 の性能評価条件下での破過曲線	5-29
図 5.2.1-35	タスク 6D の地質構造モデル (決定論的構造のみ表示)	5-30
図 5.2.1-36	タスク 6D の地質構造モデル (全亀裂および構造を表示)	5-30
図 5.2.1-37	TRUE ブロックスケール試験のレイアウト	5-30
図 5.2.1-38	断層 (Type 1) と節理 (Type 2) の微視的構造	5-31
図 5.2.1-39	感度解析の結果	5-31
図 5.2.1-40	トランジェントパルス法の測定原理	5-34
図 5.2.1-41	拡散試験結果 (採取深度 200m のインタクト試料)	5-34
図 5.2.1-42	実効拡散係数と有効空隙率の関係 (既往データとの比較)	5-35
図 5.2.1-43	亀裂試料での封圧と透水量係数の関係	5-35
図 5.2.1-44	トレーサー試験結果 (200m 試料, 封圧 0.8MPa)	5-36
図 5.2.1-45	分散長と試験スケールの関係	5-36
図 5.2.1-46	透水量係数と物質移行開口幅の関係	5-36
図 5.2.1-47	自然 γ 線検層結果と試料採取深度 (HDB-1 孔)	5-38
図 5.2.1-48	深度, 自然 γ 線量と空隙率の関係	5-38
図 5.2.1-49	蛍光 X 線全岩化学組成分析結果	5-39

図 5.2.1-50 細孔径分布累積曲線	5-39
図 5.2.1-51 堆積物と堆積様式概念図	5-40
図 5.2.1-52 圧密過程モデル概念図	5-40
図 5.2.1-53 基本ソフトウェアの出力情報の三次元表示例（砂質岩の分布）	5-41
図 5.2.1-54 基本ソフトウェアの出力情報の三次元表示例（透水係数の分布）	5-41
図 5.2.2-1 陽イオン交換サイトに収着しているイオン濃度分析結果	5-45
図 5.2.3-1 B および Si 浸出量に及ぼすベントナイト共存の影響	5-47
図 5.2.3-2 実験後ベントナイトからの Cs の脱離試験結果	5-47
図 5.2.3-3 K_2CO_3 溶液中における $NP0_2(am)$, $(U_{0.95}NP_{0.05})O_2(am)$, $(U_{0.05}NP_{0.95})O_2(am)$ の実験結果と理想的な固溶体を仮定した計算結果（直線）との比較	5-48
図 5.2.3-4 Ba をトレーサとして用いた炭酸塩との共沈試験結果	5-48
図 5.2.3-5 岩石中のヨウ素濃度分布（浸漬期間 50d）	5-51
図 5.2.3-6 I ⁻ のベントナイトに対する D_e および D_a におけるスメクタイト部分密度依存性	5-52
図 5.2.3-7 保持因子 α の $NaNO_3$ 濃度依存性	5-53
図 5.2.3-8 CO_3^{2-} , Cl^- , I^- の凝灰岩に対する D_e の溶液中 $NaNO_3$ 濃度依存性	5-53
図 5.2.4-1 ベントナイトコロイドに対する Cs の分配係数	5-56
図 5.2.4-2 ベントナイトコロイド共存系での Cs の移行に関する実験と解析の比較	5-57
図 5.2.4-3 グリムゼル原位置試験におけるコロイド非共存系での核種移行に関する解析結果の例	5-58
図 5.2.4-4 グリムゼル原位置試験におけるコロイド共存系での核種移行に関する解析結果の例	5-58
図 5.2.4-5 有機相及び無機相中に存在する Np の割合の時間変化	5-59
図 5.2.4-6 圧縮ベントナイトからのポリアクリル酸（分子量 10,000）の破過曲線	5-60
図 5.2.4-7 微生物への収着を考慮した岩盤中の Np-237 の移行率	5-62
図 5.2.5-1 感度解析の結果例 (Cs-135)	5-64
図 5.2.5-2 パラメータ設定状況の整理結果	5-64
図 5.2.6-1 天然現象影響評価の作業手順	5-66
図 5.2.6-2 レベル 1～2 の作業イメージ	5-68
図 5.3.1-1 段層的なマトリクスのイメージ	5-75
図 5.3.2-1 データが十分でない場合の分布設定手法	5-77
図 5.3.2-2 データが十分にある場合の分布設定手法	5-77
図 5.3.2-3 誘出法の手順	5-77
図 5.3.2-4 専門家が設定した各パーセンタイルにおける声問層 Cs の母岩 $Kd[m^3\ kg^{-1}]$	5-78
図 5.3.2-5 総線量の最大値に対する決定木分析のカテゴリ設定	5-79
図 5.3.2-6 決定木分析の分析結果の例（決定木）	5-79
図 5.3.2-7 決定木分析の分析結果の例（各カテゴリに属することを特徴付けるパラメータの定量的条件のまとめ）	5-79
図 5.3.3-1 問題点に対するアプローチとシステムで実現する機能の対応	5-81

図 5.3.3-2 3つの主要機能を中心とするシステムの特徴	5-81
図 5.3.3-3 技術的な情報を集約・統合する体系化の考え方	5-82
図 5.3.3-4 各研究要素に登録する研究成果とその関連情報	5-82
図 5.3.3-5 技術情報共有とコミュニケーション支援	5-83
図 5.4-1 解析対象領域	5-85
図 5.4-2 亀裂ネットワークモデル	5-85
図 5.4-3 等価不均質連続体モデル	5-85
図 5.4-4 入れ子式モデル	5-85
図 5.4-5 粒子追跡法解析結果例	5-85
図 5.4-6 各地層の分布	5-87
図 5.4-7 逆解析結果に基づく各ボーリング孔での全水頭分布	5-87

1. はじめに

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）が「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性―地層処分研究開発第2次取りまとめ―」（以下、「第2次取りまとめ」）を平成11年に公開してから、4年あまりが経過した。この間、平成12年の「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（以下、「最終処分法」）の制定、および処分事業の実施主体である原子力発電環境整備機構（以下、原環機構）の設立により、わが国の地層処分計画が事業段階へと進展し、平成14年12月には原環機構により「高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域」の公募が開始されている。また、原子力安全委員会からは、「高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第1次報告）」（平成12年公表、以下、「安全規制の基本的考え方」）、および「高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について」（平成14年公表）などが公開されている。

高レベル放射性廃棄物の地層処分（以下、地層処分）に関する研究開発を実施するにあたっては、関係機関の適切な役割分担のもとに、処分事業や安全規制の展開とも整合をとりつつ、双方の基盤となる技術や情報を整備していくことが求められる。平成12年11月に策定された「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」（以下、「原子力長期計画」）等によれば、サイクル機構には「深地層の研究施設、地層処分放射化学研究施設等を活用し、深地層の科学研究、実測データの着実な蓄積とモデル高度化による地層処分技術的信頼性向上と安全評価手法の高度化に向けた研究開発を着実に推進する」ことが求められている。このことを受け、サイクル機構では、「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の全体計画」（以下、「全体計画」）を策定した（平成13年12月）。この「全体計画」において、サイクル機構が進めるべき地層処分技術に関する研究開発は、「地層処分研究開発」とその基盤となる『深地層の科学研究』からなり、さらに「地層処分研究開発」は『処分技術的信頼性向上』と『安全評価手法の高度化』から構成されている。

地層処分事業は、国民各層の理解と信頼を得つつ進められるべきものであることから、成果等の

情報を積極的に発信するとともに、様々な議論の場を通じて、幅広い意見を採り入れつつ研究開発を展開していくことが重要である。このような観点から、サイクル機構では、とくに国や関係機関をはじめとする幅広い専門家の方々に成果の現状をご理解いただくことを目的として、平成13年度より地層処分技術に関する研究開発の成果を、年度ごとに報告書として取りまとめて公開してきた。本報告書は、「平成13年度報告」（平成14年6月公開）および「平成14年度報告」（平成15年6月公開）につづき、「全体計画」に沿って平成15年度の成果および進捗の概要を報告するものである。これら年度ごとの報告書をもとに、平成17年度には、地上からの調査研究と処分技術や安全評価手法の開発に関する成果を取りまとめる予定である。なお、年度ごとの報告書では、単年度に実施した研究開発の成果を網羅的に盛り込むこととしたため、途中段階の成果（今後、論文や報告書などの技術資料としてまとめる予定のもの）が含まれている場合がある。

本報告書は、「概要報告」と、各分野の「個別報告」により構成されている。第2章の「概要報告」においては、「地層処分技術に関する研究開発の全体概要(2.1)」を紹介したうえで、各分野における計画および個別成果の要点を「各分野の計画と成果の概要(2.2)」としてまとめている。「個別報告」では、個々の研究開発項目における平成15年度の成果の概要について、「深地層の科学研究（第3章）」、「処分技術的信頼性向上（第4章）」、「安全評価手法の高度化（第5章）」の分野ごとに報告する。また、巻末には、平成15年度の「研究開発体制」、「業務実績」、「国内外関係機関との協力状況」および「公開文献リスト」を添付する。なお、第1章「はじめに」と第2.1節「研究開発の全体概要」に記載した機関名や参考文献は、第2.2節以降とくに注釈することなく略称にて用いることとする。

【概要報告】

2. 研究開発計画と成果の概要

2. 研究開発計画と成果の概要

2.1 地層処分技術に関する研究開発の全体概要

「第2次取りまとめ」（核燃料サイクル開発機構，1999）以降，処分事業や安全規制の枠組みが整備され，わが国の地層処分計画が事業段階へと進展した状況を踏まえ，サイクル機構では平成13年に策定した「全体計画」（サイクル機構研究開発課題評価委員会，2001）に沿って研究開発を進めている。ここでは，事業段階における関係機関の役割と研究開発課題を紹介したうえで，「全体計画」で示したサイクル機構の研究開発計画と，取り組みの現状や今後の展開について，概要を報告する。

2.1.1 サイクル機構の役割

最終処分の実施に向けて，今後の研究開発には，処分事業や安全規制の段階的な進展にあわせて，地層処分技術の信頼性を高め，処分事業や安全規制の技術基盤をより堅固なものとしていくことが求められる。サイクル機構では，引き続き研究開発の中核的な役割を担い，「第2次取りまとめ」までに蓄積した知見や経験をもとに，深地層の研究施設，地層処分基盤研究施設（エントリー），地層処分放射化学研究施設（クオリティ）などを活用した基盤的研究開発を推進していく（図2.1-1）。これらを通じ，処分事業や安全規制の双方の基盤となる技術や情報を先行的に整備するとともに，あわせて，科学的・技術的な側面から専

門家を含む国民各層の地層処分に対する信頼感・安心感の醸成に寄与していくことが重要である。

2.1.2 研究開発目標と進め方

「第2次取りまとめ」までの研究開発は，具体的な地質環境を特定することなく，わが国における地層処分概念の成立性を科学的根拠に基づき概括的に示すことを目標として進めてきた。今後，地層処分技術の信頼性をさらに向上させるためには，実際の地質環境（瑞浪および幌延の地下研究施設）に適用して，技術としての実用性・信頼性を確認するとともに，地層処分システムへの理解を深め，長期にわたる評価の裕度・信頼性を高めていくことが重要である。そのため，サイクル機構では，以下の2つの目標を設定して研究開発を進めている。

- ・ 目標①「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」：「第2次取りまとめ」までに整備してきた様々な要素技術を深地層の研究施設などにおいて実際の地質環境での調査研究に適用する。それを通じて，その技術の信頼性を確認しつつ，調査の進展に応じた段階的な地層処分技術として体系化していく。
- ・ 目標②「地層処分システムの長期挙動の理解」：実際の地質環境での調査研究やエントリー，クオリティなどでの試験研究を通じて，地層処分システムに関連する現象への理解をさらに深め，より現実に即した評価手法へと改良，高度化をはかり，長期にわたる評価の信頼性を高めていく。

これら2つの目標を達成するため，以下の3つの分野で研究開発を進めている。

- ・ 深地層の科学的研究：地質環境の調査・評価技術の適用・改良と深部地質環境の不均質性などの理解，地質環境の長期安定性やナチュラアナログ研究による長期評価の信頼性向上，深地層における工学技術の適用
- ・ 処分技術の信頼性向上：人工バリアの長期挙動に関する個別・連成現象のより現実的な評価基盤の整備，人工バリアなどの工学要素技術の深地層の研究施設などにおける適用性の確認
- ・ 安全評価手法の高度化：安全評価に係るデータ

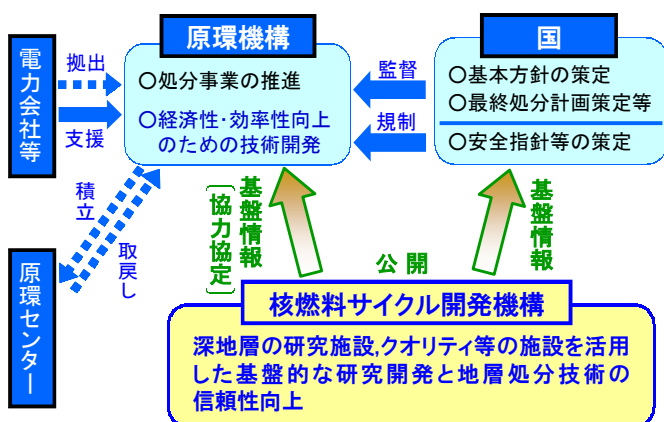


図 2.1-1 原子力長期計画（原子力委員会，2000）などに基づく事業段階における研究開発の役割

ベースの整備，個別現象の理解に基づく安全評価モデルの高度化，不確実性などに関する評価手法の改良と，深地層の研究施設などにおける適用性の確認

これら研究開発の目標と課題との関係について模式的に表したものを，図 2.1-2 に示す。これらの研究開発は，図 2.1-3 に示す東濃地科学センター，幌延深地層研究センター，東海事業所において，深地層の研究施設およびエントリー・クオリティなどの室内試験施設を活用して，分担・連携しながら進めている。深地層の研究施設については，わが国の地質環境の多様性を考慮して，その特徴が大きく異なる瑞浪（結晶質岩・硬岩・淡水系地下水）と幌延（堆積岩・軟岩・塩水系地下水）の2つの計画を進めている。いずれも，地上からの調査研究（第1段階），坑道掘削時の調査研究（第2段階），地下施設での調査研究（第3段階）と，段階的に調査・予測・検証を繰り返す，全体で20年程度の計画である。これらの深地層の研究施設は，地層処分に関連する様々な技術・手法を実際の地質環境へ適用し，信頼性を確認する場として，研究開発の中核的な役割を担う施設である。一方，東海事業所は，エントリーおよびクオリティでの室内・工学試験や放射性核種を用いた試験などを中心に，処分技術や安全評価手法に関する基盤的なデータ整備やモデル開発を進める。また，深地層の研究施設などから得られる地質環境情報を活用して，設計・安全評価手法の適用性を確認しつつ，多分野にわたる技術情報を体系的に整備していく役割を担う。

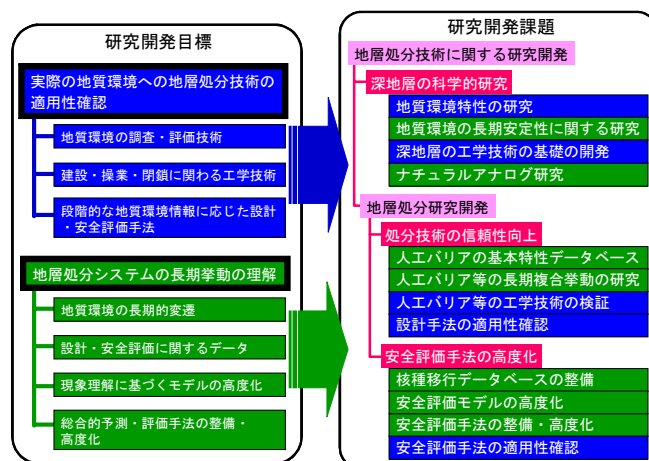


図 2.1-2 2つの目標に向けた研究開発課題



図 2.1-3 サイクル機構の研究開発施設

以下に，東濃地科学センターおよび幌延深地層研究センターにおける研究の概要を示す。

① 東濃地科学センターにおける研究開発

超深地層研究所計画としては，結晶質岩を対象として，平成14年度までに地上物理探査や深度100～200m程度までの4孔のボーリング調査（MSB-1～4号孔）を終了し，平成15年3月より深層ボーリング調査（MIZ-1号孔；予定掘削長1,350m）を実施している。これらの調査研究を通じて，花崗岩中の割れ目の分布や地下水の水質・起源などを把握するとともに，地質環境モデルの構築を段階的に進めてきている。また，平成14年7月に研究所用地の造成工事に着手し，平成15年7月には研究坑道の掘削を開始した。広域地下水流動研究では，現在，深度1,000mの深層ボーリング調査（2孔）を実施中であり，平成16年度に現地作業を終了する予定である。

2.1.3 各事業所・センターにおける研究開発の取り組みの現状と当面の計画・課題

1) 深地層の科学的研究

深地層の研究施設計画については，地上からの調査研究（第1段階）として様々な調査・評価の技術成果を蓄積するとともに，地下施設の建設工事に着工するなど坑道掘削時の調査研究（第2段階）へ向けた準備を進めつつある。さらに，第3段階として，地下施設での調査研究を計画している。各段階における地層処分技術の適用性確認の例を，図 2.1-4 に示す。また，地質環境の長期安定性を調査する技術や，東濃鉱山を活用したナチュラアナログ研究などの成果が得られている。

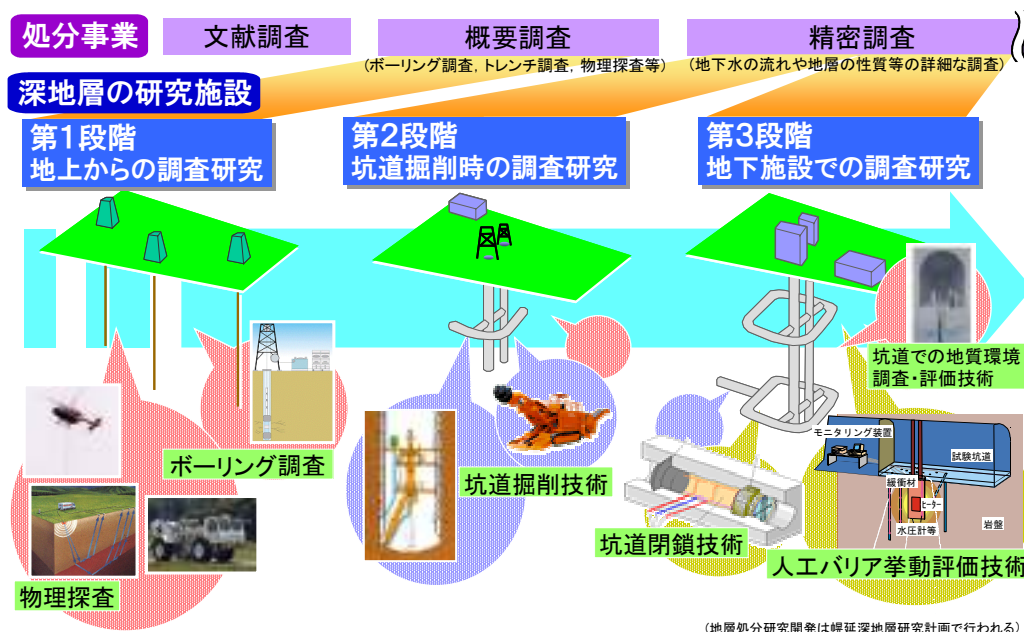


図 2.1-4 深地層研究施設計画の各段階における地層処分技術の適用性確認

東濃鉱山における調査試験研究では、物質の移行・遅延現象に着目したナチュラアナログ研究や、坑道周辺の地質環境を総合的に調べるための技術の整備を進めてきたが、平成 15 年度末をもってすべての調査研究を終了した。現在、これまでに得られた成果を深地層の研究施設設計画などへ反映すべく、取りまとめを進めている。

地質環境の長期安定性に関する研究については、実際の地質環境に適用できる調査技術の開発、地質環境の長期的変動を評価するための手法の開発や工学技術の基盤整備を実施しているほか、地殻変動や火成活動など、それぞれの現象のプロセスに関わる最新の学術的知見といった基盤情報の整備をはかっている。

② 幌延深地層研究センターにおける研究開発

幌延深地層研究計画として、堆積岩を対象に深地層の科学的研究と地層処分研究開発を進めている。平成 13 年 3 月より地表からの調査研究を開始するとともに、平成 13 年 4 月に「幌延深地層研究センター」を開設した。平成 14 年 7 月には、研究所設置地区（主たる調査研究の対象となる 3km 四方の領域）を選定し、研究所設置地区及びその周辺において、ボーリング調査(平成 14, 15 年度に各 3 孔)や物理探査を実施している。これまでの調査を通じて、地下水の流動特性や地球化学特性の不均質性の把握、地質環境モデルの詳細化や調査技術の改良などを進めてきており、地上からの調

査研究が終了する平成 17 年度頃を目処に、堆積岩における一連の地上からの調査・評価技術・適用事例として取りまとめていく。また、平成 15 年 7 月より、造成工事に着手している。地下施設については、平成 17 年度に掘削を開始し、平成 22 年度頃には、地下 500m 程度までの立坑などの施設を完成させる計画である。

2) 処分技術の信頼性向上・安全評価手法の高度化 ・東海事業所（処分研究部）における研究開発

東海事業所では、エントリーとクオリティを中心として、「第 2 次取りまとめ」以降も幅広い地質環境条件を前提に、「処分技術の信頼性向上」と「安全評価手法の高度化」に関するデータ取得やモデル高度化などを進めている。前者の研究開発としては、炭素鋼オーバーパックの腐食挙動の試験などの人工バリアの基本特性データベースの整備、熱-水-応力-化学（THMC）連成モデル開発やナチュラアナログ研究などの長期複合挙動に関する研究、低アルカリ性セメントの開発などの工学技術の検証などを実施している。後者の研究開発としては、平成 15 年 8 月の熱力学データベースおよび収着データベースの公開、還元条件における放射性核種の溶解や収着、拡散などに関するデータ取得のほか、データ不確実性の影響解析や感度分析の検討、掘削影響領域（EDZ）中の核種移行モデルの構築、深地層の科学的研究の情報も取り込んだ技術情報統合システムの開発などを進めて

いる。さらに、深地層の研究施設計画で得られた東濃と幌延の地質環境に関するデータや地質環境モデルを活用して、東濃と幌延を事例とした安全評価手法の適用や地下施設の設計を通じて、連携すべき重要な項目の抽出などを行っている。今後は、深地層の研究施設計画の進展にあわせ、さらに実際の地質環境条件を対象とした研究にも重点を置いていく予定である。

3) 研究成果の集約・取りまとめに向けて

サイクル機構では、「第2次取りまとめ」以降の研究開発成果を年度ごとに報告してきている（サイクル機構，2002，2003）。この年度報告書のほかに、処分事業と安全規制の双方にとっての基盤的な技術や情報として寄与できるよう、双方のニーズやスケジュールを勘案しつつ、研究開発成果を段階的に取りまとめることとしている。サイクル機構では、処分事業と安全規制の主要なマイルストーンに先行する形で深地層の研究施設計画を進めており、この深地層の研究施設計画の各段階の節目ごとに、全体の成果を取りまとめる計画である。取りまとめにおいては、各段階における成果を体系化することで現状の技術・知見レベルを確認するとともに重点課題を抽出し、以降の研究開発計画の効率的な推進に資することも期待している。

最初の取りまとめとして、超深地層研究所計画や幌延深地層研究計画における地上からの調査研究が終了する時期にあわせて、また平成10年代後半を目途とされる概要調査地区の選定とそれに続く概要調査や、安全審査基本指針の策定のための基盤技術を提示することを念頭において、平成17年度を目標に地上からの調査研究と処分技術や安全評価に関する成果を取りまとめる。報告書の構成としては、各分野・課題ごとに第2次取りまとめ以降の個別の研究成果を整理した報告書を作成するとともに、分野間にまたがる情報や技術を含めた地上からの調査段階での調査・評価手法などの主要成果のエッセンスを集約した報告書を、以下のように2つの目標とも関連付けつつまとめる計画である。事業所/分野間の連携のイメージを、図2.1-5に示す。

- ・ 2つの深地層の研究施設計画などにおける地上から調査研究段階で得られた成果と、これに基づく設計・安全評価手法の適用性の検討結果を

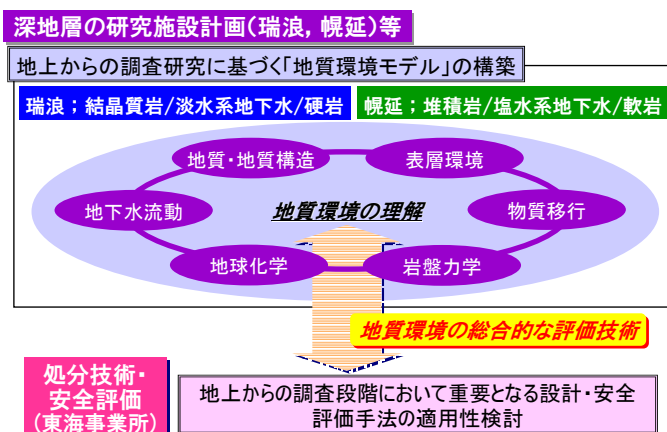


図 2.1-5 地上からの調査研究段階における事業所/分野間の連携のイメージ

踏まえて、地上からアプローチする段階における一連の地層処分技術を、適用事例を示しつつ、できるだけ一般化した方法論としてまとめる。

- ・ 幅広い地質環境も考慮しつつ進めている地層処分システムの長期挙動に関わる様々な現象の理解、ならびに個々のデータベース、モデルおよび評価手法の改良・高度化の進展をまとめる。

また、報告書の信頼性や客観性を高める観点から、個別成果については論文などでその都度報告するとともに、全体の進捗・成果については関係研究機関や外部専門家の意見を聞きながら取りまとめていく予定である。

4) 今後の研究開発

サイクル機構では、今後とも地層処分技術の信頼性向上のための基盤的な研究開発を、分野間および事業所・センター間で相互に連携を図りながら効率的に進め、各段階の取りまとめに成果を集約していく。研究開発を進めるにあたっては、信頼性、透明性及び効率性を高める観点から、研究開発成果の公表、深地層の研究施設などの施設の公開、国内外の関係機関や大学との研究協力などを積極的に進める。また、長期にわたる処分事業を支える観点から、技術の継承や研究者の育成に努めるとともに、深地層の研究施設などを活用し、国民各層の地層処分に対する理解の増進に寄与していく。

平成17年度には、日本原子力研究所とサイクル機構との原子力二法人統合が予定されているが、統合後の新法人においても、瑞浪および幌延の深地層研究施設やクオリティなどを活用し、地層処

分技術に関する研究開発を継続することが必要であると位置づけられている（原子力二法人統合準備会議，2003）。したがって，サイクル機構が果たしている役割は，新法人にも引き継がれるものである。

参考文献

- 原子力二法人統合準備会議(2003)：原子力二法人の統合に関する報告書，平成 15 年 9 月 19 日。
- 原子力委員会(2000)：原子力の研究，開発及び利用に関する長期計画，平成 12 年 11 月 24 日。
- 核燃料サイクル開発機構(1999)：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－，サイクル機構技術資料，JNC TN1410 99-020～024。
- 核燃料サイクル開発機構 研究開発課題評価委員会（廃棄物処理処分課題評価委員会）(2001)：平成 13 年度研究開発課題評価（中間評価）報告書 研究課題「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の全体計画」，サイクル機構技術資料，JNC TN1440 2001-008。
- 核燃料サイクル開発機構(2002)：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成 13 年度報告－，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2002-003。
- 核燃料サイクル開発機構(2003)：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成 14 年度報告－，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2003-004。

2.2 各研究開発分野における計画と成果の概要

2.2.1 深地層の科学的研究

地層処分において地質環境には、①廃棄物を物理的に隔離すること、②人工バリアに適した設置環境を提供すること、および③核種の移行を遅延する天然バリアとして機能する3つの働きが期待されている。これらの役割を果たすために地質環境には、まず長期にわたって十分に安定であること、ついで人工バリアの設置環境および天然バリアとして、岩盤や地下水の物理的・化学的性質が適切であることが求められる（「第2次取りまとめ」）。そのためには、地震・断層活動、火山活動、隆起・侵食、気候・海水準変動といった天然現象から、地下水の流れや水質、岩盤の熱や力学に関する特性、岩盤中での物質の移動現象など、地球科学の幅広い分野にわたる研究が必要である。

サイクル機構では、このような地層処分にとって重要な天然現象や地質環境の特性に関する知見の蓄積とともに、深地層の研究施設の活用や事例研究により、地質環境を把握するための総合的な技術を開発するための研究（「深地層の科学的研究」）を進めている。サイクル機構ではこれらの調査研究を地層科学研究と称しており、この研究は、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の柱の1つに位置づけられ、後述する「処分技術の信頼性向上」および「安全評価手法の高度化」の大きく2つの研究項目で構成される地層処分研究開発の基盤となるものである。

1) 「第2次取りまとめ」以降の研究課題

地層科学研究においては、「全体計画」に示した「第2次取りまとめ」以降における研究開発の課題を踏まえ、以下の4つの大きな課題項目を設定し、研究開発を進めている（サイクル機構、2001）。

① 地質環境特性の研究

地質環境特性として重要な地下水の流れや性質、岩盤の特性、岩盤中での物質の挙動、坑道掘削が周辺の岩盤に与える影響などを明らかにする研究

② 地質環境の長期安定性に関する研究

火山活動、地震・断層活動、隆起・侵食などの天然現象の活動の特徴や影響の程度を明らかに

し、地質環境の将来における変化を予測評価する研究

③ 深地層の工学技術の基礎の開発

地下の研究施設の設計、施工、維持などの工程を通じて、深地層における工学技術の基礎を整備する研究

④ ナチュラルアナログ研究

地質環境下で実際に生じた現象とその場の地質環境特性を定量的に把握することにより、物質の長期挙動を解明し、地層処分の長期安全性に関わる科学的な知見や傍証となる情報を蓄積する研究

これら4つの課題項目は、表2.2.1-1に示すように東濃地科学センターおよび幌延深地層研究センターにおいて、5つのプロジェクトとして取り組んでいる。

表2.2.1-1 4つの課題項目とプロジェクト

プロジェクト 課題項目	東濃地科学センター				幌延深地層 研究センター 深地層研究計画
	広域地下水 流動研究	超深地層 研究所計画	地質環境の 長期安定性 に関する研究	東濃鉦山における 調査試験研究	
地質環境 特性の研究	結晶質岩 ○	堆積岩 ○			
				△	○
地質環境の 長期安定性 に関する研究			○ (日本全国)		△ (幌延町)
深地層における 工学技術の 基礎の開発	結晶質岩 ○	堆積岩 ○			
					○
ナチュラル アナログ研究				○	

○：課題項目に対応するプロジェクト

△：課題項目の一部に対応するプロジェクト

上記①の「地質環境特性の研究」では、結晶質岩を対象とした研究を東濃地科学センターにおける「広域地下水流動研究」および「超深地層研究所計画」として、また、堆積岩を対象とした研究を幌延深地層研究センターにおける「幌延深地層研究計画」として進めている。

具体的には、地表から地下深部までの地質環境を理解しながら、それを調査・解析・評価するための技術を整備していくことを目的とした研究である。なお、東濃地科学センターでは、深地層の研究施設計画に先立つ既存の地下坑道を利用した研究として、堆積岩を対象に昭和61年より「東濃鉦山における調査試験研究」を実施してきたが、平成15年度末をもって終了した。

②の「地質環境の長期安定性に関する研究」では、全国を視野に入れて、各天然現象を対象とした事例研究およびデータベースの整備を東濃地科学センターにおいて進めている。また、幌延深地層研究所において、幌延町の地域特性に着目して地震・断層活動などの事例研究を実施している。

③の「深地層の工学技術の基礎の開発」では、超深地層研究所計画および幌延深地層研究計画の地下の研究施設の設計、施工、維持などの工程を通じて、現存の施工技術などの適用や改良を試みつつ実規模で技術の有効性を確認する。

④の「ナチュラアナログ研究」は、東濃鉱山における調査試験研究の一つとして、天然のウラン鉱床を活用して、地質環境中での物質の長期的な移行・遅延挙動を解明するための知見を整備してきた。今後は、地質環境の長期安定性に関する研究の一環として、月吉ウラン鉱床を対象とした広い範囲で実施していく。

なお、地層科学研究を進めるに際しては、大学などの外部専門家に引き続き支援をお願いするとともに、国や関係機関との連携をより一層深めながら、研究の効率化と品質向上を図る。得られた成果については、地層処分技術の信頼性をさらに向上させるための知見、情報、技術として整備し、処分事業や安全規制の技術基盤として寄与できるように情報化していく。また、地層科学研究のための研究施設については、地下深部の環境を体験する場や地層処分の研究開発に対する国民の理解を深める場、あるいは学術的な研究の場としても整備していく。

2) 地層科学研究の現状

東濃地科学センターおよび幌延深地層研究所において実施している地層科学研究の現状を平成15年度の成果を中心に、以下にまとめる。

(1) 東濃地科学センター

東濃地科学センターにおいては、2.2.1 1) 項において示した4つの課題項目のうち、地質環境特性の研究に相当する広域地下水流動研究と超深地層研究所計画、東濃鉱山における調査試験研究、および地震や火山活動などの天然現象を対象とした地質環境の長期安定性に関する研究の4つのプロジェクトを実施してきた。また、課題項目の1

つである深地層の工学技術の基礎の開発は、超深地層研究所計画において進めている。

① 広域地下水流動研究と超深地層研究所計画における地質環境特性の研究の進め方

広域地下水流動研究と超深地層研究所計画は、東濃地域を事例に地層処分にとって重要な地質環境特性を段階的に理解するための体系的な技術基盤を開発・整備するとの共通した目標を有しており、双方の成果を有機的に組み合わせつつ調査研究を進めている。これら2つのプロジェクトにおいては、図2.2.1-1に示すループ（繰り返しアプローチ）を基本に調査研究を進めており、調査の進展に伴う情報量の増加に応じて、地質環境特性に関わる理解度や調査の達成度を順次評価する。

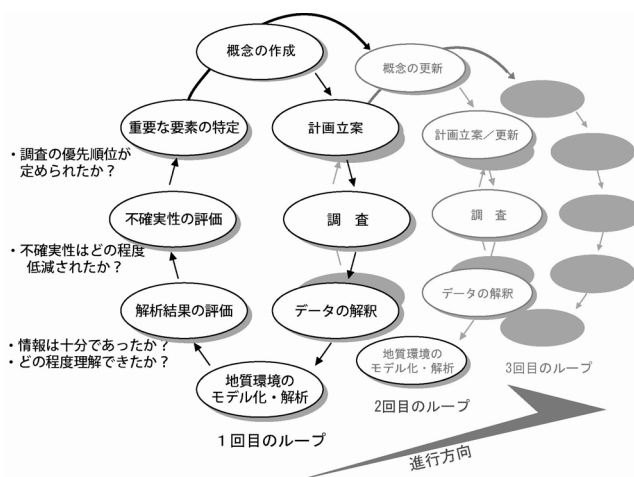


図 2.2.1-1 調査研究の繰り返しアプローチ

「全体計画」においては、調査研究段階に応じて、評価の対象とする地質環境の範囲を広域、施設、坑道というスケールに分けて実施することとしている。このことを踏まえ、広域地下水流動研究と超深地層研究所計画の2つのプロジェクトにおいては、

- ・限られた調査量で効率的に地質環境特性を把握していくこと、および
- ・断層や割れ目などが地質環境の不均質性を大きく支配していると考えられる割れ目系の岩盤を対象としていること

の2点に注目しつつ、処分システムの設計や安全評価との連携を考慮して、地上からの調査研究で評価の対象とする空間スケールを4つに区分して研究を進めている（表2.2.1-2）。

表 2. 2. 1-2 地質環境のモデル化の目標と
スケール

領域	目的/ねらい	スケール
広域スケール	リージョナル ・ローカルスケールの領域および境界条件の設定	平面：数100km ² 程度 (数10km X 数10km) 深さ：10km程度
	ローカル ・地層処分システム全体の評価	平面：数10km ² 程度 (数km X 数km) 深さ：数km程度
施設スケール	サイト ・人工バリア周辺～天然バリアの評価 ・人工バリア周辺の境界条件の設定	平面：数km ² 程度 (数100m～数km X 数100m～数km) 深さ：2～3km程度
	ブロック ・人工バリア周辺の評価 ・地層処分システムの一部の地質環境に着目した評価	平面：数100m ² 程度 (数10m～数100m X 数10m～数100m) 深さ：数100m～1km程度
坑道スケール	・坑道を利用した人工バリア周辺の詳細な評価	平面：数10m ² 程度 (数m～数10m X 数m～数10m)

表 2. 2. 1-2 に示したスケール区分のうち、リージョナルとローカルスケールは広域地下水流動研究で、サイトとブロックスケールは超深地層研究所計画で進めている。なお、坑道スケールについては、今後、超深地層研究所計画の第2段階の計画を具体化する中で、必要に応じてスケールの細分化などを検討する。

地層処分にとって重要な地質環境特性を段階的に理解するための体系的な技術基盤を開発・整備していくためには、研究成果の反映先を明確することと、どのデータをどのような方法で取得し、研究分野間の横断的なデータの解釈やモデル化をどのような手順で進めていけばよいかなど、調査研究の道すじを示すことが重要と考えられる。そのため、処分システムの設計と安全評価、瑞浪超深地層研究所地下施設の設計・施工、および第2段階の調査研究計画などの反映先への入力情報を定義し、そこに至る調査・解析およびモデル化の流れ（統合化データフロー）を明示して調査研究を進めている（大澤ほか、2001）。そのイメージを図 2. 2. 1-2 に示す。

② 広域地下水流動研究

広域地下水流動研究は、表 2. 2. 1-2 に示したリージョナルとローカルスケールの調査研究に相当する。主に地下水流動系の涵養域から流出域までを包含する数 km 四方以上の領域における、地表から地下深部までの地質・地質構造、地下水の流動特性や地球化学特性などを明らかにするために必要な調査・解析技術と、その技術を用いた解析結果を評価する技術の開発を主な目的としている

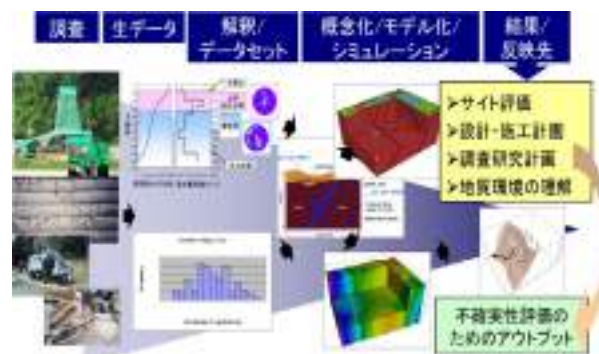
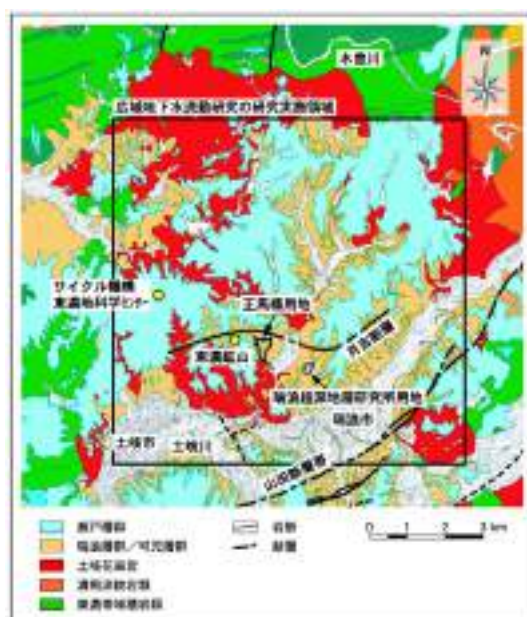


図 2. 2. 1-2 統合化データフローのイメージ

（動燃事業団、1997）。具体的な研究課題は、以下の2項目に集約される（サイクル機構、2003a）。

- ・実際の地質環境を対象にリージョナルおよびローカルスケールに相当する調査研究を通して、限定された情報量で地質環境の何がどの程度把握できるのかを事例的に示すこと
- ・各種調査・解析およびその評価技術の適用性を確認し、それらの技術の組合せや手順などを示した調査・評価フローを構築すること

本研究は、東濃鉾山周辺の 10 km 四方程度の範囲を研究実施領域としている。この領域では、後期白亜紀の土岐花崗岩を基盤として、第三紀堆積岩の瑞浪層群、さらにその上位の瀬戸層群がこれを覆って分布する（図 2. 2. 1-3）。瑞浪層群は下位より、土岐夾炭累層、本郷累層、明世累層、生俵累層に分けられる。全体の傾向として上位ほど細粒化するとともに分布が広がり、海進を示す地層



（糸魚川、1980 を簡略化）

図 2. 2. 1-3 東濃地域の地質概要

である。瑞浪層群は土岐川周辺では 300 m 以上の層厚となる地域もある（糸魚川，1980）。

上述した地質・地質構造に関わる文献情報と、広域地下水流動研究および超深地層研究所計画などにより得られた知見に基づき整理された土岐花崗岩の地質構造の概念モデルを図 2.2.1-4 に示す。

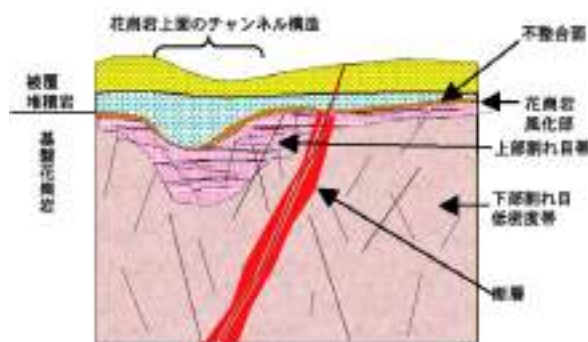


図 2.2.1-4 地質構造の概念モデル（断面図）

平成 14 年度までの調査研究において、リージョナルスケールの地下水流動解析により、ローカールスケールのモデル化の範囲や境界条件の設定を終了した。また、土岐花崗岩中の地下水は、研究実施領域の北方領域で Na-Ca-HCO_3 型～ Na-HCO_3 型の地下水が、南方領域では Na-Cl 型の地下水が分布する。さらに、南方領域に分布する Na-Cl 型の地下水については、塩分濃度の異なる複数の地下水の混合（例えば、降水と古海水起源の地下水の混合など）により水質が形成されていることなどの成果を得ている。

平成 15 年度は、これらの研究成果をふまえて、ローカールスケールを対象に、以下に示す 3 つの課題を中心に調査研究を進めてきた。

- ① 数 km から数百 m 規模の断層や割れ目帯および水みちを検出するための調査技術の開発、
- ② 地下水の主な流動方向と涵養域・流出域を推定するための水理地質構造のモデル化と地下水流動解析、およびその解析結果を確認するための技術の構築、
- ③ 地下水流動解析結果と地球化学モデルの整合性の確認

①の課題については、断層を対象として高密度電気探査やボーリング調査を行うとともに、これまで行ってきた精密空中写真判読調査、長さ数 km ～数百 m のリニアメントの解析、反射法弾性波探査、およびボーリング孔調査結果をあわせて、断層・割れ目などの主要な水みちの位置や透水性を

確認する技術について評価を試みた。

その結果、長さ数 km ～数百 m のリニアメント（472 本）と既往の調査（地表踏査，ボーリング調査，地上弾性波探査）で確認もしくは推定された断層や割れ目との比較により，両者の分布および方向性が概ね整合的であることと，両者の長さ別頻度の関係が両対数グラフ上でほぼ同一の直線上に分布することが明らかになった（図 2.2.1-5）。このことから，地上からの調査では確認が比較的困難な，長さ数 m ～数百 m 程度の割れ目の頻度（図中の点線枠部）を推定できる可能性が示された（佐々木・梅本，2004）。

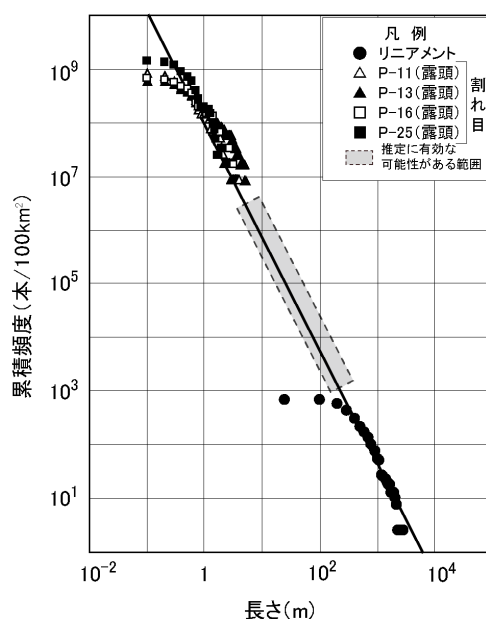


図 2.2.1-5 ローカールスケールにおける割れ目とリニアメントの長さ別頻度分布

ローカールスケールにおけるこれまでのリニアメント調査や地表地質調査により分布が推定された不連続構造や地質構造の把握を目的として，新たに図 2.2.1-6 に示す 3 測線で反射法弾性波探査を実施した。

反射断面記録と測線上のボーリング孔における音波検層および密度検層の結果から作成した合成反射記録との対比に基づき，マイグレーション深度断面上で解釈した一例を図 2.2.1-7 に示す。とくに，図中の黒矢印の範囲では被覆堆積岩と基盤花崗岩との不整合面（図中の淡赤色），被覆堆積岩中の地層境界面（図中の黄色）に相当する反射面の変位・彎曲が明瞭に示されている。さらに，地下深部の花崗岩中においても明瞭に反射面が示

され、その不連続な分布などから、地表に向かって放射状に複数の断層が存在していることが推定できる。これらの断層のうち最も明瞭な不連続部（図中の赤矢印）は、南傾斜の逆断層である。これは、月吉断層（Matsuzawa and Uemura, 1967）に相当するものと考えられる。



※ 黒実線はリニアメント（山井ほか，1994）を示す。

図 2.2.1-6 調査測線図

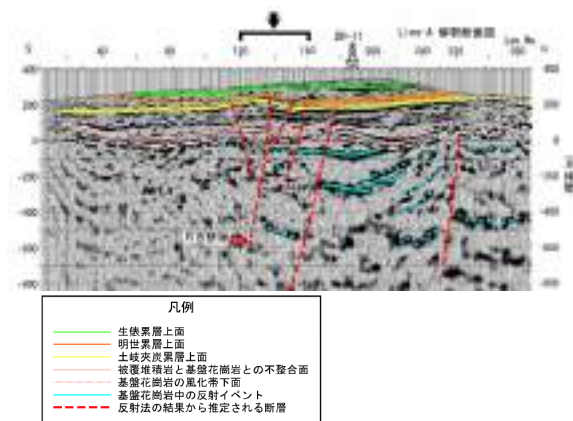


図 2.2.1-7 測線（Line）Aにおける地質構造解釈断面図

これら反射法弾性波探査の結果により、これまでに確認されている月吉断層のほかに、既存の地質図には表現されていない断層など不連続構造の分布、被覆堆積岩と基盤花崗岩との境界である不整合面や被覆堆積岩中の地層境界面などの連続性が推定でき、より精緻な地質構造モデルを作成するための入力情報が整備できた。これらの結果お

よび平成 14 年度に実施した超深地層研究所計画での同探査結果を踏まえると、東濃地域のような花崗岩を堆積岩が覆う地質環境において、堆積構造や断層などの不連続構造の分布を把握する方法として反射法弾性波探査が有効であるといえる。

次に、②の課題に対応して、ローカルスケールを対象に、平成 14 年度までの調査により得られた地質環境特性に関する情報に基づき、地質構造モデル、水理地質構造モデルを作成し地下水流動解析を実施した（図 2.2.1-8）。その結果、地下水流動方向は、概ね北東から南西であり、北東部から涵養し南側の土岐川を流出域と予測してきたこれまでの知見と一致する結果が得られた。

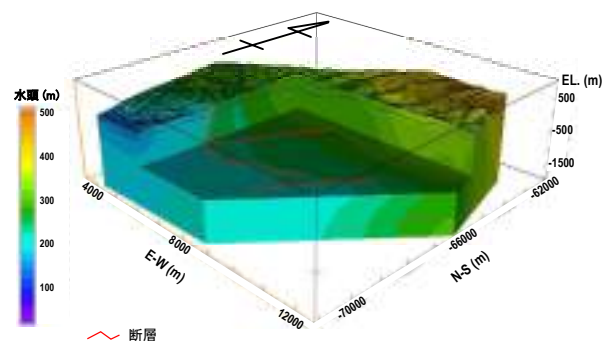


図 2.2.1-8 地下水流動解析結果（水頭分布）

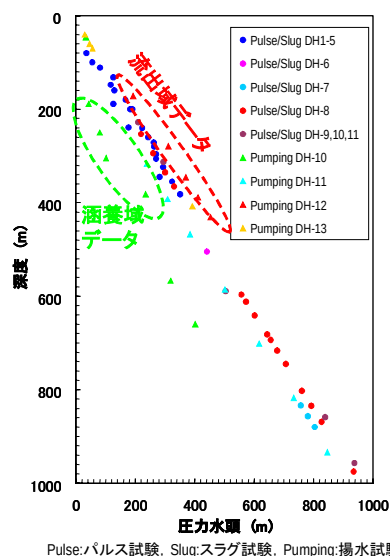


図 2.2.1-9 ボーリング孔での間隙水圧分布

この地下水流動解析結果の妥当性評価の一つとしてボーリング孔における水頭分布を用いた実測値と解析値の比較を試みた。図 2.2.1-9 にボーリング孔での水理試験により得られた間隙水圧分布を示す。地下水流動解析で推定された涵養域と流

出域以外のボーリング孔では概ね静水圧分布を示している。一方、涵養域と推定された地点でのボーリング孔の間隙水圧分布は、地表付近で静水圧分布より低い水圧を示し、深度が深くなるに従い静水圧分布に近づく傾向にある。一方、流出域と推定されたボーリング孔での間隙水圧分布は、深度が浅くなるほど静水圧分布より高い水圧を示す。これらは、涵養域付近では下降流が生じていることを、流出域付近では上昇流が生じていることを示している。このことは、地下水流動解析結果を支持しており、同解析結果の妥当性を示すものと考えられる。

③の課題に対応するテーマの一つとして、地下水の混合による水質形成を定量的に記述するために、東濃地域と同様に結晶質岩体、Na-C1 型地下水が分布する研究サイトを有するスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）によって開発された、主成分分析に混合とマスバランス計算を組み合わせた M3 解析手法 (Multivariate Mixing and Mass balance modelling analysis ; Laaksoharju et al., 1999) を適用し解析を行った。

その結果、地下水の混合による水質形成の端成分として、図 2.2.1-10 に示すように 4 種類の成分を抽出した。研究実施領域の南方領域に分布する Na-C1 型地下水は、M3 解析においても、概略的に「低 Na-C1 型地下水」と「高 Na-C1 型地下水」の混合で表現することができる。さらに、広域的な地下水の混合割合について定量的に解析した結果、土岐川近傍の温泉で認められた「高 Na-C1 型地下水」は、超深地層研究所計画の研究所用周辺の深部の地下水に 20%程度混合していると推測された。また、浅くなるに従って割合が低くなる傾向にあり、北方領域付近では、浅部から深部まで「高 Na-C1 型地下水」の寄与がほとんどないことが明らかになった (図 2.2.1-11)。

本研究の主な目標である、地表から地下深部までの地質・地質構造、地下水の流動特性や地球化学特性などを明らかにするために必要な調査・解析技術と、その技術を用いた解析結果を評価する技術の開発を達成していくためには、個々の研究成果を段階的にかつ繰り返し評価しながら、次の段階へ移行を判断していくことが重要である。この一つの手法として、地質環境特性の空間分布の不確実性解析のために新たな方法の構築を進めている。

平成15年度においては、ファジー地球統計手

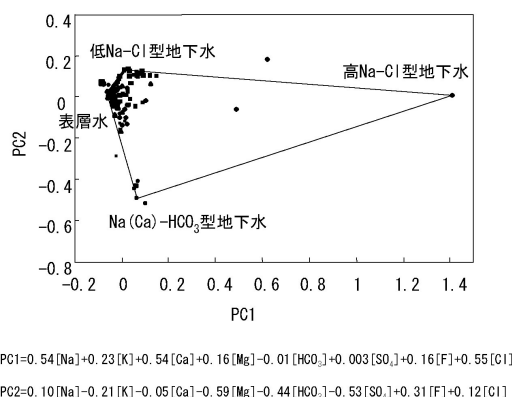


図2.2.1-10 多変量解析（主成分分析）による地下水の水質分析

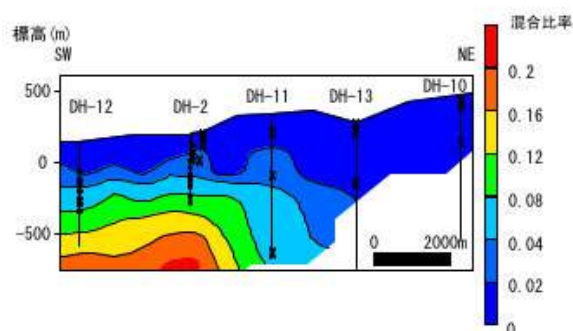


図 2.2.1-11 M3 解析手法に基づく地下水混合割合の定量的解析

法を利用し、地質環境モデルに関する不確実性解析手法を構築した（柳澤ほか，2003a）。さらに、東濃地域におけるこれまでの調査結果に基づく地下水流動解析を例題として、その解析手法の適用性評価のために試行を実施した（図 2.2.1-12）。

今回の試行では、地質構造モデルと水理地質構造モデルに含まれる概念の違いによる不確実性因子（複数の競合する概念モデルの存在）、および透水係数などのパラメータ値の変動幅などの定量的な不確実性因子の確からしさをファジーメンバーシップ（「可能性が極めて高い」や「可能性が

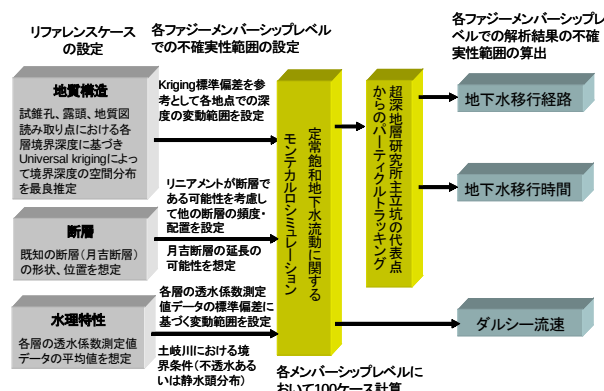


図 2.2.1-12 試行の流れ

低いが否定できない」といった主観的な確信の程度を、数学的に定量化し表したもの)として表現し、モンテカルロシミュレーションを行うことによって、「可能性の否定できない」結果の範囲と「確からしさの程度」を算出する方法を用いた(柳澤ほか, 2003b)。

解析結果の一例を、図 2.2.1-13 に示す。地質構造に関する不確実性に関しては、リニアメント(線状構造)の方向と、地表踏査やボーリング孔調査で確認された割れ目・断層の方向が一致することから、リニアメントが断層である可能性を仮説として設定した。既知の断層である月吉断層のみの場合はファジーメンバーシップ関数 $\mu=1$ 、断層地形を有する明瞭なリニアメントは $\mu=0.5$ 、不明瞭なリニアメントまで全てを断層と仮定した場合は $\mu=0$ とした。また、水理地質構造モデルへの入力パラメータの不確実性のうち、透水係数の不確実性は岩相ごとの透水係数頻度分布に基づいてファジーメンバーシップを設定した。この解析により以下のことが明らかとなった。

- ・地下水の移行経路の不確実性は、断層の有無と涵養域と断層との関係、および断層の水理学的特性(透水性か遮水性か)に依存する。
- ・任意断面の流速の不確実性は、母岩である花崗岩の平均透水係数に依存する。
- ・地下水の移行時間は、上記の移行経路のほか、母岩である花崗岩の平均透水係数に依存する。

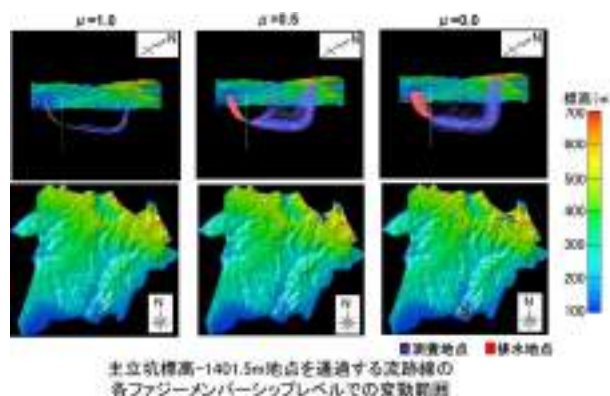


図 2.2.1-13 地下水移行経路の不確実性の例

今回の試行をとおして、本手法を用いることにより、評価指標である地下水の移行経路、移行時間および流速などについて不確実性の程度を表現できることと、これらの評価指標に大きな影響を与える地質構造要素や入力パラメータを抽出することが示された。

広域地下水流動研究においては、平成 14 年度より深度 1,000 m 程度の 2 本の深層ボーリング調査(DH-14, 15 号孔)を継続中である。これらの調査により、先に示した①から③の 3 つの課題に関する新たな地質環境情報と調査技術の適用性などの知見が積み重ねられつつある。

広域地下水流動研究は平成 16 年度までに主な調査・試験をし、平成 10 年代後半を目途とされる概要調査地区の選定とそれに続く概要調査や、安全審査基本指針の策定への反映を念頭において、平成 17 年度までに得られた成果を一連の体系化された調査技術の事例および知見として取りまとめる。このため、今後の重要な課題として、断層の分布および水理特性を調査する技術の整備、地下水の流れと水質変化をあわせて表現できるモデルの開発、図 2.2.1-1 に示した繰り返しアプローチにおける不確実性の定量的な評価のための技術構築などを継続して進める。また、超深地層研究所計画における研究坑道の掘削が広域的な地下水流動にどのような影響を与えるかなどにも留意しながら、ボーリング孔を利用した地下水の水圧や水質のモニタリングを継続し、経時的な変化を追跡する(サイクル機構, 2003a)。なお、地下水の水圧や水質のモニタリングは平成 17 年度以降も継続して行う計画である。

③ 超深地層研究所計画

超深地層研究所計画は、2.2.1 1)項で示した課題項目①の一つに位置づけられる「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」と、課題項目③の「深地層における工学技術の基盤の整備」を全体目標とした約 20 年の計画である(サイクル機構, 2002a)。全体を 3 つの段階(地表からの調査予測研究段階、研究坑道の掘削を伴う研究段階、研究坑道を利用した研究段階)に分けて進めながら、段階ごとに目標を設定し、成果を取りまとめている。

本計画では、平成 8 年度より、岐阜県瑞浪市明世町のサイクル機構が保有する用地(正馬様用地)において、地表からの調査を実施してきたが、平成 14 年 1 月、瑞浪市との間で市有地に関する賃貸借契約を締結し、研究坑道などの設置場所を市有地(瑞浪超深地層研究所用地、以下「研究所用地」)へ変更することとした(図 2.2.1-14)。研究所用地は、正馬様用地の約 2 km 東方の同じ明世町内にあり、両者は土岐花崗岩体という同一の

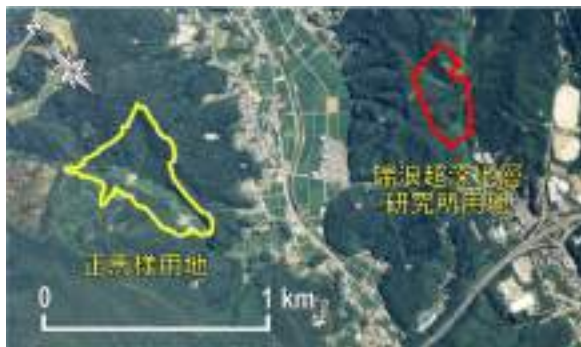


図 2.2.1-14 研究の実施場所

花崗岩体上に位置しているため、それまでの成果を活かしつつ研究を進めることができる。

瑞浪市との賃貸借契約の締結を受け、平成 14 年に研究所用地およびその周辺において第 1 段階の調査研究を開始した。また、平成 14 年 7 月には瑞浪超深地層研究所の建設に着手し、平成 15 年 3 月までに敷地の造成工事を完了した。さらに、平成 15 年 7 月より研究坑道掘削工事として平成 18 年 3 月までの予定で立坑深度 300 m までの第 1 期工事を進めている。図 2.2.1-15 に研究坑道のレイアウトと建設工程のイメージを示す。一方、正馬様用地は、これまで蓄積してきた月吉断層やその周辺の地質環境情報およびボーリング孔などの研究資源を利用した要素技術開発の場として活用している。

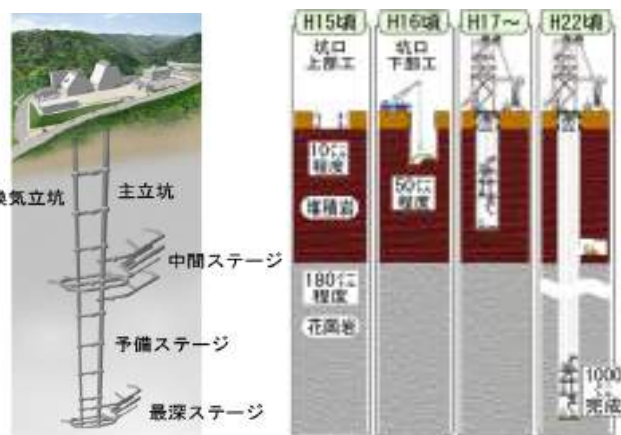


図 2.2.1-15 研究坑道レイアウトと建設工程のイメージ

i) 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備

本計画の第 1 段階は、表 2.2.1-2 に示したスケール区分のうち、サイトとブロックの 2 つのスケールに相当する。研究所用地での調査研究は平成 14 年より開始しており、地上からの調査研究は、大きく 4 つのステップに区分して、繰り返しアプローチを実践している(図 2.2.1-16)。

平成 14 年度は、ステップ 1 およびステップ 2 の調査研究により、以下に示すような成果が得られている。

- ・研究所用地とその周辺における調査結果および広域地下水流動研究の成果も取り入れて、サ

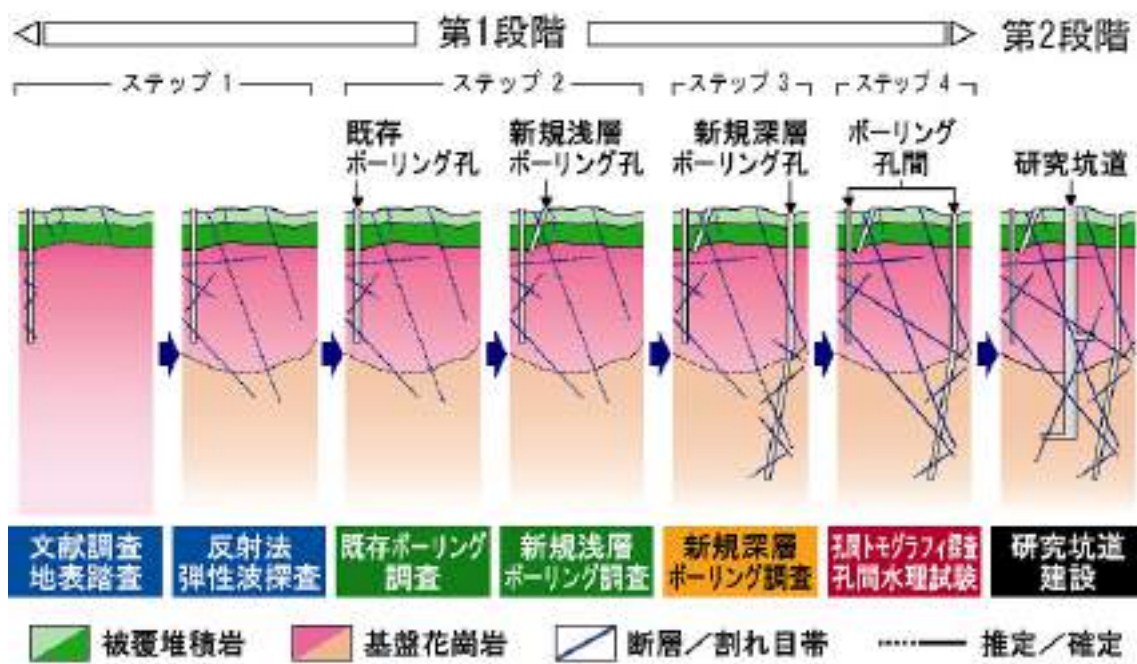


図 2.2.1-16 研究所用地における第 1 段階の調査研究の進め方

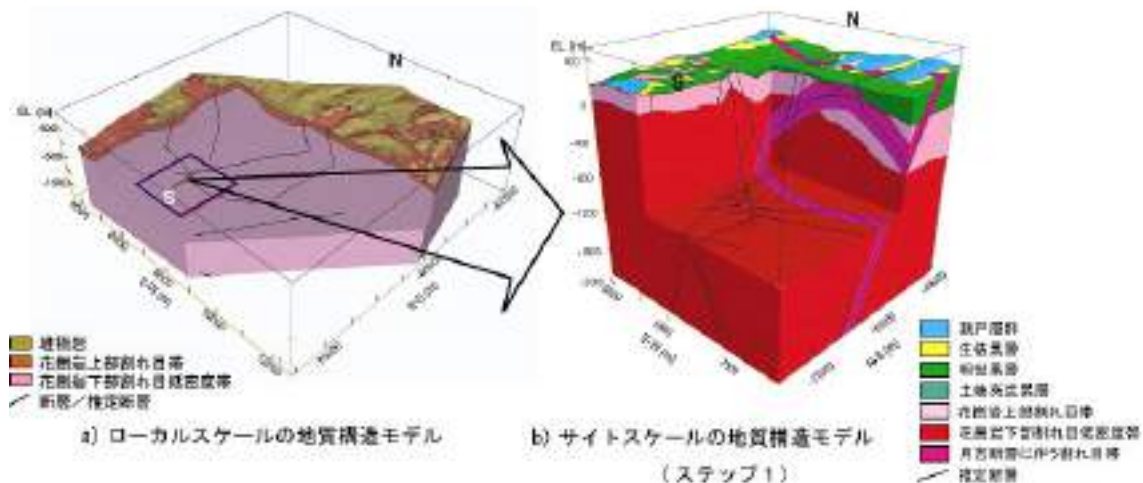


図 2.2.1-17 サイトスケールモデル化領域と地質構造モデル (ステップ1)

イトスケールの地質構造モデルを構築した (サイクル機構, 2003b, 2003c; 太田ほか, 2004; 図 2.2.1-17 および図 2.2.1-18)。

- 堆積岩では一部の区間を除き $10^{-8} \sim 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ の範囲の透水性を有し, これまで取得された堆積岩の透水性と比較するとやや高い値を示す。
- 堆積岩中の地下水は, 浅部に Si, Na, Ca, SO_4 , HCO_3 イオンに富む地下水 (以下, Si-Na-Ca- SO_4 - HCO_3 型地下水), 深部には Na, Cl イオンに富む地下水 (以下, Na-Cl 型地下水) が存在する。

以上の研究成果を踏まえつつ, 平成 15 年度においては, 繰り返しアプローチの考え方に基づき以下の 3 項目を中心に調査研究を実施した。

- ①ステップ 1 の調査や地質構造モデルに基づく, 水理地質構造モデルの構築と地下水流動解析
- ②ステップ 2 の調査結果の解釈と評価ならびにその結果を踏まえた水理地質構造モデルの更新と岩盤力学および地球化学モデルの構築
- ③ステップ 3 の深層ボーリング調査とその結果に基づくステップ 2 の地質構造モデルなどの妥当性の確認 (掘削深度 640 m 付近まで)

①の項目に対応して, ステップ 1 の水理地質構造モデルを構築するとともに, それを用いた三次元地下水流動解析を実施した。地下水流動解析では, サイクル機構が開発している地下水流動解析コードである Frac-Affinity (稲葉ほか, 2002) を用いて断層の透水性に着目した感度解析を実施した。

図 2.2.1-19 に北北西系断層および北東系断層が透水異方性を有しているケース (断層の傾斜方

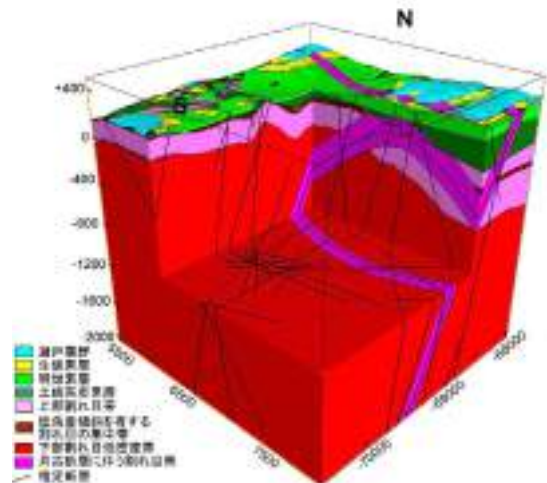


図 2.2.1-18 サイトスケールの地質構造モデル (ステップ2)

向とそれに直交する方向で透水性が異なる) と, これらの断層が透水異方性を有しない高透水性のケースにおける地下水流動解析によって得られた全水頭分布を示す。図より, いずれのケースも地下水の主流動方向は, 北東から南西方向である。また, 研究所用地の上流側に分布する北北西系断層および北東系断層が透水異方性を有しているケースでは, これらの断層部を挟んで上流側と下流側で明瞭な水頭差が生じている。これに対し, 北北西系断層および北東系断層が透水異方性を有しない高透水性のケースでは, この断層を挟んだ部分で大きな水頭差は生じていない。

このことから, 北北西系断層および北東系断層の透水性が研究所用地周辺の全水頭分布に与える影響が大きいと評価し, ステップ 2 以降の調査においては, これらの断層の水理学的特性を評価す

ることが重要であると判断した。

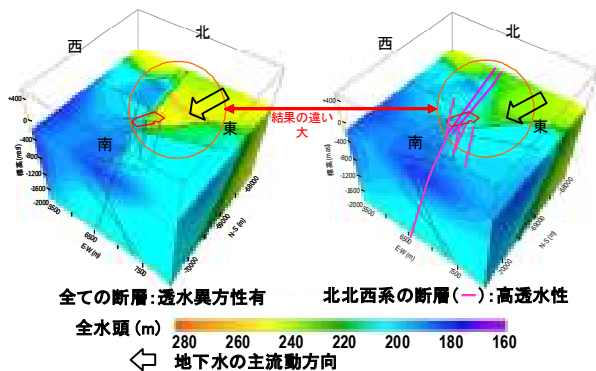


図 2.2.1-19 地下水流動解析結果（水頭分布）

②の項目に対応して、ステップ2での調査結果を基に構築した岩盤力学概念モデルを図 2.2.1-20 に示す。岩盤力学概念モデルは、ステップ2の地質構造モデルを基に、同ステップの調査として実施した既存ボーリング孔（DH-2 号孔）の岩石コアを用いた DSCA（Differential Strain Curve Analysis）法による初期応力の測定結果を用いて構築した。DH-2 号孔の土岐花崗岩は上部割れ目帯に属しており、正馬様用地の岩盤力学概念モデル（松井ほか，2001）と比べて、岩石基質部の物理特性としては、見かけ比重は高く、有効空隙率は小さく、弾性波速度は低い。一方、力学特性としては、一軸圧縮強度は小さく、剛性や破壊基準は同程度である。応力状態は最大主応力方向が N-S から NW-SE 方向であり、この傾向は正馬様用地の岩盤力学概念モデルと同様である。

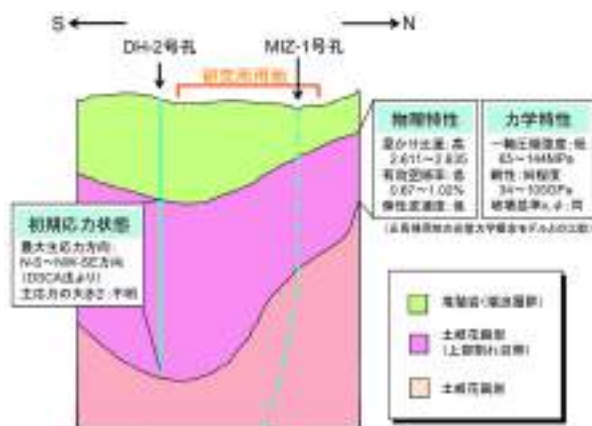


図 2.2.1-20 研究所用地周辺の岩盤力学概念モデル

③の課題に対応して、平成 15 年度よりステッ

プ2までの研究成果を踏まえ本格的にステップ3の深層ボーリング調査（MIZ-1 号孔，計画掘削長 1,350 m；Nakano et al., 2003；Takeuchi and Ota, 2004）に着手した。MIZ-1 号孔は、これまでの調査研究により構築した地質構造モデルに基づき、断層などの大規模な不連続構造および水みちの特定とその特性の把握、花崗岩最上部から深度 1,000 m 以深までの地質・地質構造、水理特性および地下水の地球化学特性の把握などの当初の目的を達成するために、図 2.2.1-21 に示すようなレイアウトとした。これまでに実施した掘削深度約 640 m までの区間においては、地質・地質構造に関する調査研究として、コアの地質学的記載のほか、ボアホールテレビ観察や物理検層などのボーリング孔内での調査を行うとともに、コア試料を用いた岩石鉱物試験などを実施した。また、水理および地下水の地球化学に関する調査研究として、水みち検出のための流体検層および 11 区間で水理試験（地下水の採水 2 区間を含む）などを実施した。

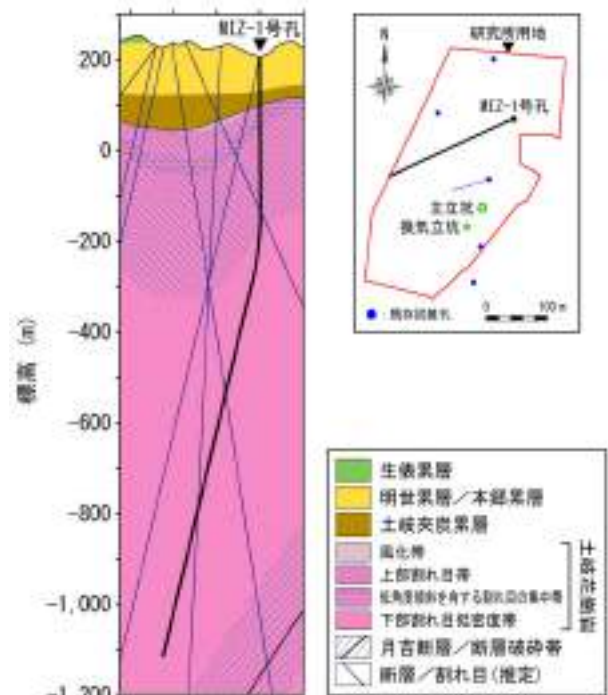


図 2.2.1-21 MIZ-1 号孔のレイアウト

これらの調査の結果、被覆堆積岩と基盤花崗岩の不整合面、および基盤花崗岩中の上部割れ目帯や下部割れ目低密度帯などの分布深度を特定するとともに、比較的小規模な断層によって形成される割れ目帯を計 2 箇所において確認した。これらの地質・地質構造は、MIZ-1 号孔ボーリング調査

より前に構築した地質構造モデル（熊崎ほか，2004）に基づき予測した深度（想定範囲内）に概ね一致している（表 2.2.1-3）。

表 2.2.1-3 MIZ-1 号孔の調査計画における地質・地質構造の予測深度と実際の分布深度

地質・地質構造	予 測	実 際
	深度（想定範囲） [mab]	深度 [mab]
不整合面	104 (92~116)	109
風化帯	104~105 (分布しない/92~120)	分布しない
低角度傾斜を有する 割れ目の集中帯	104~138 (91~178)	分布しない
上部割れ目帯	104~400 (92~446)	109~310
下部割れ目低密度帯	400~ (335~)	310~

Mab(meter along borehole)：掘削長

ii) 深地層における工学技術の基盤の整備

本研究では，現状の工学技術を適用して，地下深部の研究坑道を安全かつ合理的に設計・施工し，維持・管理できることを確認するとともに，岩盤物性のばらつきや不連続構造の出現など地質環境の不均質性に関わる変動幅を考慮したうえで，調査研究を効率的に行える研究坑道の設計や施工計画を提示することを目標としている。とくに，実際の地質環境が予測結果と大きく異なる場合や，大量出水や山はねなどの想定外の事象に遭遇した場合でも，設計変更や対策工により柔軟に対応できることが重要である。

平成 14 年度は，平成 13 年度の研究坑道レイアウトの検討結果を踏まえ，①計測結果の設計・施工計画へのフィードバック技術，②施工技術および施工中に得られる地質環境情報の品質を確保する技術，③突発湧水に対する掘削・施工対策技術，④研究坑道における地震動評価，および，⑤安全対策に関する検討などを実施するとともに，⑥研究坑道の設計と施工計画に関する検討を行った。

平成 15 年度は，立坑の本格掘削にそなえての準備の最終段階として上記の①から⑥の検討を継続しつつ，新たに取得した地質環境情報に基づき，施設設計や立坑掘削中の計測計画の見直しなどを行った。

平成 15 年度の主な成果として，計測結果の設計・施工計画へのフィードバック技術の検討において，東濃鉦山の第 2 立坑掘削時に取得されたデータなどを用いて，研究坑道の堆積岩部分を対象

に実施した逆解析手法を用いた力学的な解析による地山評価を踏まえ，フィードバックを試行した。これにより得られた課題を踏まえ，フィードバックのフローの見直し・具体化を図った（図 2.2.1-22）。

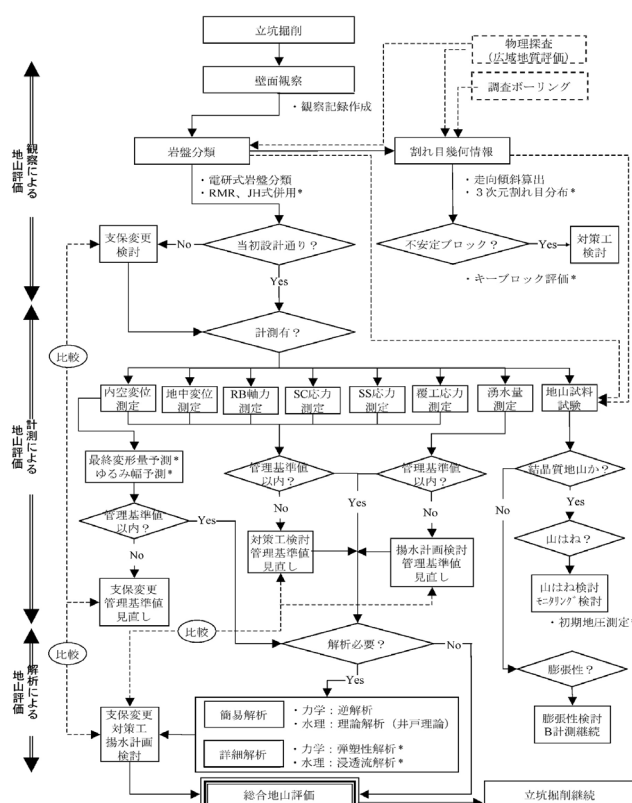


図 2.2.1-22 地山評価のフィードバックフロー案

近年，東海地震および南海地震に関する社会的な関心が高まりつつあることを踏まえ，研究坑道における地震動評価に関する検討においては，想定新東海地震に焦点を絞り，断層モデルを用いた統計的グリーン関数法（壇ほか，2000）による瑞浪地点における検討用地震動を作成し，一次元成層地盤解析を実施した（図 2.2.1-23）。図より今回作成した地震動による地盤の応答結果は，加速度・相対変位・せん断応力・せん断ひずみともにいずれも，東濃地域で過去に発生した地震および研究用地近傍の活断層を考慮して経験的手法により検討用地震動を設定した平成 14 年度の結果と比較して大幅に小さいことがわかる。等価震度についても，同様に平成 14 年度の結果より小さい結果が示された。想定新東海地震は，これまで検討に用いてきた地震源と比較して，M8.3 と地震の規模は大きいものの，研究用地までの距離が

約 100km と離れているために、その影響が小さかったと考えられる。この結果より、瑞浪超深地層研究所において、想定新東海地震は他の地震源に比べその影響度が小さいことを確認した。

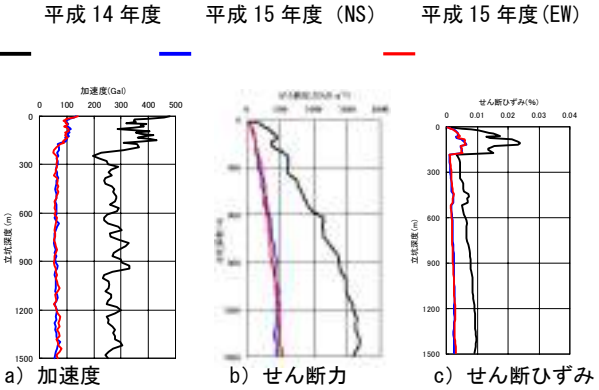


図 2.2.1-23 一次元成層地盤解析結果の比較

研究坑道の設計と施工計画については、研究所用地においてステップ 2 で新たに取得した地質環境データを基に、立坑深度 300 m までの区間を対象に再解析を実施して空洞安定性と支保設定を確認した。立坑のモデル化手法は、切羽の進行過程を模擬できる軸対称モデルと、水平方向の初期地圧の偏圧を考慮できる平面ひずみモデルを採用した。なお、掘削岩盤面から 0.8 m の範囲を発破損傷領域とみなし、変形係数を健岩部の 1/4 にした。解析手法としては、岩盤の破壊判定を桜井ら（桜井ほか，1994）による限界せん断ひずみにより判定し、破壊後の岩盤の変形係数を破壊前の 1/1,000、ポアソン比を 0.49 に設定する弾塑性解析を採用した。

平面ひずみモデルによる弾塑性解析の結果の一例を図 2.2.1-24 に示す。発破による損傷領域を設定した範囲においては、水平面内の主応力が作用する方向に直交する方向で限界せん断ひずみを越える部分が生じている。また、覆工コンクリートに発生する円周方向軸応力度については、軸対称解析時に最も条件的に厳しくなる堆積岩の GL - 150 m においても設計基準強度 (24 N mm^{-2}) の 1/2 以下が示され、覆工コンクリートの安全性は担保されていると判断できる（表 2.2.1-4）。

超深地層研究所計画の第 1 段階の調査研究（図 2.2.1-16 のステップ 1 から 4）については、平成 16 年度に現場での作業を終了し、広域地下水流動研究の成果と組み合わせて、地表からの調査により、サイトスケールからブロックスケールまでの

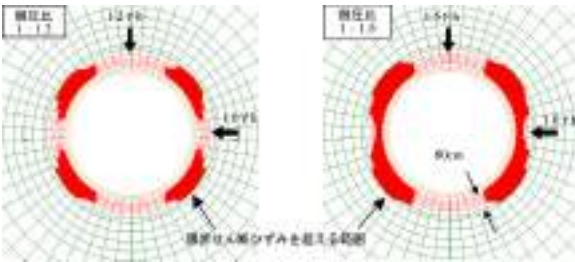


図 2.2.1-24 平面ひずみ解析結果の一例（立坑周辺岩盤のせん断ひずみ分布；主立坑 GL-150 m）

表 2.2.1-4 解析結果（主立坑の覆工コンクリートの発生応力度： N mm^{-2} ）

岩種，岩級		堆積岩			花崗岩			
		C ₁ 級			B級	C ₂ 級		
深度（m）		-75	-100	-150	-200	-250	-300	
軸対称モデル 初期地圧 1.5:1.5		2.04	7.23	11.41	1.84	4.56	3.51	
平面 ひずみ モデル	初期地 圧の 側圧 比	1.5:1.5	2.05	3.43	—	—	—	
		1.0:1.2	1.62 1.76	2.20 2.33	4.38 6.64	0.48 0.51	0.76 0.80	0.85 0.88
		1.0:1.5	2.01 2.22	2.91 3.41	5.41 8.36	0.65 0.68	0.96 1.01	1.03 1.08

地質環境を段階的に把握するための調査・解析および解析結果の妥当性を評価するための一連の技術として取りまとめる。これらの研究成果は、平成 10 年代後半を目途とされる概要調査地区の選定とそれに続く概要調査や、安全審査基本指針の策定を支援する技術基盤として反映する。また、第 2 段階の調査研究については、平成 16 年度より槽（やぐら）を用いた立坑の本格掘削を開始する予定である。

④ 地質環境の長期安定性に関する研究

地質環境の長期安定性に関する研究では、将来 10 万年程度を目安に、火成活動等のように地層処分システムの性能に著しい影響を及ぼす可能性を有する地域や地殻変動等に伴う地質環境（地下水の流動特性・地球化学特性、岩盤の熱特性・力学特性等）の変動の幅を示すための調査技術や評価手法等に係わる研究開発を進めている。これらは、概要調査地区等の選定や安全評価に資するための基盤的な研究として位置づけられ、「第 2 次取りまとめ」以降については、概要調査に求められている体系化された調査技術の開発・整備（調査技術の開発）と、地層処分システムの安全評価に反

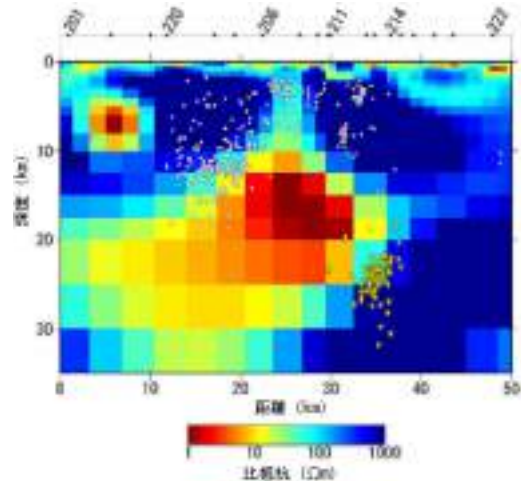
映するための将来の地殻変動・火成活動等が地質環境に及ぼす影響を予測・評価するためのモデル開発（長期予測・影響評価モデルの開発）を重点的に進めている。

調査技術の開発については、地層処分システムに重大な影響を及ぼすと想定される現象の潜在的なリスクを排除するといった観点から、地下深部の震源断層やマグマ・高温流体等を確認するための技術開発に取り組んでいる。

このうち、震源断層については、2000 年鳥取県西部地震震源域等の調査によって、地表に明瞭な痕跡を残していない震源断層によって形成された複数の線状地形が存在することを明らかにした。また、中国地方を事例としたリニアメント判読や重力異常等の地球物理データの解析の結果、鳥取県西部の潜在的な震源断層と同じ規模のものが、中国地方の他の地域に分布する可能性は小さいものと推定できた。また、地震規模が M7 クラスでありながら、活断層の長さが短く、その一部が地下に潜在している場合でも、その活動の押し引き分布に応じて、地形の相対的なアップダウンとして認識できる可能性が示された。この地形的な特徴と地域性を考慮した複合的な調査・解析により、潜在的震源断層の存在を明らかにすることが可能と考えられる。

地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術については、主に MT 法の適用性（探査深度、分解能、解析精度等）を確認するための技術開発を進めている。平成 15 年度は、地震波トモグラフィによってマグマ等の存在の可能性が指摘されている鬼首・鳴子火山周辺において、比抵抗構造の調査を行った（図 2.2.1-25）。その結果、火山下の 10 km 以深には、10 Ωm 以下の顕著な低比抵抗体が存在するが、これらはマグマや高温流体に対応すると考えられている地震波の低速度異常域と分布と整合的である。また、地殻内の微小地震発生領域の下限（約 400°C）は、観測点 206 から 222 に向かうにつれて浅くなる傾向を示し、図 2.2.1-25 の低比抵抗体の上面の形状と調和的であることから、MT 法による比抵抗構造調査は、マグマや高温流体等による地下深部の高温領域を確認するための有効な調査技術であることが示された。

長期予測・影響評価モデルの開発では、過去から現在までの変動傾向から将来を外挿する方法や現象の生起を統計的に求めて発生確率を予測する方法に加えて、現象のプロセスを考慮した数値シ

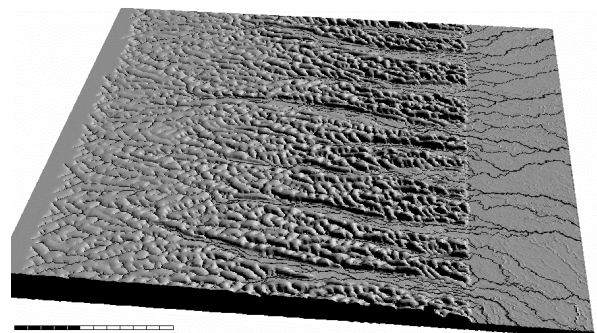


（○：微小地震，★：深部低周波微動）

図 2.2.1-25 鳴子火山下の地下 35 km までの比抵抗構造

ミュレーションモデルの研究開発を進めている。

このうち、将来の地形変化を予測するための三次元シミュレーションについては、平成 14 年度に引き続き、断層活動等を組み込んだプログラムの改良を実施した。これにより、断層変位によって隆起した地塊が時間とともに、河川による侵食を受け、丘陵地形に発達していく過程を表現することが可能となった（図 2.2.1-26）。



（5 万年後の地形陰影図，断層変位は 50 m）

図 2.2.1-26 断層変位を考慮した地形シミュレーションの例

今後は、対象地域において過去に生じた現象の規模やその影響の範囲等を定量的に把握することに重点をおいて、過去の地下水理や温度構造等を推定するため調査技術、断層破碎帯・変形帯の水理特性に係わる調査技術等を整備していく予定である。また、長期予測・影響評価モデルの開発では、将来の地形変化および気候変化に伴う広域的な地下水理や水質等の変化を予測するためのモデ

ルの統合化にも取り組む予定である。

⑤ 東濃鉱山における調査試験研究

東濃鉱山における調査試験研究は、ウラン鉱床に掘削された既存の地下坑道を利用して、昭和 61 年度に開始した。深度約 150 m までに分布する新第三紀堆積岩（瑞浪層群）が主な研究対象である。本研究は、以下に示す 2 つを目標として、東濃鉱山の既存施設や東濃ウラン鉱床などを活用して進めてきた（サイクル機構，1999）。

- ・ウラン鉱床が存在し、それを断層が横切るという地質学的特徴を活かして、堆積岩中における物質の長期的な移行・遅延挙動を評価すること
- ・坑道周辺における地質環境の長期的な変化を評価し、総合的に調査・評価するための技術を開発すること

本研究では、これまでに上記 2 つの目標達成に向けて、①ナチュラルアナログ研究、②岩盤の力学的安定性に関する試験研究、および③坑道周辺の地質環境に関する調査研究の 3 つの課題を設けて進めてきたが、ナチュラルアナログ研究以外の課題については、目標を達成したと判断し平成 15 年度末をもって東濃鉱山における調査試験研究を終了した。これらの研究成果は取りまとめた上で、超深地層研究所計画および幌延深地層研究計画へ反映していく。なお、ナチュラルアナログ研究については、今後も地質環境の長期安定性に関する研究の一環として月吉ウラン鉱床を対象に研究を進めていく。

平成 15 年度の主な成果として、ナチュラルアナログ研究において、地下水－岩石－微生物システムが実際にどの程度の還元緩衝能力を有するかを定量的に評価するため、水と岩石、および微生物を気密バイアル瓶中で反応させ、酸化還元電位（ORP）を測定する実験を行った。この実験の結果、地下水と有機質な岩石を約 28 日間反応させた結果、酸化還元電位は+100 mV 程度であったが、微生物を添加後、約 12 日間で酸化還元電位は約-350 mV まで急速に低下した（図 2.2.1-27）。このことから、東濃鉱山周辺においては地下水－岩石－有機物のみの反応では強還元環境は形成されず、ウランを保持する強還元環境の形成には、微生物との相互反応が効果的に作用する可能性が高まった。

これまでに、微生物の種組成、同位体データなどから、地層中の有機物を介した硫酸還元菌によ

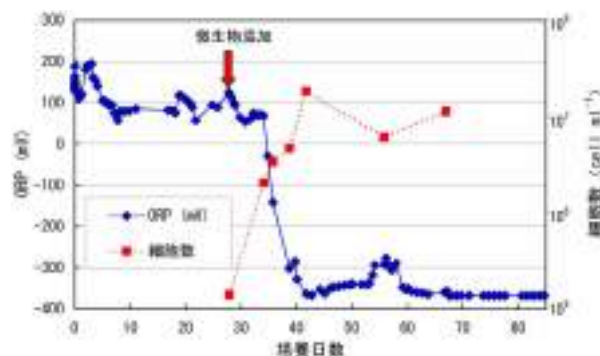


図 2.2.1-27 「水－岩石－微生物」反応試験の結果

る硫酸還元反応が還元環境の形成に関わる主要反応であると推察されている。本実験においても、開始から約 40 日後には硫化水素臭が観察された。このことより、硫酸還元菌による硫酸還元反応により強還元環境が形成されたと考えられ、従来の仮説が裏付けられた。この実験の結果から、東濃ウラン鉱床では、地下水－岩石－（有機物）微生物間の相互反応、特に微生物による還元反応が地下の還元環境を形成・維持する重要因子であることが明らかとなった。

坑道周辺の地質環境に関する研究においては、平成 14 年度に引き続き、東濃鉱山 NATM 試験坑道壁面からのレーダー計測で得られた反射面の分布および電磁波速度構造を用いて不飽和領域の評価を行うために、

- ・コアを用いた比誘電率計測（室内試験）、
- ・2本のボーリング孔を用いた孔間連続波レーダートモグラフィー計測、
- ・ボーリング孔に複数のパッカーを設置した間隙水圧計測

を実施した（升元ほか，2004）。

これらの調査・試験の結果、コアを用いた比誘電率計測により、粗粒砂岩が分布する領域において 0.05 m nsec⁻¹ 以上の電磁波速度を示す坑壁から約 2 m 以浅の領域は不飽和領域であると推定した。また、孔間連続波レーダートモグラフィー計測においては、図 2.2.1-28 に示すように、No. 2 孔と No. 3 孔の孔間で坑壁から 2 m 以浅において電磁波速度が 0.05 m nsec⁻¹ 以上の領域が認められ、地表レーダー計測から得られた電磁波速度構造と整合する結果が得られた。

さらに、複数のパッカーを設置した間隙水圧計測においても、飽和と不飽和の境界が深度 2.3～2.5 m にあることが示され、コアの比誘電率計測

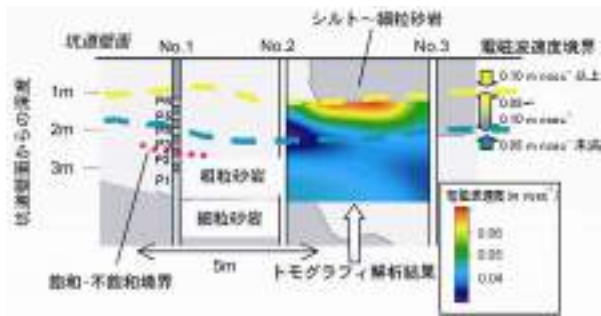


図 2.2.1-28 ボーリング孔位置とトモグラフィ解析結果

結果に基づく不飽和領域の評価と概ね整合する結果が得られた。

(2) 幌延深地層研究センター

幌延深地層研究センターにおいては、堆積岩を対象とした深地層の研究施設計画として、幌延深地層研究計画を進めている。本計画については、平成 12 年 11 月に北海道および幌延町との間で研究に関する協定を締結し、翌年 3 月に地表からの調査に着手した。本計画は、東濃地科学センターの超深地層研究所計画と同様、約 20 年の計画であり、全体を 3 つの段階（地上からの調査研究段階（第 1 段階）、坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第 2 段階）、地下施設での調査研究段階（第 3 段階））に分けて進める（サイクル機構，2001）。

① 研究の進め方

本計画の第 1 段階においては、堆積岩を対象に現有の地質環境調査技術を適用し、地表から地下深部までの地質環境を調査・把握できることを具体的に提示するとともに、これにより地質環境調査技術の適用性を確認することを目的としている。具体的には、地表から行う調査研究により取得されるデータに基づき地質環境モデル（地質構造モデル、地下水の水理モデル、地下水の地球化学モデル、岩盤力学モデル）を構築し、調査の進捗に応じて、逐次これらのモデルの更新を行う。

また、地下施設建設による地質環境の変化の予測解析を行い、これらを第 2 段階で得られる実測データを用いて確認する。

これらにより、一連の調査研究で用いた調査機器、モデル化手法を含めた体系的な地質環境調査技術を確立する。

幌延町には、研究の対象となる新第三紀の堆積

岩が広く分布しており、南北方向の軸を持つしゅう曲構造や南北系の断層構造が発達し、第四紀以降の新しい時代の活動（断層活動や地盤の傾動など）も認められる。また、地下深部には、塩水系の地下水が存在することや、地下水にガスが溶存していることが確認されている。幌延深地層研究計画では、このような地質環境の特徴を活かした研究を進めていく。

幌延深地層研究計画においては、表 2.2.1-1 で示した地層科学研究の課題項目のうち、地質環境特性に関する研究、地質環境の長期安定性に関する研究（幌延町内およびその周辺を対象）および深地層における工学技術の基礎の開発の 3 項目についての調査研究を進めている。なお、地質環境特性に関する研究については、課題をより具体化する観点から地質環境調査技術開発と地質環境モニタリング技術の開発の 2 つの項目に分けている。また、本計画においては、地層処分研究開発として、「処分技術の信頼性向上」および「安全評価手法の高度化」の 2 つの課題についても研究開発を進めている。

② 研究の現状

平成 14 年 7 月に、主たる調査研究の展開場所（2～3 km 四方程度）として、研究所設置地区を選定した（図 2.2.1-29：サイクル機構，2002b）。



図 2.2.1-29 研究所設置地区

地下施設を含む施設建設を行う研究所用地については、平成 15 年 3 月に研究所設置地区の中から幌延町市街地の北約 3 km に位置する土地を取得し、平成 15 年 7 月には、造成工事に着手した。

平成 15 年度は、地質環境調査技術開発として、地質環境のモデル化に関する情報取得などを目的に、電磁探査(AMT 法) (図 2.2.1-30)、地表地質調

査，表層水理調査，および 3 本の深層ボーリング調査（HDB-6, 7, 8 孔：深度 470, 520, 620 m；Hama et al., 2003）を実施した（サイクル機構，2002c）。その結果の例として，透水係数の深度分布を図 2.2.1-31 に示す。



図 2.2.1-30 物理探査（AMT 法）

稚内層の健岩部は透水係数が小さく，声間層では健岩部でも割れ目帯でも透水係数に大きな差がないことが明らかになりつつある。さらに，透水係数の深度依存性が確認されている。これらの調査結果を基に，地質環境モデルの更新を行った。地質構造モデルの更新例を図 2.2.1-32 に示す。

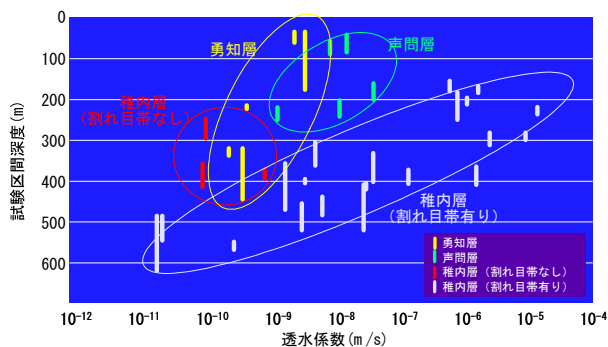


図 2.2.1-31 透水係数の深度分布

研究所設置地区に分布すると推定されている大曲断層の位置については，物理探査，地質調査，ボーリング調査の個々の調査結果からは，位置や性状に関する知見が十分には得られていないが，浅層の簡易ボーリングを利用したメタンガス調査結果（図 2.2.1-33），平成 16 年度に実施する物理探査結果などを組み合わせていくことにより，大曲断層の位置などを推定できると考えられる。

地質環境モニタリング技術の開発に関しては，平成 14 年度までに掘削したボーリング孔 5 孔のうち，4 孔（HDB-1～HDB-4 孔）に長期モニタリン

グ機器を設置し，水圧の観測を実施した。また，地質環境の長期安定性に関する研究においては，地震観測用の地震計，地殻変動観測用の GPS（Global Positioning System）観測機器，MT 観測機器を設置して観測を継続している（図 2.2.1-34）。

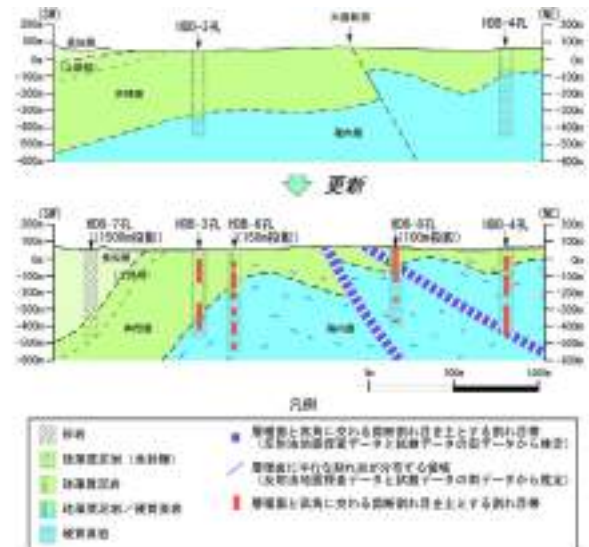


図 2.2.1-32 地質構造モデル更新の例



図 2.2.1-33 簡易ボーリングにおけるメタン濃度

これらの観測結果の例として，平成 15 年 9 月に発生した十勝沖地震の前後における HDB-1 孔観測点（図 2.2.1-34）は南東方向へ約 4cm 移動している結果が得られている（図 2.2.1-35）。

深地層における工学技術の基礎の開発においては，これまでに得られた地質環境特性に関わる情報を基に，地下施設の基本設計として，基本レイアウトの検討，空洞安定性解析（図 2.2.1-36），火災時の通気網解析を行った。

施設計画については，研究管理棟，コア倉庫・

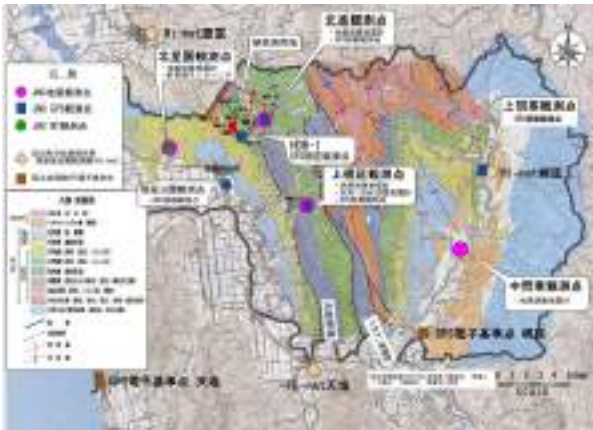


図 2. 2. 1-34 幌延町付近での観測機器の設置位置

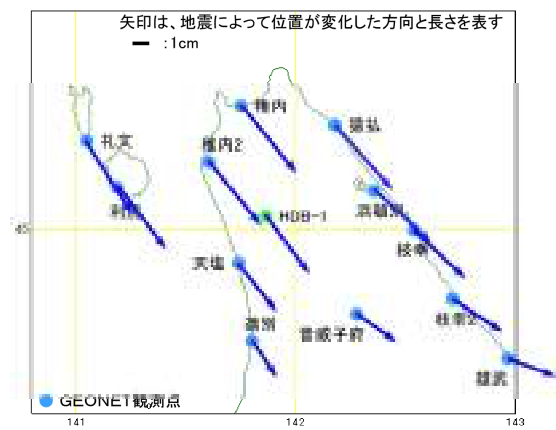
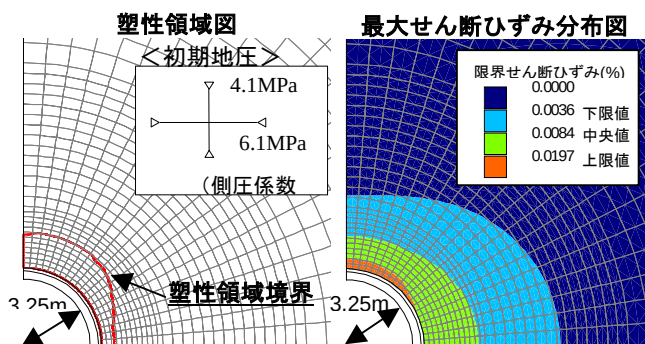


図 2. 2. 1-35 北海道北部地の十勝沖地震前後における位置の変化

<アクセス立坑（深度 340m 部）>



<水平坑道（深度 500m 部）>

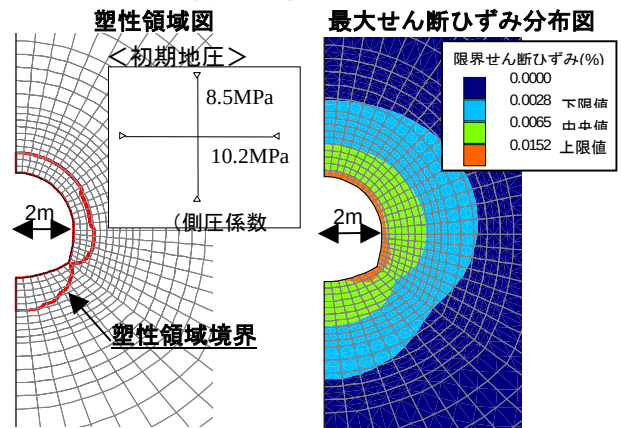


図 2. 2. 1-36 塑性領域および最大せん断ひずみ分布

ワークショップ棟に係る基本・実施設計を行うとともに、地下施設建設用地の造成工事に着手した。地下施設は平成 17 年度に掘削を開始する予定である。また、地上施設建設用地の造成工事の実施設計および地下施設建設時に発生するズリ置場の基本・実施設計を行った。

さらに、研究所設置地区において環境調査を実施した。

今後は、第 1 段階の目標である以下の 3 つを達成すべく調査研究を進め、平成 17 年度を目途にそれらの成果を取りまとめる。

- ・地表から地下深部までの地質環境データの取得
- ・地表から地下深部までの地質環境のモデル化
- ・地下施設の建設に伴う地質環境の変化の予測

参考資料

壇 一男, 渡辺基史, 佐藤俊明, 宮腰淳一, 佐藤智美 (2000) : 統計的グリーン関数法による 1923 年関東地震 (MJMA7.9) の広域強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, No. 530, pp. 53-62.

動力炉・核燃料開発事業団 (1997) : 広域地下水流動研究基本計画書, 動燃事業団技術資料, PNC TN7020 98-001.

Hama, K., Takahashi, K., Ishii, E., Takeuchi, R., Sasaki, M., Kunimaru, T. Eki, N. and Matsui, H. (2003) : Working Program for Deep Borehole Investigations - HDB-6, 7, 8 borehole -, JNC Tech. Rep., JNC TN5400 2003-002.

稲葉 薫, 三枝 博光, White, M. J., Robinson, P. (2002) : 地下水流動の予測解析統合システム (GEOMASS システム) の概要と東濃地域への適用事例, 地下水学会誌, 44, pp. 105-123.

糸魚川淳二 (1980) : 瑞浪地域の地質, 瑞浪市化石博物館専報, 1, pp. 1-50.

核燃料サイクル開発機構 (1999) : 東濃鉱山における調査試験研究基本計画書, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 99-006.

核燃料サイクル開発機構 研究開発課題評価委員会 (廃棄物処理処分課題評価委員会) (2001) : 平成 13 年度研究開発課題評価 (中間評価) 報告書 研究課題「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の全体計画」, サイクル機構技術資料, JNC TN1440

- 2001-008.
- 核燃料サイクル開発機構 (2001) : 深地層研究所 (仮称) 計画 地表から行う調査研究 (第 1 段階) 計画, サイクル機構技術資料, JNC TN1410 2001-001.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002a) : 超深地層研究所地層科学研究基本計画, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2001-018.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002b) : 幌延深地層研究計画平成 13 年度調査研究結果と研究所設置地区選定, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2002-017.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002c) : 幌延深地層研究計画平成 15 年度調査研究計画, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2002-02.
- 核燃料サイクル開発機構 (2003a) : 広域地下水流動研究年度計画書 (平成 15 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2003-004.
- 核燃料サイクル開発機構 (2003b) : 超深地層研究所計画年度報告書 (平成 14 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2003-006.
- 核燃料サイクル開発機構 (2003c) : 平成 15 年度地層科学研究情報・意見交換会要旨集, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2003-002.
- 熊崎直樹, 池田幸喜, 後藤淳一, 向井 圭, 岩月輝希, 古江良治 (2004) : 超深地層研究所計画における地表からの地質環境調査- 繰り返しアプローチに基づく調査の事例, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集, p. 807.
- Laaksoharju, M., Skärman, C., and Skärman, E. (1999) : Multivariate Mixing and Mass-balance (M3) calculations, a new tool for decoding hydrogeochemical information. *Applied Geochemistry*, 14, pp. 861-871.
- 升元一彦, 竹内真司, 藪内 聡, 渥美博行, 名児耶薫 (2004) : 堆積岩中の坑道周辺の不飽和領域を対象とした連続波レーダー調査結果の評価, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演論文集 (印刷中).
- 松井裕哉, 前田伸之, 吉川和夫 (2001) : MIU-3 号孔における力学特性調査結果および正馬様用地における土岐花崗岩体の岩盤力学概念モデル, サイクル機構技術資料, JNC TN7420 2001-001.
- Matsuzawa, I. and Uemura, T. (1967) : Geotectonic studies on the Toki Miocene sedimentary basin, central Japan, *Jour. Earth Planet. Sci.*, Nagoya Univ., 15, pp. 35-79.
- Nakano, K., Amano, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Saegusa, H., Hama, K., Kumazaki, N., Iwatsuki, T., Yabuuchi, S. and Sato, T. (2003) : Working Program for MIZ-1 Borehole Investigations, JNC Tech. Rep., JNC TN7400 2002-008.
- 大澤英昭, 中野勝志, 太田久仁雄 (2001) : 超深地層研究所計画における地表からの調査研究成果の統合化, 日本原子力学会 2001 年秋の大会予稿集, p. 918.
- 太田久仁雄, 佐藤稔紀, 小出 馨, 坂巻昌工 (2004) : 超深地層研究所計画- 地層科学研究の現状 -, 第 7 回 NUCEF セミナー講演報告文集, 日本原子力研究所研究報告書. (印刷中)
- 桜井春輔, 川嶋幾夫, 大谷達彦, 松村真一郎 (1994) : トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ, 土木学会論文集, No. 493, III-27, pp. 185-188.
- 佐々木圭一, 梅本和裕 (2004) : リニアメントによる割れ目の累積頻度の推定, 土木学会中部支部平成 15 年度研究発表会講演概要集, pp. 439-440.
- Takeuchi, S. and Ota, K. (2004) : Revised Working Programme for MIZ-1 Borehole Investigations from Phase IV, JNC Tech. Rep. (in prep)
- 山井忠世・角南基亮・小林公一 (1994) : 東濃地域を対象にしたリニアメント調査 (その 1), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; アジア航測株式会社), PNC TJ7361 94-002.
- 柳澤孝一・大澤英昭・武田精悦・高瀬博康・青山祐司・古市光昭・戸井田克・須山康宏・若松尚則・西垣 誠 (2003a) : 3 次元水理地質モデルについての不確実性解析手法の開発- 東濃地域における例題演習 -, 日本原子力学会第 19 回バックエンド夏期セミナー資料集, pp. 2. 17-1 - 2. 17-4.
- 柳澤孝一・大澤英昭・武田精悦・高瀬博康・青山祐司・古市光昭・戸井田克・須山康宏・若松尚則・西垣 誠 (2003b) : 地質環境特性評価の不確実性解析手法の東濃地域への適用, 日本地下水学会 2003 年秋季講演会講演要旨, pp. 26-31.

2.2.2 処分技術の信頼性向上

サイクル機構では、「第2次取りまとめ」以降、エントリーや海外の地下研究施設などを活用しつつ、人工バリアなどの基本特性や長期挙動に関するデータの蓄積とモデルの高度化、工学要素技術の検証、実際の地質環境に対する設計手法の適用性確認など「処分技術の信頼性向上」に関する研究開発を進めている。これらは、人工バリアの長期挙動評価などに関わる今後の重要な課題であり、関連する個別現象や連成現象の理解を、実際の地質環境への適用性を検討しつつ進め、ニアフィールド環境の時間的変遷をより現実的に把握することを通じて、地層処分システムの長期挙動評価の信頼性のさらなる向上につなげていく。

1) 研究開発課題と進め方

地層処分で想定される現象は、処分後すぐに発生するもの、数百年後、あるいは数千年後以降に想定されるものなど、時間の経過に応じて変化していく。例えば、処分後100年程度では、ガラス固化体の有意な発熱による影響とともに過渡的な緩衝材の再冠水や酸化条件下でのオーバーパック材の腐食、緩衝材の変形などが、1,000年程度までは、緩衝材の飽和や還元条件下でのオーバーパック材の腐食、緩衝材の変形・流出・変質（セメントや金属の腐食生成物が関与するベントナイトの溶解、変質）などが想定される。さらに、1,000年以降では、オーバーパック破損後のガラス固化体の溶解・変質、緩衝材の変形・変質、ガスの透過（金属腐食にともなって発生するガスの緩衝材中および岩盤中の透過）などが想定される。

これらの現象は、人工バリアシステムにおいて部分的あるいは全体的に互いに影響を及ぼし合うものと考えられる。より現実的な評価のためには、個別の現象理解に基づくモデルを連成させた解析が求められる。

「処分技術の信頼性向上」では、上述したような個別／連成現象の評価手法および関連する工学技術の信頼性向上を目指し、以下の4つの課題を設定して研究開発を進めている（図2.1-2参照）。

・人工バリアの基本特性データベースの整備

オーバーパック材および緩衝材の基本特性データの拡充を図り、長期挙動評価の信頼性向上に資するとともに、技術基準の基盤となる性能保証に

係わる知見などを整備する。

・人工バリア等の長期複合挙動に関する研究

ニアフィールド（周辺岩盤も含む）での複合現象について、実験データなどに基づく現象理解を深めるとともに、モデル・評価手法の高度化およびこれらの妥当性や信頼性確認に関する情報を蓄積する。

・人工バリア等の工学技術の検証

工学技術としての閉鎖性能に関わる試験・検証と低アルカリ性コンクリート材料の施工性開発を行い、人工バリア性能に関わる工学要素技術の信頼性向上を図る。

・設計手法の適用性確認

実際の地質環境に関する情報に基づき、処分技術に関わる設計手法の適用性を検討するとともに、設計の観点から地質環境の調査における留意点などを整理する。

これらの研究開発は、エントリーを中心とした実験室スケールや工学スケールの室内試験を通じた基礎データ取得やモデル開発とあわせて、幌延の深地層の研究施設や海外の地下研究施設を活用し、実際の地質環境への適用性も確認しつつ進めていく。また、地層処分システムの長期挙動評価の信頼性向上のためには、基本理論や基本定数などを用いて現実的な予測結果を示す数値実験技術の開発やナチュラルアナログ研究を活用して室内や地下研究施設における試験ではカバーできないような長期データの蓄積を行う。

2) 各研究開発課題の計画および成果の現状

以下に研究開発項目ごとに当面の計画と平成15年度の成果の概要を示す。

(1) 人工バリアの基本特性データベースの整備

オーバーパック候補材料（炭素鋼および代替材料であるチタン／銅）の腐食に関わるメカニズムや長期腐食速度などの基本データを拡充し、腐食寿命評価の信頼性を確認するとともに、緩衝材基本特性データを拡充し、緩衝材設計の信頼性を向上させる。また、技術基準の基盤となる性能保証に係る知見と評価手法およびデータベースなどを整備する。

① オーバーパックの基本特性

[炭素鋼オーバーパックの腐食挙動に関する研究]

炭素鋼オーバーパックに関しては、「第2次取りまとめ」における評価の長期的な信頼性を確認するための検討を継続し、長期試験概念の検討や腐食生成物による腐食への影響、支保工材料のセメントによる腐食への影響、緩衝材仕様の腐食への影響を把握するための検討を行った。

平成15年度は、これまでに行ってきた還元性雰囲気での腐食試験結果を取りまとめ、長期的な腐食速度と腐食生成物について検討した（谷口ほか，2004a）。還元性雰囲気における緩衝材中での腐食速度は、80℃と50℃の温度条件において後者で腐食速度が大きい結果が得られ、表面に形成される皮膜の保護性の違いによるものと推察された。また、マグネタイト（2価と3価の鉄イオンの化合物）共存下での腐食機構解明に資するための実験的検討を行い、マグネタイトの3価鉄/2価鉄比をパラメータとした試験により、この比が2前後において腐食速度の程度（図2.2.2-1）や水素発生反応への寄与の程度（図2.2.2-2）が変化することがわかった（谷口ほか，2004b）。

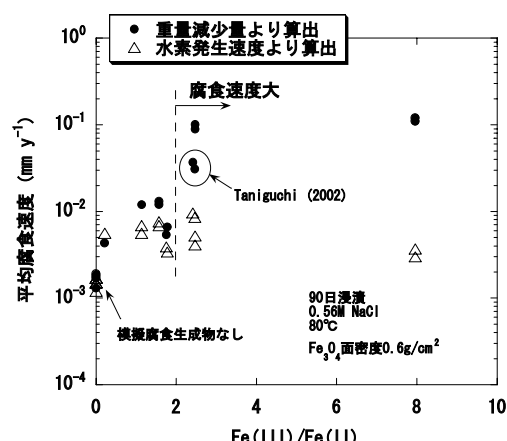


図2.2.2-1 模擬腐食生成物中3価鉄/2価鉄比と炭素鋼の平均腐食速度の関係

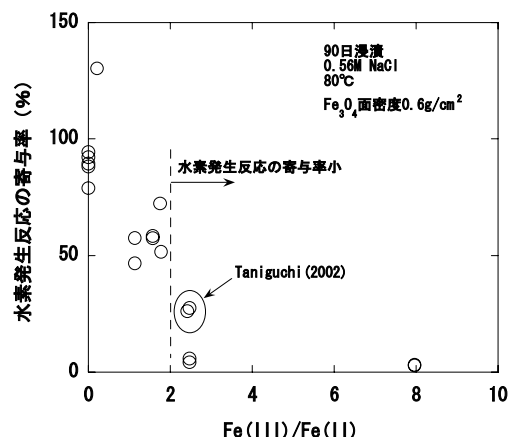


図2.2.2-2 模擬腐食生成物中3価鉄/2価鉄比と水素発生反応の寄与率の関係

[代替オーバーパック材料の腐食挙動に関する研究]

代替オーバーパック材料として、チタンおよび銅に関する検討を行っている。

チタンに関しては、長期の試験を継続し、試験期間2年までの試験データに基づき、このデータより平均腐食速度が $10^{-2} \sim 10^{-1} \mu\text{m y}^{-1}$ と見積もられた（鈴木ほか，2004）。また、長期的な水素侵入挙動の検討として電気化学的な加速試験を行い、加速の度合い（印加電流密度）が小さいほどチタンの水素吸収量は大きく、より内部まで水素が侵入することがわかった。

銅に関しては、酸化性雰囲気における腐食速度、腐食局在化および腐食挙動に及ぼす環境条件の影響を検討した（川崎ほか，2004）。腐食速度については、塩化物イオン濃度、炭酸水素イオン濃度などによる影響に関する試験データを取得した。また、酸化性雰囲気における腐食局在化に関する試験を行い、最大腐食深さの進展が短期間で抑制されること、孔食係数は腐食の進展とともに小さくなる傾向があり、ベントナイトスラリー中では水溶液中よりも孔食係数が小さな値となることがわかった。また、今回の試験により得られた孔食係数は、既往の土壤中で観察される値の範囲を超えるような顕著な腐食局在化は観察されなかった（図2.2.2-3）。

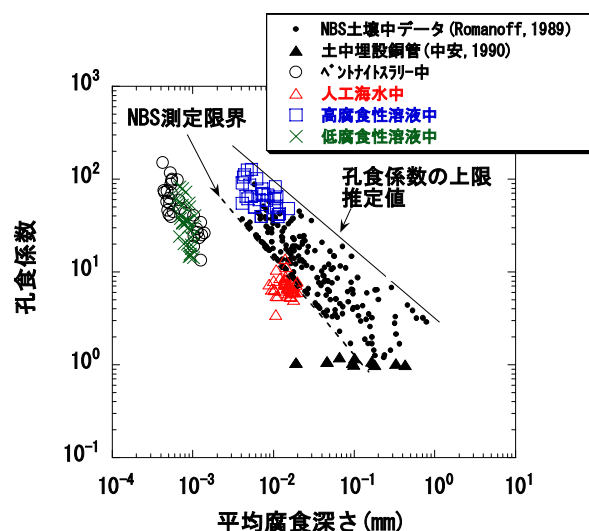


図2.2.2-3 純銅の平均腐食深さと孔食係数の関係

② 緩衝材の基本特性

「第2次取りまとめ」までに、降水系地下水条件下における人工バリア設計や各種解析上必要と

なる緩衝材の基本特性データを主に取得してきた。「第2次取りまとめ」以降は、実際の地質環境条件を考慮した熱や水質の違いによる基本特性への影響などの把握を目的としてデータの拡充を行っている。また、国による安全基準・指針の策定への反映として、関係式の一般化や測定手法の標準化に関する基盤情報の整備を進めるとともに、緩衝材の基本特性データベースの構築を進めている。

膨潤特性に関しては、圧縮ベントナイトの縦横比依存性（スケール効果と呼ぶ）による膨潤応力への影響を把握するために、圧縮成型時に発生する残留応力を除荷した供試体を用いて影響確認試験データの拡充を行い、スケール効果によって膨潤応力が変化することを確認した。飽和水理特性に関しては、塩濃度をパラメータとした海水系地下水の影響に関するデータの拡充を行った。その結果、塩濃度が高くなると固有透過度は大きくなる傾向を示し、ある一定濃度以上では固有透過度は一定の値となる傾向を示すことが分かった（図2.2.2-4）。熱特性に関しては、異なった測定手法により得られたデータの比較検討を行うとともに、解析上必要となる比熱と含水比の関係を定式化した（菊池・棚井，2003a）。また、緩衝材の基本特性データ集として、平成15年度末までに取得されたデータをサイクル機構技術資料として取りまとめた（菊池・棚井，2003b）。

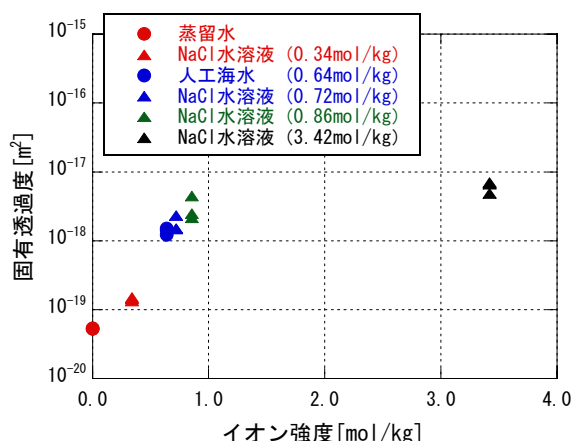


図 2.2.2-4 イオン強度と固有透過度の関係

③ 人工バリアの性能保証に関する基盤情報整備

本課題では、国による安全基準・指針などの策定および実施主体が進める処分事業へ資することを目的として、人工バリアの性能保証に関する基盤情報の整備を進めている。また、幌延深地層研究計画に向けた検討として、人工バリア性能確認

モニタリングおよび人工バリアの搬送・定置に関わる検討を行っている。

処分場の長期的安全性の確保に関する検討では、処分場を構成する各要素について、これまでの検討により抽出した性能保証項目、具体的保証（評価）方法、課題に加えて、サイクル機構における具体的取り組み状況を整理した（川上ほか，2004；栗原ほか，2004）。人工バリアの性能確認モニタリングに関わる検討では、既往の計測技術の調査・整理を行い、幌延における原位置試験に向けた概略的な開発計画を策定した。人工バリアの搬送・定置に関わる検討では、緩衝材ブロックの定置精度に着目し、ブロックのすき間が人工バリアの長期挙動に及ぼす影響を確認するために、隙間膨潤に関するデータ取得試験を行った（杉田ほか，2003）。また、「第2次取りまとめ」以降における隙間に関わる膨潤特性、力学特性、透水特性、熱影響および腐食影響に関する成果を整理し、人工バリア性能への影響について取りまとめた（杉田ほか，2004）。

(2) 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究

人工バリア変形・変質等の長期挙動（緩衝材／岩盤の力学的変形挙動、緩衝材の流出・侵入挙動、人工バリアの変質・劣化挙動）に関する基礎データを拡充し、モデルの信頼性を確認するとともに、長期的な熱-水-応力-化学連成挙動に関する予測技術（数値実験手法）を構築し、設計の妥当性や核種移行の場の変遷を記述する技術基盤を構築する。また、人工バリア性能維持限界条件の把握を目的として、緩衝材中のガス透気回復挙動および人工バリアのせん断応答挙動に関する研究を行う。さらに、人工バリア等の相互作用や変質に関するナチュラアナログ研究を行い、長期健全性評価の妥当性に関わる情報を蓄積する。

① 人工バリア等の変形・変質等の長期挙動に関する研究

[緩衝材／岩盤の力学的変形挙動に関する研究]

緩衝材の長期力学挙動については、緩衝材の評価に適したモデルを既存モデルの体系的整理や室内要素試験のシミュレーション解析結果などから再選定し、選定された力学評価モデルを用いてオーバーパック支持性能や応力緩衝性能の再評価を行っている。また、模型試験により、縦置き方式におけるオーバーパック自重沈下やオーバーパッ

ク軸方向の腐食膨張に対する支持性能の評価を行っている。平成 15 年度は、緩衝材の長期力学挙動評価モデルとして選定した 2 つのモデル（関口・太田モデルおよび足立・岡モデル）を用いて室内要素試験のシミュレーション解析を実施した。その結果、全ての室内要素試験を 1 組のパラメータで評価することが困難であることが分かった。そこで、室内要素試験の結果に基づいて緩衝材の長期力学挙動を評価するために必要なパラメータを複数設定した（平井ほか，2004a）。また、長期圧密試験結果（図 2.2.2-5）からパラメータを設定してオーバーパックの沈下予測を行った結果、約 100mm/1 万年の大きな沈下となった（平井ほか，2004b）。腐食生成物によるオーバーパックの体積膨張を考慮することなどにより、評価上の保守性を合理的に取り扱うことができるよう検討していく。

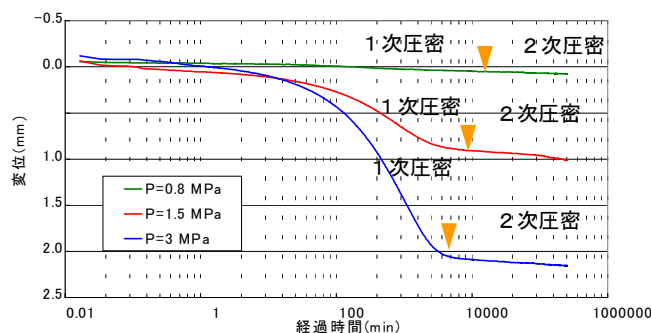


図 2.2.2-5 長期圧密試験結果

岩盤の力学的変形挙動については、評価の信頼性向上のために、主に軟岩を対象として、岩盤の変形特性に関わる環境（熱の作用や含水状態の変化）や、拘束圧（支保や人工バリアからの反力）の依存性に関する基礎データを取得し、それらの影響評価や予測モデルの検証に反映することで、ニアフィールドで想定される実現象に即した評価を目指している。また、地層処分では長期安定性を考慮する必要があることから、短期で実施された室内試験の外挿手法を整備し、岩盤の長期変形挙動評価手法の体系化を図っている。平成 15 年度は、ナチュラアナログ的アプローチによるニアフィールド岩盤の力学挙動外挿概念の一例を、地圧測定結果の検証を踏まえて提案した。その結果、空洞掘削後の岩盤中の主応力比が、およそ 1~4 の範囲に入れば時間依存性挙動は収束に向かい、それ以降長期（数万年）にわたって安定を保持する可能性が高いことが推察された。また、幌延の稚内

層（硬質頁岩）において、室内試験結果の限られたデータであるが、2MPa 以上の拘束圧において短期のうちに変位が収束し、延性的な傾向になることを確認した。さらに、岩盤-緩衝材の相互作用解析結果より、ニアフィールド岩盤の長期変形挙動は、拘束圧（緩衝材や支保工からの反力）に依存し、緩衝材設置後初期の段階においては顕著であるが、時間の経過とともに徐々に収束傾向を示すこと（図 2.2.2-6）、提案した地圧現象の調査による長期への外挿概念は、コンプライアンス可変型モデルで概ね再現できることを確認した。

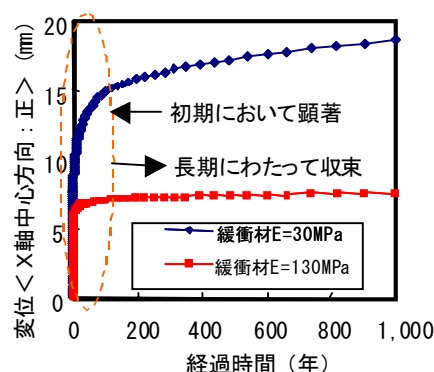


図 2.2.2-6 変位の経時変化

[緩衝材の流出・侵入挙動に関する研究]

緩衝材の流出・侵入挙動については、「第 2 次取りまとめ」までに把握された降水系地下水条件下における基本的な挙動を踏まえ、実際の地質環境条件を考慮したデータの拡充や侵入現象モデルの構築を進めている。

侵入現象については、海水系地下水を用いて時間と侵入距離の関係についてデータの拡充を行い、海水系地下水では亀裂への侵入が降水系地下水よりも極端に小さくなることを確認した。また、亀裂幅 1.5mm における単一平板模擬亀裂中への比例係数の実験式を得た。さらに、X 線 CT (Computed Tomography) による亀裂侵入ベントナイトの密度分布の測定を試み、概略的に侵入ベントナイトの密度分布を把握した（松本・棚井，2004）。侵入距離と乾燥密度分布の測定例を、図 2.2.2-7 に示す。侵入現象のモデル化では、モデルの精度向上および妥当性を検討するために、侵入現象試験によって得られた密度分布の測定結果との比較を行い、感度解析による固相拡散係数の見直しと再解析を実施した（図 2.2.2-8）。その結果、測定結果と解析結果とで整合性がある粘度評価式を得た。浸食

現象については、流速と緩衝材の浸食量の関係を定量的に評価するために、流速とベントナイトコロイドの浸食濃度の測定を実施した。その結果、平均流速 $2 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ の条件で、緩衝材を起源とするベントナイトコロイドの生成濃度は、約 3ppm 程度であることを把握した。

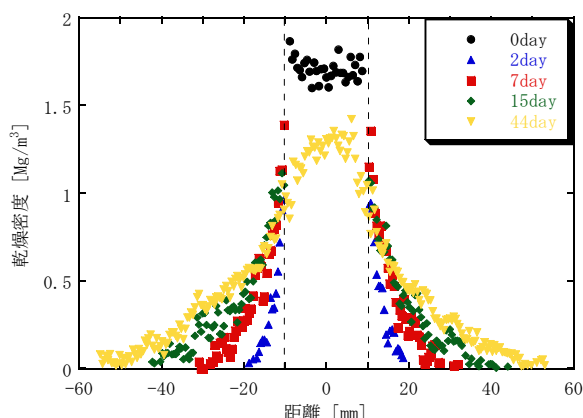


図 2.2.2-7 侵入距離と乾燥密度分布の関係
(供試体寸法： $\phi 20 \times H20\text{mm}$ ，
亀裂開口幅：供試体高さの 3%)

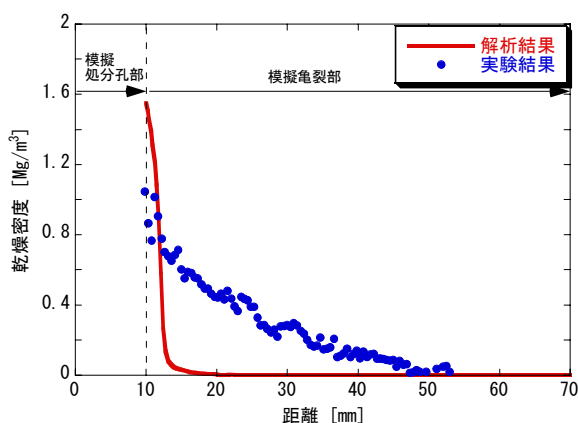


図 2.2.2-8 実験結果と解析結果の比較（固相
拡散係数見直し後における評価）

[人工バリアの変質・劣化挙動に関する研究]

人工バリア材の変質等の長期挙動に関する研究としては、オーバーパックの腐食生成物とセメント材料の利用による高アルカリ環境が緩衝材の長期健全性に及ぼす影響について検討を行っている。また、国内の粘土科学の専門家からなる評価委員会を設置し、緩衝材の長期安定性評価に関する課題の抽出・整理を進めている。

鉄腐食生成物との相互作用に関しては、天然事例および室内試験結果により、実際の処分で想定される環境下でスメクタイトの鉄型化の発生可能性が高いことが示めされた（笹本ほか，2004）。そ

のため、鉄型化したスメクタイトの長期的な変質挙動を明らかにするため、高温での加速試験を開始した。高アルカリ条件でのスメクタイトの溶解挙動に関しては、精製スメクタイトを用いたバッチ式試験により、スメクタイトの溶解プロセスや溶解速度が明らかになった。緩衝材の長期安定性に関しては、「第 2 次取りまとめ」以降の緩衝材の変質に関する最新の研究事例も踏まえ、処分環境下で発生する可能性のある変質シナリオを考慮した長期安定性評価フローを作成した。このフローに従い、現状の技術的知見を基に緩衝材の長期安定性について概略的な評価例を示した（柴田ほか，2004）。

② 熱-水-応力-化学連成挙動に関する研究

処分場閉鎖後のニアフィールドでは、熱、水、応力、化学の個々の現象が互いに影響を及ぼし合うことが予想される。そこで、より現実的な予測を行うために、これら連成挙動の数値実験を目指した熱-水-応力-化学連成現象数値解析モデルの開発と、国際共同研究などを活用したモデルの検証および高度化を進めている。

平成 15 年度は、国際共同研究を通じた連成モデルの検証、実験結果との比較による確証に関する取り組みを継続すると共に、人工バリア定置後に想定されるニアフィールドの連成挙動を定量的に把握することを目的に、エントリーの連成試験設備 COUPLE にて連成挙動に関する室内試験を実施した。連成試験設備 COUPLE における熱-水-応力-化学連成挙動に関する室内試験については、予察解析として実施した熱-水連成解析およびモルタル-水反応の解析を通じて、試験結果の解釈に取り組んでいる（鈴木ほか，2004）。熱-水-応力-化学連成モデルの開発については、既報の連成モデルを用いたニアフィールド連成挙動の事例解析、および連成モデルの高度化に関して取り組んだ（伊藤ほか，2004）。高度化したモデルを用いてニアフィールドの熱-水-化学連成挙動の事例解析を実施し（図 2.2.2-9）、緩衝材中の最高温度、緩衝材の再冠水時間、人工バリア定置後 1,000 年の緩衝材間隙水の pH の解析結果について「第 2 次取りまとめ」と比較し、概ね整合していることを確認した。

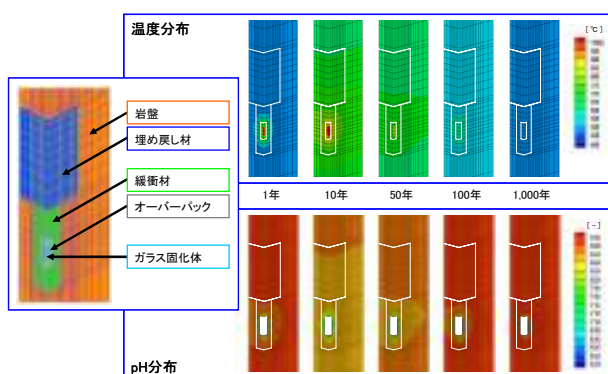


図 2.2.2-9 ニアフィールド連成挙動の事例解析結果

③ 人工バリア性能の維持限界条件に関する研究 [緩衝材ガス透気回復挙動に関する研究]

緩衝材中のガス移行挙動については、緩衝材の長期力学的安定性や核種移行に影響を及ぼすことが考えられることから、その影響の度合いを定量的に評価することが重要となる。このため「第2次取りまとめ」までの評価の信頼性を確認するため、わが国の幅広い地質環境条件を考慮したデータの拡充を行うとともに、現象のより詳細な把握に基づいたガス移行モデルの開発を目指して研究を進めている。

平成15年度は、海水系地下水条件下におけるデータの拡充を開始するとともに、X線CTによるガス移行挙動の可視化研究を継続した。その結果、図2.2.2-10に示すように、ガス供給開始でのCT値に対して95日後のCT値では、低下した箇所がかなり多く、密度の低下領域が増大していることが分かる。X線CTにより、緩衝材中のガス移行挙動に関わる情報の入手が可能であることが分かった。また、ガス移行モデルの開発については、GAMBITやその他諸外国におけるモデルの開発状況を踏まえつつ、現状で適用可能と考えられるモデルの検討を行った(棚井・山本, 2003)。その結果、現状で適用可能と考えられるモデルとして、GAMBIT-GWSモデル、改良型TOUGH2コードなどを選定した(図2.2.2-11)。なお、両モデルに関しては、課題も残されていることから、試験結果との比較検討を継続して進めていく。

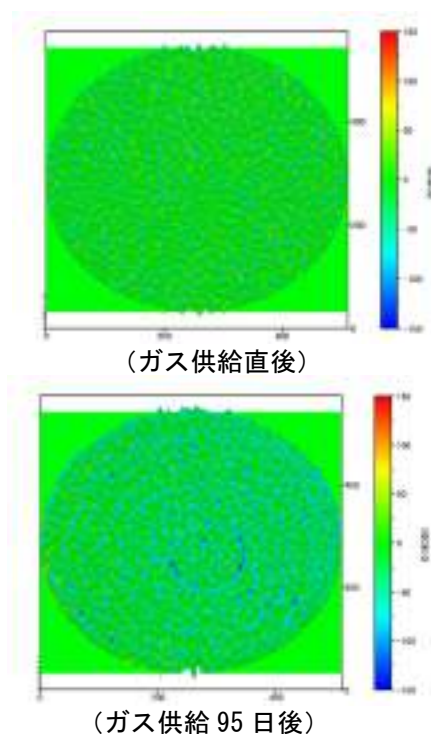


図 2.2.2-10 CT 値分布 (赤:CT 値大⇄青:CT 値小)

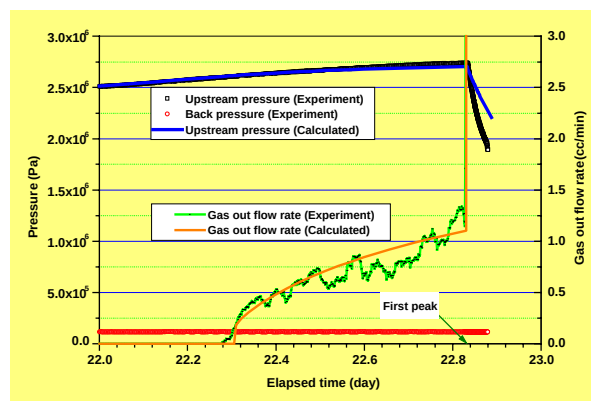


図 2.2.2-11 Kozeny-Carman モデルを付加した TOUGH2 コードによるシミュレーション例 (Tanai and Yamamoto, 2003)

[人工バリアせん断応答挙動に関する研究]

わが国の地層処分安全確保方策では、地層処分システムに著しい影響を及ぼす可能性のある断層活動などの天然現象については、サイト選定によってその影響を避けることを基本としている。しかし、C級活断層(変位速度0.01m/1000年オーダー)など、未確認のものが存在している可能性もある。このため、人工バリアの頑健性を明らかにし、安全機能の裕度を示す観点から、断層を模擬した模型試験とシミュレーション解析により、

人工バリアの挙動把握を試みている。

平成 15 年度は、人工バリアへの断層影響を評価する場合に対象とすべき断層挙動を既往の研究および専門家の意見を参考に設定した。また、平成 12 年度と平成 14 年度に実施した模型試験に対する解析において、修正 Cam-Clay モデルを適用することにより、試験結果から得られたせん断挙動をある程度説明することが可能となった(図 2.2.2-12)。

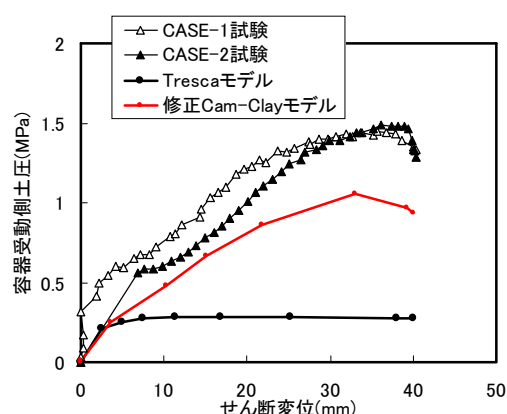


図 2.2.2-12 容器に作用する土圧増分とせん断変位

④ 人工バリア等のナチュラルアナログ研究

処分環境に類似した天然現象を研究するナチュラルアナログ研究として、「第2次取りまとめ」以降、人工バリア材の長期健全性評価に資するデータ取得を目的として、土中に長期間埋没していた天然ガラスや鉄製遺物の変質・腐食、ベントナイトの変質や粘土中の核種移行に関する研究、およびそれらを補完する室内試験を行っている。この際、処分環境との類似性の把握に重点をおき、試料の履歴や保存環境の分析を同時に行っている。

平成 15 年度は、平成 14 年度に引き続き、ガラスの溶解変質に関して、火山ガラス（凝灰岩類）を対象試料としたガラスの変質についての調査を継続した。その結果、火山ガラス組成が温度 70℃での化石海水との反応によりモンモリロナイトおよび斜ブチロ沸石に変質した事例が確認された。金属の腐食に関しては、地中に埋没していた鉄器の腐食について X 線 CT による調査を継続した (Yoshikawa et al., 2003)。また、大気と遮断された約 1,500 年前の地下式横穴墓から出土した鉄遺物の腐食量と周辺土壌の分析を実施した。この鉄遺物は、長期にわたり弱酸化雰囲気中に埋蔵され、土壌は塩化物イオンなどの腐食性イオン濃度が中

程度で腐食性の弱い環境であることがわかった。表面はマグネタイトを主とする錆に覆われ、孔食が生じていたが、1,500 年間の腐食量は、最大孔食深さで 2 mm であった(図 2.2.2-13)。土壌の腐食性イオン濃度が中程度であれば、弱酸化雰囲気では酸化雰囲気に比べて腐食速度が抑制され、個これまでの調査事例では、1,000 年間の腐食量が 10 mm を超える例は認められない。

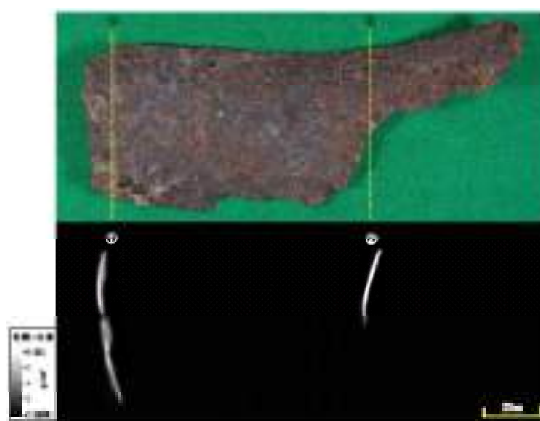


図 2.2.2-13 短甲片の外観（上）と X 線 CT 画像

(3) 人工バリア等の工学技術の検証

海外の地下研究施設を活用した閉鎖性能試験やコンクリート材料（低アルカリ性コンクリートなど）の改良などに関する試験・検討を行い、人工バリア性能等に関わる工学要素技術の信頼性向上を図る。

① 閉鎖技術の検証試験

「第2次取りまとめ」で示した閉鎖技術の構成要素のうち粘土プラグおよびコンクリートプラグに着目した検証試験を通じた閉鎖性能に関するデータ取得、閉鎖に関わる構成要素（埋め戻し材、プラグ、グラウトなど）を考慮した閉鎖シナリオの検討などを行っている。

平成 15 年度は、閉鎖技術の検証試験としての実規模原位置試験、および閉鎖要素の要件の検討を実施している。実規模原位置試験では、注水試験に引き続き、トレーサ試験、加熱試験を実施してきており、実規模プラグが止水性能を発揮しているデータ（湧水量など）を継続して取得した(図 2.2.2-14)。一方、閉鎖要素の要件の検討に関しては、平成 14 年度までの成果に基づき、埋め戻し材の隙間充填性能に関わる具体的なデータ（有効粘土密度と隙間充填量との関係）の取得を進めた。

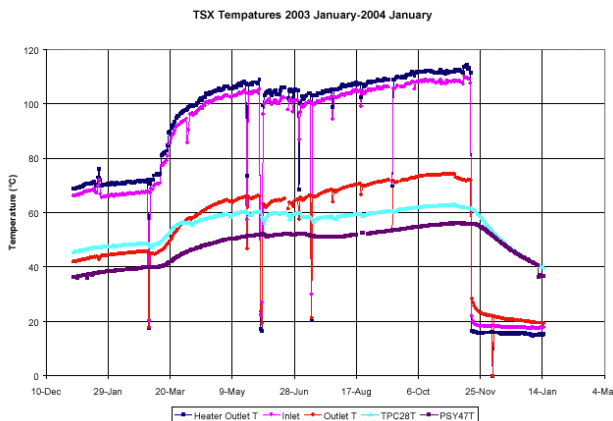


図 2.2.2-14 ヒータおよび坑道内の温度

② 人工材料の開発

「第2次とりまとめ」では、セメント系材料に起因する高 pH 溶液の緩衝材や岩盤などへの影響を考慮し、坑道支保工である普通セメントの代替材料として低アルカリ性コンクリートを推奨している。このことから、サイクル機構では pH11 以下を目標とした低アルカリ性セメント HFSC (Highly Fly-ash contained Silicafume Cement) の開発を行っている。開発課題として、①施工性の確認、②目標品質の達成、③品質変動の把握、④耐久性の評価の 4 項目を設定し、幌延の深地層の研究施設計画における原位置での施工性等の確認に向けた開発を行っている。

平成 15 年度は、目標品質の達成として、HFSC の pH 低下挙動を測定し、20℃の粉体浸漬条件で 11.5 付近まで 5×10^{-3} /日の割合で低下するが、これ以降の低下速度はこの 1/10 程度と緩慢になり、平成 15 年度の測定では目標とする 11 以下の確認には至っていない (図 2.2.2-15)。20℃のブロック浸漬条件での pH 低下速度は粉体浸漬条件より遅く、pH12.4 ~ 11.7 の範囲で約 9×10^{-4} /日となっている。pH の低下挙動については、常温では pH 低下に時間がかかり、観察困難であることが今年度判明した。そこで、解析に必要な定数を求める要素試験を行って、その信頼性を高めることにした。また、HFSC の透水性の調査として、吹付けコンクリートコアの透水性試験を行い、普通ポルトランドセメント OPC と同等であることを確認した。品質変動の把握では、硬化後の圧縮強度については問題ないが、硬化前のコンクリートの流動性等の変動が大きく、十分な品質管理が必要であることがわかった。

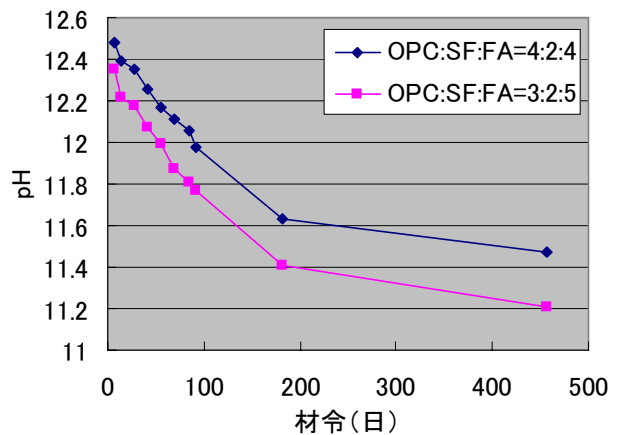


図 2.2.2-15 粉体浸漬における HFSC の pH 挙動

③ 幌延地下水環境下における緩衝材等の力学特性

幌延の深地層の研究施設では人工バリアの長期挙動に関する原位置試験が計画されており、試験で用いる緩衝材の仕様 (密度、ケイ砂混合率など) を検討するために、幌延で採取された地下水や、NaCl 水溶液を用いた室内試験を実施し、幌延の原位置試験で想定される海水系地下水環境での緩衝材の力学挙動を把握する。また、人工バリアの長期挙動の予測手法の適用性を確認するために、室内試験の結果を用いてオーバーバックの沈下挙動などの解析を実施する。このような成果を蓄積することにより、「第2次取りまとめ」に示された人工バリアの設計手法の海水系地下水環境への適用性について確認し、必要であれば設計手法の見直しを行う。

平成 15 年度は、幌延のボーリング孔 HDB-6 の深度 GL-300m 付近で採取された地下水と 2 種類の濃度の NaCl 水溶液を用いてベントナイト混合材料の力学特性試験を行い、一軸圧縮試験では降水系地下水条件と比較して強度、剛性が 2 割程度低下するなど、力学特性を概略的に把握した (図 2.2.2-16)。

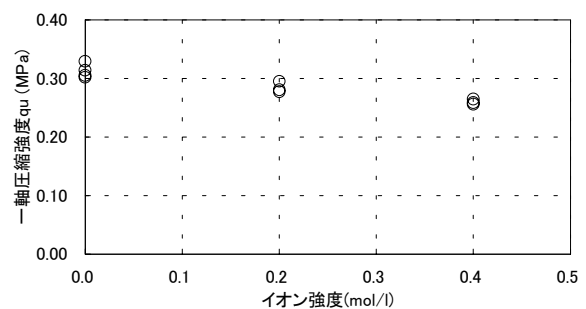


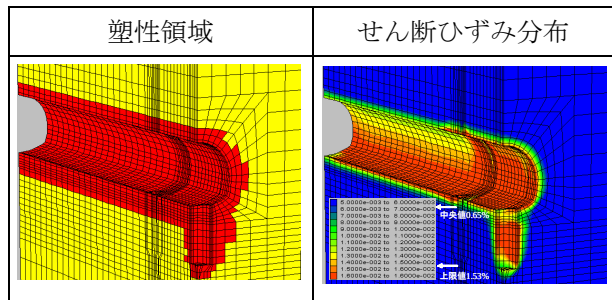
図 2.2.2-16 一軸圧縮強度とイオン強度の関係

(4) 設計手法の適用性確認

「第2次取りまとめ」では、わが国の幅広い地質環境を想定して設計を行い、技術的実現性を提示した。「第2次取りまとめ」以降においては、実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認が研究開発目標としてあげられている。この目標に対してサイクル機構では幌延の深地層研究施設の地質環境を対象として人工バリアなどの設計手法の適用性確認を行う計画としている。

平成15年度は、平成14年度の成果を踏まえ、実際の地質環境を条件として人工バリアなどの設計を行うとの観点から「第2次取りまとめ」における設計全体のフローを見直すとともに、人工バリア設計フローを設定した(栗原ほか, 2004)。また、人工バリアなどの設計に必要な地質環境データの抽出を行った。さらに、人工バリア設置環境に大きな影響を及ぼすコンクリート支保工の有無の検討として、幌延の現時点での地質条件(3.4.2 3)を参照)を用いて掘削時の力学安定性評価を行った。この結果、幌延地区に分布する堆積軟岩では、深度とそれに応じた地山条件によって、試験孔にコンクリート支保工が必要な場合もあることがわかった(図2.2.2-17)。

<深度 500m・無支保>



<深度 570m・無支保>

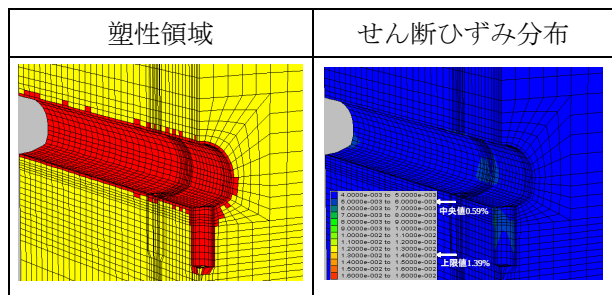


図 2.2.2-17 処分孔が無支保の場合の解析結果

参考文献

- 平井 卓, 棚井憲治, 菊池広人, 重野喜政, 並河 努, 高治一彦, 大沼 敏 (2004a): 緩衝材長期力学挙動評価モデルの検討, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-034.
- 平井 卓, 棚井憲治, 菊池広人, 高治一彦, 大沼 敏 (2004b): 緩衝材のオーバーパック支持力性能に関する検討, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-031.
- 伊藤 彰, 川上 進, 油井三和 (2004): 高レベル放射性廃棄物地層処分におけるニアフィールドの熱-水-応力-化学連成モデル/解析コードの開発, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-032.
- 川上 進, 油井三和, 栗原雄二, 神徳 敬, 杉田 裕 (2004): 人工バリア等の性能保証に関わる研究のサイクル機構における取り組み, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-037.
- 川崎 学, 谷口直樹, 川上 進 (2004): 大気吹き込み下での模擬地下水における純銅の腐食速度と腐食局在化, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-041.
- 菊池広人, 棚井憲治 (2003a): 緩衝材の熱物性測定試験(Ⅲ)一面熱源法による緩衝材の熱物性取得一, サイクル機構技術資料, JNC TN8430 2003-009.
- 菊池広人, 棚井憲治 (2003b): 緩衝材の基本特性データベース, サイクル機構技術資料, JNC TN8450 2003-010.
- 栗原雄二, 藤田朝雄, 川上 進, 神徳 敬, 油井三和, 杉田 裕 (2004): 人工バリア等の性能保証に関わる研究のサイクル機構における取り組み(その2), サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-053.
- 栗原雄二, 油井三和, 棚井憲治, 川上 進, 杉田 裕, 谷口直樹, 平井 卓, 小川豊和, 青柳茂男, 松井裕哉, 藤島 敦, 中山 雅 (2004): 幌延の地質環境を条件とした人工バリア等の設計検討, サイクル機構技術資料, (登録準備中).
- 松本一浩, 棚井憲治 (2004): 緩衝材の流出/侵入特性, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-035.
- 中安静雄 (1990): 水道用として長期間土中埋設使用した銅管の調査結果, 伸銅協会研究誌, Vol. 29, p. 87.
- Romanoff (1989): Underground Corrosion, originally issued by NBS in 1957, reprinted by NACE in 1989.
- 笹本 広, 陶山忠宏, 柴田雅博 (2004): 鉄粉-ベントナイト反応に関わる室内試験, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-047.
- 柴田雅博, 笹本 広, 神徳 敬, 油井三和 (2004): 緩衝材の長期安定性評価技術の現状, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2004-010.
- 杉田 裕, 菊池広人, 棚井憲治 (2003): 人工バリアにおける緩衝材の隙間膨潤挙動に関する基礎研究(Ⅱ), サイクル機構技術資料, JNC TN8430 2003-007.
- 杉田 裕, 川上 進, 谷口直樹, 油井三和 (2004): 要素試験に基づく隙間共存下におけるブロック緩衝材のバリア性能の評価, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-038.
- 鈴木英明, 伊藤 彰, 吉田 泰, 陶山忠宏, 川上 進, 笹

- 本 広, 油井三和 (2004) : 熱-水-応力連成試験設備 (COUPLE) における熱-水-応力-化学連成試験 (I), サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-033.
- 鈴木宏幸, 谷口直樹, 川上 進 (2004) : 還元性環境下におけるチタンの腐食速度と水素吸収挙動-II, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-042.
- Tanai, K. and Yamamoto, M. (2003) : Experimental and Modeling Studies on Gas Migration in Kunigel V1 Bentonite, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-024.
- 棚井憲治, 山本幹彦 (2003) : ガス移行挙動評価モデルに関する検討, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-051.
- 谷口直樹, 川崎 学, 川上 進, 久保田満 (2004a) : 還元性雰囲気における緩衝材中での炭素鋼の腐食挙動, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-40.
- 谷口直樹, 建石 剛, 西村 務, 川上 進 (2004b) : 模擬腐食生成物中 Fe(III)/Fe(II)比による炭素鋼の腐食挙動への影響, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-49.
- Yoshikawa, H., Ueno, K., Honda, T. Yamaguchi, S. and Yui, M. (2003) : Analysis of the Excavated Archaeological Iron Using Xray-CT, The 9th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation.

2.2.3 安全評価手法の高度化

地層処分の長期安全性は、処分概念に基づき構築される地層処分システムの将来挙動について、シナリオ、モデル、データに基づく予測解析により評価した上で、結果を基準などと比較し、評価の信頼性を様々な観点から論ずることによって、総合的に判断がなされる。

「第2次取りまとめ」においては、幅広い地質環境を対象として、簡略・保守的な考え方に基づき長期安全性の議論を行ったが、「第2次取りまとめ」以降の研究開発では、2.1項にも示したように「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」、「地層処分システムの長期挙動の理解」を目標とした取り組みを進めている。その目標のもとに、安全評価においては、「安全評価手法の高度化」として、シナリオ、モデル、データのそれぞれについて、主に、現象理解による信頼性、不確実性への対処、実際の地質環境への適用性などの観点から、基盤的な技術の継続的な強化を進めている。また、研究成果の透明性や追跡性が確保しやすい環境の整備を進めている。

1) 安全評価手法の高度化における今後の課題

「安全評価手法の高度化」としては、「国による第2次取りまとめ評価報告書」や「安全規制の基本的考え方」などに示された課題等を考慮して、安全評価に必要なデータの蓄積、モデルや評価手法の高度化を行うとともに、幌延の深地層の研究施設などを活用した実際の地質環境への適用を通じた安全評価手法の適用性の確認が重要であるとの認識から、以下のように4つの研究開発課題を設定している（図2.1-2）。

・核種移行データベースの整備

安全評価の基本情報として、幅広い地質環境に対応できるような熱力学データや収着・拡散データ等の拡充を図る。また、データ取得方法の標準化に関わる情報整備などを進める。

・安全評価モデルの高度化

安全評価において考慮すべきプロセスについて、現象理解を深めるとともに、個別モデルの改良や信頼性の確認などを進める。

・安全評価手法の整備・高度化

安全評価の考え方や安全指標などの基本事項に関する技術・情報、シナリオ開発技術、不確

実性評価技術など安全評価の基盤技術の強化・拡充を図る。

・安全評価手法の適用性確認

実際の地質環境を対象とした調査から得られる情報に基づき、安全評価に関するデータ、モデルおよび手法の適用を図るとともに、研究開発あるいは処分事業や安全規制に関する検討での課題や留意点等を明らかにしていく。

これらの研究開発課題を達成するため、エントリーやクオリティ、幌延の深地層の研究施設などを活用するとともに、「深地層の科学研究」との連携を図りつつ、安全評価に用いるデータの蓄積、およびモデルと評価手法の高度化を進める。さらに、実際の地質環境において段階的に取得されるデータに応じた安全評価のあり方や安全評価に用いるデータ、モデルおよび評価手法の適用の仕方などについて検討を進めていく。

2) 各研究開発課題の計画および成果の現状

以下に研究開発課題ごとの当面の計画と平成15年度の成果の概要を示す。

(1) 核種移行データベースの整備

核種移行評価上の重要パラメータである溶解度、収着分配係数、拡散係数の設定において基本情報となる熱力学データ、収着・拡散データに関するデータベースの整備を進める。データベースの整備は、評価対象となる地質環境の情報（岩石の地球化学的特性や地下水水質等）が与えられた際に、常に最新の情報を基に、核種移行パラメータの値や、その値の不確実性の幅を推定し、その根拠が説明できる情報を整備しておくことが重要である。この観点からは、核種の重要度や、現状のデータベースにおけるデータの充足度および地質環境への対応性などを勘案しつつ、当面は幅広い地質環境条件への対応に重点をおいたデータベース整備を進めていく。データベース整備では、クオリティにおけるデータ取得のほか、国際共同研究の活用、国際的な最新情報の調査・抽出・評価により、作業を進める。さらに、データの信頼性向上の観点から、データ取得方法の標準化やデータの不確実性に係る情報整備を進める。

① 放射性核種の熱力学データベースの整備

平成 15 年度における主な成果として、安全評価上重要なアクチニド 4 価（特にネプツニウム）に着目して、クオリティにおいて還元条件下でのネプツニウム（IV）の溶解度試験を継続し（図 2.2.3-1）、報告例の少ないヒドロキソ炭酸錯体についての新たな熱力学データを導出した（Kitamura and Kohara, 2004）。また、Np(IV)水和酸化物の溶解度積（藤原・小原, 2004）、および高アルカリ性水溶液中での U(IV)の加水分解定数 β_5^0 と β_6^0 を導出した（森山, 2004; Fujiwara et al., 2003）。なお、Np(IV)水和酸化物の溶解度積を求めるための溶解度試験では、Np(V)を Np(IV)に還元するため、クオリティの雰囲気制御グローブボックスにて、水素窒素混合ガス（0.5%）バブリングにより白金触媒を介して還元させる新たな手法を適用した。

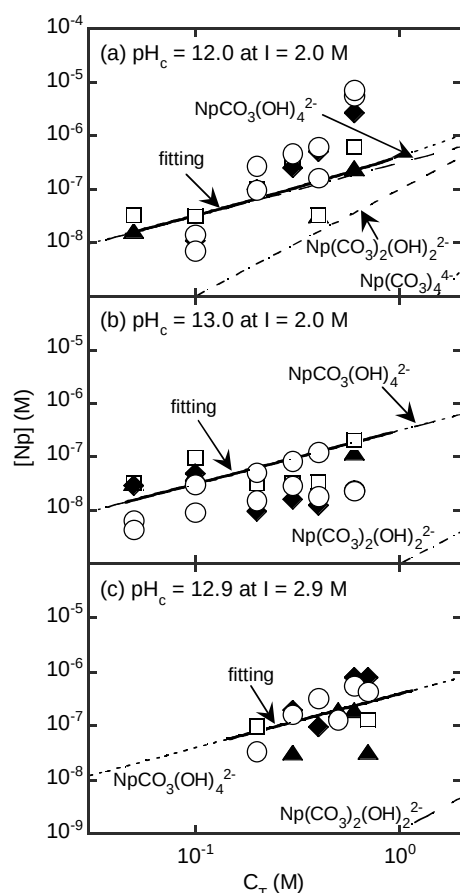


図 2.2.3-1 高アルカリ性水溶液中における Np(IV) 溶解度の全炭酸濃度依存性
▲, □, ◆, ○は, (a) (b) ではそれぞれ 0.5, 1, 3, 5 か月振とう後, (c) ではそれぞれ 1, 2, 3, 4 か月振とう後の値を示す。実線は最小二乗法による適合結果を示し, 波線および点線はそれぞれ対応する化学種の寄与を示す。

熱力学データベースについては、OECD/NEA により編纂された Np と Pu のデータ（Lemire et al., 2001）を追加し、複数の地球化学計算コードでの利用が可能な形に変換するとともに（吉田・笹本, 2004）、サイクル機構の熱力学・収着データベースホームページ（図 2.2.3-2）において公開した。また、活量補正のためのモデルのひとつである Pitzer モデル（Pitzer, 1987）に関するパラメータの調査とデータベース化を行い、高イオン強度での溶解度計算結果への影響の検討を行った。



図 2.2.3-2 サイクル機構 熱力学・収着データベースホームページ
(<http://migrationdb.jnc.go.jp/>)

② 収着・拡散データベースの整備

クオリティ等の施設において、データの充足が望まれる海水を起源とする地下水環境を想定した条件での緩衝材および堆積岩に関するデータ拡充を継続した。

平成 15 年度における主な成果としては、海水系地下水でのセシウム、ベントナイト、砂岩および泥岩への収着試験を実施し、収着に及ぼす共存陽イオンの影響に関するデータの拡充を図るとともに、固液界面の反応に関する収着モデル（表面錯体モデル）を用いた試験結果の解析を行い、共存陽イオン濃度依存性（図 2.2.3-3）および Cs 濃度依存性を説明することができた（北村ほか, 2004）。また、砂岩および凝灰岩に対するスズ、鉛、トリウムの収着に関して、pH をパラメータとして高 pH 条件も含めた条件での収着試験を実施し、分配係数に関するデータを得た（中澤ほか, 2004）。

放射性核種の収着データに関しては、試験によるデータ取得と並行し、JNC の収着データベース（JNC-SDB）の更新作業として 1998 年～2003 年の間に公開された文献データの取り込みを行なった。また、JNC-SDB の収着データの信頼度を評価・検討するための手法開発に着手した（上田・久野，2004）。

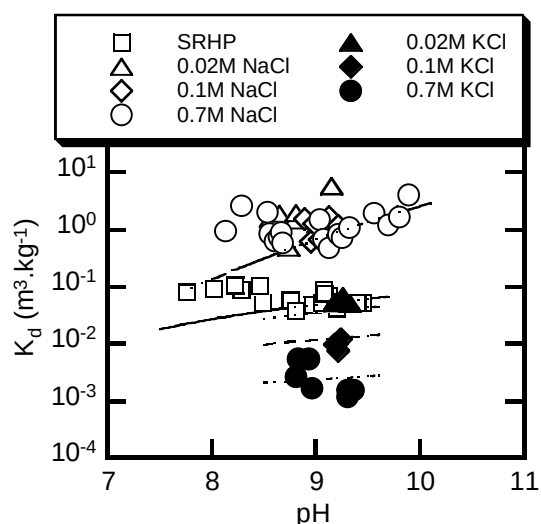


図 2.2.3-3 種々の水溶液における砂岩に対する Cs の分配係数 (K_d)
破線および実線は、表面錯体モデルを用いた解析結果を、プロットに対応する KCl 濃度ごとに示したもの。

(2) 安全評価モデルの高度化

岩盤中での水理・物質移行現象，地下水・間隙水水質形成，ガラスの長期溶解，核種の溶解および収着・拡散，核種移行に対するコロイド・有機物・微生物の影響，生物圏評価などの通常の地下水シナリオにおいて考慮すべきプロセス，ならびに天然現象のシステム性能への影響などの変動シナリオや接近シナリオとして考慮すべきプロセスについて，エントリー・クオリティでの研究および国際共同研究などを通じて現象の理解を深めるとともに，モデルの改良や信頼性の確認を図ることを課題としている。

① 岩盤中での水理・物質移行モデル

結晶質岩については，性能評価上重要と考えられる数 10～100m スケールでの亀裂ネットワークモデルを用いた水理・物質移行評価の信頼性を向上させるため，単一亀裂，亀裂交差部において重要と考えられるプロセスについてエントリー，国際共同研究等を活用して知見を得るとともに，亀

裂ネットワークモデルの信頼性向上とモデル化機能の拡充を行う。開発したモデル化手法については，瑞浪超深地層研究計画，スウェーデンのエスポ地下研究施設，スイスのグリムゼル原位置試験場に適用し信頼性を確認する。また，地下水流動解析に必要な調査結果や解析結果などのデータの空間的なばらつきが地下水流動解析結果に与える影響を定量化するための手法の整備を行う。

堆積岩については，幌延深地層研究計画で得られるデータを活用し，亀裂を有する堆積軟岩の水理特性の把握および地下水流動や物質移行現象のモデル構築を進めるとともに，不均質性の記述・評価が可能なモデル化手法を検討する。

平成 15 年度における主な成果は，結晶質岩に関しては以下のとおりである。まず，亀裂ネットワークモデルについては，計算機容量および計算時間の観点からモデル化可能なスケールに限界が生じるという課題に対応するために，詳細な調査の対象となる領域においては亀裂ネットワークモデルを用いつつ，調査データの量が相対的に疎な周辺領域においては等価多孔質媒体近似を行うことにより計算容量を低減させる入れ子式モデル化機能を開発した（図 2.2.3-4）。

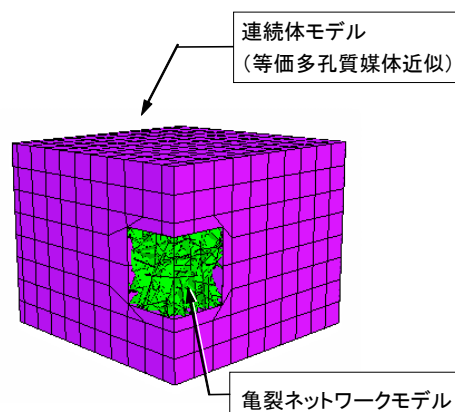


図 2.2.3-4 入れ子式モデル概念図

また，データの空間的なばらつきが地下水流動解析結果に与える影響を定量化するための検討として，クリギングにより未知領域の透水係数の期待値とその分散を推定し，確率有限要素法により流速などのばらつきを計算するとともに，特定移行経路における移行距離の不確実性を評価できる手法を開発した。

さらに，水理・物質移行モデルの信頼性向上のための室内試験に供する技術として，亀裂内空隙

構造（亀裂開口幅と亀裂形状）を研削装置を用いて測定・評価する方法の適用可能性の確認、および亀裂開口幅分布の不均質性が物質移行現象に与える影響を評価するトレーサー試験の精度を向上させるための試験方法の改良とその効果の確認を行った。単一亀裂に関するモデル化については、亀裂内の開口幅の不均質性が流体の移動に与える影響を詳細に調べるために開発した格子ガスオートマトン法による流体解析コードの解析結果（無次元量）を、実際の圧力や流量などの物理量で表現する手法を検討し、物理量が推定できる見通しを得た。

トレーサー試験等の原位置試験については、スウェーデン SKB が主催する水理・物質移行モデリングタスクフォースの課題の一つであり、サイクル機構の提唱により開始されたタスク 6（PASC プロジェクト：サイト特性調査データを用いた性能評価）において、亀裂充填物の影響、亀裂内の開口幅の不均質性の影響などについて評価を行った。

一方、堆積岩に関しては、亀裂を有する堆積軟岩の水理特性の把握として、幌延深地層研究計画でのボーリングにより得られた堆積軟岩コア試料（亀裂ありの試料、亀裂なしの試料）を用いた室内試験を行い、透水係数、拡散係数、亀裂内の物質移行開口幅および分散長などのデータを取得した（図 2.2.3-5）。また、地下水流動経路や物質移行プロセスについて、亀裂ありの試料での亀裂内の物質移行開口幅や分散長として「第 2 次取りまとめ」での想定と整合的な結果が得られ（図 2.2.3-6）、花崗岩地域の試験結果と同様に、物質移行開口幅を透水量係数と関連づけて整理できる可能性が示された。

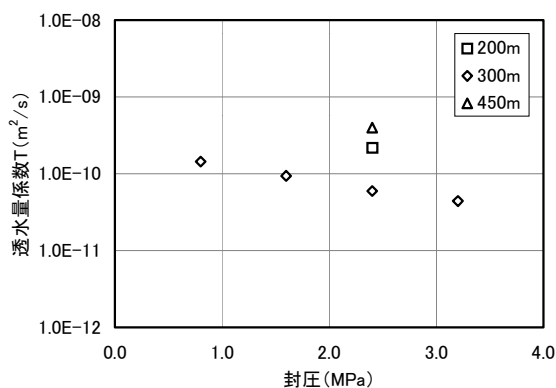


図 2.2.3-5 亀裂を有する試料に対する定流量透水試験から得られた封圧と透水量係数の関係

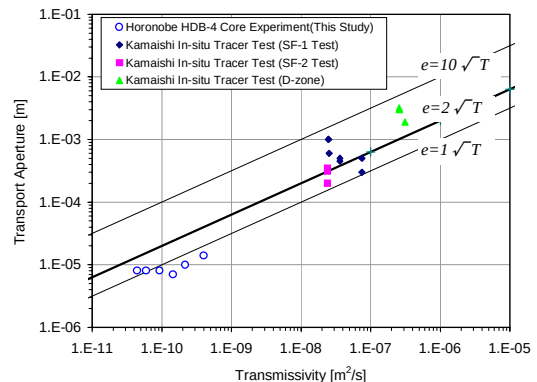


図 2.2.3-6 透水量係数と物質移行開口幅

また、堆積岩の不均質場の特性を定量的に把握する試みとして、フォワード(前進的)モデリング手法の岩相モデリングへの適用について検討を開始し、堆積岩の堆積過程と圧密過程を再現できる基本ソフトウェアの開発、および入力情報の整理の一環として、泥質岩の化学組成と孔径分布・空隙率などの物理的性質との関連性の検討を行った。

② 地下水・間隙水水質形成モデルの高度化

「第 2 次取りまとめ」においては、化学平衡に基づくモデルにより一般化した地下水水質の設定を行うとともに、緩衝材構成鉱物の表面反応や溶解沈殿反応に基づき緩衝材中の間隙水水質を推定した。「第 2 次取りまとめ」以降、地下水水質については、具体的な地質環境を対象とした地下水水質形成過程の理解とそれに基づく将来の変動可能性の推定が重要な課題である。また、間隙水水質に関しては、初期の不飽和条件および飽和後のオーバーパック腐食生成物との反応による影響を考慮した間隙水組成の時間空間変化を把握することなどが課題である。

平成 15 年度における主な成果としては、地下水に関しては、幌延深地層研究計画におけるボーリング調査から得られた、大気等の接触により化学的性質が変化していると考えられる実測地下水データに対して、熱力学的解釈および一般的に考えられている深部地下水に関する地球化学的知見に基づく地球化学モデルによる補正を行い、大気等の影響を受けていない深部地下水組成を解析的に推定した。

緩衝材間隙水水質に関しては、間隙水の pH やベントナイト中の元素濃度の時間空間変化に関する実験的な把握とそのモデル化を継続した。

鉱物等の熱力学データについては、高アルカリ

溶液と緩衝材が反応した場合、どのような二次鉱物が生成される可能性があるかを室内試験やナチュラルアナログ研究等をもとに整理した。その結果、データ整備のためには、実験だけではなく、鉱物の構造や組成に基づく計算により熱力学データを算出する経験的な手法なども併用する必要性が示唆された。

③ 現象論的核種移行モデルの開発

ガラスの長期溶解挙動および核種の溶解現象に関しては、長期の複合浸出試験や原位置試験などにより、「第2次取りまとめ」における核種浸出モデルの保守性をさらに確かなものとするとともに、ガラス表面変質層の形成が核種浸出に及ぼす影響、および溶解度制限固相の変遷や共沈現象の把握などを通じ、より現実的な安全評価モデルを構築することを目指している。

平成15年度における主な成果として、ガラスの長期溶解現象について、溶解／変質速度の温度依存性と活性化エネルギーのデータを取得した。また、ベントナイト共存下でのCsの浸出試験から、浸出したCs濃度がBなどの可溶性元素の1/10以下になる結果が得られ、それがイオン交換によるベントナイトへの収着に起因することをCsの脱離試験により確認した(稲垣ほか, 2004)。

溶解度制限固相の変遷については、U(IV)とNp(IV)の固溶体に関する溶解度測定および評価を行った(図2.2.3-7)。その結果、U(IV)とNp(IV)は理想的な固溶体を形成しており、これらの溶解度は熱力学的に評価することが可能であることがわかった(Rai et al., 2004)。共沈現象に関する研究では、Ba(Raのアナログ元素)と炭酸塩との共沈試験において、液相中でのBaとCaの濃度比および固相中でのBaとCaの濃度比の関係(元素分配比)が、初期濃度や P_{CO2} に依存せず一定になることから(図2.2.3-8)、この元素分配比を用いたRa濃度のモデル化の可能性が示された。

また、核種の収着・拡散現象に関する研究としては、溶液条件などの環境の変化が、収着分配係数や拡散係数に及ぼす影響を実験的に明らかにするとともに、より詳細な現象理解に基づくモデルによりその影響を説明することなど、核種移行パラメータの設定に対する信頼性の向上を目指した研究を進めている。なお、本研究から得られた収着・拡散データは、収着・拡散データベースの整備にも適宜反映されている。

平成15年度における主な成果としては、収着現象については、「収着・拡散データベースの整備」の部分で示した収着試験によるデータ取得や解析的な検討を進めている。また、収着現象解析モデルの構築と適用可能性の検討を継続するとともに、国際共同研究であるOECD/NEA収着プロジェクトでの議論に継続的に参加している。

拡散挙動については、結晶質岩のマトリクス拡散深さの検討として、深さ方向の間隙の連続性を確認するための拡散試験を実施している。また、緩衝材および凝灰岩中での陰イオンの拡散挙動に対する塩濃度の影響等についてデータ取得を行うとともに(図2.2.3-9)、観察された現象に基づき、拡散メカニズムの考察を行った(石寺・佐藤, 2004; 石寺ほか, 2004)。さらに、緩衝材中の物質移行に関する基礎的研究として、分子動力学法で用いる原子間相互作用のパラメータの改良、および水分子と交換性陽イオンの自己拡散係数の導出、ならびに均質化手法を用いた拡散現象のシミュレーションを実施した(河村, 2004)。

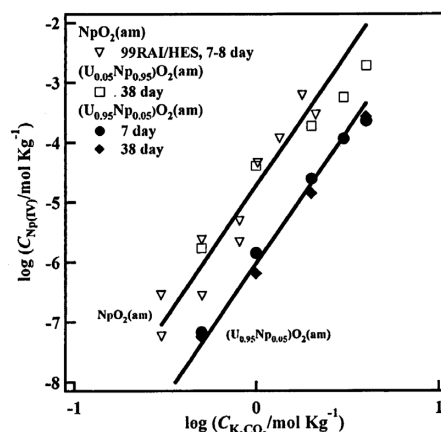


図2.2.3-7 K_2CO_3 溶液中における $NpO_2(am)$, $(U_{0.95}Np_{0.05})O_2(am)$, $(U_{0.05}Np_{0.95})O_2(am)$ の実験結果と理想的な固溶体を仮定した計算結果との比較

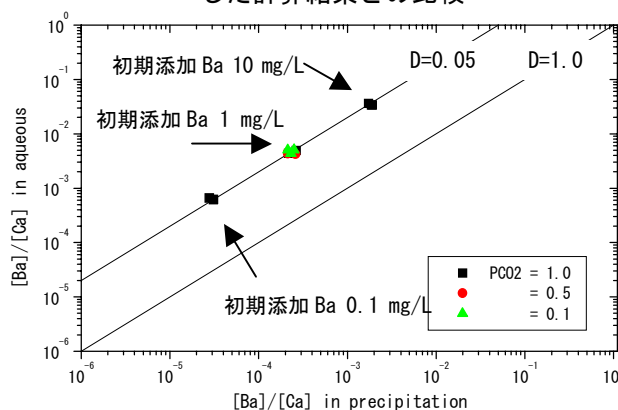


図2.2.3-8 Baをトレーサーとして用いた炭酸塩との共沈試験結果

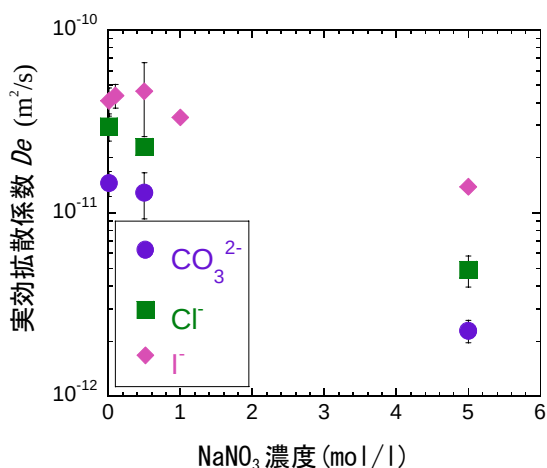


図 2.2.3-9 CO_3^{2-} , Cl^- , I^- の凝灰岩に対する D_e の NaNO_3 濃度依存性

④ コロイド等の影響評価モデルの開発

人工バリア材料から発生するコロイドおよび天然の地下水中に存在するコロイド、地下水やベントナイト中に存在する有機物などは、母岩中での核種の移行挙動に影響を及ぼす可能性がある。「第2次取りまとめ」では、簡略かつ保守的なモデルによる影響評価を実施し、その影響が大きいことを例示した。「第2次取りまとめ」以降、核種移行に及ぼすコロイド等の影響に関する現象理解をさらに深め、より現実的かつ定量的な評価を行うためのモデル構築を進めている。また、有機物については、放射性核種の溶解度に及ぼす影響の評価および人工バリア中の透過性に関するデータの取得を行っている。

平成15年度における主な成果として、コロイドについては、ベントナイトコロイドに対するCs, Np(V)およびNp(IV)の収着試験を実施し、分配係数を取得した(飯島ほか, 2004a)。また、岩石を充填したカラムを用いたコロイド共存系での核種移行室内試験および原位置(スイス・グリムゼル原位置試験場でのCRRプロジェクト)における核種およびコロイドの移行試験に関する解析(たとえば、図2.2.3-10)を実施し、核種-亀裂表面および核種-コロイドでの収着反応に関する反応速度、ならびに亀裂中でのコロイドのろ過を考慮することの重要性が示された(黒澤ほか, 2004; 飯島ほか, 2004b)。コロイドの影響を考慮した核種移行解析を行うための計算コードについては、亀裂と多孔質媒体の両方に適用可能な計算コードCOLFRAC-MRLの開発を行った(上田・久野, 2004)。

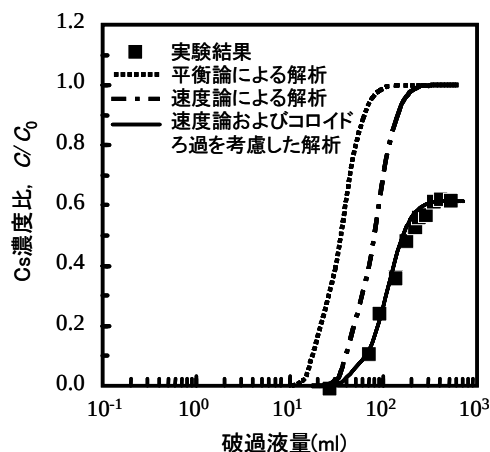


図 2.2.3-10 ベントナイトコロイド共存系でのCsの移行に関する実験と解析の比較

有機物については、核種との相互作用評価のひとつとして、フミン酸とNp(IV)の錯生成試験およびフミン酸の特性評価試験を実施し、フミン酸とNp(IV)の錯生成の強さに関する知見および安定度定数を取得した(飯島ほか, 2004c)。また、圧縮ベントナイト中のポリアクリル酸の透過試験を実施し、蒸留水と人工海水中での圧縮ベントナイトのろ過効果の違いに関する知見を得るとともに、ろ過限界が分子量15,000から300,000あたりに存在する可能性の高いことがわかった。

微生物については、核種移行評価の観点からその影響をモデル化する考え方を検討し、微生物の挙動をコロイド相当として扱うことが可能なケースを整理するとともに、核種移行に及ぼす微生物の影響を予想的に評価した。

⑤ 生物圏評価モデル

生物圏評価は、処分システムの影響を放射線量等の指標を用いて定量的に示すために必要であり、「第2次取りまとめ」では、国際共同研究プロジェクトで提唱されたレファレンスバイオスフィアの考え方に基づき、わが国における幅広い地質環境に対応した地表環境(物質移行に関係)および人間の生活環境や様式(被ばくに関係)のモデル化と評価を行った。「第2次取りまとめ」以降は、具体的な地表環境が与えられた場合に、その特徴を生物圏モデルおよびデータ設定に反映していくためのモデル化技術の改良・開発やデータの分析・整備を進めている。

平成15年度における主な成果としては、パラメータの重要度を感度解析により抽出したうえで、

そのパラメータについての現在の設定状況を整理する(図 2.2.3-11)という手法により、データ取得・整備の優先度等の検討の基盤となる情報を整備できる見通しが得られた(加藤ほか, 2003; Kato et al., 2003)。また、仮想的な環境条件を例題として、評価上重要な地下環境と生物圏とのインターフェイスの設定の具体的な作業手順や作業内容の検討を実施している。



図 2.2.3-11 パラメータの現在の設定状況の整理結果

⑥ 天然現象影響評価モデル

超長期においては、天然現象発生の不確実性は増していくものと考えられ、天然現象の影響を評価する技術を整備し総合的な安全性の議論に供することが必要である。「第2次取りまとめ」においては、隆起・侵食、気候・海水準変動、火山・火成活動、地震・断層活動などの天然現象を対象に、簡便で保守的なシナリオの検討および影響評価を例示的に行った。「第2次取りまとめ」以降は、過度に保守的とならないように、より現象に則した合理的なものとしていくための考え方および評価技術の開発・整備を進めている。

平成15年度においては、天然現象の発生からシステム性能への影響までを、天然現象の発生とそれによる地質環境への影響、処分場近傍への影響、さらに天然バリアあるいは人工バリアへの影響とそれによるシステム性能の変化、という複数の段階に分割して抽出・整理し、定量的な影響評価につなげていくという手順を構築した(図 2.2.3-12)。また、火山・火成活動を例とした実作業を通して、検討内容の整合性・追跡性・客観性を確保することにも留意しつつ、作業手順や作業内容の具体化を図った。

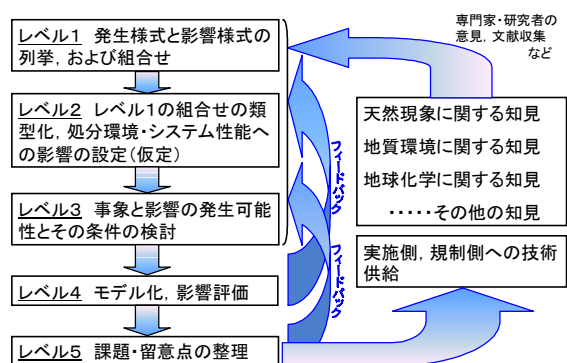


図 2.2.3-12 天然現象影響評価の作業手順

(3) 安全評価手法の整備・高度化

安全評価の考え方や安全指標などの基本事項に関する基盤技術・情報、シナリオ開発技術および不確実性解析技術などの基盤技術の強化・拡充を行うとともに、研究成果の透明性や追跡性の確保を支援するシステムを整備する。

① 安全評価の基本事項の検討

安全規制に係る指針や基準等の策定に資する基盤的な情報を整備することを目的として、安全評価の基本的考え方に関する検討を進めている。平成14年度までに、「第2次取りまとめ」に基づき安全評価の時間スケールに関する論点の整理を行うとともに、安全評価の基本事項を検討する上で重要となる段階的意思決定の進め方及び意思決定に際してのセーフティケースの役割について、国際的な検討状況を整理した。

平成15年度においては、地層処分の安全性を信頼性をもって示すうえで求められるアプローチや論拠について、国際的な考え方を参考にしつつ、複数のアプローチによる論証の必要性、頑強な性能を有する処分システムの構築、性能評価によるシステムの信頼性の提示、時間スケールに応じた検討、といった複数の観点からの整理を試みた。

② シナリオ開発技術についての研究

シナリオ開発は、安全評価解析の枠組みを設定するために重要な作業となる。「第2次取りまとめ」では、わが国において想定される幅広い地質環境を一般化した上で、国際的に検討されてきた体系的アプローチを踏襲して安全評価解析の枠組みとなるシナリオを設定した。「第2次取りまとめ」以降は、実際の地質環境への適用を念頭におきながら、十分性や透明性などを確保しつつ、シ

ナリオ開発の内容をよりわかりやすく提示できるような方法論の構築を進めている。

平成 15 年度においては、FEP の相関関係の表現を工夫することにより、シナリオ開発プロセスで行うべき複数の処理をよりスムーズにつなげるとの観点から、FEP の相関関係の具体的な表現・整理方法について検討した。その結果、FEP 等の相関関係をマトリクス形式で整理することに加えて、安全機能を介した階層的な整理の考え方を導入することにより、原因となる FEP から結果となるシステム性能に至る影響の経路をより効果的に表現できる可能性が見出された。

③ 不確実性評価技術

地層処分安全評価には不確実性が内在し、それらを完全に排除することは困難である。このため、種々の不確実性(シナリオ、モデル、データの不確実性)を適切に安全評価に取り込むことが重要である。「第2次取りまとめ」では、幅広い地質環境を対象とした検討により、シナリオ、モデルおよびデータの不確実性を考慮に入れた解析ケースの分類と設定を行い、決定論的な解析手法で評価した。「第2次取りまとめ」以降は、現象理解の向上による代替モデルの開発、データの拡充および実際の地質環境情報の整理等の結果を取り込んだ不確実性の影響評価を行い、重要な不確実性要因を適切に抽出すること、さらにこれを研究開発項目へと反映することが重要になる。

平成 15 年度においては、データの不確実性を定量化するための技術の検討や、感度分析技術の拡充を中心に進めた。不確実性の定量化技術については、まず、データが十分にある場合・ない場合のパラメータの分布設定手順を整理した。さらに、今後の処分事業や地下研究施設の研究においては、まずデータが十分でない段階から検討を始めることになると考え、データが十分でない場合に専門家が持つ情報および知見を引き出すための手法の一つである誘出法を対象に、その具体的な作業の進め方や内容を実務に即した形で具体化するための試行を行った。この結果、誘出法の適用可能性について見通しを得るとともに、分布設定に影響する要因を把握し、その要因に関する情報を専門家間で共有するという作業の重要性が見出された。

また、感度分析技術の検討として、決定木分析手法の適用性を検討した。モンテカルロシミュレーションにより得られた総線量の最大値のばらつ

き(決定木分析に供するためにカテゴリー化：たとえば、図 2.2.3-13)に対して決定木分析手法を適用した結果、ばらつきを説明できるパラメータの定量的条件とその組み合わせ(たとえば、図 2.2.3-14)を見いだせることがわかった(仲島・牧野, 2004)。

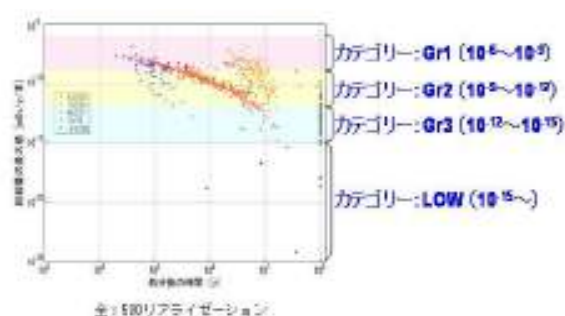


図 2.2.3-13 決定木分析で対象とした総線量の最大値のカテゴリー化の例

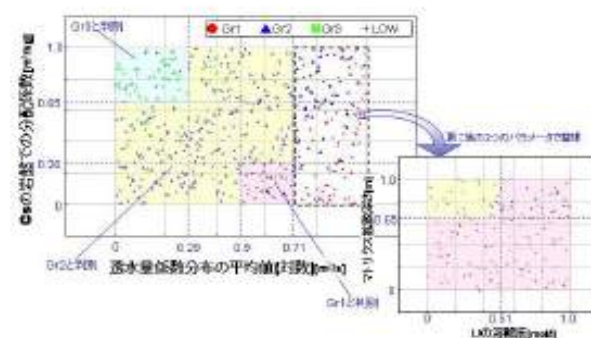


図 2.2.3-14 総線量の最大値のばらつきを特徴付けるパラメータとその定量的条件についての決定木分析の結果例

④ 技術情報統合システムの整備

「処分技術の信頼性向上」と「安全評価手法の高度化」およびその基盤となる「深地層の科学研究」における研究開発は、独立ではなく、研究開発分野間や研究開発課題間で種々の連携が必要である。また、この各分野間の連携に関しては、「国による第2次取りまとめ評価報告書」においても、工学技術や安全評価と関連付けた地表から地下深部までの調査の体系化の必要性が指摘されている。以上のこと、さらには、研究開発の進展にともなう、研究成果を含む種々の技術的な情報の量的な増加と質的な多様化、および情報受け渡しの多様化・複雑化といった状況が生じ得ることを想定して、それによる技術的な情報の不整合の発生、技術的な情報の共有の困難さの発生、情報管理の

負担増大などの問題発生の可能性に対処するための技術として、技術情報統合システムの検討・設計を進めている（核燃料サイクル開発機構，2003）。

平成 15 年度においては、これまでに実施してきたシステムの検討および設計に基づいて、

- ・ 技術的な情報の統合的な管理（研究の流れに基づいた情報の集約・統合など）
- ・ 研究内容の整合性の確保（研究成果とその品質を判断する材料となる情報の一括管理など）
- ・ 技術情報共有の場の提供（情報更新のタイムリーな周知など）

を主要な機能とする技術情報統合システムの基本システムを製作した（図 2.2.3-15）。

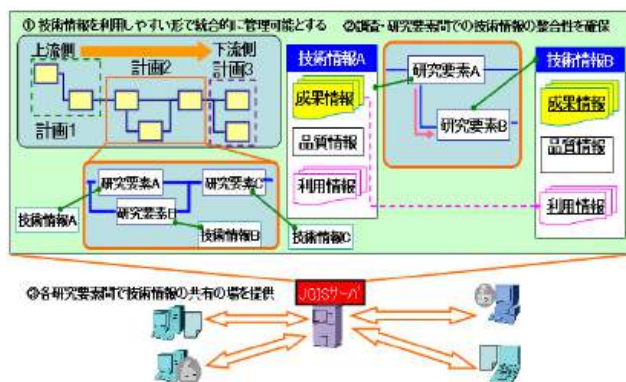


図 2.2.3-15 技術情報統合システムの主要な特徴（概念図）

(4) 安全評価手法の適用性確認

「第2次取りまとめ」以降は、深地層の研究施設計画において段階的に得られる情報などを参考として、安全評価手法の実際の地質環境に対する適用性を検討することを通じて、安全評価に係わる研究開発課題を抽出するとともに、安全評価における不確実性を低減するなどの観点から地質環境の調査の課題などを抽出することが重要になる。そのため、地質環境調査と安全評価の連携の具体化についての検討を進めている。

平成 15 年度においては、安全評価手法の適用性確認を行ううえでの着眼点や留意点を整理した。また、地層処分安全機能に大きな影響を及ぼす因子である地下深部の地下水流量、流速や移行経路情報の評価に着目し、結晶質岩地域ならびに堆積岩地域のそれぞれについて、地上からの調査の段階を対象にした地下水流動モデル構築手続きなどについて事例的な検討を行った。

参考文献

- 藤原健壯，小原 幸利(2004)：Np(IV)水和酸化物の溶解度積，日本原子力学会「2004 年春の年会」E-21.
- Fujiwara, K., Yamana, H., Fujii, T., Kawamoto, K., Sasaki, T., and Moriyama, Y. (2003): Solubility of Uranium(IV) Hydrated Oxide in High pH Solution under Reducing Conditions., presented at 9th Int. Conf. on Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere (MIGRATION' 03).
- 飯島和毅，増田嗣也，戸村努(2004a)：ベントナイトコロイドに対する Cs の収着挙動，サイクル技報, No. 23, pp. 51-61.
- 飯島和毅，太田久仁雄，油井三和, Alexander, R. (2004b)：グリムゼル岩盤試験場における亀裂中の核種及びコロイドの移行(1)ー方法と試験結果ー，日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集, p. 810.
- 飯島和毅，飛塚早智子，小原幸利(2004c)：Np(IV)とフミン酸の錯生成挙動，サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2004-005.
- 稲垣八穂広(2004)：ガラス固化体の長期鉱物化に関する研究(Ⅲ)，サイクル開発機構技術資料(契約業務報告書；九州大学)，JNC TJ8400 2003-055.
- 石寺孝充，佐藤治夫 (2004)：凝灰岩中の C, Cl, I の拡散挙動に及ぼす NaNO₃ の影響，日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集, H46, p. 852.
- 石寺孝充，宮本真哉，佐藤治夫(2004)：圧縮ベントナイト中の C, Cl, I の拡散挙動に及ぼすケイ砂混合率及び NaNO₃ の影響，サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2004-001.
- 核燃料サイクル開発機構 (2003)：サイクル機構技報 No. 21, サイクル機構技術資料, JNC TN1340 2003-004.
- 加藤智子，鈴木祐二，牧野仁史，内田雅大 (2003)：地層処分生物圏評価パラメータの設定に関わる検討ー感度解析による重要パラメータの抽出と設定状況の整理ー，日本原子力学会 2003 年秋の大会予稿集, p. 609.
- Kato, T., Suzuki, Y., Makino, H. and Uchida, M. (2003): Biosphere Assessment for High-level Radioactive Waste Disposal: Modelling Experiences and Discussion on Key Parameters by Sensitivity Analysis in JNC, International Symposium on Radioecology and Environmental Dosimetry, Abstracts.
- 河村雄行(2004)：ベントナイト中の物質移行モデルの高度化研究(Ⅱ) (研究委託報告書；東京工業大学)，JNC TJ8400 2004-001.
- Kitamura, A., Kohara, Y. (2004): Carbonate Complexation of Neptunium(IV) in Highly Basic Solutions, Radiochim. Acta. (in press)
- 北村 暁，戸村 努，中山 雅，佐藤治夫 (2004)：堆積岩に対するセシウムの分配係数に及ぼす競合イオンの

- 影響, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集, H11, p. 817.
- 黒澤進, 茨木希, 油井三和, James, S., 飯島和毅, Alexander, R. (2004b): グリムゼル岩盤試験場における亀裂中の核種及びコロイドの移行(2)-モデル解析-, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集, p. 811
- Lemire, R. J., Fuger, J., Nitsche, H., Potter, P., Rand, M. H., Rydberg, J., Spahiu, K., Sullivan, J. C., Ullman, W. J., Vitorge, P. and Wanner, H. (2001): Chemical Thermodynamics of Neptunium and Plutonium, OECE/NEA, North-Holland, Amsterdam.
- 森山裕丈(2004): 超ウラン元素の加水分解及び錯生成に関する研究 III, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書), JNC TJ8400 2003-058.
- 仲島邦彦, 牧野仁史 (2004): 決定木分析を用いた核種移行解析結果の感度分析の検討, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集, p. 843.
- 中澤俊之, 岡田賢一, 室井正行, 柴田雅博, 陶山忠宏, 笹本 広 (2004): 海水系地下水における砂岩および凝灰岩に対する Sn・Pb・Th の分配係数, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-039.
- Pitzer, K. S. (1987): Thermodynamic Model for Aqueous Solutions of Liquid-like Density. In Thermodynamic Modeling of Geological Materials: Minerals, Fluids and Melts, ed Carmichael, I. S. E. and Eugster, H. P., Reviews in Mineralogy 17, pp 97-142. Min. Soc. Am.
- Rai, D., Hess, N. J., Yui, M., Felmy, A. R., and Moore, D. A. (2004): Thermodynamic and solubility of $(U_xNp_{1-x})O_2(am)$ solid solution in the carbonate system, Migration 03, Abstracts, pp. 29-30.
- 上田真三, 久野義夫 (2004): 核種移行に関する基盤データ構築手法の検討および個別モデルの高度化に関する研究, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 三菱マテリアル株式会社), JNC TJ8400-2003-065.
- 吉田 泰, 笹本 広 (2004): OECD/NEA で整備された熱力学データベース利用環境の整備 その 1-Np および Pu の熱力学データ-, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-027.

【個別報告】

3. 深地層の科学的研究

3. 深地層の科学的研究

サイクル機構では、地層処分にとって重要な天然現象や地質環境の特性に関する知見を蓄積しており、深地層の研究施設の活用や事例研究により、地質環境を把握するための総合的な技術を開発するための研究（「深地層の科学的研究」）を地層科学研究と称して進めている。この研究においては2.2.1 1)項において示したように、以下の4つを「第2次取りまとめ」以降における大きな課題項目としている（サイクル機構、2001）。

- ① 地質環境特性の研究
- ② 地質環境の長期安定性に関する研究
- ③ 深地層の工学技術の基礎の開発
- ④ ナチュラルアナログ研究

これら4つの課題項目は、表 3-1 に示すように東濃地科学センターおよび幌延深地層研究センターにおいて、それぞれの地域の地質環境の特徴を活かして、5つのプロジェクトとして取り組んでいる。

表 3-1 4つの課題項目とプロジェクト

プロジェクト 課題項目	東濃地科学センター				幌延深地層 研究センター
	広域地下水 流動研究	超深地層 研究所計画	地質環境の 長期安定性 に関する研究	東濃地山における 調査試験研究	深地層研究所計画
地質環境 特性の研究 結晶質岩 堆積岩	○	○			○
地質環境の 長期安定性 に関する研究			○ (日本全国)		△ (幌延町)
深地層における 工学技術の 基礎の開発 結晶質岩 堆積岩		○			○
ナチュ ラル アナ ログ 研究				○	

○：課題項目に対応するプロジェクト
△：課題項目の一部に対応するプロジェクト

3.1 広域地下水流動研究と超深地層研究所計画の役割と研究の進め方

東濃地科学センターにおいては、先に示した課題項目①の結晶質岩（花崗岩）を対象とした「地質環境特性の研究」を、広域地下水流動研究と超深地層研究所計画の2つのプロジェクトで進めている。超深地層研究所計画の研究実施領域は、広域地下水流動研究の研究実施領域の中に位置して

おり、双方の研究成果を有機的に組み合わせることにより、地上からの調査研究により地質環境を体系的に調査・解析および解析結果の妥当性を評価するための技術を整備する。特に、東濃地科学センターでは花崗岩を主な対象として研究を進めていることから、地下水流動を大きく規制していると考えられる断層や割れ目などの不連続構造に注目しつつ地質環境の不均質性を評価することが主要な研究課題となる。ここでは、広域地下水流動研究と超深地層研究所計画の2つのプロジェクトの役割と研究の進め方について述べる。

実際に地質環境を理解するための調査や解析においては、空間的、時間的さらには経済的にも目的を達成するまでの間に一定の制約が設けられる。このような制約の下で、地質環境を効率的に把握していくためには、調査研究を進める過程で地質環境の理解の程度を繰り返し評価し、目的の達成に向けて計画を見直しつつ進めることが必要である。このことから、上記の2つのプロジェクトにおいては、図 3.1-1 に示すループ（繰り返しアプローチ）を基本に調査研究を進めている。このアプローチでは、調査の進展に伴う情報量の増加に応じて、地質環境特性に関わる理解度や調査の達成度を順次評価し、その結果を次の調査の具体的な計画立案および次の段階に移行する判断につなげていく（サイクル機構、2002）。

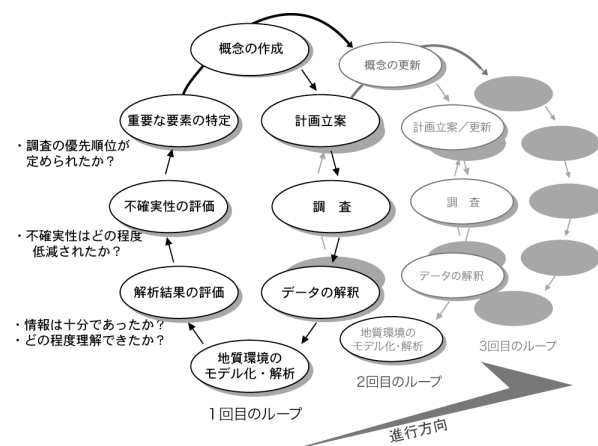


図 3.1-1 調査研究の繰り返しアプローチ

「全体計画」においては、調査研究段階に応じて、評価の対象とする地質環境の範囲を広域、施設、坑道というスケールに分けて実施することとしている（サイクル機構、2001）。これに基づき、広域地下水流動研究と超深地層研究所計画の2つのプロジェクトにおいては、

- ・ 限られた調査量で効率的に地質環境特性を把握していくことと、
- ・ 断層や割れ目などが地質環境の不均質性を大きく支配していると考えられる割れ目系の岩盤を対象としていること

の2点に注目しつつ、処分システムの設計や安全評価との連携を考慮して、地上からの調査研究で評価の対象とする空間スケールを4つに区分して研究を進めている（図 3.1-2）。

図 3.1-2 に示したスケール区分のうち、リージョナルとローカールスケールの調査研究は広域地下水流動研究、サイトとブロックスケールの調査研究は、超深地層研究所計画に相当する。なお、坑道スケールについては、今後、超深地層研究所計画の第2段階の計画を具体化する中で、必要に応じてスケールの細分化などを検討する。

表 3.1-1 に、地層処分研究開発の「安全評価手法の高度化」への反映の観点から設けた地質環境のモデル化の目標とその対象となる空間スケールを示す。地質環境特性に関わる情報は、反映先の目的に応じて取得され、反映先別に相互に活用される。このことから、「処分技術の信頼性向上」や、深地層の研究施設計画での地下研究施設の設計・施工、および地質環境への影響評価などの反映先に関する基礎情報についても、表 3.1-2 に示すよう目標を整理して研究を進めている。

地層処分にとって重要な地質環境特性を段階的に把握していくための体系的な技術基盤を開発・整備していくためには、研究成果の反映先を明確し、そこへの入力情報を定義することと、どのデータをどのような方法で取得し、データの解釈や

表 3.1-1 地質環境のモデル化の目標とスケール

領域		目的/ねらい	スケール
広域スケール	リージョナル	・ローカールスケールの領域および境界条件の設定	平面：数100km ² 程度 (数10km X 数10km) 深さ：10km程度
	ローカル	・地層処分システム全体の評価	平面：数10km ² 程度 (数km X 数km) 深さ：数km程度
施設スケール	サイト	・人工バリア周辺～天然バリアの評価 ・人工バリア周辺の境界条件の設定	平面：数km ² 程度 (数100m～数km X 数100m～数km) 深さ：2～3km程度
	ブロック	・人工バリア周辺の評価 ・地層処分システムの一部の地質環境に着目した評価	平面：数100m ² 程度 (数10m～数100m X 数10m～数100m) 深さ：数100m～1km程度
坑道スケール		・坑道を利用した人工バリア周辺の詳細な評価	平面：数10m ² 程度 (数m～数10m X 数m～数10m)

表 3.1-2 反映先別の地質環境のモデル化の目標

反映先		処分技術の信頼性向上	地下研究施設の設計・施工	地質環境への影響評価などに関する基礎情報
リージョナル	リージョナル			
	ローカル		・地下研究施設の概念検討	・施設建設前の初期状態の把握 ・全体の影響評価
施設スケール	サイト	・設計手法の適用性についての検討	・地下研究施設の設計	・施設建設前の初期状態の把握 ・施設周辺の影響評価
	ブロック	・設計手法の適用性についての検討	・地下研究施設の詳細設計 ・研究坑道の設計	・施設建設前の初期状態の把握 ・施設周辺部の影響評価

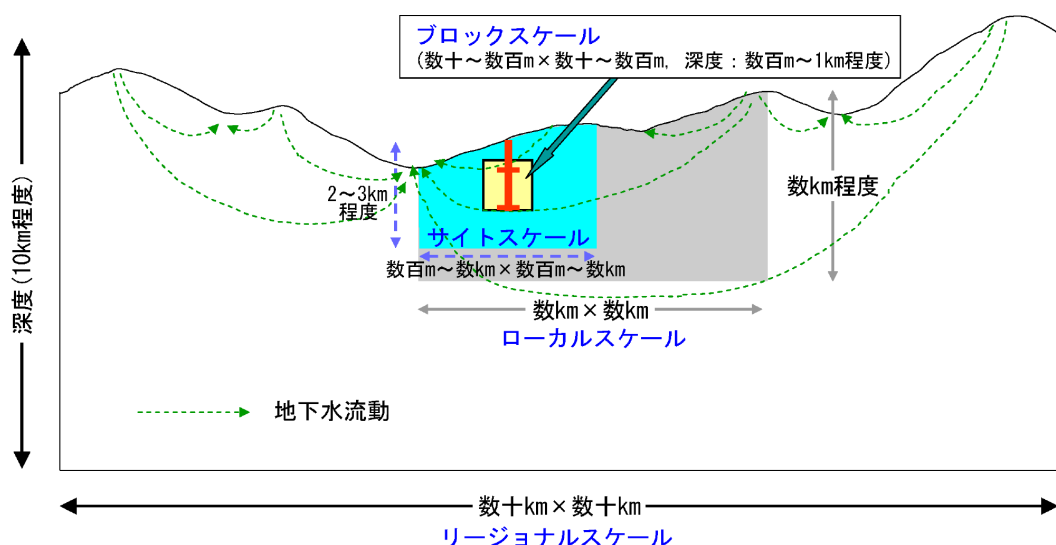


図 3.1-2 スケールの概念



図 3.1-3 研究目標／反映先と系統的なデータの流れを記述・整理したフローの一例
—超深地層研究所計画の統合化データフロー（地質・地質構造）—

モデル化をどのような手順で進めていけばよいかなど、調査研究の道すじを示すことが重要と考えられる。そこで、これら2つのプロジェクトでは、研究目標／反映先と系統的なデータの流れを記述・整理した統合化データフロー（図 3.1-3）に基づいて、調査研究を進めている（大澤ほか，2001）。なお、この統合化データフローは、研究の進展により得られる知見を踏まえ、その妥当性を評価しつつ段階的に最適化および詳細化していく。

以上、広域地下水流動研究と超深地層研究所計画の基本的な研究の進め方について述べた。この2つのプロジェクトは、上述した研究の進め方を基本に、広域地下水流動研究においては、繰り返しアプローチにおける不確実性の評価技術について、また超深地層研究所計画においては繰り返しアプローチの実践を通して、地質環境を体系的に調査・解析・評価する技術基盤の整備に主眼をおいた研究を展開している。

参考文献

核燃料サイクル開発機構 研究開発課題評価委員会（廃棄物処理処分課題評価委員会）（2001）：平成13年度

研究開発課題評価（中間評価）報告書 研究課題「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の全体計画」，サイクル機構技術資料，JNC TN1440 2001-008.

核燃料サイクル開発機構（2002）：東濃地域における地質環境特性に関する調査研究—地表からの調査研究の考え方と進め方，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2002-008.

大澤英昭，中野勝志，太田久仁雄（2001）：超深地層研究所計画における地表からの調査研究成果の統合化，日本原子力学会「2001年秋の大会」予稿集，p. 918.

3.2 広域地下水流動研究

3.2.1 研究の概要

① 背景と目的

広域地下水流動研究は、2.2.1 1) 項において示した課題項目①の「地質環境特性に関する研究」に相当するプロジェクトである。3.3 項で示す超深地層研究所計画の研究用地および正馬様用地は、広域地下水流動研究の研究実施領域の中に位置しており、双方の研究成果を有機的に組み合わせることにより、図 3.1-2 に示したリージョナルスケールからブロックスケールに至るまでの地質環境を体系的に調査・評価する技術を整備し、平成 17 年度頃を目標に行う地上からの調査研究の成果の取りまとめに反映する。

本研究では、平成 4 年度から 5 年程度の間は、主として調査・評価技術に関する要素技術の開発とその有効性・適用性の確認に主眼を置いた調査研究を行った。具体的には、ボーリング調査を中心に深度 1,000 m 対応の地下水調査機器を実用化するとともに、ボーリング孔の清水掘削技術などのノウハウを蓄積した。また、これらの調査により得られた地下水の流動特性および地球化学特性の深度方向の分布特性などを整理し、「第 2 次取りまとめ」に反映した。

「第 2 次取りまとめ」以降は、要素技術開発と並行して、超深地層研究所計画と研究成果を有機的に組み合わせつつ、リージョナルスケールからブロックスケールに至るまでの地質環境を体系的に調査・解析・評価する技術の整備を進めている。

本研究の研究実施領域は、東濃鉾山周辺の 10 km 四方程度が調査対象（図 3.2.1-1）である（動燃事業団，1997）。研究実施領域を含む東濃地域は、基盤をなす後期白亜紀の土岐花崗岩を新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）が不整合で覆い、さらにそれを固結度の低い新第三紀鮮新世の砂礫層（瀬戸層群）が不整合で覆っている（図 3.2.1-2）。瑞浪層群は下位より、土岐夾炭累層、本郷累層、明世累層、生俣累層に分けられる。全体の傾向として上位ほど細粒化するとともに分布が広がり、海進を示す地層である。瑞浪層群は土岐川周辺では 300 m 以上の層厚となる地域もある（糸魚川，1980）。

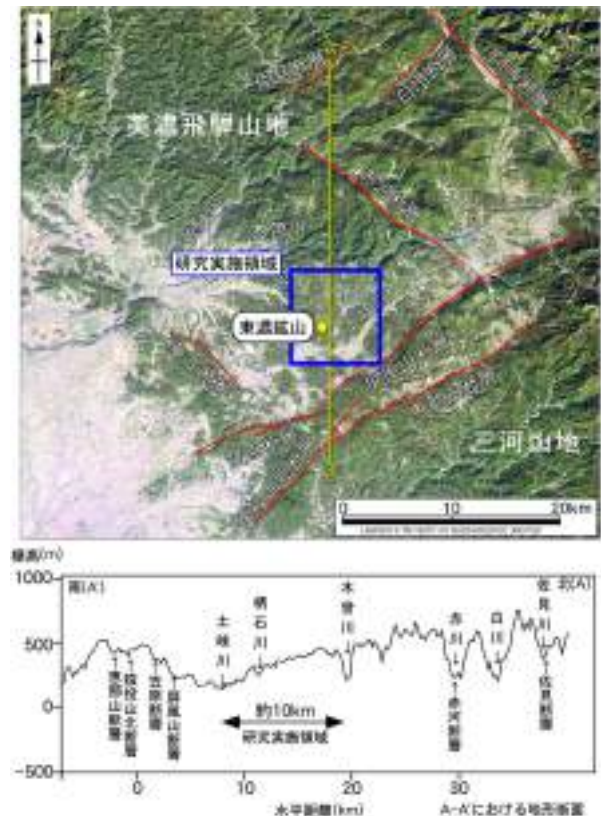
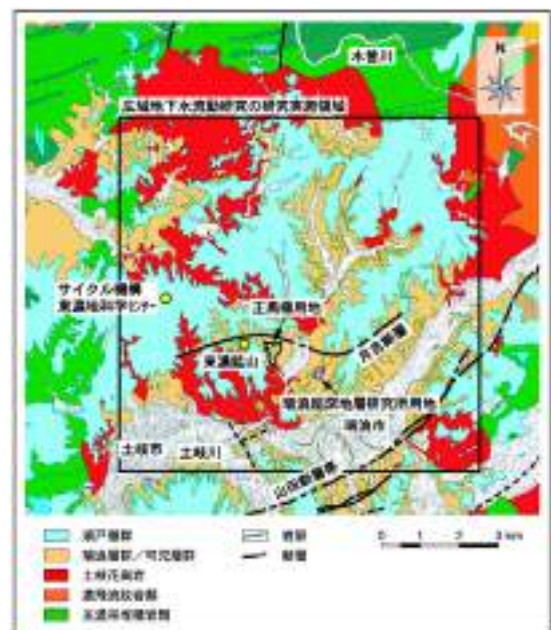


図 3.2.1-1 広域地下水流動研究の研究実施領域



（糸魚川，1980 を簡略化）

図 3.2.1-2 東濃地域の地質概要

② 実施項目と進め方

広域地下水流動研究は、リージョナルとローカルのスケールの調査研究に相当する。主に地下水流動系の涵養域から流出域までを包含する数 km 四

方以上の領域における，地表から地下深部までの地質・地質構造，地下水の流動特性や地球化学特性などを明らかにするために必要な調査・解析技術と，その技術を用いた解析結果を評価する技術の開発を主な目的としている（動燃事業団，1997）。具体的な研究課題は，以下の2項目に集約される（サイクル機構，2003）。

- ・ 実際の地質環境を対象にリージョナルおよびローカールスケールに相当する調査研究を通して，限定された情報量で地質環境の何がどの程度把握できるのかを事例的に示すこと
- ・ 各種調査・解析およびその評価技術の適用性を確認し，それらの技術の組合せや手順などを示した調査・評価フローを構築すること

リージョナルスケールを対象とした調査研究では，数十 km 四方の広域における地下水流動系を推定する。次に，超深地層研究所計画の研究用地および正馬様用地を包含する涵養域から流出域までの一つの地下水流動系を推定するとともに，ローカールスケールのモデル化領域やその境界条件を設定する（表 3.2.1-1）。そのためには，対象とする地下水流動系を適切に評価するためのモデル化領域や境界条件の設定方法を構築することが重

要な検討課題となる。

ローカールスケールを対象とした調査研究では，表 3.2.1-1 に示すように，領域の地下水流動に大きな影響を与えていると考えられる長さ数 km 以上の不連続構造の分布と幾何学的性状，領域の概括的な動水勾配や地下水の流動経路，および地下水の地球化学特性を合理的に調査・評価することが重要である。また，この調査研究を通して，地質環境が本来持つ不均質性と，調査データの品質と量などに依存する地質環境モデルや地下水流動解析結果の不確実性の評価が重要な検討課題となる。

平成 15 年度は，ローカールスケールの調査研究については，①数 km から数百 m 規模の断層や割れ目帯および水みちを検出するための調査技術の開発，②ローカールスケールにおける水理地質構造のモデル化と地下水流動解析技術の構築，③地下水流動解析結果と地球化学モデルの整合性の確認の3つの課題について検討した。具体的には，

- ・ リニアメントの解析結果から推定される断層を対象とした高密度電気探査やボーリング調査
- ・ 精密空中写真判読調査および長さ数 km～数百 m のリニアメントの解析

表 3.2.1-1 広域地下水流動研究で対象とするスケールと地質環境特性の記述要素

		地質環境モデル				スケール
		地質構造	水理地質構造	地球化学	岩盤力学	
広域地下水流動研究 (RHS)	リージョナルスケール (Regional Scale)	場のモデル ・ 文献および既存情報に示された以下の地質構造要素 ①活構造 ②長さ数km以上の大規模不連続構造 ③地形 ④母岩および堆積岩の分布	場のモデル/現象モデル ・ 文献および既存情報に基づいて地質構造モデルに示された不連続構造および岩盤構造区分毎の平均透水係数地下水位など			平面：数100km ² (数10km×数10km) 深度：10km程度まで
	ローカールスケール (Local Scale)	場のモデル ・ 領域内で確認されている断層および存在の可能性のある長さ数 km 以上の断層などの不連続構造の分布とその幾何学的性状 ・ 対象となる岩盤において，割れ目頻度や空隙構造または岩相に明瞭なコントラストが認められ，領域内に広く連続して分布することが予測される構造区分または岩相区分 ・ 地形および母岩の起伏面 ・ 層序を基にした堆積岩の区分	場のモデル/現象モデル ・ 地質構造モデルで記述された不連続構造の内，母岩と対象となる岩盤に比べオーダー単位で平均透水係数が異なると考えられる構造 ・ 地質構造モデルで区分した構造においてオーダー単位で平均透水係数が異なると考えられる区分 ・ 希釈層となり得る構造を評価・記述するための情報 ・ 地下水面または地表からの涵養量 ・ Regional Scaleの解析に基づく境界条件			平面：数10km ² (数km×数km) 深度：3km程度まで

- ・ 反射法弾性波探査ボーリング孔での調査結果をあわせて断層・割れ目や主要な水みちの位置や透水性の確認
- ・ 地下水流動解析による主要な地下水流動方向などの推定
- ・ 地下水の水質分布と水質形成機構などの検討を行い、これらの調査に必要な手法の構築を実施した。また、ファジー地球統計手法を利用し、地質環境モデルに関する不確実性解析手法を構築した。さらに、東濃地域におけるこれまでの調査結果に基づく地下水流動解析を例題として、その解析手法の適用性評価のために試行を実施した。

核燃料サイクル開発機構（2003）：広域地下水流動研究
年度計画書（平成 15 年度）、サイクル機構技術資料、
JNC TN7410 2003-004.

③ 成果の反映先

本研究の成果は、後述する超深地層研究所計画の地表からの調査予測研究段階の成果と組み合わせて、地表からの調査により地質環境を段階的に理解するための調査・評価技術として取りまとめる。また、これらの研究は、平成 10 年代後半を目途とされる概要調査地区の選定とそれに続く概要調査や、安全審査基本指針の策定を支援する技術基盤として反映する。

④ 今後の計画

リージョナルとローカールスケールの調査研究に相当する広域地下水流動研究においては、実際の東濃地域の地質環境を対象に調査計画の立案から調査・解析・評価に至る一連のプロセスを繰り返し実践し、広域地下水流動研究の研究実施領域を事例とした地質環境を把握するためのスケールごとの調査体系を例示する。

今後は、断層などの同定とその特性を評価する技術の適用性確認など残された課題の解決に向けてボーリング調査などを実施し、平成 17 年度までに研究成果を取りまとめる予定である。

なお、広域地下水流動研究は、平成 16 年度末までに、その主な調査・試験を終了する計画である。ただし、ボーリング孔における水圧・水質の長期モニタリングは、平成 17 年度以降も継続して実施する。

参考文献

- 動力炉・核燃料開発事業団（1997）：広域地下水流動研究基本計画書、動燃事業団技術資料、PNC TN7020 98-001.
- 糸魚川淳二（1980）：瑞浪地域の地質、瑞浪市化石博物館専報、1、pp. 1-50.

3.2.2 各調査研究の成果

1) 地質・地質構造に関する調査研究

① 課題と計画の概要

広域地下水流動研究における地質・地質構造に関する調査研究は、ローカスケールの地質環境を対象に、以下の2項目を平成16年度までの主要な課題として進めている。

- ・ 概括的な地質・地質構造の把握，地下水流動や地下水の水質の分布を規制すると考えられる大規模な断層や割れ目帯の同定，およびその分布特性や地質学的特性の把握のための調査技術の開発
- ・ 地質・地質構造の調査からモデル化に至るまでのプロセスを包含した，体系的な調査・解析・評価技術の整備

平成14年度までに実施した衛星・空中写真判読調査，空中・地上物理探査およびボーリング調査により，活断層や数百m規模以上の不連続構造（あるいは，対応するリニアメント），基盤花崗岩，および被覆堆積岩の分布や地質学的特性などが把握でき，それに係わる調査技術が整備された（サイクル機構，2003；竹内ほか，2003）。

平成15年度は，これまでにローカスケールにおいて分布が推定された不連続構造ならびに地質構造を対象に，リニアメント解析，反射法弾性波探査，およびボーリング孔における地質学的・地球物理学的調査を実施し，数km～数百mおよびそれより小さい規模の不連続構造の分布や地質学的特性の把握をするとともに，その調査に必要な技術を開発・整備した。さらに，その調査結果に基づき，これまでの地質構造の解釈の妥当性を確認し，その信頼性の向上を図った。

② これまでの成果

i) リニアメント解析

平成14年度に実施した大縮尺の空中写真（1万分の1スケール）の判読により抽出した，長さ数km～数百mのリニアメント（472本）と断層や割れ目との関係を検討するために，既往の調査（地表踏査，ボーリング調査，地上弾性波探査）で確認もしくは推定された断層や割れ目帯とリニアメントの分布や方向性を比較した。その結果，両者の分布および方向性が概ね整合的であること，および両者の長さや頻度の関係が両対数グラフ上

でほぼ同一の直線上に分布することが明らかになった（図3.2.2-1）。このことから，判読した長さ数km～数百mのリニアメントは，断層や割れ目帯の分布を反映していると考えられる。

また，図3.2.2-1に示すように，割れ目の長さと頻度は両対数グラフ上で直線関係にあることから，地上からの調査では確認が比較的困難な，長さ数m～数百m程度の割れ目の頻度（図中の点線枠部）を推定することができる可能性が示された（佐々木・梅本，2004）。

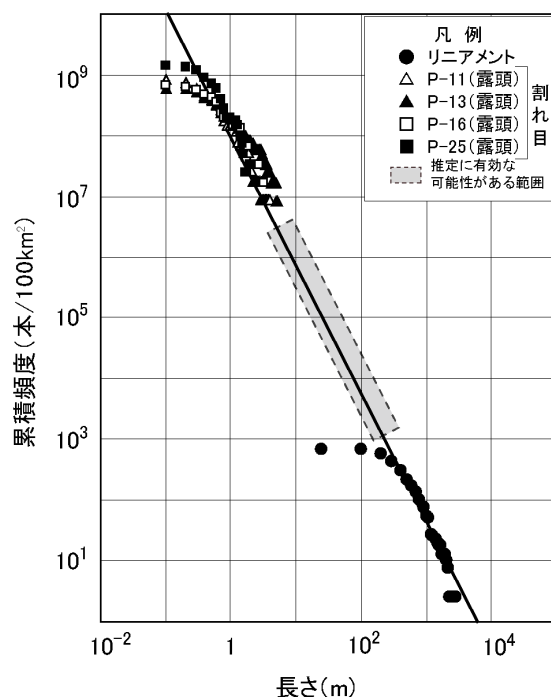


図3.2.2-1 ローカスケールにおける割れ目とリニアメントの長さ別頻度分布

以上の結果から，ローカスケールに分布する長さ数km～数百m規模のリニアメントは実際の不連続構造を反映しているばかりでなく，それより小さい規模を有する割れ目（長さ数m～数百m）の頻度を推定する際に有用な情報として活用できる可能性がある。今後は，瑞浪超深地層研究所用地で建設される研究坑道において，割れ目の長さと頻度を実際に計測し，今回の推定方法の有効性および不確実性の幅について評価する予定である。

ii) 反射法弾性波探査

ローカスケールにおけるこれまでのリニアメント調査や地表地質調査により分布が推定され

た不連続構造や地質構造の把握を目的として、図 3.2.2-2 に示す 3 測線で反射法弾性波探査を実施した。各測線における調査仕様を表 3.2.2-1 に示す。



※ 黒実線はリニアメント（山井ほか，1994）を示す。

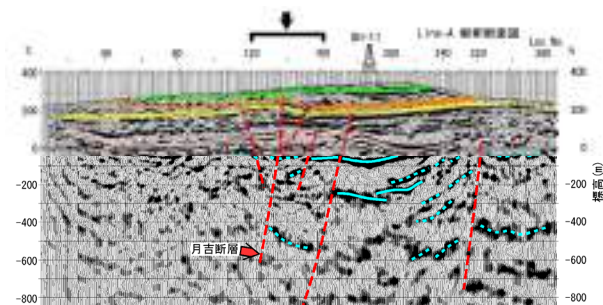
図 3.2.2-2 調査測線図

表 3.2.2-1 データ取得仕様一覧

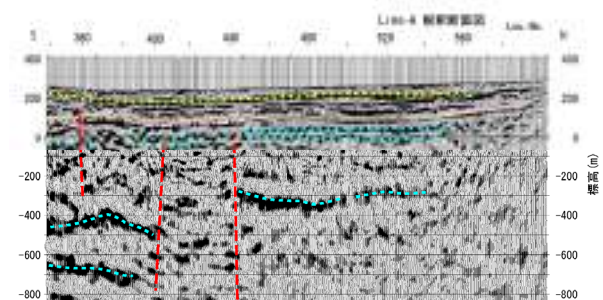
測線名	Line-A	Line-B	Line-C
測線長	5.83km	1.50km	
震源	大型パイプレータ HEM150 (2台)	ミニパイプ (1台)	ミニパイプ (1台)
スイープ周波数	8-90Hz	20-100Hz	
スイープ長	16sec		
スイープ回数	標準10回	標準5回	
発振点間隔	20m	10m	
受振点間隔	10m	5m	
装置	10Hz垂直成分		
探査機	GDAPS3		
記録長	5sec	2sec	

測線上のボーリング孔における音波検層および密度検層の結果から作成された合成反射記録との対比に基づき、各測線のマイグレーション深度断面上における地質構造を解釈した結果（図 3.2.2-3(a)～(d)）、Line-A では、被覆堆積岩と基盤花崗岩との不整合面や被覆堆積岩中の地層境界面が反射面として明瞭に捉えられていることが確認された（図 3.2.2-3(a)）。とくに、Loc.120

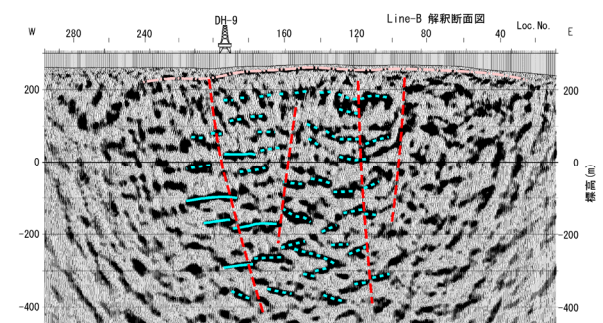
～160 付近（図 3.2.2-3(a)中の黒矢印の範囲）では被覆堆積岩と基盤花崗岩との不整合面（図 3.2.2-3(a)中の淡赤色）、被覆堆積岩中の地層



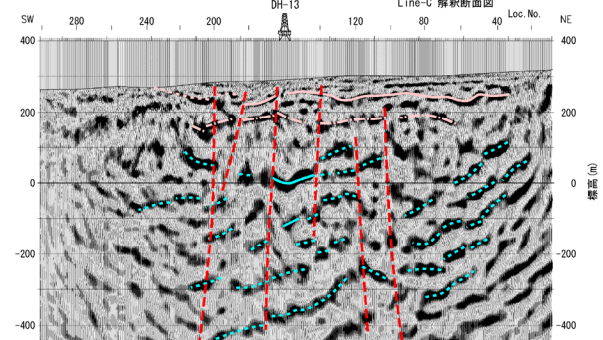
(a) Line-A/南部



(b) Line-A/北部



(c) Line-B



(d) Line-C

図 3.2.2-3 各測線における地質構造解釈断面図
境界面（図 3.2.2-3(a)中の黄色）に相当する反

射面が変位・彎曲しており、地表に向かって放射状に複数の断層が分布していることが認められた。これらの断層のうち最も明瞭な不連続部は、Loc. 140 付近（図 3.2.2-3(a) 中の赤矢印）に位置する南傾斜の逆断層であり、これは、月吉断層（Matsuzawa and Uemura, 1967）に相当するものと解釈された。一方、基盤花崗岩の中にも不整合面と平行するいくつかの反射イベント（図 3.2.2-3(a)～(d) 中の水色実線および波線）が確認されており、これらは、低角度傾斜を有する割れ目の集中帯を反映しているものと考えられる。さらに、図 3.2.2-2 で示されるリニアメントの近傍においては、反射法弾性波探査によって推定された不連続構造（図 3.2.2-3(a)～(d) 中の赤色破線）が多く分布している傾向が認められた。

以上の結果から、反射法弾性波探査により、これまでに確認されている月吉断層のほかに、既存の地質図には記載されていない不連続構造、被覆堆積岩と基盤花崗岩との境界である不整合面や被覆堆積岩中の地層境界面などの分布が推定できた。今後は、反射イベントの S/N 比向上といった解析処理の向上を図るとともに、岩芯観察結果などのボーリング孔で得られている情報との対比を試み、地質構造解釈の信頼性の向上を目指す予定である。

iii) ボーリング孔における断層・割れ目調査

サイトスケールにおける不連続構造の同定・特性評価技術を開発・整備するために、これまでに推定された不連続構造を対象に、以下のボーリング孔を利用した地質学的・地球物理学的調査を実施した。

a) DH-14 号孔における断層・割れ目調査

広域地下水流動研究実施領域の北西部には、実際にその存在が確認されている次月断層（動燃事業団, 1994）をはじめ、次月断層と同方向を有する北北西走向のリニアメントが高い頻度で分布する（図 3.2.2-4；山井ほか, 1994）。次月断層をはじめとするこれら北北西走向の不連続構造は、超深地層研究所計画の研究所用地周辺の露頭やボーリング孔でも実際に認められるほか（Kumazaki et. al., 2003）、その変位が数十 m 規模を有することから（太田ほか, 1999）、月吉断層と同様に、数 km と比較的大きな規模を有する重要な地質構造と考えられる。DH-14 号孔（垂直孔、掘削深度

1,012 m；図 3.2.2-4）は、北北西走向の不連続構造の連続性ならびにその地質学的特性の把握を主な目的として掘削し、平成 15 年度末現在、岩芯観察や BTV（ボアホールテレビ）観察、物理検層などの結果の解析とともに室内での水質分析および物性試験を継続して実施している。



図 3.2.2-4 DH-14 号孔周辺に分布するリニアメントおよび次月断層の分布

これまでに実施した岩芯観察や BTV 観察、物理検層などの結果、深度 1,000 m までの基盤花崗岩中において、十数箇所の断層や割れ目帯が確認でき、割れ目の密度（本数）および変質などに関する地質学的情報が取得できた（図 3.2.2-5）。BTV 観察による割れ目の走向・傾斜の判読結果から、ボーリング孔内で確認された断層・割れ目帯のうち、比較的規模の大きな断層岩を介在する 3 区間（深度 97 m 付近、347 m 付近、582 m 付近）は、いずれもボーリング孔東側に分布するリニアメントもしくは次月断層と同様に北北西走向を有しており、それらと連続する可能性が高いと考えられる。今後は、ボーリング孔と連続する北北西走向の不連続構造を特定していくとともに、その地質構造や活動履歴、地質学的特性などを詳細に

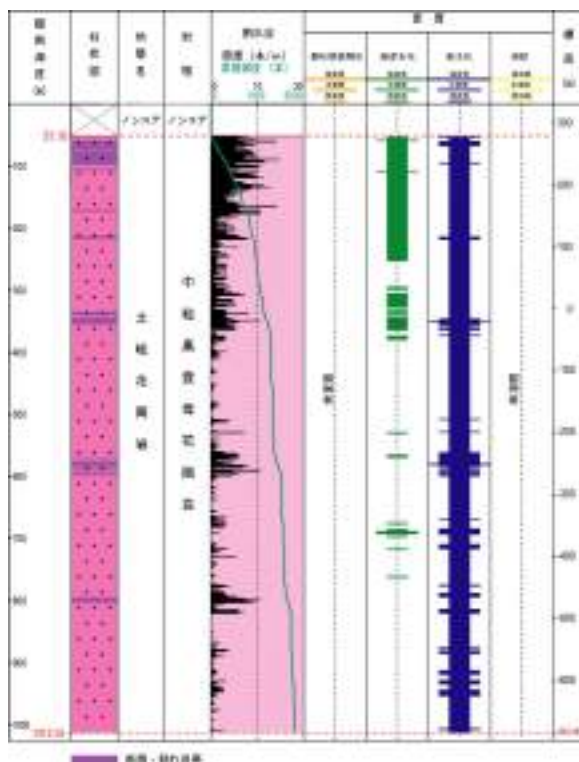


図 3.2.2-5 DH-14 号孔の地質柱状図

把握していく。

b) DH-15 号孔における断層・割れ目調査

DH-15 号孔（垂直孔，掘削深度 1,012 m；図 3.2.2-6）では，瑞浪超深地層研究用地の近傍で掘削された DH-2 号孔（垂直孔，掘削深度 501 m）で確認された 2 条の東西走向の断層（図中の緑色線）の連続性およびその地質学的特性の把握を主な目的として調査を進めている。

これまでに，深度 1,012 m までの掘削，岩芯観察，BTV 観察，物理検層などを実施し，十数区間の断層や割れ目帯を確認するとともに，岩相，割れ目の密度（本数）および変質などの地質学的情報を取得した（図 3.2.2-7）。これまでに得られた結果の概括的な解釈から，3 区間（深度 456 m 付近，595 m 付近，619 m 付近）に認められる断層・割れ目帯は，DH-2 号孔で確認された 2 条の東西走向の断層と同様な方向性，規模・構造を有しており，それらと連続する可能性が高いことが示された。今後は，DH-15 号孔においてマルチオフセット VSP（Vertical Seismic Profile）探査などを実施し，ボーリング孔近傍における断層・割れ目帯の分布や地質学的特性を把握するとともに，2 条の東西系断層をはじめとする不連続構造との関係性を評価する予定である。



この地形図は国土院刊行1/25,000地形図（土岐，瑞浪）を使用

図 3.2.2-6 DH-15 号孔周辺の推定断層

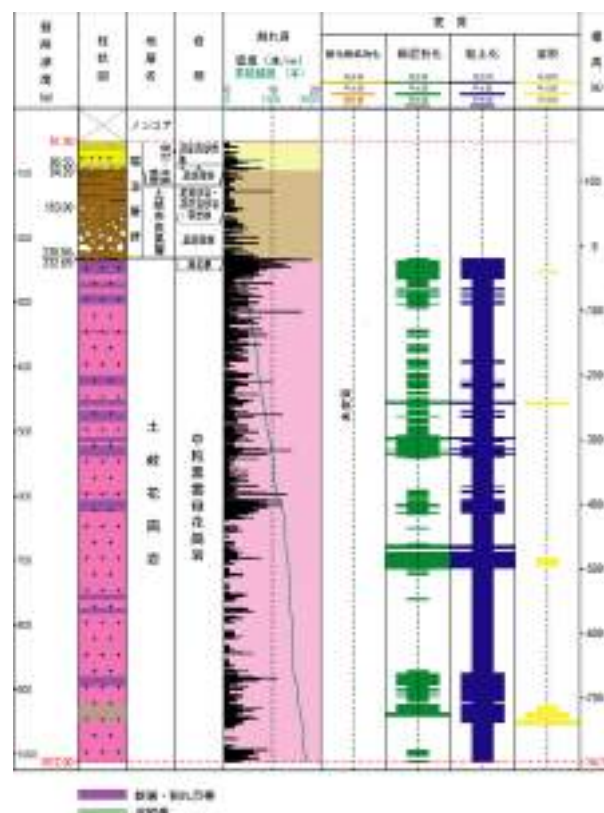
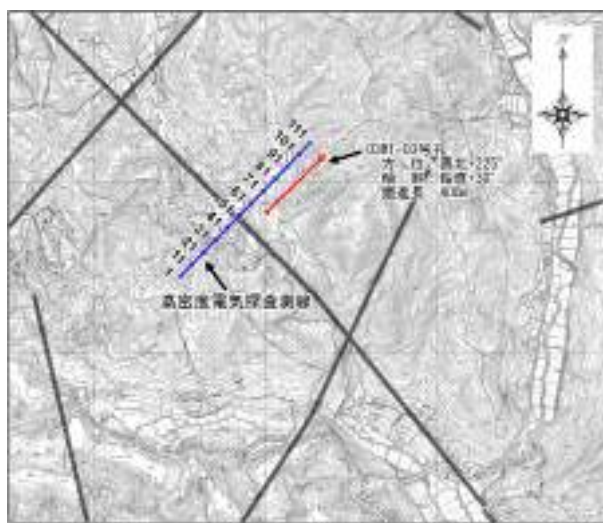


図 3.2.2-7 DH-15 号孔の地質柱状図

c) RT-03 号孔における高密度電気探査の有効性 確認調査

本調査では、高密度電気探査により検出されたリニアメント近傍の低比抵抗部（杉本・山田，2002）に対応する地質構造を明らかにすること，ならびに高密度電気探査の有効性を確認することを主な目的として，03RT-03 号孔（斜孔，掘削長 400 m）を掘削し，岩芯観察や物理検層などの地質学的・地球物理学的調査を実施した（図 3.2.2-8）。



1:2,500 瑞浪市都市計画基本図（平成 11 年測量）を使用。黒実線はリニアメント（山井ほか，1994）。電気探査測線上の数値は電極番号。

図 3.2.2-8 高密度電気探査測線およびボーリング位置図

その結果，高密度電気探査から予想されていた深度約 100 m 以深における低比抵抗値（数 10 $\Omega \cdot m$ ）を有する区間に大規模な断層の存在は確認されず，その区間の比抵抗値は，反対に非常に高い値（2,000～5,000 $\Omega \cdot m$ ）を示すことが明らかになった（図 3.2.2-9）。

ボーリング孔における電気検層結果を拘束条件とした再解析の結果（図 3.2.2-10）およびその信頼性を確認するためのシミュレーション解析の結果（図 3.2.2-11），図 3.2.2-9 の測線右端の低比抵抗部は測線延長方向の表層部に低比抵抗層が分布する場合に測線端部に現れた偽像であると考えられる。

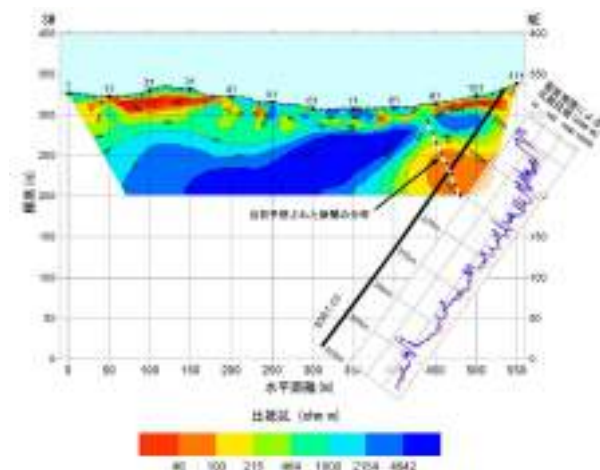


図 3.2.2-9 高密度電気探査解析結果

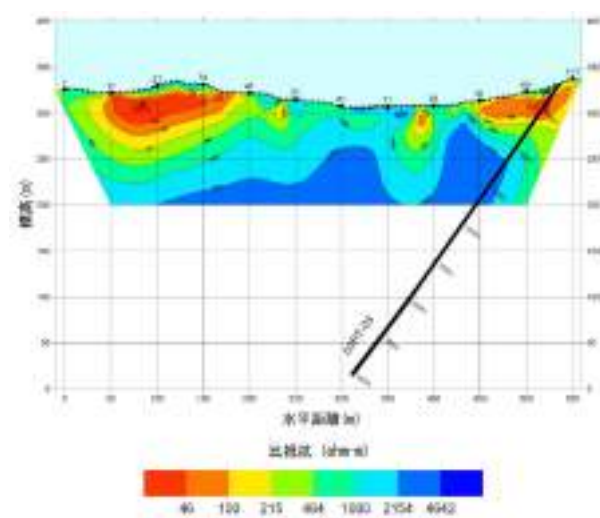
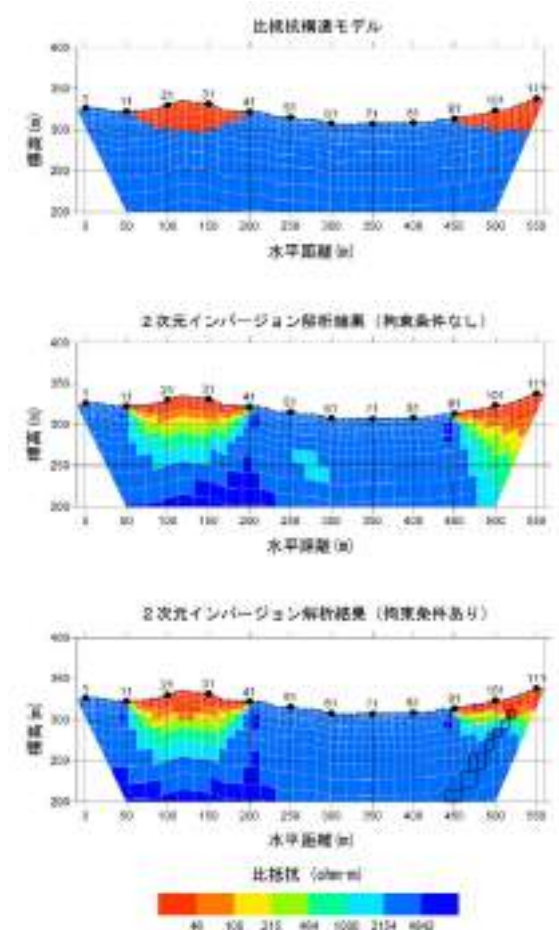


図 3.2.2-10 高密度電気探査再解析結果

岩芯観察結果や物理検層などの結果に基づき再解析結果について解釈すると，花崗岩健岩部と花崗岩風化部の境界に相当する約 2,000 $\Omega \cdot m$ の高比抵抗の分布（図 3.2.2-12 中の黒色破線部）から，中～高角度に傾斜する 3 条の不連続構造の存在が推定された（図 3.2.2-12 中の黒色および桃色実線部）。このうち，右端の不連続構造（図 3.2.2-12 中桃色実線部）は，その位置や傾斜からボーリング孔の深度 340 m 付近に分布する断層（図 3.2.2-12 中の桃色破線部）に連続していると考えられる。一方，リニアメント（図 3.2.2-12 中の白矢印）近傍においても，2 条の不連続構造（図 3.2.2-12 中の黒色実線部）が推定されるものの，これらの不連続構造は，ボーリング孔内の深度 340 m 付近で確認された断層と同等もしくはそれより小さい規模と考えられ，リニアメントで判読されるような長さ 3 km を超える規模の不



上段：想定した比抵抗構造モデル。測線終点側の浅部低比抵抗層は終点よりさらに延長させている
中段：拘束条件を与えないインバージョン解析結果
下段：傾斜孔に相当する箇所の比抵抗を電気検層の結果を拘束条件としたインバージョン解析結果

図 3.2.2-11 電気検層の比抵抗値を拘束条件とすることによる解析結果の改善

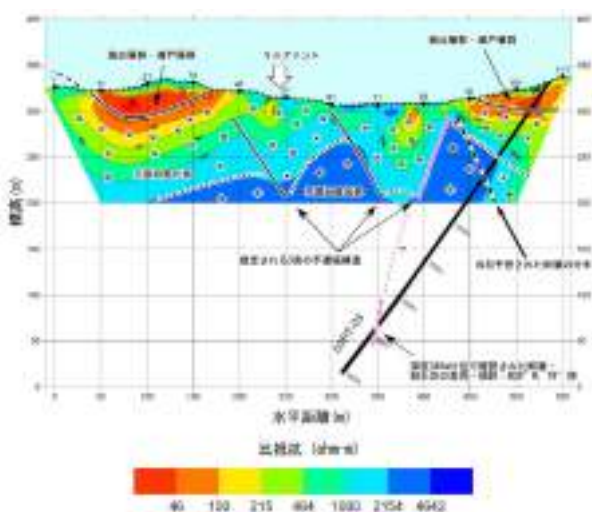


図 3.2.2-12 地質構造考察図

連続構造ではないものと推察される。

以上の結果から、高密度電気探査においては、ボーリング孔情報を拘束条件とすることにより、より正確な解析結果が得られ、かつ、不連続構造の分布を推測できる可能性が示された。また、再解析の結果から、リニアメントに対応する位置近傍に不連続構造の分布が推定されたが、それらはリニアメント長から推測された不連続構造の規模と比べると、規模の小さい不連続構造であることが推察された。今後は、これらの結果に加え、地表地質や VSP 探査などの情報を合わせた地質構造の解析・解釈を進め、不連続構造を対象とした高密度電気探査の有効性について詳細に評価していく予定である。

③ まとめ

平成 15 年度に実施した地質・地質構造に関する調査研究により、数 km～数百 m 規模の不連続構造の不連続構造の分布は、大縮尺の空中写真を用いたリニアメント解析、反射法弾性波探査、高密度電気探査により概括的に把握可能であることが明らかになるとともに、その調査に必要な技術や知見を新たに蓄積することができた。

今後は、1,000 m 級ボーリング孔 (DH-14 号孔および DH-15 号孔) で遭遇した断層や割れ目帯と予測した地質構造との連続性を確認するとともに、RT-03 号孔における高密度電気探査の有効性の評価を実施する。また、これまでに整備した広域的な地質・地質構造 (基盤花崗岩および堆積岩の分布、基盤不整合面の分布・性状や不連続構造の分布・性状) 調査の有効性を総合的に評価するとともに、不連続構造を考慮した地質・地質構造の調査・解析・評価技術を組み合わせた体系化を図り、その方法論をとりまとめる予定である。

参考文献

- 動力炉・核燃料開発事業団 (1994) : 日本のウラン資源、動燃事業団技術資料、PNC TN7420 94-006.
- 核燃料サイクル開発機構 (2003) : 広域地下水流動研究 年度報告書 (平成 15 年度)、サイクル機構技術資料、JNC TN7400 2003-002.
- Kumazaki, N., Ikeda, K., Goto, J., Mukai, K., Iwatsuki, T. and Furue, R. (2003) : Synthesis of the Shallow Borehole Investigations at the MIU Construction Site, JNC Tech. Rep., JNC TN7400 2003-005.
- Matsuzawa, I. and Uemura, T. (1967) : Geotectonic studies on the Toki Miocene sedimentary basin,

central Japan, Jour. Earth Planet. Sci., Nagoya Univ., 15, pp.35-79.

太田久仁雄, 天野健治, 須山泰宏, 三枝博光 (1999) : 広域地下水流動における三次元地質構造モデルの構築, サイクル機構技報, No. 4, pp.101-110.

佐々木圭一, 梅本和裕 (2004) : リニアメントによる割れ目の累積頻度の推定, 土木学会中部支部平成 15 年度研究発表会講演概要集, pp. 439-440.

杉本芳博, 山田直之 (2002) : 花崗岩地域を対象とした高密度電気探査による地質構造調査, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 株式会社ダイヤコンサルタント), JNC TJ7420 2002-002.

竹内真司, 天野健治, 下茂道人, 松岡清幸 (2003) : 電気伝導度検層を用いた亀裂性岩盤中の水みち検出技術, 土木学会第 58 回年次学術講演会概要集, pp. 413-414.

山井忠世, 角南基亮, 小林公一 (1994) : 東濃地域を対象にしたリニアメント調査 (その 1), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; アジア航測株式会社), PNC TJ7361 94-002.

2) 岩盤の水理に関する調査研究

① 課題と計画の概要

広域地下水流動研究における岩盤の水理に関する調査研究は、リージョナルおよびローカスケールを対象に、地下水流動特性を明らかにするために必要な調査・解析技術ならびに調査・解析結果の妥当性を評価するための技術の開発を目的としている。本研究では、東濃地域を対象に、水収支観測を含む表層水理調査、ボーリング孔を用いた水理試験、地下水位・間隙水圧の長期観測等を実施し、これらの調査で取得された情報に基づき水理地質構造モデルを構築して地下水流動解析を実施している。

本研究では、以下の3つを当面の主要な課題として研究を進めており、これらの課題は平成16年度末までに達成することを目標としている。

- ・ 断層・割れ目帯を対象とした水理調査技術の構築
- ・ ローカスケールにおける地下水流動モデル化技術および解析結果の妥当性の確認手法の構築
- ・ ローカスケールを対象とした地質環境のモニタリング技術の整備

平成14年度までの進捗と成果の概要は以下のとおりである。

断層・割れ目帯を対象とした水理調査技術の構築に関しては、健岩部と比べて高い透水性を有し顕著な水みちとなる可能性のある構造を対象として、品質のよい水理試験データを取得するため、大容量揚水ポンプの採用や試験区間の圧力漏えい（パッカーバイパス）の有無を確認するための圧力計の設置（藪内・竹内，2003）などの水理試験装置の改良を行ってきた。また、既存ボーリング孔（DH-2号孔）において流体検層、水理試験などを実施し、流体検層の一つである電気伝導度検層が花崗岩中の水みちを検出する有効な調査技術の一つであることを示した（竹内ほか，2003a，2004；Takeuchi et al.，2004）。

ローカスケールにおける地下水流動モデル化技術および解析結果の妥当性の確認手法の構築については、ローカスケールを包含するリージョナルスケールを対象とした地下水流動解析を実施し、瑞浪超深地層研究所用地周辺の地下水流動系に着目したローカスケールのモデル化・解析領域およびその境界条件を設定した。

ローカスケールを対象とした地質環境のモニタリング技術の整備については、ローカスケールにおける地下水流動解析結果の検証情報となり得る水収支観測を実施するために、ローカスケールのモデル化領域の中央部を流れる日吉川において河川流量観測を平成14年度末より開始した。また、既存ボーリング孔（DH-2号孔）に水圧モニタリングシステム（PIEZOシステム）を設置し、水圧の長期観測を開始した。さらに、多区間の長期水圧観測に有効である光ファイバーを用いた間隙水圧観測装置の開発に着手した（竹内ほか，2003b）。

② これまでの成果

i) 断層・割れ目帯を対象とした水理調査技術の構築

平成14年度に開始した深層ボーリング調査のうち、岩盤の水理に関する調査研究として、DH-14号孔では深度51m～1,010m（孔底付近）で流体検層を実施した（図3.2.2-13）。なお、流体検層は深度51～110m区間の測定を平成15年10月に実施し、深度102～1,010m区間の測定を平成16年2月に実施した。揚水状態におけるスピナー式および電磁式フローメーター検層の結果から、11箇所において孔内流速の変化点（地下水の流入点）を確認した。

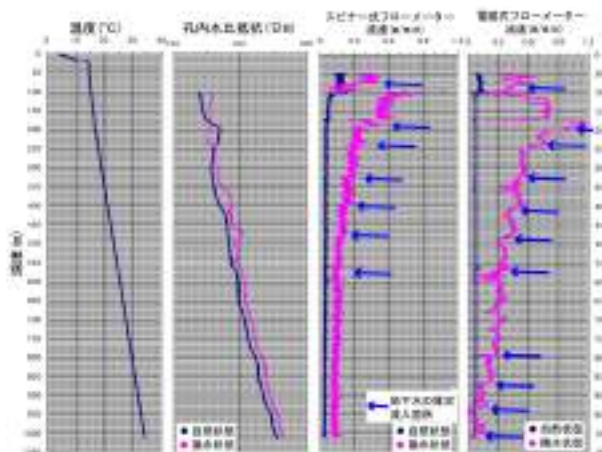


図 3.2.2-13 DH-14 号孔における流体検層結果

また、流体検層後のビルドアップ試験の結果から DH-14 号孔全体で $2 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ sec}^{-1}$ 程度の透水量係数が得られた。平成15年度末現在、抽出された地下水流入箇所における透水量係数の解析を実施中である。

DH-15 号孔では、主に堆積岩を対象とした深度

51 m～240 m までの流体検層および同区間内において 5 点の水理試験を実施した（図 3.2.2-14）。流体検層結果に認められる孔内流速の変化箇所は、孔径変化による影響が大きいと考えられることから、顕著な地下水の流入箇所の特定には至っていない。主要な地層層序毎に実施した水理試験の結果から、透水係数や水頭などの水理パラメータは、約 500 m 離れた瑞浪超深地層研究用地内の既存ボーリング孔（MSB-1, 3 号孔）で測定された値と同様の分布を示すことが明らかになった。また、DH-15 号孔での明世累層基底礫岩層における揚水に伴う水圧応答が MSB-3 号孔の同礫岩層で観測されたことから、同礫岩層は水平方向に大きな水理学的連続性を有することが確認された。

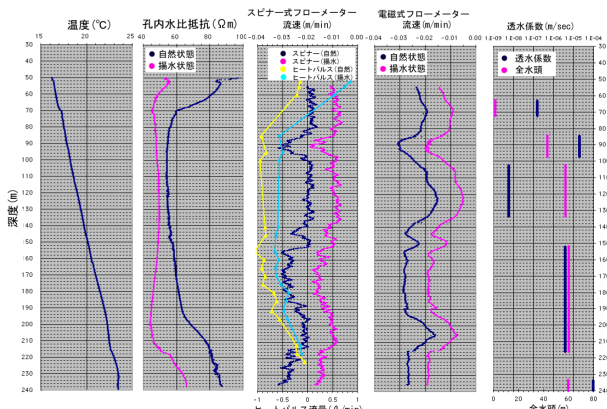


図 3.2.2-14 DH-15 号孔における流体検層および水理試験結果（深度 51～240 m）

なお、図 3.2.2-14 に示した透水係数は、グラフ上にプロットされた水理試験データ（圧力の時間変化）の直線部分の傾きから算出された値である。平成 15 年度末現在、水理試験で得られる水理パラメータの信頼性や見込まれる誤差などを定量的に評価するために、浸透流解析コードを用いて水理試験データとのフィッティングを行う逆解析を実施中である。

DH-15 号孔については、平成 15 年 3 月に掘削を終了している（掘削長 1,012 m）。深度 240 m 以深の花崗岩を対象とした流体検層および水理試験については、平成 16 年度に実施する計画である。

ii) ローカスケールにおける地下水流動モデル化技術および解析結果の妥当性の確認手法の構築

平成 15 年度は、ローカスケールを対象とした地質構造モデルに基づき水理地質構造モデルの

構築および三次元地下水流動解析を実施した。解析結果より、地下水の主流動方向は、概ね北東から南西であり、モデル化・解析領域（図 3.2.2-15）の北東部を涵養域とし、土岐川を流出域としていることが推定された（図 3.2.2-16）。

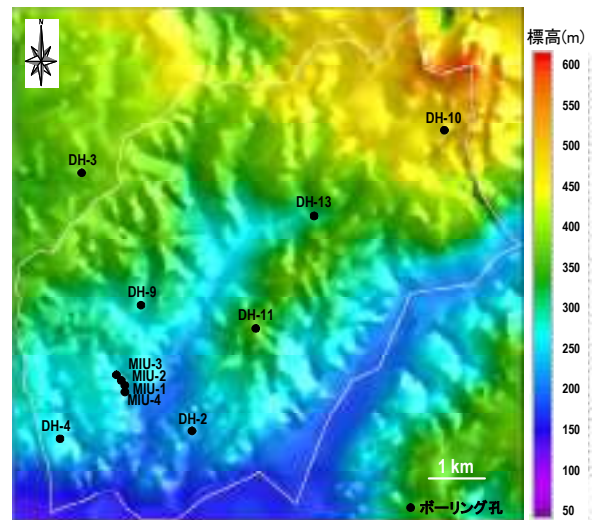


図 3.2.2-15 モデル化・解析領域とボーリング孔位置

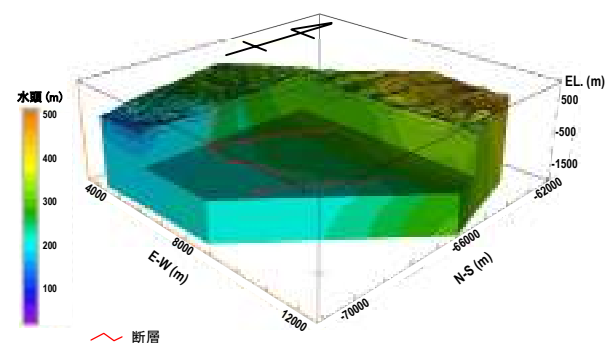


図 3.2.2-16 地下水流動解析結果（水頭分布）

次に、この地下水流動解析結果の妥当性の評価を試みた。地下水流動解析結果の妥当性の評価方法としては、ボーリング孔における水頭分布を用いた実測値と解析値の比較の他に、地下水の水質および起源・年代（OECD/NEA, 1999）、さらに地下水温に関する情報の利用が考えられる（Doughty and Karasaki, 2003）。

図 3.2.2-17 に、ボーリング孔における水理試験から得られた間隙水圧測定結果を示す。地下水流動解析で推定された涵養域と流出域以外のボーリング孔では、概ね静水圧分布を示している。一方で、涵養域と推定された地点でのボーリング孔の間隙水圧分布は、地表付近で静水圧分布より低

い水圧を示し、深度が深くなるに従い静水圧分布に近づいている。これは、このボーリング孔付近で下降流が生じていることを示している。一方、流出域と推定されたボーリング孔での間隙水圧分布は、深度が浅くなるほど静水圧分布より高い水圧となっている。これは、このボーリング孔付近で上昇流が生じていることを示している。このことから、ローカールスケールでの地下水流動解析結果は、ボーリング孔における間隙水圧測定結果と整合的であることが確認された。

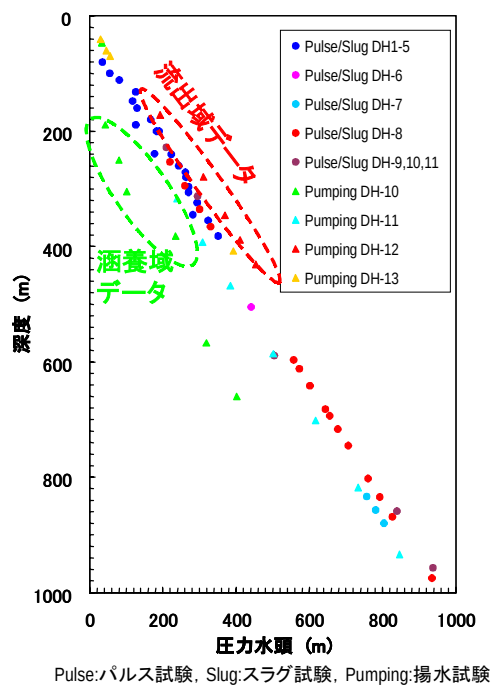


図 3.2.2-17 間隙水圧測定結果

また、水質の分布から推定される地下水の涵養域から流出域までの地下水の流動方向は地下水流動解析結果と概ね整合的であることが明らかとなった（図 3.2.2-18）（Metcalf et al., 2003；三枝ほか, 2003）。

さらに、水理地質構造のモデル化および地下水流動解析結果の妥当性を地下水温の分布を用いて評価する方法の有効性を検討するために、前述の水理地質構造モデルを用いて地下水温の影響を考慮した三次元の地下水流動解析を実施した（図 3.2.2-19）。その結果、地下水温の分布は、地表から涵養される比較的低温の低い地下水の下降流と比較的高温の高い地下水の地下深部からの上昇流の混合の程度に支配されており、これは、地表からの涵養量や地下水の流動方向ならびに流速に大きく影響を受けることが明らかとなった。こ

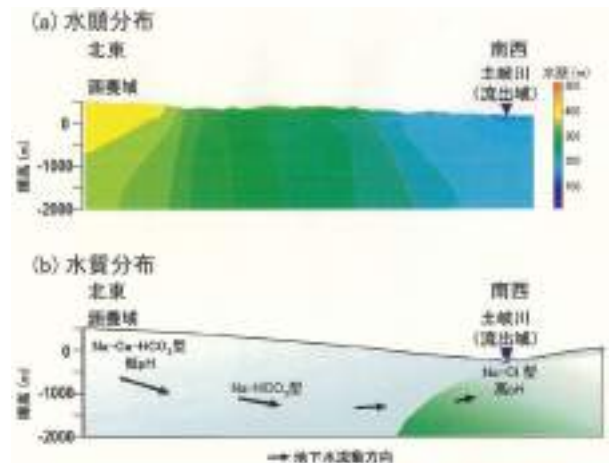


図 3.2.2-18 水頭分布と水質分布の比較

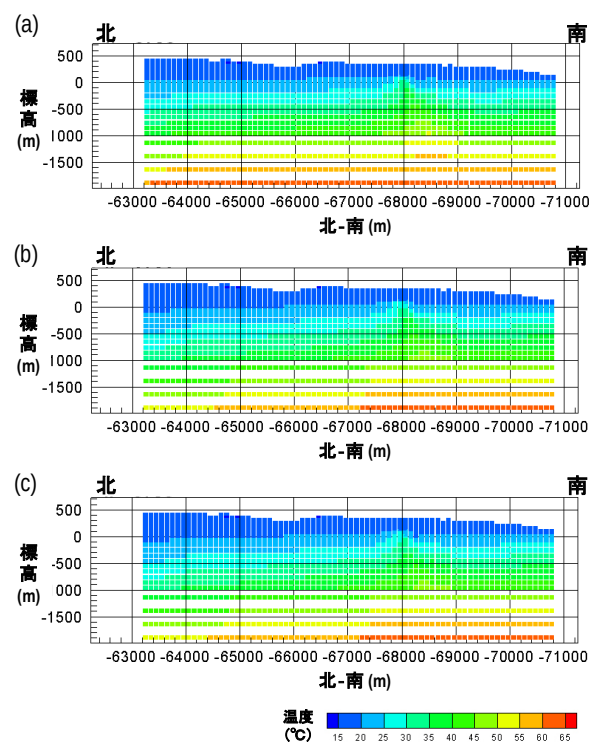


図 3.2.2-19 涵養量の違いによる地下水温分布の違い（研究所用地を通過する南北鉛直断面）（涵養量：(a)<(b)<(c)）

のことから、地下水温分布は水理地質構造のモデル化および地下水流動解析結果の妥当性を評価するための情報として利用できることが明らかになった。

iii) ローカールスケールを対象とした地質環境のモニタリング技術の整備

ローカールスケールのモデル化領域の中央部を流れる日吉川において平成 15 年 3 月より河川流量を観測した（図 3.2.2-20）。



図 3.2.2-20 日吉川流域ならびに河川流量観測位置

図 3.2.2-21 は、観測された月間の河川流量を、サイクル機構正馬様用地で観測された月間降水量とともに示したものである。この結果から、河川流量は降水量の変化に応じて増減することがわかる。なお、月間最大観測流量は 8 月の $5.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、月間最小観測流量は 2004 年 1 月の $0.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、年間平均流量は $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、総流量は $32.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ であった。

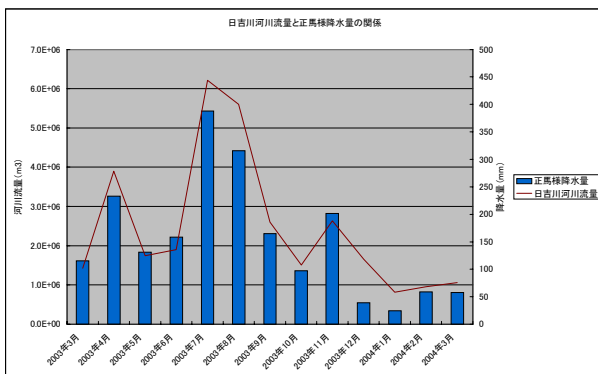


図 3.2.2-21 日吉川河川流量と降水量

また、比較的流域面積の大きい日吉川流域を対象として適切な水収支解析を行うには、流域外からの水の流入、流出の影響を考慮する必要があると考えられるが、日吉川流域内に整備されている簡易水道の供給量を調べた結果、日吉川河川流量

の 0.7%程度であり、水収支解析においてはほとんど影響しないことが明らかになった。

③ まとめ

広域地下水流動研究における岩盤の水理に関する研究では、深層ボーリング調査を実施し、断層や割れ目帯に支配されると考えられる地下水の流入点を把握するとともに、DH-15 号孔においては堆積岩を対象に水理試験を実施した。また、ローカルスケールを対象とした地下水流動のモデル化・解析においては、解析結果の妥当性を検証する方法として、深層ボーリング孔を利用した間隙水圧分布との比較に加えて地下水の水質分布および地下水温分布と比較する手法の有効性を示した。さらに、ローカルスケールのモデル化領域に対応する日吉川流域を対象とした水収支解析を行うために必要なデータを取得した。

DH-15 号孔において花崗岩を対象とした流体検層および水理試験が平成 16 年度に残されているものの、花崗岩を対象としたローカルスケールの水理地質構造モデルにおいて記述すべき重要な要素である断層割れ目帯の水理パラメータを精度よく取得する調査技術（調査フロー）を事例的に示せる段階にある。モデル化・解析技術に関しては、境界条件の設定や解析結果の検証方法を事例的に示したことから、今後は、調査量と解析結果に内在する不確実性の関係を示すことを課題として、取り組む予定である。ローカルスケールを対象としたモニタリング技術については、日吉川流域の水収支解析に必要な蒸発散量を適切に算出する手法の検討が課題として残されており、これを平成 16 年度に実施する予定である。

深層ボーリング孔を利用した地下水長期モニタリングに関しては、開発中の装置を含め異なるタイプの地下水の長期モニタリングシステムを導入しているが、それぞれの装置の長期健全性ならびに計測値の精度や信頼性など運用実績に基づく評価を今後実施していく予定である。

参考文献

- Doughty, C. and Karasaki, K. (2003) : 熱解析による水理モデルの境界条件の検討, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 377-382.
- Metcalfe, R., Hama, K., Amano, K., Iwatsuki, T. and Saegusa, H. (2003) : Geochemical approaches to understanding a deep groundwater flow system in the Tono area, Gifu-ken, Japan, Groundwater Engineering - Recent Advances, pp. 555-561, A.A.

BALKEMA PUBLISHERS.

OECD/NEA (1999) : Use of Hydrogeological Information in Testing Groundwater Flow Models, Workshop Proceedings, Borgholm, Sweden, 1-3 September 1997.

三枝博光, 稲葉 薫, 天野健治, 竹内真司 (2003) : 広域地下水流動特性評価に関する調査研究の現状と今後の取り組みについて, 土木学会第 58 回年次学術講演会論文集, CS7-065, pp. 407-408.

竹内真司, 天野健治, 下茂道人, 松岡清幸 (2003a) : 電気伝導度検層を用いた亀裂性岩盤中の水みち検出技術, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, pp. 413-414.

竹内真司, 平田洋一, 西垣 誠 (2003b) : 光ファイバーを用いた地下水圧観測装置の開発, 日本地下水学会 2003 年秋季講演会講演要旨, pp. 6-9.

Takeuchi, S., Shimo, M., Doughty, C. and Tsang, C.-F. (2004) : Identification of the Water-Conducting Features and Evaluation of Hydraulic parameters using Fluid Electric Conductivity Logging, Proceedings of the Second International Symposium on Dynamics of Fluids in Fractured Rock, pp. 349-354.

竹内真司, 下茂道人, 城まゆみ, Tsang, C.-F. (2004) : 電気伝導度検層による深部花崗岩中の水みちの抽出と水理特性の評価, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 451-456.

藪内 聡, 竹内真司 (2003) : 深層岩盤を対象とした単孔式透水試験, 日本地下水学会 2003 年秋季講演会講演要旨, pp. 32-35.

3) 地下水の地球化学に関する調査研究

① 課題と計画の概要

広域地下水流動研究における地下水の地球化学に関する調査研究では、深部地下水の地球化学特性の三次元的分布を把握し、地球化学モデルの構築を行うことで、地下深部の地球化学特性を把握するための調査・解析技術を構築することを目的としている。そのため研究実施領域の土岐花崗岩を対象に、

- ・ 地下水の物理化学パラメータ、化学組成および同位体組成の三次元的分布、それらと地質構造との相関の把握
- ・ 地球化学的情報に基づく地下水流動解析結果の妥当性評価

を主要課題として研究を進めている（サイクル機構、2003）。この調査研究によって得られる成果は、超深地層研究所周辺の深部地下水の流動状態やそれに伴って形成される地下水の水質分布などについても基盤情報を提供するものである。

平成 14 年度までに、研究実施領域に分布する地下水の地球化学特性について、研究実施領域の北方領域（ローカールスケールの地下水流動解析における上流域）で Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型地下水が、南方領域（ローカールスケールの地下水流動解析における下流域）で Na-Cl 型地下水が分布することを把握した。また、各々の地下水の水質形成機構について、Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型地下水は主に水-岩石反応により、Na-Cl 型地下水については、塩分濃度の異なる複数の地下水の混合により水質が形成されていることを明らかにした。

平成 15 年度は、これらの研究成果を踏まえ、研究実施領域全体の地下水水質データを用いた多変量解析や希ガス同位体比等に基づく解析によって、各々の地下水の分布状態、水質形成メカニズムについて詳細な解析を行った。

② これまでの成果

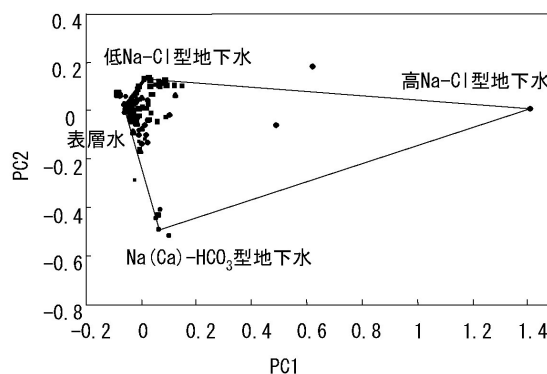
i) 多変量解析による水質分類手法の検討

前述したように、これまでに地下水の化学組成に基づいて水質分類および地下水の分布状態の解析を行った結果、研究実施領域の南方領域においては、塩分濃度の異なる複数の地下水の混合により Na-Cl 型地下水が存在することが明らかになっている。このような異なる地下水の混合により水質が形成される場合、特定の成分間の相関（例え

ば、Na-Cl の関係など）などに着目した解析が有効である。一般的に、溶存する複数の成分を同一の場で考察する手法として、多変量解析の一手法である主成分分析（Principal Component Analysis）が行われている。平成 15 年度は、東濃地域と同様に結晶質岩体、Na-Cl 型地下水が分布する研究サイトを有するスウェーデン SKB によって開発された、主成分分析に混合とマスバランス計算を組み合わせた M3 解析手法（Multivariate Mixing and Mass balance modelling analysis; Laaksoharju et al., 1999）を適用し解析を行った。

その結果、研究実施領域の地下水について、混合による水質形成の端成分として、以下の 4 種類の成分を抽出できた（図 3.2.2-22）。

- ・ 地表水：表層の河川水等で代表される水
- ・ 低 Na-Cl 型地下水：南方領域の花崗岩最上部に分布する低 Cl 濃度の Na-Cl 型の地下水
- ・ 高 Na-Cl 型地下水：南方領域の高砂温泉（瑞浪市北小田町）に代表される高塩濃度の Na-Cl 型地下水
- ・ Na(Ca)-HCO₃ 型地下水：北方領域の Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型地下水



$$\begin{aligned} \text{PC1} &= 0.54[\text{Na}] + 0.23[\text{K}] + 0.54[\text{Ca}] + 0.16[\text{Mg}] - 0.01[\text{HCO}_3] + 0.003[\text{SO}_4] + 0.16[\text{F}] + 0.55[\text{Cl}] \\ \text{PC2} &= 0.10[\text{Na}] - 0.21[\text{K}] - 0.05[\text{Ca}] - 0.59[\text{Mg}] - 0.44[\text{HCO}_3] - 0.53[\text{SO}_4] + 0.31[\text{F}] + 0.12[\text{Cl}] \end{aligned}$$

図 3.2.2-22 多変量解析（主成分分析）による地下水の水質分析

南方領域の Na-Cl 型地下水は、M3 解析においても、概略的に「低 Na-Cl 型地下水」と「高 Na-Cl 型地下水」の混合で表現することができる。更に、広域的な地下水の混合割合について定量的に解析した結果、「高 Na-Cl 型地下水」は南方領域の DH-2、DH-12 号孔の深部の地下水に 20%程度混合していると推測された。また、浅くなるにしたがつ

て割合が低くなる傾向にあり、北方領域の DH-10, DH-13 号孔付近では、浅部から深部まで「高 Na-Cl 型地下水」の寄与がほとんどないことが明らかになった（図 3.2.2-23）。

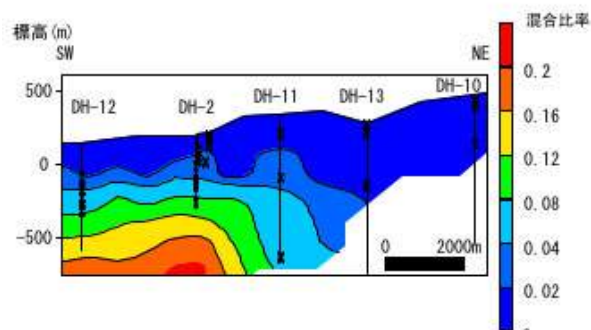


図 3.2.2-23 M3 解析手法に基づく地下水混合割合の定量的解析

ii) 希ガス同位体比に基づく調査解析技術の検討

溶存希ガスは、その化学的な特性から周辺岩盤との反応も少なく、地下水に溶存している限り地下水と共に移動するので、地下水の起源や流動状態を反映するトレーサーとして有効である。また、各希ガスの発生源はそれぞれ異なり、同位体比にそれらの違いが反映され易いため、その特性を十分に理解した上で調査に活用することで地下水の流動状態に関するより多くの情報を得ることがで

きる（五十嵐ほか、2000）。これまでに東濃地域では、岩盤から地下水への He フラックス見積もり値に基づいて、地下水の涵養域と流出域の解析等を行っており、水理学的な解析結果と矛盾しない結果が得られている。平成 15 年度は、各々の水質の地下水中の希ガスの濃度・同位体比に関わる情報を整理し、希ガスを用いた地球化学的調査・解析技術について検討した（長尾ほか、2004）。

東濃地域の岩石の希ガス濃度及び同位体比の一例を表 3.2.2-2 と表 3.2.2-3 に示す。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が約 5×10^{-9} と極めて小さい値、 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ が 1,600~6,100 と高い値を示し、放射性起源 ^4He と ^{40}Ar に富むと推察された。更に、岩石中での核反応 $^{18}\text{O}(\alpha, n)^{21}\text{Ne}$ や $^{24}\text{Mg}(n, \alpha)^{21}\text{Ne}$ により生成される ^{21}Ne の過剰も検出された。地下水中の希ガス同位体比は、地下へ浸透する前段階で混入した大気起源の希ガスの同位体比と、その後、地下に浸透していく過程で、岩盤や地下深部から地下水へ付加する希ガスの同位体比を反映した値となる。図 3.2.2-24 に $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比- $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比の関係を示す。図中の 2 つの線は、大気あるいは水に溶解した大気中の He が、花崗岩中の放射性物質起源の He と混合した場合（大気成分と花崗岩成分を結ぶ下側の線）と、地下深部から上昇してきたマントル起源の He との混合した場合（大気成分と

表 3.2.2-2 東濃地域の岩石中の希ガス量

孔名	採取深度 (mab)	重量 (g)	^4He E-9cc/g	^{20}Ne E-9cc/g	^{40}Ar E-9cc/g	^{84}Kr E-12cc/g	^{132}Xe E-12cc/g
DH-3	208.4-208.6	0.6430	3540	5.63	13100	242	14.8
DH-3	329.9-330.1	0.4031	11600	2.88	12100	69.4	6.83
DH-3	481.0-481.2	0.4352	6130	1.78	9780	83.5	15.5
DH-3	509.5-509.6	0.5116	8150	1.44	10400	73.6	7.08
DH-3	882.1-882.3	0.4413	10800	3.45	12300	111	7.88
DH-3	996.0-996.2	0.5539	9600	4.87	11100	105	8.43
KNA-6	96.0-101.0	0.5019	13600	1.34	10200	95.9	7.96

表 3.2.2-3 東濃地域の岩石の希ガス同位体比

孔名	深度 (mab)	³ He/ ⁴ He 10 ⁻⁶	e-3/4 10 ⁻⁶	²⁰ Ne/ ²² Ne e-20/22	²¹ Ne/ ²² Ne e-21/22	³⁸ Ar/ ³⁶ Ar e-38/36	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar e-40/36				
DH-3	208.4-208.6	0.0039	0.0034	9.804	0.047	0.0314	0.0007	0.1894	0.0010	1597	4
DH-3	329.9-330.1	0.0050	0.0030	9.428	0.060	0.0350	0.0008	0.1924	0.0016	6107	37
DH-3	481.0-481.2	0.0080	0.0028	9.463	0.052	0.0341	0.0009	0.1891	0.0009	2543	7
DH-3	509.5-509.6	0.0054	0.0030	9.261	0.047	0.0377	0.0011	0.1909	0.0014	4882	12
DH-3	882.1-882.3	0.0045	0.0032	9.478	0.043	0.0323	0.0006	0.1910	0.0018	3445	15
DH-3	996.0-996.2	0.0041	0.0028	9.559	0.048	0.0304	0.0006	0.1895	0.0016	3295	12
KNA-6	-160m	0.0108	0.0032	9.343	0.085	0.0420	0.0013	0.1911	0.0021	3931	15

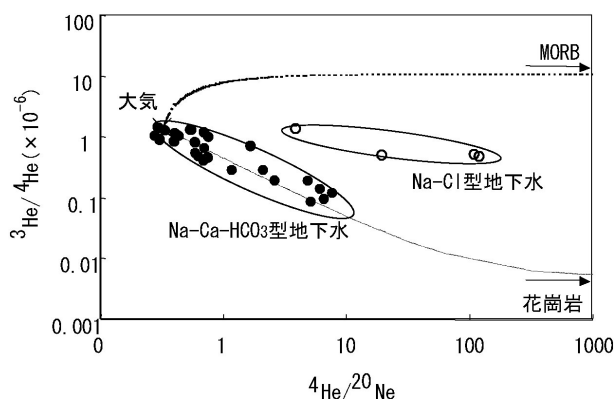


図 3. 2. 2-24 東濃地域の地下水中の希ガス同位体組成と水質の相関

マントル[MORB]成分を結ぶ上側の線)を示している。

東濃地域の地下水は、希ガス同位体比が大気成分の He と花崗岩成分の He との混合線上にプロットされるものと、大気成分の He と花崗岩成分および MORB 成分の He の中間的値との混合線上にプロットされる地下水に大別される(長尾ほか, 2004)。地下水の水質と比較すると、北方領域の Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型地下水が前者の、南方領域の Na-Cl 型地下水が後者の傾向を示す。この前者の相関については、Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型地下水が、主に水-岩石反応で水質形成されているというこれまでの研究結果と整合的である。一方、Na-Cl 型地下水中の希ガスの特徴を説明する仮説として、同地下水が分布する南方領域において、未確認の断層等を経路として地下深部からマントル起源の He が供給されている可能性や同地下水が Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型地下水と比較して滞留時間が長く MORB 成分の He をより蓄積する条件にあった可能性等が挙げられる。これらの仮説について、今後、He, Ne 以外の希ガス成分も用いて解析を行う必要がある。

iii) 塩素同位体比を用いた Na-Cl 型地下水の成因解析

研究実施領域北方領域の Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型地下水の水質形成機構が比較的明確であるのに対して、南方領域の Na-Cl 型地下水については、地下深部に高塩素濃度の地下水が存在し、それとの混合により水質が形成されていると推測されるものの、混合相手の高塩素濃度地下水について素性が明らかになっていない。平成 14 年度までの解析では、高塩素濃度地下水の成因として、

1) 長期にわたる水-岩石反応、2) 化石海水、3) 高温環境での水-岩石反応(温泉水)などを想定し、化学成分比(Na, Br, Cl 等)や水素・酸素安定同位体比等に基づく解析を行ったが(Metcalf et al., 2003)、高塩素濃度地下水の混合割合が低いため、その起源や成因を明確にできなかった。平成 15 年度は、近年分析可能になった塩素の安定同位体比(³⁷Cl/³⁵Cl 比)を用いて、解析手法としての適用性を検討する観点も含めて、予察的に分析および解析を行った。塩素の安定同位体比は、塩素濃度の低い地下水との混合による希釈の影響をほとんど受けないことから、化学成分比や水素・酸素安定同位体比等と違い、直接的に高塩素濃度地下水に関わる情報を得られる可能性がある。

この地域で最も塩素濃度が高く高塩素濃度地下水の寄与率が高いと考えられる高砂温泉の地下水、水-岩石反応によりその水質が形成されている北方領域の Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型地下水(DH-9 号孔/深度 150 m [花崗岩浅部], KNA6S 号孔 [堆積岩最下部])、および参照試料として現在の海水の塩素安定同位体比を分析・比較し、高塩素濃度地下水の成因について考察した。

各々の値は図 3. 2. 2-25 のように求められた。塩素同位体比と塩素濃度には、直線的な相関が認められた。高砂温泉の地下水は、Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型地下水と海水の中間的な塩素同位体比を示した。この事実は、化石海水が Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型地下水によって希釈されることで、高砂温泉の塩素同位体組成が形成された可能性を示唆する。以上のことから、塩素安定同位体比を用いた解析は、Na-Cl 型地下水の起源・成因を考

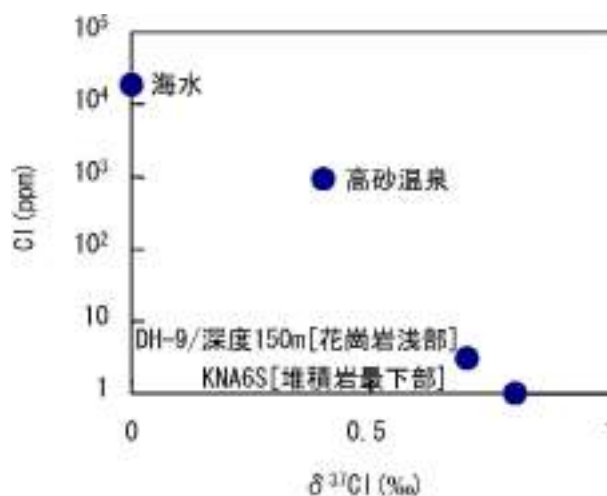


図 3. 2. 2-25 地下水中の塩素同位体比と塩素濃度の相関

察する上で非常に有効であると考えられた。今後、この地域の様々な塩素濃度の地下水について塩素同位体比を測定するとともに、水-岩石反応で生成される高塩素濃度地下水についても塩素同位体比に関わる情報を取得し、それらの相関に基づいて、この地域の Na-Cl 型地下水の起源・成因について詳細に解析していく予定である。

③ まとめ

研究実施領域に分布する様々な水質の地下水について、多変量解析により分類を行った。その結果、4種類の端成分地下水の水質について整理できた。また、研究実施領域南方領域に分布する Na-Cl 型地下水について、水質形成に関わる地下水の混合状態を定量的に解析可能であることを示した。希ガス同位体比に関わる調査では、北方領域と南方領域の地下水の水質形成機構の違いを希ガス同位体組成が反映していることが明らかになった。今後、希ガス同位体組成に基づいて地下水の分布状態に関わる解析を行うことが可能であると考えられる。また、これまで明らかになっていなかった、南方領域深部に分布する可能性のある高塩素濃度の Na-Cl 型地下水について、塩素同位体比を用いて解析した結果、解析手法の有効性を示すと共に、Na-Cl 型地下水の起源が化石海水である可能性を示唆した。この点については、今後詳細に調査を行う必要がある。

参考文献

- 五十嵐敏文, 馬原保典, 塩崎 功 (2000) : 地下水モデリングのためのデータ解析手法の基礎, 地下水学会誌, 42, pp. 243-262.
- 核燃料サイクル開発機構 (2003) : 広域地下水流動研究年度計画書 (平成 15 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2003-004.
- Laaksoharju, M., Skärman, C., and Skärman, E. (1999) : Multivariate Mixing and Mass-balance (M3) calculations, a new tool for decoding hydrogeochemical information. Applied Geochemistry, 14, pp. 861-871.
- Metcalfe, R., Hama, K., Amano, K., Iwatsuki, T., and Saegusa, H. (2003) : Geochemical approaches to understanding a deep groundwater flow system in the Tono area, Gifu-ken, Japan, Groundwater Engineering - Recent Advances, Kono, Nishigaki & Komatsu (eds), pp. 555-561.
- 長尾敬介 (2004) : ストロンチウム同位体比及び希ガスをを用いた地球化学的研究手法の確立, サイクル機構技術資料 (公募型研究報告書; 東京大学), JNC

3.2.3 調査研究の統合

① 課題と計画の概要

広域地下水流動研究は、広域（ここでは主に地下水流動系の涵養域から流出域までを包含する数km四方以上の領域）における地表から地下深部までの地質・地質構造、地下水の流動特性や地球化学特性などを明らかにするために必要な調査・解析技術ならびに調査・解析結果の妥当性を評価するための技術の開発を主な目的としている（動燃事業団、1997）。

「第2次取りまとめ」以降は、要素技術開発と並行して、超深地層研究所計画と研究成果を有機的に組み合わせつつ、リージョナルスケールからブロックスケールに至るまでの地質環境を調査・評価する技術の整備を進めている。取り組んでいる主な課題としては、地質構造、特に大域的な地下水流動や地下水の移行経路に影響を与えると考えられる断層の分布および水理特性を調査・評価する技術の整備、地球化学的に地下水の流れを確認する方法の整備、調査・解析・評価の一連の繰り返しアプローチを実践するために必要となる地質環境特性の空間分布の不確実性解析手法の整備である。

断層の分布および水理特性を調査・評価する技術の整備については、既存文献でその存在が確認されている断層（月吉断層、次月断層）を対象とした調査・解析手法の整備、鞍部や傾斜変換点などの判読要素が明瞭ではないリニアメント（地形の線状構造）が断層と対応しているのかどうかを確認する調査、地表地質踏査や地上物理探査においても空間的に決定論的な評価が難しい中規模の断層を試錐調査データで補完しつつ確率論的にモデル化する手法の整備などの取り組みを行っている。

地球化学的に地下水の流れを確認する方法の整備については、地下水の水質から推定される地下水の涵養域から流出域までの地下水の流動方向と、地下水流動解析から推定される地下水の流動方向に矛盾がないかどうかの確認などを行ってきている。

調査・解析・評価の一連の繰り返しアプローチを実践するために必要となる地質環境特性の空間分布の不確実性解析手法の整備については、地質環境の不均質性に依存する地質環境特性の空間分布の不確実性の定量化のために新たな方法論を構

築し、東濃地域におけるこれまでの調査結果に基づく地下水流動解析を例題として、その解析手法の適用性評価のために試行を実施した。

② これまでの成果

今回の解析は、ファジー地球統計手法を利用して、地質環境モデルに関する不確実性解析手法を構築し、東濃地域におけるこれまでの調査結果に基づく地下水流動解析を例題として、その適用性を評価することを目的に行った。

今回の解析では、地質構造モデルと水理地質構造モデルに含まれる概念の違いによる不確実性因子（複数の競合する概念モデルの存在）、および透水係数などのパラメータ値の変動幅などの定量的な不確実性因子の確からしさをファジーメンバーシップ（「可能性が極めて高い」や「可能性が低いが否定できない」といった主観的な確信の程度を、数学的に定量化して表現したもの）として表現し、モンテカルロシミュレーションを行うことによって、「可能性の否定できない」結果の範囲と「確からしさの程度」を算出する方法を用いた（柳澤ほか、2003a；柳澤ほか、2003b；図3.2.3-1）。

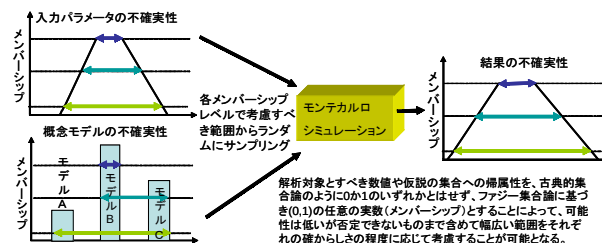


図 3.2.3-1 ファジー地球統計学を利用した地質環境モデルに関する不確実性解析の考え方

解析領域は、地形および土岐花崗岩体の分布に基づき約10km四方とし（図3.2.3-2）、この範囲でこれまで行われたリモートセンシング調査、地表地質踏査およびボーリング調査の結果に基づきファジーメンバーシップを設定し、各メンバーシップレベルにおいて定常飽和地下水流動解析（モンテカルロシミュレーション）を行った。これらの結果に基づき、地下水移行経路、地下水移行時間などを算出するとともに、どのような因子が地下水流動解析の不確実性の評価結果に影響を与えているかどうかを検討した（図3.2.3-3）。

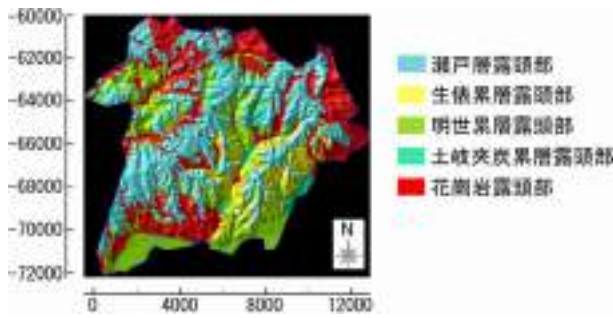


図 3.2.3-2 対象領域

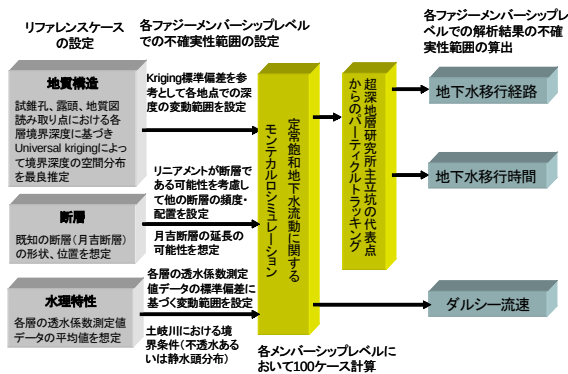


図 3.2.3-3 解析の流れ

地質構造に関する不確実性のうち、断層の頻度および分布の不確実性を図 3.2.3-4(a)に、月吉断層の総延長の不確実性を図 3.2.3-4(b)に例として示す。本解析では、リモートセンシング調査で抽出されたリニアメント（線状構造）の方向と、地表踏査やボーリング調査で確認された割れ目・断層の方向が一致することから、リニアメントが断層である可能性を仮説として設定した。既存の断層である月吉断層のみの場合はファジーメンバーシップ関数 $\mu=1$ 、断層地形を有する明瞭なリニアメントまで全てを断層と仮定した場合は $\mu=0.5$ 、不明瞭なリニアメントまで全てを断層と仮定したものを $\mu=0$ とした（図 3.2.3-4(a)；以下、リニアメントから設定したものを仮定断層と呼ぶ）。また、既存の断層（月吉断層）については、図 3.2.3-4(b)に示すとおり側方方向の延長の不確実性を設定した。

水理地質構造モデルへの入力パラメータの不確実性のうち、透水係数の不確実性を図 3.2.3-5 に示す。透水係数の不確実性は各岩相の透水係数頻度分布に基づき、割れ目を含む岩盤の透水係数のファジーメンバーシップを設定した。また、仮定断層および月吉断層の水理特性については、月吉断層の試験結果から、断層面に鉛直な方向に関し

ても透水性と遮水性の2つのケースが想定されることから、図 3.2.3-5 に示すとおり、母岩である花崗岩の透水係数に対する相対値として不確実性を設定した。

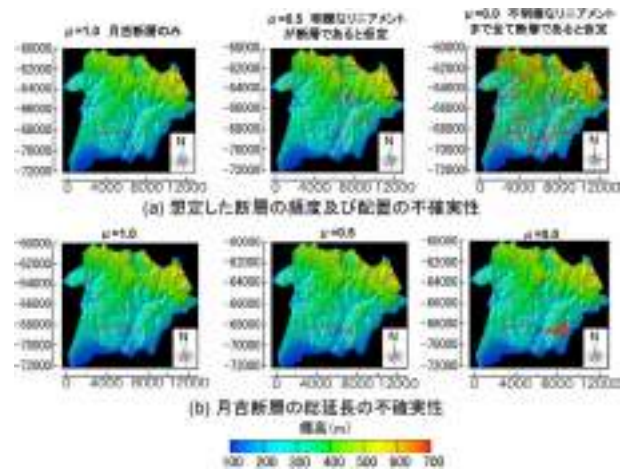


図 3.2.3-4 断層の不確実性

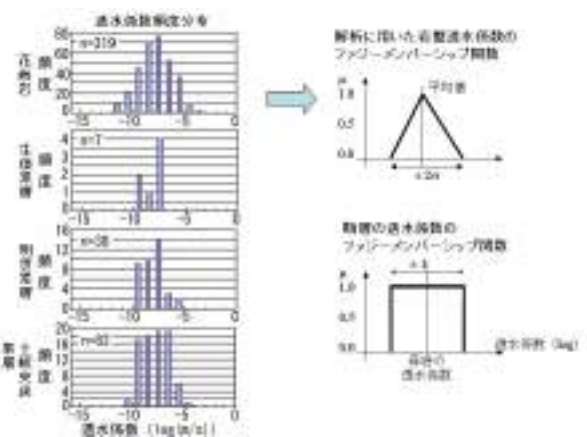


図 3.2.3-5 透水係数の不確実性

解析結果の一例を図 3.2.3-6 に示す。この解析により、以下のことが明らかとなった。

- ・地下水の移行経路の不確実性は、断層の有無と涵養域と断層との関係、および断層の水理学的特性（透水性／遮水性）に依存する。
- ・任意断面の流速の不確実性は、母岩である花崗岩の平均透水係数に依存する。
- ・地下水の移行時間は、上記の移行経路のほか、母岩である花崗岩の平均透水係数に依存する。

今回の解析をとおして、本手法を用いることにより、評価指標である地下水の移行経路、移行時間および流速などについて不確実性の程度を表現することと、これらの評価指標に大きな影響を与える地質構造要素や入力パラメータを抽出することが可能となった。

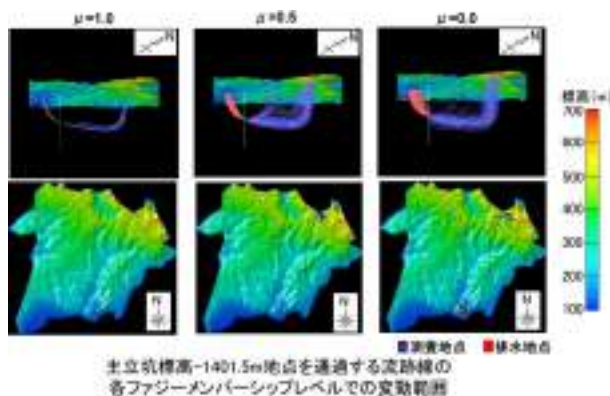


図 3.2.3-6 地下水移行経路の不確実性の例

③ まとめ

広域地下水流動研究は、平成 16 年度で主な調査・試験を終了する。今後は、「第 2 次取りまとめ」以降に取り組んできた、

- ・ 地質構造、特に大域的な地下水流動や地下水の移行経路に影響を与えると考えられる断層の分布および水理特性を調査・評価する技術の整備、
- ・ 地球化学的に地下水の流れを確認する方法の整備、調査・解析・評価の繰り返しアプローチを実践するために必要となる地質環境特性の空間分布の不確実性解析手法の整備

などの課題を中心に、それらの適用事例などによる知見を踏まえ、地質環境の調査・解析および解析結果の妥当性を評価するための一連の体系化された技術として、平成 17 年度までに取りまとめでいく。

参考文献

- 動力炉・核燃料開発事業団（1997）：広域地下水流動研究基本計画書，動燃事業団技術資料，PNC TN7020 98-001.
- 柳澤孝一，大澤英昭，武田精悦，高瀬博康，青山裕司，古市光昭，戸井田克，須山泰宏，若松尚則，西垣誠（2003a）：3 次元水理地質モデルについての不確実性解析手法の開発－東濃地域における例題演習－，日本原子力学会第 19 回バックエンド夏期セミナー資料集，pp.2.17-1 - 2.17-4.
- 柳澤孝一，大澤英昭，武田精悦，高瀬博康，青山裕司，古市光昭，戸井田克，須山泰宏，若松尚則，西垣誠（2003b）：地質環境特性評価の不確実性解析手法の東濃地域への適用，日本地下水学会 2003 年秋季講演会講演要旨，pp.26-31.

3.3 超深地層研究所計画

3.3.1 計画の概要

① 背景と目標

超深地層研究所計画は、2.2.1 1)項で示した課題項目①に位置づけられる「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」と、課題項目③に該当する「深地層における工学技術の基盤の整備」を全体目標とした約 20 年の計画である。本計画は、第 1 段階：地表からの調査予測研究段階、第 2 段階：研究坑道の掘削を伴う研究段階、第 3 段階：研究坑道を利用した研究段階からなる（サイクル機構、2002）。

本計画は、平成 8 年度より岐阜県瑞浪市明世町のサイクル機構が所有する用地（正馬様用地）において第 1 段階の調査研究を行ってきたが、平成 14 年 1 月、瑞浪市と研究所用地（市有地）の賃貸借契約を締結し、研究坑道などの設置場所を研究所用地に変更することとした（図 3.3.1-1）。

これを受けて、平成 14 年、研究所用地およびその周辺において第 1 段階の調査研究を開始した。また、平成 14 年 7 月には研究所の建設に着手し、平成 15 年 3 月までに用地の造成工事を完了した。平成 16 年 6 月現在、研究坑道掘削工事として立坑深度 300 m までの第 1 期工事を進めている。図 3.3.1-2 に研究坑道のレイアウトと建設工程のイメージを示す。



図 3.3.1-1 研究の実施場所

一方、正馬様用地は、これまで蓄積した月吉断層やその周辺の地質環境の情報やボーリング孔などの研究資源を利用した要素技術の改良・高度化の場として活用していくこととしている。研究所用地および正馬様用地を含む東濃地域では、基盤をなす後期白亜紀の土岐花崗岩を新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）が不整合で覆い、さらにそれを固結度の低い新第三紀鮮新世の砂礫層（瀬戸層群）が不整合で覆っている（図 3.3.1-3）。瑞浪層群は下位より、土岐夾炭累層、本郷累層、明世累層、生俵累層に分けられる。瑞浪層群は土岐川周辺では 300m 以上の層厚となる地域もある（糸魚川、1980）。

上記の既存情報とこれまでの調査研究により得られた知見に基づき整理された土岐花崗岩の地質構造の概念モデルを図 3.3.1-4 に示す。

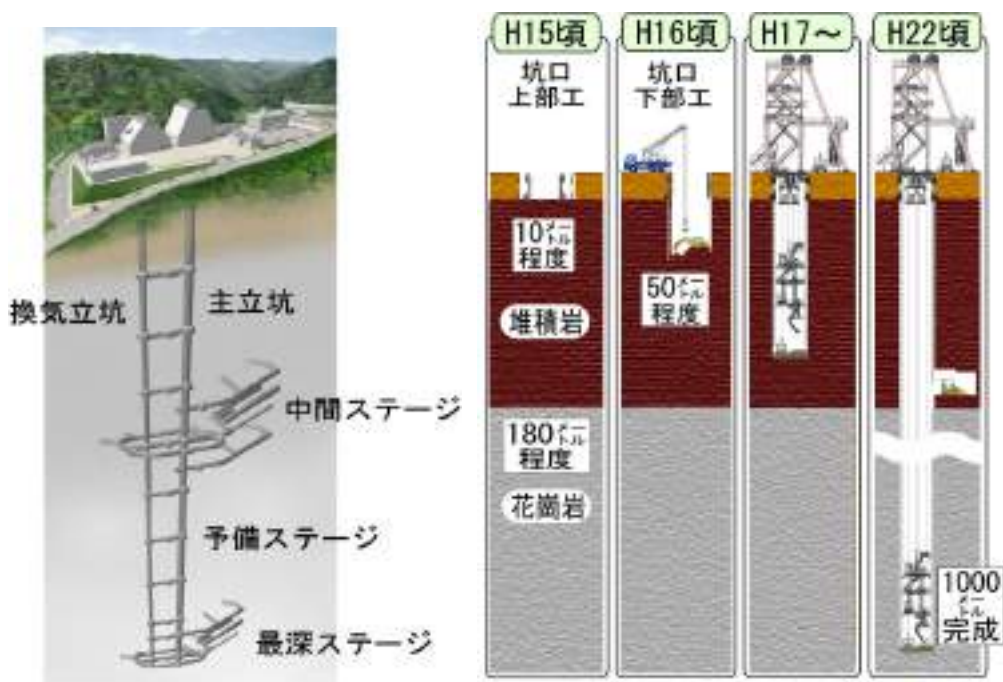


図 3.3.1-2 研究坑道レイアウトと建設工程のイメージ

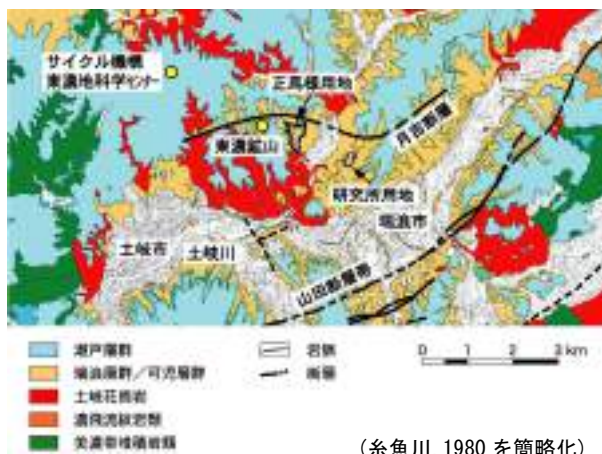
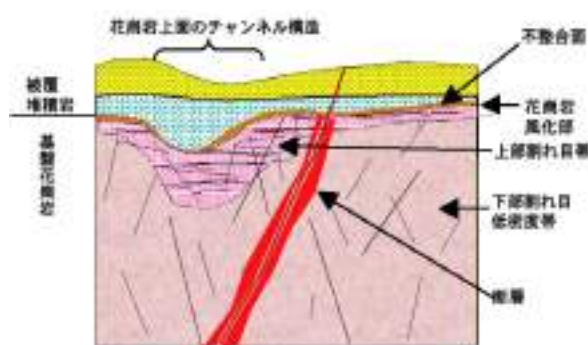


図 3.3.1-3 研究所用地周辺の地質



超深地層研究所計画の研究用地と正馬様用地は、広域地下水流動研究の研究実施領域の中に位置しているため、双方の研究成果を有機的に組み合わせることにより、リージョナルスケールからブロックスケール（図 3.1-2）に至るまでの地質環境を体系的に調査・評価する技術を整備する。

② 実施項目と進め方

本計画の「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」においては、3.1 項で示したように、地層処分にとって重要な地質環境特性を段階的に把握していくため、調査計画の立案から調査結果の評価に至る一連のプロセス（図 3.3.1-5）を繰り返すアプローチを基本としている。この過程で、情報の過不足や不確実性など地質環境に対する理解度を評価し、それらを次の調査計画へ反映していく。繰り返しアプローチを実際に行うにあたっては、主な研究対象が花崗岩であることと、調査量に限界があることを踏まえ、段階的に地質環境を把握していくために、広域地下水流動研究と組み合わせて地表からの調査研究のスケールを設定している。超深地層研究所計画は、表 3.3.1-1 に示したスケール設定のうち、サイトスケールとブロックスケールの調査研究に相当する。

表 3.3.1-1 超深地層研究所計画で対象とするスケールと地質環境特性の記述要素

		地質環境モデル				スケール
		地質構造	水理地質構造	地球化学	岩盤力学	
超深地層 研究設計画 (MIU)	サイトスケール (Site Scale)	場のモデル - 領域内で確認されている断層、および存在の可能性がある長さ数百m以上の断層などの不連続構造の分布とその幾何学的性状 - 母岩と成り得る岩盤およびその周辺岩盤中の不連続構造と分布密度および傾向(割れ目の不均質な分布を考慮した確率論的アプローチへの対応) - 地形および母岩の起伏面の詳細記述 - 層序あるいは岩相に基づいた堆積岩の詳細区分	場のモデル/現象モデル - 地質構造モデルに記述された不連続構造の内、母岩と成り得る岩盤に比べオーダー単位で平均透水係数が異なると考えられる構造 - 地質構造モデルで区分した構造においてオーダー単位で平均透水係数が異なると考えられる区分 - 水理学的物性 (K, Ss) の不均質分布 - 地下水面または地表からの涵養量 - Local Scaleの解析に基づく境界条件	場のモデル/(現象モデル) - 地質構造モデルに示された堆積岩区分に基づく地下水の地球化学的特性 - 地質構造モデルに示された母岩の対象となる岩盤の構造区分に基づく地下水の地球化学的特性または深度分布(コントラストが明瞭な場合) - 地質構造モデルに示された不連続構造中での地下水の地球化学的特性 - 地下水移行経路に基づいた地下水の年代に関する記述 - 地質構造モデルに基づく岩盤の地球化学特性に関する記述	場のモデル/現象モデル - 広域応力場や歪みの情報に基づき設定した領域における、対象となる岩盤の応力分布および岩盤力学物性の空間的分布 - 応力分布や力学物性に明瞭な変化が認められるゾーンの区分	平面: 数km² (数100m~数km × 数100m~数km) 深度: 2~3km程度 まで
	ブロックスケール (Block Scale)	場のモデル - 母岩とその周辺岩盤中の長さ数10m以上の不連続構造の分布とその幾何学的性状、分布密度および不均質性 - 母岩とその周辺岩盤および不連続構造の空隙構造特性、鉱物学的・地球化学的特性および不均質性	場のモデル/現象モデル - 地質構造モデルに記述された不連続構造の不均質性を考慮したK, Ss、有効空隙率などの分布 - 母岩とその周辺岩盤の不均質性を考慮したK, Ss、有効空隙率などの分布 - Site Scaleの解析に基づく境界条件	場のモデル/(現象モデル) 地質構造モデルに示された母岩・周辺岩盤および不連続構造の地球化学特性および地下水の地球化学特性	場のモデル/現象モデル - 対象となる岩盤の応力分布および岩盤力学物性の空間的分布 - 応力分布や力学物性に明瞭な変化が認められるゾーンの区分	平面: 数100m²~ 数km² (数10m~数100m × 数10m~数100m) 深度: 数百m~ 1km程度まで
		<物質移行特性> 母岩および地下水の移行経路となる不連続構造中での遅延(収着・マトリクス拡散)特性				

サイトスケール（数百 m～数 km 四方）の調査研究においては、研究坑道を掘削する母岩を通過する地下水の流束、研究坑道の掘削による地下水流動への影響や応力分布および力学物性に与える影響を把握することが重要となる。そのため、地下水流動に大きな影響を与えていると考えられる長さ数百 m 以上の不連続構造の分布とその幾何学性状や母岩となる岩盤およびその周辺岩盤中の不連続構造と分布密度、それらの地質構造要素の透水性、地下水の水質、岩盤の応力分布や力学物性を把握する。さらに、それらの調査結果を基にした地質環境のモデル化や予測解析をとおして地下水流動への影響や、応力分布および力学物性に与える影響を予測することが第 1 段階の目標となる（表 3.3.1-1）。

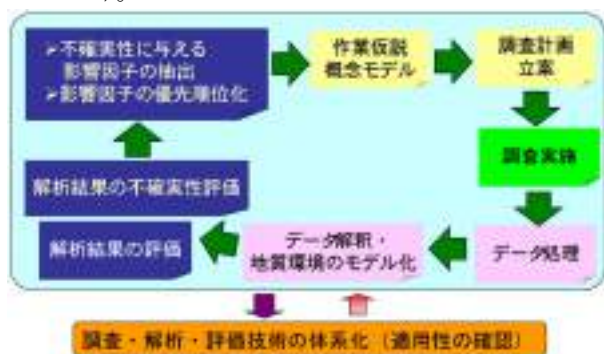


図 3.3.1-5 調査研究の繰り返しアプローチ

ブロックスケール（数百 m 四方）においては、母岩となる岩盤およびその周辺岩盤における物質移行特性を把握することが重要となる。そのため、母岩とその周辺岩盤中の長さ数 10 m 以上の不連続構造の分布と幾何学的性状、分布密度、空隙構造特性やこれらの地質構造要素の透水性、母岩および地下水移行経路となる不連続構造中での遅延特性などを把握することが重要な目標となる。

本計画の目標である深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備を達成するためには、研究成果の反映先を明確し、そこへの入力情報を定義することと、どのデータをどのような方法で取得し、データの解釈やモデル化をどのような手順で進めていけばよいかなど、調査研究の道すじを示すことが重要と考えられる。そこで、研究目標/反映先と系統的なデータの流れを記述・整理した統合化データフロー（図 3.1-3）に基づいて、調査研究を進めている（大澤ほか，2001）。

なお、この統合化データフローは、研究の進展により得られる知見を踏まえ、その妥当性を評価しつつ段階的に最適化および詳細化していく。

図 3.3.1-6 に、研究用地およびその周辺における第 1 段階の調査研究の進め方を示す。調査研究は、大きく 4 つのステップに区分して、ステップ毎に繰り返しアプローチを実践している。平成

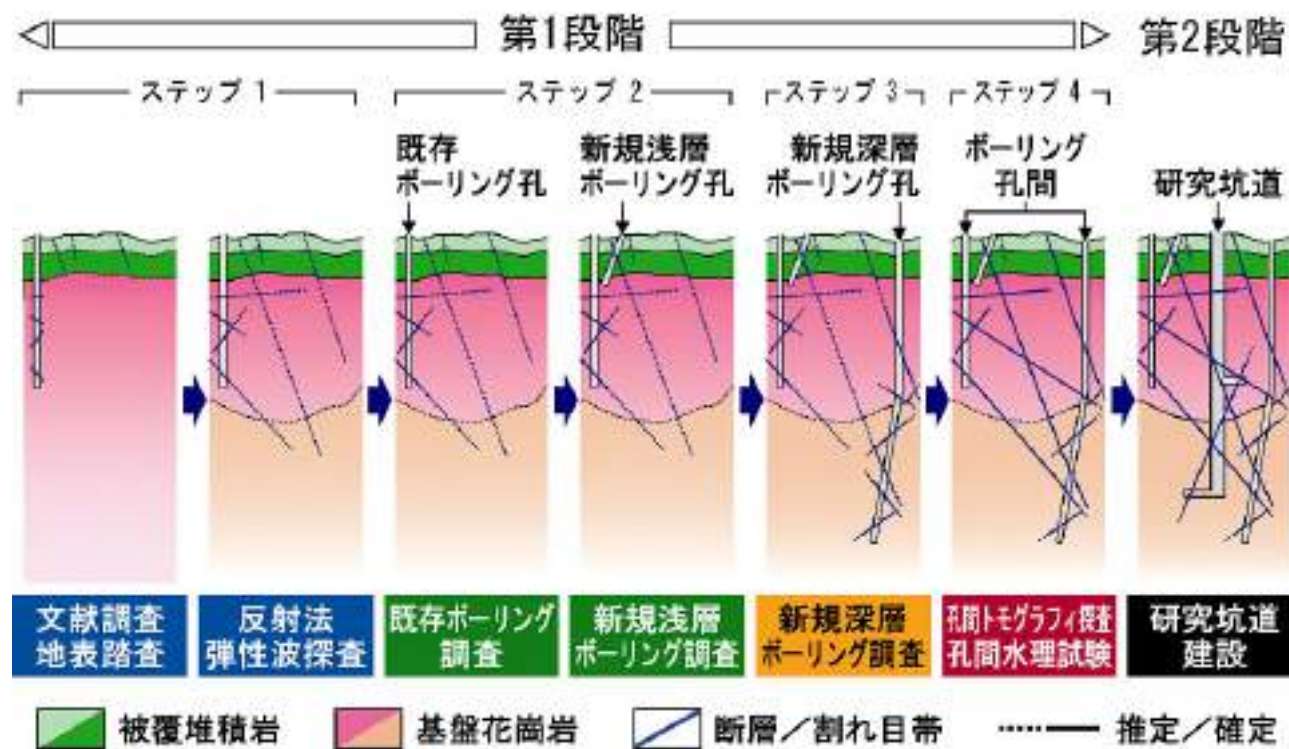


図 3.3.1-6 研究用地における地表からの調査研究の進め方

14 年度までに概ねステップ 2 までの調査が概ね終了し、平成 15 年度までに、ステップ 1 および 2 の地質構造モデルを作成／更新した。また、水理地質、地下水地球化学、および岩盤力学モデルについても、ステップ 1 および 2 の情報を基に作成／更新を行い、地下水流動解析とその解析結果の評価を実施した。さらに、ステップ 2 において調査を実施した浅層と既存ボーリング孔には地下水のモニタリング装置を設置して、水圧などの連続観測を開始した。

平成 15 年度においては、ステップ 2 までの調査研究の結果を踏まえ、ステップ 3 に該当する掘削計画長 1,350 m の深層ボーリング調査（MIZ-1 号孔；Nakano et al., 2003）に本格的に着手した。MIZ-1 号孔は、平成 16 年 3 月末現在、深度約 640 m に到達し、それまでの間に 11 点の水理試験（一部採水調査を含む）を実施した。これらの調査・試験の結果を用いて、ステップ 2 までのデータにより更新した地質構造モデルなどの評価と更新を実施している。

深地層の工学技術の基礎に関する研究では、既存の掘削技術などにより地下深部に研究坑道を安全かつ合理的に設計・施工、維持・管理できることを確認すること、岩盤物性のばらつきや不連続構造の出現など地質環境の不均質性に関わる変動幅を考慮したうえで、調査研究を効率的に行える研究坑道の設計や施工計画を策定することが可能であることを例示することが重要である。このことから、平成 15 年度は平成 14 年度に引き続き計測結果の設計・施工へのフィードバック技術、研究および施工技術の品質を確保する技術、突発湧水に対する掘削・施工対策技術、研究坑道における地震動評価、安全対策の各項目について検討を行うとともに、新たに取得した地質環境情報に基づき研究坑道の設計および立坑掘削中の計測計画の見直しを行った。

本計画においては、既に平成 14 年度より第 2 段階に該当する研究所の建設に着手し、平成 16 年 3 月末時点で深度約 10 m までの立坑掘削が終了している。このような施設建設の状況と、第 1 段階における調査研究により地質環境特性に関わる情報が整備されつつある現状を踏まえ、平成 15 年度においては、本計画の第 1 段階の目標の一つでもある第 2 段階の調査研究計画について詳細な検討を行い、計画書として取りまとめた。

③ 成果の反映先

本計画の第 1 段階の成果（地表からの調査・解析・評価技術など）は、前述した広域地下水流動研究の成果と組み合わせて、サイトスケールからブロックスケールまでの地質環境を把握するための地上からの調査段階における地質環境の調査・解析および解析結果の評価技術として取りまとめる。これらの研究成果は、平成 10 年代後半を目標とされる処分事業における概要調査地区の選定とそれにつづく概要調査や、国による安全審査基本指針の策定を支援する技術基盤として反映する。

また、研究施設は広く公開し、地下深部についての学術的な研究の場、あるいは深部地質環境や地層処分の研究開発に対する国民の理解を深める場としても活用していく。

④ 今後の計画

第 1 段階の調査研究については、ステップ 4 までの調査研究を平成 16 年度までに終了し、広域地下水流動研究の成果とともに、地上からの調査段階の研究成果として取りまとめる予定である。また、第 2 段階の調査研究については、平成 16 年度より槽を用いた立坑の本格掘削を開始する予定である。

なお、正馬様用地は、これまでに蓄積した月吉断層を含む地質環境の情報やボーリング孔などの研究資源を活かし、水圧の連続観測を継続しつつ地質環境のモデル化手法の高度化や要素技術開発の場として活用していく予定である。

参考文献

- 糸魚川淳二（1980）：瑞浪地域の地質，瑞浪市化石博物館専報，1，pp.1-50.
- 核燃料サイクル開発機構（2002）：超深地層研究所地層科学研究基本計画，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-018.
- Nakano, K., Amano, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Saegusa, H., Hama, K., Kumazawa, N., Iwatsuki, T., Yabuuchi, S. and Sato, T. (2003) : Working program for MIZ-1 borehole investigations, JNC Tech. Rep., JNC TN7400 2002-008.
- 大澤英昭，中野勝志，太田久仁雄（2001）：超深地層研究所計画における地表からの調査研究成果の統合化，日本原子力学会 2001 年秋の大会 予稿集，p. 918.

3.3.2 第1段階の調査研究

1) 各分野の調査研究の成果

1-1) 地質・地質構造に関する調査研究

① 課題と計画の概要

地表からの調査予測研究段階（第1段階）における地質・地質構造に関する調査研究は、同段階が終了する平成16年度末までに、

- ・ 地質・地質構造の効率的な把握、地下水流動や地下水の水質を規制すると考えられる断層や割れ目帯の分布特性ならびに地質学的特性を把握するための地表からの調査技術の開発
- ・ 繰り返しアプローチに基づく、地質・地質構造の適切なモデル化技術の整備

を目標としている。このため、3.1に示した地表からの調査研究の進め方に基づき、サイト～ブロックスケールの地質環境を対象として、地表およびボーリング孔における地質学的調査や物理探査などを実施するとともに、地質構造モデルの構築ならびに更新を進めている。

平成14年度は、研究所用地においてステップ1の地表踏査、反射法弾性波探査（松岡ほか、2002）およびステップ2の浅層ボーリング調査（Kumazaki et al., 2003）を実施した（図3.3.1-5参照）。これらの調査の結果、研究所用地およびその周辺における被覆堆積岩および基盤花崗岩上部の地質・地質構造を把握した。また、断層や割れ目帯の分布特性を評価し、広域地下水流動研究の成果も取り入れて地質構造モデルを構築した（サイクル機構、2003a, 2003b；太田ほか、2004）。これら一連の調査研究により、正馬様用地における調査研究をとおして構築した地質構造の概念の妥当性や地質構造調査技術の適用性などを確認した（サイクル機構、2003a）。

平成15年度は、上述の知見を踏まえ、研究所用地において、①ステップ3の深層ボーリング調査による、主要な不連続構造の分布特性や深度1,000m以深の地質・地質構造などを把握するための調査（サイクル機構、2003c）に加え、②ステップ2の一環として地質構造の推定技術の高度化を目的とした反射法弾性波探査データの再解析を実施した。さらに、これらの調査研究で得られたデータをもとに、地質構造モデルの妥当性を評価した。

② これまでの成果

i) 深層ボーリング調査による地質構造の確認および特性評価

研究所用地において、地表から深度1,000m以深にいたる被覆堆積岩（瑞浪層群）ならびに基盤花崗岩（土岐花崗岩）の地質・地質構造、および地下水流動を規制すると考えられる不連続構造の分布や地質学的特性の評価を目的として、深層ボーリング調査（MIZ-1号孔、計画掘削長1,350m；Nakano et al., 2003；Takeuchi and Ota, 2004）を実施している。MIZ-1号孔は、これまでの調査研究により構築した地質構造モデルに基づき、前述の目的を達成するために、図3.3.2-1に示すようなレイアウトとした。MIZ-1号孔における地質・地質構造に関する調査研究では、岩芯の地質学的記載のほか、ボアホールテレビ観察や物理検層などのボーリング孔内での調査を行うとともに、岩芯試料を用いた岩石鉱物試験などを実施した。

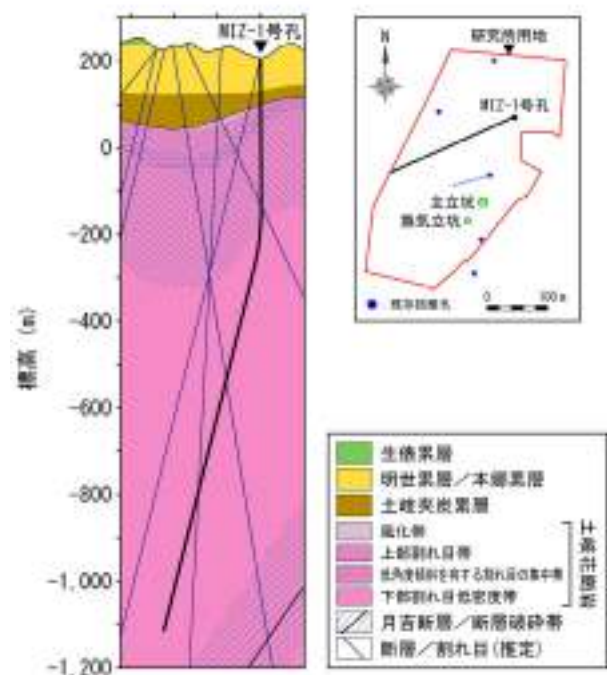


図3.3.2-1 研究所用地におけるMIZ-1号孔のレイアウト

これまでに実施した掘削長約640mまでの調査の結果、被覆堆積岩と基盤花崗岩の不整合面、および基盤花崗岩中の上部割れ目帯や下部割れ目低密度帯などの分布深度を特定するとともに、比較的小規模な断層によって形成される割れ目帯の分

布を計2箇所において確認した。これらの地質・地質構造は、MIZ-1号孔ボーリング調査より前に構築した地質構造モデル（熊崎ほか，2004）に基づき予測した深度（想定範囲内）に概ね分布している（表3.3.2-1）ことから，その地質構造モデルの精度は概ね妥当であると考えられる。

表 3.3.2-1 MIZ-1号孔の調査計画における地質・地質構造の予測深度と実際の分布深度

地質・地質構造	予 測	実 際
	深度（想定範囲） [mab]	深度 [mab]
不整合面	104(92~116)	109
風化帯	104~105(分布しない/92~120)	分布しない
低角度傾斜を有する 割れ目の集中帯	104~138(91~178)	分布しない
上部割れ目帯	104~400(92~446)	109~310
下部割れ目低密度帯	400~(335~)	310~

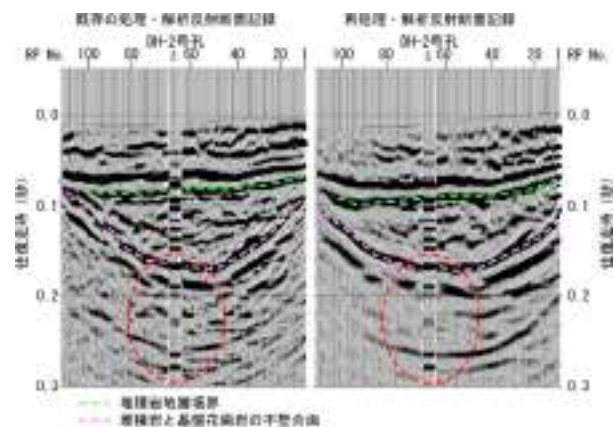
Mab(meter along borehole)：掘削長

今後は，掘削長 640~1,350 m 区間において遭遇すると想定されている主要な不連続構造の分布特性および地質学的特性の評価などをとおして，これまでに整備した調査・解析・評価技術の妥当性を評価するとともに，その高度化を図る。また，これまでに取得されたデータを統合し，研究所用地（ブロックスケール）の地質構造モデルを精度良く構築する。

ii）反射法弾性波探査による地質構造推定技術の高度化

これまでに超深地層研究所計画などで実施した反射法弾性波探査では，断層や割れ目（帯）の分布，被覆堆積岩と基盤花崗岩の不整合面および堆積構造などに関する情報を取得した（サイクル機構，2003a，2003b）。しかしながら，探査結果を解析した反射断面記録上の花崗岩中の反射イベントと実際の地質構造には，一致していない箇所が認められた。このため，花崗岩を対象とした反射法弾性波探査による地質構造推定技術の高度化の一環として，正確な反射波のイメージングを目的とした既存データの再処理・解析を実施した。この再処理・解析では，主に表面波抑制処理，サーフィスコンシステントデコンボリューション，相対振幅保存処理，重合前時間マイグレーションを追加項目として適用した。

再処理・解析を適用した結果の一例を図3.3.2-2に示す。図中左が既存の反射断面記録，同右が再処理・解析による反射断面記録である。



各反射断面記録は調査測線沿いに位置するDH-2号孔における音波・密度検層記録から作成した合成反射記録を対比。

図 3.3.2-2 既存の反射断面記録と再処理・解析結果との対比

反射断面記録と合成反射記録との対比から，堆積岩においては，既存の反射断面記録に比べて，再処理・解析結果の方がより合成反射記録と一致していることがわかる。一方，花崗岩中において認められる反射面（図中赤点線で囲った範囲）についても，再処理・解析結果の方が合成反射記録と良い一致を示している。以上のことから，今回実施した再処理・解析によって，より実際の地質構造を反映した反射波のイメージング結果を得ることができたと考えられる。

今後，これらの再処理・解析結果に基づき，反射法弾性波探査で認められる反射イベントと花崗岩中の地質構造との対応とともに，花崗岩を対象とした反射法弾性波探査の適用性についても評価する。

③ まとめ

平成15年度に実施した地質・地質構造に関する調査研究により，研究所用地における被覆堆積岩および基盤花崗岩上部の地質・地質構造，ならびに断層や割れ目帯の分布特性がより詳細に把握でき，これまでの知見に基づいて地質構造モデルを評価・更新した。このことは，統合化フローに基づく調査→解釈→モデル化とその繰り返しが適切に進められ，地質・地質構造のモデル化技術も適切に整備されつつあると考えられる。また，花

崗岩を対象とした反射法弾性波探査における反射波のイメージング技術の高度化などをとおして、個別の調査技術の改良・高度化も図られた。

今後は、地表からの調査研究の進め方（図 3. 3.1-5 参照）にしたがい、ステップ 3 の MIZ-1 号孔ボーリング調査（掘削長 1,350 m まで）における地質・地質構造に関する調査、同孔におけるマルチオフセット VSP（Vertical Seismic Profile）探査を実施する。引き続き、ステップ 4 に相当する MIZ-1 号孔と DH-2 号孔を利用した孔間弾性波トモグラフィー調査に加え、反射法弾性波探査を段階的に実施し、研究所用地の地質・地質構造をさらに詳細に把握する。これと合わせて、取得したデータに基づき既存（サイトスケール）の地質構造モデルの妥当性を確認し、その精度の向上を図るとともに、研究坑道掘削に向けたブロックスケールの地質構造モデルを構築する。さらに、これらの一連の調査研究を通して、適用した調査技術や調査量と地質・地質構造の理解度との関係について評価しつつ、体系化した地表からの調査技術全体についても高度化を図る。

参考文献

- 核燃料サイクル開発機構（2003a）：超深地層研究所計画年度報告書（平成 14 年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2003-006.
- 核燃料サイクル開発機構（2003b）：平成 15 年度地層科学研究情報・意見交換会要旨集，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2003-002.
- 核燃料サイクル開発機構（2003c）：超深地層研究所計画年度計画書（平成 15 年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2003-005.
- Kumazaki, N., Ikeda, K., Goto, J., Mukai, K., Iwatsuki, T. and Furue, R. (2003) : Synthesis of the Shallow Borehole Investigations at the MIU Construction Site, JNC Tech. Rep., JNC TN7400 2003-005.
- 熊崎直樹，池田幸喜，後藤淳一，向井 圭，岩月輝希，古江良治（2004）：超深地層研究所計画における地表からの地質環境調査－繰り返しアプローチに基づく調査の事例，日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集，p. 807.
- 松岡稔幸，上原大二郎，藪内 聡，太田陽一，川中卓（2002）：花崗岩地域を対象とした反射法弾性波探査の適用，平成 14 年度応用地質学会中部支部研究発表会・講演会予稿集，pp. 31-36.
- Nakano, K., Amano, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Saegusa, H., Hama, K., Kumazaki, N., Iwatsuki, T., Yabuuchi, S. and Sato, T. (2003) : Working Program for MIZ-1 Borehole Investigations, JNC Tech. Rep., JNC TN7400 2002-008.
- 太田久仁雄，佐藤稔紀，小出 馨，坂巻昌工（2004）：超深地層研究所計画－地層科学研究の現状－，第 7 回 NUCEF セミナー講演報告文集，日本原子力研究所研究報告書．（印刷中）
- Takeuchi, S. and Ota, K. (2004) : Working Programme for MIZ-1 Borehole Investigations Revision of Work Procedures after Phase IV, JNC Tech. Rep. (in prep).

1-2) 岩盤力学に関する調査研究

① 課題と計画の概要

超深地層研究所計画の地表からの調査予測段階における岩盤力学に関する調査では、研究坑道が建設される規模のサイトスケールならびに研究坑道の掘削影響がおよぶ可能性のあるブロックスケールの力学特性を把握すること、岩盤力学モデルを構築することおよび、研究坑道の力学的安定性を評価することを目的としている。そのため、研究所用地およびその周辺の土岐花崗岩を対象に、以下の項目を主要な課題として調査研究を進めている。

- ・岩盤の物理・力学特性、初期応力状態と地質・地質構造との相関を把握すること
- ・上記調査結果および初期応力解析に基づき、岩盤力学モデルを構築し、研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の力学的影響を予測すること

平成 14 年度までに、正馬様用地の AN-1 号孔および MIU-1～3 号孔、研究所用地近傍の既存ボーリング孔（DH-2 号孔）の岩石コアあるいはボーリング孔を利用した各種物性試験、初期応力測定を実施し、研究所用地周辺の土岐花崗岩の力学特性（岩盤物性や初期応力など）を把握した。また、正馬様用地における調査結果をもとに構築した岩盤力学モデルを用いた解析を通じて、地表からの調査・解析・評価技術の適用事例を整理した。

平成 15 年度は、DH-2 号孔における調査結果をとりまとめ（中間ほか、2003）、研究所用地周辺の岩盤力学概念モデルを構築するとともに、研究所用地に掘削中の MIZ-1 号孔（掘削計画長：1,350 m）の掘削長 500 m までの岩芯を用いた室内試験を行った。また、研究坑道の掘削予測解析手法の高度化を目的に、坑道周辺岩盤に発生する掘削損傷領域を考慮した予測解析手法に関する検討を行った。さらに地下施設深部で発生する可能性のある応力集中による破壊現象のモデル化に関する研究を実施した。

② これまでの成果

i) 研究所用地周辺の岩石コアの室内試験結果

および岩盤力学概念モデルの構築

研究所用地周辺の概括的な初期応力状態を把握するため、既存ボーリング孔（DH-2 号孔）の岩石コアを用いた DSCA（Differential Strain Curve Analysis）法による室内試験を行った（中間ほか、

2003）。DSCA 法は、ボーリングによって採取された岩石コアが地下の応力状態から解放され、これに伴い主応力方向に垂直に微小クラックが発生すると仮定し、その発生量と方向性から初期応力状態を推定するものである。このような仮定のもとで評価された結果を図 3.3.2-3 に示す。図 3.3.2-3(a) は DSCA 法による室内試験で得られた微小クラックの量をクラック密度に関するパラメータとして表したものである。深度 200～370 m までは深度が深くなるに伴って各パラメータは徐々に増加（すなわち発生する微小クラックの数が増加）している。深度 370～450 m では各パラメータは深度が深くなるとともに減少し、深度 470 m 付近では再び増加する。初期主応力比は、パラメータの最小主値(σ_3)を基準とすると、 σ_1/σ_3 は 1.4～3.1、 σ_2/σ_3 は 1.2～1.9 の範囲に分布する。図 3.3.2-3(b) は各パラメータの主値の方向を示したものである。パラメータの最大主値(σ_1)の方向に注目すると、N-S から NW-SE 方向に分布する傾向が認められる。また、最大主値の方向は深度 300 m まではほぼ水平面にあるものの、深度 300 m 以深は水平面より 50° 以上傾いており、応力状態としては、深度 200～300 m は逆断層型か横ずれ断層型、深度 300 m 以深は正断層型に近い初期応力環境であることが推察された。

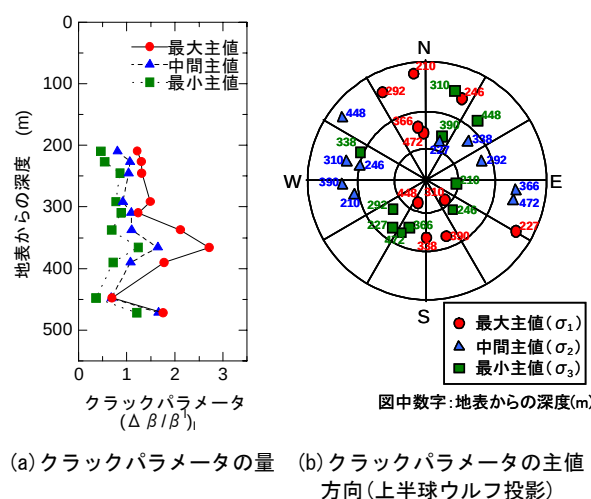


図 3.3.2-3 研究所用地近傍の岩石コアを用いた DSCA 法による室内試験結果

次に、DH-2 号孔の岩石コアを用いた物理・力学試験を実施した（中間ほか、2003）。これらの結果と MIZ-1 号孔の掘削前の地質断面図（Nakano et. al, 2003）をもとに研究所用地周辺の岩盤力

学概念モデルを構築した（図 3.3.2-4）。DH-2 号孔の土岐花崗岩は上部割れ目帯に属しており，正馬様用地の岩盤力学概念モデル（松井ほか，2001）と比べて，岩石基質部の物理特性としては，見かけ比重は高く，有効空隙率は小さく，弾性波速度は低い。一方，力学特性としては，一軸圧縮強度は小さく，剛性や破壊基準は同程度である。DSCA 法により求めた初期応力状態は最大主応力方向が N-S から NW-SE 方向であり，この傾向は正馬様用地の岩盤力学概念モデルと同様である。

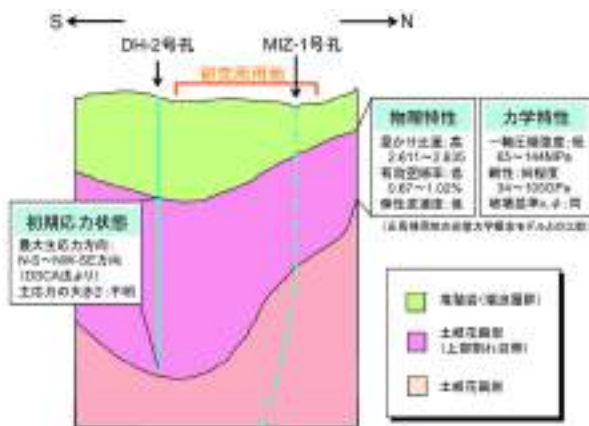


図 3.3.2-4 研究所用地周辺の岩盤力学概念モデル

ii) 研究所用地の岩石コアの室内試験結果

図 3.3.2-5 に研究所用地内に掘削したボーリング孔である MIZ-1 号孔のコアを用いた室内試験結果を示す。

調査対象とした土岐花崗岩の物性値は，一軸圧縮強度が 63～207 MPa，50%接線ヤング率が 20～60 GPa であり，日本の花崗岩として平均的な値（佐藤ほか，1999）であることがわかった

（表 3.3.2-2）。一軸圧縮強度については，研究所用地近傍（DH-2 号孔）の値より大きい値が得られ，研究所用地内ではやや硬質な岩石が分布しているものと考えられる。掘削長 200 m 付近において，見かけ比重や有効空隙率などの物理特性および一軸圧縮強度，ヤング率の力学特性の低下がみられたが，岩石コアの観察より，局所的な岩種変化（変質および割れ目密度の増加）によるものであり，その範囲は限定されているものと推定された。

表 3.3.2-2 研究所用地およびその周辺における岩石コアの室内試験結果

物性	MIZ-1 号孔		DH-2 号孔	日本の花崗岩類*
	(範囲)	(平均値)	(平均値)	(平均値)
見かけ比重	2.299～2.645	2.593 (2.624)**	2.623	2.63
有効空隙率	0.925～13.5 %	2.38 (1.10)** %	0.83 %	2.0 %
弾性波速度 (P 波)	3.74～5.70 km s ⁻¹	5.03 km s ⁻¹	4.80 km s ⁻¹	4.75 km s ⁻¹
弾性波速度 (S 波)	1.58～3.13 km s ⁻¹	2.61 km s ⁻¹	2.41 km s ⁻¹	2.44 km s ⁻¹
一軸圧縮強度	63.7～207 MPa	157 MPa	117 MPa	136 MPa
50%接線ヤング率	20.3～60.1 GPa	48.1 GPa	58 GPa	33 GPa
ポアソン比	0.21～0.35	0.28	0.33	0.23

* 佐藤ほか（1999）：花崗岩，花崗閃緑岩，花崗斑岩，石英斑岩，石英閃緑岩，石英閃長岩，片麻岩
** () 内は地表からの掘削長 200 m の値を除いた平均値

iii) 研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の掘削影響評価解析

土岐花崗岩のような結晶質岩中に坑道を掘削する際の掘削影響を予測・評価するためには，坑道周辺岩盤の不連続面の挙動（既存のき裂のすべりや進展など）を適切に表現できる解析手法を用いる必要がある。平成 14 年度までに，岩盤の不連続面の影響を考慮できる解析手法として，MBC（Micro-mechanics Based Continuum Model）解析（吉田・堀井，1996），BEMF（Boundary Element Method for Rock Fractures）解析（Stephansson

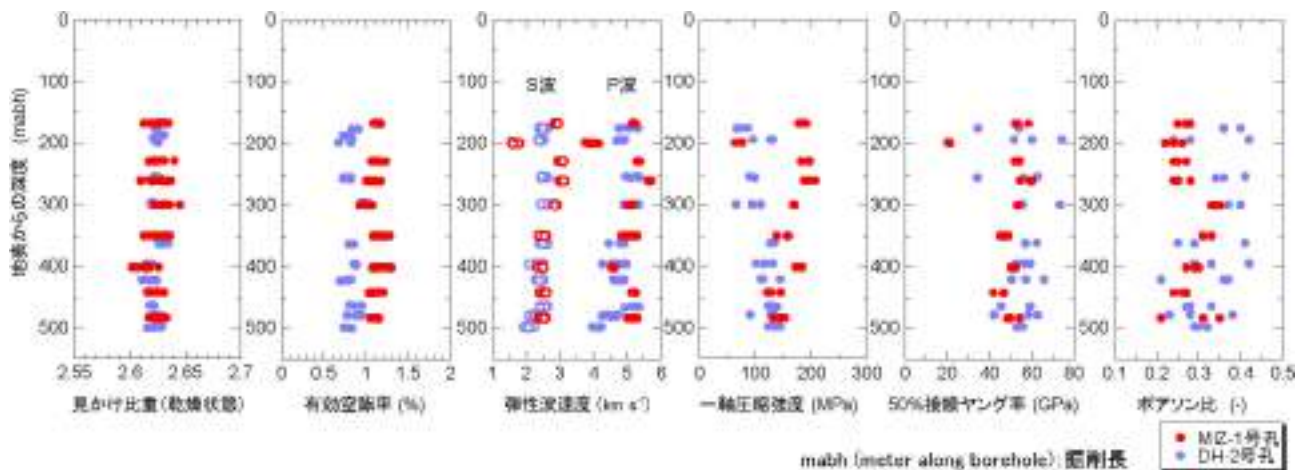


図 3.3.2-5 研究所用地およびその近傍における岩石コアの室内試験結果

et al, 2003) およびクラックテンソル・仮想割れ目モデルを用いた解析（郷家ほか，2004）を行った。これらの解析手法では，取り扱える現象が応力再配分現象のみであり，発破や機械掘削により生じる掘削損傷領域は考慮されていない。掘削損傷領域は坑道壁面の周囲に発生するため，掘削影響領域の予測・評価にそれ相応の影響があると考えられる。そこで，平成 15 年度は，等価連続体解析を基本とした MBC 解析およびクラックテンソル・仮想割れ目モデル解析について，掘削損傷領域を考慮した解析を実施し，掘削損傷領域を考慮することによる掘削影響予測への影響を評価した。掘削損傷領域は釜石鉱山や東濃鉱山における研究事例（サイクル機構，1999；杉原ほか，2000；Sato et al., 2000）などからその幅を 30～80 cm とし，岩盤基質部の剛性やき裂の発生方法（新規発生，既存き裂の進展），き裂の分布（長さ，密度，方向）などを変化させて解析を行った。その結果，掘削損傷領域を考慮することにより，壁面変位は掘削損傷領域を考慮しない場合の 2 倍程度に増大する場合があること（図 3.3.2-6），掘削損傷領域内の透水係数が掘削前の透水係数に比して 3 オーダー以上増加する場合があること（図 3.3.2-7），影響の度合いは，掘削損傷領域に新たに発生させた亀裂の幾何条件に大きく影響されることがわかった。ただし，坑道周辺の安全率分布にはほとんど差異が認められなかった。これは，ほとんどの掘削損傷領域の局所安全率が引張破壊側のモードで決まっていることから，掘削損傷領域の考慮による剛性の低下の影響を受けなかったためと考えられる。

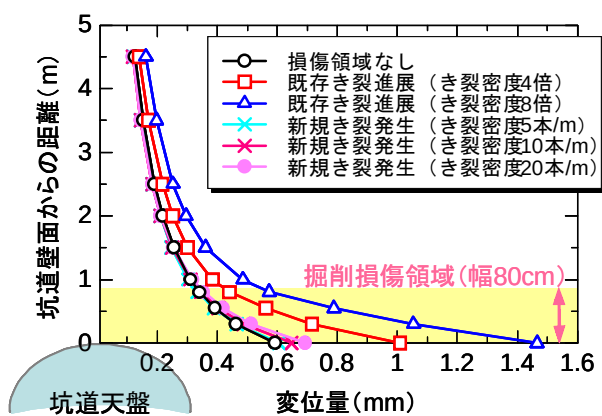
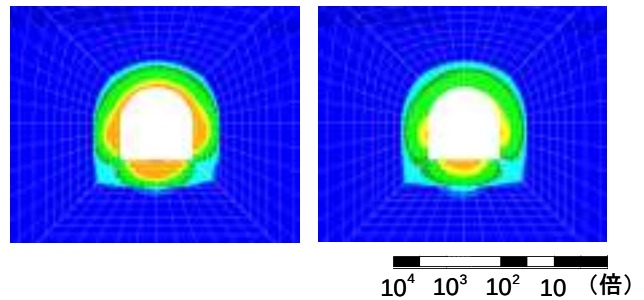


図 3.3.2-6 坑道天盤の岩盤内変位分布（MBC 解析，新規き裂は壁面に平行に発生）



(a) 壁面に平行なき裂を発生させた場合 (b) ランダムな方向のき裂を発生させた場合

図 3.3.2-7 坑道周辺岩盤の透水係数変化の分布（クラックテンソル・仮想割れ目モデル解析）

iv) 応力集中による破壊現象のモデル化に関する研究

結晶質岩の破壊現象を解明し，そのメカニズムをモデル化することは，掘削損傷領域の物性評価において重要となる。そこで，花崗岩を対象として，破壊過程における岩石中のクラックの進展を構造解析や大型供試体による一軸および三軸圧縮試験，円孔を有する模型載荷試験により評価し，モデル化手法の検討を行っている。

平成 15 年度では，結晶質岩（花崗岩）の大型供試体を用いた三軸圧縮試験を実施し，破壊の進行に伴う供試体内部のクラックの構造変化を弾性波速度分布により推定した（竹村ほか，2003）。拘束圧を 80 MPa とした 6 つの応力レベル（破壊応力の 85，90，95，98，100% および破壊後）で三軸圧縮試験を行い，実験終了後の供試体から弾性波測定用の 18 面体試料を作成し，9 方向の弾性波（P 波）速度を測定した（図 3.3.2-8）。図より，弾性波速度の分布の異方性には，供試体の破壊から破壊直後に至るまで変化が見られず，破壊の進行が初期異方性により制約されていることが確認された。すなわち，掘削損傷領域のモデル化は，損傷を受ける前の岩石のき裂の分布（長さ，密度，方向）を評価することにより可能であることが示された。

③ まとめ

研究用地およびその近傍の土岐花崗岩の物性値は，正馬様用地における物性値とほぼ同様の分布傾向を示していることを確認した。また，解析および室内試験をとおして，研究坑道の掘削解

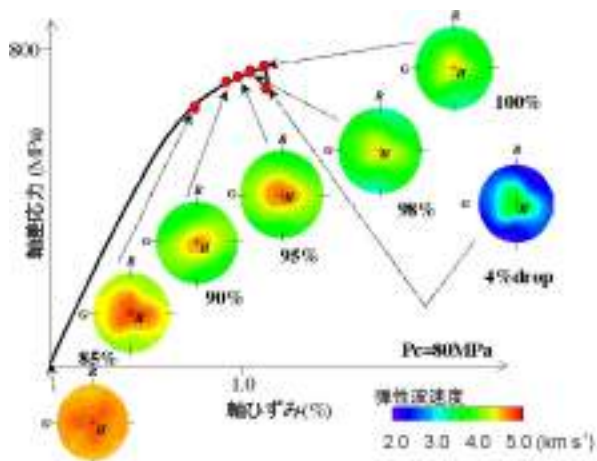


図 3.3.2-8 破壊進行に伴う P 波速度分布の変化
(ステレオネットは下半球投影)

析における掘削損傷領域のモデル化手法を整備した。今後は研究所用地内の深層ボーリング孔 (MIZ-1 号孔) において掘削長 500~1,000 m の物理・力学物性および地表から深度 1,000 m までの初期応力状態を水压破碎法および岩石コアの室内試験により把握し、研究所用地における岩盤力学概念モデルを更新する。さらに更新されたモデルを用いて掘削損傷領域を考慮に入れた研究坑道の掘削解析を実施し、超深地層研究所計画の地表からの調査予測段階における予測結果を示していく。

参考文献

- 郷家光男, 堀田政國, 若林成樹, 多田浩幸, 佐藤稔紀, 中間茂雄, 青木俊朗 (2004): 坑道展開方向による水理学的な掘削影響の変化に関する解析的検討, 第 58 回土木学会年次学術講演会. (投稿中)
- 核燃料サイクル開発機構 (1999): 釜石原位置試験総括報告書, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 99-001, pp. II-1-II-29.
- 松井裕哉, 前田信行, 吉川和夫 (2001): MIU-3 号孔における力学特性調査結果および正馬様用地における土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデル, サイクル機構技術資料, JNC TN7420 2001-001.
- 中間茂雄, 中島貴弘, 青木俊朗, 佐藤稔紀 (2003): DH-2 号孔の岩芯を用いた力学特性調査結果, サイクル機構技術資料, JNC TN7400 2003-003.
- Nakano, K., Amano, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Saegusa, H., Hama, K., Kumazaki, N., Iwatsuki, T., Yabuuchi, S. and Sato, T. (2003): Working program for MIZ-1 borehole investigations, JNC Tech. Rep., JNC TN7400 2002-008.
- 杉原弘造, 吉岡直也, 松井裕哉, 佐藤稔紀, 山本卓也 (2000): 堆積軟岩での立坑掘削に伴う岩盤物性変化の現場計測による検討, 資源と素材, 116, pp. 821-

830.

Sato, T., Kikuchi, T. and Sugihara, K. (2000): In-situ experiment on excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rocks at Tono mine, central Japan, Engineering Geology, Vol. 56, pp. 97-108.

佐藤稔紀, 谷口 航, 藤田朝雄, 長谷川宏 (1999): 文献調査による我が国の岩石の物理的特性に関するデータの収集 (その 2), サイクル機構技術資料, JNC TN7400 99-011.

Stephansson, O., Shen, B., Rinne, M., Backers, T., Koide, K., Nakama, S., Ishida, T., Moro, Y. and Amemiya, K. (2003): Geomechanical evaluation and analysis of research shafts and galleries in MIU project, Japan, Environmental Rock Engineering, Saito & Murata (eds), pp. 37-46.

竹村貴人, 小田匡寛, 亀田 篤, 鈴木健一郎, 中間茂雄 (2003): 弾性波速度とクラックテンソルによる岩石の脆性破壊機構, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, pp. 645-646.

吉田秀典, 堀井秀之 (1996): マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルと大規模空洞掘削の解析, 土木学会論文集, No. 535, III-34, pp. 23-41.

1-3) 岩盤の水理に関する調査研究

① 課題と計画の概要

超深地層研究所計画における第1段階の岩盤の水理に関する調査研究は、サイト～ブロックスケールの地質環境を対象に以下の項目を主要な課題として進めている。

- ・ 岩盤中の地下水流動を規制する透水性割れ目を検出するとともに水理特性を把握するための地表からの調査技術を第1段階終了時期までに開発すること。
- ・ 繰り返しアプローチに基づく、地下深部までの地下水流動特性を効率的に調査・解析・評価するための体系的な技術基盤を第1段階終了時期までに整備すること。

平成14年度までに、地表からの調査研究の進め方に基づき(図3.3.1-5参照)、研究用地においてステップ2の浅層ボーリング調査を実施し、堆積岩中の各層および花崗岩最上部の水理パラメータを取得した。その結果、堆積岩では一部の区間を除き $10^{-8} \sim 10^{-6}$ (m s^{-1})の範囲の透水性を有し、これまで取得された堆積岩の透水性と比較すると高い範囲に入ることが明らかとなった。

また、水理地質構造のモデル化および地下水流動解析に関する研究においては、正馬様用地を包含するモデル化・解析領域を対象とした複数のモデル化手法を適用してMIU-4号孔でのボーリング調査結果および長期揚水試験結果に基づくモデルの更新およびキャリブレーションを実施した。その結果、非定常状態の水理に関するデータの取得は、地下水の移行経路の不確実性を低減するために有効な手段であることが明らかとなった。

② これまでの成果

i) 水理地質構造のモデル化・地下水流動解析

平成15年度は、繰り返しアプローチの1順目として、地下水流動に対する重要な地質構造要素を特定し、ステップ2以降の調査対象を抽出することを目的として、ステップ1の地質構造モデル(図3.3.2-9)、および正馬様用地での調査や広域地下水流動研究(サイクル機構, 2000, 2001)によって取得された透水性に関するデータに基づき水理地質構造モデルを構築し三次元地下水流動解析を実施した。地下水流動解析では、サイクル機構が開発している地下水流動解析コードであるFrac-Affinity(稲葉ほか, 2002)を用いて断層

の透水性に着目した感度解析を実施した。図3.3.2-10に、北北西系断層および北東系断層が透水異方性を有している(断層面に沿った方向と直交する方向で透水性がことなる)ケースと、これらの断層が透水異方性を有しない高透水性の2つケースにおける地下水流動解析によって得られた全水頭分布を示す。図より、いずれのケースも地下水の主流動方向は、北東から南西方向であることが分かる。また、研究用地の上流側に分布する北北西系断層および北東系断層が透水異方性を有しているケースでは、これらの断層部を挟んで上流側と下流側で明瞭な水頭差が生じている結果となった。これに対し、北北西系断層および北東系断層が透水異方性を有しない高透水性のケースでは、この断層を挟んだ部分で大きな水頭差は生じない。このことから、北北西系断層および北東系断層の透水性が研究用地周辺の全水頭分布に与える影響が大きいことが明らかとなった。ステップ2以降の調査においては、これらの断層の水理学的特性を評価することが重要である。

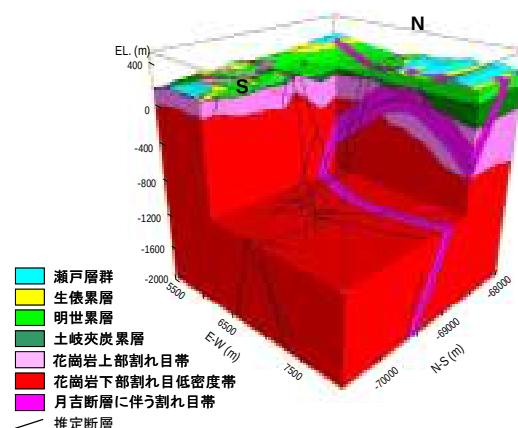


図 3.3.2-9 ステップ1での地質構造モデル

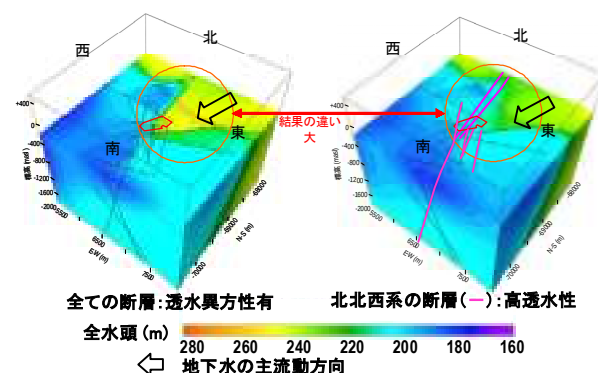


図 3.3.2-10 地下水流動解析結果(水頭分布)

また、瑞浪超深地層研究所の主立坑、換気立坑、水平坑道などの建設に伴う、地下水位分布や水頭分布の変化、研究坑道への湧水量や湧水地点等を予測評価するための水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析を実施した。これらは、研究坑道の設計・施工への情報提供、および研究坑道建設に伴う地下水流動場の変化を用いたサイトスケールのモデルキャリブレーションに必要な調査項目や仕様を抽出すること（第2段階での調査計画策定への情報提供）を目的としている。

地下水流動解析においては、有限要素法による等価不均質連続体モデル（下茂・山本，1996）を用いた飽和－不飽和状態における三次元非定常地下水流動解析を実施した。要素分割の際には、研究坑道周辺の水理地質構造を詳細にモデル化するために、研究坑道周辺領域の要素サイズをその外側より詳細にした入れ子モデル（Nested Model）を採用した。また、主立坑、換気立坑、水平坑道、および予備ステージについても要素分割の際にモデルに取込んだ（図 3.3.2-11，図 3.3.2-12）。また、研究坑道の掘削工程を模擬して内部境界条件を非定常に変化させた。

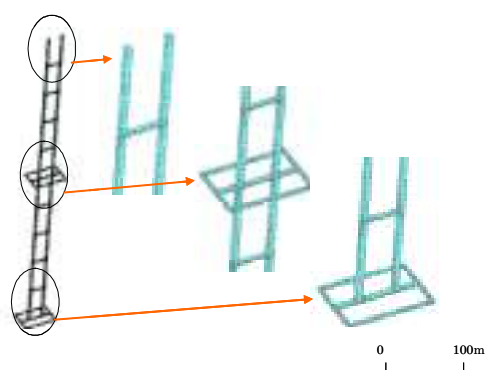


図 3.3.2-11 モデルに取込んだ研究坑道の要素分割

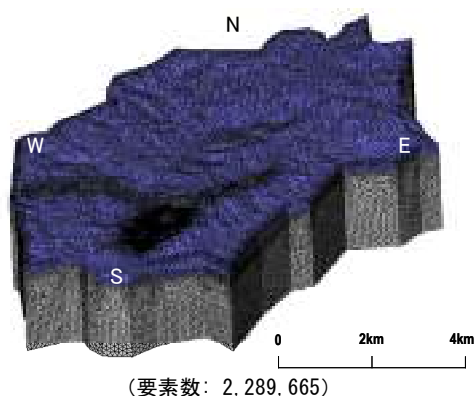


図 3.3.2-12 三次元要素分割

解析では、研究坑道壁面からの湧水量に対するコンクリート覆工やコンクリート覆工と岩盤の間に設置される排水マットなどの影響を考慮し、研究坑道壁面の境界条件を完全大気開放条件と不透水境界の中間に設定するために「掘削開放率： α 」の概念を導入した。研究坑道壁面の境界は、掘削前の初期水圧と大気圧の差にこの α を掛けることによって求めた水圧を設定している。この掘削開放率を変化させて地下水流動解析を行った結果、 α の変化に伴い研究坑道からの湧水量が変化することが明らかとなった（図 3.3.2-13）。また、研究坑道周辺の水圧低下領域は、透水異方性を有していると仮定した複数の断層によって包含される領域内部に限定される可能性があることが示唆された。

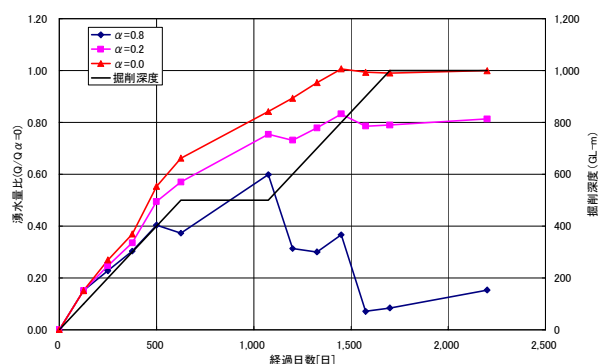


図 3.3.2-13 立坑への湧水量の経時変化

これらの結果から、研究坑道建設に伴う地下水流動場の変化を用いてサイトスケールのモデルキャリブレーションを行うためには、掘削開放率の程度を確認するために研究坑道近傍での間隙水圧測定や研究坑道周辺における断層の水理特性を評価するための間隙水圧モニタリングを実施することが優先課題として抽出された。

ii) 深層ボーリング調査（MIZ-1 号孔）

ステップ1での地下水流動解析結果から抽出された調査課題である研究所用地内を通る北北西系断層の花崗岩部での水理学的特性を把握するために、研究所用地北東部から南西方向に向けて深層ボーリング調査（MIZ-1 号孔：計画掘削長 1,350 m のコントロールボーリング。計画では掘削長 250 m までを鉛直掘削、それ以降から南西方向に 12° の傾斜掘削。）を開始した。また、浅層ボーリング孔や研究所用地近傍のボーリング孔に設置したモニタリング装置による地下水圧の観測を継

続した。

MIZ-1 号孔ボーリング調査では約 500 m まで掘削後、孔跡の修正のため掘削長約 350 m までセメントにより埋め戻しを行った。岩盤の水理に関する調査研究では、埋め戻し前の掘削長約 500 m までを対象に水みちを検出するための電気伝導度検層（竹内ほか，2004，Takeuchi, et. al., 2004）ならびに掘削中の逸水や検層の結果に基づき、可能性のある水みち区間などを対象とした水理試験を実施した。

電気伝導度検層はボーリング孔内の水をイオン交換水で置換した後に孔上部に設置したポンプにより定流量で揚水（5 リットル/分および 20 リットル/分）をしながら孔内の電気伝導度の時間変化を 1 時間毎に合計 6 回測定した。計測結果を図 3.3.2-14 に示す。

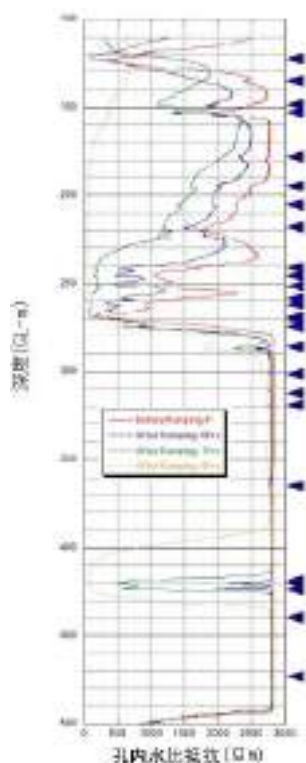


図 3.3.2-14 電気伝導度検層の結果
(15 リットル/分での揚水)

検層の結果、掘削長 220 m，掘削長 240～270 m 付近，掘削長 420～430 m 付近，掘削長 435～440 m および掘削長 470 m 付近で明瞭な電気伝導度の変化が観測された。

水理試験は 11 区間で実施した。このうち 8 区間は、電気伝導度検層で捕らえられた流入点における割れ目の水理特性(透水性や間隙水圧など)の

推定を目的に、約 2.5～11 m の区間長での試験を実施した。一方、長区間の試験は岩盤の平均的な透水性の把握を目的に埋め戻し区間を対象に実施した。水理試験の方法は、試験区間の透水性に応じた試験手法を選定することで試験結果の品質を確保するために、シーケンシャル試験を実施した（小出ほか，2001，藪内・竹内，2003）。簡易解析により求められた各区間の透水量係数，透水係数，間隙水圧などの代表値を表 3.3.2-3 に示す。なお，これらの値は今後実施される詳細解析などにより修正されることがある。

MIZ-1 号孔で実施した電気伝導度検層と水理試

表 3.3.2-3 水理試験の結果

No	試験区間 (m)	区間長 (m)	透水量係数 ($\text{m}^2 \text{sec}^{-1}$)	貯留係数 (-)	間隙水圧 (GL-m)	備考 (試験区間の特徴)
1	113.05-116.28	3.23	1.80E-03	?	54.1	掘削中に逸水量増大
2	215.0-225.67	10.67	6.79E-05	4.68E-12	54.0	掘削中に逸水量増大 電気伝導度検層に異常
3	261.20-270.41	9.21	5.77E-04	?	54.0	掘削中に逸水量増大 電気伝導度検層に異常
4	468.4-470.96	2.56	8.91E-09	2.63E-08	54.57	掘削中に逸水量増大 電気伝導度検層に異常
5	302.0-304.56	2.56	1.26E-10	4.94E-11	54.6	掘削中に逸水量増大
6	436.3-439.36	3.06	1.80E-07	5.87E-08	54.1	電気伝導度検層に異常
7	418.0-421.06	3.06	1.71E-05	5.59E-06	54.1	電気伝導度検層に異常
8	365.0-368.06	3.06	7.21E-11	2.36E-11	54.0	掘削中に逸水量増大
9	429.5-499.56	70.06	4.80E-07	6.86E-09	54.0	長区間試験
10	360.0-430.06	70.06	2.02E-04	2.88E-06	54.0	長区間試験
11	290.0-360.06	70.06	1.04E-06	8.84E-05	54.0	長区間試験

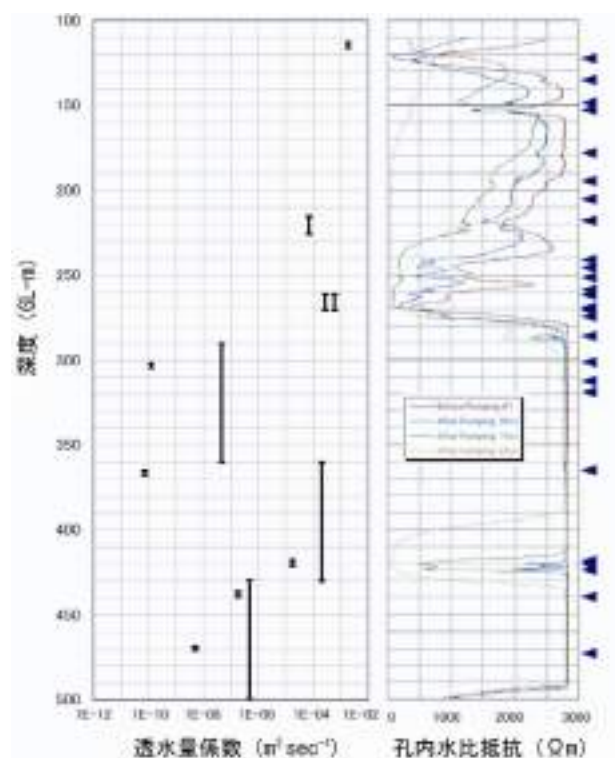


図 3.3.2-15 電気伝導度検層と水理試験結果

験の結果、電気伝導度に明瞭な変化が観測された掘削長では透水量係数で $10^{-8}(\text{m}^2 \text{ s}^{-1})$ オーダー以上の透水性を有することが分かった(図 3.3.2-15)。これは DH-2 号孔で示された透水性の下限値 ($10^{-7}(\text{m}^2 \text{ s}^{-1})$) (竹内ほか, 2003) よりも 1 桁程度低い値である。また掘削中に逸水の増加が観測された、掘削長 303 m 付近や 367 m 付近などは電気伝導度検層においては明瞭な電気伝導度の変化点は観測されず、さらにこの深度を含む区間の透水量係数は $10^{-10}(\text{m}^2 \text{ s}^{-1})$ オーダー程度の低い値を示すことから、当該深度での逸水量の増加は試験区間よりも上位の透水性の高い区間で発生した可能性が極めて高い。

また、既存ボーリング孔における間隙水圧観測の結果、研究所周辺の露頭やリニアメント、浅層ボーリング孔の MSB-3 号孔、さらには主立坑内などで確認された北北西走向の急傾斜を有する断層 (IF_SB1_004 ; 図 3.3.2-16) を境に西側の観測孔 (MSB-3 の上から 3 番目の観測区間以深および DH-2 号孔) では、2003 年 9 月 26 日に北海道十勝沖で発生した地震に同期して、その直後に水圧の急上昇が観測された。一方、同断層の東側では地震による水圧の急激な変動は観測されなかった(図 3.3.2-17)。さらに浅層ボーリング孔における採水作業に伴う水圧応答は、同断層を境に反対側には伝播していないことから(図 3.3.2-18, 図 3.3.2-19)、この断層は水理的に遮水構造を有している可能性が示唆された。



図 3.3.2-16 北北西走向の断層とボーリング孔位置

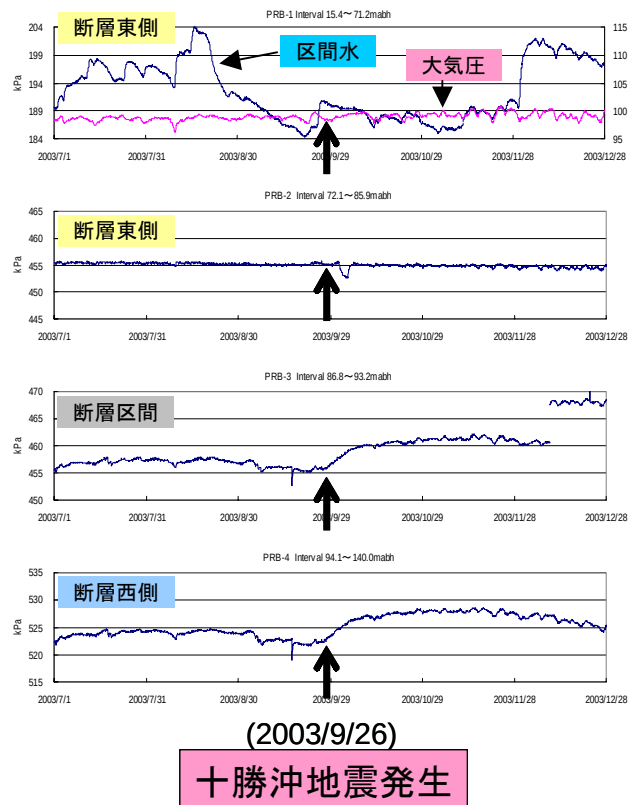


図 3.3.2-17 十勝沖地震前後の水圧変化

MSB-2号孔	応答	MSB-3号孔
揚水区間		観測区間
明世累層 酸化還元フロント		明世累層主要部
明世累層主要部 (泥岩の上位)		
明世累層主要部 (泥岩の下位)		
明世累層基底礫岩	→ ×	明世累層基底礫岩
土岐夾炭累層主要部	→	断層部
土岐夾炭累層 (γ線異常部)	→	土岐夾炭累層主要部
土岐夾炭累層基底礫岩 (上部)	→	
土岐夾炭累層基底礫岩 (下部)	→	土岐夾炭累層基底礫岩
花崗岩風化部	→	花崗岩風化部
	→	花崗岩新鮮部

→ : 明瞭に観測* (*目視により反応の大小を判断)
 → : わずかに観測*

断層西側の MSB-2 号孔の区間毎の採水に伴う MSB-3 号孔での水圧応答

図 3.3.2-18 採水作業に伴う水圧応答

MSB-1号孔	応答	MSB-4号孔
観測区間		揚水区間
明世累層主要部		明世累層主要部 (泥岩の上位)
		明世累層泥岩部および その周辺
		明世累層主要部 (泥岩の下位)
明世累層基底礫岩		明世累層基底礫岩
土岐夾炭累層主要部	× ←	土岐夾炭累層 (γ線異常部)
	× ←	土岐夾炭累層主要部
土岐夾炭累層基底礫岩		
花崗岩新鮮部		花崗岩新鮮部

→ : 明瞭に観測* (*)目視により反応の大小を判断
 ----- : わずかに観測*

断層東側の MSB-4 号孔の区間毎の採水に伴う MSB-1 号孔での水圧応答

図 3.3.2-19 採水作業に伴う水圧応答

③ まとめ

平成 15 年度に実施した岩盤の水理に関する調査研究の結果、ステップ 1 の地下水流動解析により北北西系および北東系の断層の水理学的特性を評価すること、また研究坑道建設に伴う地下水流動場の変化の予測解析により、研究坑道近傍での間隙水圧測定や研究坑道周辺の断層の水理特性を評価することなどが重要であることなど、次期調査に優先すべき項目が抽出された。また、研究所用地の深度 500 m までの花崗岩中の地下水流動を規制する透水性割れ目の位置や水理特性が明らかになるとともに、水みちを検出する手法の検出範囲に関しても新たな知見を得ることができた。さらに地下水のモニタリングデータに基づき、北北西走向の断層の特性を推定した。これらの結果は、今後、ステップ 2 以降の繰り返しアプローチにおける水理地質構造のモデル化および地下水流動解析や研究坑道の設計・施工ならびに掘削影響の予測解析に必要不可欠なものである。

今後は、MIZ-1 号孔のボーリング調査を継続し花崗岩の地下深部の水理学的特性を把握するとともに、孔間水理試験を実施し、研究所用地内での水理学的な連続性を把握する。また、繰り返しアプローチに基づき、これらの結果を用いた水理地

質構造のモデル化および地下水流動解析を実施することにより、地表からの調査によりサイト～ブロックスケールの地下水流動特性を効率的に調査・解析・評価するための体系的な技術基盤を第 1 段階の調査研究の終了時期までに整備していく。さらに今後の調査データに基づき、研究坑道掘削が地下水流動に与える影響の予測解析を更新していく計画である。

参考文献

- 稲葉 薫, 三枝博光, White, M. J., Robinson, P. (2002): 地下水流動の予測解析統合システム (GEOMASS システム) の概要と東濃地域への適用事例, 地下水学会誌, 44, pp. 105-123.
- 核燃料サイクル開発機構 (2000): 超深地層研究所計画の現状—平成 8 年度～11 年度—, サイクル機構技術資料, JNC TN7400 2000-014.
- 核燃料サイクル開発機構 (2001): 広域地下水流動研究の現状—平成 4 年度～11 年度—, サイクル機構技術資料, JNC TN7400 2001-001.
- 小出 馨, 杉原弘造, 長谷川健, 武田精悦 (2001): 花崗岩を対象とした深部地質環境の調査技術開発の課題と現状—測定データの品質保証の観点で構築した地下水調査法の提案—, 資源と素材, 117, pp. 785-793.
- 下茂道人, 山本 肇 (1996): 等価不均質連続体モデルによる亀裂性岩盤の浸透流解析手法, 大成建設技術研究所報, pp. 257-262.
- 竹内真司, 天野健治, 下茂道人, 松岡清幸 (2003): 電気伝導度検層を用いた亀裂性岩盤中の水みち検出技術, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, pp. 413-414.
- Takeuchi, S., Shimo, M., Doughty, C. and Tsang, C.-F. (2004): Identification of the Water-Conducting Features and Evaluation of Hydraulic parameters using Fluid Electric Conductivity Logging, Proceedings of the Second International Symposium on Dynamics of Fluids in Fractured Rock, pp. 349-354.
- 竹内真司, 下茂道人, 城まゆみ, Tsang, C.-F. (2004): 電気伝導度検層による深部花崗岩中の水みちの抽出と水理特性の評価, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 451-456.
- 藪内 聡, 竹内真司 (2003): 深層岩盤を対象とした単孔式水理試験, 日本地下水学会 2003 年秋季講演会講演要旨, pp. 32-35.

1-4) 地下水の地球化学に関する調査研究

① 課題と計画の概要

超深地層研究所計画における第1段階から第2段階にかけての調査研究では、研究坑道掘削の影響が及ぶ可能性のあるサイト～ブロックスケールを対象に、研究所建設以前の未擾乱の地下水の地球化学的状态や研究所建設過程における擾乱の範囲・程度を三次元的に把握し、既存の地球化学モデルを検証・更新することを目的とする。そのため、研究所用地の堆積岩および花崗岩を対象に、以下の項目を主要な課題として調査研究を進めている（サイクル機構、2002）。

- ・ 地下水の物理化学パラメータ、化学組成および同位体組成の三次元的分布、ならびに、それらと地質・地質構造との相関の把握
- ・ 熱力学解析やマスバランス・多変量解析に基づく地球化学モデルの構築
- ・ 坑道掘削段階で遭遇する地球化学環境の予測、およびそれに基づいた研究計画の策定

平成14年度までに、研究所用地に掘削された4本の浅層ボーリング孔のうち、2本の浅層ボーリング孔（MSB-2, 4号孔：深度約100～200 m）を用いて調査・解析を行い、研究所用地に分布する地下水の起源と水質分布、ならびに水質形成機構に関する検討を行った（サイクル機構、2003a）。その結果、堆積岩中の地下水について、浅部にケイ素、ナトリウム・カルシウム・硫酸・炭酸水素イオンに富む地下水（以下、Si-Na-Ca-SO₄-HCO₃型地下水）、深部にナトリウム、塩化物イオンに富む地下水（以下、Na-Cl型地下水）が存在することが明らかになっている。

平成15年度は、研究所用地に掘削中の深層ボーリング孔（MIZ-1号孔：平成15年度末で深度約600 m）と、既設の浅層ボーリング孔（MSB-2号孔、MSB-4号孔）において未調査の深度の地下水採水を実施して、地下水の地球化学に関する調査・解析を行った。この調査・解析の目的は、研究坑道建設予定地点の地下水の地球化学特性を把握し、地球化学特性の三次元的分布と水質形成機構に関わる概念モデルを構築することである。深層ボーリング孔では揚水ポンプを用いて花崗岩中の地下水を採水し、浅層ボーリング孔ではMPシステム（多区間間隙水圧モニタリングシステム）を利用して主に堆積岩中の地下水を採水した。採水した地下水の水質・起源・滞留時間などを明らかにす

るために、化学成分・同位体分析を行った（サイクル機構、2003b）。

② これまでの成果

i) 水質分布の把握

堆積岩の上部（明世累層）に分布する Si-Na-Ca-SO₄-HCO₃ 型地下水には、平成15年度におけるデータの蓄積により、深度に応じて減少する成分（ケイ素、カルシウム・硫酸・炭酸水素イオンなど）と、増加する成分（ナトリウムイオンなど）があることが明らかとなった（図3.3.2-20）。

一方、堆積岩下部（土岐夾炭層）と基盤花崗岩中に分布する、Na-Cl 型地下水では、深度とともに塩分濃度が高くなる傾向が認められた（図3.3.2-20；研究所用地近傍のDH-2号孔のデータも使用）。この Na-Cl 型地下水では、深度とともに硫酸イオン濃度が低くなり、溶存ガスとして還元状態の指標となる硫化水素ガスを含むという特徴が認められ、花崗岩深部は強還元環境にあると推測された。

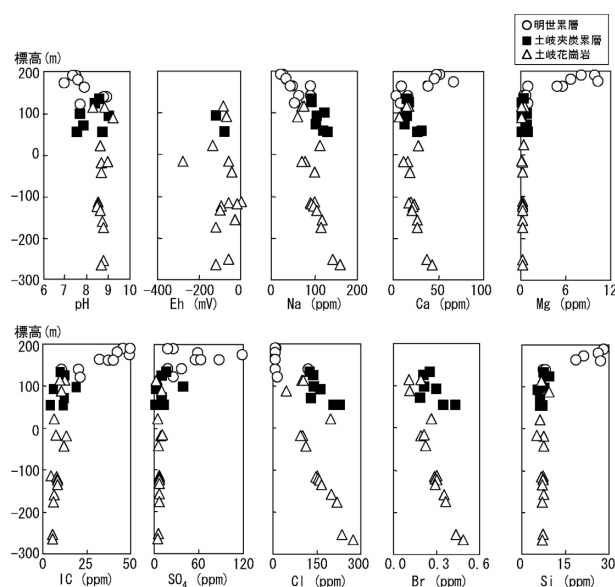


図 3.3.2-20 研究所用地における地下水の化学組成

ii) 水質形成機構の考察

Na-Cl 型地下水については、塩化物イオン濃度が深度に比例して増加し、ナトリウム・カルシウム・フッ素・臭素・硫酸・炭酸水素イオン濃度が、深度に伴う塩化物イオン濃度の変化と良い相関を示しながら増減する傾向が認められた（図3.3.2-21）。このことから、花崗岩深部には塩化物イオン濃度の高い地下水が存在していると推測され、

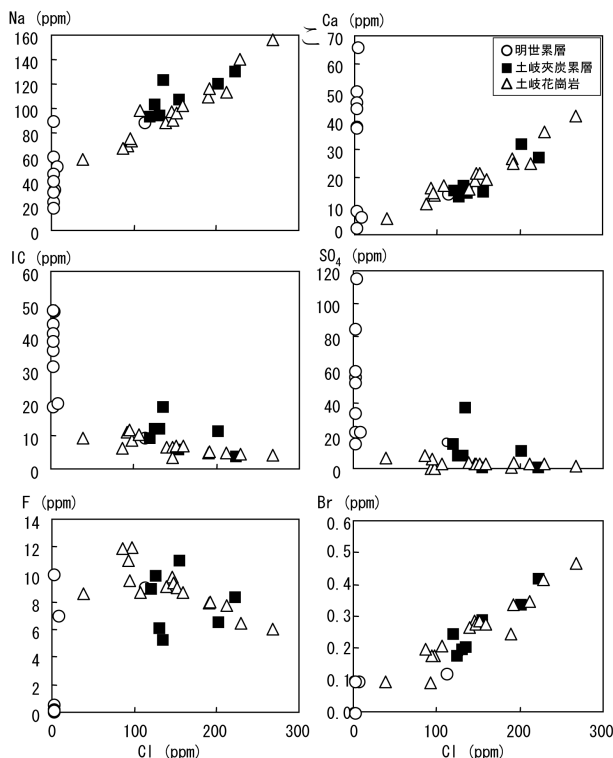


図 3.3.2-21 塩化物イオン濃度と各化学成分濃度の相関

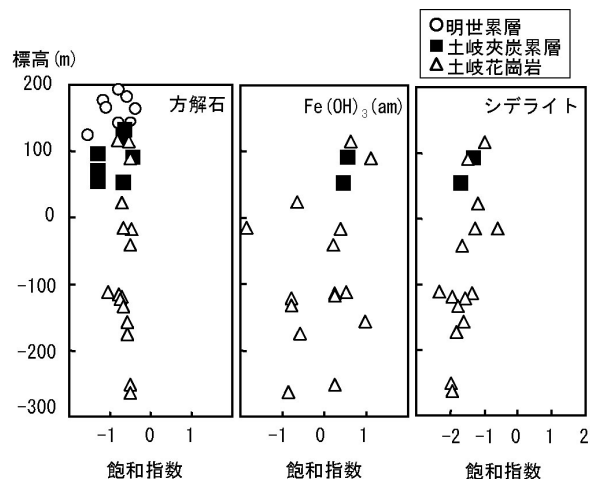
この地下水と浅部の塩化物イオン濃度の低い地下水混合が水質形成機構として想定された。花崗岩深部の塩化物イオン濃度の高い地下水の起源・成因については、3.2.2 3)項で示したように、

- ・ ブラインや温泉水のように長期にわたる水－岩石反応により生成された地下水
- ・ 高温環境での水－岩石反応で生成した水－岩石反応を主成因とする地下水、あるいは
- ・ 当該地域が海底下にあった時代に地下深部に浸透していた海水に由来する化石海水

などである可能性が考えられる。塩素同位体比を用いた解析では、その起源として化石海水の可能性が示唆されている。今後、第2段階における調査で、より塩化物イオン濃度の高い深部の地下水を採取して、引き続き検討を行う必要がある。

iii) pH・酸化還元状態とその形成機構の考察

地下水の pH は約 7～9 の範囲にあり、堆積岩の上部では深度とともに増加する傾向があり、堆積岩の下部と花崗岩では、pH はほぼ一定となる（図 3.3.2-20）。岩芯調査において、堆積岩の上部では炭酸塩鉱物（主に貝化石）の溶脱痕・再結晶痕が普遍的に観察されたことから、地下水の化学組



飽和指数が-1～1の範囲内にある場合を平衡状態にあるとみなした。

図 3.3.2-22 各鉱物の地下水に対する飽和指数

成を基にした熱力学解析により、地下水に対する各鉱物の飽和指数を計算した。その結果、pH がほぼ一定になる深度で、方解石の溶解・沈殿反応がほぼ平衡状態に達していることから（図 3.3.2-20、図 3.3.2-22）、地下水の pH に関わる主要な緩衝反応として炭酸塩鉱物の溶解・沈殿反応が想定される。

堆積岩の上部の、明世累層の Si-Na-Ca-SO₄-HCO₃型地下水については酸化還元電位を実測できていないことから、ボーリングコアの観察結果に基づいて酸化還元状態の推測を試みた。酸化還元状態を反映し易い鉱物（鉄や硫黄を含む鉱物）について、その深度分布を観察した結果、深度約 10～20 m 以浅の割れ目の表面に鉄水酸化物の沈殿が、約 40～60 m 以深のコア中に黄鉄鉱が認められた（Kumazaki, et. Al., 2003）。これらのことから、鉄の化学種（二価鉄／三価鉄）の酸化還元境界が深度約 10～20 m、硫黄の化学種（硫酸イオン／硫化鉱物）の酸化還元境界が深度約 40～60 m に位置すると推測され、また、これらの鉱物が酸化還元電位の主要な制限固相となっている可能性がある。

一方、堆積岩の下部の土岐夾炭累層と基盤花崗岩中に分布する Na-Cl 型地下水に関しては、実測された酸化還元電位に基づく熱力学解析では、主に非晶質 Fe(OH)₃ またはシデライト（FeCO₃）の溶解・沈殿反応が平衡状態にある可能性が示唆され、これらの鉱物が酸化還元電位の制限固相となっていることが推定される（図 3.3.2-22）。しかし、揚水ポンプを用いた地下水の採水においては、原

位置の水圧が地上の1気圧まで減圧するため、酸化還元電位の実測時に地下水から硫化水素ガスが脱ガスしている可能性が高いこと、硫化水素ガスが遍在する環境下では、硫酸イオン／硫化物イオン／硫化水素ガス間の酸化還元反応も、地下水中の酸化還元電位に関わる主要な反応となり得ることから、原位置の酸化還元電位とその形成機構については、更に詳細な検討が必要である。今後、第2段階における調査で、原位置の水圧を保持した状態で、溶存ガスが脱ガスしていない地下水を対象とした酸化還元電位の実測を行う必要がある。

iv) 地球化学モデルの検証・更新

研究所用地周辺に分布する Na-Cl 型地下水が持つ深度依存性の特徴を用いて、未知の深度領域の水質を予測できる可能性がある。研究所用地における地下水の水質分布・水質形成機構を表す地球化学モデルを図 3.3.2-23 に示す。この図は、DH-2 号孔の調査結果から、深度 700 m 程度までの花崗岩中の塩化物イオン濃度の深度分布を推定したものである。推定にあたり、DH-2 号孔と MIZ-1 号孔との間の塩化物イオン濃度は、各深度において水平に成層分布しているものと仮定した。この地球化学モデルについて、MIZ-1 号孔の調査により得られた溶存化学成分濃度と DH-2 号孔のデータに基づく予測結果を比較することでモデルの検証を行った。花崗岩中では塩化物イオン濃度が深度とともに直線的に増加し、ナトリウム・カルシウムイオン濃度などが塩化物イオン濃度と良い相関を示しながら増減する傾向が認められることから、MIZ-1 号孔の採水ポイントである深度約 220 m での各成分のイオン濃度を塩化物イオン濃度との相関式から計算した（表 3.3.2-4）。この結果、MIZ-1 号孔の深度約 220 m での分析値は、硫酸イオン・無機炭素濃度を除いて予測値におおむね一致する結果となり、研究所用地では、同様の水質の地下水が各深度において成層分布している可能性が高いことが明らかになった。硫酸イオンと無機炭素濃度の実測値と予測値が一致しない理由として、採水時における地下水中の溶存ガス（硫化水素ガス、炭酸ガス）の脱ガス現象によって濃度が変わったことが推察された（彌榮ほか、2004）。

この脱ガス現象に関しては、第2段階の研究坑道掘削段階において、地下環境に対して酸化的、低圧力の地下空間がボーリング孔よりも、はるかに大きな規模で出現するため、ボーリング孔で観

察されたものよりも、更に大規模な脱ガスが起こり、坑道周辺に溶存ガス成分に関する不飽和領域が形成されることが予想される。そのため、硫酸イオン・無機炭素濃度や酸化還元電位の変化が坑道周辺で顕著に起こる事が予測され、この点に着目した詳細な調査が必要である。

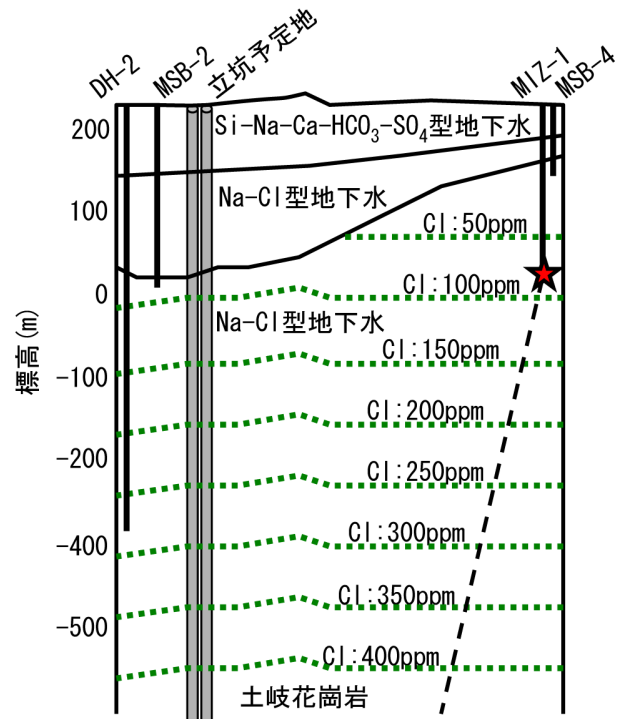


図 3.3.2-23 研究所用地における地下水の推定塩素濃度

表 3.3.2-4 観測値とモデル予測値の比較

	観測値 (ppm)	予測値 (ppm)
Cl	85.3	89~97
Na	68.1	73.7~76.7
Ca	11.1	11.3~12.4
Mg	<0.1	0.14
SO ₄	8.4	4.7~4.8
IC	6.6	9.7~10.1
F	11.9	9.9~10.1
Br	0.2	0.2

③ まとめ

研究所用地に分布する堆積岩および花崗岩（深度 500 m 程度まで）を対象に、研究坑道建設前（初期状態）の地下水の地球化学特性（水質、pH、

酸化還元状態など)の三次元的分布とその形成機構について考察を行い、これらを表現する地球化学モデルを構築した。今後、MIZ-1 号孔で新たに取得されるデータを用いて、深度 500 m 以深の領域において、本研究で構築された地球化学モデルが適用可能かどうかを検証する予定である。

さらに、第 2 段階の研究坑道掘削段階では、硫化水素ガスや炭酸ガスの脱ガス現象に着目した調査が必要であり、脱ガスの影響を受けていない真の酸化還元電位などの値を取得する技術を確立すると同時に、研究坑道掘削過程で起こりうる諸現象を想定し、地下施設建設過程の地球化学的擾乱や周辺環境への影響を評価していく予定である。

参考文献

- 核燃料サイクル開発機構 (2002) : 超深地層研究所地層科学研究基本計画, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2001-018.
- 核燃料サイクル開発機構 (2003a) : 超深地層研究所計画年度報告書 (平成 14 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2003-006.
- 核燃料サイクル開発機構 (2003b) : 超深地層研究所計画年度計画書 (平成 15 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2003-005.
- Kumazaki, N., Ikeda, K., Goto, J., Mukai, K., Iwatsuki, T. and Furue, R. (2003) : Synthesis of the Shallow Borehole Investigations at the MIU Construction Site, JNC Technical Report, JNC TN7400 2003-005.
- 彌榮英樹, 岩月輝希, 古江良治, 水野 崇 (2004) : 超深地層研究所計画 (第 1 段階) における地下水の地球化学特性調査, サイクル機構技報, No. 23 (2004. 6), pp. 41-49.

1-5) 調査技術開発

① 課題と計画の概要

超深地層研究所計画の第2段階以降において、必要とされる地質環境に関する情報を取得するために、既存の調査機器やデータ取得方法等の改良を行う。これらの調査技術は、研究坑道周辺の実際の地質環境に対する適用性を評価した上で、調査を実施する段階までに実用化することを目標として技術開発を実施する。

平成15年度においては、i) 逆 VSP 探査、ii) 高差圧対応調査機器の開発、iii) ボーリング孔閉塞技術の開発を実施した。それぞれの概要および技術開発の目標は以下のとおりである。

逆 VSP 探査とは、通常の VSP 探査とは逆にボーリング孔内に発震点、地表に受振点を設置する弾性波探査である。同様の原理を用いて、研究坑道の掘削時の発破を震源とすることにより、研究坑道周辺の堆積構造、不整合面の形状、割れ目(帯)・断層などの不連続構造の分布の情報を取得し、第1段階で構築した地質構造モデルを検証・更新する観点から、本探査手法の適用性を評価する。

第2段階以降における岩盤の水理や地下水の地球化学に関する調査研究の原位置試験においては、研究坑道の掘削に伴い、研究坑道とその周辺岩盤との間において水圧分布が大きく変化することが予測できる(高差圧環境)。とくに、水みちとして機能している割れ目帯などにおいては、局所的に大量の地下水が研究坑道内へ流入する可能性がある。このような環境において調査研究を進めるためには、高差圧環境下で確実にデータが取得可能な調査機器を開発する必要がある。

実際の地層処分においては、ボーリング孔は初期の調査から処分場閉鎖後のモニタリング終了まで長期間にわたり使用することが考えられる。処分場閉鎖後の安全確保の観点では、ボーリング孔についても閉塞などの適切な処置が必要である。また、ボーリング調査における掘削および地下水調査に影響を与える逸水に対しても適切な処置が必要とされることから、ボーリング孔の閉塞および逸水対策に関する技術としてボーリング孔閉塞技術(手法)の開発を行う。

② これまでの成果

i) 逆 VSP 探査

逆 VSP 探査では、通常の VSP 探査が地表に発震点を設置するのとは逆に、地表に受振点を設置することから発震点としては設置が困難な場所でも容易に受振器を設置できるため、通常の VSP 探査に比べて三次元的なデータの取得が容易である。また、研究坑道掘削時の発破を震源エネルギーとすることで、通常の孔内震源などと比較して信号エネルギーが小さいことによる S/N 比の低さや測定範囲の極端な制限もないと考えられるため、より広い範囲における空間的な情報をより高い S/N 比で取得できることが期待できる。

平成15年度は、平成16年度以降の研究坑道の本格掘削に伴って逆 VSP 探査を実施するための事前検討として、逆 VSP 探査に関連する文献の調査ならびにシミュレーション解析などによる調査方法の検討を行った。また、逆 VSP 探査における発破震源データの取得方法、受振レイアウト、測定頻度ならびに測定間隔などを最適化するための基礎情報を得た。

ii) 高差圧対応調査機器の開発

平成14年度は高差圧環境に対応するパッカーに関する情報収集を行った。平成15年度は第2段階の調査研究計画の具体化(3.3.3 参照)に伴い、研究坑道から掘削するボーリング孔を用いた間隙水圧測定装置などについて、国内外の事例を参照して各部品の構成や必要な仕様を検討し、同装置の概念設計を実施した。

iii) ボーリング孔閉塞技術の開発

平成15年度は、国内外のボーリング孔の閉塞技術および逸水対策技術について、現状の技術レベルを調査し、現行技術の有効性・適用性の評価を行った。また、結晶質岩および堆積岩に対する現行技術の有効な手法を検討するため、室内試験による逸水防止剤の挙動試験や化学的安定性、閉塞材料の選択、閉塞施工方法およびボーリング孔閉塞の検証方法を検討するとともに当該技術に関する課題を抽出し、課題解決に向けた開発手順を検討した。

③ まとめ

逆 VSP 探査については、平成15年度に研究坑道掘削時の発破を震源とした事前検討を実施し、

技術的に実施可能であるとの結論を得た。このことから平成 16 年度においては、研究坑道（立坑）の掘削に伴う発破を震源として、研究坑道およびその周辺に受信器を配置して適用試験を実施する予定である。

高差圧対応調査機器の開発については、平成 15 年度までに高差圧環境に対応する調査機器の概念設計を実施し、実用化の見通しを得た。

ボーリング孔閉塞技術の開発については、平成 15 年度の調査結果から、さらに既存手法の調査、閉塞材料の試験、ボーリング孔の形態別の施工方法の検討・試験、閉塞孔の検証のための検討・実証試験が必要である。

今後、第 2 段階以降の調査研究の進捗に応じて研究坑道周辺の地質環境の理解が深まるとともに、各調査の目的に応じて取得すべきデータの精度や装置に必要な仕様が具体化される。各調査のスケジュールに従って必要な調査機器を製作し、調査に適用する計画である。

2) 深地層の工学技術の基礎に関する研究

① 課題と計画の概要

深地層の工学技術の基礎に関する研究では、まず現存の工学技術の適用により、地下深部の研究坑道を安全かつ合理的に設計・施工し、維持・管理できることを確認する。また、岩盤物性のばらつきや不連続構造の出現など地質環境の不均質性に関わる変動幅を考慮したうえで、調査研究を効率的に行える研究坑道の設計や施工計画を例示する。とくに、実際の地質環境が予測結果と大きく異なる場合や大量出水や山はねなどの想定外の事象に遭遇した場合でも、設計変更や対策工により柔軟に対応できることが重要である。

平成 14 年度までに、「国による第 2 次取りまとめ評価報告書」や国内外の先行事例などを参考にして、瑞浪超深地層研究所で実施すべき工学技術に関する研究項目を抽出し、これが実現できる具体的な研究坑道レイアウト案を検討した。また、計測結果の設計・施工計画へのフィードバック技術、施工技術および施工中に得られる地質環境情報の品質を確保する技術、突発湧水に対する掘削・施工対策技術、研究坑道における地震動評価、および、安全対策に関する検討などを実施するとともに、研究坑道掘削工事の実施設計を行った。

平成 15 年度は、立坑の本格掘削に備えて準備を整えることを目標として上記の検討を継続するとともに、新たに取得された地質環境情報に基づき研究坑道の設計を見直し、立坑掘削中の計測計画の見直しを行った。また、研究坑道掘削にともなう周辺環境のモニタリングとして、年間を通じて河川流量測定と地下水位測定を実施するとともに、立坑掘削工事の進捗に応じて騒音・振動測定を実施した。

② これまでの成果

i) 計測結果の設計・施工計画へのフィードバック技術の検討

研究坑道の掘削中において必要となる調査・計測項目を設定し、施工中に得られるデータを用いて設計における地山評価、支保仕様、対策工選定へのフィードバックの適用性について検討した。特に、施工中における予想外の事象として、当初予測しえなかった地質構造、坑道掘削に伴う変形挙動および地下水挙動の 3 項目について、フィードバック技術を用いた支保仕様の変更、対策工と

その計測結果を調査・整理した。

平成 14 年度は、土木学会から提案されている地山評価のフロー（土木学会，1987）に対して、立坑掘削時に実施される調査項目を付加して、各調査項目のフィードバック解析における位置づけを検討した。

平成 15 年度は、東濃鉱山の第 2 立坑掘削時に取得されたデータなどを用いて、研究坑道の堆積岩部分を対象としてフィードバックを試行し、課題の抽出およびフィードバックのフローの見直し・具体化を図った。

フィードバック試行の一環として実施した、逆解析手法を用いた力学的な解析による地山評価の結果を以下に示す。

a) 解析の入力条件

東濃鉱山第 2 立坑掘削時に計測されたデータ（内空変位データ）を入力データとし、その深度における初期応力条件を以下のように設定した。

- ・ 内空変位データ（2 方向）
- ・ 土被り：132 m（第 2 立坑の最深部分の計測断面の深度）、単位体積重量：2.0 g cm⁻³

なお、内空変位計測は、立坑切羽が計測断面を過ぎてから行われるため、立坑掘削にともなう全変位量を計測することはできない。計測開始時点における地山解放率を軸対象解析結果に基づく 64%と設定した。

b) 解析手法

- ・ 有限要素法弾性解析

c) 結果

- ・ 逆解析結果を表 3.3.2-5 に示す。地山の弾性係数は 3,040 MPa となり、主応力の比は 0.70 と算出された。土被り条件で換算した初期応力条件は、東西方向が 1.88 MPa、南北方向が 2.59 MPa である。
- ・ 算出された応力条件を入力条件として、有限要素法弾性解析による順解析を実施した結果、南北方向の変位は 3.3 mm、東西方向は 0.6 mm となり、実測値（3.1 mm、1.8 mm）と概ね一致した。
- ・ 順解析の結果の応力分布に対して、せん断応力と内部摩擦角を設定して破壊基準線を描き、安全率を求めた結果を図 3.3.2-24 に示す。逆解析に実測値を入力した場合（a）と計測管理値を超過したことを想定して実測値の 10 倍の値を入力した場合（b）の結果を示す。前者の場

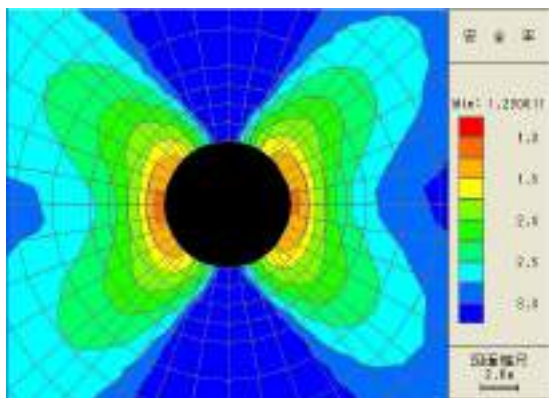
合は、安全率が 1 を下回る領域は認められない。後者の場合には、安全率が 1 を下回るいわゆる塑性領域が立坑のほぼ全周にわたって認められる。

上記の解析による地山評価のフィードバックのほかに、立坑壁面の地質観察などによる地山評価と、岩盤変位計測や覆工コンクリート有効応力計測などによる地山評価を試行し、フィードバックのフローを改定した（図 3.3.2-25）。

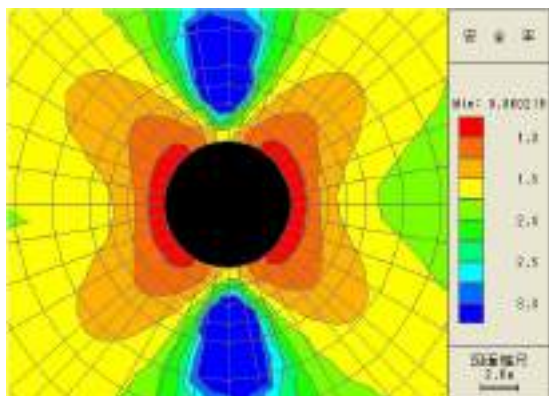
今後は、瑞浪超深地層研究所の立坑掘削において、堆積岩部分で取得されるデータに基づいてフィードバックを適用していく。

表 3.3.2-5 逆解析結果のまとめ

解析結果	弾性係数	3040 MPa
	最大主応力	N13° W
	主応力比	0.70
土被り条件で換算した初期応力（圧縮：正）	σ_x	1.88 MPa
	σ_y	2.59 MPa
	τ_{xy}	-0.18 MPa



(a) 実測値を入力した場合



(b) 実測値の 10 倍の値を入力した場合

図 3.3.2-24 逆解析の結果を入力値とした順解析の結果（安全率の分布）

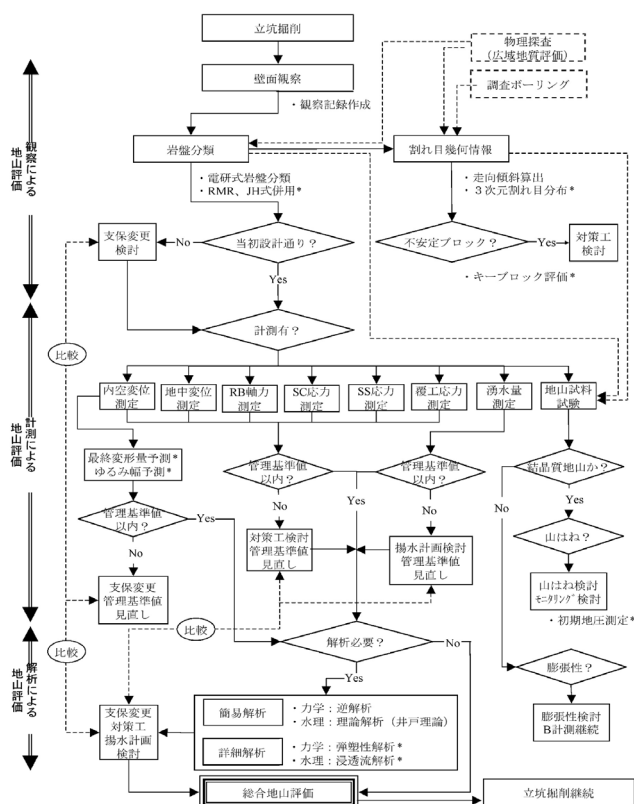


図 3.3.2-25 地山評価のフィードバックフロー案

ii) 施工技術および施工中に得られる地質環境情報の品質を確保する技術の検討

平成 14 年度には、施工技術については、施工事例に基づき、研究坑道掘削時の品質管理項目と手法を整理し、研究の品質については、調査システムフローや 3D 割れ目可視化システムについて検討した。平成 15 年度には、品質管理システムについて検討するとともに、立坑の仕上がりに関する品質確認の試験のひとつであるスームブラスティング適用試験を対象とした調査システムフローを試構築した。また、覆工コンクリートおよび立坑掘削設備の品質管理について検討した。以下に、立坑掘削設備（ワイヤーロープ）の品質管理の検討結果を示す。

a) 検討の位置づけ

瑞浪超深地層研究所の 2 本の立坑の諸元は、通常の立坑工事に比較して掘削設備の稼動回数および期間がともに増大するため、その耐久性が従来以上に重要となる。また、本工事に対してリスクマネジメント手法（佐藤ほか，2003a）を適用した結果、工期に与える影響が最も大きいリスクとして機械・設備のトラブルが抽出されており（佐藤ほか，2003b），掘削設備の品質管理は円滑な

工事の進展において重要と考えられる。特にワイヤロープは、キブル、スcafford、エレベーターを吊り支えており、その健全性を確保することは工事の安全上最も重要である。そこで、ワイヤロープについて品質管理方法を検討することとした。

b) 検討事項・方法

土木工事と鉱山運用時を対象として、文献調査とメーカーヒアリングにより、既存立坑における不具合事例、品質管理方法および予防保全方法を調べた。その結果に基づき、本立坑工事におけるワイヤロープの品質管理計画を策定するとともに、予防保全方法を整理し、具体的な品質管理方法を策定した。

c) 結果

土木分野の立坑においては、日常点検と定期点検を実施し、電磁探傷検査による内部断線に関する検査を実施している事例が多いことが分かった。鉱山分野の立坑・斜坑においては、点検のほかに、連続監視装置の導入（大山，1995）、交換あるいは切詰めたワイヤロープを用いた残存強度試験を実施している事例があった。また、予防保全策として、ロープの切詰めや天地振替えを実施している事例があった。

本立坑工事におけるワイヤロープの品質管理方法としては、日常／定期点検と電磁探傷検査を行うこととし、これに対する具体的な点検シートを作成した。また、立坑深度 500 m 到達時に予定しているロープ交換時には残存強度試験を行い、これに基づき以深の立坑掘削における予防保全策を立案する計画とした。

今後は、これらの品質管理方法に基づいて管理を行うとともに、データを蓄積していく。

iii) 突発湧水に対する掘削・施工対策技術の検討

平成 14 年度は、研究坑道掘削中の突発湧水に対する対策について以下の項目を検討した。

- ① 掘削・施工段階での対策工の選定基準，施工上の対処方法
- ② 突発湧水対策および立坑覆工時の裏込め材としての注入工法の検討
- ③ 対策工が地質環境に及ぼす影響に対する評価方法

平成 15 年度は、前方予測を含めた突発湧水に

対する具体的な対策方法について検討した。

具体的な検討手順を図 3.3.2-26 に示す。まず基本となる地質条件を前提とした場合の主立坑および換気立坑位置における亀裂出現深度を想定し、これらに対処するための前方予測計画の立案，グラウト実施基準等の計画立案，さらにその他の対策技術の検討を行った。

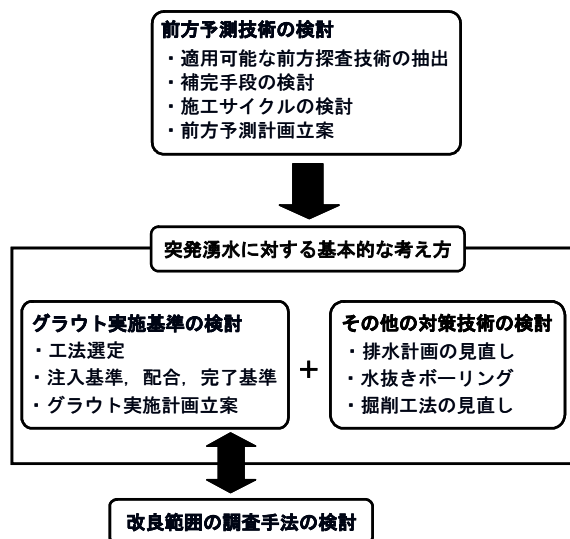


図 3.3.2-26 突発湧水に対する基本的な考え方

a) 前方予測技術の検討

研究坑道掘削中において突発湧水の可能性がある亀裂，水みちの存在を掘削前に検出する手段について検討した。具体的な検討項目を以下に示す。

- ① 研究坑道において実施可能な方法と調査において把握できる項目の整理
- ② 前方予測を行う際に，予測を補完するために利用可能な手段の検討
- ③ 前方予測の実施計画の立案
- ④ 研究坑道掘削のサイクルタイムに与える影響の整理

岩盤中の水みちとなるような亀裂を掘削前に検出する方法としては，直接的な先行ボーリングと間接的な物理探査手法に大別される。前者の先行ボーリングは，掘削に先行して突発湧水箇所の状況を直接的に特定できる。後者の物理探査による前方予測は，ある程度の幅で存在する亀裂，破碎帯部等を評価できる。平成 15 年度は，先行ボーリングを行う場合と行わない場合について，物理探査による前方予測の手法を検討した。物理探査については，反射法弾性波探査，電気・電磁法等の適用性をおもに高角度の亀裂や破碎帯部につい

での検出能力を評価の観点として検討した。

b) 突発湧水に対する基本的な考え方

突発湧水に対する対策工のうち、止水工法としてグラウト注入工法があるが、その実施については発生箇所の想定および排水設備のポンプ能力等を勘案したうえで、排水工法からグラウト実施への切替え基準、グラウト実施判定フロー、注入圧力基準、注入完了基準等を立案する必要がある。突発湧水に対する基本的考え方としては、排水工法による掘削の続行、止水工法（グラウト注入）、排水計画の見直し等があり、湧水の状況に応じた対策の選定および組み合わせにより対処する。これらの順序を以下に示す。

- ① 排水工法からグラウト実施への切替え基準およびグラウト実施判定フローの検討
- ② グラウト注入時の圧力、配合切替、注入完了基準の検討
- ③ グラウト注入計画と施工計画との整合性の検討
- ④ その他の対策技術の検討

ここで、グラウト注入の要否に際しての考え方を図 3.3.2-27 に示す。また、その他の対策技術としては、排水計画の見直し、排水設備の増設、水抜きボーリングの検討、掘削工法の見直し等が考えられる。

基本的な考え方において、掘削の前方予測で湧水箇所が想定され、作業の安全性の観点から掘削に先行してプレグラウトにより周辺岩盤に止水ゾーンを設けることが望ましい場合には、想定箇所の湧水予測状況に応じたグラウト注入計画を立案する必要がある。注入対象として、対象範囲で全体的に透水性が高い場合や、水みちとなる亀裂、破碎帯部がある程度の幅で分布する場合、あるいは対象範囲の透水性は低いものの透水性が卓越して高い亀裂が存在する場合等が考えられる。これらのうち、透水性が卓越して高い亀裂が存在する場合の注入孔配置例を図 3.3.2-28 に示す。この例は、想定した亀裂の走行・傾斜に合わせて面的にグラウト注入を行うものである。既往の事例や指針を参照して、亀裂と 3D（D：立坑径）の範囲が交差する地点までを注入範囲とし、注入孔配置は 1.5 m ピッチを基本とし、複数列（3列）の配置とした。

また、図 3.3.2-29 に主立坑および換気立坑位置における亀裂出現想定深度を示す。この図において想定された亀裂出現深度は、文献調査、地質

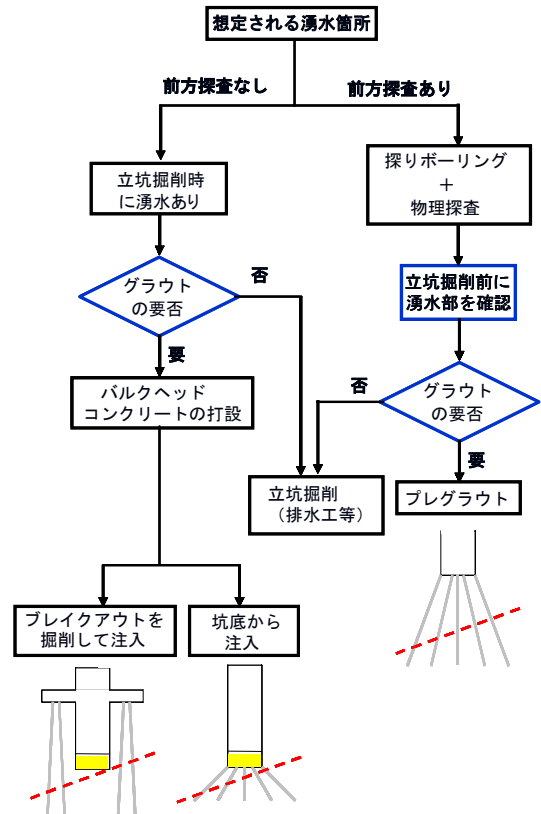
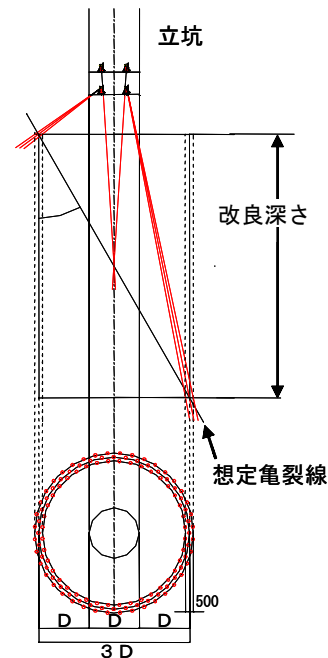


図 3.3.2-27 グラウト注入の実施フロー



D：立坑径 3D：注入範囲

図 3.3.2-28 グラウト注入孔配置例

踏査、反射法弾性波探査、ボーリング調査等の結果から構築されたステップ2の地質構造モデルにもとづくものである。これらの想定された亀裂出

現深度に対して、前方予測、グラウト実施等についてより詳細な検討を行う。

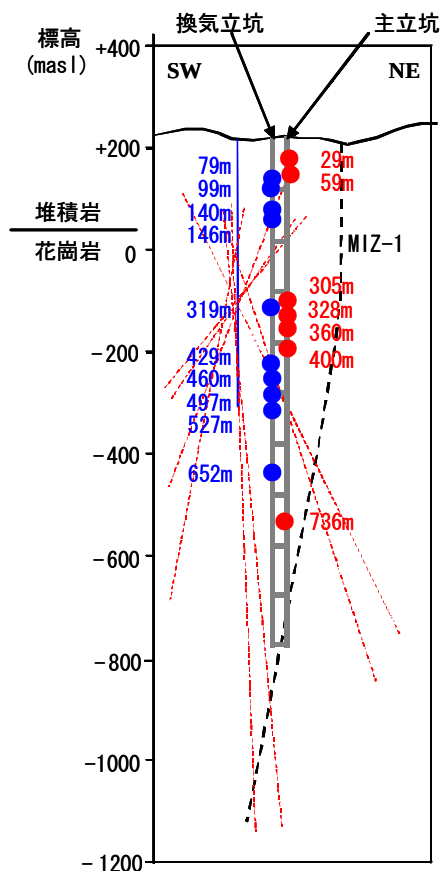


図 3.3.2-29 主立坑および換気立坑における亀裂出現想定深度

c) 改良範囲の調査手法の検討

研究坑道掘削に伴う周辺の地質環境への影響という観点において、グラウト注入による改良範囲を把握することは重要な研究課題である。特に、深部では花崗岩で亀裂開口幅の比較的小さい亀裂が対象と想定されるため、この条件にもとづき具体的に適用が可能と考えられる手法を抽出した。調査手法としては、チェック孔を利用した透水試験、物理探査によるグラウト注入前後の対比等が挙げられる。また、改良範囲を把握するためには、グラウトとして注入する材料の物性（粘性、ゲルタイム、浸透特性、施工性等）の把握が必要であり、調査手法とあわせて今後検討を進める。

iv) 研究坑道における地震動評価に関する検討

平成 14 年度は、サイト周辺で過去に発生した既往地震および近傍の活断層を考慮して経験的手法により検討用地震動を設定し、研究坑道の地震

時健全性を検討した。平成 15 年度は、社会的に関心が高まっている東海地震および東南海地震を対象に、より精緻な手法である断層モデルにより検討用地震動を作成し、平成 14 年度に作成した検討用地震動と比較することで、本立坑に与える東海地震の影響について検討した。なお、本検討における想定新東海地震とは、愛知県設計用入力地震動研究協議会に準拠して、中央防災会議での想定東海地震に 1944 年東南海地震の震源域も含めた震源域を起振断層として設定したものである。さらに、平成 14 年度に検討した地下深部における鉛直地震動について、その特性を引き続き調査し、鉛直地震動と水平地震動の比率について検討した。その結果を踏まえて、平成 14 年度に用いた簡易的な手法により瑞浪超深地層研究所における鉛直方向の検討用地震動を作成した。次に、FEM 動的解析を実施することで、鉛直地震動が主立坑の健全性に与える影響について検討した。

a) 想定新東海地震とした断層モデルによる地震動評価

近年、東海地震および東南海地震に関する社会的な関心が高まっており、瑞浪超深地層研究所においてもその影響が想定される。このことから、平成 15 年度は想定新東海地震に焦点を絞り、より精緻な検討手法である断層モデルを用いた図 3.3.2-30 に示す統計的グリーン関数法（壇ほか、2000）により瑞浪地点における想定新東海地震を想定した検討用地震動を作成することとした。想定新東海地震の断層モデルを図 3.3.2-31 に示す。地震動の計算結果例（NS 成分の場合）を図 3.3.2-32 に示す。図には、加速度波形・速度波形および加速度応答スペクトル（減衰 5%）を示してあるが、今回作成波による加速度応答スペクトルは、検討用地震動の加速度応答スペクトルを下回っていることがわかる。EW 成分も同様である。

今回作成した地震動（NS 成分、EW 成分）を用いて一次元成層地盤解析（SHAKE）を実施した結果を図 3.3.2-33 に示す。同図より、今回作成した地震動による地盤の応答結果は、加速度・相対変位・せん断応力・せん断ひずみともにいずれも平成 14 年度作成した結果に比較して大幅に小さいことがわかる。等価震度についても、同様に平成 14 年度の結果より小さい。

この結果より、瑞浪超深地層研究所において、想定新東海地震は他の地震源に比べその影響度が

小さいことを確認した。

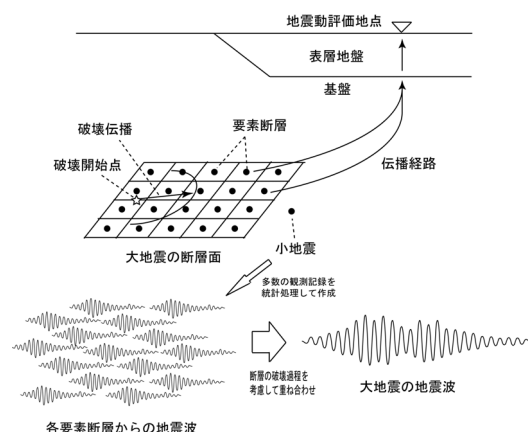


図 3.3.2-30 統計的グリーン関数法 の概念

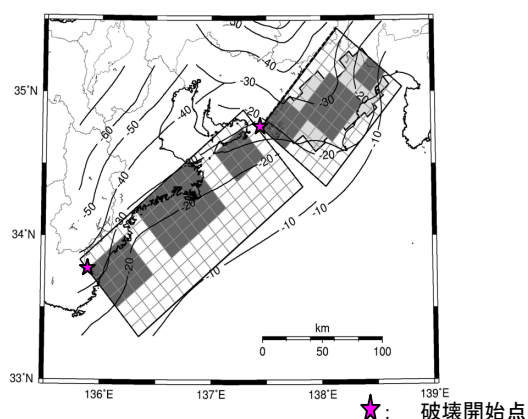
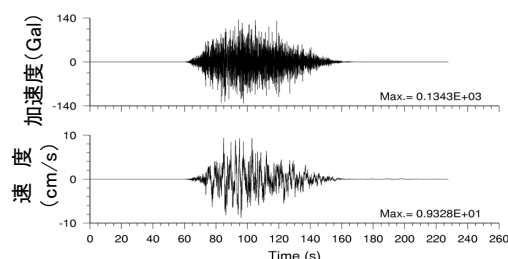
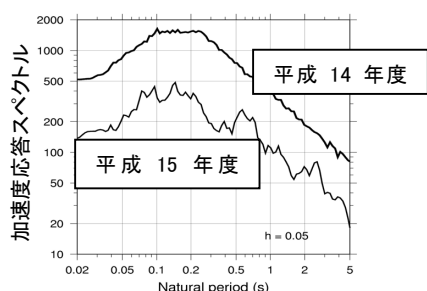


図 3.3.2-31 想定新東海地震の断層モデル



(a) 加速度波形および速度波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 3.3.2-32 地震動の作成例 (NS 成分)

— 平成 14 年度 — 平成 15 年度 (NS) — 平成 15 年度 (EW)

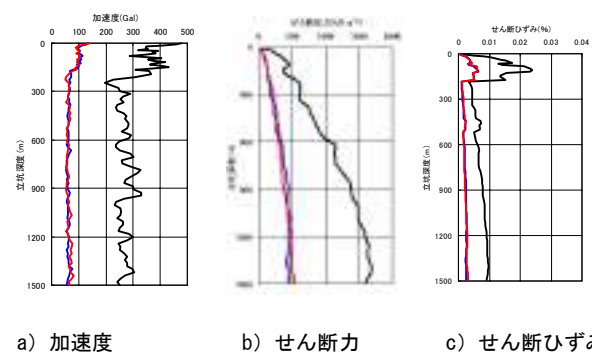


図 3.3.2-33 一次元成層地盤解析 (SHAKE) 結果比較

b) 上下地震動の検討

平成 14 年度に対比して、上下方向地震動の作成フローを図 3.3.2-34 に示す。一般に耐震設計で用いる上下動は水平動の $1/2 \sim 2/3$ であるが、岩盤深部では斜め入射等により上下動が水平動と同等になる場合もあることから、岩盤深部で得られた既往の地震記録を用いて、岩盤深部における上下地震動の特性を検討した。防災科学技術研究所の KiK-net 観測点のうち地表と地中 1,500 m で観測されている羽島観測点と岩盤が露出した地表と地中 (岩盤、深度 615 m) で観測された釜石鉱山の記録 (佐々木ほか, 1999) を用いて、一次元波動論による地盤定数の同定を行った。最適化された地盤モデルを用いて岩盤の露頭波を算定することで表層の影響を解析的に取り除き、水平動と上下動のスペクトル比を比較した。地中と地表の伝達関数を最適化のターゲットとし、遺伝的アルゴリズム (GA) により解析と観測がフィッティングするように地盤同定を行った。同定する物性値は、水平方向はせん断波速度と減衰定数、上下方

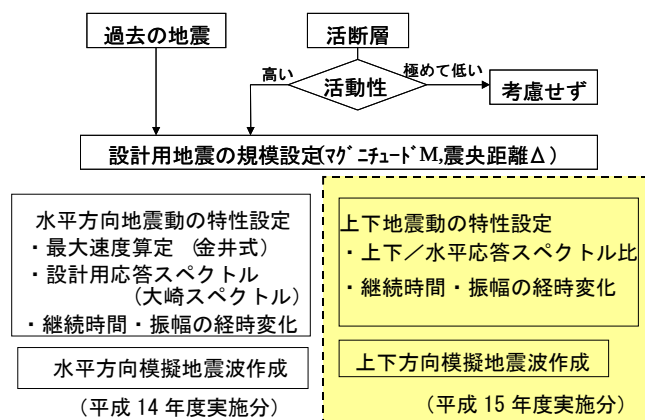


図 3.3.2-34 地震動評価フロー

向は縦波速度と減衰定数とした。検討の結果、検討用上下地震動は、釜石鉱山の地表の岩盤位置でのスペクトル比を参考に水平地震動の応答スペクトルを全周期において $2/3$ 倍としたターゲットスペクトルとして設定した。検討用上下方向地震動の最大加速度は 350 Gal となった。

c) 研究坑道の健全性評価

本項においては、鉛直地震動による主立坑の地震時挙動を、FEM 動的解析（線形）により検討する。入力地震動は工学的基盤面である地表面において設定しているが、FEM 動的解析では解析モデル下端（GL-1, 500 m ）において地震動を入力する必要がある。そこで、平成 14 年度と同様に、1 次元成層地盤解析により FEM 動的解析用入力地震動（解析モデル下端における 2E 波（入射波））を算定し、その地震動を入力地震動として 1 次元成層地盤解析（SHAKE）を行い入力基盤面での地震動を求めた上で、研究坑道の健全性検討のため FEM 動的解析を実施した。

一次元成層地盤解析により算定された最大加速度分布、最大相対変位分布、最大軸応力分布、軸ひずみ分布を求めた。さらに、加速度応答値を平成 14 年度に実施した水平加振時の解析結果と比較し図 3.3.2-35 に、水平方向に対する鉛直方向の加速度応答値の比率を図 3.3.2-36 に示す。さらに応答スペクトルにおける比を算定した結果を、図 3.3.2-37 に示す。上記の図により、応答加速度に関しては地下深部における鉛直比率の増大は確認されず、同比率は 0.75 程度で一定であった。

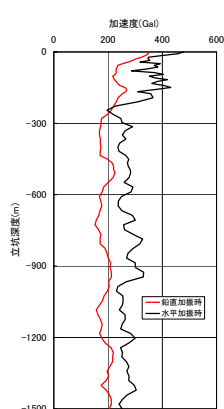


図 3.3.2-35 応答加速度の比較

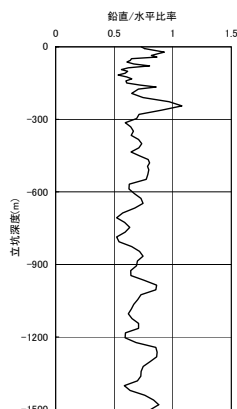


図 3.3.2-36 水平方向に対する鉛直方向加速度の比率

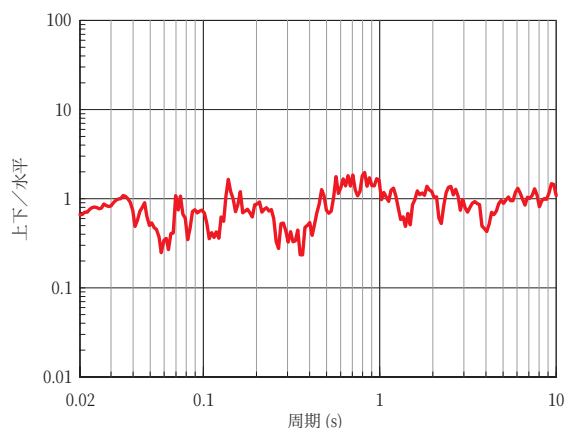


図 3.3.2-37 策定した地震動の上下／水平応答スペクトル比：GL-1, 500 m

また、応答スペクトルレベルで比較すると、地中での上下／水平の比率は平均で 0.86 となり、地表で設定した $2/3$ に比べて大きくなっている。これは、羽島観測点、釜石鉱山での地中でのスペクトル比（羽島：平均 0.97 ，釜石：平均 0.88 ）と同等の傾向となった。

これらの検討から、地下深部における地震動は、以下の 2 つの理由により、地表面に比べて水平地震動に対する鉛直地震動の比率が高まることがわかった。

- ・一般的に、地表面においては鉛直動に比べて水平動の方が増幅すること
- ・深部地下においては、地震波は鉛直方向からある角度を持って斜めに入射するため、SV 波が鉛直動に寄与すると考えられること

今回、瑞浪超深地層研究所を対象として、斜め入射の影響を考慮しない FEM 動的解析により、レベル 2 相当の鉛直方向地震動が作用した場合の主立坑への影響を評価した結果、以下のことが明らかになった。

- ・覆工コンクリートに発生する断面力は、水平方向および鉛直方向の軸力が卓越し、覆工コンクリートには同方向の引張および圧縮応力が発生する。このため、特に水平方向については、掘削時に発生する圧縮応力が増加する。
- ・しかしながら、その地震時増分応力度は平成 14 年度に実施した水平方向加振時に比べ半分以下と小さい。
- ・また、平成 14 年度に実施した FEM 非線形解析により算定した掘削時の発生応力度に足し合わせた結果、覆工コンクリートの発生応力度は破壊強度に対して十分に小さい。

しかしながら、上記の検討結果は斜め入射の影響を考慮していないため、必ずしも安全側の検討となっていない。そこで、仮に 500 m 以深において鉛直動/水平動の比率が 1.0 になると考えて鉛直地震動の影響を 1.33 倍 ($1.0/0.75$ (=鉛直/水平の加速度応答の比率)) した安全側の仮定をおいて解析した。その結果でも、地震時増分応力は十分に小さく、立坑の健全性が確保されることがわかった。

v) 安全対策に関する検討

立坑掘削中の安全を確保する方法となる入出坑管理、火災管理、環境管理および通信監視システムからなる坑内管理システムについて、平成 14 年度は熱環境解析に基づいた適切な防災計画と坑内環境の情報管理方法を連動させたシステムの概念的な検討を行った。また、リスクマネジメント手法の品質管理への適用について、いくつかの事象を抽出し、抽出したリスクについて被害事象の分類、分類した事象の発生確率の評価、事象発生時の損失量の評価を行い、リスクの定量化を試みた。評価に当たっては、工程遅延、工事金額損失および社会信用損失を評価のパラメータとした。

平成 15 年度は、坑内管理システムについては、東濃鉱山をモデルとしたプロトタイプシステムを構築してデモンストレーションを実施した。リスクマネジメントについては、より詳細な検討を行い、実務レベルに適用するための評価精度の向上を図るために、リスクの発生確率の算定においては専門家に対するアンケート調査や統計的な手法を用いた。

a) 坑内情報管理システムの構築

これまでの瑞浪超深地層研究所における防災の基本コンセプトの検討結果に基づき、立坑内の安全対策システムとして、①入出坑管理システム、②坑内火災管理システム、③坑内環境管理システム、④坑内通信監視システムからなるそれぞれが独立したシステムを構築し、実際の立坑掘削工事の仕様に含めて適用することとした。

平成 15 年度は、これら 4 つのシステムに火災時解析と熱環境解析を連動させたプログラムを作成するとともに、避難ルート解析を含む GIS 情報管理アプリケーションを介して管理者の判断を補佐するシステムを試構築した。

構築したシステムを図 3.3.2-38 に示す。入坑

者の位置情報および坑内外の環境データは解析プログラムに入力される。これらのデータに基づき異常個所が特定され、火災時解析が行われる。平行して熱環境解析も行われ、これによっても異常個所が特定される。これらの解析結果や入力データは GIS 情報管理アプリケーションに入力され、データベースに蓄積されるとともに、ユーザーインターフェイスを通じて管理者に情報が伝達される。

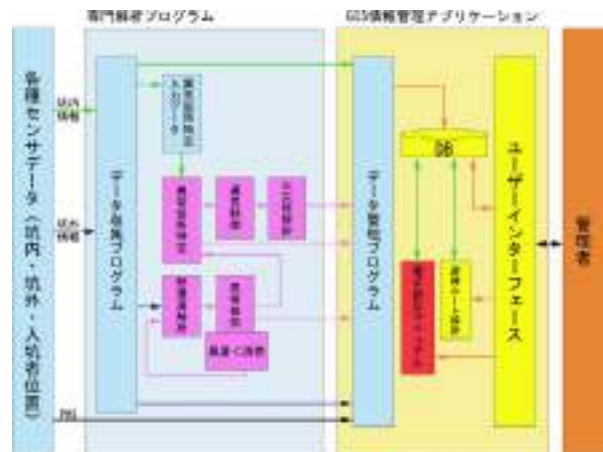


図 3.3.2-38 坑内情報管理システムの構成とデータの流れ

構築したシステムに対して東濃鉱山をモデル化し、坑内で取得された実測データを用いて、デモンストレーションを行った。

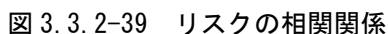
平成 15 年度の検討の結果、構築したシステムの有効性が確認された。今後は、瑞浪超深地層研究所の研究坑道をモデル化して坑内情報管理システムを構築するとともに、立坑掘削で取得されるデータを用いて課題点などの改善を行っていく。

b) リスクマネジメント手法の適用

平成 14 年度はとくにマネジメント手法の方法論の確立と研究坑道施工時のリスクに主眼を置き検討した。はじめに坑道を施工する際に生じるおそれのあるリスクに限定してリスクの抽出を行い、それについて被害事象の分類、分類した事象の発生確率の評価、事象発生時の損失量の評価を行い、リスクの定量化を試みた（佐藤ほか、2003a、2003b、見掛ほか、2003）。ただし、被害確率および損失量の定量的評価に関しては主観的評価にとどまった。したがって得られたリスクの値に関しても試算値であり精度は実用に供するものではない。また、個々のイベントは互いに独立を仮定し

平成 15 年度では、リスクのイベント間の相関性を専門家へのアンケートにより評価するとともに、リスクの発生確率と評価においては、統計データ、発生メカニズムのモデル化と解析、イベントツリーなどの被害評価モデルを用いることにより、定量的な評価を行った。以下に、検討結果を示す。

まず、専門家へのアンケートを実施した結果を考慮し、12 のイベントを7つにグループ化した。グループ化したイベントとイベント間の相関を示した図を図 3.3.2-39 に示す。これらのイベントをイベントツリーによりモデル化し、各評価のパラメータを算出した。突発湧水が生じたことによって人的災害が発生した例を図 3.3.2-40 に示す。



- ・ 統計データ、文献・記録に基づく方法
- ・ 発生メカニズムのモデル化と解析
- ・ イベントツリーなどの被害評価モデル
- ・ アンケート・ヒアリング

突発湧水		人的災害		各7/7日発生確率 P _i			損失 C _i			リスク R _i		
				発生確率 P _i	人災発生	損失日数	損失金額	社会信用	損失日数	損失金額	社会信用	
START	無被害	発生しない	0.995	0.969	0.6731	無	0日	0万円	0E+0 U	0.00日	0.0万円	0.0E+0 U
			小規模	0.0137	無	5日	0万円	1E+6 U	0.07日	0.0万円	1.4E+4 U	
			中規模	0.0077	無	15日	0万円	1E+7 U	0.12日	0.0万円	7.7E+4 U	
			大規模	0.0004	無	60日	0万円	1E+8 U	0.03日	0.0万円	4.2E+4 U	
	小被害	発生しない	0.205	0.956	0.1960	小	5日	1万円	0E+0 U	0.98日	0.2万円	0.0E+0 U
			小規模	0.0057	小	10日	1万円	1E+6 U	0.06日	0.0万円	5.7E+3 U	
			中規模	0.0032	小	20日	1万円	1E+7 U	0.06日	0.0万円	3.2E+4 U	
			大規模	0.0002	小	65日	1万円	1E+8 U	0.01日	0.0万円	1.7E+4 U	
	中被害	発生しない	0.083	0.948	0.0787	中	30日	10万円	0E+0 U	2.36日	0.0万円	0.0E+0 U
			小規模	0.0027	中	35日	10万円	1E+6 U	0.09日	0.0万円	2.7E+3 U	
			中規模	0.0015	中	45日	10万円	1E+7 U	0.07日	0.0万円	1.5E+4 U	
			大規模	0.0001	中	90日	10万円	1E+8 U	0.01日	0.0万円	8.3E+3 U	
	大被害	発生しない	0.017	0.933	0.0159	大	90日	100万円	1E+8 U	1.43日	1.6万円	1.6E+5 U
			小規模	0.0007	大	95日	100万円	1E+8 U	0.07日	0.1万円	7.2E+4 U	
			中規模	0.0004	大	105日	100万円	1E+8 U	0.04日	0.0万円	4.4E+4 U	
			大規模	0.0000	大	150日	100万円	2E+8 U	0.00日	0.0万円	4.4E+3 U	
		小計	1.00000					5.4日	2.7万円	1.9E+6 U		

図 3.3.2-40 イベントツリーによる評価例
(突発湧水・人的災害の例)

相関を考慮して評価した結果と単独事象として評価した結果を比較した。3つのリスク評価は、全ての工事範囲において単独事象として評価した結果より、相関性を考慮して計算した結果の方が大きくなった。これは、イベントツリーによる相関関係の評価の過程において、事前のイベントの相関に応じて発生確率を変化するように設定した結果を反映していると考えられる。

平成 15 年度の検討の結果、リスクマネジメント手法の実務レベルでの評価精度の向上を図ることができた。また、リスク評価の結果、リスクの大小を把握することができ、対策の方向性を明確

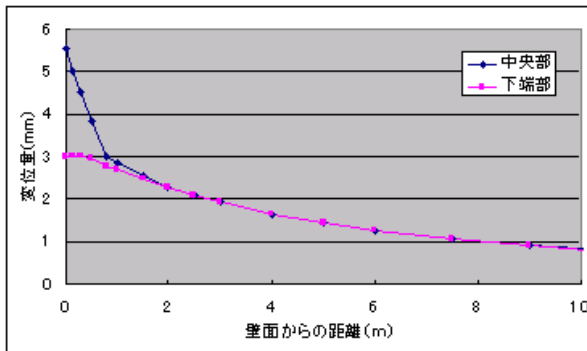


図 3.3.2-42 軸対象解析の結果の一例（岩盤内変位の分布；主立坑 GL-75 m, 側圧比 1:1.2）

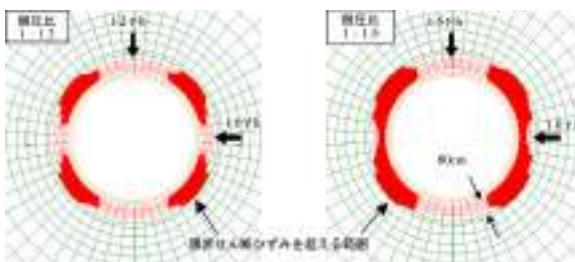


図 3.3.2-43 平面ひずみ解析結果の一例（立坑周辺岩盤のせん断ひずみ分布；主立坑 GL-150 m）

表 3.3.2-7 解析結果（主立坑の覆工コンクリートの発生応力度：N mm⁻²）

岩種、岩級		堆積岩			花崗岩		
		C _L 級			B 級	C _H 級	
深度 (m)		-75	-100	-150	-200	-250	-300
軸対称モデル 初期地圧 1.5:1.5		2.04	7.23	11.41	1.84	4.56	3.51
平面ひずみモデル 下段の数値は縁応力	初期地圧の側圧比 1.5:1.5	2.05	3.43	—	—	—	—
	1.0:1.2	1.62	2.20	4.38	0.48	0.76	0.85
	1.0:1.2	1.76	2.33	6.64	0.51	0.80	0.88
	1.0:1.5	2.01	2.91	5.41	0.65	0.96	1.03
		2.22	3.41	8.36	0.68	1.01	1.08

されていると判断される（表 3.3.2-7）。

b) 立坑掘削設備の設計・設置

平成 14 年度までに、立坑の掘削設備や付帯する設備として、櫓や巻上機、スcafford、給排気設備、給排水設備、コンクリートプラント、受電配電設備などの地上設備について設計を行い（佐藤ほか，2003b；今津ほか，2004），研究坑道掘削工事の契約に反映した。地上施設の計画を図 3.3.2-44 に示す。櫓や巻上機などの主要な設備に

ついては、騒音・振動対策に関する検討結果をふまえて、防音パネルの建屋で覆う計画とした。平成 15 年度は、受注業社による施工計画のもとで、これらの設備が準備され、平成 16 年度には順次設置される予定である。



図 3.3.2-44 地上施設の計画図

c) 施工計画の検討

立坑の掘削において最も基本的で重要な施工計画はサイクルタイムの算出である。サイクルタイムは、準備、入坑、穿孔、装薬、退避、発破、換気、ズリ出し、壁面観察、覆工打設という一連の掘削作業の詳細な工程を示す。これまでに岩種や深度に応じたサイクルタイムを算出し、全体工程を検討した。この検討の中で、1.3 m の発破を 2 回繰り返し、2.6 m の覆工コンクリート打設を行う作業を 1 サイクルとする変則的なショートステップ工法を適用することで、立坑の掘削進捗が最速となることを明らかにした。さらに、替キブル方式（2 つのキブルを交互に使用してズリ出しの行う方法）を採用することで、サイクルタイムの中で占める割合が高いズリ出し時間の短縮を図った。このサイクルタイムに基づき、全体工程計画を検討したうえで、研究坑道掘削工事の契約に反映した。

今後は、研究坑道掘削工事のサイクルタイムの実データを取得し、施工計画の妥当性を検証していくとともに、以深の施工計画に反映していく。

vii) 研究坑道掘削に伴う周辺環境のモニタリング

施設建設に伴う周辺環境への影響を把握し、影響が生じた場合には適切な処置を講じることは、工事を進めていく上で必要不可欠である。具体的

な周辺環境への影響としては、瑞浪超深地層研究所の立地条件を考慮すると、河川流量・地下水位への影響および騒音・振動である。

平成 14 年度までに河川流量計と地下水位計を設置して観測準備を整えるとともに、施設建設前の騒音・振動調査を実施した。平成 15 年度は、年間を通じて河川流量測定と地下水位測定を実施するとともに、立坑掘削工事の進捗に応じて適宜騒音・振動測定を実施した。

a) 河川流量・地下水位調査

狭間川の 3 ヶ所（上流：用地の北東約 1,300 m, 中流：用地の北東約 300 m, 下流：用地の南南東約 800 m）に設置した河川流量計（水位計）を用いて河川流量（水位）を観測した。また、出水時や渇水時を含む幅広い水位に対応した河川流量の実測値を測定し、水位流量曲線関係式を求めた。

地下水調査については、研究用地周辺の民家等の井戸 10 ヶ所に設置した地下水位計を用いて、年間を通じて地下水位の観測を実施した。

河川流量および地下水位の実測データを降雨量などのデータと比較し、その関係を把握するとともに、年間の変動幅を把握した。

b) 騒音・振動調査

研究坑道掘削工事によって発生する騒音・振動レベルおよびその騒音・振動源を把握し、周辺への影響の程度を把握するとともに、規制基準を遵守していることを確認するために、直近の保全対象施設との敷地境界線上において測定を実施した。

立坑の坑口上部工が開始された平成 15 年 7 月以降、4 回の測定を実施した。その結果、騒音、振動ともに規制基準を満足していることが確認された。騒音については、建設機械が稼働していた時間の 90%レンジ上端値で 50~60 dB、振動については、80%レンジ上端値で 30 dB 以下であった。

今後は測定を継続するとともに、河川流量・地下水位調査については、立坑坑口下部工の掘削に伴う湧水量との関係の比較、騒音・振動測定については、発破に伴う騒音・振動を把握する。

viii) データベースシステムの構築

立坑壁面の地質観察図や湧水量などの地質環境に関するデータ、工事日報や立坑覆工コンクリートのスランプ試験結果などの工事監理に関する情報、さらには、河川流量などの周辺環境のモニタ

リングデータなど、施設建設に伴って取得されるデータや情報は多種多様である。これらのデータや情報を関係者と共有するとともにトレーサビリティを確保し、必要な時に閲覧するなどの利用が可能となるようにするため、データベースシステムの構築・運用が必要となる。

平成 14 年度までに、工事監理のための工程と情報を管理するシステムを構築し、立坑掘削工事の開始とともに運用を開始した。システムの基本構成は、ハードについては PC とハードディスクであり、ソフトはオラクルを基本とし、LAN 環境で閲覧が可能である。

平成 15 年度は、工事監理の運用に伴って発生した課題点を解決するなどの運用に関する機能を修正・追加するとともに、削孔、装薬、発破、覆工などの掘削サイクルに関するデータを収録する機能を追加した。また、河川流量などの環境モニタリングデータを収納・閲覧する機能を追加し、データを収録した。

今後は、工事監理に関する情報や周辺環境のモニタリングデータについては、データベースへの記録を継続する。立坑壁面観察や湧水量のデータなどの地質環境に関するデータ、内空変位計測や覆工コンクリート応力測定などの施工に関わる計測データについては、これらを収録・閲覧する機能をシステムに追加して、データが取得され次第、登録していく。

③ まとめ

立坑の本格掘削に備えて準備を整えることを目標として、計測結果の設計・施工計画へのフィードバック技術、施工技術および施工中に得られる地質環境情報の品質を確保する技術、突発湧水に対する掘削・施工対策技術、研究坑道における地震動評価、および、安全対策に関する検討などを実施した。また、新たに取得された地質環境情報に基づき設計を見直し、立坑掘削中の計測の予測を行った。さらに、研究坑道掘削にともなう周辺環境のモニタリングとして、年間を通じて河川流量測定と地下水位測定を実施するとともに、立坑掘削工事の進捗に応じて騒音・振動測定を実施した。

今後は、これらの技術を研究坑道掘削に適宜適用しながら、掘削中に取得されるデータを蓄積、評価して設計時の検討事項の妥当性を評価し、以深の掘削に反映していくことを繰り返して設計手

法の高度化を図る。また、あわせて掘削・施工対策技術や安全対策の適用性の評価を行っていく。

参考文献

- 壇 一男，渡辺基史，佐藤俊明，宮腰淳一，佐藤智美
(2000)：統計的グリーン関数法による 1923 年関東
地震 (MJMA7.9) の広域強震動評価，日本建築学会構
造系論文集，No. 530，pp. 53-62.
- 佐々木俊二，佐藤清隆，駒田広也，川村 淳，青木和
弘 (1999)：釜石鉱山の地下深部における地震動特性，
電力中央研究所報告，研究報告 U99029.
- 土木学会 (1987)：トンネルにおける調査・計測の評価
と利用，土木学会，189p.
- 今津雅紀，佐藤稔紀，坂巻昌工 (2004)：地下 1,000m
の研究坑道工事に着手ー瑞浪超深地層研究所研究坑
道掘削工事ー，トンネルと地下，Vol. 35，pp. 31-42.
- 見掛信一郎，佐藤稔紀，下野正人，田口洋輔，亀村勝
美 (2003)：超深地層研究所施設建設へのリスクマネ
ジメント手法の適用について，土木学会第 58 回年次
学術講演会講演要旨.
- 大山仁美 (1995)：7000m級長大斜坑巻揚設備完成につ
いて，資源・素材学会 (1995 秋季大会)，0-13，pp.
42-45.
- 桜井春輔，川嶋幾夫，大谷達彦，松村真一郎 (1994)：
トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ，
土木学会論文集，No. 493，Ⅲ-27，pp. 185-188.
- 佐藤稔紀，見掛信一郎，田口洋輔，亀村勝美，下野正
人 (2003a)：超深地層における研究坑道建設プロジ
ェクトのリスクマネジメント，第 5 回構造物の安全
性・信頼性に関する国内シンポジウム，日本材料学
会，pp. 209-212.
- 佐藤稔紀，見掛信一郎，玉井 猛，今津雅紀，坂巻昌
工 (2003b)：地下 1,000mに向けて・瑞浪超深地層研
究所の建設計画，サイクル機構技報，No. 20，pp. 31-
43.

3) 調査研究の統合

① 課題と計画の概要

超深地層研究所計画では、「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」と「深地層における工学技術の基盤の整備」を全体目標として、研究所用地において平成 14 年度より第 1 段階の調査研究を、平成 14 年 7 月より第 2 段階の研究の建設を進めてきている。

本項では、上記 2 つの全体目標に向けた、これまでの第 1 段階における調査研究について、3.1 項において述べた研究の進め方に沿って平成 15 年度までの第 1 段階調査研究の進捗を総括する。

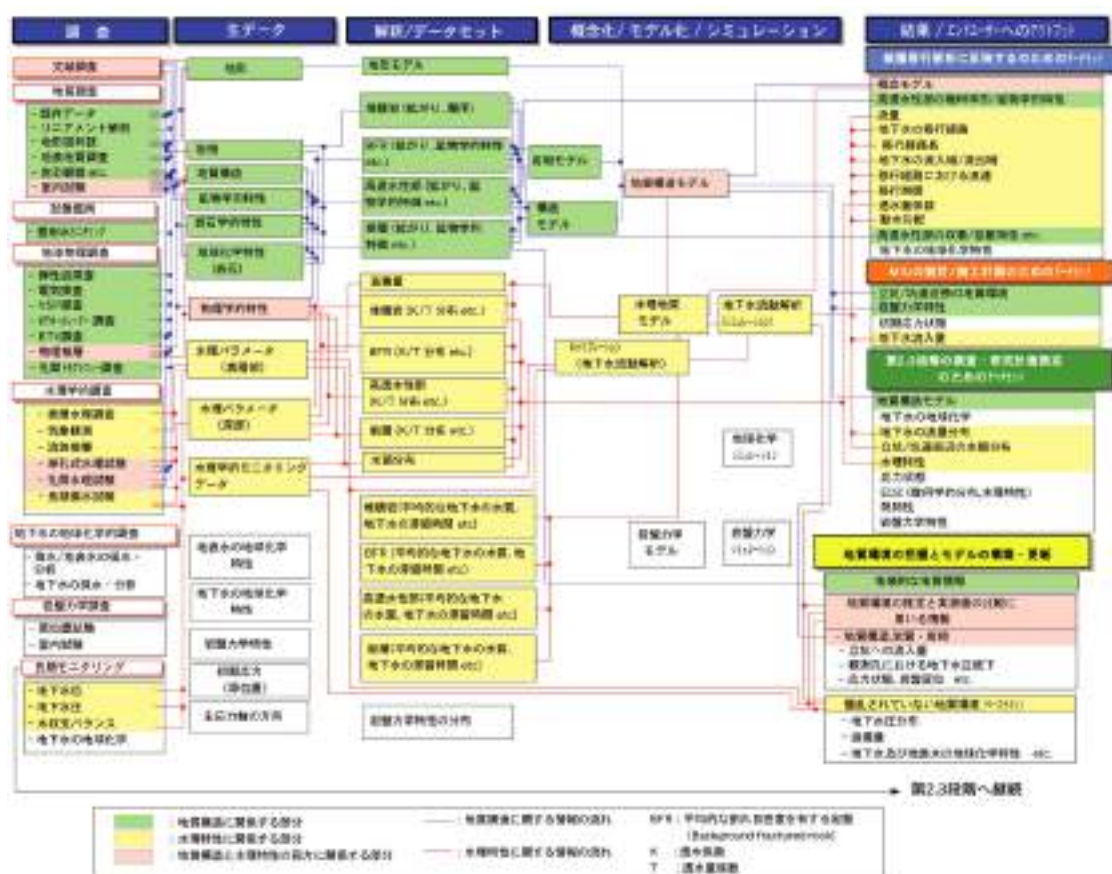
本計画の第 1 段階では、主にサイトスケール（表 3.3.1-1）に相当する地質環境を対象に、繰り返しアプローチ（図 3.3.1-4）を実践している。地表からの調査研究においては、研究坑道などでの調査研究に比べて、調査・解析する領域が広く、調査内容が地表からのボーリング調査などに限定されるため、地質環境の理解の程度には限界が生じる。このため、地上からの調査により地層処分

にとって重要な地質環境特性を、限られた調査量、空間（領域）、さらには時間内で効率的に把握できる技術を整備していく必要がある。

これらのことを踏まえ、第 1 段階の調査研究の道すじを示したものが図 3.3.2-45 に一例を示す統合化データフローである（大澤ほか，2001）。この統合化データフローにおいては、研究対象の地質環境特性（例えば、割れ目などが地下水流動を大きく支配する岩盤であること）を踏まえつつ、実際の調査研究を通して得られる地質環境データセットの反映先として、

- ・ 地層処分研究開発の研究課題（安全評価の適用性確認など）：図中の「核種移行解析に反映するためのデータセット」
- ・ 地下施設の設計・施工：図中の「MIU の設計/施工計画のためのデータセット」、
- ・ 第 2，3 段階の調査研究計画の策定：図中の「第 2，3 段階の調査・研究計画のためのデータセット」

の 3 つを設定するとともに、それぞれの具体的な入力情報を定義して研究を進めている。



（大澤ほか，2001 を一部修正）

図 3.3.2-45 地上からの調査予測研究段階の統合化データフロー（水理地質）

② これまでの成果

i) 繰り返しアプローチの実施状況

平成 14 年度から平成 15 年度までの繰り返しアプローチの実施状況を地質環境モデルの作成状況を例に図 3.3.2-46 に整理して示す。

第 1 段階の調査研究はステップ 1 から 4 に区分して進めている (図 3.3.1-5)。調査は、ステップ 1 において、地質構造に関わるデータ取得を目的とした地質踏査、反射法弾性波探査などを実施した。ステップ 2 では、花崗岩を被覆する堆積岩を対象に、断層などの不連続構造の分布、堆積構造、各層ごとの物理特性や水頭分布、さらには地下水の地球化学特性に関わるデータ取得のために、4 本の浅層ボーリングを研究所用地内に配置して調査を実施した (Kumazaki et al., 2003)。平成 15 年度末時点では、ステップ 3 の深層ボーリング調査 (MIZ-1 号孔) を実施している (太田ほか, 2004)。なお、ステップ 2 までにおいては、主な研究対象である花崗岩中でのボーリング調査を計

画していない。この状態を補うために、広域地下水流動研究の一環として、研究所用地近傍の既存ボーリング孔 (DH-2 号) で水理試験や物理検層などの再調査と岩石サンプルを用いた室内力学試験を実施している。

一方、地質環境のモデル化については、水理地質構造モデルを除きステップ 2 までが完了し、平成 16 年 3 月時点で深層ボーリング調査により取得されるデータを基に、モデルの確認および評価を順次実施している (熊崎ほか, 2004)。ステップ 1 から 2 においては、ステップごとに地質構造と水理地質構造モデル (地下水流動解析を含む) を作成または更新をした (ステップ 2 の水理地質構造モデルは更新中)。岩盤力学と地球化学モデルについては、ステップ 2 において、研究所用地で最初となるモデル化を実施した。これは、ステップ 1 においては、地質構造調査が主体で地質環境モデルを構築する情報が得られなかったことによる。

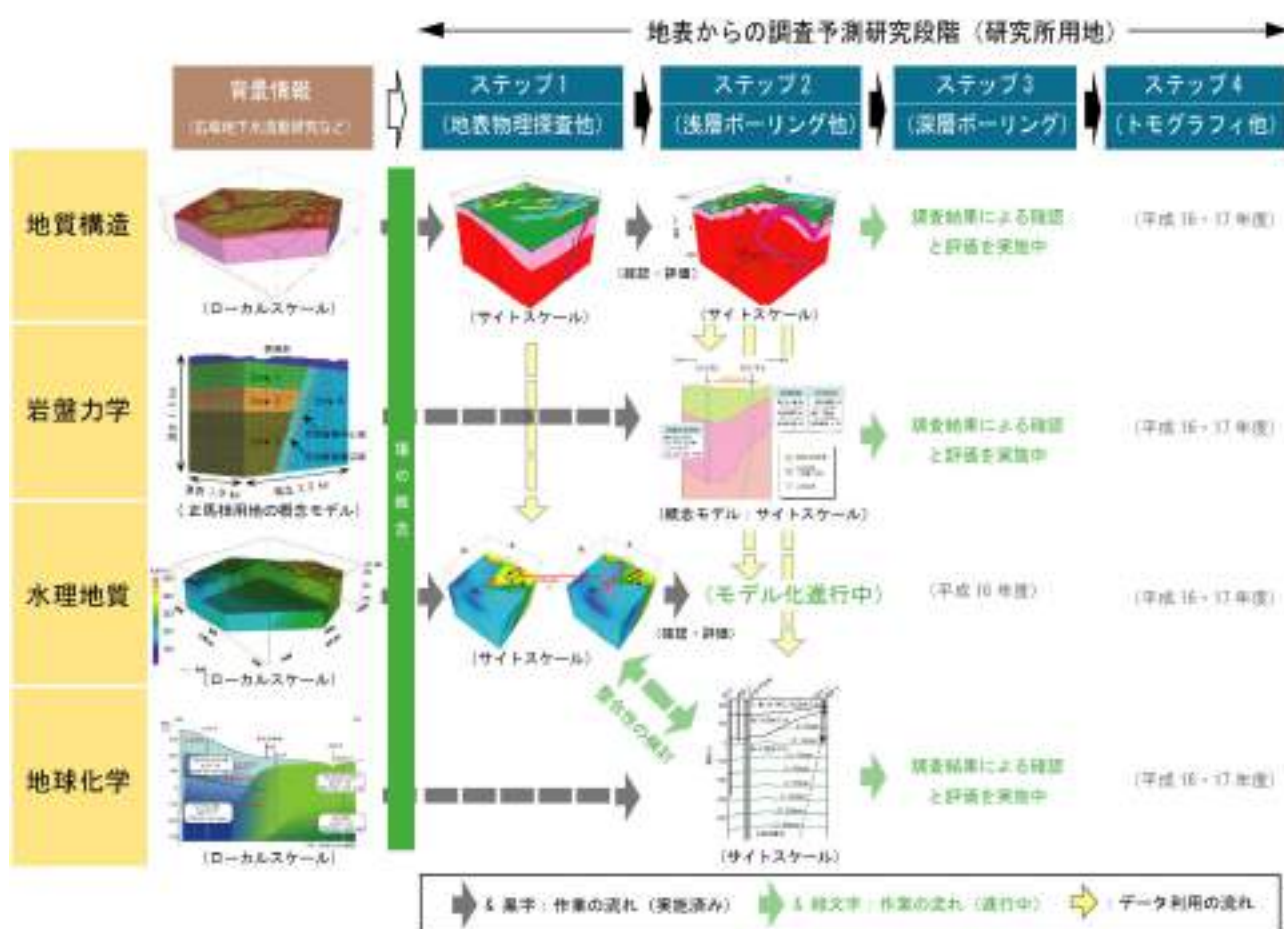


図 3.3.2-46 地質環境モデルの作成・更新状況を例にした繰り返しアプローチの現状
- 超深地層研究所計画の第 1 段階 (平成 15 年度末時点) -

ii) 地質環境データセットの整備

地質構造および水理地質構造の2分野においては、これまで繰り返しアプローチを基本に、ステップ1での調査からモデル化、ステップ2の調査結果に基づくモデルの評価と更新を行った（太田ほか、2004）。ここでは、これらの2分野の地質環境データセットの整備状況を中心に、統合化データフローに基づき、その達成度について中間評価を試みる。

研究所用地での第1段階の調査研究においては、広域地下水流動研究のローカスケールを対象とした調査研究の成果など、サイトスケールに該当する研究所用地での調査研究の計画を立案する上での既存情報は比較的良く整備されつつある。しかし、研究所用地の調査量は、深層ボーリング調査が1孔に限定されるなど、地質環境モデルの評価や更新を繰り返す上では新たな情報が極めて少なくなることに留意が必要である。また、割れ目（帯）などが地下水流動を大きく規制していると考えられる花崗岩を主な研究対象とした調査研究においては、断層などの不連続構造の分布や性状を効率的に把握することが極めて重要となる。

これらのことから、地質構造に関わる調査研究においては、基本的に、

- ・ 既存情報と航空写真などによるリニアメント解析結果などを最大限に活用しつつ、断層などの大規模な不連続構造の分布を推定する
- ・ 反射法弾性波探査などの情報を重ねて確からしさを段階的に向上させる
- ・ とくに重要な大規模な不連続構造について地上踏査やボーリング調査により確認していくという方法で調査研究を進めている。

研究所用地とその周辺において実施したステップ1から2までの地質構造調査で得られた様々なデータは、統合化データフローにしたがい、地下水の流動や水質形成などに影響を及ぼすと考えられる以下の地質構造要素ごとにデータセットとして取りまとめ、その規模や特性などについて地質学的な解釈を加えている。

- ・ 基盤花崗岩（土岐花崗岩）
 - a. 健岩部, b. 花崗岩上部の風化部
- ・ 被覆堆積岩（瑞浪層群および瀬戸層群）
 - a. 基盤花崗岩との不整合面, b. 地層境界面
- ・ 地質構造
 - a. 領域を区分する可能性のある大きさを有する断層

- b. 基盤花崗岩における上部割れ目帯および下部割れ目低密度帯
- c. 基盤花崗岩における上部割れ目帯中の低角度傾斜を有する割れ目の集中帯

ステップ1からステップ2への地質構造モデルの変遷について、ステップ1において主立坑に出現すると予測された断層（図 3.3.2-47；IF_SB0_005）の分布に着目すると、ステップ1における断層の走向・傾斜はN19° W81° Eであるが、ステップ2においては、情報量の増加に伴って、N18° W87° Wに見直されており（IF_SB1_004）、主立坑での出現予測深度はステップ1からステップ2で118 mから2.5 mへと変更した。現在、掘削工事が進められている主立坑の坑口部において、その位置と方向性から IF_SB1_004 と同一と考えられる断層の分布が確認されており、このことは、ステップ1からステップ2へ情報量が増加することに伴い、地質構造モデル上の断層分布がより確からしく表現されたことを示している。また、より精緻なモデル化のために（不確実性の低減に向け）、ステップ2の調査研究が適切に計画立案されたことを示す一例と考える。

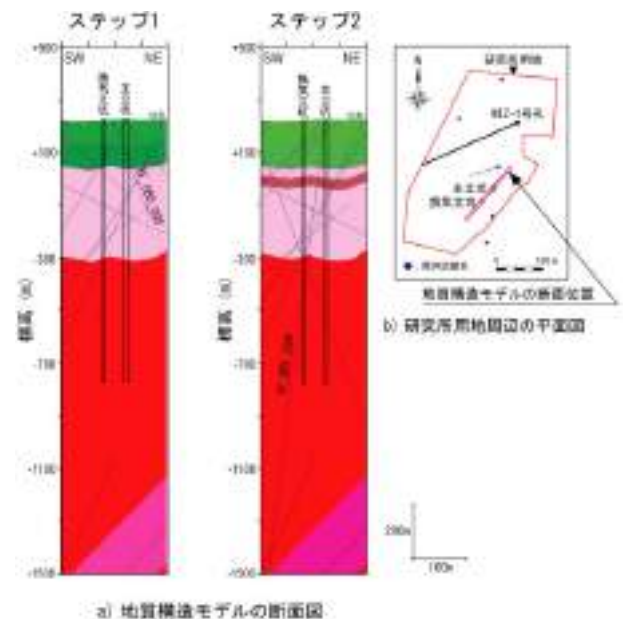


図 3.3.2-47 地質構造モデル鉛直断面図
(主立坑および換気立坑を
通過する鉛直断面)

図 3.3.2-45 の統合化データフローにおいて、反映先として（図中の「結果／エンドユーザーへのアウトプット」）定義した3つのデータセット

を整備するためには、それぞれの地質構造要素（とくに、断層や割れ目帯）の分布や形状、地質学および水理学的特性を詳細に（精確に）把握する必要がある。このことから、IF_SB1_004 断層をステップ 3（深層ボーリング調査：MIZ-1 号孔）における主要な調査対象として設定した（Nakano et al., 2003）。MIZ-1 号孔における掘削深度 640 m までの調査の結果、3.3.2 1) に述べたように、ステップ 2 の地質構造モデルの精度は概ね妥当であることが示されている。

一方、ステップ 1 の水理地質構造に関する調査研究においては、既存の文献情報を基に、断層などの不連続構造の分布や物性の違いによる地下水流動への感度を評価することを主目的に水理地質構造のモデル化と地下水流動解析を実施した。水理地質構造のモデル化のためのデータの解釈やデータセットの作成は、統合化データフローに沿って、上記の地質構造区分を基に作成している。

地下水流動解析の結果、研究所用地の主流動方向は北東から南西で、ローカルスケールでの地下水流動解析と一致し（3.2.2 2）参照）、とくに北北西系の断層と北東系の断層の透水性が研究所用地周辺の全水頭分布に与える影響が大きいことが示された（図 3.3.2-15 参照）。このことから、ステップ 2 以降においては、これらの断層の水理特性を評価することが重要と判断し、ステップ 3 の深層ボーリング調査計画へと反映している。

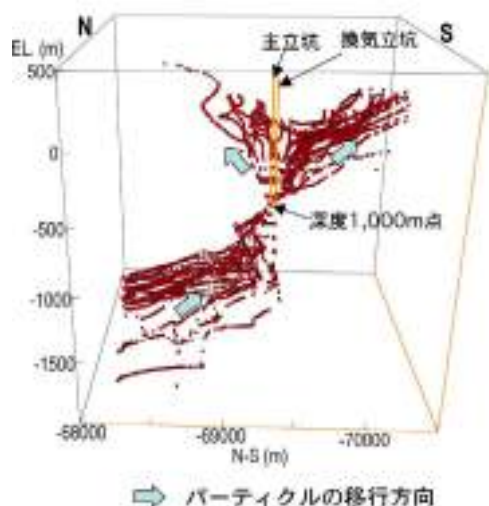


図 3.3.2-48 ステップ 1 での地下水流動解析の例
ーパーティクルトラッキングー

なお、ステップ 1 では断層の地下水流動への感度などを把握することのほかに、統合化データフ

ローに沿って、深部地質環境特性の評価に該当する地下水の移行経路や移行経路長などの評価も実施している（図 3.3.2-48）。ただし、これらの結果は文献情報を基にした予察的なものであり、ステップ 2 以降の調査研究によりモデルの確からしさが向上し、その結果も大きく変化してくるものと考えている。

ステップ 2 までの地質環境データに基づき構築した岩盤力学概念モデルと地球化学モデルも、地質構造モデルや水理地質構造モデルと同様に統合化データフローにそってデータを解釈しモデル化を進めている。ステップ 2 までのところ、反映先の入力情報として定義した全ての項目が整備されている状況にはない。また、その確からしさの評価もステップ 3 の深層ボーリング調査におけるモデルの確認や評価を踏まえて行われていく。このため、この 2 つの分野についてはステップ 3 で集中的にデータ取得からモデルの確認と評価を行い、最終的に第 1 段階における反映先への入力データセットを整備していく。

③ まとめ

繰り返しアプローチや統合化データフローに沿って第 1 段階の調査研究を進める中で、ステップ 1 および 2 での地質環境の理解の状況、今後の課題を取りまとめて以下に示す。

- ・ 統合化データフローに基づく反映先への入力情報は、地質構造分野で整備されつつある。
- ・ 岩盤力学、水理地質、地球化学の 3 分野における反映先への入力情報は、ステップ 3 以降の調査研究で重点的に進めなければならない。
- ・ 断層などの不連続構造について、リニアメントや反射法などの空間分布を類推することのできる間接的な情報と、その存在を確認できる地表踏査やボーリング調査結果などの直接的な情報を組み合わせ、これらの情報の確かささらしさの分類と評価を重ねつつモデルの信頼性を向上させていく進め方は効果的と考えられる。
- ・ ステップ 3 以降は、とくに各分野のデータの解釈やモデルおよび解析結果を、それぞれの分野とは別の独立した分野の知見により吟味して、確からしさを向上させていくことが必要である。
- ・ 研究所用地における第 1 段階の調査の進め方（図 3.3.1-6 参照）は、ステップ 1 で地質構造に関する理解が早期に進み、モデル化や次の段階の計画立案が容易になったことと、ステップ

2 でおよび塩分濃度の高い地下水の存在が堆積岩中で確認された事実などから、これまでのところ概ね適切であったと考えられる。

今後は、繰り返しアプローチと統合化データフローに基づき、ステップ 4 までの調査研究の成果を段階的に評価しつつ、緻密で現実的なモデル化を進め反映先の入力情報を整備する。一方で、地層処分にとって保守的な考え方を堅持しつつ透明性の担保された判断がなされるように、広域地下水流動研究で検討を進めている不確実性の定量的な評価方法も取り入れ、地表からの地質環境調査技術として整備していく。

参考文献

- Kumazaki, N., Ikeda, K., Goto, J., Mukai, K., Iwatsuki, T. and Furue, R. (2003) : Synthesis of the Shallow Borehole Investigations at the MIU Construction Site, JNC Tech. Rep., JNC TN7400 2003-005.
- 熊崎直樹, 池田幸喜, 後藤淳一, 向井 圭, 岩月輝希, 古江良治 (2004) : 超深地層研究所計画における地表からの地質環境調査- 繰り返しアプローチに基づく調査の事例, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集, p. 807.
- Nakano, K., Amano, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Saegusa, H., Hama, K., Kumazaki, N., Iwatsuki, T., Yabuuchi, S. and Sato, T. (2003) : Working Program for MIZ-1 Borehole Investigations, JNC Tech. Rep., JNC TN7400 2002-008.
- 太田久仁雄, 佐藤稔紀, 小出 馨, 坂巻昌工 (2004) : 超深地層研究所計画 - 地層科学研究の現状 -, 第 7 回 NUCEF セミナー講演報文集, 日本原子力研究所研究報告書. (印刷中)
- 大澤英昭, 中野勝志, 太田久仁雄 (2001) : 超深地層研究所計画における地表からの調査研究成果の統合化, 日本原子力学会 2001 年秋の大会予稿集, p. 918.

3.3.3 第2段階の調査研究

超深地層研究所計画における第2段階については、平成15年7月に研究坑道掘削工事の一環として立坑坑口上部工に着手し、研究坑道等の設置作業を開始したところである。本項では、第2段階前半の調査研究計画および、施設計画の平成15年度の進捗状況について述べる。

1) 調査研究計画（第2段階前半の計画）

第1段階における平成15年度までの調査研究成果に基づき、第2段階における中間ステージまでの主立坑、換気立坑および同深度における水平坑道を掘削しつつ行う調査研究計画を検討した。図3.3.3-1に第2段階前半までの調査レイアウトを示す。また、それぞれの調査内容を表3.3.3-1にまとめる。なお、これらの調査研究計画は、調査の進展に伴い適宜修正を加えるものである。

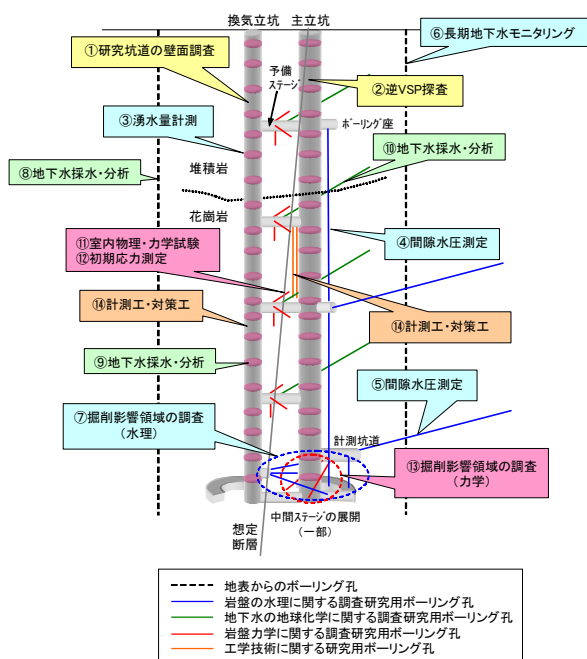


図3.3.3-1 研究坑道における調査レイアウト

（图中番号は、表3.3.3-1中の番号に対応）

i) 地質・地質構造に関する調査研究

第1段階で構築したサイトスケールの地質構造モデルの妥当性を確認し、モデルを適宜更新するとともに、ブロックスケールの地質構造モデルを構築するために必要な情報を取得することを目的として、研究坑道の壁面調査および逆VSP探査を実施する。

・壁面調査（図3.3.3-1、表3.3.3-1中①）

壁面調査は、研究坑道で遭遇する被覆堆積岩、基盤花崗岩、および主要な断層について、地質学的性状などを把握するために実施する。調査は、調査時間の制約などに起因するデータの欠落を防止し、データの精度の向上を図るために、複数の手法により実施する。具体的には、マッピング・地質記載、壁面のカラー撮影および赤外線サーモグラフィー撮影、レーザー計測からなる壁面撮影・計測を実施する。さらに、鉱物学的・地球化学的特性を把握するために岩石試料の採取・分析を行う。

・逆VSP探査（図3.3.3-1、表3.3.3-1中②）

逆VSP探査は、研究坑道掘削のための発破の振動を震源として利用するものであり、研究坑道周辺の地質・地質構造の分布と連続性を推定するために実施する。また、坑道掘削時における切羽前方の地質・地質構造の予測手法としての適用性を評価することも目的とする。

ii) 岩盤の水理に関する調査研究

第1段階で構築したサイトスケールの水理地質構造モデルの妥当性を確認し、モデルを適宜更新するとともに、ブロックスケールの水理地質構造モデルの構築を行い、これらのモデルに基づく地下水流動解析を行うために必要な情報を取得することを目的として、湧水量計測、間隙水圧測定、長期地下水モニタリング、および掘削影響領域の調査を実施する。

・湧水量計測（図3.3.3-1、表3.3.3-1中③）

立坑に設置する約25m毎の集水リングに流量計を設置し、立坑への湧水量の深度分布と経時変化を計測する。

・間隙水圧測定（図3.3.3-1、表3.3.3-1中④⑤）

間隙水圧は、予備ステージ（深度100m、300m）におけるボーリング座からの鉛直ボーリング孔（掘削長200m）と予備ステージ（深度300m）および計測坑道（深度470m）からの水平ボーリング孔（掘削長200m）において測定する。

主立坑近傍での鉛直ボーリング孔においては、第1段階で構築した水理地質構造モデルや地下水流動解析結果の妥当性を確認するとともに、モデルの更新を行うために、コンクリート覆工や集水

表 3.3.3-1 第2段階前半での調査内容

		目的	調査項目	実施内容
地質・地質構造	①	・ サイトスケールの地質構造モデルの妥当性確認・更新 ・ ブロックスケールの地質構造モデルの構築	研究坑道の壁面調査	・ マッピング・地質記載 ・ 壁面撮影・計測 （壁面のカラー撮影、赤外線サーモグラフィ撮影、レーザー計測） ・ 試料の採取・分析
	②	・ サイトスケールの地質構造モデルの妥当性確認・更新 ・ 立坑掘削時における切羽前方の地質・地質構造の予測手法の整備	逆VSP探査	・ 立坑の発破の振動を震源とした逆VSP調査
水理	③	・ サイトスケールの水理地質構造モデルの妥当性確認・更新	集水リングからの湧水量計測	・ 約25m毎の集水リングからの湧水量計測
	④	・ サイトスケールの水理地質構造モデルの妥当性確認・更新 ・ 坑道建設に伴う坑道周辺岩盤の水理特性（スキニング効果）の評価 ・ ブロックスケールの水理地質構造モデルの構築 ・ 切羽前方の地質・地質構造／湧水箇所・湧水量の予測	先行鉛直ボーリング孔を用いた 間隙水圧測定	・ 100m、300m予備ステージにおけるボーリング座からの 鉛直ボーリング孔掘削（掘削長：200m） ・ BTV、キャリバー検層、孔曲り検層、流体検層 ・ 間隙水圧観測装置の設置 ・ 間隙水圧モニタリング
	⑤	・ サイトスケールの水理地質構造モデルの妥当性確認・更新 ・ ブロックスケールの地下水流動解析における境界条件の把握	水平ボーリング孔を用いた間隙水圧測定	・ 300m予備ステージおよび470m計測坑道からの水平ボーリング孔の 掘削（掘削長：200m） ・ BTV、キャリバー検層、孔曲り検層 ・ 間隙水圧観測装置の設置 ・ 間隙水圧モニタリング
	⑥	・ サイトスケールの水理地質構造モデルの妥当性確認・更新 ・ 研究坑道掘削が周辺環境に与える影響評価	長期地下水モニタリング	・ 表層水理観測 ・ 地下水位モニタリング ・ 間隙水圧モニタリング
	⑦	・ 立坑掘削に伴う水理学的掘削影響領域の形成範囲の把握	掘削影響領域の調査	・ 換気立坑の480m付近から主立坑に向けた水平ボーリング孔の掘削 ・ 主立坑掘削前後での水理試験、間隙水圧計測 ・ 470m計測坑道から500m中間ステージに向けた鉛直孔の掘削 ・ 中間ステージ掘削前後での水理試験、間隙水圧計測
地球化学	⑧	・ サイトスケールの地球化学モデルの妥当性確認・更新 ・ 地下水のpH、酸化還元状態とその形成に関わる諸プロセスの把握 ・ 研究坑道掘削が周辺環境に与える影響評価 ・ 覆工コンクリートやグラウト等による地下水水質に対する影響評価 ・ 地下水中のコロイド／有機物、微生物が核種移行に与える影響評価	地表からのボーリング孔での 地下水採水・分析	・ 地表からのボーリング孔を用いた地下水の採水・分析 ・ 地下水中の物理化学パラメータ値と溶存化学成分濃度の把握
	⑨		集水リングからの地下水採水・分析	・ 約25m毎の集水リングからの湧水の採水・分析
	⑩		水平ボーリング孔での地下水採水・ 分析、コアの採取・分析	・ 各予備ステージからの水平ボーリング孔の掘削（掘削長：100m） ・ BTV、キャリバー検層、孔曲り検層 ・ 地下水採水装置設置 ・ 地下水採水・分析
岩盤力学	⑪	・ サイトスケールの岩盤力学モデルの妥当性確認 ・ ブロックスケールの岩盤力学モデルの構築 ・ 空洞安定性解析	室内物理・力学試験	・ 深度100m、200m、300mの各予備ステージから掘削するボーリング孔 （掘削長：約20m）のコアを利用した物理試験および力学試験
	⑫	・ 第1段階での初期応力状態の予測結果の妥当性確認 ・ ブロックスケールの岩盤力学モデルの構築 ・ 空洞安定性解析	初期応力測定	・ 深度100m、200m、300mの各予備ステージから掘削するボーリング孔 （掘削長：約20m）およびそのコアを利用した初期応力測定
	⑬	・ 立坑掘削に伴う掘削影響領域の物性と分布の評価	掘削影響領域の調査	・ 主立坑掘削中の振動計測およびAE計測 ・ 主立坑掘削後の弾性波屈折法探査 ・ 研究坑道連接部の底盤もしくは側壁における亀裂観察など ・ 岩盤変位計測、ひずみ計測、覆工応力測定など
工種技術	⑭	・ 第1段階で実施した設計の妥当性確認 ・ 突発湧水対策などの対策工	計測工・対策工	・ A計測（内空変位測定、天盤沈下測定、切羽観察） ・ B計測（岩盤変位、覆工応力、鋼製支保工ひずみ・RB軸力計測など） ・ C計測（地質観察・撮影、光ファイバー変位計測、湧水量測定など） ・ 環境計測（温湿度、気圧、風速、酸素・二酸化炭素濃度など） ・ 突発湧水対策（前方予測、グラウト工、グラウト効果の調査など）
	⑮	・ 研究坑道掘削の品質確保	施工情報のデータベース化	・ 施工で取得される情報のデータベース化
	⑯	・ 第1段階で実施した設計結果の妥当性確認、詳細化および高度化 ・ 研究坑道の施工 ・ 設計手法および情報化施工技術の高度化	解析・検討	・ 空洞安定性解析 ・ 通気網解析 ・ 耐震解析
	⑰	・ 研究坑道掘削が周辺環境に与える影響評価	モニタリング調査	・ 排水処理水の水量・水質の測定 ・ 河川の流量測定 ・ 井戸の地下水位測定 ・ 騒音・振動測定
	⑱	・ 立坑掘削を対象とした空洞安定性、支保設計および耐震設計などの 基準・指針の策定	設計基準・指針策定	・ 設計、計測工との比較、詳細な設計の実施、以深の設計への反映、 を繰り返し実施

マットなどの人工構造物を含むスキニング効果が湧水量に与える影響を評価することを主な目的とした間隙水圧測定を行う。なお、主立坑掘削に可能な限り先行して鉛直ボーリングを掘削することにより、主立坑掘削前後の間隙水圧の変化を測定する。

また、この鉛直ボーリング孔による調査は、切羽前方の地質・地質構造や湧水箇所、湧水量を予測することも目的とする。

水平ボーリング孔においては、立坑掘削に伴う間隙水圧の変化を測定し、立坑からの距離と間隙

水圧の変化量の関係などを評価するための間隙水圧測定を行う。

・**地下水モニタリング**（図 3.3.3-1，表 3.3.3-1 中⑥）

研究坑道掘削に伴う間隙水圧の変化を評価することを目的に，地表からの既存ボーリング孔（AN-1, 3 号孔, MIU-1～4 号孔, MSB-1, 3 号孔, MIZ-1 号孔）を用いた間隙水圧や地下水位の長期モニタリングおよび表層水理観測を第 1 段階から継続して実施する。

・**掘削影響領域の調査**（図 3.3.3-1，表 3.3.3-1 中⑦）

岩盤の水理に関する掘削影響領域の調査は，立坑掘削に伴う水理学的掘削影響領域の形成範囲を把握するために実施する。調査は，まず換気立坑の深度 480 m 付近に設置するボーリング座から主立坑を囲むように 3 本の水平ボーリングを主立坑掘削が到達する前に掘削し，水理試験および間隙水圧計測を実施する。さらに，主立坑掘削が水平ボーリング設置深度を通過後に再度水理試験および間隙水圧計測を実施し，主立坑掘削前後の透水性の変化を評価する。また，研究坑道の軸方向の違い（立坑と水平坑道の違い）による水理学的掘削影響領域の形成範囲の違いを評価するために，中間ステージ周辺においても研究坑道掘削前後の透水性の変化を評価するための鉛直ボーリング孔を利用した調査を実施する。

iii) **地下水の地球化学に関する調査研究**

第 1 段階で構築したサイトスケールの地球化学モデルの妥当性を確認し，モデルを適宜更新すること，地下水の pH，酸化還元状態とその形成に関わる諸プロセスを把握すること，研究坑道掘削が周辺環境に与える影響を評価すること，地下水中のコロイド／有機物，微生物が物質移行に与える影響の予察的評価を行うことを目的として，地下水採水・分析，およびコアの採取・分析を行う。

・**地表からのボーリング孔での地下水採水・分析**（図 3.3.3-1，表 3.3.3-1 中⑧）

地表からの既存ボーリング孔（MSB-2, 4 号孔）を用いた地下水の採水・分析を第 1 段階から継続して実施し，地下水中の物理化学パラメータ値と溶存化学成分濃度に関するデータを取得する。

・**集水リングからの地下水採水・分析**（図 3.3.3-1，表 3.3.3-1 中⑨）

立坑に設置する集水リングからの湧水を一定期間ごとに採水・分析し，湧水水質の深度分布と経時変化を測定する。

・**水平ボーリング孔での地下水採水・分析，コアの採取・分析**（図 3.3.3-1，表 3.3.3-1 中⑩）

各予備ステージの深度レベルにおける平面的な水質分布や研究坑道掘削による脱ガスや酸化領域の広がりを把握するために，各予備ステージから水平ボーリング（掘削長 100 m）を掘削し，坑道からの一定距離毎に 5～10 箇所程度の区間から原位置の圧力を保持した状態の地下水を採水・分析する。さらに，地下水流動経路の連続性を確認するとともに，研究坑道掘削の三次元的な影響を評価するために，ボーリング孔に設置した多区間水質連続モニタリング装置を用いて，間隙水圧と水質のモニタリングを行う。

また，地球化学的な掘削影響領域を検討するための基礎データを取得するために，ボーリング孔のコアを用いて，研究坑道からの一定距離毎に方解石の溶脱や鉄水酸化物の沈殿などに着目した化学分析を行う。

予備ステージからのボーリング孔に設置した多区間水質連続モニタリング装置およびコロイド／有機物濃縮装置により，各地下水採水区間の様々な pH，酸化還元環境において，各種金属元素（鉄やウラン）と地下水中的コロイド／有機物との錯体形成係数を求める。また，原位置の化学環境条件下で分子サイズ毎にコロイド／有機物を分別し，コロイド／有機物の種類，錯体形成にかかわる重要因子などを明らかにするとともに，地下水中的コロイド／有機物と岩石表面間の物理化学的な相互反応にかかわる基礎データを取得する。

これらの調査は，ボーリング孔周辺に原位置ラボを設けて行う。

iv) **岩盤力学に関する調査研究**

第 1 段階で構築したサイトスケールの岩盤力学モデルの妥当性を確認し，モデルを適宜更新するとともに，ブロックスケールの岩盤力学モデルを構築するために必要な情報を取得することを目的として，室内物理・力学試験，初期応力測定，および掘削影響領域の調査を実施する。

・室内物理・力学試験（図 3.3.3-1，表 3.3.3-1 中⑪）

岩石の物理特性および力学特性を把握することを目的として，各予備ステージから掘削するボーリング孔（掘削長約 20 m）のコアを利用した物理試験および力学試験を実施する。

・初期応力測定（図 3.3.3-1，表 3.3.3-1 中⑫）

深度毎の三次元初期応力状態を把握することを目的として，各予備ステージから掘削するボーリング孔（掘削長約 20 m）およびそのコアを利用した初期応力測定を実施する。

・掘削影響領域の調査（図 3.3.3-1，表 3.3.3-1 中⑬）

立坑掘削による直接的な損傷領域および応力再配分領域の物性と分布を把握することを目的として，掘削影響領域の調査を行う。損傷の発生については，掘削中の振動計測および AE 計測，掘削後の弾性波屈折法探査，研究坑道接続部の底盤もしくは側壁における亀裂観察などを実施する。また，応力再配分については，岩盤変位計測およびひずみ計測，覆工応力測定などを実施する。

v) 工学技術に関する研究

工学技術に関する研究として，計測工・対策工，施工情報のデータベース化，解析・検討，モニタリング調査，および設計基準・指針の策定に寄与するための情報のとりまとめを実施する。

・計測工・対策工（図 3.3.3-1，表 3.3.3-1 中⑭）

第 1 段階で実施した設計の妥当性確認を行うために，A 計測（内空変位測定，天盤沈下測定，壁面観察），B 計測（岩盤変位，覆工応力，鋼製支保工ひずみ・RB 軸力計測など），C 計測（壁面観察・撮影，光ファイバー変位計測，湧水量測定など），および環境計測（温湿度，気圧，風速，酸素・二酸化炭素濃度などの計測）を実施する。また，突発湧水対策などの対策工を行う。突発湧水対策工は，突発湧水が想定される断層を対象として必要に応じて実施する。

・施工情報のデータベース化（表 3.3.3-1 中⑮）

研究坑道掘削の品質確保の観点から，施工に関わる計測工データや坑内管理データ，掘削サイクルタイムに関するデータ，掘削の仕上がりに関する

データ，掘削機械・設備に関わる品質データを蓄積する。

・解析・検討（表 3.3.3-1 中⑯）

研究坑道の施工に反映すること，および設計手法や情報化施工技術を高度化することを目的として，空洞安定性解析，通気網解析，耐震解析などの各種解析を行う。

・モニタリング調査（表 3.3.3-1 中⑰）

研究坑道掘削が周辺環境に与える影響を評価するために，排水処理水の水量・水質の測定や河川の流量測定，周辺井戸での水位測定，騒音・振動測定を実施する。

・設計基準・指針策定に寄与するための情報の取りまとめ（表 3.3.3-1 中⑱）

「設計，計測工との比較→詳細な設計の実施→以深の設計への反映」を繰り返し実施することにより，立坑掘削を対象とした空洞安定性，支保設計および耐震設計などの高度化を図るとともに，その基準・指針の策定に寄与するための情報の取りまとめを行う。

2) 施設計画の進捗状況

研究坑道掘削工事は、平成 14 年度までに実施設計を終了し、立坑深度 300 m までの第 1 期工事の契約：（平成 15 年 3 月～平成 18 年 3 月）を締結した。平成 15 年 7 月に立坑坑口上部工に着手し、平成 15 年度末までに主立坑と換気立坑ともに平成 15 年度に深度約 10 m の掘削と櫓設備の基礎を兼ねたコンクリート打設を終了した。平成 16 年度は立坑坑口下部工を開始し、深度約 50 m まで掘削を行う。その後、櫓や巻上機、スcaffordなどの掘削設備や、コンクリートプラントや受電設備などの付帯設備を設置する。設備設置後、これらを用いた立坑掘削を開始する。平成 17 年度末には深度 300 m に到達する計画である。

a) 坑口上部工

立坑坑口基礎は、上載荷重である櫓設備の安定性を図ることを目的に岩着としているが、立坑の掘削位置では堆積岩の上に 10 m 程度の盛り土があるため、親杭横矢板工法（掘削部分の周辺に H 型钢を打設し、鋼間に矢板を設置することで土留めする工法）で施工することとした。立坑坑口上部工の状況を図 3.3.3-2、3.3.3-3 に示す。



a) 土留め工（親杭打設）の状況



b) 掘削の状況

図 3.3.3-2 立坑坑口上部工の状況（施工中）



図 3.3.3-3 立坑坑口上部工の状況（完成）

b) 坑口下部工

平成 16 年 4 月より坑口下部工を開始する。立坑中にスcaffordを設置し、以深の掘削時に発破待避が可能な距離をとれるように、深度約 10 m から 50 m 付近まで掘削を進める。掘削工法はショートステップ工法とし、1 回の掘進長は 1 m を計画している。立坑壁面の観察時間を含めて、2 日に 1 サイクルの工程を予定している。

c) 地上設備の設置

3.3.2 2) に示したように、立坑の掘削設備や付帯する設備として、櫓や巻上機、スcafford、給排気設備、給排水設備、コンクリートプラント、受電配電設備などの地上設備については、今後、設備が準備され、平成 16 年度には立坑坑口下部工が終了したのちに順次設置される予定である。

d) 本体内工

立坑の坑口下部工が終了し、掘削のための地上設備が設置された後の平成 16 年度末から、これらの設備を使用した本体内工の掘削を開始する。3.3.2 2) に示したように、立坑本体部分の掘削は、1.3 m の発破を 2 回繰り返し、2.6 m の覆工コンクリート打設を行う作業を 1 サイクルとする変則的なショートステップ工法を適用する。主立坑と換気立坑の掘削をほぼ並行して進め、平成 17 年度末には立坑深度 300 m に到達する予定である。

平成 21 年度末までの研究坑道掘削工事の工程を図 3.3.3-4 に示す。



図 3.3.3-4 研究坑道掘削工事の工程（～H21 末）

3.4 幌延深地層研究計画

3.4.1 役割と研究の進め方

① 背景と目標

幌延深地層研究計画は、「原子力長期計画」で示された深地層の研究施設計画の一つとして、堆積岩を対象に地層処分技術に関する総合的な研究を行うものである。この深地層の研究施設は、地層処分技術の信頼性の確認や安全評価手法の確立に向けた研究開発を進めていく上での主要な施設であるとともに、国民の研究開発に対する理解を得ていく場としての意義を有している。本計画は、調査研究の開始から終了まで20年程度の計画とし、地上からの調査研究段階（第1段階）、坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階）、地下施設での調査研究段階（第3段階）と段階的に進めていく。平成13年3月より第1段階の調査研究を開始し、平成14年7月には、幌延町内において地表からの調査を実施していく主な領域として、研究所設置地区を選定した。また、平成15年3月には研究所を設置する用地を取得し、平成15年7月に用地の造成に着手した。平成17年度から立坑の掘削を開始し、平成22年度の地下研究施設の完成を目指している。

幌延深地層研究計画では、「第2次取りまとめ」以降の研究開発課題として設定された項目について、大きく、地層科学研究と地層処分研究開発に区分して研究開発を実施する。地層科学研究としては、地質環境調査技術開発、地質環境モニタリング技術開発、地質環境の長期安定性に関する研究、深地層における工学的技術の基礎の開発の4課題を、地層処分研究開発としては、処分技術の信頼性向上、安全評価手法の高度化の2課題を設定している。

② 実施項目と進め方

i) 地質環境の特徴を踏まえた課題とアプローチ

幌延町は天塩堆積盆の東端部に位置し、幌延町の東縁部には蝦夷層群を含む中生界の地層と中生代末に主に形成されたと推定される神居古潭帯に属する変成岩類、堆積性メランジェ、構造的メランジェ（蛇紋岩等）が南北方向に分布する。一方、幌延町の西部は、先新第三系の地層を基盤岩とし、それを中期中新世以降に堆積した新第三系の地層（宗谷夾炭層、増幌層、稚内層、声間層）が不整

合で覆う（保柳ほか、1986）。また、ほぼ南北方向の褶曲構造や断層構造が発達し、活断層、とう曲、傾動等の第四紀に生じた活構造も認められる。また、研究対象とする新第三系堆積岩は透水性が比較的低いことや、地下水水質のタイプとしては塩水系地下水と淡水系地下水の両者が存在すること、その地下水には溶存ガスが存在することを確認しており、幌延深地層研究計画では、このような地質環境の特徴を活かして研究を進めている。

本計画の第1段階においては、堆積岩を例に地質環境調査技術を適用し、地表から地下深部までの地質環境を具体的に提示するとともに、これにより地質環境調査技術の適用性を確認することを目的としている（図3.4.1-1）。具体的には、地表から行う調査研究により取得されるデータに基づき地質環境モデル（地質構造モデル、水理地質構造モデル、地下水地球化学モデル、岩盤力学モデル）を構築し、調査の進捗に応じて、逐次これらのモデルの更新を行うこととしている。また、地下施設建設による地質環境の変化の予測解析を行い、これらを第2段階で得られる実測データを用いて確認する。これらにより、一連の調査研究で用いた調査機器、モデル化手法を含めた体系的な地質環境調査技術を確立する。

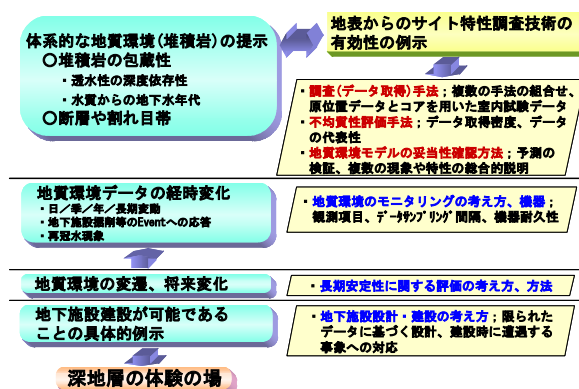


図3.4.1-1 地層科学研究（幌延深地層研究計画）の成果のイメージ

ii) 研究所設置地区の選定と研究所用地

幌延深地層研究計画では、以下の手順で調査研究を進めてきた。

- ① 第1段階調査研究の開始
- ② 研究所設置地区の選定
- ③ 研究所用地の取得
- ④ 研究所設置地区およびその周辺地区における調査研究

研究所設置地区の選定については、地質環境要件（研究の対象となる地層と地下水が存在すること）、安全要件（安全に地下施設を建設でき、研究環境を確保できること）を基本的な要件として、文献等の既存資料の調査、空中物理探査（磁気、電磁、自然放射能探査）、地上物理探査（電磁探査）、地質調査を実施し、さらに社会的な条件などを考慮して、2つの区域（B1 区域および B2 区域：図 3.4.1-2）を選定し、ボーリング調査（2 孔：HDB-1 孔、HDB-2 孔）（図 3.4.1-2）を実施した。

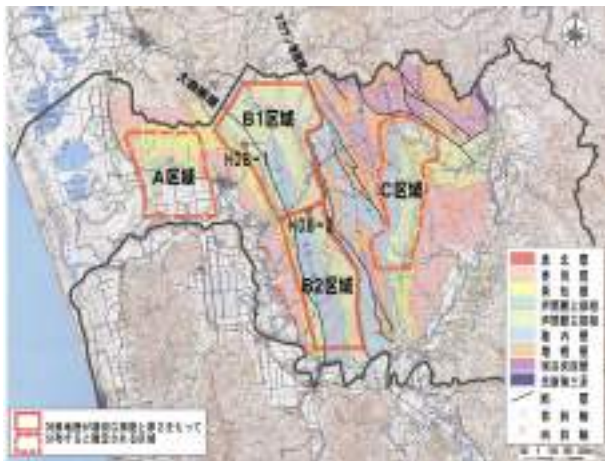


図 3.4.1-2 研究所設置対象区域とボーリング調査位置

ボーリング調査の結果に加えて、地形、アクセス道路、土地利用状況の比較を行い、平成 14 年 7 月に北進地区の約 3km 四方を研究所設置地区として選定した（図 3.4.1-3）（山崎ほか，2002）。



図 3.4.1-3 研究所設置地区

次に、地下施設を含む施設建設を行う研究所設置用地については、用地取得や許認可の観点から、

公共機関の所有する土地で、かつ原野であること、また、地下施設建設のための安全要件などを満たしていることを、平成 13 年度のボーリング調査（HDB-1 孔）データにより確認できること等を考慮し、幌延町市街地北方約 3km の位置に研究所設置用地を選定し、幌延町などから購入取得した（図 3.4.1-4）。



図 3.4.1-4 研究所用地

平成 14 年度までに地下施設/地上施設を建設する位置が決定したことから、平成 15 年度においては、研究所設置地区およびその周辺地区地質環境モデル（地質構造モデル、地下水の水理モデル、地下水の地球化学モデル、岩盤力学モデル）の構築を目的とした地質環境データの取得を中心に実施した。

iii) 調査研究の進捗状況

平成 15 年度は、上述の目的を踏まえて、物理探査、地表地質調査、表層水理調査、ボーリング調査を実施した（図 3.4.1-5）。



図 3.4.1-5 調査研究実施位置

ボーリング調査については、平成14年度までに実施したボーリング調査で得た知見を活かし、調査機器の改良を行うなどの調査手法の改良を行い、調査に活用した（Hama et al., 2003）。

一方、地質環境モニタリング技術の開発に関しては、平成14年度までに掘削したボーリング孔5孔のうち、4孔（HDB-1～HDB-4 孔）に長期モニタリング機器を設置し、水圧の観測を実施した。また、地質環境の長期安定性に関する研究においては、地震観測用の地震計、地殻変動観測用の GPS（Global Positioning System）観測機器、MT 観測機器を設置して観測を継続している。

深地層における工学技術の基礎の開発においては、それまでに得られた地質環境特性に関わる情報を基に、地下施設の基本設計を行った。

地層処分研究開発に関しては、第2段階以降の地層処分研究開発の計画を具体化するために、人工バリアの定置等に関する室内試験、低アルカリ性コンクリート材料に関する室内試験等を実施した。また、今後の研究課題を整理するため、安全評価において重要となる地質環境データや現象の整理ならびに量や精度等の検討を実施した（本報第4、5章参照）。

施設計画については、研究管理棟、コア倉庫・ワークショップ棟に係る基本・実施設計を行うとともに、地下施設建設用地の造成工事に着手した。また、地上施設建設用地の造成工事の実施設計、地下施設建設時に発生するブリ置場基本・実施設計を行った。

環境調査については、地下施設の建設などが周辺の環境に与える影響を未然に防止する観点から、研究用地周辺を対象に行った。

③ 成果の反映先

幌延深地層研究計画では、平成17年頃に第1段階の成果取りまとめを行う予定である。この取りまとめでは、堆積岩/塩水系地下水の地質環境条件下において、幌延に適用した調査技術や調査手法について、その適用結果としての適用性評価およびこれらの技術・手法による把握された具体的な堆積岩の地質環境の提示を行う。また、東濃地科学センターにおける地層科学研究の成果とともに、東海事業所で実施している地層処分研究開発、あるいは国際共同研究の成果と合わせて、実施主体が行う処分事業、国が行う安全規制等に反映する。

④ 今後の予定

地下施設の設計・建設を進めるとともに、地質環境モデルの構築と並行して地質環境データの取得を継続していく。これら研究成果については、平成17年度に予定されている研究成果取りまとめおよび第1段階取りまとめに集約する予定である。

参考文献

- 保柳康一，宮坂省吾，渡辺 寧，木村 学，松井 愈（1986）：衝突帯のタービダイト相形成とテクトニクス—中新世・中央北海道の例—，地団研専報31，pp. 265-284.
- 山崎眞一，中司 昇，浴 信博，守屋俊文，竹内竜史，國丸貴紀，白戸伸明，尾方伸久（2002）：幌延深地層研究計画 平成13年度調査研究結果と研究所設置地区選定，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2002-017.
- Hama, K., Takahashi, K., Ishii, E., Takeuchi, R., Sasaki, M., Kunimaru, T., Eki, N. and Matsui, H.（2003）：Working program for deep borehole investigations - HDB-6, 7, 8 borehole-, JNC Tech. Rep., JNC TN5400 2003-002.

3.4.2 第1段階の調査研究

1) 地質環境調査技術開発

1-1) 地質・地質構造に関する調査研究

① 課題と計画の概要

地質・地質構造に関する調査研究では、水理地質構造モデルや地下水の地球化学モデルの基盤となる地質構造モデルを構築するとともに、地表からの調査・モデル化手法を確立することを目指している。調査は、研究所設置地区の広域的な地質学的位置付けを明確にするため、研究所設置地区を含む幌延町内全域を対象として実施している。

平成14年度までに、研究所設置地区およびその周辺地区に分布する新第三系～第四系を対象とした地表地質調査、地上物理探査やボーリング調査を実施した。地質層序に関しては、岩相の分布や微化石年代などのデータを取得した。その結果、幌延町全域においては、東部（間寒別構造盆地）と西部（天塩平野付近）の地層の同時異相関係（例えば岡・五十嵐，1997）について詳細が不明な部分があるものの、研究所設置地区の範囲においては、稚内層と声問層の岩相境界が生層学上の境界と調和的な関係を示すことが確認でき（JNC，2003），研究所設置地区の稚内層～声問層の層序を確立することができた。一方、地質構造に関しては、地下2,000 m程

度までを対象とした反射法地震探査やVSP探査の結果、研究所設置地区に発達する褶曲構造を概括的に捉えることはできたが、大曲断層の位置や形状を特定するまでには至っていない。

平成15年度は、平成14年度までの調査で十分に把握されていないボーリング孔間の地層の空間的連続性や割れ目の分布状況、また、大曲断層の位置や形状などを理解するために、

- i) 稚内層～勇知層の連続的な岩相変化や、大曲断層推定位置付近の岩相およびガス徴・油徴の状況を確認するための地表地質調査（地表踏査，簡易ボーリング調査）
- ii) 地下の比抵抗分布や密度分布から地質構造を推定するための地上物理探査（AMT法による電磁探査，重力データの解析）
- iii) 地下深部における岩相分布や割れ目の分布を把握するためのボーリング調査（コア観察，物理検層など）
- iv) 研究所設置地区およびボーリング孔周辺における地質構造のモデル化

を実施した。

② これまでの成果

i) 地表地質調査

研究所設置地区およびその周辺地区に分布する新第三系～第四系を対象に地表踏査，簡易ボーリング調査を行った（図3.4.2-1）。

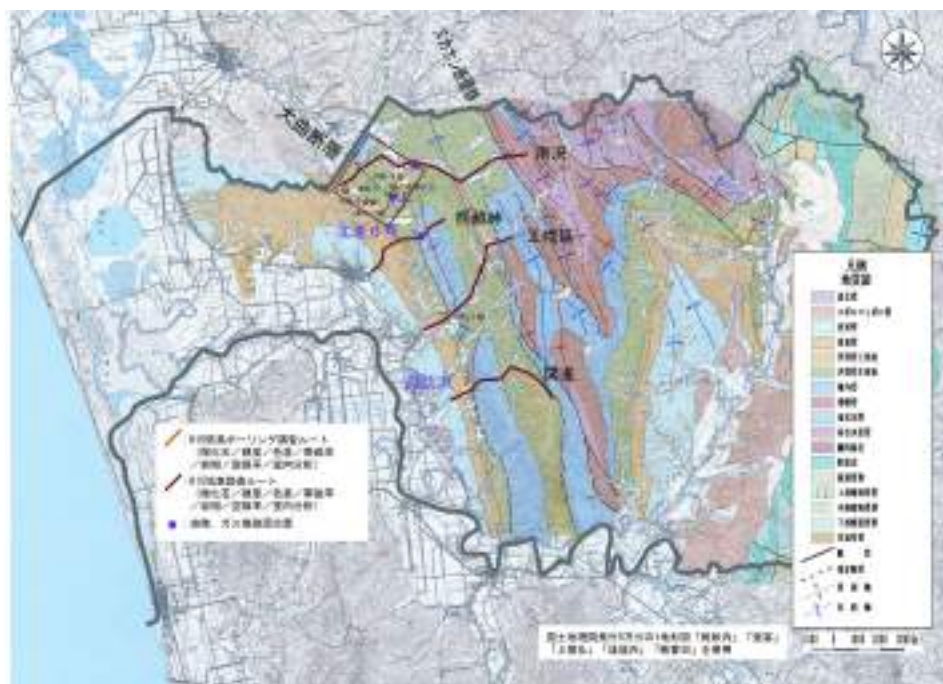


図3.4.2-1 地表地質調査ルート

調査の結果，研究所設置地区北東部（図3. 4. 2-1の南沢ルート付近）で勇知層相当の岩相（粗粒砂岩）を新たに確認し，声問層と勇知層の地層境界付近の岩相変化（硬度変化や凝灰岩の挟在）がボーリング孔で確認した変化と概ね調和的であることを確認することができた（図3. 4. 2-2）。また，研究所設置地区の大曲断層推定位置付近においては，推定位置をまたいで岩相の急激的な変化などは確認できなかったものの，2箇所の簡易ボーリング孔で高濃度メタンガスの湧出（図3. 4. 2-3）や沢沿いで油徴の存在（図3. 4. 2-4）を確認することができ，大曲断層推定位置付近において断層が存在することや，地下深部の地層中で生成されたメタンガスや石油が断層などの割れ目に沿って地表まで移動してきた可能性があることが示唆された。しかしながら，メタンガスについては，生物起源の場合もあるため，今後，起源を特定するための分析を行う予定である。

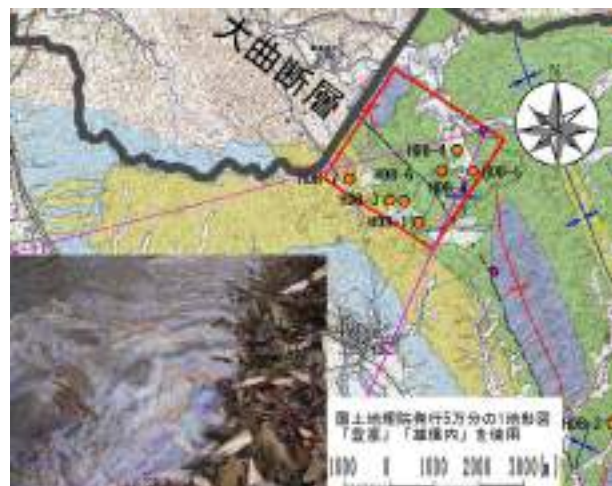


図3. 4. 2-4 南沢で認められる油徴

今後は，本調査により取得された地表部における稚内層～勇知層の岩相などの地質情報を用いて，地表部と地下深部の地層の層準対比を検討する予定である。また，研究所設置地区周辺の地表部において，ガス測定器を用いた濃度測定によりメタンガスの濃度分布や化学分析によりガスや油の起源を明らかにするための調査を行う予定である。

なお，研究所用地内で造成工事の一環で実施した簡易ボーリング調査における貫入試験やコアの色測定・鉱物組成分析・全岩化学組成分析の結果，声問層の地表部に酸化帯／溶解帯（千木良，1995）が存在する事が確認できている（図3. 4. 2-5）。

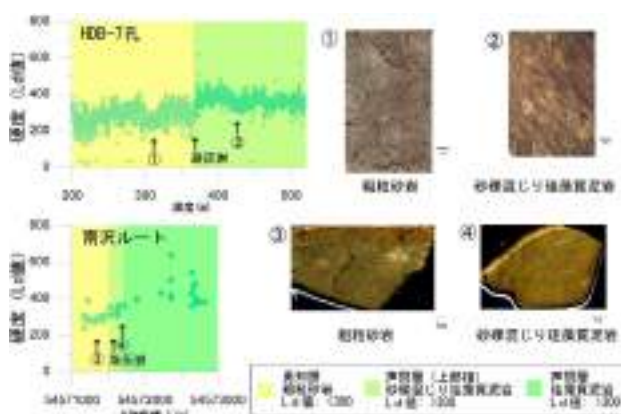


図3. 4. 2-2 声問層と勇知層の地層境界付近における岩相変化

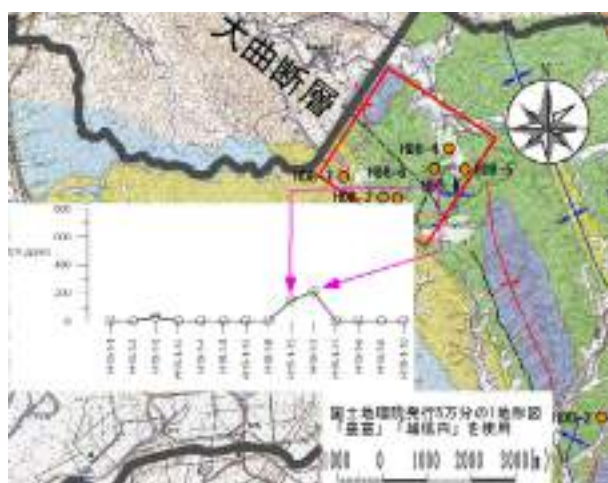


図3. 4. 2-3 北進地区の地表浅所のメタン濃度

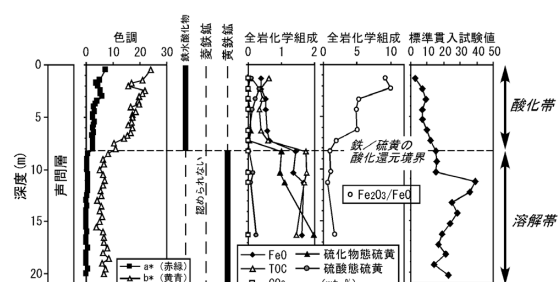


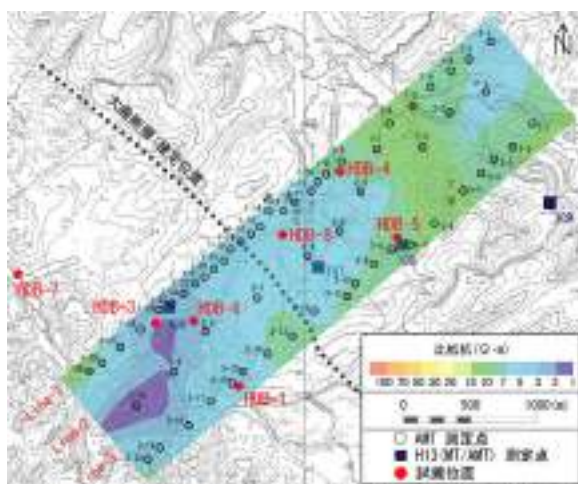
図3. 4. 2-5 声問層地表部の分析・測定結果

ii) 地上物理探査

a) AMT 法による電磁法探査

AMT 法による電磁探査は，地質構造や大曲断層の位置や形状を推定することを目的として，平成 13 年度に実施した電磁法による物理探査(MT, AMT 法)の結果，比抵抗構造の変化が認められた観測点（測点 106 から 109 の間。大曲断層の推定位置）付近において，地表から地下 1,000 m 程度を対象範囲として実施した。

平成 15 年度の調査では、大曲断層などの地質構造を把握するため、調査測線の方向を大曲断層に直交する方向 (N50° E) とし、三次元解析が行えるよう、測線を 3 本並行に配置した。また、高い分解能を得るために、測点の間隔を平成 13 年度の調査より短い間隔 (100~400 m) とした (図 3.4.2-6)。調査手法は、浅部比抵抗構造探査に適しているリモートリファレンス法による AMT 法を用いた。総測点数は 59 点 (リモート点は含まず) である。



国土地理院 1/25,000 地形図 (幌延, 本流) を使用
図 3.4.2-6 二次元解析比抵抗平面図 (標高-100 m)

AMT 法の現場での測定は、各測点で午後 8 時~午前 0 時を含む 5 時間以上の計測を実施した。現場で取得したデータは、現地においてリモートリファレンス処理を施しデータ品質を確認した。なお、データの品質が不十分と判断された測定点については再測定を実施した。

測定データの見掛け比抵抗値は調査地域で、1~100 $\Omega \cdot m$ 前後の値であった。周波数 1~10Hz について S/N の低い部分があるが、データ品質は概ね良好であった。

二次元解析比抵抗断面図に、ボーリング調査で行われた比抵抗検層の結果を重ねたものを図 3.4.2-7 に示す。解析結果は検層結果と整合しており、解析結果は信頼性が高いと考えられる。この解析結果から、本地域の比抵抗構造は、

- ・ 表層では 10~100 $\Omega \cdot m$ であり、深くなるにつれ、比抵抗の値は小さくなる。深部では概ね 2 $\Omega \cdot m$ ある。
- ・ 変化の仕方は地点によって異なり、浅部から 2 $\Omega \cdot m$ の比抵抗値が現れる地点もある。

水質分析の結果と比較すると、この低比抵抗の領域

は地下水の溶存塩分濃度の高い箇所と一致していると考えられる。

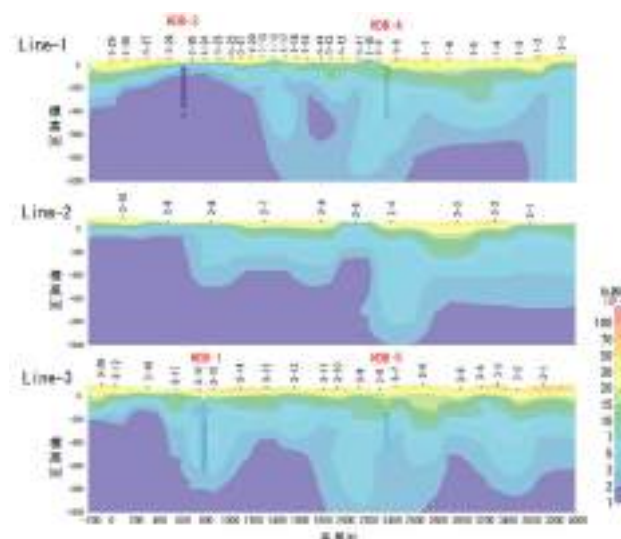


図 3.4.2-7 二次元解析比抵抗断面図

二次元解析比抵抗平面図 (標高-100 m) を図 3.4.2-6 に示す。本地域の比抵抗の平面分布は、北北西-南南東方向に分布し地質構造と同傾向である。しかしながら大曲断層の位置を推定できるような比抵抗の変化は捉えられていない。なお、平成 15 年度末現在、三次元解析を実施中である。

b) 重力データの解析

重力データの解析は、他機関で取得されている既存重力データのコンパイルを行い、大曲断層による重力分布の異常を捉えることを目的としてデータ解析を実施した。また、平成 16 年度に実施予定の稠密重力測定の基礎資料として重力異常の空間変化について検討した。

データ解析は、コンパイル後のデータに対し、フリーエア補正を行い、500 m 間隔にグリッド化したデータを用いてブーゲー異常図を作成した。なお、既存重力測定点は、密な箇所でも約 300 m 間隔である。次に、深部の地質構造による重力変化を取除くために傾向面解析 (25 km ハイカットフィルターを適用) を行い、残差重力異常図 (図 3.4.2-8) を作成した。この結果、大曲断層推定位置の西側に、北北西-南南東の走向をもつ低重力異常帯 (図 3.4.2-8 青矢印) が存在することが明らかとなった。

さらに、これまでに得られている地質構造モデルや、ボーリング調査などから得られている岩石の密度を基にして、二次元重力フォワード・モデリングを実施したところ、観測された重力異常を説明でき

ないことがわかった（図 3. 4. 2-9）。そこで、大曲断層の西側にある褶曲の頂部付近で地層の密度が低下していると仮定して計算を行ったところ、この重力異常を良く説明できた（図 3. 4. 2-10）。

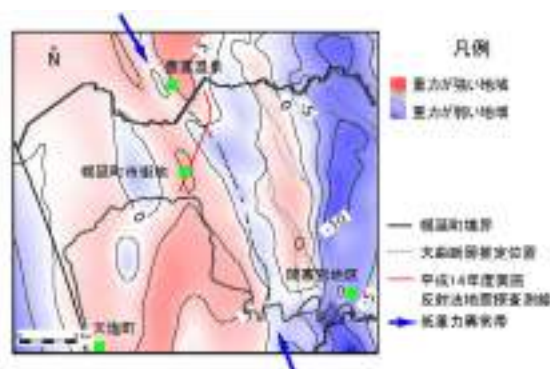


図 3. 4. 2-8 残差重力異常図

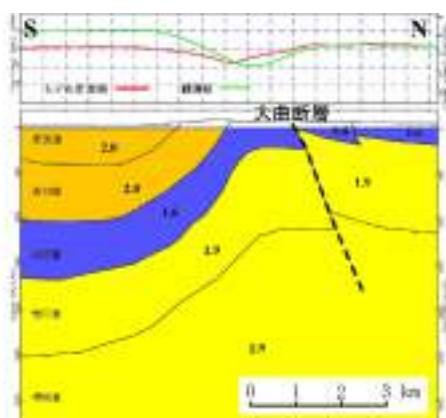


図 3. 4. 2-9 重力フォワード・モデリング結果
(平成 14 年度に実施した反射法地震探査測線(図 3. 4. 2-8 の赤線)の地質モデルで計算した重力異常(赤線)と観測された重力異常(緑線)、図中の数字は密度 (g cm^{-3})

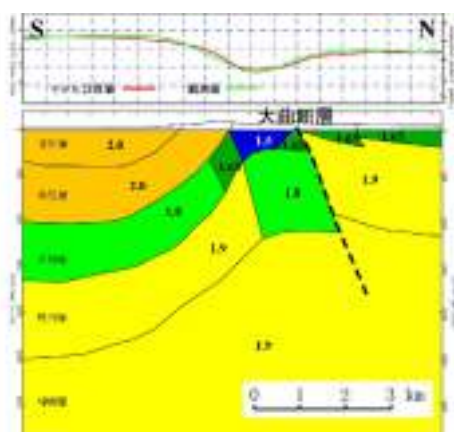


図 3. 4. 2-10 観測された重力異常を説明できる地質モデル例
(断面図位置は図 3. 4. 2-9 と同じ、図中の数字は密度 (g cm^{-3}))

iii) ボーリング調査

平成 15 年度は 3 本のボーリング孔(HDB-6, 7, 8 孔)においてコア記載、物理検層、室内試験を行い、地質学的データや物性データを取得した（図 3. 4. 2-11）。

地質層序に関しては、現在、平成 14 までに得られたコア記載および室内試験の結果と平成 15 年度のコア記載の結果から、稚内層、声間層、勇知層の特徴について以下の記述ならびに表 3. 4. 2-1 のようなまとめを行っている（高橋ほか, 2003; 高橋ほか, 2004）。

稚内層：硬質頁岩を主体とする層厚約 400～1,000 m の海成層で、下位の増幌層を不整合に覆う。続成変質が進んでおり、クリストバライトやトリディマイト（オパール CT）を主体とする。二枚貝や巻貝、ウニなどの化石を多産し、ノジュールからは *Neodenticula kamtschatica* 帯（おおよそ 6.4～3.5 Ma と解釈される）～*Rouxia californica* 帯（おおよそ 7.6～6.4 Ma と解釈される）の珪藻を産出する。

声間層：珪藻質泥岩を主体とする層厚約 500 m（柳田, 1998）の海成層で、下位の稚内層を整合に覆う。*N. kamtschatica* 帯（おおよそ 6.4～3.5 Ma と解釈される）の珪藻や海綿骨針などの生物遺骸からなり、非晶質の珪酸（オパール A）を主体とする。半深海性の生痕化石が発達しており、珪藻化石や生痕化石内には特徴的にフランボイダル状黄鉄鉱が晶出する。

勇知層：細～中粒砂岩層を主体とする層厚約 400 m の海成層で、下位の声間層を整合に覆う。所々に泥岩を挟在し、直径 1 cm 以上の生痕化石や、直径 3 cm 以下のチャート礫、直径数 mm 程度の有機物片が観察される。

表 3. 4. 2-1 稚内層・声間層・勇知層の岩石学的特徴

	稚内層	声間層	勇知層
主な構成	頁岩	頁岩	砂岩
岩石	硬質頁岩 (断層面直下には軟弱層が認められる)	珪藻質泥岩	砂岩
珪藻化石の産出	多い	多い	少ない
平均厚	約 500 m	約 500 m	約 400 m
平均厚	約 100 m	約 500 m	約 400 m
厚さ	約 100 m	約 500 m	約 400 m
主要成分	クリストバライト・トリディマイト	オパール A	石英・長石
特徴的な地質学的特徴	クリストバライト・トリディマイト	オパール A	石英・長石

岩盤中の割れ目に関しては、孔壁観察で認められる割れ目の分類・成因について検討した。用いたデータは、これまでの孔壁観察結果（EMI 検層）およびコア記載結果（ともに平成 15 年度実施分を含む）

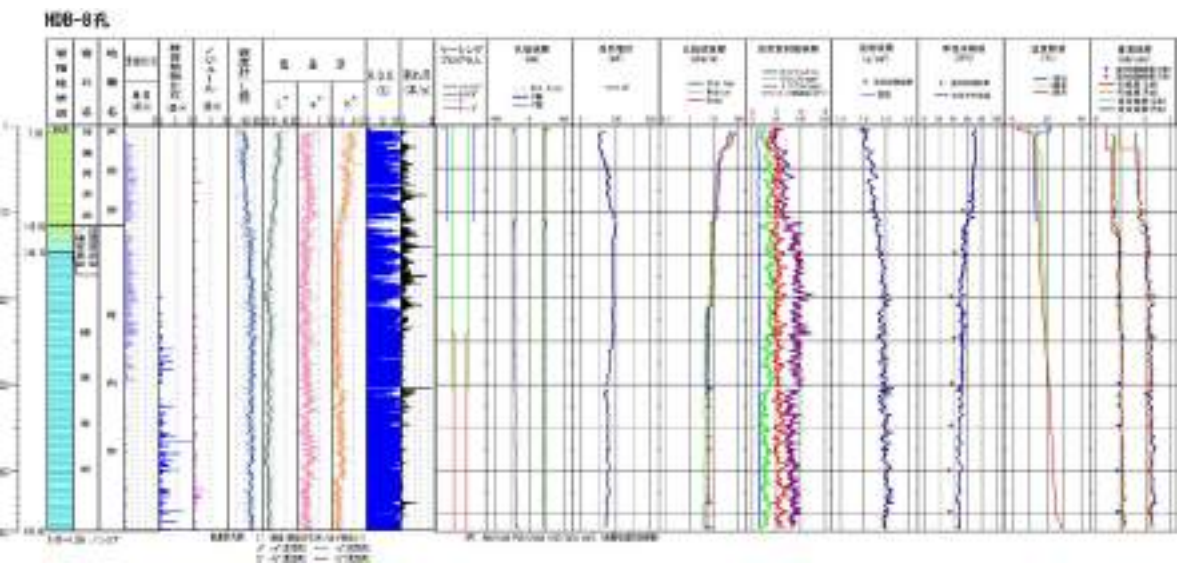
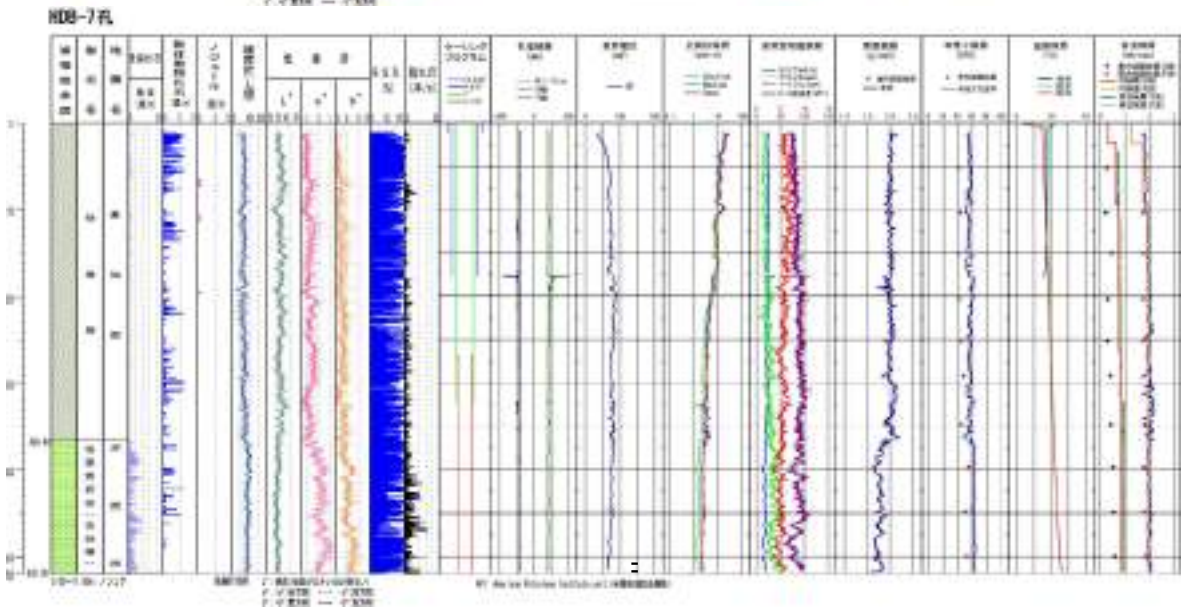
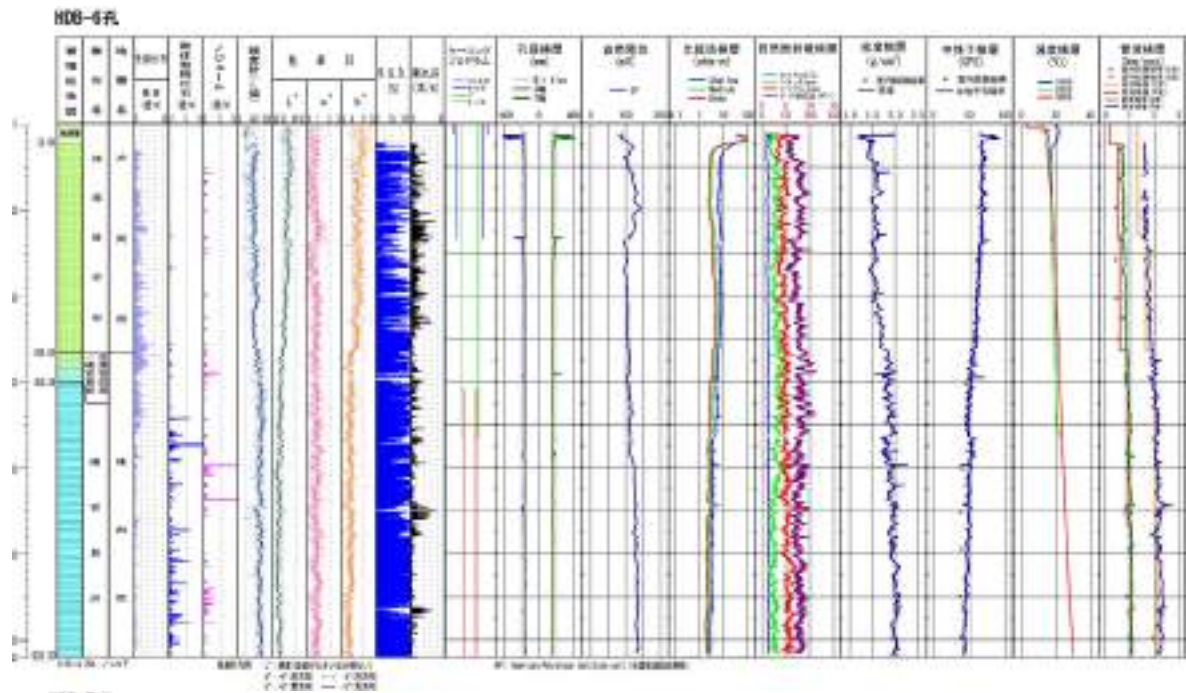


图 3.4.2-11 地質柱状图

平行な割れ目が分布する領域は、割れ目の変位量が極めて少なく（前項目参照）、脆性的な破壊をほとんど受けていない領域と考えられるのに対し、層理面と高角に交わる剪断割れ目を主とする割れ目帯は、割れ目に明瞭な変位の証拠が認められることから（前項目参照）、ある程度の脆性的な破壊を受けているゾーンであると想定される。

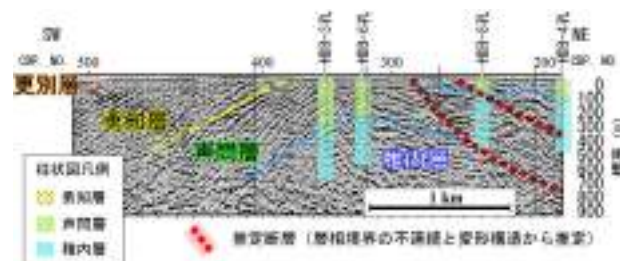


Figure 1 is a geological cross-section of the study area. The vertical axis on the left represents depth in meters (0 to 500). The horizontal axis at the top is labeled '試錐孔' (Test borehole). The diagram shows various geological layers and fracture patterns. A legend on the right explains the symbols and colors used in the diagram. The bottom right corner contains a table summarizing the fracture data.

Fracture Type	Number of Samples
EM1地層で抽出した割れ層	281本
→等速層に平行な割れ目	50本
層傾斜と高角に交わる割れ目	231本

ボーリング孔近傍の地層境界深度や割れ目帯の推定分布、および平成 14 年度実施の反射法地震探査の再解釈結果を用いて既存の地質構造モデル（図 3.4.2-15 上図；サイクル機構（2003）の地質断面とは断面位置が異なる）を更新した（図 3.4.2-15 下図）。大きな更新点としては、大曲断層の推定位置の東側に新たな断層（割れ目帯）を推定したことと、西部の勇知層の基底深度の増加が挙げられる。なお、HDB-8 孔口南東付近（大曲断層推定位置付近）における 2 本の断層（割れ目帯）の推定分布位置は、地質調査によってガス徴を確認した位置（図 3.4.2-3）とほぼ一致することが確認された。

- 3-79 -

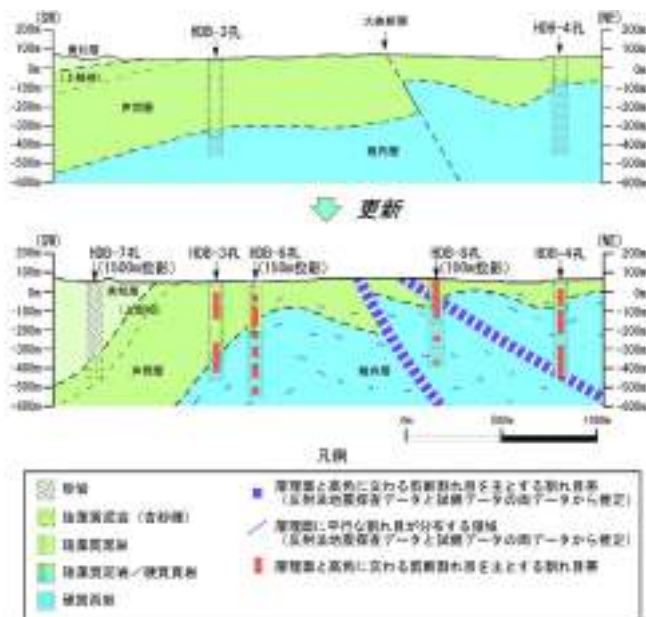


図 3.4.2-15 反射法地震探査データとボーリングデータから比較的明瞭に把握できる割れ目帯の分布推定図

- 1) 地表地質調査により、研究所設置地区周辺の詳細な岩相分布や稚内層～勇知層の連続的な岩相変化、断層位置の指標となりうるガス徴、油徴の存在位置や岩盤表層部における酸化帯／溶解帯の存在が明らかとなった。
- 2) 地上物理探査により、大曲断層の位置や形状に関する詳細なデータを取得に至っていないが、概括的な地質構造を推定することができた。
- 3) ボーリング調査や既存データの整理により、研究所設置地区の地下深部における岩相や割れ目の分布および割れ目の地質学的特性に関するデータや知見が得られた。
- 4) これまで蓄積されたデータや知見の整理により、研究所設置地区における地質構造モデルを更新した。

今後は、引き続き地質構造モデルに必要なデータ（岩相や割れ目帯の分布など）を取得し、より信頼性の高い三次元地質構造モデルの構築を目指していくとともに、各調査手法の有効性について検討していく。平成 16 年度の主な実施項目としては、地表地質調査やボーリング調査、および、平成 15 年度に実施した AMT 法による電磁法探査の三次元解析や高密度反射法地震探査、マルチオフセット VSP や重力探査を予定している。

参考文献

- 石井英一，竹内竜史，安江健一，高橋一晴，操上広志，松井裕哉，福島龍朗(2004a)：幌延深地層研究計画 - 新第三紀堆積岩における岩盤の水理地質学的特性調査 - ，地球惑星科学関連学会合同大会要旨集 (CD-ROM)，G018-P006.
- 石井英一，安江健一，高橋一晴，松井裕哉，福島龍朗(2004b)：幌延深地層研究計画 - 新第三紀堆積岩における割れ目の地質学的特性調査 - ，地球惑星科学関連学会合同大会要旨集 (CD-ROM)，G018-P005.
- JNC(2003)：Working Program for Deep Borehole Investigations - HDB-6,7,8 borehole-, サイクル機構技術資料，JNC TN5400 2003-002.
- 岡 孝雄，五十嵐八枝子(1997)：北海道・上部天塩平野北部の新生界 - 特に勇知層・更別層の堆積相と花粉化石層序について - ，加藤誠教授退官記念論文集，341-365.
- サイクル機構(2003)：幌延深地層研究計画平成 14 年度調査研究成果報告，サイクル機構技術資料，JNC TJ1400 2003-001.
- サイクル機構(2004)：平成 15 年度地層処分技術に関する研究開発報告会，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2003-014.
- 高橋一晴，石井英一，安江健一，福島龍朗(2004)：幌延深地層研究計画 - 新第三紀堆積岩の岩石・鉱物学的特性 (その 2)，地球惑星科学関連学会合同大会要旨集 (CD-ROM)，G018-P004. .
- 高橋一晴，守屋俊文，福島龍朗(2003)：北海道幌延町における研究所設置地区の新第三系層序および有機地球化学的特徴，第 21 回有機地球化学シンポジウムプログラム(2003 年札幌シンポジウム)講演要旨集，o-24.
- 千木良雅弘(1995)：風化と崩壊，近未来社，204p.
- 柳田 誠(1998)：北海道北部地域の地質に関する研究報告書，サイクル機構技術資料 (契約業務報告書；(株)アイ・エヌ・エー)，JNC TJ1400 98-001.

1-2) 岩盤力学に関する調査研究

① 課題と計画の概要

平成 14 年度までに、研究所設置地区の大曲断層（推定）東西領域の岩盤力学の特性に関する概略的な知見を得ることができた。平成 15 年度は、主として地質・地質構造（大曲断層、勇知層）に関する解釈の一助となるデータの取得および地下施設建設地点に最も近いボーリング孔において地下施設設計に必要となる力学特性（岩石物性、原位置岩盤の力学物性および初期応力）を把握する目的で各種調査を実施した。さらにそれらの結果に基づき、平成 14 年度構築した岩盤力学の概念モデルの更新を図った。その結果を以下に示す。

② これまでの成果

i) 室内試験

室内試験としては一般的な物理試験（密度、含水率、飽和度、空隙率（HDB-6 のみ水銀圧入法も実施）、単位体積重量、弾性波速度）、力学試験（一軸圧縮試験、圧裂試験、三軸圧縮試験（HDB-6 のみ）、熱特性（比熱、線膨張率）試験を実施している。なお、平成 14 年度までにスレーキング耐性がかなり高いことがわかっており、平成 15 年度は本試験を実施していない。図 3.4.2-16 に HDB-6, 7, 8 孔の主なコア室内試験の物理試験・力学試験結果を示す。

HDB-6 孔では深度 265 m 程度まで珪藻質泥岩、HDB-8 孔については深度 115.5 m 程度までが珪藻質泥岩であり、それ以深が珪藻質泥岩と硬質頁岩の遷移帯および硬質頁岩である。

大曲断層（推定）の西側に位置する HDB-6 孔の珪藻質泥岩（声問層に対応）は、単位体積重量は $14\sim 16\text{ kN m}^{-3}$ 、空隙率は $60\sim 65\%$ 、弾性波速度は P 波が 1.8 km s^{-1} 、S 波が 0.5 km s^{-1} 程度の物理物性を有している。力学物性は、静弾性係数 (E50) が 2 GPa 以下、一軸圧縮強度は 5MPa 程度、静ポアソン比は $0.1\sim 0.2$ の範囲に分布する。

珪藻質泥岩／硬質頁岩の遷移部分および硬質頁岩（稚内層に対応）は単位体積重量が $16\sim 18\text{ kN m}^{-3}$ 、空隙率が $40\sim 50\%$ 、弾性波速度は P 波が $2.0\sim 2.5\text{ km/sec}$ 、S 波が $0.7\sim 1.0\text{ km/sec}$ 程度まで、深度増加とともに急激に増加する。力学物性についても静弾性係数が $1\sim 4\text{ GPa}$ 、一軸圧縮強度が $5\sim 25\text{ MPa}$ と急激な変化を示す。この変化は、珪藻質泥岩／硬質頁岩の遷移部分で生じており、その下の硬質

頁岩部分と連続している。

HDB-8 孔は、これまでのボーリング調査結果と同様、珪藻質泥岩／硬質頁岩が深度 470 m まで分布しており、それらの物理・力学物性もまた岩種の違いと良く対応する。また、得られた物理・力学物性等の深度変化から見ても、HDB-8 孔位置は、平成 14 年度まで得られていた大曲断層（推定）位置より東側の領域の特徴、すなわち珪藻質泥岩の厚さが薄いことが確認された。

研究所設置地区最北西端に位置する HDB-7 孔は、深度 365 m まで砂岩（勇知層に対応）が分布し、それ以深は珪藻質泥岩（声問層に対応）が分布する。しかし、その変化も遷移的であり、同孔で出現した珪藻質泥岩の部分には砂礫が含まれる。勇知層の砂岩は、単位体積重量が $19\sim 19.5\text{ kN m}^{-3}$ 、空隙率が $40\sim 45\%$ 、吸水率は 30% 程度、弾性波速度は P 波が 1.75 km s^{-1} 、S 波が $0.25\sim 0.5\text{ km s}^{-1}$ の物理物性であり、深度に伴う物性の変化度合いが小さいことが特徴である。力学物性は、静弾性係数が数百 MPa、一軸圧縮強度が数 MPa、静ポアソン比が $0.3\sim 0.5$ の範囲であり、物理物性同様深度依存性が小さく、また、これまで研究所設置地区で見られている珪藻質泥岩、硬質頁岩およびそれらの遷移層と比べ力学的にはかなり弱い岩石である。勇知層の下に分布する珪藻質泥岩（声問層）の物理・力学特性は、静ポアソン比のばらつきが非常に大きい以外は、これまで得られている珪藻質泥岩の物理・力学特性と大きく異ならない。

ii) 原位置試験

研究所設置地区スケールでの応力状態の把握および地下研究施設の設計に必要なデータ取得を目的として、HDB-6 孔において水圧破碎法による初期応力測定および孔内載荷試験を実施した。以下に結果の概要を示す。

a) 水圧破碎法による初期応力測定

6 深度において水圧破碎法による初期応力測定を実施した。試験システムは、平成 14 年度と同様ロッドによる測定システム (TAM 社製) を使用した。本システムを模式的に図 3.4.2-17 に示す。本システムでは、掘削ロッドの先端に型取りパッカーシステムおよび水圧破碎パッカーシステムを装着し、ロッドを通じてパッカーシステムへの注排水を行うとともに圧力・流量測定を孔口で実施する。

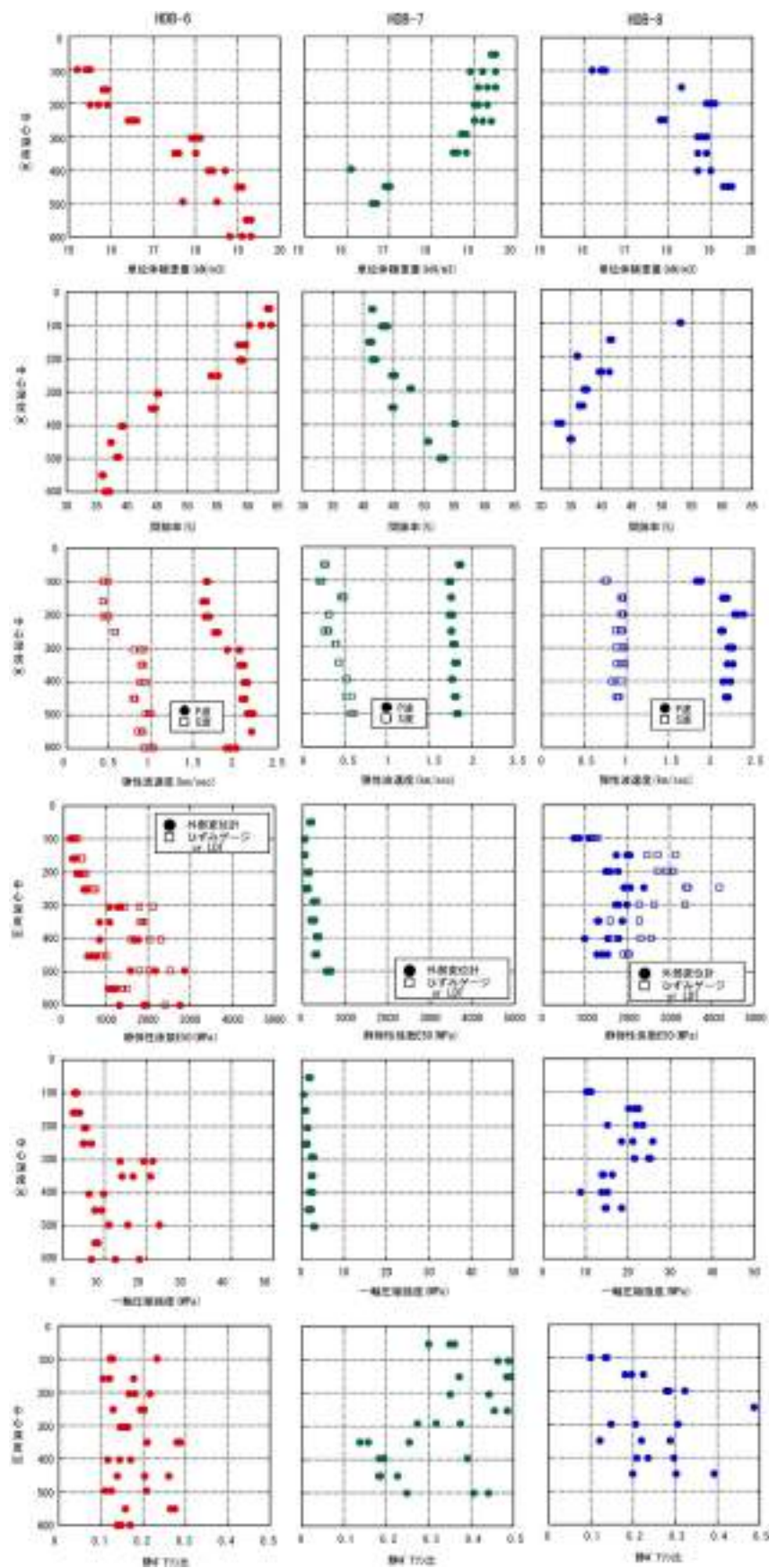
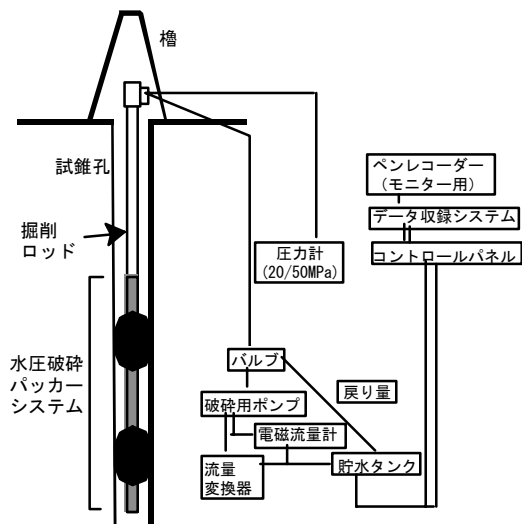


図 3.4.2-16 室内物理・力学試験結果 (HDB-6, 7, 8 孔)



* 型取り時には、水圧破碎パッカーシステムに変えて掘削ロッド先端に型取りパッカーシステムを装着する

図 3.4.2-17 水圧破碎時の測定配置

測定深度は、地下研究施設建設予定地近傍の初期応力分布をより詳細に把握することおよび平成 14 年度までの地下研究施設検討において前提としている水平面内および鉛直断面内の最大／最小主応力比が最大 1.5 程度が妥当であることを確認するために、地表～深度 600 m 付近までの範囲を概ね 100 m ピッチで試験する予定としていた。しかし、岩盤中の割れ目やボアホールブレイクアウトの発生などから、最終的には表 3.4.2-2 に示す深度で試験を実施した。

表 3.4.2-2 初期応力測定結果

破碎中心深度(m)	水平面内最大主応力 $\sigma_{Hmax}(MPa)$	水平面内最大主応力 $\sigma_{Hmin}(MPa)$	σ_{Hmax} の方向	備考
223.2	4.4	3.2	ほぼ東西	
256.0	4.6	3.6	ほぼ東西	
338.1	8.5	5.8		ブレイクダウンプレッシャーが不明瞭
351.0	9.2	6.3	ほぼ東西	
461.0	6.1	5.1	ほぼ東西	既存亀裂あり(孔軸方向、方位はほぼ東西)
529.5	14.5	9.6	ほぼ東西	
539.5	11.7	8.2		破碎区間に既存亀裂あり
576.0	14.6	10.0	ほぼ東西	

図 3.4.2-18 に HDB-1, 3, 6 孔の深度方向の応力分布および最大主応力方向（速報値）を示す。これまでの傾向とほぼ同様であり、深度の増加とともに水平面内の最大・最小主応力値もほぼ線形的に増加しているように見える。また、水平面内最小主応力は、推定土かぶり圧とほぼ等しく、水平面内最大主応力方向もほぼ東西方向である。一方、珪藻質泥岩（声間層）と珪藻質泥岩／硬質頁岩および硬質頁岩（稚内層）との対比で見た場合には、声間層中の水平面内最大・最小主応力比は稚内層

のそれに比べ相対的に小さい可能性もある。これは、東濃鉱山の初期応力測定結果（Maeda et.al, 1999）でも見られるように、珪藻質泥岩と硬質頁岩の岩盤剛性の違いに起因する可能性がある。

一方、地下施設設計の観点から見た場合重要なことは、これまで仮定している初期応力状態、すなわち水平面内最小主応力値は概ね推定土被り圧に等しく、水平面内最大主応力値は最大その 1.5 倍の範囲であり、かつ水平面内最大主応力方向は深度によらず東西方向で変わらないという条件が満足されているかどうかである。この観点からは、HDB-6 孔の結果は、上記仮定を逸脱するものではない。

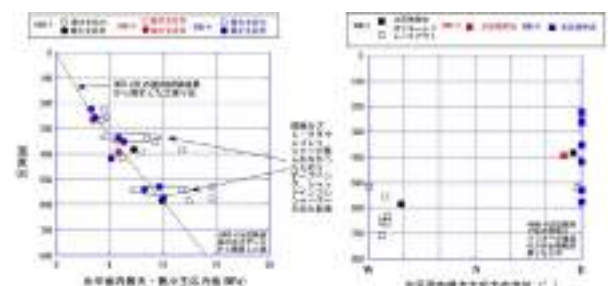


図 3.4.2-18 水平面内最大・最小主応力および最大主応力方向の深度変化 (HDB-1, 3, 6 孔)

また、HDB-6 孔でも深度 400 m より深い領域ではかなりの区間でボアホールブレイクアウトが見られている（図 3.4.2-19）。このボアホールブレイクアウトから推定される水平面内最大主応力方向もほぼ東西方向である。これは、水圧破碎法から得られた最大主応力方向と調和的である。

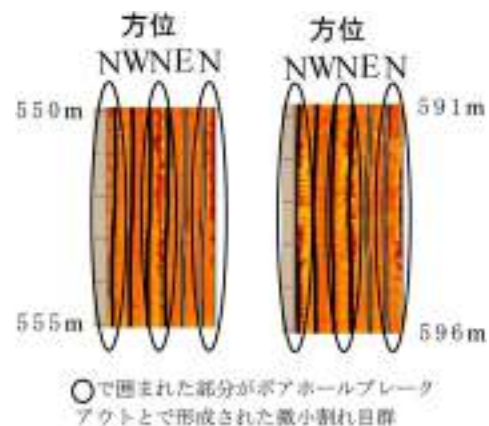


図 3.4.2-19 孔壁画像検層結果 (HDB-6 孔)

b) 孔内载荷試験

原位置岩盤の変形特性に関するデータ取得およびコアサイズの変形特性との比較を行う目的で、計 12 深度で孔内载荷試験を実施した。試験は、コアサイズで力学特性が異なる珪藻質泥岩（声間層）および硬質頁岩（稚内層）を対象に、原位置岩盤で割れ目がない所および割れ目が存在する箇所を実施した。

なお、試験方法は、土木学会の指針に準拠し、等圧载荷方式の試験装置（SOREXPERTS 社製 Diatometer）を用いた。本装置は、1 m 試験区間長内の異なる水平 3 方向の変位を同時に計測できることが特徴である。

異なる応力レベルにおける繰返载荷試験で得られた変形係数・弾性係数の深度分布を図 3.4.2-20 に示す。

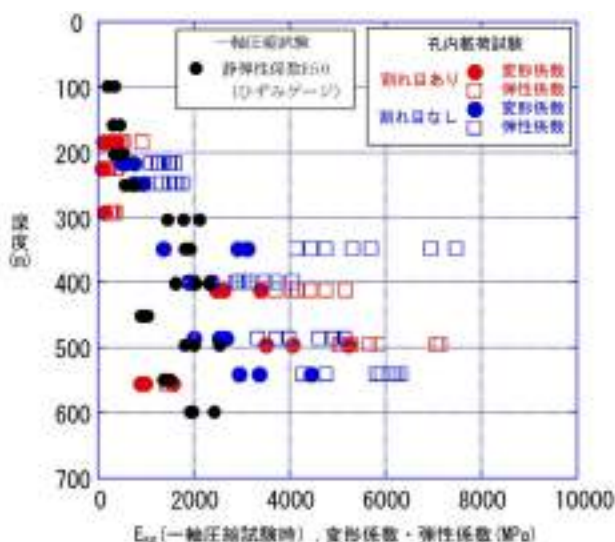


図 3.4.2-20 孔内载荷試験結果（HDB-6 孔）

なお、参考として一軸圧縮試験時に得られている静弾性係数 E_{50} の値もプロットしている。

割れ目のない箇所での孔内载荷試験結果と一軸圧縮試験で得られた E_{50} の値を比較すると、もっとも低い応力レベルの変形係数は同一深度の E_{50} と概ね一致しており、裸孔の孔壁近傍の原位置岩盤は孔直交方向の応力が解放されインタクトなコアの一軸圧縮状態と大きな違いがないことが想定できる。その後応力レベルを増加させると変形係数・弾性係数は高くなり、孔壁より奥側の三軸応力状態の岩盤の変形特性が計測されていると考えられる。変形係数・弾性係数は、深度 350 m 付近を除くと概ね線形的に増加する傾向にあり、各種検層結果や室内試験結果で見られる定性的な傾向と矛

盾しない。弾性係数／変形係数比は概ね 1.5～2 程度である。

割れ目のある部分とない部分で比較すると、珪藻質泥岩では、割れ目のある部分はない部分に比べ極端に剛性が低下する。また、深度増加にかかわらず得られている弾性係数／変形係数はほぼ同じ値である。他方、硬質頁岩中での試験結果は、最深部を除くと、割れ目のない箇所とほぼ同等かもしくはそれより大きな値となっている。試験対象となっている割れ目の幾何学特性も含めて結果の解釈を行う必要がある。

iii) 対象岩盤のモデル化

a) 調査対象岩盤の力学的物性分布の特徴

図 3.4.2-21 に、HDB-6, 8 孔において平成 15 年度に実施した室内試験結果と物理検層結果の比較を示す。一般に、原位置の弾性波速度や密度は、原位置岩盤中の割れ目が開口していると、その影響でコアの弾性波速度や密度より小さくなり、割れ目の挙動が岩盤挙動に支配的影響を及ぼす可能性がある。一方、HDB-6, 8 孔の室内試験から得られた密度／弾性波速度（P 波）と密度検層および速度検層で得られた P 波速度は良く一致している。これは、HDB-1, 3, 4, 5 孔で得られた結果と同じであり、研究所設置地区内においては、原位置岩盤内の割れ目の開口幅は総じて小さく、結晶質岩と比べ相対的に連続体に近い挙動を示す可能性が高いことを示唆している。

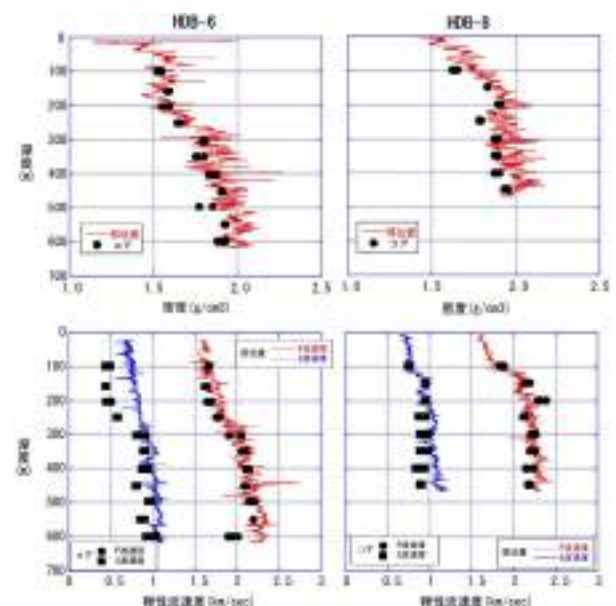


図 3.4.2-21 原位置およびコアから得られた密度および弾性波速度の比較（HDB-6, 8 孔）

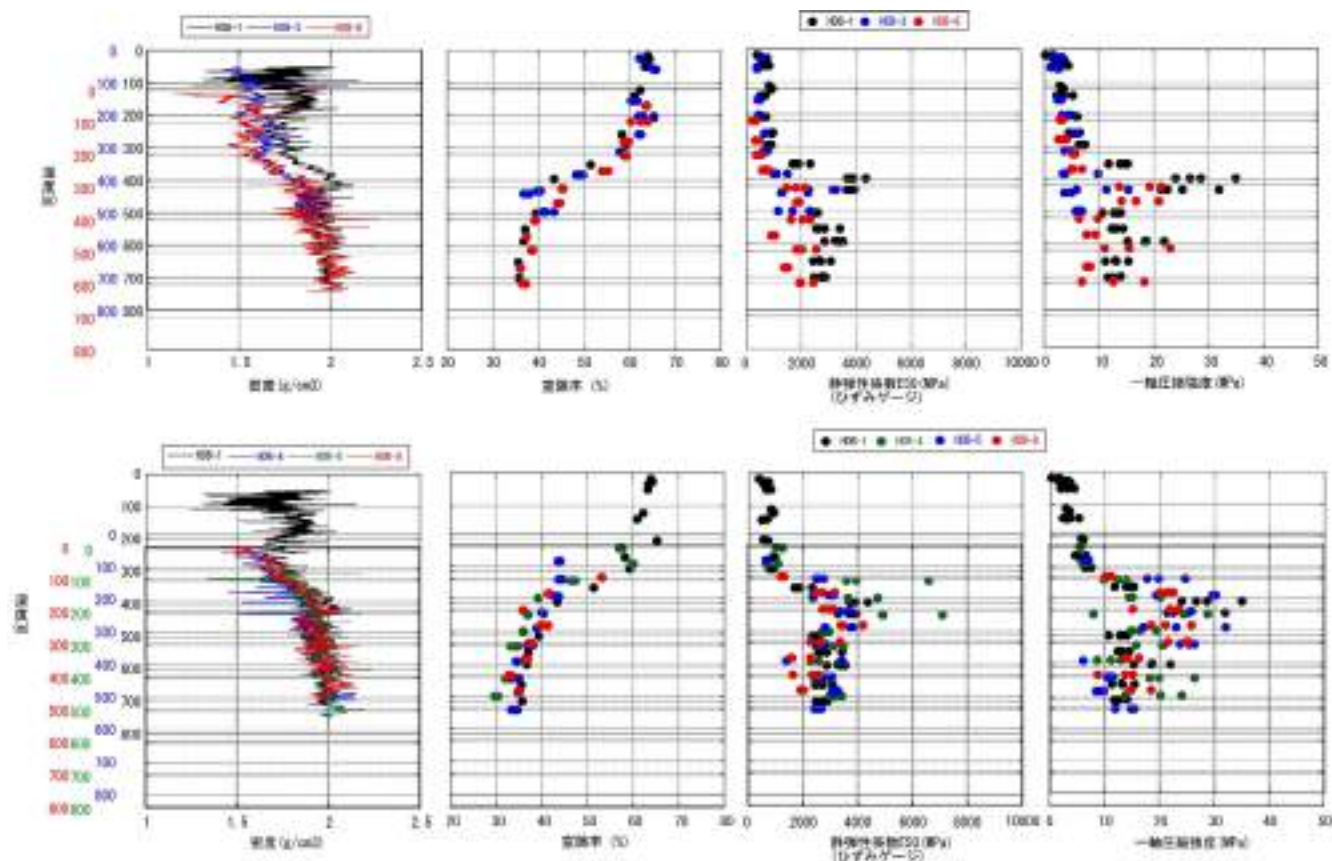


図 3.4.2-22 室内物理・力学試験結果 (HDB-6, 7, 8 孔)

ただし、S 波速度については、HDB-3, 6 孔の室内試験結果は、原位置速度検層より求めた値がかなり低い。速度検層から得られた S 波速度は別途実施した PS 検層結果と整合的であり、この要因については現時点では明らかではない。

図 3.4.2-22 に HDB-1, 3, 4, 5, 6, 8 孔の物理検層結果、室内試験結果をまとめた一例を示す。HDB-6, 8 孔もこれまでに得られている物性の深度分布と同様の傾向、すなわち珪藻質泥岩、珪藻質泥岩／硬質頁岩の遷移層および硬質頁岩という構成でほぼ説明しうる。力学的物性の観点からの遷移層（急激な物性変化ゾーン）の厚さは、断層西側で 100m 程度、東側では 200 m 程度と考えられる。

初期応力状態については、研究所設置場所に近い HDB-1, 3, 6 孔のデータからは昨年度までに想定した応力状態、すなわち水平面内最小主応力値は推定土被り圧に等しく、水平面内最大主応力値は最大その 1.5 倍の範囲であり、かつ水平面内最大主応力方向は深度によらず東西方向で変わらないという想定をこえる結果は得られていない。また、水平面内最大主応力方向は、本地域を対象とした地震のメカニズム解から推定される水平最大圧縮

軸方向（森谷，1999）と概ね一致している。断層東側のデータは非常に限られているため、全般的な傾向を見いだすには至っていないが、地下研究施設建設に伴う力学的影響範囲は限られるため、地下施設設計等の観点から影響はない。

b) 力学的概念モデル

上記の結果をベースとして構築した力学的概念モデルを図 3.4.2-23 に示す。モデル構築のベースとなっている Zone 1, 2, 3 の境界はあくまで力学的物性の深度分布に基づくものであり、必ずしも地質学的境界と一致していない。HDB-6, 8 孔のデータが加わったため大曲断層直交方向の力学物性分布が明らかになってきた。それ以外の定性的傾向は平成 14 年度までに得られている結果と概ね一致している。

③ まとめ

平成 15 年度の調査は、主として地質・地質構造（大曲断層、勇知層）に関する解釈の一助となるデータの取得および地下施設建設地点に最も近いボーリング孔において地下施設設計に必要なとなる

力学特性（岩石物性、原位置岩盤の力学物性および初期応力）を把握する目的で各種調査を実施した結果、平成14年度までの調査および解釈で得られている傾向とほぼ同じ結果が得られ、それらの結果に基づき、平成14年度構築した岩盤力学的概念モデルの更新を図った。

今後は、岩石物性の異方性等のより詳細な岩石・岩盤の特徴を捉えるための調査を実施し、第1段階の最終目標である地下施設建設に伴う力学的影響の予測に結び付ける予定である。

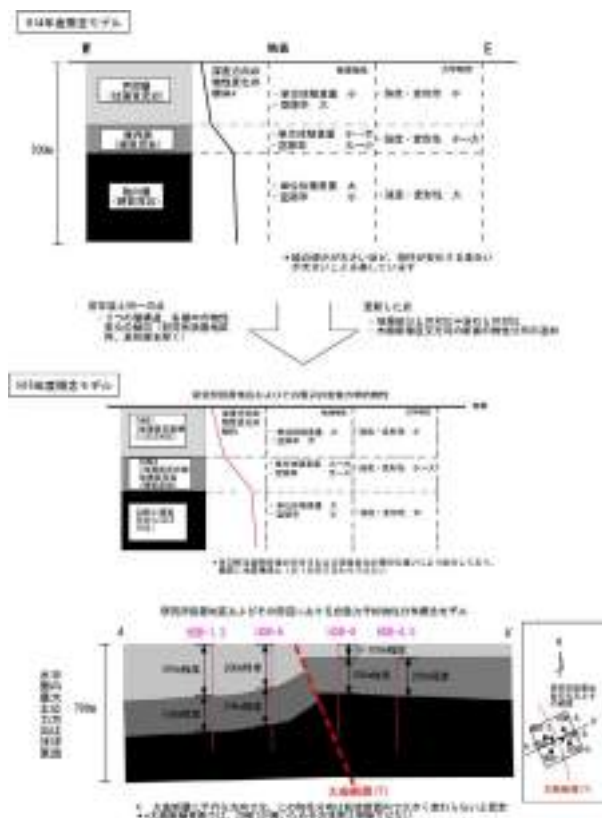


図 3.4.2-23 平成15年度ボーリング調査までのデータを考慮した岩盤力学的概念モデル

参考文献

- Maeda, N., Sato, T., Matsui, H. and Sugihara, K. (1999): Estimation of applicability of stress measurement methods and three dimensional stress state in soft sedimentary rock, Proc. Of '99 Japan-Korea Symposium on Rock Engineering, pp.277-284.
- 森谷武男(1999):北海道とその周辺における地震のメカニズム解から推定される地殻内部応力場, 月刊 地震 Vol. 21, No. 9, pp.557-564.

1-3) 岩盤の水理に関する調査研究

① はじめに

岩盤の水理に関する調査研究では、地表から地下深部における地下水流動特性を明らかにするための調査・解析技術を構築することを目標とし、研究所設置地区およびその周辺地区を対象として、地表付近における地下水流動特性を評価するための表層水理調査、地下深部の岩盤の地下水流動特性を評価するためのボーリング調査や間隙水圧の観測および、地下施設建設に伴う地下水流動の変化を予測するためのモデル化・解析を進めている。

平成 15 年度は、表層水理調査の一環として研究所設置地区およびその周辺地区における河川流量観測と気象観測設備の新規設置を行うとともに、蒸発散量観測に関する検討を実施した。また、深部岩盤の地下水流動特性を明らかにするために必要な調査として、HDB-6, 7, 8 孔において水理試験を実施するとともに、これまでのボーリング調査を実施した HDB-1, 2, 3, 4 孔に地下水の水圧・水質長期モニタリング装置を設置し、間隙水圧の連続観測を開始した。また、これらの結果を基に、研究所設置地区およびその周辺地区における水理地質構造概念モデルに関する検討を行った。

② これまでの成果

i) 表層水理調査

表層水理調査については、地下水流動解析における上部境界条件の 1 つとなる地下水涵養量を把握することを目的として、水収支法による地下水涵養量の推定に必要な河川流量や降雨量、蒸発散量に関するデータを取得するための観測体制の整備を進めた。また、研究所設置地区およびその周辺地区における蒸発散量や降水量のばらつきを評価するために必要な追加観測地点の検討を行った。

a) 河川流量観測

平成 14 年度に開始したペンケエベコロベツ川流域 2 箇所、清水川流域 1 箇所での河川流量観測システム（中野ほか、2003）による河川流量観測を継続するとともに、冬期の河川結氷期における河川流量の観測精度を向上させるため、可搬式の回転式流量計により流水断面中の流速分布を測定し水深測定結果とあわせて河川全断面における流量を算定する方法（建設省水文研究会、1996）に基づく流量観測を実施した。

河川流量および気象観測結果の一例を図 3.4.2-24 に示す。この結果、河川流量を流域面積で除した流出高は各流域とも同様の傾向を示して

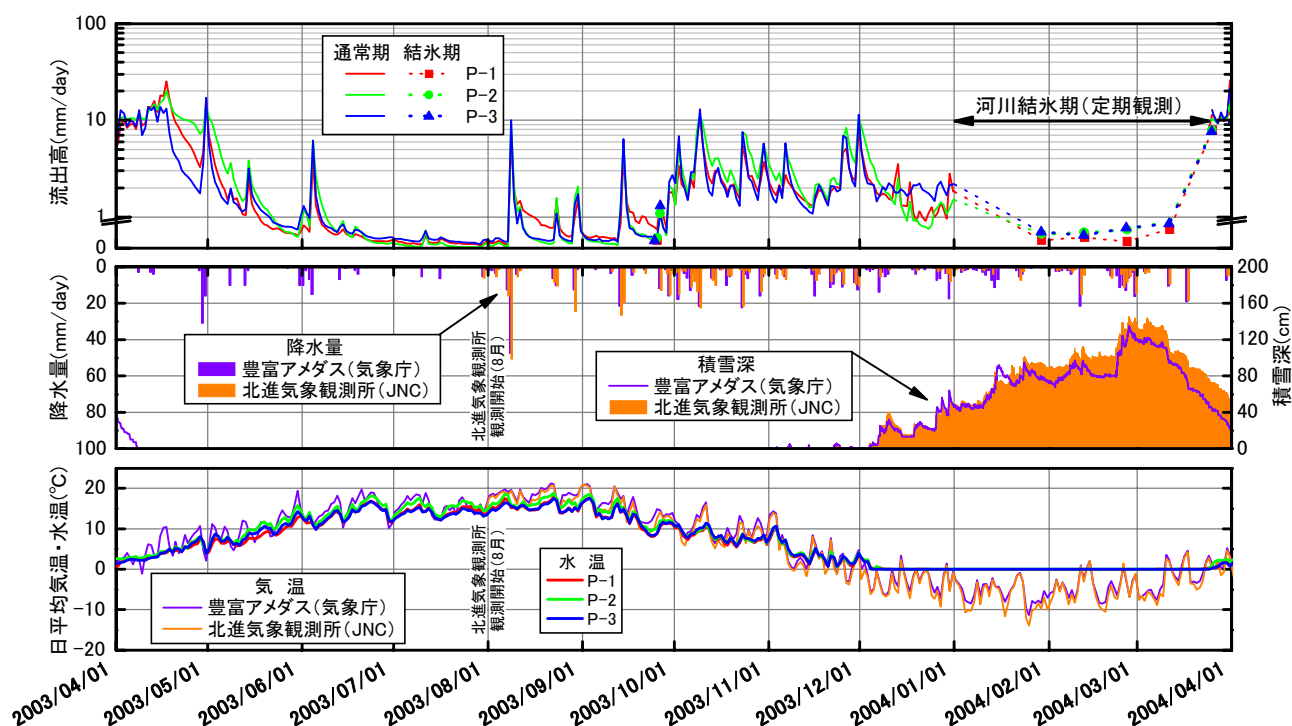


図 3.4.2-24 河川流量観測および気象観測結果（例）

おり、河川水が流れ出す特性は各流域でほぼ等しいと考えられる。また、非積雪期には降雨後の約3～8時間後に河川流量（流出高）が最大となること、積雪期には降水（降雪）が流出高の大小に直接影響しないこと、雪解け時の流出高は年間を通して最大になること、渇水期や積雪期には約1ヶ月で流出高が0.5 mm/day程度まで小さくなることなどがわかった。

b) 気象観測

降雨量および蒸発散量については、研究所設置地区に北進気象観測所を新設し、平成15年8月から観測を開始した。降雨量や降雪量、蒸発散量の算定に必要な気象要素は、気象観測の手引き（気象庁、1998）に基づき抽出し、機器の選定・設置を行った（図3.4.2-24、表3.4.2-3、図3.4.2-25）。

表 3.4.2-3 気象観測機器一覧

観測目的	観測機器	仕様	観測項目	北進	既設3地点
降水量	雨量計	転倒ます型（ヒーター付）	降水量（通年）	1	
	転倒ます型		降水量（積雪期を除く）		3
	積雪深計	レーザー式	積雪の深さ	1	3
蒸発散量	積雪重量計	メタルウェファー式	積雪重量	1	
	温・湿度計	電気式温度計、電気式湿度計	気温、相対湿度	1	3
	気圧計	電気式気圧計	気圧	1	
	雪面温度計	放射温度計	雪面温度	1	
	風向風速計	風車型風向風速計	風向・風速	1	3
	風速計	三杯風速計	地上風速	1	
	日照計		日照時間	1	3
	日射計		全天日射量	1	
	放射収支計		正味放射量（純放射量）	1	

注1) 全天日射量：水平な平面上で上部から受ける日射量 (J/m^2)

注2) 正味放射量：全天日射量等の下向き放射量と反射日射量等の上向き放射量の差 (J/m^2)

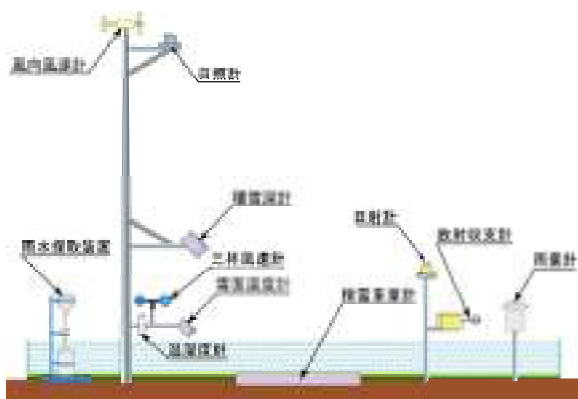


図 3.4.2-25 気象観測所概念図

また、降雨量や植生による蒸発散量への影響を評価するための観測体制の整備を目的として、研究所設置地区およびその周辺地区を対象に、新たな観測地点についての検討に必要な地質・地形・植生等の流域特性を整理した。その結果を表3.4.2-4に示す。

表 3.4.2-4 流域特性一覧

流域	河川名	流域面積 (km ²)	流域の地質		流域の地形	流域の植生
P-1	二号川	4.4	中下流域	声間層が分布	他の流域と比較すると谷地形がやや多く、中間的な起伏（平均起伏量10.3m）を示す流域	広葉樹60.0% 針葉樹23.4% 草 地15.0%
			上流域	増幌層・稚内層が分布、局所的に宗谷炭層が分布		
P-2	ベンケ エベコロベツ川	19.5	下流域	声間層が分布	他の流域と比較すると谷地形がやや多く、起伏が大きな（平均起伏量13.2m）流域	広葉樹67.7% 草 地18.7% 針葉樹11.1%
			上流域	宗谷炭層・増幌層・稚内層が分布		
P-3	清水川	7.1	中下流域	西側に勇知層、東側に声間層が分布し、局所的に恵比呂層が分布	他の流域と比較すると谷地形が多いが、起伏が小さい（平均起伏量9.7m）流域	草 地39.7% 広葉樹29.2% 針葉樹19.9%
			上流域	主として声間層、一部に稚内層が分布		

さらに、牧草地と森林が混在し積雪寒冷地である研究所設置地区の周辺流域における蒸発散量推定手法の適用性について検討した（表3.4.2-5）。その結果、広葉樹林に対しては年間通して傾度法およびボーエン比熱収支法の適用性が高く、また牧草地に対しては非積雪期にはペンマン法の、積雪期にはバルク法の適用性が高いことがわかった。

表 3.4.2-5 蒸発散量測定手法の検討結果

蒸発散量算定手法	①ペンマン法	②傾度法	③ボーエン比熱収支法	④バルク法	⑤湧相関法	⑥ソーンスウエイト法	⑦ハーモン法
判定項目							
a) データ管理の労力	○	△	○	△	×	○	○
b) データ取得の容易性	△	×	×	△	△	○	○
c) 地形の影響	○	○(注1)	△	○	×	○	○
d) 冬季の計測	×	○	○	○	○	○	○
e) 機器のメンテナンス	○	○	○	○	×	○	○
f) 樹林での適用性	×	○	○	×	○	×	×
g) 草地での適用性	○	○	○	×	○	×	×
h) 雪面での計測	×	×	×	○	×	×	×
評価							
広葉樹林への適用性評価	×	○(注2)	○	×	△	×	×
牧草地への適用性評価	○	△	△	×	△	×	×
積雪期での適用性評価	×	△	△	○	△	△	△

注1) 適用可能な起伏の小さい観測地点が設定できることが条件。

注2) f) 項が×の場合は適用しない。

注3) g) 項が×の場合は適用しない。

これらの結果を踏まえて、研究所設置地区およびその周辺地区の森林からの蒸発散量の測定（樹冠上蒸発散量測定）を行うための適地の選定を行った（図3.4.2-26）。選定手順を以下に示す。

- ① 広葉樹の樹高 4～10 m、樹冠密度 70%以上のエリアを選定（図中の緑色領域）
- ② 上記①で選定したエリアで起伏量が 10 m 未満の地点を抽出（図中の黄丸および赤丸）
- ③ 上記②エリアで道路網から 300 m 以内の距離にある地点を抽出
- ④ 上記③で抽出された地点で 100 m×100 m 以上の範囲が確保できるエリアを選定

抽出された 3 つの候補エリアの優先順位を流域内の配置、地形、エリアの大きさ、管理の容易性の各項目で評価した結果、候補エリアの優先順位は候補エリア 1, 2, 3 の順となった。



(国土地理院 数値地図 25000「天塩」を使用)

図 3.4.2-26 樹冠上蒸発散量測定候補エリア

ii) 深層水理調査

深部岩盤の地下水流動特性を明らかにするための調査として、HDB-6, 7, 8 孔において電磁フローメータ検層、原位置水理試験を実施し、岩盤の透水性に関するデータを取得した。

ボーリング孔は泥水を用いて掘削されているため、電磁フローメータ検層は、孔内水の清水置換が可能な場合に実施した。原位置透水試験も試験実施前に孔内水の清水置換を行うことを原則としたが、孔内状況により事前の清水置換が困難な場合は試験区間のみ清水置換を行い、試験を実施した。

平成 14 年度までの調査により、研究所設置地区およびその周辺地区の深部の地下水には、メタンを主成分とする溶存ガスの存在を確認していることから、透水試験中に試験区間における溶存ガスの遊離を極力抑えた試験条件を設定し、試験を実施した(竹内, 平田, 2003)。

各孔における試験結果を以下に示す。

a) HDB-6 孔

HDB-6 孔は全掘削段階で清水置換が可能であったため、全孔長で電磁フローメータ検層、原位置水理試験を実施した。結果を図 3.4.2-27 に示す。

揚水状態で実施した電磁フローメータ検層の結果からは 20 区間以上の地下水の流入出点が推定された。このうち深度 300 m および 400 m 付近の地下水流入区間を含む区間においては、原位置透水試験により 10^{-6} m s⁻¹ オーダーの透水係数が得られており、大曲断層推定位置の西側においても透水性の高い区間が存在することが確認された。それ以外の区間については、声間層で $10^{-9} \sim 10^{-8}$ m s⁻¹

オーダー、稚内層で $10^{-11} \sim 10^{-9}$ m s⁻¹ の透水係数が得られた。また、原位置透水試験時に計測した間隙水圧は、地表面を基準とした静水圧より 0.1 MPa 程度高い値を示した。

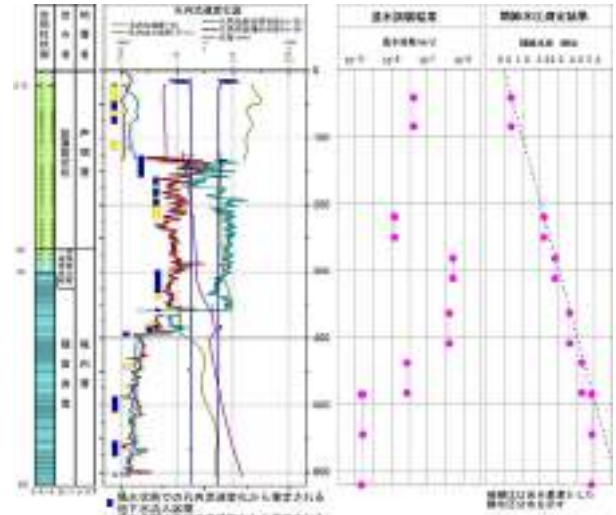


図 3.4.2-27 HDB-6 孔での検層・水理試験結果

b) HDB-7 孔

HDB-7 孔での試験結果を図 3.4.2-28 に示す。

第 1 段階掘削 (0-178 m) および第 2 段階掘削 (178-324 m) では、孔内水を清水に置換することによる孔壁崩壊が懸念されたことから、第 1 段階、第 2 段階では電磁フローメータ検層を実施せず、第 3 段階掘削 (324-520 m) でのみ電磁フローメータ検層を実施した。揚水状態における電磁フローメータ検層の結果からは 7 区間の地下水流入出区間が推定されたが、流入出量が小さいことから顕著な高透水性は有していないと考えられる。また、

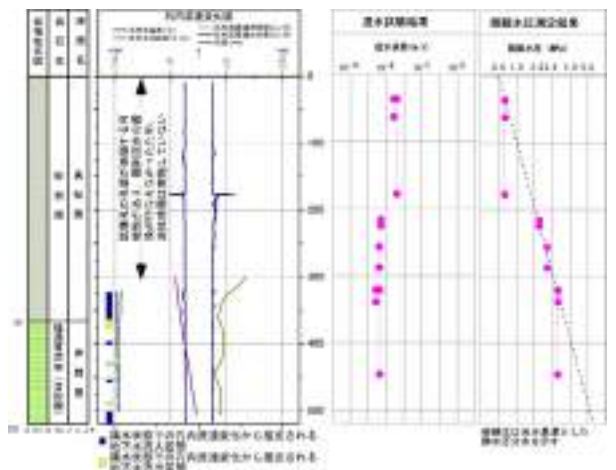


図 3.4.2-28 HDB-7 孔での検層・水理試験結果

原位置透水試験により得られた勇知層の透水係数は $10^{-10} \sim 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ 程度であった。間隙水圧については、深度 200 m 以深において地表面を基準とした静水圧より 0.2 MPa 程度高い値を示した。

C) HDB-8 孔

HDB-8 孔は清水置換が可能であったことから、全掘削段階で電磁フローメータ検層、原位置水理試験を実施した。結果を図 3.4.2-29 に示す。

揚水状態で実施した電磁フローメータ検層の結果から、20 区間以上の地下水の流入区間が推定されたが、多くの区間については流入量が小さく透水性は低いと考えられる。しかしながら、電磁フローメータ検層実施時に計測している孔内水比抵抗値で顕著な変化が確認できる深度 170 m および深度 200 m 付近を含む区間で実施した原位置透水試験結果はいずれも高透水性を示していることから、孔内水比抵抗値の変化による高透水性区間の抽出が有効と考えられる。これら以外の原位置透水試験の結果からは、声間層で 10^{-8} m s^{-1} 、稚内層で $10^{-10} \sim 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ オーダーの透水係数が得られた。間隙水圧については、深度 200 m 以浅において地表面を基準とした静水圧より 0.07 MPa 程度低い圧力を示し、深度 200 m 以深では概ね静水圧と等しい値を示した。

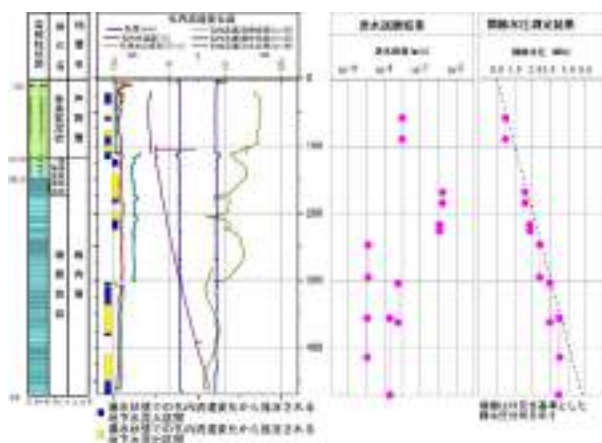


図 3.4.2-29 HDB-8 孔での検層・水理試験結果

iii) 水理地質構造のモデル化

平成 14 年度に研究所設置地区が選定されたことから、この地区を対象として、解析領域を再設定した。解析領域の設定において、解析を行う際に側方の境界の影響を受けないように十分に広く設定するとともに、分水嶺となりうる地形の尾根や谷、海岸線に沿って決定した(図 3.4.2-30)。設

定した解析領域に対して、数値解析用の三次元メッシュを作成した。水理地質構造モデルの構築において用いた地質構造は、平成 13 年度のものから大きく変更されていない。

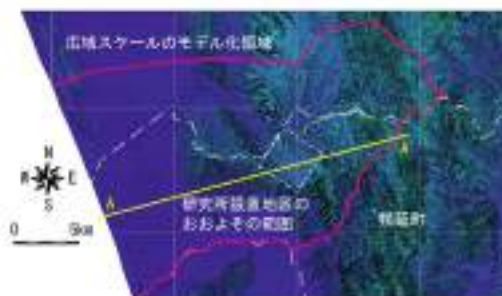


図 3.4.2-30 再設定したモデル化領域

解析は、密度差による対流を考慮できるプログラム DTRANSU を使用した。基本ケースとして、声間層、稚内層の透水係数をともに 10^{-8} m s^{-1} とした解析を行った。これらの値は、平成 15 年度までに行った原位置水理試験(HDB-1, 3, 4, 5, 6, 7, 8 孔)により得られた透水係数の対数平均である。なお、その他の透水係数、分散長などの物性値は、平成 14 年度に設定した値に基づいて与えた。また、基本ケースの他に、稚内層の透水係数を変化したケース、透水係数の深度依存性を考慮したケースなどの解析を行い、全水頭や塩化物イオン濃度などの実測値と比較することで透水係数などの水理特性と地下水流動の相関を調べた。なお、三次元での密度差を考慮した解析は長時間を要するため、塩水の分布に着目した感度解析では、主に三次元の解析領域から切り出した二次元の鉛直断面を用いて検討した。

図 3.4.2-31 に基本ケースでの、標高 0m, -180 m (250 m 坑道に相当), -430 m (500 m 坑道に相当)における等ポテンシャル線図を示す(研究所設置地区の地表面の標高はおおよそ 70 m)。ただし、図示した結果は、地下水の概略を捕らえるための淡水のみで計算したものである。境界条件として海岸線で静水圧に対応する全水頭を与え、地表を浸出面境界として 365 mm y^{-1} の涵養を仮定した。解析結果から、標高 0 m においては、地形の起伏と同様のポテンシャル分布となっており、研究所設置場所付近では、地下水の流向は清水川と同様に北西となっていることがわかる。しかし、標高-430 m では、等ポテンシャル線の間隔が広く、すなわち、動水勾配が小さくなり(研究所設置場所付近では 0.01 程度)、地下水の流向も不明瞭になっている。

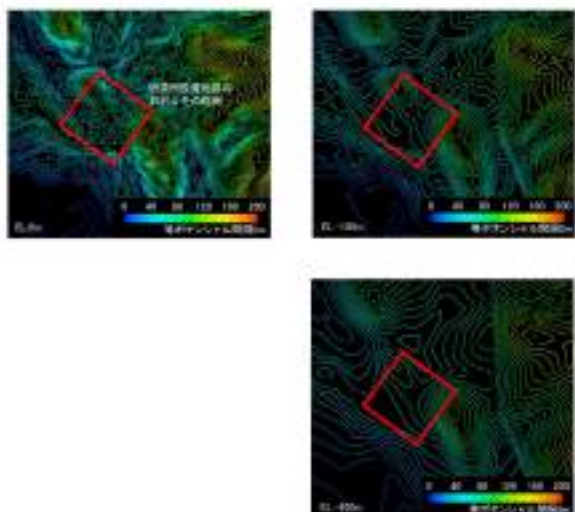


図 3.4.2-31 基本ケースでの各標高の等ポテンシャル線図

図 3.4.2-32 に、基本ケースの解析結果と、原位置水理試験時に測定した間隙水圧および地下水水圧の長期観測により得られた間隙水圧の比較結果を示す。実測値では、ほとんどの箇所静水圧よりも高い水圧が観測されているのに対し、解析結果でも HDB-1 孔以外では同様の傾向が得られており、実測値と調和的である。しかし、全体的に、解析では実測値で得られているような深度方向の全水頭のコントラストは表現できていない。

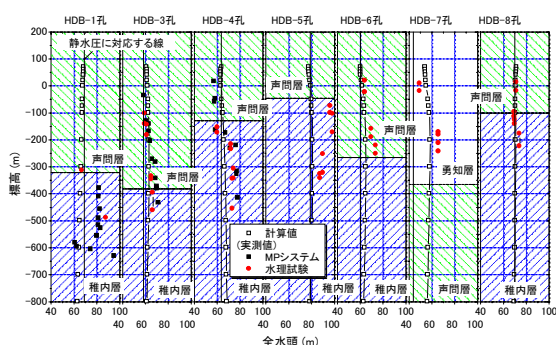


図 3.4.2-32 全水頭分布の解析結果と実測値の比較

図 3.4.2-26 に示す各河川流域について解析結果から得られた涵養量は、P-1 流域が 21 mm y^{-1} 、P-2 流域が 22 mm y^{-1} 、P-3 流域が 60 mm y^{-1} であり、P-3 流域で相対的に涵養量が大きい結果となっている。一方、表層水理調査において各流域の流出特性はほぼ等しいと想定されることから、降水量、蒸発散量の場合によるばらつきが小さいと仮定した場

合、各流域の涵養量はほぼ等しいこととなり、解析結果とは整合しないこととなる。

図 3.4.2-33 は、HDB-3,5 を通る鉛直断面(図 3.4.2-30 中 A-A' 断面)を用いた二次元の密度を考慮した解析で得られた塩化物イオン濃度と、各孔のコアから抽出した間隙水の分析により得られたイオン濃度を比較したものである。解析については、平成 14 年度の解析結果に基づき、堆積時に地層中に取り残された海水が天水と混合していることを想定し、初期条件として全領域で海水と同等の塩化物イオン濃度を与えた。間隙水の分析結果では、高い塩化物イオン濃度が検出されているのに対し、解析結果は非常に低い濃度となっており、実測値と大きく異なる結果となった。

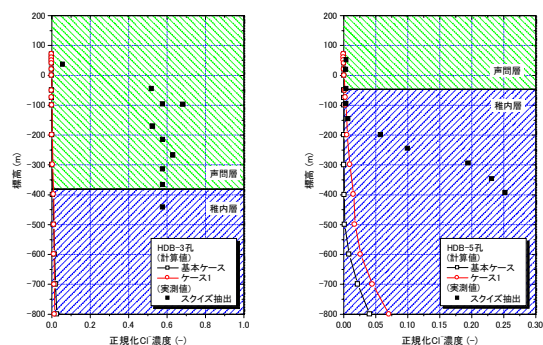


図 3.4.2-33 塩化物イオン濃度分布の解析結果と実測値の比較

今回の解析での実測値と解析結果の相違の原因の 1 つに透水係数の設定が考えられる。これまでのボーリング調査から、透水性の高い場所の多くは、稚内層中の層理面と高角に交わる剪断割れ目を主とする割れ目帯に存在していることがわかってきている。また、稚内層の健岩部は透水係数が小さく、声間層では健岩部でも割れ目帯でも透水係数に大きな差がないことが明らかになりつつある(図 3.4.2-34)。さらに、透水係数の深度依存性が確認されており、これは室内透水試験結果からも確認されている(図 3.4.2-35)。今後は、このような透水係数の分布や透水特性を考慮した透水係数の設定に関する検討等、各種調査から得られた結果を基により詳細な検討を行い、実測データや調査から得られた知見をより反映したモデルの構築、更新を行う。

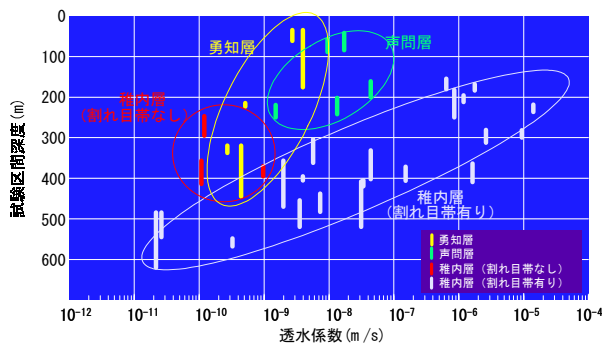


図 3.4.2-34 原位置透水試験結果

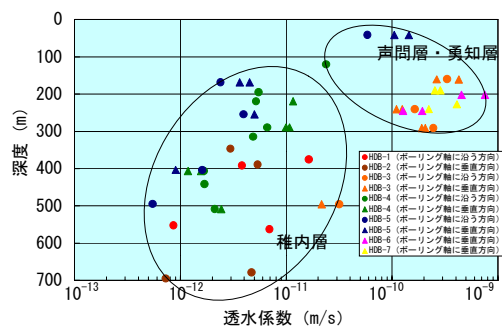


図 3.4.2-35 室内透水試験結果

③ まとめ

表層水理調査については、研究所設置地区およびその周辺地区において河川流量や気象観測データの取得を継続するとともに、観測の精度を向上させるために蒸発散量・降水量の観測を対象とした気象観測装置の増設に関する検討を実施した。また、深部水理調査としてボーリング調査において地下深部の岩盤の水理特性に関するデータを取得した。さらに、水理地質構造のモデル化として、研究所設置地区およびその周辺地区を対象とした水理地質構造モデルの構築を行うとともに、地下水流動解析を行い、透水係数などの水理特性と地下水流動との関係について検討した。

今後は、水収支法による地下水涵養量の推定に向けて既に設置している各種観測システムでのデータ取得に加えて、蒸発散量・降水量の観測精度を向上するための観測体制の整備を進める。また、地盤水理的手法により地下数m～数十m程度のボーリング孔内に地下水位計・土壌水分計を設置して地下水位の分布やその変化、土壌中の水分の移動を計測して、表層の水の動きを把握するとともに地下水涵養量を求める予定である。

また、今後もボーリング調査において地下深部の岩盤の水理特性に関するデータを取得するとともに、各種調査で得られた結果を基に水理地質構

造モデルの構築・改良を行い、研究所設置地区およびその周辺地区の地下水流動場の推定や、地下施設建設に伴う地下水流動場の変化の予測解析などを実施する予定である。

参考文献

- 建設省水文研究会 (1996)：水文観測，3版，社団法人全日本建設技術協会，pp. 103-142，pp. 199-208.
- 気象庁 (1998)：気象観測の手引き．
- 中野洋一，小林利章 (2003)：表層水理定数取得のための河川流量調査，サイクル機構技術資料，JNC TJ1440 2002-001.
- 竹内竜史，平田洋一 (2003)：溶存ガスを含む地下水の調査手法に関する一考察 第38回地盤工学研究発表会，pp. 1259-1260.

1-4) 地下水の地球化学に関する調査研究

① 課題と計画の概要

幌延深地層研究計画における地下水の地球化学に関する調査研究では、地下水の地球化学特性の三次元的分布を把握し、地球化学モデルの構築、地下水流動解析結果の妥当性を評価するために必要な滞留時間を明らかにするとともに、地下水の地球化学特性を把握するための調査・解析技術を構築することを目的としている。そのため幌延深地層研究計画では、

- ・地下水の地球化学特性の三次元的分布と地質構造との関係の把握
- ・地球化学特性に基づく地下水流動解析結果の妥当性評価
- ・地層処分技術開発において要求される原位置における地下水の物理化学パラメータ（pH、ORP、温度など）の推定と取得技術の確立

を課題として研究を実施している。これまでの調査により、研究所設置場所周辺の地下水は地表部に地表から涵養したと考えられる淡水系の地下水と、塩濃度が高く、現在の天水と比較すると酸素・水素同位体比が重い塩水系の地下水が存在していることが明らかになってきた。

上記の目的に関して平成15年度は、研究所設置場所周辺の地下水の地球化学特性の三次元的分布を評価することを主目的として調査・解析を実施した。

② これまでの成果

i) 水質分布について

地下水の水質の三次元的分布を把握するために幌延深地層研究計画で実施しているボーリング調査では、揚水試験中にポンプで汲み上げた地下水を地上において採取し化学分析する手法と、コアをスクイズして間隙水を抽出し化学分析する2手法を適用して調査を実施している。地下水の採水にあたっては、水理試験装置により地下水を揚水して採水する必要があるため限られた区間のデータしか取得できないことや、掘削水の影響を十分に排除できないなどの問題がある。一方、間隙水を抽出し分析する手法については、割れ目が多く、掘削水が浸透するような場所を除けば、間隙水を抽出し分析することが可能である。しかし、本手法で抽出される間隙水の抽出量は限られることから分析項目が限定されるという問題が

ある。

これらの手法により得られた化学分析結果についてヘキサダイアグラム（図3.4.2-36）を作成し、地下水の地球化学特性の三次元的分布を評価することを試みた。その結果、地下水と間隙水ともに同程度の深度における Na^+ 、 Cl^- の濃度に関しては同様の傾向を示しているが、 SO_4^{2-} については間隙水に異常に高い値を示すものがある。これは、間隙水の抽出を大気中で行ったため、岩石中の黄鉄鉱などとの反応が生じた結果として抽出されたと考えられる。このように間隙水の化学分析結果については問題があるものの、対象岩盤の透水性が全般的に低いことを考慮すると、地下水の地球化学特性の三次元的分布評価のためには、両手法を組み合わせることが有効と考えられる。

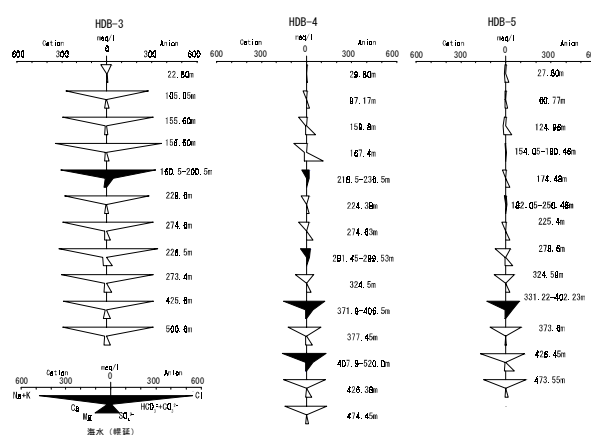


図3.4.2-36 HDB-3, 4, 5孔で採水された地下水とコアから抽出した間隙水の水質分布

以上の結果から、研究所設置場所周辺の地下水の地球化学特性の分布は、表層部では深部に比べると塩濃度の低い淡水系の地下水が分布しており、この地下水の地球化学特性の深度変化は、研究所設置場所周辺に配置されているボーリング孔毎に違いはほとんど認められないと言える。しかし、塩濃度の深度分布を見ると、HDB-3孔の地下水の溶存成分濃度がHDB-4, 5孔のそれに比べると浅い深度から高くなっており、淡水系地下水と塩水系地下水との境界深度が異なっていると考えられる。

ii) 酸素・水素同位体比の特徴について

地下水の滞留時間や流動場を地球化学的に評価する手法として、地下水中の放射性同位体や安定同位体を用いた研究が挙げられる。放射性同位

体は、その放射壊変に伴う半減期をもとに、地下水の滞留時間を与えることができる。また、酸素・水素同位体のような安定同位体については、その起源が異なれば、異なる同位体比を有すると考えられている。したがって、地表から涵養する表層水と堆積岩が堆積した時代に閉じ込められた過去の地下水で異なる酸素・水素同位体比を有していると考えられることから、本研究においては、地下水と間隙水のそれらを測定し、本地域の地下水流動場に関する検討を行った。

本地域の酸素・水素同位体比の特徴を図3.4.2-37に、各ボーリング孔の酸素・水素同位体比の深度プロファイルを図3.4.2-38に示す。

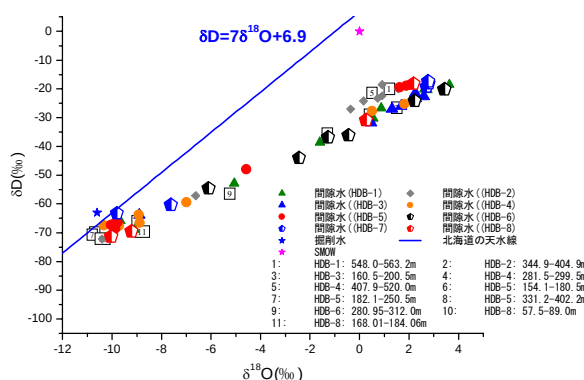


図3.4.2-37 ボーリング調査中に採水された地下水とコアから抽出した間隙水の酸素・水素同位体比

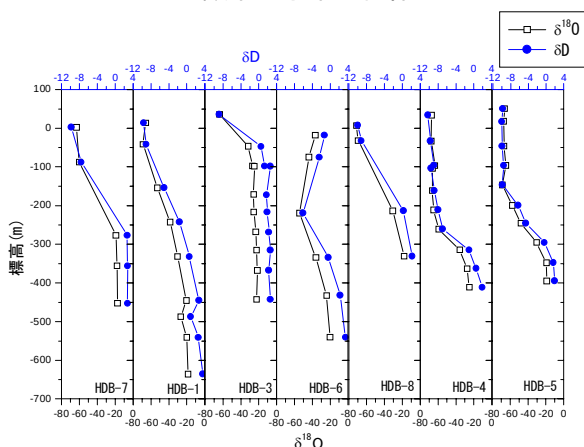


図3.4.2-38 各ボーリング孔の酸素・水素同位体比の深度プロファイル

酸素・水素同位体比の結果より、表層部の地下水は天水線上にプロットされることから、そのほとんどは表層から涵養した地下水であると考えられる。また、酸素・水素同位体比の深度プロファイルについては、どのボーリング孔も深度が深

くなるにつれ地下水の酸素・水素同位体比は重くなる傾向を示す。特に、HDB-1, 3孔に比べ、HDB-4, 5孔は深い深度まで、天水起源の影響を受けていると考えられる酸素・水素同位体比の軽い地下水が分布している。このことは、本地域の地下水の水質分布で認められた淡水系地下水と塩水系地下水の境界深度の分布とよく一致しており、本地域の地質構造の影響を反映している可能性が考えられる。

iii) 地球化学モデルの構築

これまでに取得された地下水や間隙水の地球化学特性をもとに、地層処分研究開発の人工バリアの設計手法や核種移行評価手法の適用性確認などで必要と考えられる原位置におけるpHや酸化還元電位(Eh)などの地球化学特性に関する評価手法についての検討を行った。さらに、研究所設置場所周辺の地下水については、これまでの調査で溶存成分濃度の高い地下水が存在する深度が、ボーリング孔毎に異なることが分かっているため、その分布に関する検討を行った。

(a) 原位置における地球化学特性の推定

ボーリング孔掘削時に使用する掘削水の地層中への浸入や、地下水に溶存している二酸化炭素やメタンガスなどが脱ガスすることにより、採水した地下水は原位置の地下水とは異なる地球化学特性を示すことが分かっている(図3.4.2-39)。これらの掘削水の浸入や脱ガスの影響を見積り、採水した地下水の化学組成をもとに、原位置におけるpHや酸化還元電位(Eh)などを推定する手法について検討を行った。

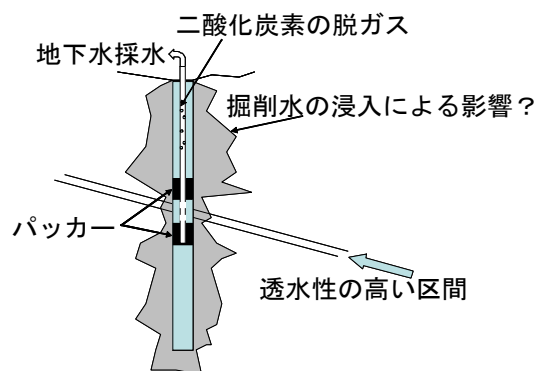


図3.4.2-39 掘削水の浸入の影響

原位置におけるpHの推定にあたっては、地下水の採水時に溶存ガス成分のひとつである二酸化

炭素の脱ガスにより、pHの上昇や炭素濃度の減少が生じることから、原位置におけるpHを推定するためには、これらの補正が必要となる。ここでは、ボーリング調査中に採水された地下水組成（上述の手法で推定した組成）に、方解石と化学的に平衡になるまで二酸化炭素を付加することによって、原位置における地下水のpHを推定した。その結果、採水時に地上にて測定したpHが6.87であるのに対し、地球化学計算により推定された原位置地下水のpHは約6.4前後である。

(b) 塩水系地下水の境界の分布

淡水系と塩水系の地下水の境界深度の分布については、ボーリング調査中に採水した地下水とコアから抽出した間隙水をもとに推定を行った。図3.4.2-40に深度とCl⁻濃度（Cl⁻濃度と塩濃度には相関があると仮定する）の関係を示す。この結果から、研究所設置場所周辺の地下水には以下の特徴が認められる。

1. HDB-3孔を除くと標高-200 m以深ではCl⁻濃度が数100 mg l⁻¹であり、Cl⁻濃度が高い地下水は確認されない。
2. Cl⁻濃度は、深度が深くなるに伴って高くなるように漸移する。
3. HDB-3孔では相対的に他のボーリング孔に比べ浅い深度からCl⁻濃度が高い地下水が認められる。

塩水系地下水をTotal dissolved solid:TDSが10,000 mg l⁻¹以上であると定義(Carpenter, 1978)し、研究所設置場所周辺の塩水系地下水の三次元的分布をモデル化することを試みたが、取得されている地下水の地球化学特性の情報量では、塩水系地下水の三次元的分布を示すモデルが有する不確実性が大きいと考えられる。今後は、地層の分布や大曲断層、割れ目帯などの地質構造や地下水流動解析結果などを組み合わせたモデル化を実施する必要がある。さらに、物理探査で得られている比抵抗は、地下の地質構造ではなく、地下水の水質を反映したと考えられる結果が得られていることから、比抵抗分布を合せて検討することで、塩水系地下水の三次元的分布の不確実性を低減できる可能性があると考えられる。

③ まとめ

・コアから抽出された間隙水の化学組成、酸素・水素同位体比などの地球化学特性は、本地域にお

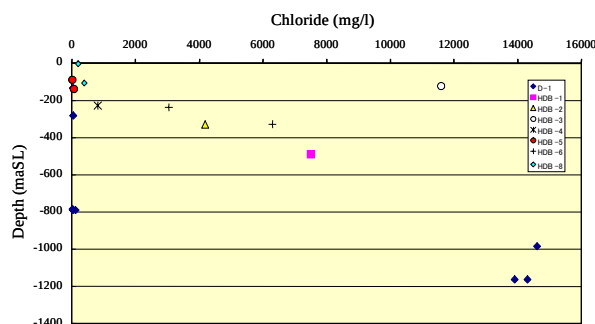


図3.4.2-40 Cl⁻濃度の深度分布

ける地下水流動を推定するうえで有用であることが示されつつある。

・地表において生じる二酸化炭素の脱ガスのため地上部で測定されるpHは低くなることから、地球化学計算により原位置での地下水のpHを推定することを試みた。その結果、約0.5の差が生じた。今後は、推定されたpHの妥当性を評価するために、原位置での地下水のpHや酸化還元電位を取得する予定である。

参考文献

- Carpenter A. B. (1978) : Origins and chemical evolution of brines in sedimentary basins, pp. 78-88. Oklahoma Geological Survey.
- KUNIMARU, T. and Richard M. (2003) : Isotopic study of the groundwater at Horonobe, northern Hokkaido, Japan, *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 67 pp. A239.
- 國丸貴紀(2003) : 幌延深地層研究計画～地下水の地球化学特性調査の現状～, 日本原子力学会第19回バックエンド夏季セミナー資料集, pp2. 19-1 - 2. 19-3.
- 國丸貴紀, 竹内竜史, 瀬尾昭治(2003) : 幌延深地層研究計画における地下水の地球化学特性について, 日本地下水学会2003年秋季講演会講演要旨, pp36-39.

2) 地質環境モニタリング技術の開発

2-1) ボーリング孔を用いたモニタリング技術 開発

① 課題と計画の概要

ボーリング孔を用いたモニタリング技術開発では、地下施設建設前から地下水の水圧や水質などの観測を開始し、周辺でのボーリング調査などの活動や地下施設の建設による影響あるいは季節変動などの長期的な自然変動を系統的に観測し、地下水の水理モデルや地球化学モデルの構築および地下水流動解析等の解析に必要なデータや解析結果の妥当性を検証するためのデータを取得する。また、これら観測を通して、既存の地下水の水圧・水質長期モニタリング装置の適用性を確認するとともに、必要に応じて、装置の開発・改良を行い、上述したモニタリング結果と合わせて地下水の水圧・水質長期モニタリング技術を体系的に構築することを目的としている。

本研究では、平成 13 年度に幌延深地層研究計画において適用可能な地下水の水圧・水質長期モニタリング装置に関する国内外の事例調査を行い、孔内閉鎖区間内に直結可能なプローブを用いて水圧観測・採水を実施する方式と孔内閉鎖区間から地上につながるスタンドパイプあるいはチューブを利用して水位・水圧観測・採水を実施する方式双方に適用の可能性の高い機器が開発されていることを確認している（サイクル機構, 2002）。平成 14 年度には HDB-1 孔において孔内閉鎖区間内に直結可能なプローブを用いて水圧観測・採水を実施する方式を採用しているカナダ Westbay 社製の Multi Piezometric System（以下 MP システム）を設置し、平成 14 年 12 月から平成 15 年 2 月までの期間に地下水水圧の連続観測を実施した（サイクル機構, 2003）。

平成 15 年度は、HDB-1 孔において MP システムによる地下水水圧の連続観測を本格的に開始するとともに、新たに HDB-3, 4 孔に同システムを設置し、HDB-3 孔で地下水水圧の連続観測、HDB-4 孔で地下水水質観測のための採水を実施した。また、HDB-2 孔には、孔内閉鎖区間から地上につながるスタンドパイプを利用して水位・水圧観測・採水を実施する方式を採用しているスイス Solexperts 社製の Stand-Pipe Multi-Packer system（以下、SPMP システム）を設置し、地下水水圧の連続観測を開始

した。各孔での現在の観測位置を図 3.4.2-41, 42 に示す。

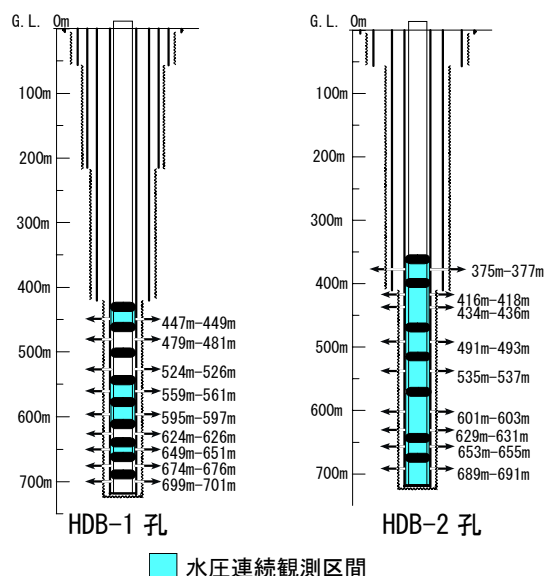


図 3.4.2-41 観測区間（HDB-1, 2 孔）

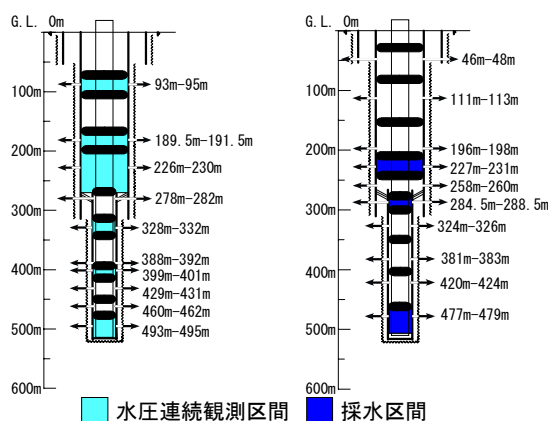


図 3.4.2-42 観測区間（HDB-3, 4 孔）

② これまでの成果

i) 地下水水圧の観測

地下水水圧の長期観測については、異なる測定概念を有する異なるシステムの適用性を確認することを目的として、HDB-1, 3 孔に設置した MP システム、HDB-2 孔に設置した SPMP システムでの地下水水圧の連続観測を開始した。SPMP システムの概念を図 3.4.2-43 に示す。

前述したとおり、スタンドパイプ方式を採用している SPMP システムは、パイプ内の水位の変化を観測することが基本的な考え方となっている。しかしながら、同システムを設置した HDB-2 孔では高水圧区間があってパイプ内の水位を計測すること

が難しいため、スタンドパイプ内に閉鎖機構を付加し、水圧観測が可能な構造としている。

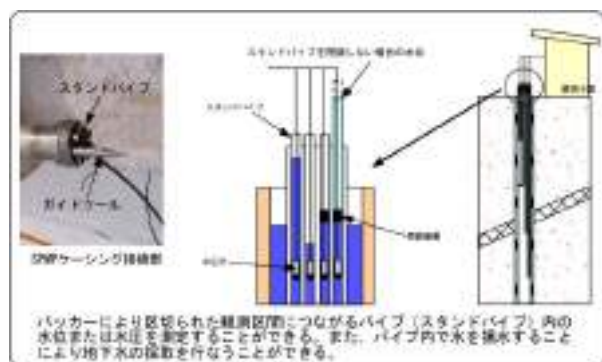


図 3.4.2-43 SPMP システム概念図

ii) 長期モニタリング装置を用いた地下水の採水

ボーリング調査中に採水される地下水は、ボーリング孔掘削用水の影響を十分に排除できていない問題がある。一方、長期モニタリング装置を用いて地下水を採水する方法では、ボーリング孔を保護するために設置しているケーシングパイプや、それを固定するためのセメントの影響を受けることが予想されるが、その程度については十分に検討がなされていない。そこで、本試験では、HDB-4 孔においてボーリング調査終了後に設置した MP システムを用いて地下水の採水を実施し、ボーリング調査中に採水した地下水と長期モニタリング装置を用いて採水した地下水との比較を行い、両手法の適用性について検討を行った。

(a) 地下水の採水方法

地下水採水対象区間は、ボーリング調査中の水理試験において透水性が高く、地下水が採水できた区間である区間 No. 4 (224.43～233.78 m)、No. 6 (281.15～290.76 m)、No. 10 (475.25～484.61 m) の 3 区間を設定した。

・孔内水の置換

各区間からの地下水採水前に、採水対象区間内の孔内水を排除し、原位置の地下水への置換を実施した。区間 No. 4 については、ポンプによる連続的な揚水、区間 No. 6 については、毎分 1 リットル程度の湧水、区間 No. 10 については、ポンプにより水位低下させ、その後回復させることを繰り返す方法により、区間内の地下水を置換した。

・連続揚水中の pH、電気伝導度のモニタリング

連続揚水中は、約 10 リットル 毎に孔口（地上）で採取した水について pH と電気伝導度を測定した。その結果を図 3.4.2-44 に示す。

特に区間 No. 4 について、採水中の pH の変化に着目すると、累積揚水量 430 リットルまでは pH8.0 以下に対し、累積揚水量 440 リットル以後は pH9.0 前後へと急激に変化していることが確認できる。また、電気伝導度も同様に累積揚水量 430 リットルまでは 3.7 mS cm^{-1} 以下で、累積揚水量 440 リットル以後は 4.0 mS cm^{-1} 以上へと比較的急激な変化が認められる。累積揚水量 430～440 リットルは、MP ケーシングの長さ 185 m に残留していた水の体積（約 460 リットル）に近いことから、ポンプ採水によって MP ケーシング内に残留していた水が排出され、地下水へと置換されたと判断できる。なお、累積揚水量 200 リットルまでの pH および電気伝導度の減少傾向は、区間 No. 4 の連続採水に先立ち実施した区間 No. 6 での採水の際に MP ケーシング内に残留した区間 No. 6 の地下水が徐々に排出されているためと考えられる。

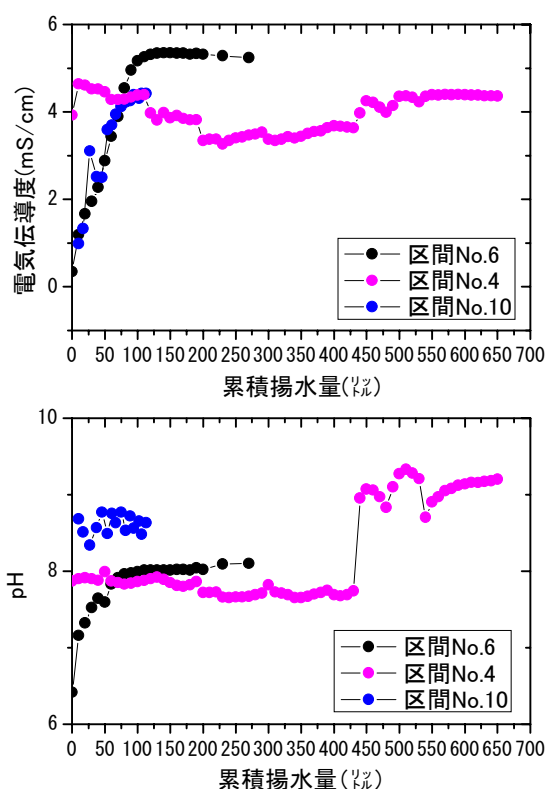


図 3.4.2-44 連続揚水中のモニタリング結果

(b) ボーリング調査中に採水した地下水との比較

地下水採水対象区間内の地下水を十分に連続揚水等によって地下水と置換した後、MP システム専

用の採水ボトルを用いて分析に必要な地下水を採水した。

ボーリング調査中に採水した地下水の分析結果と本調査で採水、分析した結果を図 3.4.2-45 のヘキサダイアグラムに示す。同図から、ボーリング調査中に採水した地下水の pH は 7.0～7.5 程度にあるのに対し、長期モニタリング装置を用いて採水した地下水では 8.2～8.6 と高くなっていることがわかる。一方、ヘキサダイアグラムで、ボーリング調査中に採水した地下水と長期モニタリング装置を用いて採水した地下水を比較すると、両者において顕著な変化は認められないが、 HCO_3^- については後者のほうがその濃度が低下している。

これらの違いは、ボーリング調査中に採水された地下水は地層から直接採水しているのに対し、長期モニタリング装置を用いて採水した地下水は、ケーシングパイプやそれを固定するために用いたセメントなどの影響を受けていることを示していると考えられる。

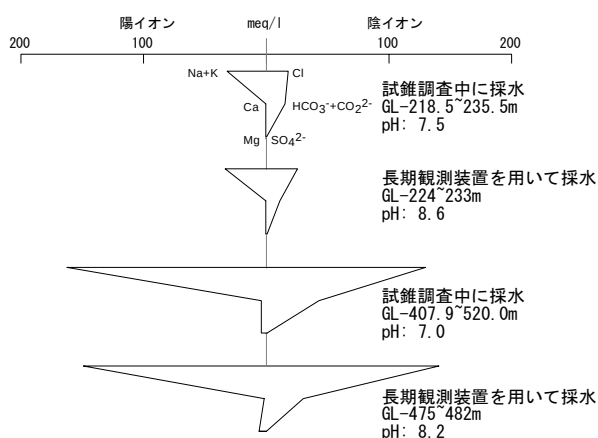


図 3.4.2-45 地下水水質分析結果

③ まとめ

平成 15 年度は、2 種類の地下水の水圧・水質長期モニタリング装置を設置し、地下水水圧の連続観測や地下水水質の観測のための採水を実施した。

今後は、既にモニタリング装置を設置した各孔で地下水水圧の連続観測や地下水の採水を継続するとともに、これら装置の長期的な耐久性や観測精度などの確認、遠隔地での観測体制に関する検討を実施する予定である。また、平成 15 年度にボーリング調査を実施した HDB-6, 7, 8 孔に地下水の水圧・水質長期モニタリング装置を設置し、データの取得、装置の適用性の確認を実施する予定である。

参考文献

サイクル機構 (2002)：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発—平成 13 年度報告書—，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2002-003.

サイクル機構 (2003)：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発—平成 14 年度報告書—，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2003-004.

2-2) 遠隔監視システムの開発

① 課題と計画の概要

地下の構造や物性の変化を遠隔から監視するための技術開発の一環として、陸域変動による地質環境の変化に関する研究として技術開発が進められているアクロス<ACROSS:Accurately Controlled Routinely Operated Signal System>(國友ほか, 1999; 熊澤ほか, 2000; 中島ほか, 2000; 横山ほか, 2000; 陸域地下構造フロンティア研究プロジェクト, 2001)を応用した遠隔監視システムを構築する。ここで構築したシステムを地下施設の建設前から建設中、建設後まで稼動することにより地下施設の建設に伴う地下施設周辺の構造や物性の变化などを観測し、同技術の有効性を確認する。本システムは、位相および振幅を精密にコントロールした連続波信号と独自の解析手法を用いることにより、従来の手法より桁違いに精度良く地下の構造や状態の把握を実現させるシステムである(図 3.4.2-46)。

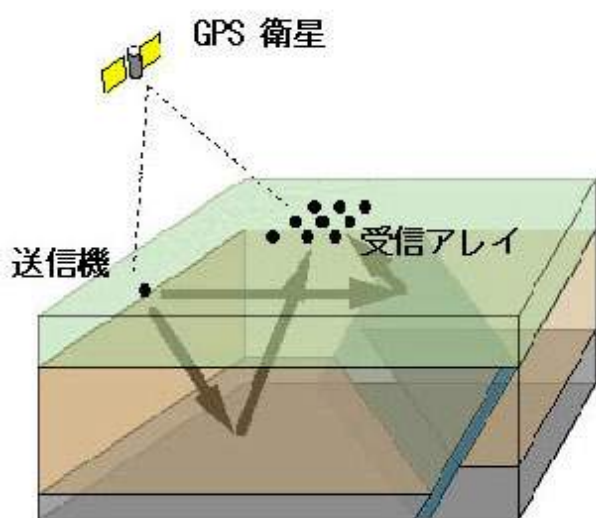


図 3.4.2-46 遠隔監視システムの例

本システムの開発においては、まず送信装置から精度の高い信号を送信する技術の改良と、受信装置が信号を精度良く受信できるように送信装置との同期方法などの改良を行う。また、地下の情報をもより多く取得するために、広い周波数範囲をカバーする計測技術の改良を行う。その後、モニタリングシステム全体の調整・設置を行い、データの連続取得を開始し、地下施設建設に対する感度の確認などのシステムの有効性の検証と改良を

行う予定である。

② これまでの成果

平成 15 年度は、平成 14 年度に実施した弾性波ア
クロスおよび電磁アクロス観測装置の設置に適し
た場所を選定するための、環境ノイズデータの解
析結果をもとに、実際にアクロス信号を送信した
場合の、信号強度の空間分布や時間変化検出に必
要な観測時間の見積りなどを行い、設置場所の検
討、弾性波アクロスの送信装置の移設の検討、電
磁波アクロスの送受信装置の整備等、遠隔監視シ
ステムの整備を行った。

③ 今後の予定

平成 16 年度に遠隔監視システムの設置場所を選定し、弾性波アクロスの受信装置の設置、電磁波アクロスの送受信装置の設置を行い、試験観測を開始する予定である。また、平成 17 年度には弾性波アクロス送信装置を設置し、地下施設建設前の状態を把握するための観測を開始する予定である。

参考文献

- 熊澤峰夫, 國友孝洋, 横山由紀子, 中島崇裕, 鶴我佳代子
(2000) : アクロス : 理論と技術開発, および将来展望.
サイクル機構技報, No. 9, pp. 115-129.
- 國友孝洋, 熊澤峰夫, 山岡新春(1999) : ACROSS における
周波数変調の有効性と送信装置特性を考慮した変調
波形の最適化, 日本地震学会講演予稿集, p. 171.
- 中島崇裕, 國友孝洋, 熊澤峰夫, 横山由紀子(2000) : 電
磁アクロスの開発と送信実験, 地震研究所彙報, 75,
pp. 229-244.
- 陸域地下構造フロンティア研究プロジェクト(2001) :
「陸域地下構造フロンティア研究」報告書, サイクル
機構技術資料, JNC TN7400 2001-008.
- 横山由紀子, 熊澤峰夫, 國友孝洋, 中島崇裕(2000) : 精
密に制御された電磁波を用いた 3 次元精密構造探査の
ためのデジタル信号波形の設計, 地震研究所彙報,
75, pp. 265-282.

3) 深地層の工学技術の基礎に関する研究

① 課題と計画の概要

幌延深地層研究計画における地下施設は、深度500mを目途に立坑を設置し、複数の深度に水平坑道を展開する計画である。

地下施設の設計・施工計画においては、研究環境を確保し、施設を安全に建設・維持できることが基本的な要件であるため、地下施設における調査研究の内容のほか、地下施設の安全性を確保するために岩盤特性に応じた空洞の安定性を評価すると共に、可燃性ガス対策や通気等の防災面を考慮した検討を行っている。また、地下施設の設計にあたっては、一般の人々が深地層を体験する場であることも考慮して進めている。

② これまでの成果

i) 岩盤の物理性状および地質環境の特徴

地質は新第三紀の堆積岩で、上部が珪藻質泥岩(声間層)、下部が硬質泥岩・硬質頁岩(稚内層)である。

幌延の泥岩は、自然含水比が高く、単位体積重量が小さく、強度は低い、いわゆる軟岩に属する。また、透水性は低く、膨張性の粘土鉱物の含有率が低いため膨潤性に乏しく、中～高程度の耐久性があるという特徴を有している。

地質環境の特徴としては、メタンガスを主成分とする可燃性ガスを賦存し、地下水は高い塩分濃度を有していることがあげられる。

岩盤の物理性状および地質環境の特徴を表3.4.2-6に示す。

表 3.4.2-6 岩盤の物理性状・地質環境の特徴

項 目	物性値等	備 考
自然含水比	40～60%	
単位体積重量	15～19kN/m ³	
一軸圧縮強度	3～30MPa	ボーリングコア
透 水 係 数	10 ⁻⁹ ～10 ⁻¹² m/s	
膨 潤 性	0.04%以下	膨張ひずみ指数
耐 久 性	90%以上	耐スレーキング性指数
ガ ス	可燃性ガス有	主成分はメタンガス
地 下 水	塩水系	

ii) 地下施設の配置計画

坑道の配置は、試験研究に必要な領域を確保し、空洞を安全に建設・維持できることを考慮して、基本レイアウトを図3.4.2-47に示す計画としている。

この基本レイアウトは第2段階終了時点を示しており、第3段階においても、試験研究の内容に応じてさらに水平坑道を展開する計画である。

今後、平成15年度に地下施設近傍で掘削したHDB-6孔のボーリング調査結果を反映するとともに、通気対策や排水処理の検討結果、第2・第3段階における研究計画の詳細な検討により、坑道の設定深度・配置や工程を具体化させていく予定である。

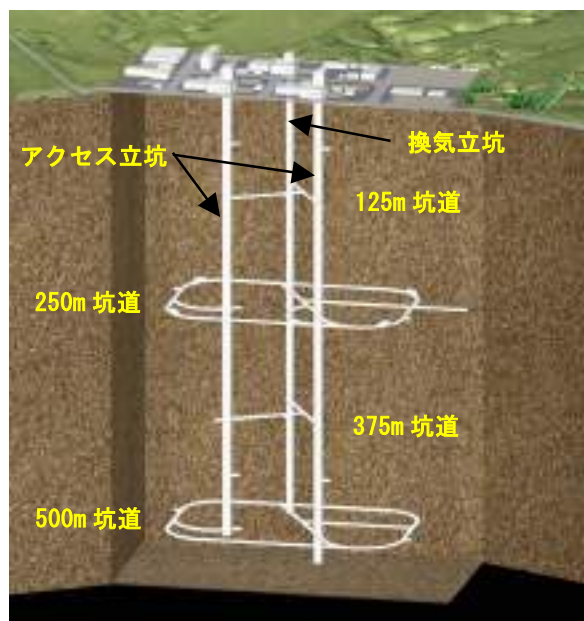


図 3.4.2-47 地下施設のイメージ

a) 立坑

地下施設へのアクセス立坑を2本、換気立坑を1本とし、アクセス立坑を入気立坑、換気立坑を排気立坑とした。第2段階は、2本のアクセス立坑を水平坑道掘削の作業立坑として利用する。

第3段階においては、アクセス立坑(東)の立坑櫓を撤去後、昇降設備を設置し、アクセス立坑(西)は立坑櫓を残置する計画である。立坑の諸元を表3.4.2-7に示す。

表 3.4.2-7 立坑の諸元

名 称	内径 (m)	延長 (m)	第3段階の設備配置計画	
			坑底設備	地上設備
アクセス立坑(東)	6.5	530	排水ポンプ	昇降設備
アクセス立坑(西)	6.5	505	—	立坑櫓残置
換気立坑	4.5	500	—	換気ファン
計		1,535		

b) 水平坑道

主要な水平坑道を深度 125m, 250m, 375m, 500m の4深度に展開した。水平坑道の諸元を表 3.4.2-8 に示す。

表 3.4.2-8 水平坑道の諸元

名 称	内空幅 (m)	延長 (m)	備 考
125m 坑道	4	121	一時避難所含む
250m 坑道	4~7	891	大試錐座, 一時避難所含む
375m 坑道	4	121	一時避難所含む
500m 坑道	4	719	一時避難所含む
小試錐座	4	17	深度 62.5m, 437.5m
計		1,869	

・ 500m 坑道

地層処分の技術的信頼性を実際の深部環境（堆積岩系：幌延）に適用し確認するため、地層処分において想定される深度（300m 以深）や地層の力学的特性による施工性や坑道維持の観点等から、これまで目途としてきている最大深度 500m に水平坑道を配置した。

・ 250m 坑道

各種地質環境特性の深度依存性の確認や異なる地質区分（岩相）での試験研究および早い段階から試験坑道を確保して長期間の試験研究に供する目的から、中間深度として仮に深度 250m に水平坑道を配置した。

・ 125m 坑道, 375m 坑道

試験研究の予備的な実施場所や地下施設建設時の施工性（給排水や通気設備等の設置場所）を確保することを目的として深度 125m と 375m に水平坑道を配置した。

iii) 掘削計画

立坑の掘削工法は自由断面掘削機または発破による全断面掘下がり工法、水平坑道の掘削工法は自由断面掘削機による全断面掘削工法を計画している。

幌延の泥岩は軟岩に属し、機械掘削が可能な岩盤強度であるが、立坑は機械工法による大深度立坑の全断面掘削の施工実績がないため、その適用性について検討を進めている。立坑掘削工法の比較検討項目を表 3.4.2-9 に示す。

支保工法は、立坑ではショートステップ工法、水平坑道では NATM を計画している。

地下施設の掘削手順は、3本の立坑の掘削を地表

から同時に開始し、水平坑道の深度に到達した際に、順次、水平坑道の掘削を行い所定の深度まで掘り下げる計画である。換気立坑は単独で所定の深度まで先行して掘り下げる計画である。

表 3.4.2-9 立坑掘削工法の比較検討項目

掘 削 工 法	機械工法	発破工法
施 工 実 績	△	○
施 工 性	△	○
周辺岩盤への影響	○	△
周 辺 環 境 保 全	○	△
安 全 性	○	△
工 期	□	□
工 事 費	□	□

（凡例）○：相対的に有利, △：相対的に劣る, □：同程度

iv) 空洞の安定性

平成 14 年度までに地下施設予定位置近傍で実施した試錐調査（HDB-1, 3 孔）で得られた力学試験結果等に基づいて条件を設定し、空洞掘削手順を考慮した解析により空洞安定性の検討を行った。

a) 地山区分および岩盤物性値の設定

地山区分については、空洞掘削時の安定性に影響を及ぼすと考えられる岩盤の工学的性質（RQD、割れ目頻度等）に着目し、声間層・稚内層の岩盤を細区分した。

地山区分に対する岩盤物性値の設定にあたっては、岩石力学試験結果のばらつきによる地質の不確実性を考慮して、一軸圧縮強度および弾性係数において区間最小値を採用した。一方、単位体積重量およびポアソン比については、地圧や数値解析の精度向上のため、平均値を採用した。粘着力については、モール・クーロンの破壊規準との整合性を図るため、一軸圧縮強度と内部摩擦角から算定した。引張強度については、一軸圧縮強度の 1/10 の値を採用した。設定した地山区分と岩盤物性値を表 3.4.2-10 に示す。

なお、一軸圧縮強度および弾性係数については、コアと原位置岩盤の物性の差を、各々の弾性波（P 波）伝播速度（原位置岩盤では試錐孔における PS 検層結果を使用）の低減率により評価し、物性値に反映した。また、岩石力学試験データが存在しない地山区分に対しては、P 波速度との相関関係から補間したデータを採用した。

初期応力については、鉛直応力を土被り圧相当とし、HDB-3 試錐孔において実施した水圧破碎試験に

よる応力測定結果に基づいて、水平面内主応力の鉛直応力に対する比率を SHmax (水平最大) : SHmin (水平最小) : Sv (鉛直) = 1.2 : 0.8 : 1.0 と設定した。

表 3. 4. 2-10 地山区分および岩盤物性値

地山区分	地層名	E.L. m	深度	単位体積 重量 kN/m ³	粘着力 MPa	内部 摩擦角 °	弾性係数 MPa	ポアソン 比	一軸圧縮 強度 MPa	引張 強度 MPa
1	2-I	60~35	25	14.8	0.1	24.1	8.3	0.30	0.2	0.02
2-I	2-II	35~-20	80	14.9	0.3	8.1	223.2	0.18	0.7	0.07
2-II	3	-20~-79	139	14.9	0.9	8.1	337.3	0.18	2.1	0.21
3	4	-79~-159	219	14.4	1.0	16.5	365.5	0.12	2.8	0.28
4	5	-159~-239	299	15.4	1.3	19.6	626.0	0.13	3.7	0.37
5	6	-239~-279	339	14.9	0.9	16.3	449.5	0.14	2.5	0.25
6	7	-279~-300	360	14.9	1.2	18.2	522.2	0.14	3.2	0.32
7	8	-300~-339	399	16.8	1.1	16.0	845.6	0.10	2.9	0.29
8	9	-339~-369	429	18.6	1.1	16.5	1032.4	0.11	3.0	0.30
9	10	-369~-389	449	18.0	1.9	20.5	1177.0	0.11	5.5	0.55
10	11	-389~-419	479	18.1	2.0	20.8	1153.0	0.12	5.7	0.57
11	12	-419~-474	534	18.0	1.7	19.5	1116.2	0.11	4.8	0.48
12	13	-474~-489	549	18.4	3.8	19.2	2300.0	0.18	10.6	1.06
13	14	-489~-574	634	19.3	3.7	27.5	2520.0	0.24	12.2	1.22
14	15	-574~-584	644	18.9	3.4	25.1	2346.9	0.22	10.8	1.08
15		-584~-699	759	19.1	3.2	29.3	2410.0	0.23	11.1	1.11

* 表中の網掛け部はデータ補間による設定

b) 支保部材の強度

支保部材として使用するコンクリートの設計基準強度 f_{ck}' とそれに対応する許容圧縮応力度を表 3. 4. 2-11, 12 に示す。設計基準強度については、一般的に用いられる普通コンクリートの強度（覆工コンクリートで 18~40MPa の 4 水準、吹付けコンクリートでは 18, 36MPa の 2 水準）に設定した。覆工コンクリートおよび吹付けコンクリートの長期の許容圧

縮応力度は、土木学会 (2002) による無筋コンクリートの基準に準拠した。吹付けコンクリートの 1 次支保については、日本鉄道建設公団 (1996) による短期の許容圧縮応力度に準拠した。

鋼製支保工については、表 3. 4. 2-13 に示すとおり、標準規格の SS400 および高規格の HT590 を採用した。長期の許容応力度については、土木学会 (1996) による鋼材に準拠し、1 次支保については日本鉄道建設公団 (1996) による短期の許容応力度に準拠した。

c) 挙動予測解析手法および解析モデル

解析手法としては、弾完全塑性モデルを用いた二

表 3. 4. 2-11 覆工コンクリートの許容圧縮応力度

設計基準強度 f_{ck}' (MPa)	18	24	30	40
許容圧縮応力度 (長期) (MPa)	4.5	6.0	7.5	10.0

表 3. 4. 2-12 吹付けコンクリートの許容圧縮応力度

仕 様	設計基準強度	許容圧縮応力度 (MPa)	
	f_{ck}' (MPa)	短期 ($f_{ck}' / 1.3$)	長期 ($f_{ck}' / 4$)
普 通	18	13.8	4.5
高強度	36	27.7	9.0

表 3. 4. 2-13 鋼製支保工 (鋼材) の許容引張応力度

仕 様	許容引張応力度 (MPa)	
	短 期	長 期
SS400 (標準鋼)	400	160
HT590 (高張力鋼)	590	236

次元有限要素法を採用した。解析にあたっては、切羽の進行に伴って変化していく状態を考慮するため、実際の施工手順に従って掘削解放力を分割して順次作用させる逐次掘削解析を用いた。施工手順は、立坑では掘削長 1m を 2 回繰り返した後に覆工コンクリートを打設するショートステップ工法を、水平坑道

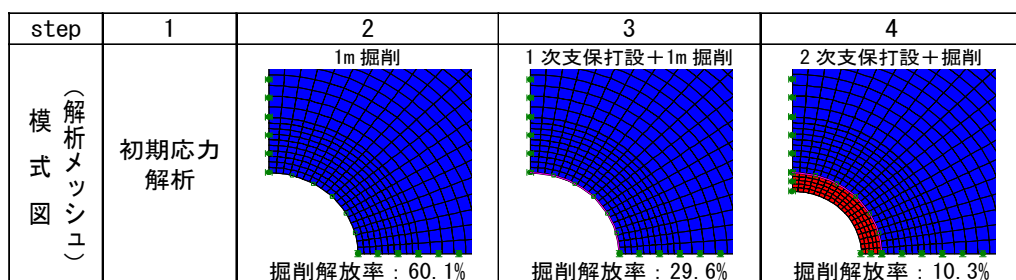


図 3. 4. 2-48 解析上の掘削手順 (立坑・二重支保の場合)

では吹付けコンクリートによるインバート閉合を併用した掘削長 1m の全断面工法による NATM を標準工法としてモデル化した。図 3.4.2-48 に立坑で二重支保（吹付けコンクリート等の 1 次支保と覆工コン

クリートによる 2 次支保）を採用した場合の解析上の掘削手順と、作用させる掘削解放率を示す。なお、切羽進行に伴う掘削解放率は、トンネル縦断面での軸対称モデルによる有限要素解析における壁面での

表 3.4.2-14 挙動予測解析結果・標準支保パターン一覧表（アクセス立坑）

地山区分	地層名称	深度 m	最終(二次)支保				一 次 支 保								塑性領域		せん断ひずみ			支保仕様		
			覆工コンクリート				吹付けコンクリート				鋼製支保工				最大幅 m	0.4D m	γ _{max} %	限界ひずみ 上段値 中央値				
			応力 MPa	f _{ck} MPa	長期 MPa	厚さ cm	応力 MPa	f _{ck} MPa	長期 MPa	短期 MPa	厚さ cm	応力 MPa	長期 MPa	短期 MPa				部材				
2-Ⅰ	声問層	47	1.9	18	4.5	40	—	—	—	—	36	160	400	NH125	1.0	2.9	0.8	2.4	1.0	覆工コンクリートのみ		
		80	3.3								64				2.5		1.4					
2-Ⅱ		139	5.3	24	6.0						84				1.1		1.5	2.2	0.9		掘進長: 1m/ステップ 覆工長: 2m/ステップ	
3		192	7.3	30	7.5						102				0.9		1.8	2.0	0.9			
		219	8.5	40	10.0						105			1.0	1.9							
4		240	7.5	30	7.5						108			0.6	1.3		1.8	0.8				
		299	7.2								387			1.0	1.7							
5		339	9.5	17.1	36.0						9.0			27.7	408		1.8	2.5	2.0		0.8	吹付けコンクリート(1次支保) 覆工コンクリート(2次支保) 掘削長: 1m/ステップ 吹付けコンクリート: 1m/ステップ 覆工長: 2m/ステップ
6		360	9.1	17.0											410		1.3	2.3	1.9		0.8	
7		399	9.4	10.8	18.0						4.5			13.8	458		2.3	2.0	1.6		0.7	
8		429	9.9	11.5											494		2.5	2.0	1.6		0.7	
9	449	8.9	10.5	36.0	9.0	27.7	459	1.3	1.7	1.5	0.6											
10	479	9.5	18.3				462	1.1	1.8	1.5	0.7											
11	530	10.0	60	20.5	36.0	9.0	27.7	512	1.6	3.2	2.0	1.5	0.7									

鋼製支保工⇒NH125: H 型钢 NH125×125 (SS400)、NH150: H 型钢 NH150×150 (SS400)、HH154: 高規格 H 型钢 NH154×151 (HT590)

表 3.4.2-15 挙動予測解析結果・標準支保パターン一覧表（水平坑道：側圧係数 1.2）

地山区分	地層名称	深度(m) 部位	一次支保												二次支保		塑性領域		せん断ひずみ			支 保 仕 様			
			アーチ部						インバート部						アーチ部	インバート部	f _{ck} 長期	厚さ	最大幅	γ _{max}	限界ひずみ %				
			吹付けコンクリート			鋼製支保工			吹付けコンクリート			鋼製支保工			吹付けコンクリート						0.4D		%	上限値	中央値
			線応力	f _{ck} 長期 短期	厚さ	線応力	f _{ck} 長期 短期	厚さ	線応力	f _{ck} 長期 短期	厚さ	線応力	f _{ck} 長期 短期	部材	線応力	線応力									
MPa	MPa	cm	MPa	MPa		MPa	MPa	cm	MPa	MPa			MPa	MPa											
2-II		125 標準部	2.8	18.0 4.5 13.8		215			2.8	18.0 4.5 13.8					—		—	—	0.9	1.8	1.9	3.9	1.7	吹付けコンクリート、インバート吹付、 鋼製支保工	
4	声問層	250 標準部	6.3			269			5.6						0.5		18.0 4.5	5.0	0.8	1.8	2.0		3.2	1.4	吹付けコンクリート、インバート吹付、 鋼製支保工(1次支保) 吹付けコンクリート(2次支保)
		250 大試錐座	12.7	36.0 9.0 27.7	20	470	236 590	HH154	4.6	36.0 9.0 27.7	20				5.3	36.0 9.0	10.0	1.4	3.0	2.6					
7	稚内層	375 標準部	9.1			366			8.1						1.6		18.0 4.5	5.0	1.6		2.4	2.9	1.2		
11		500 標準部	11.3			447			7.9			339	236 590	HH154	2.8	1.6		5.0	1.3		2.6	2.7	1.2	上記+インバート支保工 (2次支保)	

鋼製支保工⇒NH125: H 型钢 NH125×125 (SS400)、NH150: H 型钢 NH150×150 (SS400)、HH154: 高規格 H 型钢 NH154×151 (HT590)

＜アクセス立坑（深度 340m 部）＞

＜水平坑道（深度 500m 部）＞

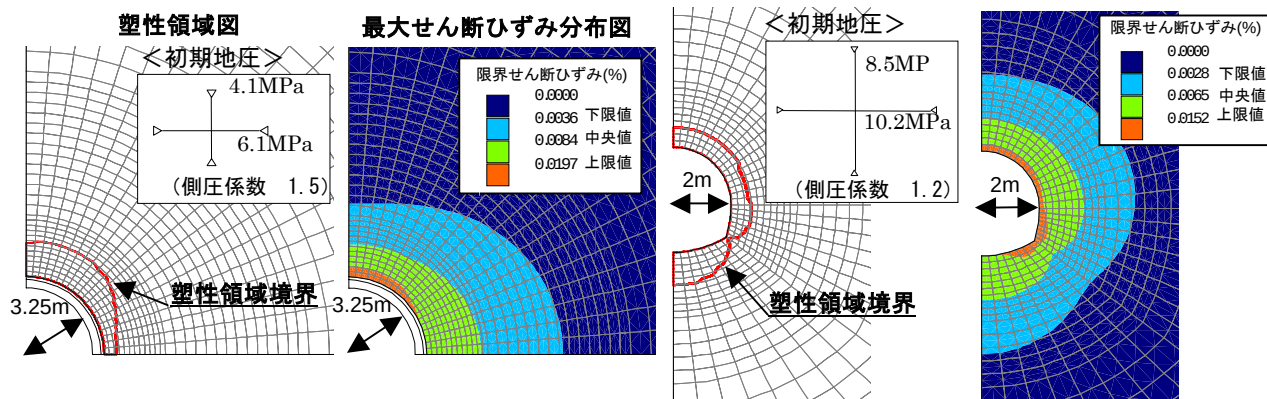
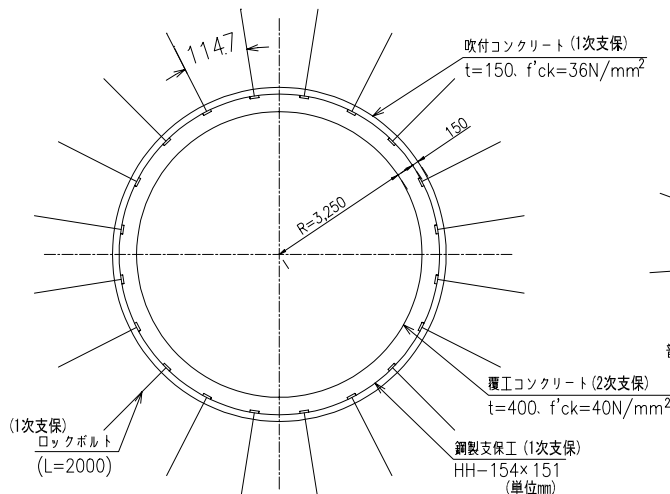


図 3.4.2-49 塑性領域および最大せん断ひずみ分布

<アクセス立坑（深度 340m 部）>



<水平坑道（深度 500m 部）>

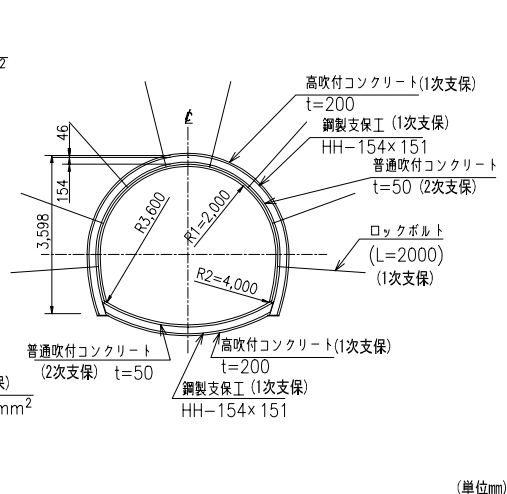


図 3.4.2-50 標準支保パターンの例

変位発生量の比率から算定した。

解析において、岩盤およびコンクリートは平面ひずみ要素でモデル化し、鋼製支保工についてはビーム要素でモデル化するとともに、吹付けコンクリートが硬化した後に一体化して機能することを考慮して、吹付けコンクリートの内側に配置した。

d) 支保設計およびまとめ

支保部材の設計にあたっては、挙動予測解析結果に基づく許容応力度設計法を基本とした。解析により支保部材（覆工コンクリート・吹付けコンクリート・鋼製支保工）に発生する応力を算定し、それらが許容応力度を超えないようにするとともに、空洞周辺に発生する塑性領域を既往のトンネル施工実績から設定した許容値 0.4D（D：掘削径）以内に収まるように、支保部材の選定を行った。

表 3.4.2-14, 15 に挙動予測解析結果とそれに基づいて設定した支保の仕様を示す。また、図 3.4.2-49 に解析により得られた塑性領域の分布と最大せん断ひずみ分布の一例を、図 3.4.2-50 に当該箇所での支保仕様を反映した断面図を示す。解析結果から、空洞掘削に伴い発生する塑性領域の幅は、立坑で最大 2.5m 程度、水平坑道で最大 1.6m 程度と推定される。なお、掘削時の支保仕様部材に発生する応力が長期許容応力度を超える場合については、これを満足するように仕様を追加した。具体的には、立坑では掘削直後の 1 次支保を追加、水平坑道では切羽掘削サイクル後の 2 次支保を追加することによる二重支保構造を導入することとした。二重支保構造については、アクセス立坑において深度 240m 以深、水平坑道において 250m 坑道以深での採用を計画し

ている。

v) 防災対策の検討

可燃性ガスの発生が見込まれる坑内の研究・作業環境や入坑者の安全を確保するために、可燃性ガス対策、坑内作業環境対策、火災時対策、坑内情報管理システム等の検討を行った。

a) 可燃性ガス対策の検討

過去の災害事例から可燃性ガス災害の要因を整理し、ガス湧出量予測解析の結果を踏まえて、本地下施設で考慮すべき可燃性ガス対策を検討した。坑内では十分な換気を行うことにより、空気中の可燃性ガス含有率が爆発限界に達するおそれは無いと考えられるが、可燃性ガス濃度は切羽付近で高くなると予測されるため、基本的に切羽から 30m 程度内で使用す

表 3.4.2-16 防爆対象設備一覧表

	防爆対象設備
立 坑	穿孔機、積込機、排水ポンプ、スイッチ、照明、各種センサ等
水平坑道	掘削機、積込機、穿孔機、排水ポンプ、バッテリー機関車、吹付け機、スイッチ、照明、各種センサ等

* 主換気ファン掘進用換気ファン、集塵機、坑内通信設備等は上表に係らず防爆対象設備とする。

る電気機器および換気ファン、ガスセンサーなどの保安機器は防爆設備とすることとして、防爆対象設備を整理した。表 3.4.2-16 に防爆対象設備の一覧

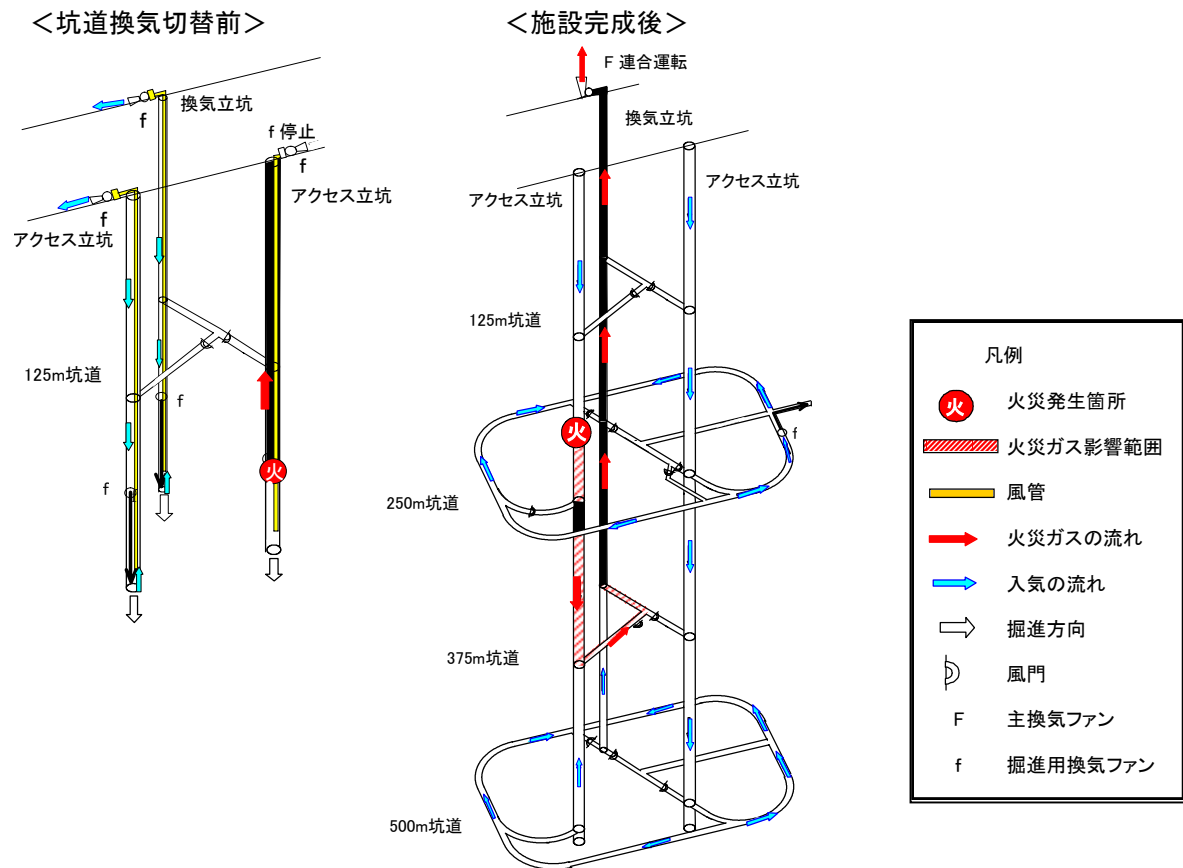


図 3.4-51 火災時通気網解析（通気制御実施後）の例

表を示す。

b) 坑内作業環境対策の検討

坑内熱環境を検討した結果、冬季は1月の平均気温が -7°C 、最低気温は -25°C 以下になることもあることから、坑内の一部で氷点下の気温となることが予測されたため、坑内凍結防止、作業環境維持を目的として入気坑口に暖房装置を設置し、冬季の坑口入気温度を 0°C 以上に維持することとした。

c) 火災時対策の検討

地下施設レイアウトを基に施工段階毎に火災時の通気制御パターンを設定し、火災時の通気網解析により避難路の安全確保と火災ガスによる被害の拡大防止が可能であるかを検討した。その結果、換気ファンの運転・停止、風門の開閉などの適切な通気制御を行うことにより、火災ガスによる坑内汚染範囲を最小限に抑え、地上までの避難のための安全区域を確保できること、掘削中の坑道においても避難のための安全区域を確保できることを確認した。図 3.4.2-51 に火災時の通気網解析の一例を示す。

d) 坑内情報管理システムの検討

地上施設とは異なる地下施設の特殊性を踏まえた

防災対策を確立するために、坑内からの情報の収集、伝送、情報処理、監視、警報、制御などを含めた一連のシステムの概要について検討した。

③まとめ

平成 15 年度は、地下施設の配置計画、空洞の安定性評価、施工計画、防災対策、環境対策等の基本設計を実施した。

平成 16 年度は、平成 15 年度までの設計・施工計画を踏まえ、より現実的な地下施設の実施設設計を行い、平成 17 年度に地下施設工事に着工する計画である。

参考文献

- 土木学会(1996)：トンネル標準示方書「シールド工法編」・同解説，p. 66.
- 土木学会(2002)：コンクリート標準示方書「構造性能照査編」，p. 247.
- 日本鉄道建設公団(1996)：NATM 設計・施工指針，p. 339.

① 課題と計画の概要

一方、幌延深地層研究計画では、「地層処分技術の実際の地質環境への適用による信頼性の確認」へ反映するための地質環境特性に関わる情報（データセット、地質環境モデル、予測解析結果など）を蓄積していく必要がある。すなわち、安全評価手法の適用性の検討に用いるなどといった反映先を念頭においたデータ取得を行わなければならない。しかし、本研究計画のように反映先が多様となると、データの種類や品質が反映先ごとに異なると予想される。さらに反映先に受け渡すまでのデータ解釈やモデル化の考え方も多岐に渡るため、研究目標/反映先、それを達成するための方法や系統的なデータの流れを明示しつつ研究を展開することが重要である。

The flowchart illustrates the process of interpreting raw data into various models and analysis results. It is organized into four main sections: **生データ/初期状態** (Raw Data/Initial State), **解釈/データセット** (Interpretation/Data Set), **概念/モデル化/解析** (Concept/Modeling/Analysis), and **結果 / 反映先** (Result / Destination).

生データ/初期状態 (Raw Data/Initial State) includes categories like **水質調査** (Water Quality Survey), **水量調査** (Water Quantity Survey), **水環境調査** (Water Environment Survey), **水利用調査** (Water Use Survey), **水資源調査** (Water Resource Survey), **水循環調査** (Water Cycle Survey), **水質汚染調査** (Water Quality Pollution Survey), **水質改善調査** (Water Quality Improvement Survey), **水質モニタリング** (Water Quality Monitoring), **水質評価** (Water Quality Evaluation), **水質予測** (Water Quality Prediction), **水質管理** (Water Quality Management), **水質教育** (Water Quality Education), **水質研究** (Water Quality Research), **水質開発** (Water Quality Development), **水質利用** (Water Quality Use), **水質保存** (Water Quality Preservation), **水質保護** (Water Quality Protection), **水質回復** (Water Quality Restoration), **水質再生** (Water Quality Regeneration), **水質循環** (Water Quality Circulation), **水質再生** (Water Quality Regeneration), **水質利用** (Water Quality Use), **水質保存** (Water Quality Preservation), **水質保護** (Water Quality Protection), **水質回復** (Water Quality Restoration), **水質再生** (Water Quality Regeneration).

解釈/データセット (Interpretation/Data Set) includes categories like **水質データ** (Water Quality Data), **水量データ** (Water Quantity Data), **水環境データ** (Water Environment Data), **水利用データ** (Water Use Data), **水資源データ** (Water Resource Data), **水循環データ** (Water Cycle Data), **水質汚染データ** (Water Quality Pollution Data), **水質改善データ** (Water Quality Improvement Data), **水質モニタリングデータ** (Water Quality Monitoring Data), **水質評価データ** (Water Quality Evaluation Data), **水質予測データ** (Water Quality Prediction Data), **水質管理データ** (Water Quality Management Data), **水質教育データ** (Water Quality Education Data), **水質研究データ** (Water Quality Research Data), **水質開発データ** (Water Quality Development Data), **水質利用データ** (Water Quality Use Data), **水質保存データ** (Water Quality Preservation Data), **水質保護データ** (Water Quality Protection Data), **水質回復データ** (Water Quality Restoration Data), **水質再生データ** (Water Quality Regeneration Data), **水質循環データ** (Water Quality Circulation Data), **水質再生データ** (Water Quality Regeneration Data), **水質利用データ** (Water Quality Use Data), **水質保存データ** (Water Quality Preservation Data), **水質保護データ** (Water Quality Protection Data), **水質回復データ** (Water Quality Restoration Data), **水質再生データ** (Water Quality Regeneration Data).

概念/モデル化/解析 (Concept/Modeling/Analysis) includes categories like **水質モデル** (Water Quality Model), **水量モデル** (Water Quantity Model), **水環境モデル** (Water Environment Model), **水利用モデル** (Water Use Model), **水資源モデル** (Water Resource Model), **水循環モデル** (Water Cycle Model), **水質汚染モデル** (Water Quality Pollution Model), **水質改善モデル** (Water Quality Improvement Model), **水質モニタリングモデル** (Water Quality Monitoring Model), **水質評価モデル** (Water Quality Evaluation Model), **水質予測モデル** (Water Quality Prediction Model), **水質管理モデル** (Water Quality Management Model), **水質教育モデル** (Water Quality Education Model), **水質研究モデル** (Water Quality Research Model), **水質開発モデル** (Water Quality Development Model), **水質利用モデル** (Water Quality Use Model), **水質保存モデル** (Water Quality Preservation Model), **水質保護モデル** (Water Quality Protection Model), **水質回復モデル** (Water Quality Restoration Model), **水質再生モデル** (Water Quality Regeneration Model), **水質循環モデル** (Water Quality Circulation Model), **水質再生モデル** (Water Quality Regeneration Model), **水質利用モデル** (Water Quality Use Model), **水質保存モデル** (Water Quality Preservation Model), **水質保護モデル** (Water Quality Protection Model), **水質回復モデル** (Water Quality Restoration Model), **水質再生モデル** (Water Quality Regeneration Model).

結果 / 反映先 (Result / Destination) includes categories like **水質調査結果** (Water Quality Survey Results), **水量調査結果** (Water Quantity Survey Results), **水環境調査結果** (Water Environment Survey Results), **水利用調査結果** (Water Use Survey Results), **水資源調査結果** (Water Resource Survey Results), **水循環調査結果** (Water Cycle Survey Results), **水質汚染調査結果** (Water Quality Pollution Survey Results), **水質改善調査結果** (Water Quality Improvement Survey Results), **水質モニタリング結果** (Water Quality Monitoring Results), **水質評価結果** (Water Quality Evaluation Results), **水質予測結果** (Water Quality Prediction Results), **水質管理結果** (Water Quality Management Results), **水質教育結果** (Water Quality Education Results), **水質研究結果** (Water Quality Research Results), **水質開発結果** (Water Quality Development Results), **水質利用結果** (Water Quality Use Results), **水質保存結果** (Water Quality Preservation Results), **水質保護結果** (Water Quality Protection Results), **水質回復結果** (Water Quality Restoration Results), **水質再生結果** (Water Quality Regeneration Results), **水質循環結果** (Water Quality Circulation Results), **水質再生結果** (Water Quality Regeneration Results), **水質利用結果** (Water Quality Use Results), **水質保存結果** (Water Quality Preservation Results), **水質保護結果** (Water Quality Protection Results), **水質回復結果** (Water Quality Restoration Results), **水質再生結果** (Water Quality Regeneration Results).

- 3-106 -

② これまでの成果

上述のジオシンセシスダイアグラムに示すデータ反映先の一つである、地質環境の理解とモデルの更新について、地質・地質構造に関する調査をとりあげ、調査量の増加に伴いモデルを更新した事例を紹介する。

図3. 4. 2-53は、平成14年度までに取得した地質に関するデータを基に、構築した地質構造モデルを、平成15年度新たに取得したデータを加えて更新した例である。この例では、大曲断層の推定位置の東側に新たな断層（割れ目帯）の存在を推定したこと、西側に分布する勇知層と声間層の境界深度の変更を行っている。なお、今回に例では、地質調査だけではなく、物理探査など個別に実施した調査結果も総合的に考慮して、モデルの更新を行っている。

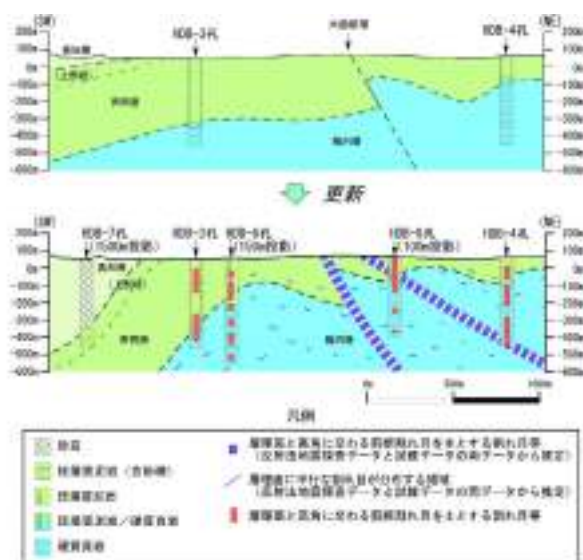


図3.4.2-53 地質環境モデル更新の例
(地質構造モデル)

③ 今後の計画

今回は、地質・地質構造に関する調査研究を例として述べたが、今後は他の地質環境モデルについてもモデルの構築/更新を繰り返すことにより、信頼性を向上させるとともに、幌延を事例とした性能評価の試行などの結果を基に、ジオシンセシスダイアグラムに沿った研究成果の集約を行うことを計画している。

5) 地質環境の長期安定性に関する研究

① 課題と計画の概要

地質環境の長期安定性に関する研究では、文献調査だけでは十分に把握できないような現象も含めた地域特有の天然現象の将来発生可能性およびそれら天然現象が地質環境に与える影響を調査・評価する技術の開発を目的に実施している。具体的には、幌延町において事例研究が可能である地震・断層活動、地殻変動（テクトニクス）、気候・海水準変動および隆起・沈降について、それらの過去から現在にわたる特徴を把握するためのデータを文献調査および現地調査により取得し、個々の天然現象を結びつけた総合的な理解を通じて、将来10万年程度における天然現象の活動場・活動度およびそれら天然現象により引き起こされる地質環境条件の変化幅を把握することを目指している。本研究の成果は、数万年オーダーにわたる長期的な時間変遷を考慮したより現実的な地質環境の将来予測に反映される。

これまで、1) 現在の地震・断層活動および地殻変動の特徴や地震・断層活動などが地質環境に与

える影響の把握を主目的とした地震観測、GPS観測および電磁探査法比抵抗観測、2) 気候・海水準変動および隆起・沈降の過去から現在にわたる特徴の把握を主目的とした段丘調査、3) 大曲断層の活動など地殻変動の履歴を把握するための地質構造調査などを行なっている。以下では、平成15年度に実施した調査・研究の概要を示す。

② これまでの成果

i) 地震観測

本研究では、地震観測記録に基づいて幌延町を含む北海道北部地域の地震活動の特徴を明らかにし、地震活動により生じる幌延町付近の地質環境の変化幅を把握する。

平成14年度に設置した地震計（上幌延観測点：地表付近および地下138 mに設置）に加えて、防災科学技術研究所が幌延町付近に設置した地震計との位置関係も考慮して幌延町内に1辺約10 kmの地震観測網を形作るように、幌延町市街地の北西約4kmに位置する北星園（北星園観測点）、HDB-5孔敷地内（北進観測点）および中間寒小学校跡地（中間寒観測点）の地表付近に地震計を設置し（図



図 3.4.2-54 幌延町付近に設置された地質環境の長期安定性研究に関わる観測点位置図

3.4.2-54), 平成 16 年 4 月から連続観測を開始した。サイクル機構が設置した合計 4 点の地震観測点および防災科学技術研究所が幌延町付近に設置した 3 点の地震観測点 (豊富, 幌延および天塩) から形作られる地震観測網により, 幌延町内の地下約 10 km 以浅で発生する地震を精度よく観測することができると考えられる。上幌延観測点に設置した地震計では, 連続観測を開始した平成 14 年 12 月 24 日から平成 15 年 9 月 30 日の期間までに, 上幌延観測点を中心とする半径 18 km の円内 (幌延町内をほぼ覆う地域) で発生した地震 103 件 (防災科学技術研究所ウェブページ Hi-net 地震情報) のうち, 55 件の地震が観測された。上記の期間に, 上幌延観測点を中心とする半径 100 km の円内において発生したすべての地震の分布を図 3.4.2-55 に, 上幌延観測点で観測することができた幌延町内 (ほぼ半径 18 km の円内) における地震の分布を図 3.4.2-56 に示す (防災科学技術研究所ウェブページ Hi-net 地震情報)。

上幌延観測点で捉えた地震観測記録の一例を図 3.4.2-57 に示す。図 3.4.2-57 上図は, 平成 15 年 3 月 17 日に発生した, 上幌延観測点から約 71.7 km 北の宗谷岬沖を震源とする浅い地震を捉えた地震記録である。また, 図 3.4.2-57 下図は, 平成 15 年 9 月 26 日に発生した, 観測点から約 428 km 離れた十勝沖地震の観測記録である。これらの観測記録について地表と地下での加速度振幅 (地震による揺れの大きさ) を比較した結果, 観測点から近い距離で発生した地震 (近地地震) は地表の加

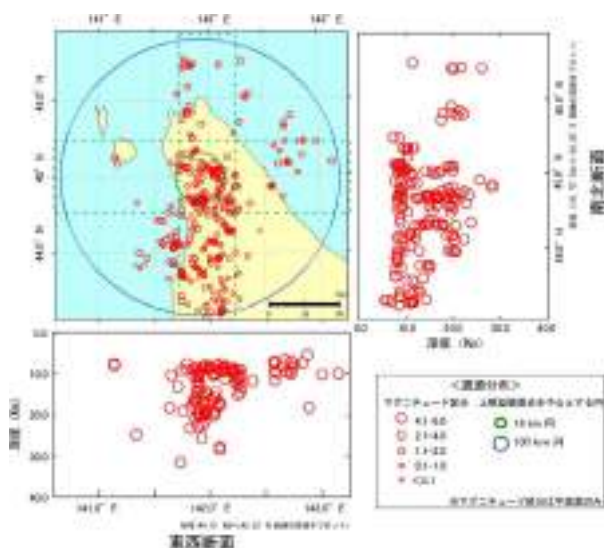


図 3.4.2-55 上幌延観測点を中心とする半径 100km の円内で発生した地震の震源分布

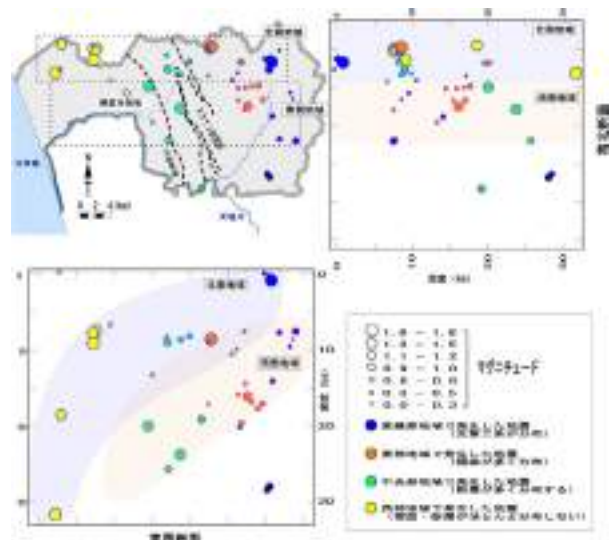


図 3.4.2-56 幌延町内で発生した地震の震源分布

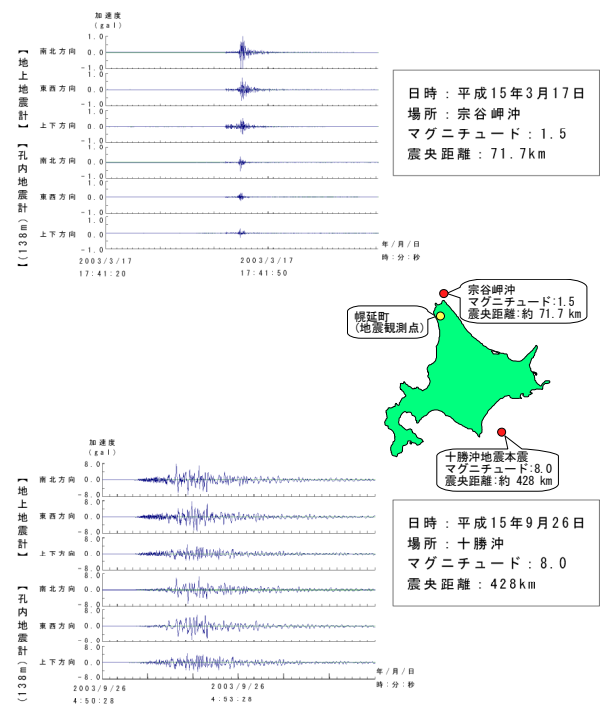


図 3.4.2-57 上幌延観測点において観測された地震の観測記録

速度振幅に比べて地下での加速度振幅が小さくなっているが, 観測点から遠い距離で発生した地震 (遠地地震) は, 加速度振幅があまり小さくないことが明らかとなった (表 3.4.2-17)。

今後は, 北海道北部地域の地震活動の特徴を把握するために, 幌延町内での地震観測を継続するとともに, 得られたデータについて防災科学技術研究所などが取得した地震観測データを統合して地震の震源分布の解析を行い, 幌延町付近および

表 3. 4. 2-17 地震記録の最大振幅比較

		宗谷岬沖 2003年3月17日		十勝沖地震 2003年9月26日	
地上最大振幅 (gal)	NSs(南北)	1.20	-1.84	7.88	-7.49
	Ews(東西)	0.74	-0.70	7.85	-7.20
	Vs(鉛直)	0.21	-0.16	1.92	-1.49
孔内最大振幅 (gal)	NSb(南北)	0.38	-0.53	6.77	-6.95
	Ewb(東西)	0.28	-0.22	5.55	-7.00
	Vb(鉛直)	0.08	-0.09	1.58	-1.16
振幅比 (孔内/地上)	NSb/NSs	0.31	0.29	0.86	0.93
	Ewb/EWs	0.38	0.31	0.71	0.97
	Vb/Vs	0.36	0.55	0.82	0.78

(南北および東西方向はS波、鉛直方向はP波の読み)

北海道北部地域に認められる広域的な地質構造（断層、褶曲および岩石分布）と震源分布との関連性について、検討を実施する予定である。また、地表と地下の加速度振幅を近地地震と遠地地震とで比較した場合に、差違が認められることについては、現在解析を実施中である。

ii) GPS 観測

平成 14 年 12 月に北進地区の HDB-1 孔敷地内に GPS 観測機器を設置し、30 秒間隔 24 時間の連続観測を開始した。平成 15 年度は、GPS 観測データ解析システムを構築するとともに同システムを用いた解析を行った。

解析ソフトウェアには、アメリカのマサチューセッツ工科大学(MIT)とスクリプス海洋研究所で開発された GAMIT(GPS at MIT)を使用している。解析には HDB-1 孔観測点のデータのほかに国土地理院の GPS 連続観測システム (GEONET) の 12 点と IGS(International GPS Service:国際 GPS 事業)のグローバル観測網に属する 4 点を加えた計 17 点を用いた (図 3. 4. 2-58)。

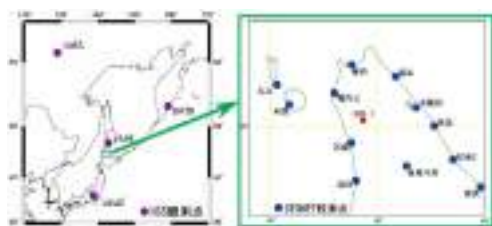


図 3. 4. 2-58 GPS 観測網

HDB-1 孔観測点と各 GEONET 間との日々の基線長 (HDB-1 孔観測点との距離) 変化を図 3. 4. 2-59 に示す。この図では、HDB-1 孔を通る南北軸を境に西側の GEONET 点を左列に、東側の GEONET 点を右列に並べてある。また、縦軸は基線長のうち、センチメートル単位以下の数値を示している (例えば、礼文の基線長変化グラフにおいて、縦軸の 09cm

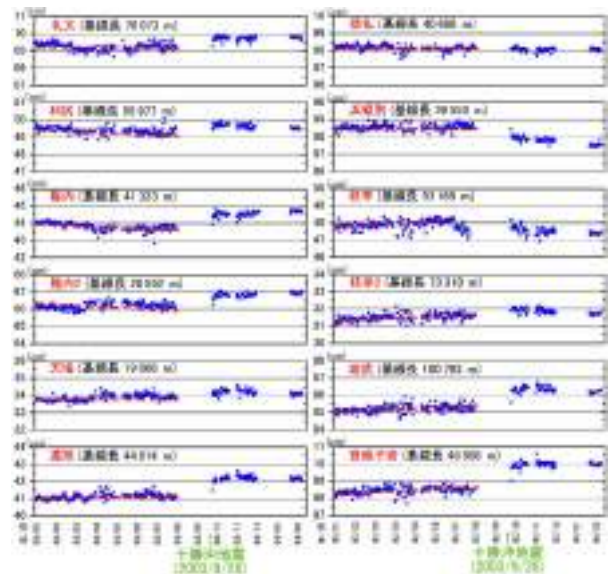


図 3. 4. 2-59 HDB-1 観測点と GEONET 観測点との基線長変化図

は基線長 70073.09mを意味する)。解析の結果、平成 15 年 9 月 26 日の十勝沖地震を境に、HDB-1 孔観測点と GEONET の各観測点との基線長は、東側の浜頓別および枝幸で短縮が見られる以外は伸張している。この地震により、震源地付近のえりも町に設置されている GEONET 電子基準点が最大約 87cm 東南東方向へ変位したことが報告されているが (国土地理院, 2003)、本地域でも、十勝沖地震発生日を境に HDB-1 孔観測点の位置座標が、南東方向に 4cm 程度変位していることが観測された (図 3. 4. 2-60)。

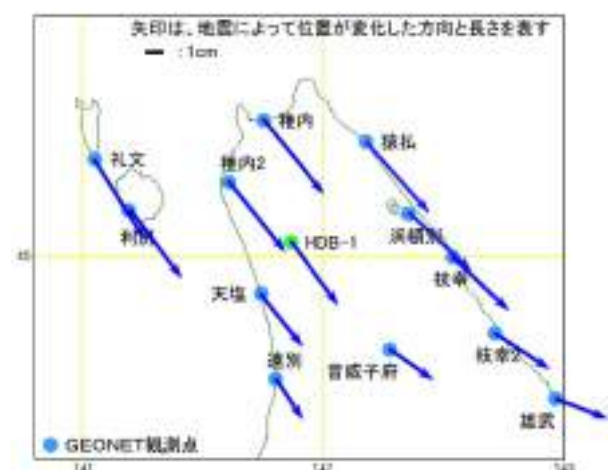


図 3. 4. 2-60 北海道北部地域の十勝沖地震前後における位置座標の変化

同図中の矢印は、赤道上的点 (北緯 0 度, 東経

十勝沖地震前の基線長の変化は、HDB-1 観測点の北西側では短縮傾向（例えば稚内は HDB-1 観測点に近づく傾向）にあり、南東～東側では伸張傾向（例えば音威子府は HDB-1 から遠ざかる傾向）が認められた（図 3.4.2-59 の赤破線）。

iii) 地下水水压觀測

十勝沖地震発生後の10日間前後における地下水水圧モニタリングデータ（図3.4.2-62）によると、約1kPa程度の変動ではあるが、地下水水圧は地震発生4日前に上昇、2日前から地震発生まで減少、地震直後には再度上昇するという変化がHDB-1孔の3区間で認められた。なお、地震発生直後の著しい変化は、停電などにより生じた電氣的ノイズである。

(kPa)

観測区間深度: -595~-597m

観測区間深度: -559~-561m

観測区間深度: -447~-449m

地下高圧圧

9/15 9/20 9/25 9/30 10/5 (月/日)

※黒矢印は十勝沖地震の全震を示す

[illegible]

図 3.4.2-62 HDB-1 孔における地下水水圧モニタリングデータ（期間：9月15～10月6日、地下水水圧は1時間の移動平均値）

iv) 電磁探査法による比抵抗観測

- 3-111 -

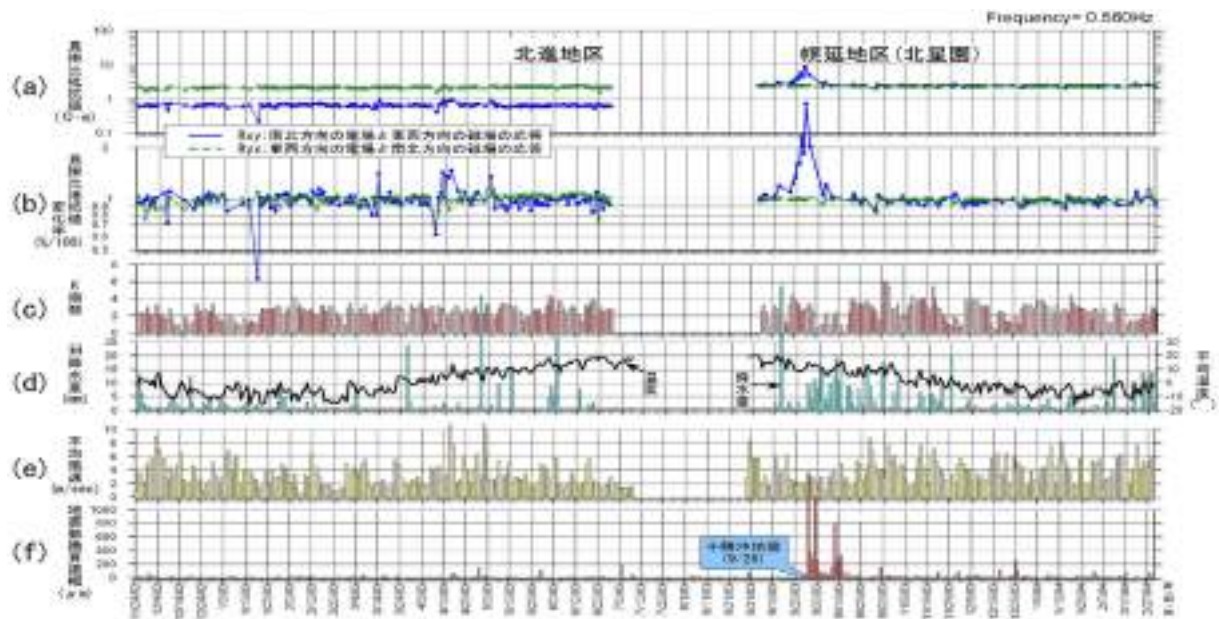


図 3.4.2-63 見掛比抵抗変化図(周波数 0.56Hz)

- (a) : 自動編集されたデータに対し、K 値(下記(c)参照)1.3 以上、日降水量(下記(d)参照)が 6mm 以下、平均風速(下記(e)参照)が 6m/sec 以下のデータを選別した見掛比抵抗値。
- (b) : ある時間の比抵抗値が、その地点の平均的な比抵抗値からどのくらい変化しているかをあらわした変化率。ある時間の比抵抗値を、ある地点における平均比抵抗値で除算した値。
- (c) : 通信総合研究所が公表している地磁気変動係数 K 値。地磁気が活発に変化しているかを示す。
- (d) : 幌延市街地および北進気象観測所の日降水量および平均温度。
- (e) : 幌延市街地および北進気象観測所の平均風速。
- (f) : 幌延町での 1 日ごとの地震動の強さを示す。北海道地方で発生した深度 90km 以浅の地震(気象庁一元化震源リストより)について、下記の坪井式(坪井, 1954)のマグニチュード計算式を用いて幌延町における地震の換算振幅(A)を計算し、振幅の 1 日分を合計した値。

$$\log A = M - 1.73 \log \Delta + 0.83$$

但し、A:最大地動振幅(μm)、 Δ :震央距離(Km)

と考えられることから、電磁探査法により電場と磁場を連続的に観測することにより、地震が発生するような地下深部の地下水の動きやその分布などの変化を把握することができると考えられる。電磁探査機器による観測については、平成 14 年 11 月より HDB-1 に隣接する地点に電磁探査機器を設置し、連続観測を実施した。平成 15 年 9 月からは、研究用地造成などに伴う人工ノイズの混入を避けるために、電磁探査機器を幌延町市街地の北西約 4km に位置する北星園に移設して連続観測を行っている。

電磁探査機器により取得される電磁気的な性質に関するデータは、地磁気の変動や天候などにより影響を受ける。このため、通信総合研究所が公表している地磁気の変動データ、サイクル機構が幌延町内に設置した気象観測所で得られた降水量、気温および風速などの気象観測データに基づき、解析に使用するデータの選別を行い、選別された

データを用いて解析を実施した。例として、周波数 0.56Hz の解析結果を図 3.4.2-63 に示す。

この図では、平成 15 年 9 月 26 日に発生した十勝沖地震直前に見掛比抵抗の変化が見られる。しかし、電場には変化が認められたが磁場には変化が認められなかったこと、周波数 0.56Hz 以外では変化が確認できなかったこと等から、今回得られた見掛比抵抗値の変化は地電流ノイズにより生じた変化であり、地震により生じた地下深部の電磁気的な性質の変化を示すものではないと考えられる。

十勝沖地震発生時以外では、安定した見掛比抵抗値が得られているが、見掛比抵抗値の変化率(図 3.4.2-63 説明参照)で 3%程度の変動が認められている。この原因が深部地下水流動などの季節変動や機器の温度特性によるものなのかなどの検討も含めて、今後も電磁探査機器による連続観測を継続し、得られたデータに基づき地下深部の電磁気的な性質の変化などについて解析を行う予定で

ある。

v) 段丘調査

気候・海水準変動および隆起・沈降に関する過去数十万年間程度における特徴（特に汀線の変遷）の把握に必要な、第四紀更新世中期～後期に形成された段丘面とその構成層・形成年代に関するデータを取得するため、空中写真を用いた段丘面の判読や地表踏査を行った。その結果、研究所設置地区において、海成段丘起源と見られる著しく開析した地形面と水平な構成層、および小河谷沿いに分布する河成段丘面とその構成層を確認した（図 3. 4. 2-64）。これらの段丘については、前者は開析の程度、復元される面の連続、分布高度、層相から、高位海成段丘に、また、後者は段丘面の分布と形状、構成層直上の泥炭と木片の ^{14}C 年代値から、最終氷期に形成された低位河成段丘に対比される可能性が高い（安江ほか、2004a）。

今後は、段丘面の分布・形成年代や海岸付近の段丘面との連続を明らかにしていく予定である。

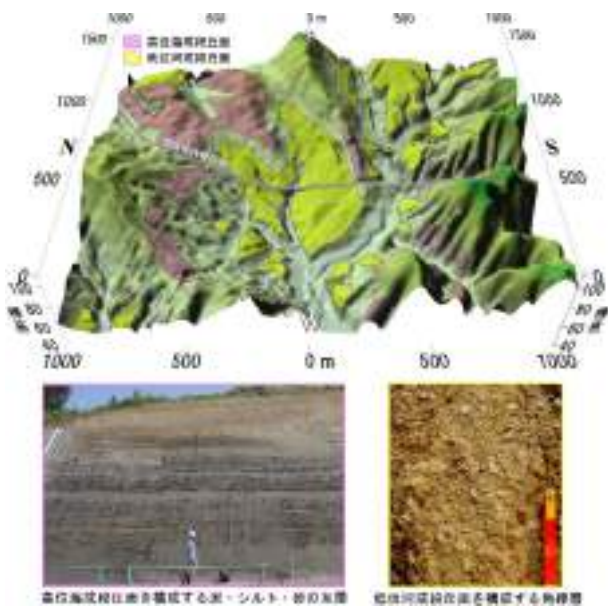


図 3. 4. 2-64 研究所設置地区の段丘面の分布と構成層

vi) 地殻変動の変遷に関する調査

過去数百万年間程度における隆起・沈降などの地殻変動の履歴を把握するために必要である鮮新～更新統に見られる変形構造の形成時期に関するデータを取得するため、第 3. 4. 2. 1-1) iv) 項で実施した既存反射法地震探査断面の再解釈を大曲断

層の西側地域においても実施し、加えて地表地質調査を行った。平成 14 年度に実施した反射法地震探査断面の再解釈に当たっては、地質構造に直交するラインへ投影した反射法地震探査断面に、表層地質とボーリングデータを付加して、解釈を試みた（安江ほか、2004b）。その結果、研究所設置地区周辺における大曲断層推定位置の西側においては、声問層・勇知層・更別層は南西側へ向かって南西傾斜から北東傾斜へと変化し、勇知層と更別層の層厚は西へ向かって厚くなる傾向が認められた（図 3. 4. 2-65）。また、地質調査の結果、大曲断層の地表推定位置から西側約 2km の地点では、勇知層・更別層の泥岩の層理面は約 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 西傾斜していることが確認された（図 3. 4. 2-66）。これらのことから、大曲断層西側における褶曲作用は、褶曲構造に参加している更別層の堆積より後に生じたと推測される。

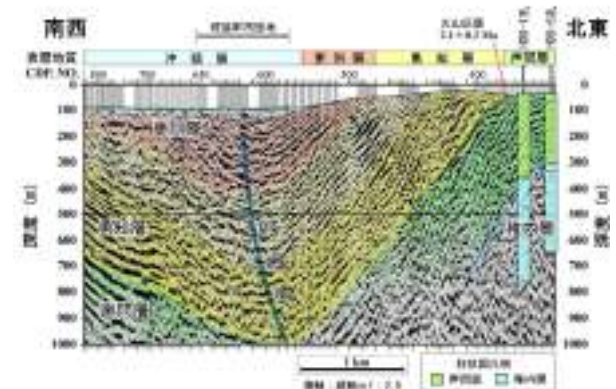


図 3. 4. 2-65 反射法地震探査断面の解釈図

図 3. 4. 2-65 では、勇知層上部の層厚は向斜軸付近において最も厚くなっている（図 3. 4. 2-65）。一般に、褶曲構造の形成とともに堆積物が堆積した場合、向斜軸付近において地層の層厚が厚くなると予想される。このことから、大曲断層西側に発達する褶曲構造は、地層の層厚に変化が認められる勇知層上部堆積時から形成されていた可能性も考えられる（安江ほか、2004b）。

今後は、幌延地域の勇知層と更別層の堆積年代や堆積過程をより明らかにするために、広域火山灰層の対比や噴出年代の決定、微化石層序の対比やシーケンス層序学的解析などを実施していく予定である。

③ まとめ

幌延町内に設置した観測機器により、平成 15 年



図 3.4.2-66 幌延町市街地付近の更別層の露頭
(大曲断層の地表推定位置から西へ
約 2km の地点)

9 月 26 日に発生した十勝沖地震に起因すると思われる現行の地質環境の変化 (GPS 観測・地下水水圧観測) および地震発生時以外の現行の地殻変動の傾向 (GPS 観測) が捉えられた。また、過去数万年～数百万年間程度における地質環境の変化および地殻変動の変遷を把握するための調査として、段丘調査および地質構造調査を行った。

今後は、現行の地質環境の特徴および地質環境の変化を把握するために、地震、GPS などの連続観測を継続するとともに、過去数百万年～現在に至る地質環境の変遷を把握するために、段丘調査、地質調査および文献調査などを実施し、将来 10 万年程度における天然現象の活動場・活動度およびそれら天然現象により引き起こされる地質環境条件の変化幅を把握することを目標とする。

参考文献

- 防災科学技術研究所ホームページ (<http://www.hinet.bosai.go.jp/>) 地震のページ 全国高感度地震観測 Hi-net【防災科学技術研究所】。
- 国土地理院(2003)：平成 15 年(2003 年)十勝沖地震に伴う地殻変動調査について
- 坪井忠二(1954)：地震動の最大振幅から地震の規模を定めることについて，地震 2，7，P. 185-193.
- 安江健一，石井英一，浴 信博，福島龍朗 (2004a)：北海道北部，幌延町北進地域の段丘堆積物の特徴，地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会要旨集 (CD-ROM)，Q042-P004.
- 安江健一，石井英一，高橋一晴，浴 信博，福島龍朗 (2004b)：北海道，幌延地域西部における鮮新世広域火山灰層の年代とネオテクトニクス，地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会要旨集 (CD-ROM)，G015-004.

6) 環境調査

① 課題と計画の概要

幌延深地層研究計画における開発規模は、環境影響評価法および北海道環境影響評価条例の対象となる規模より小さいが、調査研究や地下施設の建設により環境へ影響を与えないことを確認するために、環境調査を実施した。

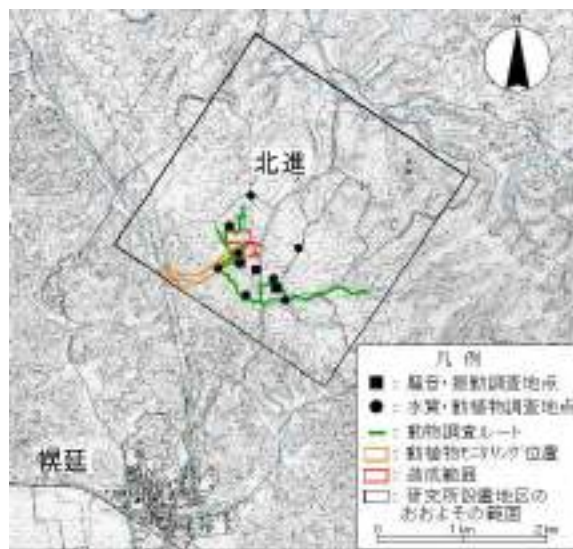
平成 15 年度は、平成 14 年度の夏季・秋季・冬季調査に引続き、研究所用地およびその周辺地区を対象とし、春季調査を実施した。また、研究所設置用地が決定したことから、重要種についてはその有無を確認するとともに、必要に応じて保全対策を検討、実施した。さらに、これまでの調査結果を踏まえてモニタリングを開始した。

春季調査の調査位置は、研究所用地の環境区分（河川植生、防風林、低木樹林、湿原植生）を考慮し、各環境区分を代表する調査地点と各環境区分を網羅する調査ルートを設定した。調査概要を表 3.4.2-18 に、調査位置を図 3.4.2-67 に示す。

表 3.4.2-18 調査概要

調査項目		調査時期	調査方法
騒音		＜夏季＞*H15/8/19～20 ＜秋季＞*H15/10/20～21	・「特定建設作業に伴って発生する騒音の規制に関する基準」および「騒音に係る環境基準の評価マニュアル」に準拠する方法
振動		＜夏季＞*H15/8/19～20 ＜秋季＞*H15/10/20～21	・「特定建設作業の規制に関する基準」に準拠する方法
水質		＜春季＞H15/6/6 ＜夏季＞*H15/8/26 ＜秋季＞*H15/10/8	・「生活環境の保全に関する環境基準」に示す方法
動物	哺乳類	＜春季＞H15/5/20～22	・捕獲調査法 ・直接観察、フィールドサイン法
	鳥類	＜春季＞H15/5/9, 6/3	・ラインサース法 ・定点観察法
	両生・爬虫類	＜春季＞H15/5/7, 5/20～21 ＜夏季＞*H15/8/26 ＜秋季＞*H15/10/8	・直接観察法
	魚類	＜春季＞H15/5/21 ＜夏季＞*H15/8/25 ＜秋季＞*H15/10/7～8	・直接観察 ・捕獲法
	昆虫類	＜春季＞H15/5/20～22	・直接観察 ・採集法
	底生動物	＜春季＞H15/5/22	・直接観察 ・採集法
植物	植物相	＜春季＞H15/5/20～22 ＜夏季＞*H15/8/25～26 ＜秋季＞*H15/10/7	・直接観察法
	植物群落	＜秋季＞*H15/10/7	・コドレート調査

*1：モニタリング



国土地理院 1/25,000 地形図（幌延）（本流）を使用

図 3.4.2-67 調査位置図

② これまでの成果

i) 騒音・振動

研究所設置場所付近の 3 箇所において、騒音・振動調査を実施した結果、騒音レベルは昼間 43～60dB、夜間 39dB 以下、振動レベルは昼間 36dB 以下、夜間 30dB 以下であった。平成 14 年度と比較すると大きな変化はみられなかった。

ii) 水質

調査位置図に示す 2 地点で、水素イオン濃度、生物化学的酸素要求量、溶存酸素量、浮遊物質量について調査した。平成 14 年度と比較すると、各項目とも大きな変化はみられなかった。

iii) 動植物

調査の結果、哺乳類 5 目 6 科 6 種、鳥類 8 目 17 科 33 種、両生・爬虫類 2 目 2 科 2 種、昆虫類 6 目 20 科 43 種、魚類 5 目 6 科 8 種、底生動物 12 目 23 科 27 種、植物 58 科 214 種が確認された。

このうち重要な動植物は 19 種（哺乳類なし、鳥類 3 種、両生・爬虫類 1 種、魚類 5 種、昆虫類 2 種、底生動物 2 種、植物 6 種）であった。確認された動植物のうち、法指定種や環境省のレッドデータブックなどで絶滅のおそれのある動植物種を抽出したものを重要種として表 3.4.2-19 に示す。

表 3. 4. 2-19 確認された重要種

区分	種名	選定基準*						
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
鳥類	オジロワシ	○	○	EN	En		○	○
	オオタカ		○	VU	Vu			○
	オオジシギ			NT	R		○	
両生類	エゾサンショウウオ				N		○	●
昆虫類	オオルリオサムシ						○◎	◎
	ミズスマシ				R			
魚類	スナヤツメ			VU		希		
	ヤマメ				N	減		
	エゾホトケドジョウ			VU	En			
	エゾトミヨ			NT	R			○
	ハナカジカ				N			
底生動物	カワシンジュガイ			VU				
	コエゾトンボ						◎	
植物	ノダイオウ			VU				
	エゾオオヤマハコベ						●	
	オオバタチツボスミレ			VU				
	エゾノカワデシャ						●	
	ハイドジョウツナギ				R			
	タカネトンボ			VU				

*⑤：重要種の選定基準

①：「文化財保護法」（昭和25年 法律第214号）

○：天然記念物

②：「絶滅のおそれのある野生動植物の種の保存に関する法律」（平成4年 法律第75号）

○：国内希少野生動植物種

③：「改訂・日本の絶滅のおそれのある野生生物—レッドデータブック—1 哺乳類」（環境省 2002年）

「改訂・日本の絶滅のおそれのある野生生物—レッドデータブック—2 鳥類」（環境省 2002年）

「改訂・日本の絶滅のおそれのある野生生物—レッドデータブック—3 爬虫類・両生類」（環境庁 2000年）

「改訂・日本の絶滅のおそれのある野生生物—レッドデータブック—4 汽水・淡水魚類」（環境省 2003年）

「改訂・日本の絶滅のおそれのある野生生物—レッドデータブック—8 植物 I（維管束植物）」（環境庁 2000年）

「無脊椎動物（昆虫類、貝類、クモ類、甲殻類等）のレッドリストの見直しについて」（環境庁 平成12年）

EN：絶滅危惧ⅠB類 VU：絶滅危惧Ⅱ類 NT：準絶滅危惧

④：「北海道の希少野生生物 北海道レッドデータブック2001」（北海道 平成13年）

En：絶滅危惧種 VU：絶滅危惧種 R：希少種 N：留意種

⑤：「日本の希少な野生水生生物に関するデータブック（水産庁編）」（社団法人 日本水産資源保護協会 1998年）

希：希少種 減：減少種

⑥：「緑の国勢調査—自然環境保全調査報告書—」（環境庁 昭和51年）

○：主要野生動物 ●：貴重植物 ◎：すぐれた自然

⑦：「第2回自然環境保全基礎調査報告書（緑の国勢調査）」（環境庁 昭和57年）

○：希少種 ●：調査対象種 ◎：特定昆虫

重要種のうち、鳥類では、オジロワシ、オオタカなどの通過を確認するとともに、両生・爬虫類では、エゾサンショウウオ、魚類では、ヤマメ、エゾトミヨなど、底生動物では、カワシンジュガイ、昆虫類では、オオルリオサムシ、ミズスマシの生息が確認された。植物では、ノダイオウ、ハイドジョウツナギなどが確認された。

これらのうち、エゾサンショウウオとハイドジョウツナギについては、研究所用地内で確認され、保全措置が必要と判断された。エゾサンショウウオについては、5月上旬に卵塊の状態で捕獲し、他の自然産卵箇所に移動した。ハイドジョウツナギについては、休眠状態に入る10月下旬に、移植前の生育地と同様な環境を有する場所に移植した。

③ まとめ

i) 春季調査

春季調査結果および有識者へのヒアリングをまとめた結果、造成範囲周辺は、すでに人為的に改変された環境であること、造成範囲内でのみ生息可能な重要種は確認されておらず、周囲には同様の環境があることから、造成工事による環境への影響はほとんどないと考えられる。

ii) モニタリング

造成工事中（夏季・秋季）に行った水質、騒音・振動、魚類、植物のモニタリングの結果、各項目とも工事着手前と比較して大きな変化はみられず、現時点では造成工事による影響は認められなかった。今後もモニタリングを継続していく。

3.4.3 第2段階の調査研究

① 目標

幌延深地層研究計画では、現在第1段階の調査研究を実施している。平成17年度中には立坑の掘削を開始し、第2段階の調査研究を開始する計画である。平成15年度においては、第2、3段階の調査研究計画の基本的な方針を検討するとともに、研究計画案を策定した。なお、本調査研究計画は平成16年度においても検討を継続する。

② 基本的な考え方

幌延深地層研究計画に関する基本計画（サイクル機構、1998）では、第2段階の調査研究として以下の調査研究を実施することとしている。

- ・ 実際に地下に坑道を掘削して取得するデータに基づき、地表からの調査の段階における予測を確認すること
- ・ 調査手法や解析手法の妥当性を検証すること
- ・ 坑道を掘削することに伴う周辺の地層や地下水の変化とその範囲などを調査すること

第3段階では、地下施設において数10m程度の規模で、物理探査やボーリング調査などを行うことにより、地質環境特性について地震による影響を含めた調査研究を実施する。また、物質移行試験などの原位置での調査研究を実施する。なお、坑道掘削に合わせて、これらの調査を順次異なる場所や深度で行い、予測と検証のステップを繰り返すことにより、岩盤や地下水の性質の空間的な不均質性を調べるとともに、調査解析手法の妥当性を確認していくこととしている。

本調査研究の計画策定にあたっては、上述の基本計画について、これまでに明らかとなっている地質環境特性を基に、計画を具体化することとした。

③ 計画の概要

第2、3段階の調査研究計画を検討する上では、地下施設周辺の地質環境特性の分布およびそのバックグラウンドとしての変動を把握するとともに、地下施設建設時に想定される事象を検討しておく必要がある。これまでの調査により得られたデータから、地下施設周辺の地質環境は以下のように推定される。

a) 地質・地質構造

地表から700 m程度までは声間層（珪藻質泥岩）

および稚内層（硬質頁岩）が分布し、地層の境界が深度300～400 mと推定される。

b) 水理地質構造

各地層の透水係数は、声間層では健岩部、割れ目帯を問わず $10^{-10} \sim 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ 、稚内層割れ目帯 $10^{-10} \sim 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ 、稚内層健岩部で $10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ のオーダーであり、深度が深くなるにつれ透水係数が小さくなる傾向（深度依存性）がある。また、ほぼ静水圧分布である。

c) 地下水化学

深度100 m程度以深では、塩水系の地下水が分布しており、地下水中にはメタンを主体とする溶存ガスが存在している。

d) 岩盤力学

一軸圧縮強度は5～30 MPaであり、水平面内でみた場合には、深度250 m以深ではほぼ東西方向が水平面内最大主応力方向であると考えられる。

以上述べた地質環境特性および地下施設のレイアウト（3.4.2.3）章参照）を踏まえて調査研究レイアウト案を検討した。その例を図3.4.3-1に示す。

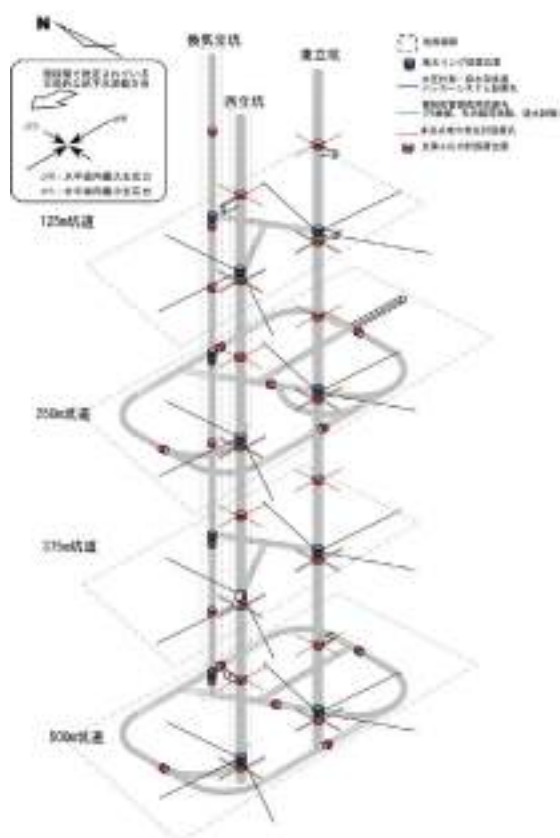


図3.4.3-1 第2段階調査試験レイアウトの例

図 3.4.3-1 は、立坑における各種調査試験の項目や実施位置案を示したものである。主な調査項目としては、地質観察、湧水量測定、地下水水圧測定、水質測定などを考えている。

今後、地下施設の詳細なレイアウトや掘削工程を考慮しつつ調査研究計画を具体化していく予定である。

参考文献

核燃料サイクル開発機構(1998)：深地層研究所（仮称）
計画，サイクル機構技術資料，JNC TN1410 98-002.

3.5 地質環境の長期安定性に関する研究

3.5.1 研究の概要

① 背景と目的

プレート収束帯に位置する日本列島では、安定大陸に比べ地殻変動や火成活動が比較的活発であることから、わが国の地層処分概念は、「長期的な安定性を備えた地質環境」に「性能に余裕をもたせた人工バリア」を設置することを特徴とする。これらの概念に基づき地層処分の安全性を確保するためには、地層処分システムの性能が著しく損なわれないよう長期にわたって安定な地質環境を選定することと、想定される天然現象の変動を見込んで人工バリアや処分施設を適切に設計・施工することにより地層処分システムが備えるべき固有の性能を確保したうえで、構築された地層処分システムの安全性を評価することが重要となる。

そのため、「地質環境の長期安定性に関する研究」では、数万年以上の長期にわたって、

- ・ 火成活動等のように地層処分システムの性能に著しい影響を及ぼす可能性を有する地域
- ・ 地殻変動等に伴う地質環境（地下水の流動特性・地球化学特性、岩盤の熱特性・力学特性等）の変動の幅

を示すための調査技術や評価手法等に係わる研究開発を進めてきた。

「第2次取りまとめ」までの研究開発では、「我が国においても地層処分にとって安定な地質環境が存在し得ること」を科学的な根拠に基づき立証するため、文献調査を主体に全国レベルのデータの収集・解析を進めてきた。事業段階として位置づけられた「第2次取りまとめ」以降の研究開発は、最終処分事業や国の安全規制に資するための研究開発を重点的に推進するとともに、地層処分の信頼性の向上を図るための基盤的な研究を着実に進めていくことが重要となる（武田ほか、2004）。

東濃地科学センターでは、地質環境の長期安定性に関する研究を以下の3つに整理して進めている。

i) 調査技術の開発

概要調査に必要となる体系化された調査技術の開発・整備

ii) 長期予測・影響評価モデルの開発

処分施設の設計・施工等の工学的対策や地層処分システムの安全評価等に資するための、長期にわたる地殻変動・火成活動等の予測とそれらが地質環境に及ぼす影響を評価するためのモデル開発

iii) 研究情報基盤の整備

安全評価に用いる現実的な天然現象の影響に係わる情報の整備や次世代の工学技術を目指した基盤的な研究

② 実施項目と進め方

i) 調査技術の開発

調査技術の開発では、概要調査で用いられる地表踏査、物理探査、トレンチ掘削、ボーリングにより、対象地域における活断層や第四紀火山等の存在を確認するための調査技術のほか、地層処分システムに重大な影響を及ぼすと想定される現象の潜在的なリスクを排除するため、地下深部の震源断層やマグマ溜り・高温岩体を確認するための調査技術の開発を進めている。平成15年度は、中国地方を事例とした震源断層の調査技術、鬼首・鳴子火山を事例としたマグマ・高温流体等の調査技術等に関する研究を実施する。また、活断層周辺の力学的影響を把握するため、横手盆地東縁断層帯を事例として、断層の分岐、変形範囲の長期的変化について検討を行う。

ii) 長期予測・影響評価モデルの開発

長期予測・影響評価モデルの開発は、これまでの過去から現在までの変動傾向や影響範囲から将来を外挿・類推する方法や現象の生起を統計的に求めて発生確率を予測する方法に加えて、現象のプロセスを考慮した数値シミュレーションモデルの研究開発を進めている。平成15年度は、将来の地形変化を予測するための従順化モデルによる三次元シミュレーション技術の開発のほか、モンテカルロ法による将来の火山の発生を予測するための確率モデルの開発等を行う。

iii) 研究情報基盤の整備

研究情報基盤については、それぞれの現象のプロセスに係る最新の学術的知見のほか、安全評価シナリオ（接近シナリオ・地下水シナリオ）や概念モデルの構築に必要な一般的かつ現実的な現象のプロセスに関する情報や安全評価に用いる力学、熱、地下水理、水質等のパラメータに関す

る情報の整備を進めている。平成 15 年度は、わが国の地下の温度構造や地下水の化学的性質に関する情報をデータベース（坑井温度データベース、温泉地化学データベース）として整備する。また、地下深部の微小な地殻内変動を地震波や電磁波によってモニタリングするための精密制御定常信号システム（アクロス）に関する研究、活断層帯の地殻活動に関する基盤的研究を進める。

期安定性と地層処分—今後の研究開発に向けた視点—, 月刊地球, 26, pp. 332-338.

③ 成果の反映先

万年オーダーの非常に長い期間を対象とする地層処分において、その安全性を評価するとともに信頼性を向上させるためには、地質環境の現在の状態を把握するだけでなく、その環境がなぜ作られたか、それが将来どのように変化するか（あるいは変化しないのか）を自然のプロセスと関連づけて予測・評価していく必要がある。そのための科学的基盤として、天然現象の発生の規則性や地質環境への影響の範囲と程度に関する長期安定性研究の成果が重要となる。本研究の成果を最終処分事業や国の安全規制に反映できるよう、実施主体による概要調査や国による安全審査基本指針の策定等のスケジュールを踏まえて、研究開発を計画的かつ着実に推進していく。

④ 今後の計画

i) 調査技術の開発

対象地域において過去に生じた現象の規模やその影響の範囲等を定量的に把握することが必要となることから、過去の地下水理や温度構造等を推定するための調査技術、断層破碎帯・変形帯の水理特性に係わる調査技術等を整備していく。

ii) 長期予測・影響評価モデルの開発

将来の地形変化に伴う広域的な地下水理や水質等の変化を予測するためのモデルの統合化にも取り組んでいく。

iii) 研究情報基盤の整備

「5.2.6 天然現象影響評価モデル」に必要なそれぞれの現象のプロセスに係る最新の学術的知見や天然現象の影響に係わる力学、熱、地下水理、水質等のデータを整備していく。

参考文献

武田精悦, 中司 昇, 梅田浩司 (2004): 地質環境の長

3.5.2 各研究の成果

1) 隆起・侵食／気候・海水準変動に関する研究

① 課題と計画の概要

将来の地下水流動の変動を予測解析するには、任意の時点での地形・地質断面の情報が必要である。そのため、万年オーダーでの隆起と侵食による地形変化を三次元でシミュレートする技術の開発や、海水準変動にともなう平野の地層・地形の発達プロセスの研究を進めている。

② これまでの成果

i) 調査技術の開発・体系化

海水準変動に伴う平野の地形発達プロセスを、形成年代や地下の地質状況が比較的良好に分かっている完新世の濃尾平野を事例に調査した。既存のボーリングコアを用いた堆積相の解析や ^{14}C 年代測定などの結果、濃尾平野では過去約 6,000 年間に、長さ約 40 km、幅約 25 km の沖積平野が形成されたことがわかった（山口ほか，2003）。この事例から、陸水と海水の境界である海岸線は海水準変動に対応して急速に移動することが確認された。

また、段丘地形などの年代と高度から、日本列島の過去 10 万年程度の期間について隆起速度を推定し、分布図を作成した（藤原ほか，2004）。

ii) 長期予測・影響評価モデルの開発

侵食速度を地形勾配の大きさや岩石の硬さなどをパラメータとして記述した微分方程式を精密な数値地図に適用して、時間とともに地形が変化する様子を解析する技術（Nogami et al., 2002）の開発を進めている。平成 15 年度は、断層活動などを組み込んだプログラムの改良を進めるとともに、入力や解析結果の検証に必要な侵食速度や隆起速度のデータを全国的に収集した。

以下にシミュレーションに断層運動をどのように組み込むかを検討した例を示す。これは数値実験であり、現実の地形を扱ったものではない。

[シミュレーションの初期条件]

- ・ 解析領域は 2.5 km 四方で、空間分解能は 5 m。
- ・ 図の左側から 250 m の位置に上下方向に延びる分水嶺を設定し、地表は左右両側にそれぞれ 0.5 度で傾斜していくものとする。
- ・ 右端から 500 m の位置に、上下方向を走向と

し、相対的に左側が隆起する断層（傾斜は垂直で変位速度は 1 mm y^{-1} ）を置く。

- ・ 幾つかの河川を乱数で生成させる。

[解析条件]

- ・ 基本方程式は Nogami et al. (2002) と同じ。
- ・ 従順化係数は解析領域で一様（地質は均質と仮定）。
- ・ 解析期間中の気候変動は考慮しない。
- ・ 解析期間は 12 万年間。
- ・ 時間ステップは 50 年。

[シミュレーションの結果]

12 万年間の地形変化を、幾つかの段階について陰影図を用いた鳥瞰図で示す（図 3.5.2-1(a)～(d)）。地質や気候条件を単純化した仮想の流域を設定しているが、断層変位によって隆起する地塊（変位した段丘に相当）に、時間経過と共に断層崖から上流へ河川の彫り込みが進み、丘陵地形が形成されていく過程を再現することができた。

③ まとめ

海水準変動による平野の地形発達に関しては、濃尾平野での事例調査ポイントを増加させるとともに、世界各地の事例のレビューを行い、より詳細な平野の形成プロセスを考察する。また、地震隆起などの地殻変動による地形・地質の発達も考慮していく。

地形変化シミュレーションに関しては、今後、より現実の自然現象に近い地形変化を予測するために、以下の研究が必要である。

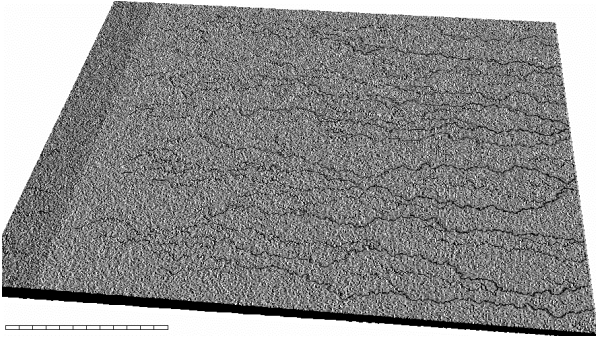
- ・ 具体的な従順化係数（地質や気候条件、河床勾配などに依存）を与えた解析の実施。
- ・ シミュレーション結果（標高変化、地形の開析量、下流側での堆積量など）と、実際の地形計測結果とが調和する「最適解」の探索（各種のパラメータを変えた繰り返し計算による）。
- ・ 日本全国の地質や気候条件による具体的な従順化係数の取得（地表調査など）。

参考文献

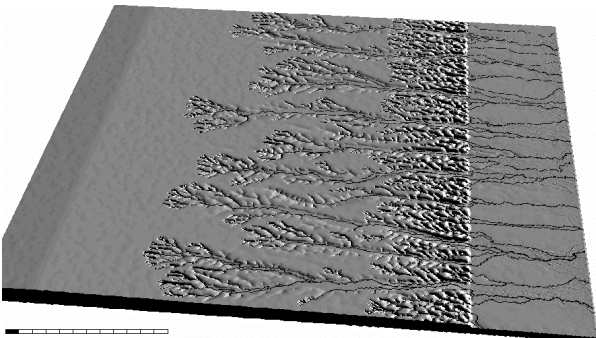
- 藤原 治・柳田 誠・三箇智二 (2004) : 日本列島の最近約 10 万年間の隆起速度の分布. 月刊地球, 26, pp. 442-447.
- Nogami, M., Fujiwara, O. and Sanga, T. (2002) : Simulation of a small drainage basin during the future of 120,000 yrs, Trans. Jap. Geomorph.

Union, 24, pp.105-106.

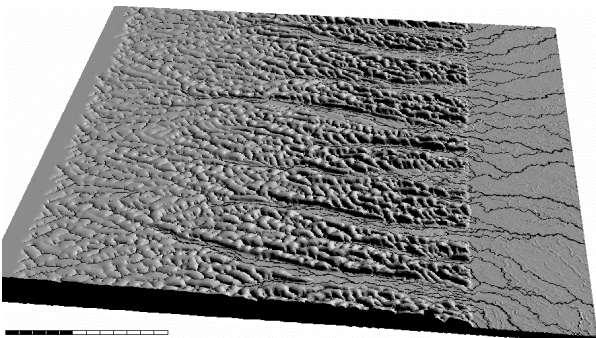
山口正秋, 須貝俊彦, 藤原 治, 大森博雄, 鎌滝孝信,
杉山雄一 (2003) : 濃尾平野ボーリングコア解析にも
とづく完新統の堆積過程, 第四紀研究, 42, pp. 335-
346.



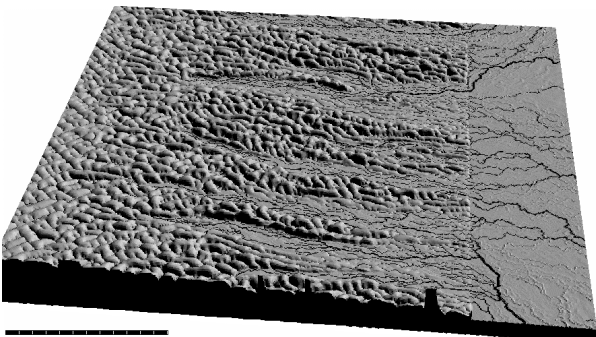
(a) 現在の地形陰影図



(b) 1 万年後の地形陰影図
(断層変位 10 m)



(c) 5 万年後の地形陰影図
(断層変位 50 m)



(d) 12 万年後の地形陰影図
(断層変位 120 m)

図 3.5.2-1 地形変化シミュレーションの結果

2) 火山活動に関する研究

① 課題と計画の概要

火山活動に関する研究では、『調査技術の開発』として「地下深部のマグマや高温岩体等の調査技術」，「第四紀火山の同定技術および熱史の復元技術」を，『長期予測・影響評価モデルの開発』として「地熱地帯の熱ポテンシャルの評価」，「確率統計学的手法による火山活動の予測モデル」に関する研究開発を進めている。

このうち，「地下深部のマグマや高温岩体等の調査技術」では，紀伊半島等を事例に地震波トモグラフィー，MT 法 (Magnetotelluric Method) 等の物理探査技術の適用性の確認を行うとともに (浅森ほか，2003；上原ほか，2003；梅田ほか，2003a)，温泉ガスの希ガス同位体等を用いたマグマや高温流体等の調査手法の検討を進めている (角田ほか，2002)。「第四紀火山の同定技術および熱史の復元技術」については，テフクロロジーによる噴火履歴の調査技術 (RIPL 法) の適用性の確認のほか (梅田・古澤，2004)，熱史の復元に用いる各種の地質温度計について適用条件・推定誤差等に関する情報の収集を行った。「地熱地帯の熱ポテンシャルの評価」については，一次元熱輸送モデルにより坑井温度プロファイルから熱流束を推定する手法を検討した (坂川・梅田，2004)。「確率統計学的手法による火山活動の予測モデル」については，独立単成火山群を例に，点過程モデルにより新たに発生する火山の確率分布を検討するとともに (Martin et al., 2003a, b)，成層火山を例に，中心火道から派生する放射状岩脈の確率分布をモンテカルロ法によって検討した。

以下では，平成 15 年度に実施した主な研究成果の概要を示す。

② これまでの成果

i) MT 法による深部比抵抗構造調査

地下深部に存在するマグマや高温流体に対する MT 法の適用性 (探査深度，分解能，解析精度等) を確認するため，地震波トモグラフィーによってマグマが確認されている鬼首・鳴子火山周辺 (例えば，Nakajima and Hasegawa, 2003) において，MT 法調査を行い，比抵抗構造を推定した。また，取得されたデータの品質が比抵抗構造に及ぼす影響を検討した (浅森ほか，2004)。

MT 法調査は，図 3.5.2-2(a)に示す東西約 50 km

の測線において 19 点の観測点を設置し，各測点において電場 2 成分および磁場 3 成分を 3 日間以上測定した。また，観測データの人工ノイズの影響を低減させるため，約 100 km 離れた宮城県丸森町においても観測を行い，このデータをリモートリファレンス処理に使用した。この結果，周波数 320Hz から 0.0005 Hz までの S/N 比の高い良好なデータが取得できた。

比抵抗構造の解析に際しては，Groom and Baily (1989) のテンソル分解により，構造の二次元性を確認したのち，N30° E 方向の磁場とそれに直交する電場から得られるインピーダンスを T M モードと定義し，Ogawa and Uchida (1996) のアルゴリズムを用いて観測されたインピーダンスを最も良く説明する地下 40 km までの比抵抗モデルを求めた。

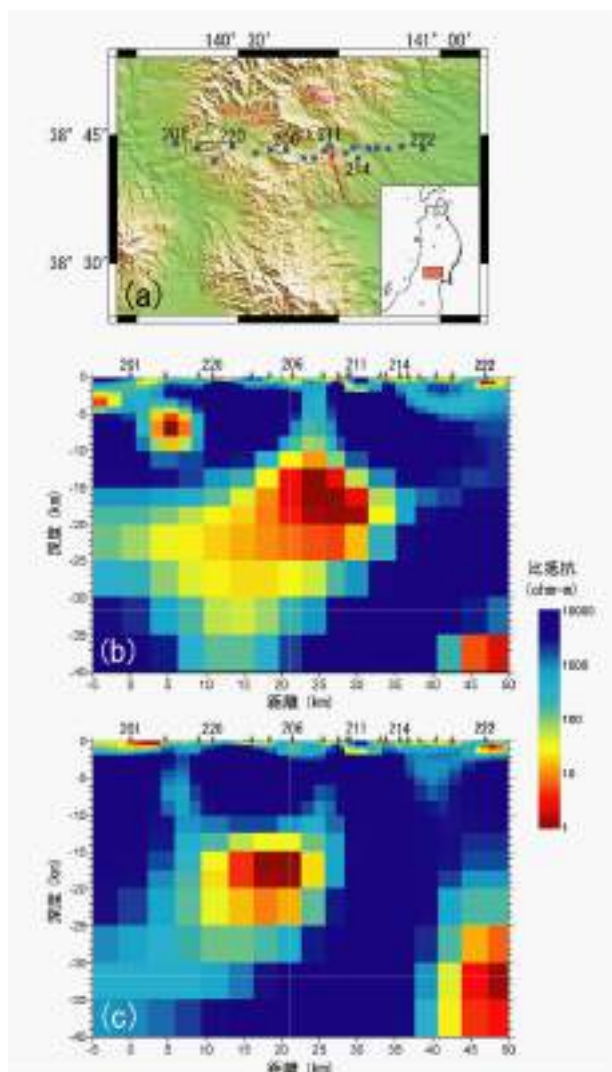
解析結果を図 3.5.2-2(b)に示す。鳴子火山下の西側の地殻中部および下部において顕著な低比抵抗体がみられた。これは地震波トモグラフィー (Nakajima and Hasegawa, 2003) によって見出されている低地震波速度異常域の分布と調和的である。また，地殻内の微小地震発生領域の下限 (約 400°C) は観測点 206 の東側に向かうにつれて浅くなっており，低比抵抗体の上面の形状と調和的である。これらのことから，鳴子火山下にみられる低比抵抗体は，部分熔融域に起因する流体の存在を示唆していると考えられる。

一方，観測期間中である 10 月末から 11 月初めにおいては，過去最大級の太陽フレアによる磁気嵐が発生したため，地磁気 (シグナル) の強度が全般的に大きくなり，人工ノイズの影響の小さい観測データを得ることができたが，それ以前に観測したデータを用いた解析結果 (図 3.5.2-2(c)) と比較すると，比抵抗構造の形状が大きく異なる。これらは，同一観測点で観測された 0.1 Hz 以下の見掛け比抵抗や位相が地磁気活動の活発でない時期に比べて大きな誤差が伴うことに起因するものと考えられる。

今後は，観測されたデータの S/N 比の違いが解析に及ぼす影響を定量的に把握するとともに，三次元のインバージョン解析についての検討を進めていく予定である。

ii) 温泉ガス等のヘリウム同位体比測定

火山ガスに含まれるヘリウムは，地殻中での化学反応を生じにくいことから地下深部の化学的な



(a) 比抵抗探査における観測点分布
(b) 地磁気活動が活発な時期のデータによる解析結果
(c) 地磁気活動が静穏な時期のデータによる解析結果

図 3.5.2-2 MT 法調査の結果

情報を得るための重要な指標の一つである。特に、温泉ガス中のヘリウム同位体比 ($^3\text{He}/^4\text{He}$) は、マントル物質の寄与の程度を推定するための有効な手段の一つであると考えられている。平成 14 年度までに紀伊半島周辺の代表的な温泉において付随ガスのヘリウム同位体比の測定を行ったところ、大気値 ($1R_a : 1.4 \times 10^{-6}$) とマントル起源のヘリウム同位体比 ($8 \pm 1R_a$) の中間的な値が得られた。

一般に、沈み込み帯の前弧域の温泉で観測されるヘリウム同位体比は、大気値と同程度やそれよりも低い値を示すと考えられている（例えば、Sano and Wakita, 1985）ことから、紀伊半島周辺の高いヘリウム同位体比は、スラブから脱水した流体によってマントル起源のヘリウムが付加された可能性が指摘されている（例えば、梅田ほか、

2004）。

しかしながら、前弧域（非火山地帯）におけるヘリウム同位体比のデータは限られることから、東北日本や西南日本といった地域ごとの系統的な違いは明らかにされていない。そのため、温泉ガスのヘリウム同位体比をマグマや高温流体等の存在を推定するための手法として用いるためには、非火山地帯におけるヘリウム同位体比の一般的な値（バックグラウンド）を評価しておくことが必要となる。そのため、平成 15 年度は、紀伊半島と同様に四国海盆の沈み込み帯に位置する四国の代表的な温泉（15 地点）において、付随ガスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 CO_2 、 H_2S 、 H_2 、 O_2 、 N_2 、 CH_4 、 He 、 Ar のほか、温泉水の D/H 、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ の測定を行った。

図 3.5.2-3 に今回測定した四国の温泉ガス（一部は温泉水に溶存する気体成分を真空環境下において超音波振動によって抽出したガス）の $^3\text{He}/^4\text{He}$ の分布を示す。前弧域においてマントル起源のヘリウムの影響を受けている基準となる大気値の 2 倍以上の値（Wakita et al., 1987）を示す温泉もいくつか存在するものの、全般的には大気値と同程度の値を示し、紀伊半島で観測された値に比べると有意に低い。しかしながら、東北日本の前弧域の温泉ガス（Sano and Wakita, 1985）に比べると、系統的に高い値を示すことが明らかになった。

今後は、ヘリウム同位体比の系統的な違いについて、地球物理学的データ等との比較・検討を行うとともに、火山フロントの背弧側の非火山地帯に関するデータの蓄積を図る予定である。

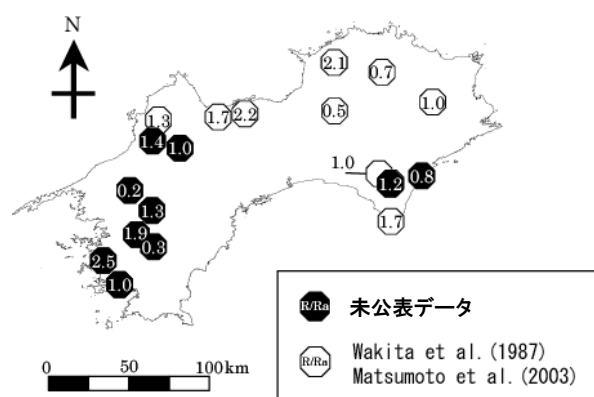


図 3.5.2-3 四国地方における $^3\text{He}/^4\text{He}$ 分布

R は $^3\text{He}/^4\text{He}$ の測定値、 R_a は大気の $^3\text{He}/^4\text{He}$ の値 (1.4×10^{-6}) を示す。

iii) RIPL 法による第四紀火山の同定技術

火山の活動時期の推定に際しては、K-Ar 年代測

定、フィッシュトラック年代測定等といった絶対年代を求める方法と、火山灰やレスによる地質学的編年等といった相対年代を求める方法とを、それぞれの適用条件においてうまく組み合わせていくことが重要になる。特に、火山灰による編年では、鍵層によって噴出物の新旧を一義的に決定できるため、新第三紀・第四紀境界の火山灰が識別できれば、第四系の認定に大きな役割を果たす。

しかしながら、降下火山灰・軽石等のテフラは、その分布域が特定の方向に限られていることが多く、降灰主軸から離れた地域や小規模噴火によってわずかにしか降灰しない場合には、露頭において肉眼でテフラを識別することは困難であることが多い。このため、風成層や湖沼・内湾堆積物を5~10 cm 間隔で連続的に採取し、試料に含まれる火山ガラス、斑晶鉱物（斜方輝石、角閃石等）の屈折率を全て測定し、得られた大量のデータを統計的に解析し、肉眼では識別できないテフラ起源物質やテフラ降灰層準を認定する手法（Refractive Index Physical Lobar Method ; RIPL 法）により、放射年代測定が適用できなかった火砕流堆積物の形成時期の推定を試みることとし、この手法を用いて、むつ燧岳火山の最新期の噴出物（MHi-2-pf1）の形成時期の推定を行った。

調査にあたっては、MHi-2-pf1 の上下の風成層中のテフラと、この地域に飛来した可能性がある広域テフラおよびむつ燧岳火山の南東に広がる田名部低地帯に分布するテフラとの対比を行った結果、その噴出時期は、30 数万年前であることが明らかになった（梅田・古澤，2004）。

以上のことから、RIPL 法が更新世中期の小規模噴火の同定にも適用できる見通しを得たが、今後は鮮新世～更新世前半の火山への適用性について検討していく予定である。

iv) 一次元熱輸送モデルによる熱流束の評価

地下深部のマグマや高温岩体等の熱源による地質環境の熱的影響を定量的に評価するため、一次元熱輸送モデル（流体によって運ばれる熱を考慮したモデル）による熱流束の解析手法の検討を行った（梅田ほか，2003b；坂川・梅田，2004）。

実際の坑井温度プロファイルからその地域の流体流動の速度や熱流束を計算するための一次元熱輸送モデルには、Bredehoeft and Papadopoulous（1965）のモデルと、Clauser and Villinger（1990）のモデルがある。これらのモデルは、熱

伝導によって運ばれる熱（伝導熱流束）と流体によって運ばれる熱（移流熱流束）の合計が上方境界面を含めて各深度で一定に保たれていると仮定している。熱流束の算定に際しては、実測データにモデル曲線をフィッティングして求めるが、前者は各深度の温度の値そのものの残差を最小にするのに対して、後者は温度勾配と熱伝導率の積の対数の残差を最小にするという条件で温度分布を計算する。

一方、一般過程の比熱の定圧比熱からのずれは圧力の温度による微分にある係数を掛けたものになるが、この係数は温度依存性が大きく、高温で温度勾配が小さい場合には実際の比熱は定圧比熱と違いモデルで仮定する一定値から乖離している可能性が考えられる。そのため、温度勾配を直接的にモデルフィッティングに供する Clauser and Villinger のモデルでは、地下深部の高温かつ熱移流が卓越する領域では、見積もりの誤差が大きくなることから、温度プロファイルにこの領域のデータが含まれる場合には比熱のずれを概略的に評価した上で解析から除外することとした。

図 3.5.2-4 に上記の2種類の手法によって坑井温度プロファイルを解析した結果を示す。これらの結果によると、深度 0 m での伝導熱流束は、Bredehoeft and Papadopoulous のモデルでは 1.13 Wim^{-2} 、Clauser and Villinger のモデルでは 1.18 Wim^{-2} となった。また、地表での流体の基準温度を 10°C とした場合の移流熱流束を含む総熱流束はそれぞれ 0.92 Wim^{-2} 、 0.89 Wim^{-2} となり、解析方法による算定結果の違いは数%程度であった。

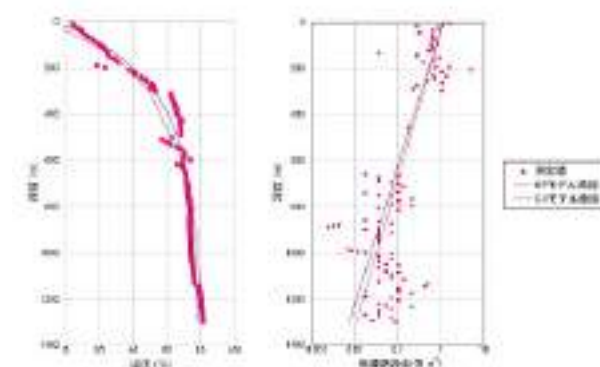


図 3.5.2-4 実際の坑井温度プロファイルによる解析結果

(a)および(b)はそれぞれ深度-温度、深度-伝導熱流束としてプロットした同一のデータを示す。

今後は、これらの解析手法を用いた火山・地熱

地帯における熱的影響の評価を進めるとともに、実測データから地下深部の熱源や熱水対流系等の深度、大きさ等を推定する手法の開発を進めていく予定である。

v) モンテカルロ法による火山活動の長期予測モデル（岩脈モデル）の開発

将来の火山活動の可能性を評価するための長期予測モデルの開発の一環として、成層火山の中心火道から派生する放射状岩脈の確率分布をモンテカルロ法によって計算するモデル（岩脈モデル）を作成した。これは、成層火山に伴う側火山と中心火道の間に放射状岩脈が存在すると仮定し、岩脈の到達距離（中心火道－側火山間）と方向性のデータを正規分布近似したのち、モンテカルロ法により、対象領域に岩脈が生じる確率を計算するものである。

既存の岩脈モデルには Perry et al. (2001) があるが、放射状岩脈が全方位に均一に発生すると仮定しているため、これにより求められる任意の位置での確率は中心火道からの距離のみに依存し、広域応力場に起因する放射状岩脈の異方性は考慮されていない。今回作成したモデルでは、岩脈の到達距離から求められる確率 P_p に対して、岩脈の異方性を考慮した任意の位置における確率 P_w を (3.5.2-1) 式から求めている。

$$P_w = P_p \cdot W(\theta) \quad (3.5.2-1)$$

ここで、 θ 、 $W(\theta)$ はそれぞれ、岩脈の方位、正規分布に基づく重み付け関数である。なお、今回作成したモデルにおいて確率 P_p を算出する際に用いる乱数アルゴリズムは、Matsumoto and Nishimura (1998) による Mersenne Twister 法を用いた。

今回作成したモデルを用いて、富士山の形成に伴って発生する放射状岩脈の確率分布を計算した (図 3.5.2-5)。計算する格子間隔は 0.5 km とし、各格子から半径 1.5 km の円内に発生した岩脈の確率分布を計算した。また、岩脈の長さや異方性については、富士山に認められる 104 の側火山の位置を津屋 (1971) から読み取り、データベース化した。なお、ここで求めた確率は、1 回の岩脈が形成された場合の対象領域に発生する空間的な確率を計算したものであり、時間的な概念は含まれていない。

図 3.5.2-5 によると、富士山では中心火道から北西－南東あるいは北東－南西方向に高い確率分布を示し、顕著な異方性を示す。また、中心火道から数 km では $10^{-1} \sim 10^{-2}$ オーダーの高い確率を示すが、中心火道から 10～15 km 以上離れた地域では、中心火道近傍に比べて確率分布が 2 オーダー以上低くなった。

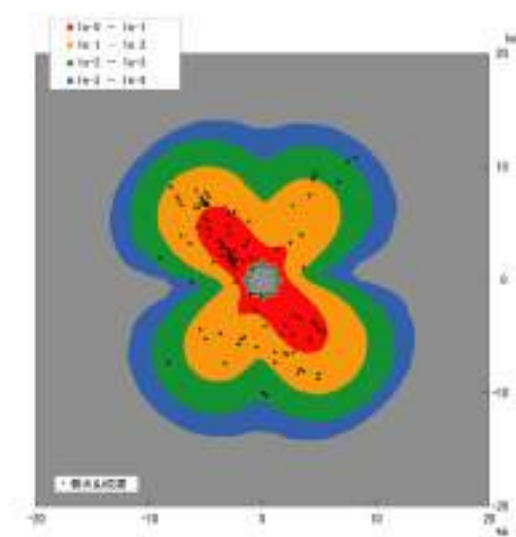


図 3.5.2-5 岩脈モデルによる確率分布
(富士山の例)

③ まとめ

「地下深部のマグマや高温岩体等の調査技術」については、MT 法調査が中～下部地殻のマグマや高温流体の存在を判定するための有効な物理探査技術であることを確認した。また、前弧域における温泉ガスのヘリウム同位体比を活用する際には、地域ごとのバックグラウンドを考慮する必要があることが明らかになった。「第四紀火山の同定技術および熱史の復元技術」については、RIPL 法が更新世中期の小規模噴火の同定に適用できることを確認した。「地熱地帯の熱ポテンシャルの評価」では、既存の解析手法を検討した結果、解析方法の違いによる算定結果の違いは数%程度であることがわかった。「確率統計学的手法による火山活動の予測モデル」では、モンテカルロ法による成層火山を対象とした火山活動の長期予測モデル（岩脈モデル）を作成した。

参考文献

浅森浩一、梅田浩司、小川康雄、武田祐啓、千葉昭彦、趙 大鵬、鍵山恒臣 (2003)：雲仙岳下における比抵抗及び地震波速度構造、地球惑星関連学会 2003 年合同大会予稿集 (CD-ROM), V055-034.

- 浅森浩一, 梅田浩司, 小川康雄, 武田祐啓, 上原大二郎, 鍵山恒臣 (2004): 鳴子火山下における深部比抵抗構造, 地球惑星関連学会 2004 年合同大会予稿集 (CD-ROM), V055-012.
- Bredehoeft, J.D. and Papadopoulos, I.S. (1965): Rates of vertical groundwater movement estimated from the earth's thermal profile, *Water Resour. Res.*, 1, pp.325-328.
- Clauser, C. and Villinger, H. (1990): Analysis of conductive and convective heat transfer in a sedimentary basin, demonstrated for the Rheingraben, *Geophys. J. Int.*, 100, pp.393-414.
- Groom, R.W. and Bailey, R.C. (1989): Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortions. *J. Geophys. Res.*, 94, pp.1913-1925.
- 角田地文, 梅田浩司, 石丸恒存, 工藤 健, 棚瀬充史, 小松 亮 (2002): 紀伊半島南部における地殻構造について一非火山地域における高温異常域の地殻構造の検討例一, 日本応用地質学会中部支部研究発表会・講演会予稿集, 14, pp.25-30.
- Martin, A.J., Takahashi, M., Umeda, K. and Yusa, Y. (2003a): Probabilistic methods for estimating the long-term spatial characteristics of monogenic volcanoes in Japan, *Act. Geophysica. Polonica*. 51, pp.271-289.
- Martin, A.J., Umeda, K. and Yusa, Y. (2003b): Probabilistic approaches for predicting the long-term spatial and temporal characteristics of monogenetic volcanoes; application to two monogenetic volcano fields in Japan, *JNC Technical Review*, No.18 (2003.3), pp.59-70.
- Matsumoto, M. and Nishimura, T. (1998): Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator, *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation*, 8, pp.3-30.
- Matsumoto, T., Kawabata, T., Matsuda, J., Yamamoto, K. and Mimura, K. (2003): $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in well gases in the Kinki district, SW Japan surface appearance of slab-derived fluids in a non-volcanic area in Kii Peninsula, *Earth Planet Sci. Lett.*, 216, pp.221-230.
- Nakajima, J. and Hasegawa, A. (2003): Estimation of thermal structure in the mantle wedge of northeastern Japan from seismic attenuation data, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 10.1029 / 2003GL017185.
- Ogawa, Y. and Uchida, T. (1996): A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift. *Geophys. J. Int.*, 126, pp.69-76.
- Perry, F.V., Valentine, G.A., Desmarais, E.K. and WoldeGabriel, G. (2001): Probabilistic assessment of volcanic hazard to radioactive waste repositories in Japan: Intersection by a dike from a nearby composite volcano, *Geology*, 29, pp.255-258.
- 坂川幸洋, 梅田浩司 (2004): 一次元熱輸送モデルによる熱流束推定手法の再検討, 地球惑星関連学会 2004 年合同大会予稿集 (CD-ROM), T032-P002.
- Sano, Y. and Wakita, H. (1985): Geographical distribution of $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in Japan: Implications for arc tectonics and incipient magmatism, *Jour. Geophys. Res.*, 90, pp.8729-8741.
- 津屋弘達 (1971): 富士山の地形・地質. 富士山-富士山総合学術調査報告書 (国立公園協会・編), 富士急行, pp.2-127.
- 上原大二郎, 石丸恒存, 棚瀬充史, 小川康雄, 鍵山恒臣 (2003): MT 法におけるファーマトリファレンス処理の効果と紀伊半島南部地域の深部比抵抗構造, 応用地質, 44, pp.164-174.
- 梅田浩司, 浅森浩一, 及川輝樹, 角田地文, 趙 大鵬, 鎌谷紀子 (2004): 前弧域の非火山地帯における高温異常域について一紀伊半島中～南部の地殻・マントル構造と温泉ガスのヘリウム同位体比一, 月刊地球, 26, (印刷中).
- 梅田浩司, 古澤 明 (2004): RIPL 法によるテフラ降灰層準の認定と最新の噴火活動の推定, 月刊地球, 26, (印刷中).
- 梅田浩司, 梶原竜哉, 内田洋平 (2003b): 日本列島における坑井温度プロファイルのコンパイルと一次元熱輸送モデルによる熱流束, 地球惑星関連学会 2003 年合同大会予稿集 (CD-ROM), T032-P002.
- 梅田浩司, 上原大二郎, 小川康雄, 工藤 健, 角田地文 (2003a): 広帯域MT法による紀伊半島の中新世珪長質火成岩体の深部構造, 火山, 48, pp.461-470.
- Wakita, H., Sano, Y. and Mizoue, M. (1987): High ^3He emanation and seismic swarms observed in a nonvolcanic, forearc region, *Jour. Geophys. Res.*, 92, pp.12539-12546.

3) 地震・断層活動に関する研究

① 課題と計画の概要

テクトニクスと断層活動との関係を分析した結果をもとに、過去数十万年に繰り返し活動し、その痕跡が地形に現われ、今後も活動を繰り返すと考えられる断層を「活断層」と定義し、研究を進めている。この活断層について、平成 12 年度までに既存情報の整理、解析および判読精度の向上により、全国一律の基準で見直しを行い、「200 万分の 1 日本列島活断層図」(200 万分の 1 活断層図編纂ワーキンググループ, 2000) を作成するとともに、全国の主要な活断層に関する分布や活動性等の諸元を把握・整理し、GIS データとして整備した。また、それらの活動による地質環境への影響の範囲と程度について、主に既存文献の網羅的な調査により、その影響が活断層帯周辺の特定の範囲に限られていることを示した (「第 2 次取りまとめ」)。

これらの結果を踏まえ、平成 13 年度からは、概要調査地区の選定および精密調査地区の選定段階で必要となる知見の蓄積と調査技術の体系化およびそれらの信頼性の向上を当面の目標とし、特に重要と考えられる事象に焦点をあてた以下の事例研究を実施している。

- ・震源断層の調査技術に係わる調査・研究
- ・将来の活断層帯の延伸や、断層活動による周辺岩盤の変形などに伴う地質環境への力学的影響等の範囲に係わる調査・研究

平成 14 年度までに、前者について、「潜在的震源断層」(M7 クラスの地震を過去数十万年間に繰り返して発生させた断層のうち、地表に明瞭な痕跡を残さないもの)の調査技術の開発・体系化に関して、中国地方を事例として、2000 年鳥取県西部地震の震源域における地形学的な特徴を調べるとともに、同様の地形がどのような地域に分布する傾向があるか、地球物理学的情報や地質学的情報との比較によって検討を行った(高田ほか、2003)。後者については、月吉断層を事例対象に、断層周辺に形成された小断層や亀裂の分布の特徴を把握した。

② これまでの成果

i) 震源断層の調査技術に係わる調査・研究

2000 年鳥取県西部地震の震源域（本震の震央から半径 20 km 程度の範囲）の特徴を明らかにし、

潜在的震源断層の分布の推定可能性を検討するため、地形・地質学的な調査と、地球物理学的情報等を踏まえた総括的な解析を試みた。

この震源域の分布は、横田の単成火山群のおおよその分布範囲と重なる。また、余震分布とほぼ同方向の第四紀の火山列が、約 10 km 離れて分布する（図 3.5.2-6）ため、この地震活動と、火成活動との間に何らかの関係があることが示唆される。この震源域では、系統的でない河川の屈曲や、現在の広域応力場および Okada (1992) が示した断層活動に伴う変形様式と整合的な山地高度の有意な不連続（以下、推定変位地形という。）を伴い、断層活動に伴って形成された可能性がある線状の地形（以下、推定地震性線状地形という。）の集中が特に顕著である。したがって、このような特徴が潜在的震源断層の存在を示している可能性がある。

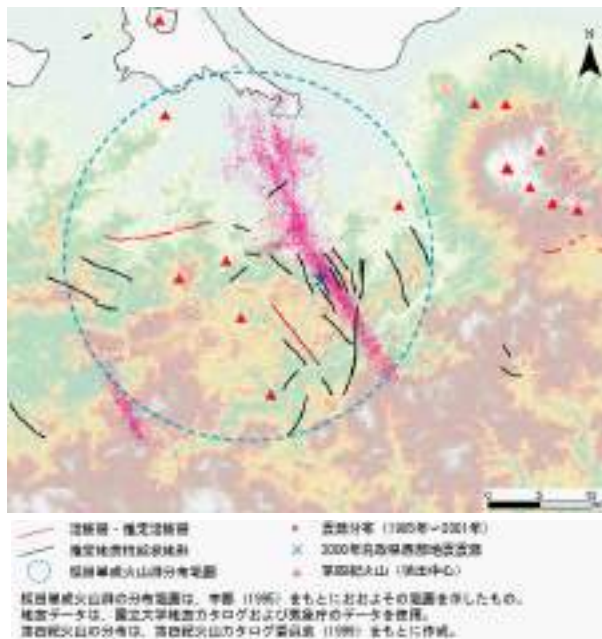


図 3.5.2-6 鳥取県西部地震震源域の活断層・推定地震性線状地形分布と単成火山群の分布

推定地震性線状地形は、断層活動が繰り返されてきた傍証といえる推定変位地形を伴うことから、少なくともその一部は、潜在的震源断層の活動に伴って形成されたものと推定できる。この分布の特徴だけから潜在的震源断層の分布を推定することはできないが、それと併せて、地質学的情報等を用いた複合的な解析を行うことにより、潜在的震源断層の分布が推定できる可能性がある。そこで、中国地方を対象に、主に推定地震性線状地形

の分布と第四紀の火成活動に着目して、複合的な解析を試みた。

中国地方の日本海側において、第四紀に活動している単成火山群の分布範囲と活断層および推定地震性線状地形の分布をみると、火山フロント背弧側にあたる日本海側で、両者の分布が重複しており（図 3.5.2-7）、これらの地域では火成活動と断層活動の間に何らかの関連性があることが示唆される（野原・木下，2004）。

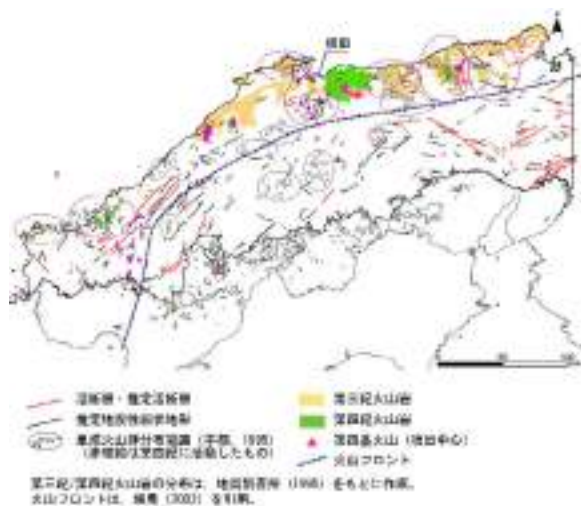


図 3.5.2-7 中国地方の活断層・推定地震性線状地形分布と火山岩の分布

断層活動や火成活動による地質構造の変化の累積は、しばしば不均質な重力異常の分布として認められることが知られている。重力と活断層および推定地震性線状地形の関係を調べるため、中国地方を対象に、半径 15 km の円を検索範囲として、円内の重力異常の標準偏差ごとの、単位面積あたりの活断層および推定地震性線状地形の累積長を求めた。その結果、重力異常の標準偏差が 0~14 mgal の範囲で、その値が大きいほど、単位面積あたりの累積長が大きく、重力異常の不均質性が顕著な地域に、活断層および地震性線状地形が偏在する傾向が認められた（Kudo et al. , 2004）。この重力異常の標準偏差値と活断層および線状地形の分布を、中国地方土木地質図（中国地方土木地質図編纂委員会編，1984）に記載された断層の分布と比較した結果、重力異常の標準偏差値が 10 mgal 以上の地域では、推定地震性線状地形にほぼ対応する断層が認められた。また、本地域では、長さ 18 km 以上の推定地震性線状地形が 3 本解析されたが、これらは重力異常の標準偏差値が 5

mgal 以上の地域に分布しており、それらにほぼ対応する断層が認められた。

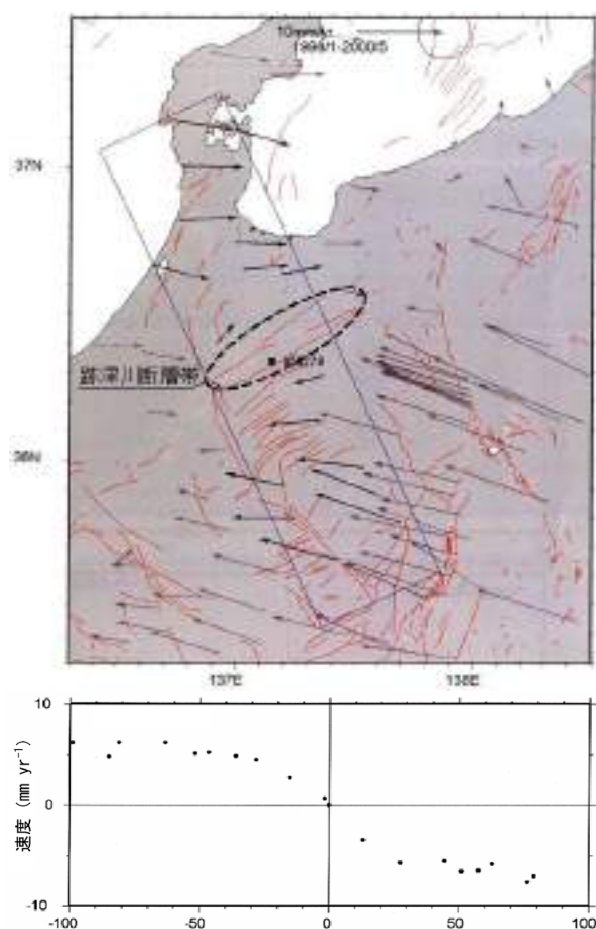
以上の解析の結果、中国地方においては鳥取県西部地震震源域で見られるような、推定地震性線状地形の集中と第四紀火山の分布とが重なる地域は他には認められなかった。ただ、推定地震性線状地形の分布については、活断層帯のほか、不均質な重力異常の主な原因と考えられる地質断層および火山が分布する地域に偏在する傾向がみられ、その多くは、最近の断層活動および火成活動に関連して形成されたことが示唆される。推定地震性線状地形が偏在することは、花崗岩類が広く分布する中国地方でも、火成活動などに伴って地質構造に局所的な地域差が生じており、断層活動の影響を考える上で、地域性の考慮が重要であることを示しているといえる。

鳥取県西部地震の震源域で抽出された推定地震性線状地形を対象とした地表調査を行った結果、推定地震性線状地形の分布は、花崗岩類が分布する地域に偏在する傾向がみられた。また、多くの推定地震性線状地形の分布域では、それに対応する可能性のある塩基性の貫入岩脈や断層、亀裂が観察された。

また、潜在的震源断層の存在を示唆する証拠とされる GPS 等の測地学的に得られる現在の地殻変動と地形・地質学的に得られる活断層の情報の関係を解析した。従来は、GPS データから求めた歪速度と、地形・地質学的に推定される活断層の平均変位速度等から求められる歪速度との比較がなされており、前者が後者に比べて 1 桁から 2 桁程度大きい値を持つため、未知の活断層や潜在的震源断層等が存在する可能性が指摘されていた。しかし、GPS データは非断層活動時の比較的短期間の歪みであり、一方地形地質学的データは断層活動時の長期間の変位の累積の平均値である。異なる現象を比較していることになり、本来、それらが一致する必然性はない。一方、断層活動に伴う定常的な地殻変動があるならば、その速度は、活断層を境とする両側のブロック運動を反映して、断層からある程度離れた 2 地点間の相対的な運動速度として、測地学的にも求められるはずである。海外では、そのような例が示されている（Bourne et al., 1998）。

そこで、国内の主要な活断層（糸魚川－静岡構造線断層帯（中部）、阿寺断層帯、跡津川断層帯、濃尾断層帯、養老－桑名－四日市断層帯）につい

て、各断層に最も近い観測点を選んで基準点とし、この基準点に対する周辺の GPS 観測点の相対的な変動速度から、活断層両側の地殻変動速度（図 3.5.2-8）を求めた（鷲谷，2004）。その結果、活断層から両側にそれぞれ 30～50 km 程度離れた 2 地点間の相対的な変動の方向と値は、個々の活断層で地形・地質学的に推定されているものと矛盾しないことが明らかになった。また、活断層地域の深部における変形は、ブロック境界に集中したものではなく、断層の周囲に幅を持った、流動的な変形である可能性が示唆された。



1998 年 1 月から 2000 年 5 月までの国土地理院の GPS データを使用し、950279 観測点を基準点として他の観測点の変動速度を求めた。上図の矩形範囲が下図の解析領域。下図は、変動速度のうち、跡津川断層の走向方向に対して平行方向のベクトル成分を示したもの。基準点を 0 として、縦軸は速度 (mm yr^{-1})、横軸は基準点からの距離 (km) を示している。

図 3.5.2-8 活断層周辺の地殻変動速度

ii) 断層活動に伴う地質環境への力学的影響等の範囲に係わる調査・研究

断層活動に伴う力学的影響については、横手盆地東縁断層帯を事例として、分岐、変形範囲の長

期的変化とその原因について、地形・地質学的調査および弾性波探査を行った。その結果、逆断層帯で最近数十万年間に生じた新たな分岐は、盆地側に偏って生じている可能性が高いことがわかった。また、既存の物理探査等の調査結果を踏まえて、同じ逆断層帯の中の 3 地点で分岐や変形の様子を比較した結果、それらの範囲の幅は地点ごとに異なることがわかった（佐藤，2004）。一般的な傾向として、盆地の沈降・堆積速度が比較的大きい地点では、分岐や変形の範囲の幅は広く、かつ、盆地側の分岐断層が地表に明瞭に現れる傾向がみられる。また、分岐開始点が相対的に新しい地層中であって盆地側に明瞭な褶曲構造が発達する地点と、分岐開始点が古い地層中であって盆地側に褶曲構造の発達がみられない地点とを比較した場合、前者の方が分岐・変形の範囲の幅は大きく、かつ、盆地側の分岐断層が地表に明瞭に現れる傾向が示唆された。後者に該当する地点では、盆地側の分岐断層が地表に現れない場合がある。

③ まとめ

2000 年鳥取県西部地震の震源域の地形学的、地質学的および地球物理学的情報等を踏まえた複合的な解析により、潜在的震源断層分布の調査手法を検討した。中国地方における推定地震性線状地形の偏在や、それらの分布と重力異常の標準偏差との相関は、花崗岩類が広く分布するこの地域でも、地質構造に局所的な地域差があり、この地域性の考慮が、断層活動の影響を考える上で重要であることを示唆している。2000 年鳥取県西部地震の震源域では、最近の断層活動に伴って形成された可能性がある推定地震性線状地形の集中など、地形学的な特異性がみられる。ここで生じた断層活動は、第四紀の火成活動との関連性が示唆され、これらの特徴が潜在的震源断層の存在を示す可能性がある。この震源域でみられる地形学的特徴および第四紀の火成活動と関連した地質学的特徴は、他の地域では認められないこと、GPS データから求めた主要な活断層の平均変位速度と、地形地質学的に求められている平均変位速度がほぼ同様で、矛盾がないことから、その潜在的震源断層と同じ規模のものが、中国地方の他の地域に分布する可能性はむしろ低いといえる。以上のように、試行的ではあるが複合的な調査・解析により、潜在的震源断層の分布が推定できる可能性が示された。

断層活動に伴う力学的影響については、過去数

十万年間の逆断層帯の分岐および変形の幅が、盆地側の地下構造と関連している可能性を示すことができた。

上述の結果は、限られた情報をもとに推定したものであり、関連する知見の蓄積とデータの信頼性の向上が主な課題として残っている。今後は、震源断層の調査技術については、地震データ等の解析による地下構造の把握や、DEM データを用いた地形解析および潜在的震源断層の活動履歴に関する調査などを実施して、調査技術の体系化と信頼性向上を図る。断層活動に伴う力学的影響については、逆断層帯の過去数十万年間の分岐・変形領域の変化過程に関する三次元的な情報を取得するための調査技術の体系化と、信頼性の向上をはかる。

参考文献

- 200 万分の 1 活断層図編纂ワーキンググループ
(2000) : 200 万分の 1 日本列島活断層図, 活断層研究, 19, 1 sheet.
- Bourne, S. J., England, P. C. and Parsons, B. (1998) : The motion of crustal block driven by flow of the lower lithosphere and implications for slip rates of continental strike-slip faults, *Nature*, 391, pp. 655-659.
- 地質調査所 (1995) : 100 万分の 1 日本地質図第 3 版.
- 中国地方土木地質図編纂委員会編 (1984) : 中国地方土木地質図.
- 第四紀火山カタログ委員会 (1999) : 日本の第四紀火山カタログ, 日本火山学会.
- 垣見俊弘 (2002) : 「地震断層」と「バックグラウンド地震」のはざまの地震—鳥取県西部地震を例として—, 災害の研究, 33, pp. 113-125.
- Kudo, T., Yamamoto, A. Nohara, T. Kinoshita, H. and Shichi, R. (2004) : Variations of standard deviation of gravity anomalies in Chugoku district, Japan: Relationship with distributions of topographic lineaments, *Earth Planets Space*, 56, E-Letter, pp. e5-e8.
- 野原 壯, 木下博久 (2004) : 鳥取県西部地震と地質環境の長期安定性, 月刊地球, 26, pp. 372-377.
- Okada, Y. (1992) : Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82, pp. 1018-1040.
- 鷺谷 威 (2004) : GPS データを用いた地殻変動解析手法に関する研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 名古屋大学), JNC TJ7400 2004-010.
- 佐藤比呂志 (2004) : 逆断層帯の地質構造の三次元的モデル化のための弾性波探査手法に関する研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 東京大学), JNC TJ7400 2004-009.
- 高田圭太, 中田 高, 野原 壯, 原口 強, 池田安隆, 伊藤 潔, 今泉俊文, 大槻憲四郎, 鷺谷 威, 堤浩之 (2003) : 震源断層となりうる活断層とリニアメントの検討—中国地方を事例として—, 活断層研究, 23, pp. 77-91.
- 宇都浩三 (1995) : 火山と年代測定 : K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定の現状と将来, 火山, 40, pp. 27-46.

4) 研究情報基盤の整備

4-1) 地質環境の長期安定性に係わるデータベースの整備

① 課題と計画の概要

安全評価に用いる天然現象の影響に係わる力学、熱、地下水理、水質等のパラメータに関する情報を整備するため、平成 15 年度までにわが国の地下の温度構造や地下水の化学的性質に関する情報を収集するとともに、データベースとして取りまとめた。

② これまでの成果

i) 坑井温度データベース

「第 2 次取りまとめ」では、日本全国の温泉井、地熱井等 1,936 本の坑井について坑底温度等を調査し、個別坑井のデータ（緯度、経度、標高、スタンディングタイム、坑井深度、坑底温度、地温勾配）を取りまとめたが（田中ほか，1999）、深度ごとの温度データ（いわゆる坑井温度プロファイル）については、公表されていない。温度プロファイルは、その地域の地下の詳細な温度構造に関する情報を与えるのみならず、プロファイルの曲率等から深部からの流体の上昇速度や熱流量を算定することが可能である（梅田ほか，1999）。

そのため、上記で収集したデータのうち、温度プロファイルが明らかなもののうち、地下水流動等による温度の擾乱の影響が大きいと考えられる掘削深度 300 m 未満のデータを除外した 1,215 本の坑井温度プロファイルをデータベース化した（坂川ほか，2004；図 3.5.2-9）。



図 3.5.2-9 「坑井温度データベース」の表示例

ii) 温泉地化学データベース

瀬尾・清水（1992）は、わが国の地下水の水質の特徴を明らかにするため、1953 年から 1988 年までに公表された学会誌を中心に化学分析値等のデータを取りまとめた。また、「第 2 次取りまとめ」では、火山活動が地下水の水質に及ぼす影響を把握するため、1989 年以降の地下水・温泉の化学分析値を収集した。

今回、これらのデータベースの統合を図るとともに、空間的な解析を可能にするため、地下水・温泉の採取地点（緯度・経度）を特定した「温泉地化学データベース」を作成した（浅森ほか 2002；浅森ほか，2003）。データベースには、採取地点をはじめ、井戸深度、採水標高、湧出量、pH、電気伝導度、Eh、化学分析値（陽イオン、陰イオン、非解離成分、遊離成分等）、文献名等のデータが収録されている。

③ まとめ

わが国の地下の温度構造や地下水の化学的性質に関する情報を取りまとめ、「坑井温度データベース」、「温泉地化学データベース」を作成した。今後は、「5.2.6 天然現象影響評価モデル」に必要なそれぞれの現象のプロセスに係る最新の学術的知見や天然現象の影響に係わる力学、熱、地下水理、水質等のデータを整備していく予定である。

参考文献

- 浅森浩一，石丸恒存，岩月輝希（2002）：日本列島における火山周辺の酸性地下水分布，サイクル機構技報，No. 15（2002.6），pp.103-111.
- 浅森浩一，梅田浩司，石丸恒存，小松 亮（2003）：温泉地化学データベースの作成，サイクル機構技術資料，JNC TN7450 2002-003.
- 坂川幸洋，梅田浩司，鈴木元孝，梶原竜哉，内田洋平（2004）：日本の坑井温度プロファイルデータベース，地震，（印刷中）.
- 瀬尾俊弘，清水和彦（1992）：我が国における地下水の水質に関するデータの収集・解析，動力炉・核燃料開発事業団技術資料，PNC TN7410 92-017.
- 田中明子，矢野雄策，笹田政克，大久保泰邦，梅田浩司，中司 昇，秋田藤夫（1999）：坑井の温度データによる日本の地温勾配値のコンパイル，地質調査所月報，50，pp.457-487.
- 梅田浩司，小松 亮，江原幸雄（1999）：坑井温度データから算定した地熱地帯における熱水流体の流動速度及び熱流量，地熱，36，pp.219-237.

4-2) 次世代の高精度物理探査技術等に係わる 基盤研究

① 課題と計画の概要

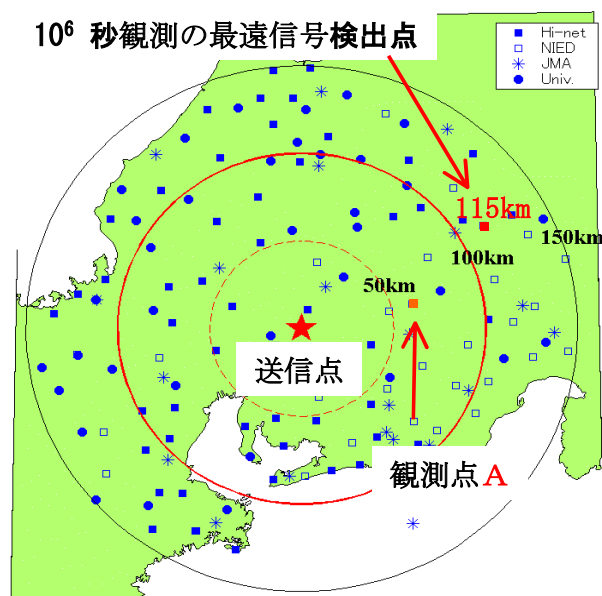
物理探査等において、高い分解能と長い探査距離を両立させるための基盤研究として、アクロス（精密制御定常信号システム；Accurately Controlled Routinely Operated Signal System (ACROSS)) の研究開発を実施している。アクロスは、能動的計測全般に応用可能で汎用性の高い信号理論およびそれを実現するハード・ソフトウェア技術の総称である。なお、アクロスの信号理論と技術の核は、少数の周波数だけで高分解能の構造推定が可能な複素遅延解析と、特定の設定周波数に信号エネルギーを集中可能な精密制御送受信である。

これまでに理論の構築および弾性波探査と電磁探査用の試験機の開発を終え、実用化に向けて観測試験を行いつつ解析技術の開発を進めている。

② 成果の概要

i) 弾性波アクロス長期観測試験

正逆反転制御による周波数変調送信技術が確立



し、1年以上にわたる連続稼働実績を得た（國友・熊澤，2004a）。その結果、任意の方向への直線加振に対する伝達関数の時間変動や長期スタッキング記録が得られるようになった（國友・熊澤 2004b）。長期観測結果の例を図 3.5.2-10 に示す（長尾ほか，2004a）。

この観測試験により得られた知見の一つとして、降雨による伝達関数の変化がある。これを解析すると、直接 S 波はあまり変化しておらず、多重反射と考えられる波相が大きく変化していることが分かる。この結果は、地表の反射係数が帯水により変化したと解釈することができる（國友・熊澤，2004c）。また、正馬様用地における稠密な地震計アレイにより、長期間にわたってデータを取得している。このデータを用いて、地下の能動的常時監視に欠かせない技術である地震波の走時や到来方向の精密決定のための解析手法の開発を進めた（鶴我ほか，2004；羽佐田ほか，2004）。さらに、正馬様用地内に第 2 の地震計アレイを設置し、観測体制を強化した。平成 16 年度には、2 箇所の地震計アレイにより詳細な地下構造を推定するため観測および解析を行っていく予定である。

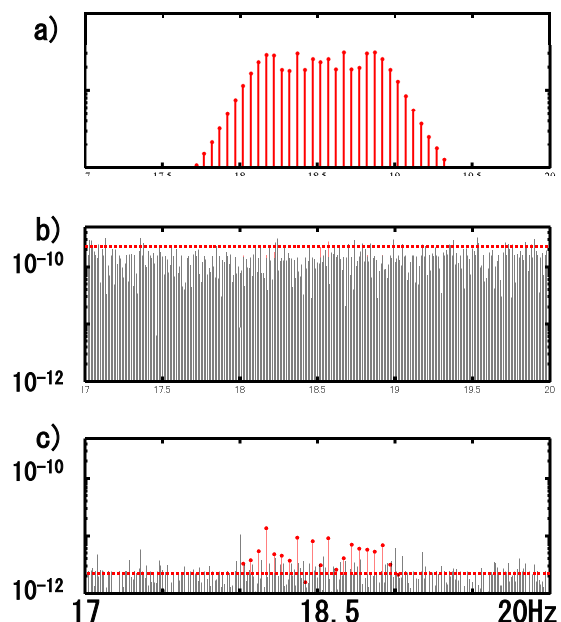


図 3.5.2-10 長期観測結果の例

左図：弾性波アクロスの長期観測試験では、30 m 離れば震度 0 という比較的弱い震源を用いた 100 万秒の観測で、送受信点間距離 100 km 以上での信号抽出を達成している。

右図 a)：この長期観測における送信信号の発生カスペクトル。送信のトータルエネルギーを有効に使うため、エネルギーを狭い周波数帯域の少数の送信周波数に局在させている。

右図 b), c)：観測点 A における受信信号の地動速度スペクトルで、b) は 100 秒、c) は 100 万秒の観測時間での結果。精密制御送受信と最適重み付きスタッキング法により、ノイズが時間変動しても観測時間の平方根にほぼ比例した S/N 比向上を達成している。すなわち、c) のノイズレベル（赤点線）は b) の 100 分の 1 程度となり、a) の送信信号周波数に対応した信号（赤線）が抽出できている。

ii) 電磁アクロス観測試験

電磁アクロスにおいても 1 年以上にわたる連続稼働実績を得た。

正馬様での観測データを用いて高い精度で伝達関数を推定し、その時間変化についての検討を行った（中島ほか，2004）。また，正馬様用地における観測データに存否イベント解析法を適用し，その有効性を確認すると同時に，速度分散の大きい電磁データへの適用には新たな開発要素があることが判明した（長尾ほか，2004b）。

電磁アクロス観測試験の受信はこれまで 1 ヶ所のみであったが，正馬様用地内に第 2 の観測点を新設し，観測体制を強化した。また，東濃鉾山の送信信号をアンプ性能の上限まで出せるように，電流電極の接地抵抗を低減させた。さらに，送信信号のモニタとして，送信電流だけでなく，近傍の電位を測定できるように電極設置を行った。これらを用いた本格的な観測を平成 16 年度から実施する。

iii) 最適重み付きスタッキング法

アクロスでは，伝達関数の S/N 比を向上させるために受信信号のスタッキングを行っている。受信信号に含まれるノイズレベルは時間変化が大きく，それを考慮したスタッキング法を用いる必要がある。すなわち，地動ノイズや電磁ノイズのレベルが大きく時間変化することはごく普通に見られる現象であり，S/N 比が悪い時間帯（時間セグメント）のデータも含めて一律にスタッキングを行った場合，スタックデータの S/N 比が一挙に低下する。

これに対処するため，従来は，ノイズレベルの高いセグメントを捨ててスタッキングを行っていた。しかし，シグナルチャンネルに含まれるノイズレベルの二乗に反比例する重みを各時間セグメントのデータにかけてスタッキングすれば，どんなに大きなノイズレベルのセグメントをスタッキングしても，スタックデータの S/N 比は決して減少することではなく，スタック回数とともに単調増加することが理論的に明らかになった。このスタッキング法を，「最適重み付きスタッキング法」と呼ぶことにする。この最適重み付きスタッキング法を観測データの処理に用いることにより，これまでの対処法では捨てられてしまっていたセグメントについても有効に活用した効率的なスタッキングが可能となった。

なお，最適重み付きスタッキング法を適用するには，各セグメントにかかる重みを決めるために，シグナルチャンネルに含まれるノイズレベルを推定する必要があるが，シグナルチャンネル自身からこのノイズレベルを推定することはできない。そこで，アクロスの受信システム設計では S/N 比を定量化するためノイズのみのチャンネルを設定し，シグナルチャンネル周辺のノイズチャンネルを用いたノイズ推定を行う。なお，シグナルチャンネルに含まれるノイズレベルは，近傍のノイズチャンネルにおける振幅スペクトルの二乗平均平方根で推定すれば良いことも理論的検討により明らかになった。

最適重み付きスタッキング法の効果については実データへの適用によっても確認している。先に図 3.5-10 に示した長期観測試験結果は最適重み付きスタッキング法を用いた結果であり，従来のスタッキングでは，100 万秒の観測でも信号は抽出できていない。

③ 今後の計画

アクロスは，その有効性の総合的な実証段階に入っており，以下の項目が今後の主な作業となる。

- ・ 電磁アクロス観測試験の本格化と，弾性波アクロス長期観測試験の継続，さらにそれらに基づく伝達関数の高精度推定法の開発。
- ・ 弾性波の地震計アレイ観測データおよび大きな速度分散を含む電磁アクロスの観測試験データに対する存否イベント解析の適用と同手法の改良・拡張。
- ・ 物性の周波数依存性を容易に扱うことのできる周波数領域のシミュレーション理論の確立とそれに基づくソフトウェアの開発。

なお，幌延におけるアクロスを用いた遠隔監視技術開発も支援していく。

参考文献

- 羽佐田葉子，熊澤峰夫，鶴我佳代子，國友孝洋（2004）：ACROSS の観測データから走時を読み取る存否イベント解析法，月刊地球号外，No. 47，pp. 61-68.
- 國友孝洋，熊澤峰夫（2004a）：弾性波アクロスによる地殻構造のアクティブ・モニタリングー弾性波アクロスの開発と東濃鉾山からの連続送信一，月刊地球号外，No. 47，pp. 26-33.
- 國友孝洋，熊澤峰夫（2004b）：弾性波アクロスによる地殻構造のアクティブ・モニタリングー弾性波アクロスにおける送受信技術一，月刊地球号外，No. 47，pp. 44-52.

- 國友孝洋, 熊澤峰夫 (2004c) : 弾性波アクロスによる地殻構造のアクティブ・モニタリングー東濃鉦山アクロステストサイトでの観測結果ー, 月刊地球号外, No. 47, pp. 86-94.
- 長尾大道, 中島崇裕, 熊澤峰夫, 國友孝洋 (2004a) : 最適重みつきスタッキング法による最大 SN 比を持つアクロス伝達関数の取得, 月刊地球号外, No. 47, pp. 53-60.
- 長尾大道, 中島崇裕, 羽佐田葉子, 熊澤峰夫, 國友孝洋 (2004b) : 電磁アクロス伝達関数の存否イベント解析による反射波検出の可能性, 月刊地球号外, No. 47, pp. 185-191.
- 中島崇裕, 國友孝洋, 長尾大道, 熊澤峰夫, 茂田直孝 (2004) : 拡散を考えるような電磁場の場合の電磁アクロスの試験観測, 月刊地球号外, No. 47, pp. 179-184.
- 鶴我佳代子, 國友孝洋, 羽佐田葉子, 熊澤峰夫, 茂田直孝, 笠原順三 (2004) : 高品質信号取得のための ACROSS 稠密地震観測アレイ, 月刊地球号外, No. 47, pp. 95-104.

4-3) 活断層帯での地殻活動研究

① 課題と計画の概要

活断層帯での地殻活動研究は、地層処分の信頼性を高める上で重要な、地震・断層活動が地質環境に与える影響を把握する手法の開発と、その基盤となる広域地殻変動や活断層の形成メカニズムに関する科学的知見の蓄積を目的としている。このため、跡津川断層帯を事例とし、地震活動や活断層の破碎帯の構造および、断層帯の発達史（活断層がどのように生まれ、成長するか）の解明に焦点を当てた調査研究を実施している。平成 14 年度までに、広域に展開した地震観測・GPS 観測・構造地質学的調査研究を行い、断層帯における観測データを蓄積している。

② これまでの成果

活断層帯での地殻活動研究では、広域の変動とスリップ面との関連を解明するため、跡津川断層帯でクリープが確認されている地域に加え、断層固着域を対象に、平成14年度までに構築されたGPS観測網を強化し、地震観測と合わせて、地殻変動データを蓄積した。これにより、クリープ域、固着域の分布と地震活動の関係、両域の境界で起こっている現象が理解された。このうち広域の変動については、ひずみ集中帯のひずみ領域の幅の違いが、weak zoneの概念を用いたモデル計算により説明できた。また、ローカルな変動については、クリープモデルにより跡津川・牛首断層での高剪断ひずみ速度を説明できた。牛首断層においては、GPS観測から、地殻変動の集中が推定され

ており、地形地質学的調査との関連が注目されていた。このため、特に、牛首断層の活動度の評価に向けて地形面測量、地表踏査等を実施した。跡津川断層帯で実施した高密度地震観測網による観測からは、跡津川断層と茂住一祐延断層とに沿う地震活動が分離されることが明らかになった（図 3.5.2-11）。Kameda, et al. (2003) は、地震活動と流体pHの変化の関連を明らかにするための室内実験を行い、層状珪酸塩鉱物で水素発生能力が高く、これが断層内物質の新生表面形成(破壊)－水反応によることを明らかにした。

③ まとめ

活断層研究では、跡津川断層帯の GPS 観測や地震観測等により、断層活動の性質、影響範囲が明らかになってきた。今後は、観測を継続するとともに地質構造発達史や隣接逆断層区との活動の関係などを明らかにしていく。また、地震活動と流体 pH との関係については、断層破碎帯から直接地下水を連続的に採取・分析し、実際の地震活動との関連を明らかにする。

参考文献

Kameda, J., Saruwatari, K. and Tanaka, H. (2003) : H₂ generation in wet grinding of granite and single-crystal powders and implications for H₂ concentration on active faults, Geophysical Research Letters, 30, no.20, pp.SDE10-1～SDE10-5.

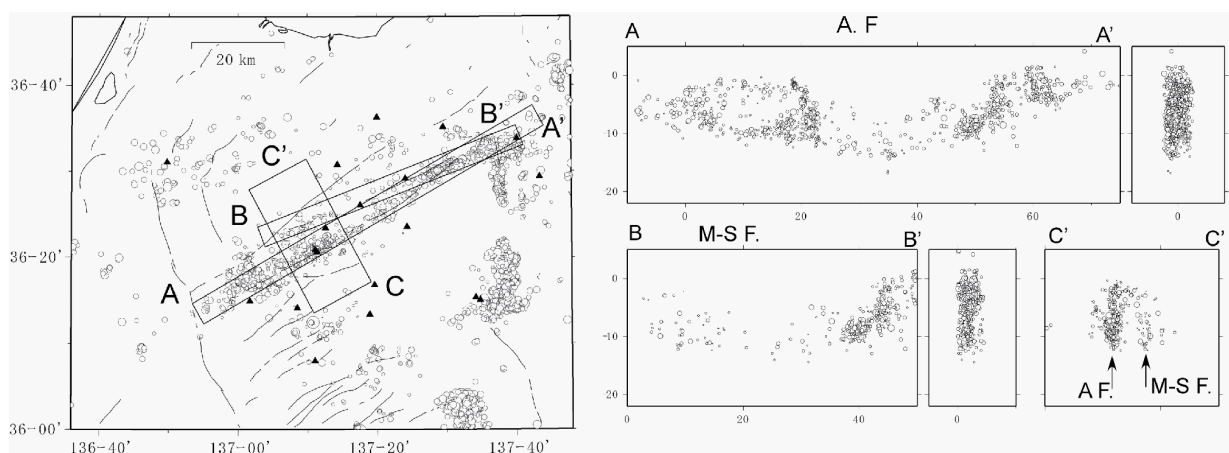


図 3.5.2-11 跡津川断層帯に沿う微小地震活動

跡津川断層帯付近の地震活動。上図は震央分布、下図は断面図。A-A' は跡津川断層、B-B' は茂住一祐延断層に沿う断面図。断層に直交する方向の断面図も示した。断面図 C-C' は跡津川断層帯に直交する断面図。A.F. は跡津川断層、M-S.F. は茂住一祐延断層を示す。

3.6 東濃鉱山における調査試験研究

3.6.1 調査試験研究の概要

① 背景と目標

東濃鉱山とその周辺では、主に地表から深度約150 m までに分布する新第三紀堆積岩（瑞浪層群）を対象とした調査試験研究を行っている。本調査試験研究では、昭和 61 年 4 月からウラン鉱床と地下坑道などが存在するという利点を活かし、地質・地質構造、地下水の流動と地球化学的特性、ウラン系列核種などの物質の分布とその移行特性、坑道掘削に伴う周辺岩盤への影響に関する研究を行ってきた。

これらの調査試験研究により、ウラン鉱床を胚胎する堆積岩の地質学的・水理学的・力学的特性、地下水の地球化学的特性、物質移行特性や掘削影響に関する情報など、個々の地質環境特性や現象に関する知見が幅広く収集され、調査試験研究に必要な要素技術や機器が開発されてきた。その成果は「第1次取りまとめ」や「第2次取りまとめ」などに適宜反映され、深部地質環境条件として重要な特性の把握という観点から、地層処分研究開発の基盤として反映されてきている。

さらには、これまでの調査試験研究によって、個別の特性や現象に関する知識が整備され、研究対象領域についての総合的な調査・研究が可能になった。

このような背景を踏まえ、「東濃鉱山における調査試験研究基本計画」（サイクル機構、1998）に基づき、東濃鉱山（図 3.6.1-1）の既存施設や東濃ウラン鉱床などを活用し、地質環境特性や現象に関する、より具体的かつ信頼性のある知見や事例を示すことを研究の基本方針としている。この観点から、本調査試験研究の最終目標は以下の2つに集約される。

- ・ウラン鉱床が存在し、それを断層が横切るという地質学的特徴を活かして、堆積岩中における物質の長期的な移行・遅延挙動を評価すること
- ・坑道周辺における地質環境について、その長期的な変化を評価し、総合的に調査・評価するための技術を開発すること

② 実施項目と進め方

本調査試験研究では、以下の3項目の調査試験研究を実施している（サイクル機構、2003）。

i) ナチュラルアナログ研究

東濃ウラン鉱床を事例研究の場として、隆起・侵食や断層運動などの地質環境の変遷がウラン鉱床の長期にわたる保存に及ぼした影響の評価とそのモデル化、ウラン系列核種の移行・遅延特性の定量化および影響要因（例えば、有機物や微生物）の評価、および異なる地質環境にも適用できる体系的な研究手法の整備を目的に研究を展開する。

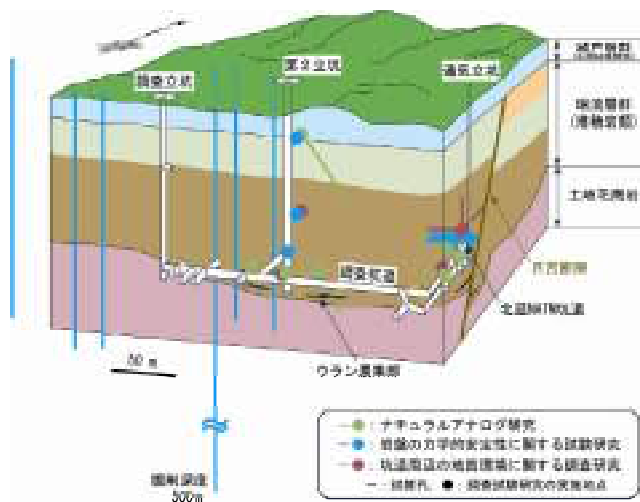


図 3.6.1-1 東濃鉱山における調査試験研究の実施領域

ii) 岩盤の力学的安定性に関する試験研究

本試験研究では、岩盤中の応力分布の不均一性、および坑道掘削に伴う周辺岩盤の力学的特性の変化や長期的な力学的挙動の評価手法の開発を目的に、応力状態に関する調査研究および長期挙動に関する研究を進める。

iii) 坑道周辺の地質環境に関する調査研究

坑道周辺に分布する堆積岩を対象に、とくに水理学的・地球化学の状態の長期的な変化とそのメカニズムを把握し、総合的な調査・評価手法の開発を目的とした、坑道周辺水理特性調査および坑道周辺地球化学特性調査を実施する。

③ 成果の反映先

本調査試験研究において得られる成果のうち、とくにナチュラルアナログ研究で得られる地質環境中における物質の長期的な移行・遅延挙動に関する知見は、地層処分システムの長期挙動の理解の観点から、安全評価手法の高度化に反映される。また、適用性が確認された坑道からの調査・モニタリング

技術，地質環境特性のモデル化・評価手法などは，処分事業における地質環境の調査・評価技術として反映されるほか，新第三紀堆積岩を対象とした幌延深地層研究計画を進めるうえでの技術基盤としても活用される。

④ 今後の計画

本調査試験研究では，これまでに地質環境中における物質の長期的な移行・遅延挙動を評価するために必要な地球化学的条件に関するデータなどを蓄積してきた。また，坑道からの調査・評価技術については，必要な技術開発を行いながら，開発した技術の適用性を確認し体系化を図るために必要な情報を取得してきた。これまでの調査試験研究によって，ナチュラルアナログ研究以外の項目については，目標が達成されたと判断し，平成 15 年度末をもって東濃鉱山における坑道を利用した調査試験研究を終了した。これらの研究成果は取りまとめた上で，超深地層研究所計画および幌延深地層研究計画に反映していく。

なお，ナチュラルアナログ研究は，平成 16 年度以降，地質環境の長期安定性に関する研究の事例研究の一環として，月吉ウラン鉱床を対象としたより広い領域で行うことを計画している。

参考文献

- 核燃料サイクル開発機構（1998）：東濃鉱山における調査試験研究基本計画書，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 99-006.
- 核燃料サイクル開発機構（2003）：東濃鉱山における調査試験研究年度計画書（2003 年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2003-003.

3.6.2 各調査試験研究の成果

1) ナチュラルアナログ研究

① 課題と計画の概要

東濃ウラン鉱床を対象としたナチュラルアナログ研究では、その目標を以下のように設定し調査研究を実施してきた。

- ・ 地質環境の変遷がウラン鉱床の長期にわたる保存に及ぼした影響の評価ならびにモデル化
- ・ ウラン系列核種の移行・遅延特性の定量化および影響を及ぼす要因の評価
- ・ 異なる地質環境にも適用できる体系的なナチュラルアナログ研究手法の整備

平成 14 年度までに実施した調査研究により、東濃ウラン鉱床が存在する深度では、地下水－岩石－微生物システムの相互作用によって還元状態が維持されてきたこと、現在の水理環境が続く場合、このシステムは今後数百万年間にわたって維持される可能性があることが推測されている（岩月ほか，2003）。また、東濃ウラン鉱床におけるウランの溶解度を規制する環境条件は、無機的には地下水の pH、酸化還元電位、炭酸ガス分圧であることを解明していたが、地下水中有機物を考慮した解析により、実際の地下水と同程度の溶存有機物濃度では、pH-Eh 条件によっては、有機物の存在を考慮しない解析結果よりもウランの溶解度が増加する可能性のあることが示されている（Arthur et al., 2003）。

② これまでの成果

i) 東濃ウラン鉱床の長期保存に関わる地質環境に関する研究

地下水－岩石－微生物システムが実際にどの程度の還元緩衝能力を有するかを定量的に評価するため、水と岩石、および微生物を気密バイアル瓶中で反応させ、酸化還元電位（ORP）を測定する実験を行った（表 3.6.2-1、図 3.6.2-1）。

この実験の結果、地下水と有機物に富む岩石を約 28 日間反応させた結果、Pt 電極を用いた ORP 計で測定した酸化還元電位は+100 mV 程度であったが、微生物を添加後、約 12 日間で酸化還元電位は約-350 mV まで急速に低下した（図 3.6.2-1）。この実験の結果、地下水－岩石－有機物のみの反応では強還元環境は形成されず、ウランを保持する強還元環境の形成には、微生物との相互反応が必要である可能性が高まった。

表 3.6.2-1 「水－岩石－微生物」実験に用いた各試料の概要

水	イオン交換、蒸留水（121℃，30 分オートクレーブ滅菌済み）
岩石	MIU-3 号孔リグナイト含有層から採取した堆積岩の粉碎物（サイズ：63-125 μm，121℃，30 分オートクレーブ滅菌済み）
微生物	MSB-2 号孔 深度 79-130.5 m（土岐夾炭累層上部）の地下水中に存在したもの

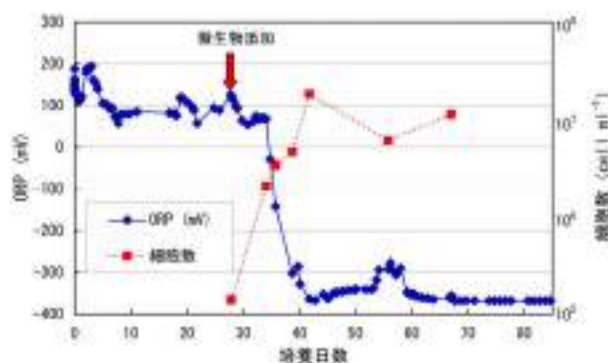


図 3.6.2-1 「水－岩石－微生物」反応試験の結果

これまでに、微生物の種組成、同位体データなどから、地層中有機物を介した硫酸還元菌による硫酸還元反応が還元環境の形成に関わる主要反応であると推察されている。本実験においても、開始から約 40 日後には硫化水素臭が観察され、硫酸還元菌による硫酸還元反応により強還元環境が形成されたと考えられ、この実験により従来の仮説が裏付けられた。

この実験の結果から、東濃ウラン鉱床では、地下水－岩石－（有機物－）微生物間の相互反応、特に微生物による還元反応が地下の還元環境を形成・維持する重要因子であることが明らかになった。

ii) ウラン系列核種の移行・遅延およびその影響要因に関する研究

地下水に存在している有機物がウランの移行挙動に与える影響を評価するために、地下水中有機酸分析を実施した結果、乳酸と酢酸が検出された。また、地下水中のウランと有機物の錯体形成係数を求めるために必要な基礎的な実験系として、実際の地下水環境と同等の還元的かつ弱アルカリ性の酸化還元状態や pH を模擬できる実験システムや分析手法の調査・検討を行い、約-400 mV 程度の還元環境を維持できる試験系を構築した。このような条件

下で、様々な溶存有機物と各種金属元素の相互関係を評価することで、微量元素の移動に関わる情報を取得できると考えられる。平成 15 年度は、実験システムの能力評価も念頭において、予察的に弱還元環境で価数が増える鉄を用いて試験を行い、有機物と金属イオンの錯体形成係数を評価できることを把握した。

iii) 体系的なナチュラルアナログ研究手法の整備

隆起・侵食や断層活動などの長期の時間スケールで生じる地質環境の変遷が、東濃ウラン鉱床の長期保存に及ぼす影響を評価するために、性能評価研究に適用されるシステム解析手法を導入している (Sasao et al., 2003)。これまでに抽出した東濃ウラン鉱床の長期保存に関わる FEP (特質, 事象, プロセス) に基づいて解析の前提となるシナリオの作成を行ってきた (Metcalf et al., 2003)。平成 15 年度はこのシナリオに基づき、地下水中のウラン濃度や pH, Eh などのパラメータを地質学的な変化に基づいて時代毎に変化させて 800 ケース以上の感度解析を行い、解析結果とウラン鉱床中の現在のウラン量との比較を行った。

その結果、解析したケースのうち、71 ケースで解析結果が現在のウラン量の 1/2~2 倍となり、ウランの沈殿に影響を及ぼす主要な要因として、有機物の酸化速度や地下水流動の変化、地下水中のウラン濃度などが挙げられた。

③ まとめ

東濃ウラン鉱床を対象としたナチュラルアナログ研究では、地質環境の変遷がウラン鉱床の長期にわたる保存に及ぼした影響の一つとして、地下水-岩石-微生物システムがどの程度の還元緩衝能力を有するかについての定量的の評価に着手した。ウラン系列核種の移行・遅延特性の定量化および影響を及ぼす要因の評価については、有機酸分析を実施した。また、異なる地質環境にも適用できる体系的なナチュラルアナログ研究手法の整備として、平成 15 年度はシナリオに基づく解析を行い、解析結果とウラン鉱床中の現在のウラン量との比較を行った。

今後、ナチュラルアナログ研究については、地質環境の長期安定性に関する研究の事例研究の一環として、月吉ウラン鉱床を対象としたより広い領域で行うことを計画している。

参考文献

- Arthur, R., Iwatsuki, T., Murakami, Y., Metcalfe, R., Sasao, E., MacKenzie, A. B., Berke, M., McKibben, M. and Ota, K. (2003) : The Tono Natural Analogue Project: Geochemical constraints on uranium mobility within the Tono uranium deposit, Japan, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 67, A24.
- 岩月輝希, 村上由記, 長沼 毅, 濱 克宏 (2003) : ウラン鉱床の長期保存に関わる岩盤の酸化還元緩衝能力-東濃地域における天然環境の水-鉱物-微生物システムの研究例-, *地球化学*, 37, pp. 71-82.
- Metcalf, R., Takase, H., Sasao, E., Ota, K., Iwatsuki, T., Arthur, R. C., Stenhouse, M., Zhou, W. and MacKenzie, A. B. (2003) : The Tono Natural Analogue Project: A system model for the origin and evolution of the Tono uranium deposit, Japan, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 67, A288.
- Sasao, E., Ota, K., Iwatsuki, T., Arthur, R. C., Stenhouse, M., Zhou, W., Metcalfe, R., Takase, H., and MacKenzie, A. B. (2003) : The Tono Natural Analogue Project: An overview, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 67, A413.

2) 岩盤の力学的安定性に関する試験研究

① 課題と計画の概要

東濃鉱山における調査試験研究のうち、岩盤の力学的安定性に関する試験研究では、堆積岩を対象に、以下の2つを主要な課題として進めている。

- ・岩石や岩盤などのクリープ現象について、東濃鉱山の既存坑道および坑道周辺の試料を用いて堆積岩の長期挙動データを取得・評価すること
- ・東濃鉱山において掘削した大口径の水平ボーリング孔において観察されている孔壁崩壊現象についてそのメカニズムを解明すること

平成14年度までに、場の応力分布の不均一性を評価する手法の開発を目的に、東濃鉱山に分布する堆積岩中の三次元的な応力分布を把握し、その分布ならびに不均一性を解析的に評価する手法について検討した(水田ほか, 2003)。また、東濃鉱山の坑道および岩石試料を用いて堆積岩の長期挙動に関するデータを取得してきた(中間ほか, 2002)。

平成15年度は、東濃鉱山の坑道および岩石試料を用いた堆積岩の長期挙動に関するデータの取得を継続するとともに、孔壁崩壊現象のみられる水平ボーリング孔周辺の各種挙動変化計測を実施した。

② これまでの成果

i) 堆積岩の長期挙動に関する研究

東濃鉱山の坑道周辺岩盤の長期挙動計測(内空変位計測および地中変位計測)を平成3年度から平成15年度までに最長で12年間継続実施している。その結果、時間の経過とともに変位が増大するクリープ変形が認められ、平成15年度中の計測においても、坑道が縮小する方向の変位の増大傾向が確認された。図3.6.2-2に東濃鉱山北延NATM坑道によって計測された地中変位計測による時間経過に伴う坑道周辺岩盤の変位速度の変化を示す。変位速度は時間の経過とともに低下しており、坑道周辺岩盤でみられるクリープ変形は継続しているものの、収束する方向に向かっているものと評価される。

また、これらの計測結果の解釈に必要な基礎データを取得するために、空圧式長期クリープ試験装置により、坑道周辺で取得された岩石コアを用いた長期クリープ試験を実施し、大久保らが提案する構成方程式(大久保ほか, 2002; 以下、大久保モデルと称す)を適用したところ、試験で得られたクリープ曲線をかなり良く表現でき、堆積岩の低応力レベル環境下での長期挙動を評価できる手法のひとつと

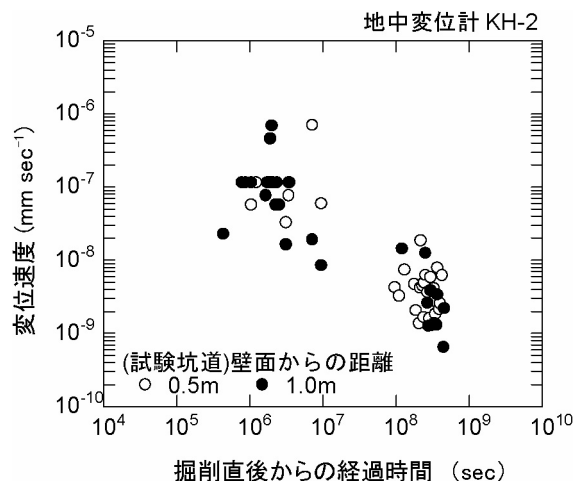


図 3.6.2-2 坑道周辺岩盤の変位速度

して有効であることがわかった(高倉ほか, 2003)。

平成14年度に実施した細粒砂岩のクリープ試験結果をもとにした構成方程式のパラメータおよび平成15年度に実施した粗粒砂岩の大久保モデルパラメータを組み込んだ有限要素法による解析により、東濃鉱山北延NATM坑道の掘削および時間経過に伴う応力変形変化を評価した。この解析結果と先に示した12年間継続している長期挙動計測結果を比較したものを図3.6.2-3に示す。解析結果と計測結果とでは、絶対量としては差異があるものの、変位の発生傾向(線図の傾き)としては比較的良好な一致がみられた。

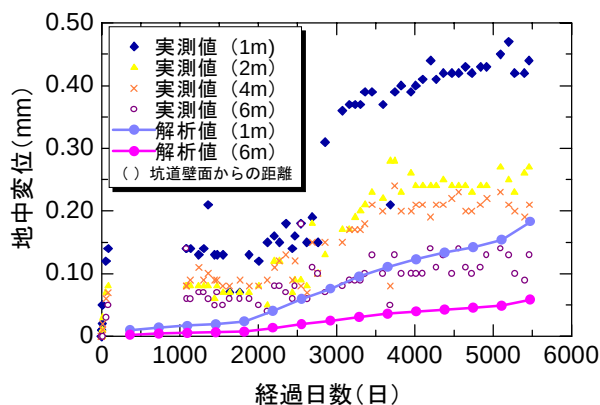


図 3.6.2-3 坑道周辺岩盤の変位計測結果と実測をもとにした大久保モデルによる解析結果との比較

ii) 孔壁崩壊現象に関する研究

東濃鉱山坑内北延NATM坑道の堆積岩中に掘削した水平ボーリング孔では、図3.6.2-4に示すように、孔壁崩壊現象が継続的に進行している(中島ほか, 2003)。

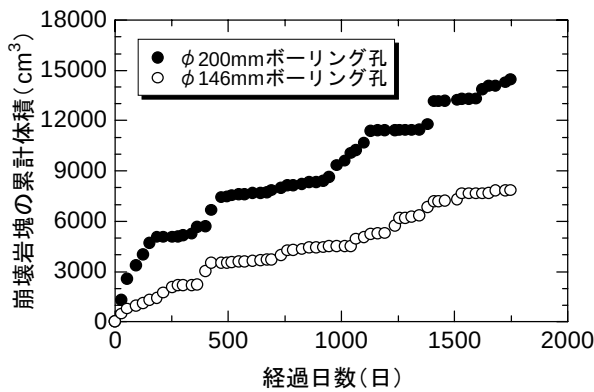


図 3.6.2-4 崩壊岩塊の累計体積

水平ボーリング孔周辺の各種挙動変化計測について、孔周辺の堆積岩試料を用いた物性試験では、変形強度特性は含水比に大きく依存する傾向がみられ、特に細粒砂岩からなる試料では、载荷や除荷および岩石破壊の際に AE (Acoustic Emission)、電位および電気抵抗の応答に大きな変動が見られた。

原位置における計測では、主に細粒砂岩からなるボーリング孔では、AE 計測の結果と観察写真等により、現在も孔壁の崩壊は進行中であり、細粒の岩質部に亀裂がより発達し易い傾向が認められた。しかしながら、主に粗粒砂岩からなるボーリング孔では孔壁の崩壊が発生していないことが確認された。

孔壁崩壊のみられる水平ボーリング孔周辺を対象とした応力・変形解析では、最大主応力が空洞の天盤と底盤に集中し破壊を発生させることが明らかとなった。応力・変形解析に加え、水分量拡散を考慮に入れた解析では、岩盤内の水分量減少に伴って空洞が拡大するような変形挙動が予測され、細粒砂岩の空洞の変位は粗粒砂岩の約 6 倍となった。後者の解析における空洞周辺での応力成分の経時変化は応力緩和現象に類似していることがわかり、ボーリング孔での孔壁崩壊現象が遅れて発生することを説明可能であることが示された。

③まとめ

平成 15 年度までに実施した岩盤の力学的安定性に関する試験研究により、堆積岩を対象とした長期挙動計測手法、長期岩石クリープ試験手法ならびにモデル化手法を整備した。今後、これらの成果は幌延深地層研究所計画に反映していく。

参考文献

水田義明, 金子勝比古, 松木浩二, 菅原勝彦, 須藤茂韶 (2003): 3 次元応力場の同定手法に関する研究 (その 2), サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 社団法人資源・素材学会), JNC TJ7400 2003-004.

中島貴弘, 中間茂雄, 林 叔民, アイダンオメル (2003): 堆積軟岩における水平試験孔の孔壁崩壊現象の計測, 資源・素材 2003 (宇部) 秋季大会企画発表・一般発表 (A) (B) 資料, pp. 77-78.

中間茂雄, 高倉 望, 松井裕哉 (2002): 東濃鉱山における坑道周辺岩盤の長期変位計測, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2002-002.

大久保誠介, 福井勝則, 羽柴公博 (2002): コンプライアンス可変型構成方程式の拡張とクリープ試験結果による検討, 資源と素材, 118, pp. 737-744.

高倉 望, 中間茂雄, 大久保誠介 (2003): 堆積軟岩を対象とした低応力レベルにおけるクリープ解析, 第 58 回土木学会年次学術講演会 CD-ROM, pp. 391-392.

3) 坑道周辺の地質環境に関する調査研究

① 課題と計画の概要

地下深部に坑道を掘削すると坑道周辺岩盤の地質環境（力学、水理、地球化学など）に変化が生じることが予想される。この内、酸化フロントの進展等の地球化学環境の変化は、坑道掘削に伴う不飽和領域の発生とその領域の形状の変化に密接な関係があると考えられる。本研究では、堆積岩における坑道周辺の不飽和領域の計測手法（原位置試験およびコアを用いた室内試験）を確立することを目標として研究を実施している。

平成 14 年度までに、坑道内から掘削したボーリング孔を用いて TDR（Time Domain Reflectometry）によるボーリング孔沿いの岩盤の比誘電率を原位置で計測する装置（パッカー式プローブ）を開発した（片岡ほか，2003）。また、坑道壁面からの地表レーダー計測で得られる平面的な電磁波反射面の形状および電磁波速度構造と上記の原位置計測などで得られた比誘電率の情報を組み合わせることにより、坑道周辺岩盤に生じている不飽和領域の評価を行った（升元ほか，2003）。

② これまでの成果

平成 15 年度は、平成 14 年度に引き続き、東濃鉱山 NATM 試験坑道壁面からの地表レーダー計測で得られた反射面の分布および電磁波速度構造（図 3.6.2-5）を用いて不飽和領域の評価を行うために、i）コアを用いた比誘電率計測（室内試験）、ii）2本のボーリング孔を用いた孔間連続波レーダートモグラフィ計測、iii）ボーリング孔に複数のパッカーを設置した間隙水圧計測、を実施した（升元ほか，2004）。

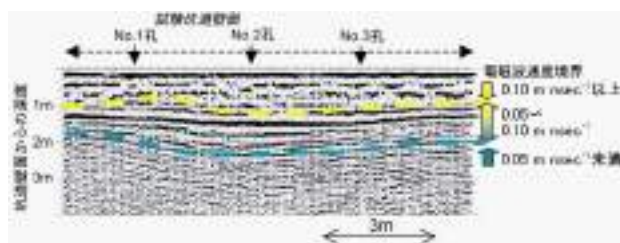


図 3.6.2-5 地表レーダー計測結果

i) コアを用いた比誘電率計測（室内試験）

坑道壁面から水平方向に長さ 6 m のボーリング孔を 3 本（No. 1, No. 2, No. 3）掘削した（図 3.6.2-6）。採取したコアから粗粒砂岩 12 個の供試体を製作し、

室内試験においてコアの飽和度を変化させながら比誘電率を測定した。室内試験において、飽和度 100% で比誘電率が 40 程度の値を示す結果が得られたことから、原位置の粗粒砂岩において比誘電率が 40 以下の場合は不飽和になっていると考えられる。周波数が高い場合、電磁波速度 v と比誘電率 ϵ_r の間には $v = c_0 / \epsilon_r^{1/2}$ (c_0 は光速) の関係があることから、比誘電率が 40 以下の粗粒砂岩は $0.047 \text{ m nsec}^{-1}$ 以上の電磁波速度を示す。このことから、粗粒砂岩が分布する領域において図 3.6.2-5 で 0.05 m nsec^{-1} 以上の電磁波速度を示す坑壁から約 2 m 以浅の領域は不飽和領域であると推定できる。

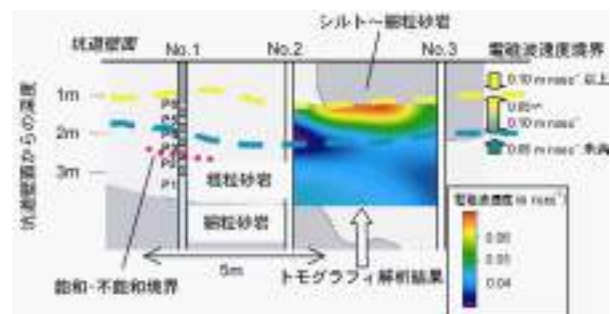


図 3.6.2-6 ボーリング孔位置とトモグラフィ解析結果

ii) 2本のボーリング孔を用いた孔間連続波レーダートモグラフィ計測

図 3.6.2-6 に示す No. 2 孔と No. 3 孔を用いて連続波レーダートモグラフィ計測を実施した。地表レーダーによる電磁波速度は坑壁からの奥行き方向の速度が求められるのに対し、今回の孔間トモグラフィでは坑道方向の速度が求められる。同図に逆解析により得られた電磁波速度分布を示す。この結果、No. 2 孔と No. 3 孔の孔間で坑壁から 2 m 以浅において電磁波速度が 0.05 m ns^{-1} 以上の領域が認められ、地表レーダー計測から得られた電磁波速度構造と整合する結果が得られた。

iii) ボーリング孔に複数のパッカーを設置した間隙水圧計測

図 3.6.2-6 に示す No. 1 孔にパッカーを設置し、P1 から P6 までの 6 つの区間において間隙水圧計測を実施した。P2 から P6 までの各観測区間長は 0.2 m であり、最も奥の観測区間のみ約 3 m の区間長である。図 3.6.2-7 に間隙水圧計測結果を示す。これは各区間に注水を行い、各区間の間隙水圧を約 0.1 MPa に上昇させ注水を止めた後の計測値である。P3 から

P6 までの間隙水圧は計測開始直後からほぼゼロに近い値を示したのに対し、P1 および P2 は定常状態の水圧に向かってゆるやかな低下を示したことから飽和状態にあると考えられた。この結果は、飽和と不飽和の境界が P2 と P3 の間（深度 2.3～2.5 m）にあることを示していると考えられ、i）に記したコアの比誘電率計測結果に基づく不飽和領域の評価と概ね整合する結果が得られた。

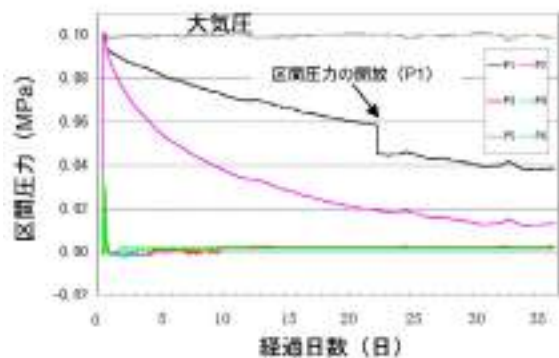


図 3.6.2-7 間隙水圧計測結果

③ まとめ

堆積岩における坑道周辺の不飽和領域の計測手法を確立することを目標に研究を進めてきた結果、坑壁からのボーリング孔および採取コアを用いた原位置／室内試験で得られる比誘電率や飽和度に基づき地表レーダーやトモグラフィ計測から得られる面的な電磁波速度構造を解釈する手法が有効であることが確認できた。今後は、瑞浪超深地層研究所の研究坑道においてこれらの計測手法を適用し、花崗岩を対象にした不飽和領域の計測を実施する予定である。

参考文献

- 片岡達彦, 前村庸之, 竹内真司, 松井裕哉, 向井 圭
(2003): 坑道周辺における不飽和領域の原位置計測手法の研究, サイクル機構技報, No. 19 (2003. 6), pp. 41-50.
- 升元一彦, 片岡達彦, 竹内真司 (2003): 連続波レーダーと TDR を用いた坑道周辺の不飽和領域の評価, 平成 15 年度応用地質学会研究発表会講演論文集, pp. 191-194.
- 升元一彦, 竹内真司, 藪内 聡, 渥美博行, 名児耶薫
(2004): 堆積岩中の坑道周辺の不飽和領域を対象とした連続波レーダー調査結果の評価, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演論文集 (印刷中).

【個別報告】

4. 処分技術の信頼性向上

4. 処分技術の信頼性向上

4.1 人工バリアの基本特性データベースの整備

4.1.1 オーバーパックの基本特性

1) 炭素鋼オーバーパックの腐食挙動に関する研究

① 課題と計画の概要

オーバーパックの長期健全性を評価するうえで地下水との接触による腐食挙動を把握することが重要である。「第2次取りまとめ」では日本における地下水条件に対し、緩衝材中の炭素鋼の腐食形態は全面腐食である可能性が高いことを示し、酸素による腐食量、水による腐食量を腐食の不均一化を考慮して見積もった。

これらの評価の長期的な信頼性を確認するため、腐食生成物による腐食への影響など腐食メカニズムの検討ならびに長期腐食データの取得を進めている。また、腐食形態や腐食寿命に直接関わる因子として、堆積軟岩系岩盤における処分を想定した支保工材料としてのセメントによる影響とオーバーパックの材料因子による影響（溶接による影響を含む）を明らかにするための研究等を実施している。平成14年度までにセメントによる腐食形態への影響評価、アルカリ性環境における局部腐食進展挙動の評価を行ってきた。また、腐食生成物による影響について、マグネタイトによる腐食加速現象に着目してそのメカニズムについて検討を行うとともに現状の知見と課題を整理した。平成15年度はこれまでにやってきた還元性雰囲気での腐食試験結果を取りまとめ、長期的な腐食速度と腐食生成物について検討した。また、マグネタイト共存下での腐食機構解明に資するための実験的検討を行った。

② 成果の概要

i) 還元性雰囲気における炭素鋼の長期腐食速度の検討

「第2次取りまとめ」では、海水系における浸漬試験結果に基づき、還元性雰囲気における炭素鋼の平均腐食速度を保守的に $10\mu\text{m y}^{-1}$ と設定して寿命評価を行った。その後、海水系のほか、より希薄な溶液や温度の異なる条件など更にデータを拡充したため、これまでのデータのとりまとめを

行った（谷口ほか，2004a）。図4.1.1-1にこれまでに得られた還元性雰囲気における緩衝材中での炭素鋼の腐食深さの経時変化を示す。緩衝材は「第1次取りまとめ」での緩衝材仕様（乾燥密度 $\rho=1.8\text{Mg m}^{-3}$ ，ケイ砂なし）と「第2次取りまとめ」での緩衝材仕様（乾燥密度 $\rho=1.6\text{Mg m}^{-3}$ ，30%ケイ砂混合）とした。図中には代表的な条件について、腐食深さ変化の直線の傾きから求めた腐食速度も示した。浸漬後1年までは比較的腐食速度が大きく、今回の実験条件の範囲では $4\sim 18\mu\text{m y}^{-1}$ の値となった。また、実験条件によって腐食速度も異なる値を示した。しかし、浸漬後1年以降はほとんどの条件で腐食の進展が急激に抑制され、腐食量の増加は2～3年間で数 μm 程度となった。この1年以降の腐食深さ変化の傾きより、温度 80°C の条件での腐食速度は $1\mu\text{m y}^{-1}$ 以下と見積もられた。本試験では電子ビーム溶接による溶接部の付与された試験片を用いた実験も行った。浸漬期間3年間までの実験では母材とほぼ等しい腐食速度が観察された。また、溶接部近傍において不均一な腐食や選択的な腐食の生じた形跡はなく、均一な全面腐食が観察された。一方、試験温度 50°C の条件では（図中、□のプロット）、浸漬1年間までは腐食速度が最も小さく約 $4\mu\text{m y}^{-1}$ の値であったが、1年以降の腐食の進展は他の条件よりも大きく、約 $2\mu\text{m y}^{-1}$ の腐食速度が見積もられた。

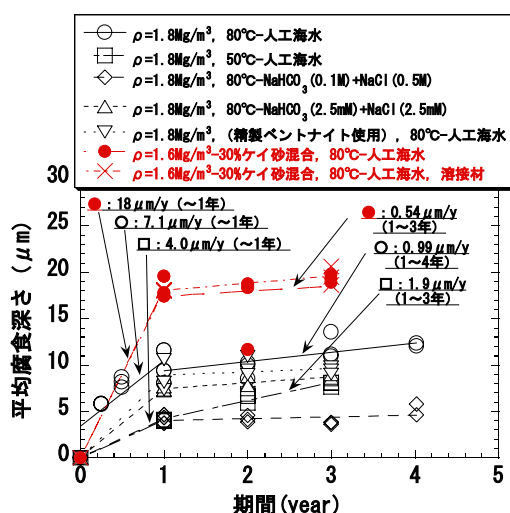


図4.1.1-1 還元性雰囲気下、緩衝材中における炭素鋼の平均腐食深さの経時変化

浸漬試験後試験片の表面を観察すると、図4.1.1-2に一例（ $\rho=1.8\text{Mg m}^{-3}$ ，人工海水中3年間浸漬）を示すように温度 80°C の実験では試験片表

面に緻密で密着性のよい皮膜の形成が観察されたが、50℃の条件では皮膜がうろこ状に表面に付着した様子であり、80℃の場合に比べて密着性が劣っているように見える。このように、表面に形成される皮膜の保護性によって長期的な腐食速度は異なるものと考えられる。本実験で用いた試験片表面について窒素雰囲気を維持した状態で皮膜のX線回折を行った結果、いずれの条件でも FeCO_3 または $\text{Fe}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ が同定された。これは對馬ほか(2003)の結果と一致する。

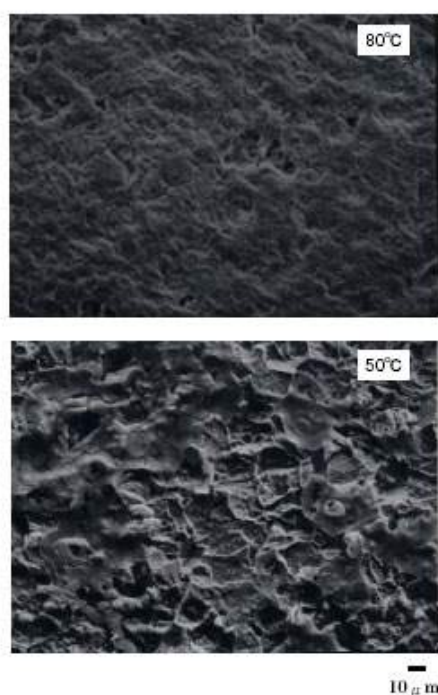


図 4. 1. 1-2 試験後試験片表面の SEM 観察結果

以上の3～4年間の実験結果より、炭素鋼の現実的な腐食速度は $0.2 \sim 2 \mu\text{m y}^{-1}$ と推定された。また、この推定結果は考古学的鉄製品の腐食調査から推定された弱酸化性～還元性雰囲気での長期的な平均腐食速度(Honda et al., 2003)に近い値となった。本実験結果に基づくと、「第2次取りまとめ」における還元性雰囲気での平均腐食深さ評価値(10mm/1000年)に達するのは現実的には約5000年以上が必要と考えられる。

ii) 腐食生成物による炭素鋼の腐食への影響

模擬腐食生成物としてマグネタイトを炭素鋼表面に付与することにより炭素鋼の腐食が加速される現象が報告されている(兒島・辻川, 1996)。昨年度にマグネタイト共存下での炭素鋼の腐食挙動に関する現状の知見が整理された(柴田ほか,

2003)。それによると、マグネタイト共存下での腐食機構はマグネタイト中3価鉄/2価鉄比によって異なることが示唆されている。そこで、ウスタイト(FeO)、マグネタイト(Fe_3O_4)、マグヘマイト($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)を用い、これらを単独で使用、または混合調整して3価鉄/2価鉄比の異なる鉄酸化物を作製した。これを模擬腐食生成物として炭素鋼表面に接触させ、0.5M-NaCl水溶液中で浸漬試験を90日間行った。試験片の腐食減量から腐食量を算出するとともに、腐食に伴って発生した水素ガス量を分析し、腐食機構を検討した(谷口ほか, 2004b)。その結果、図4.1.1-3に示すように、模擬腐食生成物中の3価鉄/2価鉄比が2を超えると腐食速度が急激に増加した。また、図4.1.1-4に示すように3価鉄/2価鉄比が2を超えると腐食反応に占める水素発生反応の寄与率が小さくなり、3価鉄の還元反応が支配的になることがわかった。

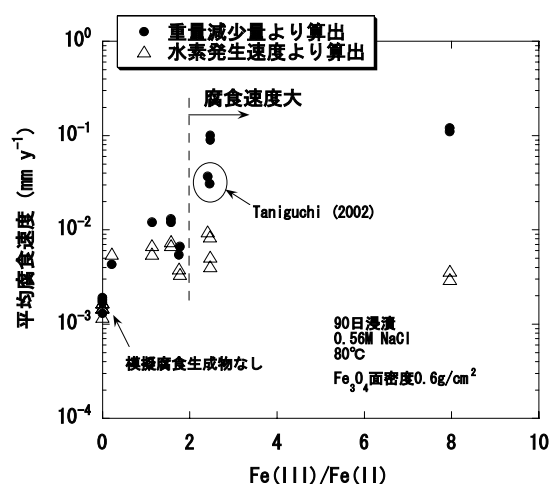


図 4. 1. 1-3 模擬腐食生成物中3価鉄/2価鉄比と炭素鋼の平均腐食速度の関係

一般試薬として市販されているマグネタイトの3価鉄/2価鉄比は化学量論比である2を超えることが確認されており(Taniguchi, 2002)、これまでに報告されているマグネタイト共存下での炭素鋼の顕著な腐食速度の増加現象(兒島・辻川, 1996)はマグネタイト中の3価鉄による酸化作用が原因と考えられる。したがって、処分後初期の酸化性雰囲気においてマグネタイトが生じ、炭素鋼オーバパックの腐食速度を増加させる現象が生じたとしても3価鉄が消費されるため、還元性雰囲気において顕著な腐食速度の増加が長期にわたって持続することはないと考えられる。ただし、

3 価鉄／2 価鉄比が 2 以下の場合であっても腐食速度の増加が認められており、このときのカソード反応は水素発生反応が支配的となることが示唆された。したがって、このような条件での水素発生速度の経時変化などより詳細な検討が必要である。

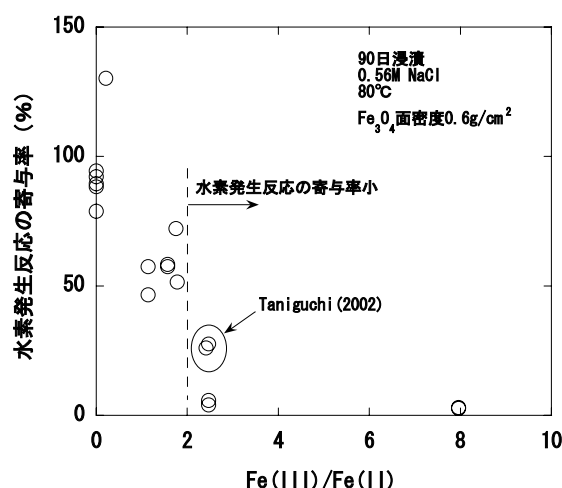


図 4.1.1-4 模擬腐食生成物中 3 価鉄／2 価鉄比と水素発生反応の寄与率の関係

③ まとめ

平成 15 年度の研究成果は以下のようにまとめられる。

- 還元性雰囲気下、緩衝材中での炭素鋼の腐食速度は 80℃の場合には浸漬 1 年までは約 4～18 $\mu\text{m y}^{-1}$ の範囲の値であったが、浸漬 1 年以降は腐食の進展が急激に抑制され、腐食速度は 1 $\mu\text{m y}^{-1}$ 以下と見積もられた。50℃の条件では浸漬 1 年までは約 4 $\mu\text{m y}^{-1}$ と比較的小さな値であったが、80℃の場合に比べて腐食の抑制の程度は小さく、1 年以降の腐食速度は約 2 $\mu\text{m y}^{-1}$ となった。
- 還元性雰囲気下、緩衝材中において 80℃の条件では緻密で密着性のよい皮膜の形成が観察されたが、50℃での皮膜は容易に剥離した。このような皮膜の保護性の違いにより長期的な腐食速度の差が生じたものと考えられる。
- 炭素鋼表面の腐食生成物の分析結果、 FeCO_3 、 $\text{Fe}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ といった 2 価鉄の炭酸塩が同定された。
- 3 年間までの浸漬試験では、電子ビーム溶接の有無による、還元性雰囲気下、緩衝材中での腐

食速度への影響は認められなかった。

- 3 価鉄／2 価鉄比の異なる模擬腐食生成物を接触させた状態で炭素鋼の浸漬試験を行った。その結果、3 価鉄／2 価鉄比が 2 以上になると腐食速度の顕著な増加が観察された。その腐食機構として、3 価鉄の還元反応を主なカソード反応とする腐食であることが確認された。
- 模擬腐食生成物中の 3 価鉄／2 価鉄比が 2 以下の場合には腐食加速の程度は小さくなった。また、この場合の 3 価鉄の還元反応の寄与は小さく (50%以下)、水素発生反応が支配的となることが示唆された。

今後は以下の事項を実施する予定である。

- 還元性雰囲気での腐食速度、腐食生成物などについて、より長期のデータを取得する (10 年以上の試験継続中)。
- 長期間の腐食モニタリング手法を検討する。
- 3 価鉄／2 価鉄比が低い (2 以下) 腐食生成物が接触した条件での水素発生反応による腐食加速の可能性を検討する。
- 溶接部の耐食性について、酸化性環境での腐食局在化、応力腐食割れの可能性などより詳細に検討する (高 pH 環境を含む)。
- 材料中不純物元素による耐食性への影響についても実験的な検討を行う。

参考文献

- Honda, T., Yamaguchi, S., Yoshikawa, H., Ueno, K. and Yui, M. (2003): X-RAY CT ANALYSIS OF IRON-BASED ARCHAEOLOGICAL REMAINS BURIED IN SOIL, Proceedings of 13th Asian-Pacific Corrosion Control Conference, Paper No.H-05.
- 児島洋一, 辻川茂男 (1996): ベントナイト環境中における腐食生成物堆積下の炭素鋼の腐食挙動, 腐食防食'96 講演集, p. 129.
- 對馬 卓, 原 信義, 杉本克久 (2003): オーバーパック容器用低合金鋼の含水圧縮ベントナイト中での耐食性, 材料と環境, 52, 545-553.
- 柴田俊夫, 瀬尾眞浩, 杉本克久, 水流 徹, 井上博之 (2003): マグネタイト共存下における炭素鋼の腐食挙動に関する研究の現状と課題, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 社団法人腐食防食協会), JNC TJ8400 2002-060.
- 谷口直樹, 川崎 学, 川上進, 久保田満 (2004a): 還元性雰囲気における緩衝材中での炭素鋼の腐食挙動, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-040.
- 谷口直樹, 建石剛, 西村務, 川上進 (2004b): 模擬腐食生成物中 $\text{Fe(III)}/\text{Fe(II)}$ 比による炭素鋼の腐食挙動

への影響，サイクル機構技術資料，JNC TN8400
2003-049.

Taniguchi, N. (2002): Effect of Magnetite as a
Corrosion Product on the Corrosion of Carbon
Steel Overpack, EFC No.36, Proceedings of
International Workshop on “Prediction of Long
Term Corrosion Behaviour in Nuclear Waste
Systems” .

2) 代替オーバーパック材料の腐食挙動に関する研究

① 課題と計画の概要

幅広い地質環境条件に対して柔軟に対応する観点から、代替オーバーパック材料としてチタンおよび銅について処分環境条件での腐食挙動を検討している。

「第2次取りまとめ」では、チタンオーバーパックについて、処分開始初期の酸化性環境において考慮すべき腐食形態としてすきま腐食を考慮し、その発生条件を実験的に検討した。還元性環境については水素脆化を考慮し、既往の文献データに基づいて水素脆化の可能性を検討した。すきま腐食の発生条件については種々のチタン合金の実験データが整備されつつあり、環境条件に応じて適切な合金を選択することによってすきま腐食を避けることができるとの見通しが得られている。しかし、還元性環境におけるチタンの耐食性については知見が十分とは言えないため、不動態皮膜の安定性、水素吸収挙動などの検討を進めるとともに水素脆化の評価手法を検討することが重要である。平成14年度までにチタンの腐食速度や水素発生/吸収の評価に資するための浸漬試験および加速試験を行い、期間1年までの短期試験データを取りまとめた。平成15年度は長期の試験を継続しており、期間2年までの試験データを取得した。また、電気化学的な加速試験を行い、長期的な水素吸収挙動を検討した。

銅オーバーパックについては、「第2次取りまとめ」において酸素による腐食と硫化物による腐食を考慮し、海外での銅オーバーパックの研究事例を参考に主に既往の文献データを用いて概略的な腐食寿命評価を行った。しかし、現時点では日本における地下水化学条件を想定した実験データが少なく、電気化学特性、局部腐食の発生条件、腐食速度等の基礎データの取得が重要である。また、これらの実験データに基づく銅オーバーパックの寿命評価手法を検討する必要がある。純銅は一般に酸素のない環境において熱力学的に安定であるという特徴を有するため、環境条件によっては極めて長い寿命を期待できる可能性がある。しかし、オーバーパック周囲は処分開始初期には地上から酸素が持ち込まれるため、それによる腐食挙動を評価する必要がある。そこで酸化性環境における腐食に着目し、平成14年度までに酸化性雰

囲気における銅の腐食形態を把握するための電気化学試験を行った（川崎ほか，2002）。平成15年度は酸化性雰囲気における純銅の腐食速度、腐食局在化および腐食挙動に及ぼす環境条件の影響を検討した。

② 成果の概要

i) 還元性環境におけるチタンの長期浸漬試験

気相部酸素濃度0.1ppm以下の還元性雰囲気において純チタンおよびチタン-パラジウム(0.06%)合金の長期浸漬試験を水溶液単独系およびベントナイト中で実施している(最長5年間予定)。平成15年度は、水溶液単独系で2年間浸漬させた試料を取り出し、評価を行った(鈴木ほか，2004)。

試験溶液として人工海水、0.1M NaHCO₃水溶液、0.1M NaHCO₃+0.5M NaCl水溶液を用い、温度80℃で浸漬試験を行った。浸漬後の試料について、SIMSにより表面から深さ方向の水素および酸素の分布を測定し、水素吸収挙動、皮膜成長挙動を調査した。「第2次取りまとめ」と同様に酸化物皮膜厚さの60%がチタンの腐食深さと仮定して試験期間の平均腐食速度を算出した。その結果をMattosson and Olefjord(1990)のデータとともに図4.1.1-5に示す。今回得られたデータより、2年後の水溶液単独系での平均腐食速度は $10^{-2} \sim 10^{-1} \mu\text{m y}^{-1}$ と見積もられた。皮膜成長に伴い、概ね時間とともに腐食速度は低下する傾向が観察されたが、人工海水-溶液単独系では1年以下の腐食速度(鈴木ほか，2003)と同程度の値が得られた。

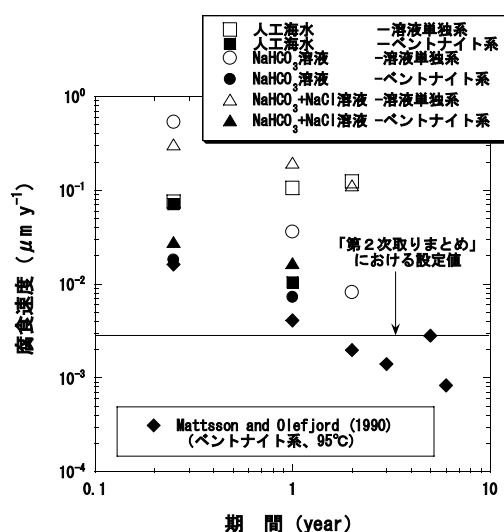


図 4.1.1-5 成長皮膜厚さから算出したチタンの腐食速度の経時変化

ii) 電気化学的加速試験によるチタンの水素吸収挙動の検討

チタンの腐食速度に対応した速度で水素が発生すると仮定し、加速試験として 1000 年間分の水素発生量に相当するカソード電荷を試験片にチャージする試験を行った。これまでの研究により加速の度合い（印加電流密度）が小さいほど、すなわち、自然浸漬状態に近いほど水素吸収量は大きくなることがわかっている（鈴木ほか, 2003）。平成 15 年度はチタン中の水素濃度分布に及ぼす電流密度の影響を調査し、長期経過後の水素の分布状態を推定した（和田ほか, 2003）。結果の一例として、80℃における水素チャージ（電荷量： $1.02 \times 10^3 \text{ C cm}^{-2}$ ）後の試験片の断面ミクロ組織を図 4.1.1-6 に示す。電流密度の大きい条件ではチタンの水素化物と考えられる針状の組織が表面のみに観察されるのに対し、電流密度の小さい条件では試験片表面から内部にわたって分布していることがわかる。図中には試験片中の全水素量を分析した結果も示した。水素量は電流密度の小さい条件のほうが大きな値を示しており、従来の報告（鈴木ほか, 2003）と一致する。以上のとおり、自然浸漬状態に近いほど多くの水素が吸収され、チタン内部まで水素の浸入が起こることがわかった。

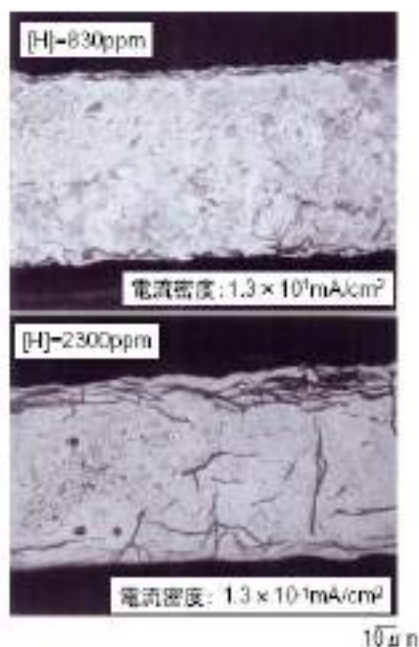


図 4.1.1-6 水素チャージ後の純チタン試料の断面ミクロ組織 (80℃, $1.02 \times 10^3 \text{ C cm}^{-2}$)

iii) 酸化性雰囲気における純銅の腐食挙動に及ぼす環境条件の影響と腐食局在化の検討

大気雰囲気下において純銅の浸漬試験を行い、腐食速度に及ぼす陰イオン濃度、ベントナイト共存の影響など環境条件の影響を調査した（川崎ほか, 2004）。図 4.1.1-7 に塩化物イオンと炭酸水素イオン共存下での腐食速度を示す。塩化物イオン濃度の高い条件のほうが腐食速度は大きくなった。また、炭酸水素イオンによる影響については共存する塩化物イオン濃度によって異なる挙動が観察された。低塩化物イオン濃度条件では炭酸水素イオン濃度の高い条件のほうが腐食速度は大きいのに対して、高塩化物イオン濃度条件では逆に炭酸水素イオン濃度の高い条件のほうが腐食速度は小さくなった。

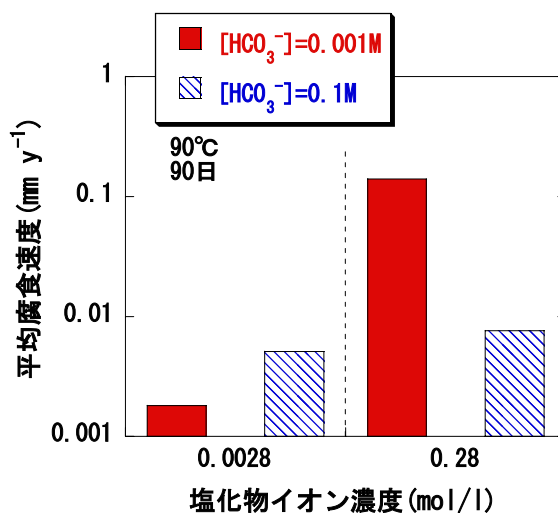


図 4.1.1-7 炭酸水素イオンと塩化物イオンの共存下における純銅の平均腐食速度

この原因について、既に報告した純銅のアノード分極挙動（川崎ほか, 2002）に基づいて検討した。低塩化物イオン濃度条件では 0.0001M 以上の炭酸水素イオンによって不動態型の分極挙動を示し、大気雰囲気では不動態化する。その不動態保持電流密度は炭酸水素イオン濃度の高い条件のほうが大きい。したがって、低塩化物イオン濃度条件での腐食速度の違いは不動態保持電流密度の違いを反映していると考えられる。一方、高塩化物イオン濃度条件では炭酸水素イオン濃度 0.001M 程度では不動態化せず活性溶解型の分極挙動を示すが、0.1M では酸化性環境で不動態化して腐食速度

は小さくなる。このように、高塩化物イオン濃度条件での腐食速度の違いは腐食形態の違いを反映しているものと考えられる。次に、ベントナイト共存による腐食への影響を図 4.1.1-8 に示す。人工海水中で固液比（ベントナイトと溶液の重量比）をパラメータとした実験を行った結果、ベントナイトの比率が大きいほど腐食速度は小さくなる傾向があり、「第2次取りまとめ」における緩衝材仕様（ $\rho=1.6\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ）相当の固液比での腐食速度は $1\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{y}^{-1}$ 以下の値となった。

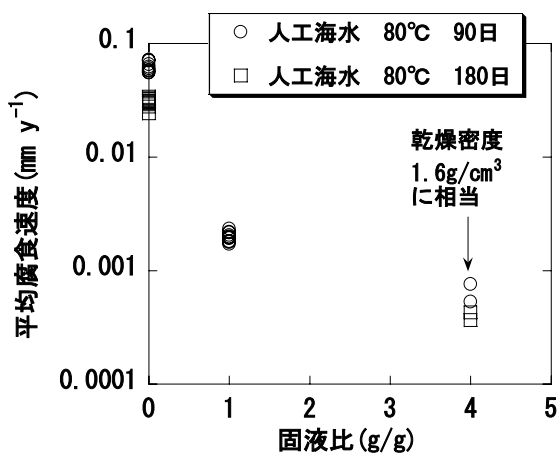


図 4.1.1-8 ベントナイト中における純銅の平均腐食速度の固液比依存性

次に、純銅の腐食の局在化の程度を評価するため、腐食性の異なる試験溶液を用いて水溶液単独系およびベントナイトスラリー中にて浸漬試験を行った（川崎ほか，2004）。試験溶液として高腐食性溶液（ $0.6\text{M}\cdot\text{NaCl} + 0.1\text{M}\cdot\text{Na}_2\text{SO}_4 + 0.01\text{M}\cdot\text{NaHCO}_3$ ）、低腐食性溶液（ $6\text{mM}\cdot\text{NaCl} + 1\text{mM}\cdot\text{Na}_2\text{SO}_4 + 0.1\text{M}\cdot\text{NaHCO}_3$ ）および人工海水を用いた。最大腐食深さについては極値統計解析を行い、実際のオーバーパックにおける腐食深さを推定した。図 4.1.1-9 に最大腐食深さ（極値統計解析による推定値）の時間依存性を示す。腐食深さの大きさは高腐食性溶液、人工海水、低腐食性溶液の順であったが、ベントナイト共存系では溶液による腐食量の差は小さくなった。また、いずれの条件でも 30 日以降の腐食深さの変化はほとんどなく、短期間で腐食の進展が抑制されることがわかった。ここで、最大腐食深さと平均腐食深さの比を孔食係数として求め、図 4.1.1-10 に示すように平均腐食深さとの関係を調べた。図中には米国 National Bureau of Standards (NBS) による土壤中試験デー

タ（Romanoff, 1989）と中安（1990）の土中埋設管の腐食調査結果も示した。純銅の孔食係数は試験条件によって異なる領域に分布しており、腐食局在化の程度が環境因子により大きく異なることが示唆された。しかし、いずれの条件でも腐食の進展とともに孔食係数は小さくなる傾向が認められた。また、土壤中で観察される孔食係数と同程度かそれ以下となった。このような純銅の腐食局在化に関するデータの蓄積によってより信頼性の高い腐食寿命評価が可能と考えられる。

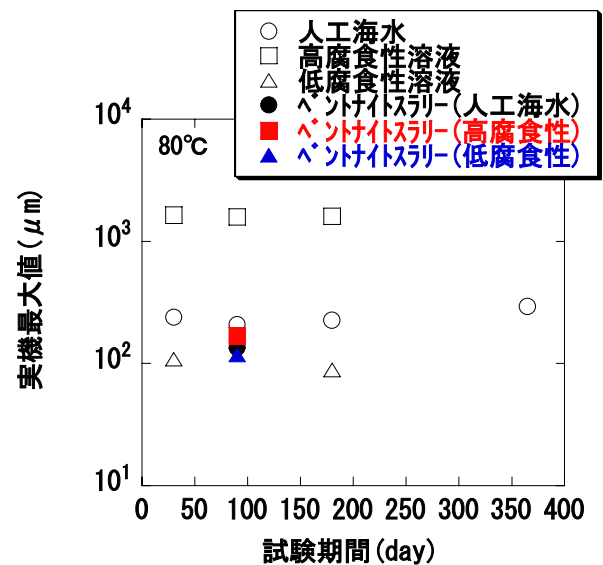


図 4.1.1-9 大気雰囲気における純銅の最大腐食深さ（実機最大値の推定値）の経時変化

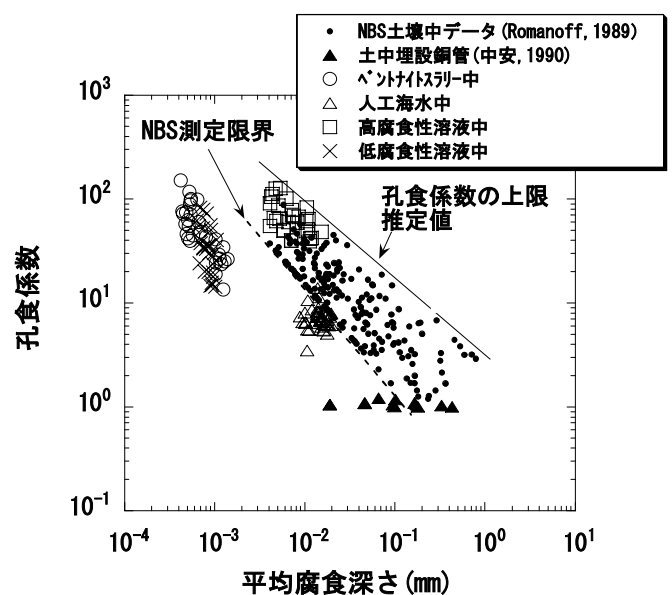


図 4.1.1-10 純銅の平均腐食深さと孔食係数の関係

③ まとめ

平成15年度の研究成果は以下のようにまとめられる。

- 還元性雰囲気におけるチタンの浸漬試験により、水溶液単独系における2年間のチタンの平均腐食速度は $10^{-2} \sim 10^{-1} \mu\text{m y}^{-1}$ と見積もられた。
- 電気化学的な加速試験の結果、加速の度合い（印加電流密度）が小さいほどチタンの水素吸収量は大きく、より内部まで水素が浸入することがわかった。
- 大気雰囲気における純銅の腐食速度は塩化物イオン濃度が高いほど大きくなった。また、炭酸水素イオンによる影響については、共存する塩化物イオン濃度によって異なり、低塩化物イオン濃度条件では炭酸水素イオン濃度の高いほうが腐食速度は大きくなった。高塩化物イオン濃度条件では逆に炭酸水素イオン濃度の高い条件のほうが腐食速度は小さくなった。
- ベントナイト中の実験では固液比の大きいほど腐食速度は小さくなった。
- 酸化性雰囲気における純銅の最大腐食深さの進展は短期間で抑制された。また、孔食係数は腐食の進展とともに小さくなる傾向があり、ベントナイトスラリー中では水溶液中よりも小さな値となった。また、土壤中で観察される値の範囲を超えるような顕著な腐食局在化は観察されなかった。

今後は以下の事項を実施する予定である。

- ベントナイト共存系における還元性環境でのチタンの腐食速度、水素吸収挙動についてデータを取得する。また、水素脆化生起条件を検討する。
- 処分環境における純銅の腐食形態、腐食局在化を実験的に評価する。
- 硫化物共存下での還元性環境における純銅の腐食挙動を実験的に評価する。
- セメントによってもたらされる高pH化によるチタンの腐食速度、水素吸収挙動への影響および純銅の腐食形態、腐食速度への影響などを検討する。

参考文献

川崎 学，谷口直樹，川上 進（2002）：炭酸塩水溶液およびケイ砂混合ベントナイト中における純銅のアンノード分極挙動，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2002-016。

川崎 学，谷口直樹，川上 進（2004）：大気吹き込み下での模擬地下水における純銅の腐食速度と腐食局在化，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-041。

Mattsson, H. and Olefjord, I. (1990): Analysis of oxide formed on Ti during exposure in bentonite clay. I. The oxide growth, Werkstoffe und Korrosion, 41, pp.383-390.

中安静雄（1990）：水道用として長期間土中埋設使用した銅管の調査結果，伸銅協会研究誌，vol.29, p.87.

鈴木宏幸，谷口直樹，川上 進（2003）：還元性環境下におけるチタンの腐食速度と水素吸収挙動，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-003。

鈴木宏幸，谷口直樹，川上 進（2004）：還元性環境下におけるチタンの腐食速度と水素吸収挙動-II，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-042。

Romanoff (1989) : Underground Corrosion, originally issued by NBS in 1957, reprinted by NACE in 1989.

和田隆太郎，西村務，中西智明，藤原和雄，井上隆夫，建石剛，舩形剛（2003）：チタンオーバーパックの水素吸収に関する研究，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；株式会社神戸製鋼所），JNC TJ8400 2003-092。

4.1.2 緩衝材の基本特性

① 課題と計画の概要

人工バリアにおける緩衝材には、止水性、自己シール性、核種収着遅延性、熱伝導性、化学的緩衝性、オーバーパック支持性、応力緩衝性などの性能が長期にわたり維持されることが期待されている。これらの機能を比較的満足し得る候補材料であるベントナイトについては、「第2次取りまとめ」までに、降水系地下水条件下における人工バリア設計や各種解析上必要となるデータを主に取得してきた。今後、実際の地質環境を考慮した場合、熱や水質の違いによる影響などを把握しておくことが必要である。また、国による安全基準・指針の策定への反映として、関係式の一般化や測定手法の標準化に関する基盤情報の整備も重要と考えられる。このため、実際の地質環境条件を考慮したデータの拡充や、評価並びに測定手法などに関する基盤情報の整備を進めるとともに、緩衝材の基本特性データベースの構築を図る。

平成14年度までに、膨潤応力測定手法の標準化に係る基盤情報の整備においては、圧縮ベントナイトの縦横比依存性（以下、「スケール効果」と言う）によって膨潤応力が変化することから、その影響因子のひとつとして考えられる供試体圧縮成型時の残留応力の影響を把握するために、供試体成型後、拘束状態から一旦抜き出した（以下、「開放型」という）圧縮ベントナイトを対象とした膨潤応力データの測定を一部実施した。また、緩衝材の飽和水理特性においては、海水系地下水の影響に関して人工海水を用いたデータの充足を行い、試験温度25～90℃、乾燥密度 $1.2 \sim 1.8 \text{ Mg m}^{-3}$ の範囲における有効粘土密度と固有透過度に関する関係式の一般化を図った（菊池ほか、2003）。さらに、緩衝材の熱特性においては、熱物性測定データの信頼性の確認を目的に、異なる測定手法によるデータの比較に着手し、面熱源法（ホットディスク試験装置）を用いて、降水系および海水系地下水条件下におけるベントナイト単体試料を対象とした熱物性データの拡充を行った。

また、熱伝導率に関しては、線熱源法との比較を、熱拡散率においては、点熱源法との比較をそれぞれ行った。

平成15年度においては、塩濃度をパラメータとした緩衝材の飽和水理特性に関するデータの拡充および膨潤・熱特性における測定手法に係るデータの拡充を進めた。また、緩衝材の基本特性データベースの整備に向けた取り組みとして、「第2次取りまと

め」までの知見および、平成15年度末までに取得した海水系地下水条件に関する各特性データをデータ集として取りまとめ、公開した。

② 成果の概要

i) 膨潤特性

・スケール効果による膨潤応力への影響

膨潤特性においては、スケール効果による膨潤応力の影響因子の1つとして考えられる供試体圧縮成型時の残留応力の影響を把握するために、乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率30wt%の試料を用い、供試体縦横比を変えた膨潤応力データの拡充を実施した。この結果をこれまでの拘束型試験で示された有効粘土密度と膨潤応力の関係と合わせて図4.1.2-1に示す。図から、拘束型の結果と比べ、縦横比(H/D)0.5および1.0に関しては、約4割程度膨潤応力は低下するものの、縦横比(H/D)2.0に関しては、拘束型とほぼ変わらない値が得られた。また、平成14年度までに得られた結果とともにスケール効果による膨潤応力および供試体成型圧の関係を図4.1.2-2に、また、それらを成型圧にて正規化したものを図4.1.2-3にそれぞれ示す。なお、図4.1.2-3においては、拘束型における乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} の結果を合わせて示す。図4.1.2-2から、一旦開放し、かつ縦横比を変えて膨潤応力を測定した場合においても、拘束型における結果（鈴木・藤田、1999）と同様、縦横比を変えることによって、膨潤応力は変化することが分かった。また、拘束型および開放型いずれの結果においても、成型圧にて正規化できることが分かった。

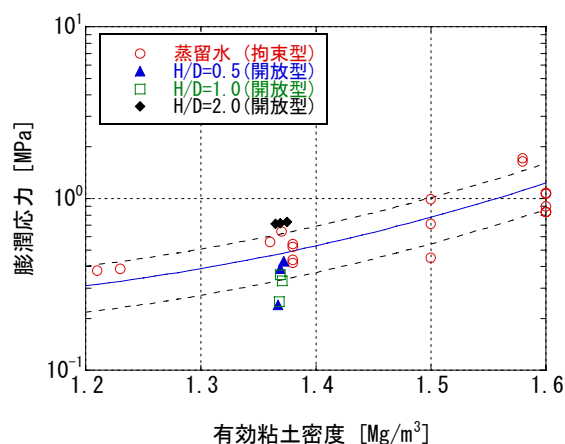


図 4.1.2-1 有効粘土密度と膨潤応力の関係

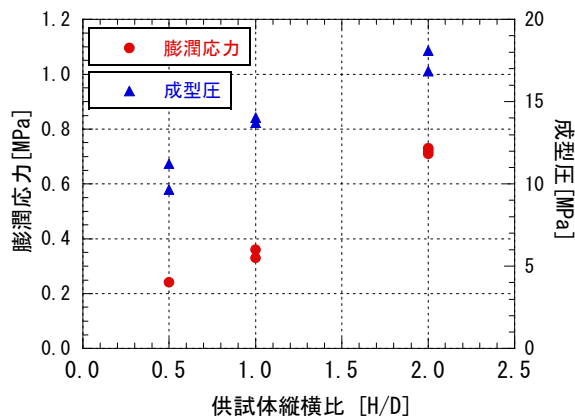


図 4.1.2-2 スケール効果による膨潤応力および供試体成型圧

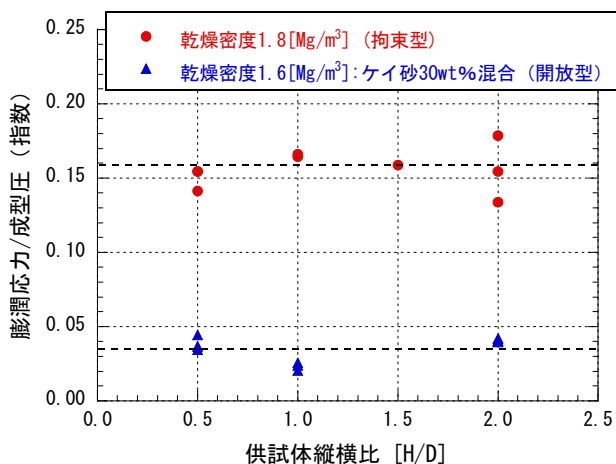


図 4.1.2-3 スケール効果による膨潤応力および供試体成型圧（正規化）

ii) 飽和水理特性

・塩濃度をパラメータとした透水試験の結果

飽和水理特性においては、塩濃度（NaCl 濃度）をパラメータとした海水系地下水の影響に関するデータの拡充を行った。図 4.1.2-4 にこれまでに取得された降水系および海水系地下水条件下における有効粘土密度 ρ_b [Mg m⁻³] と固有透過度 κ [m²] の関係を示す。さらに、図 4.1.2-5 に塩濃度をイオン強度にて整理し、有効粘土密度 1.4 Mg m⁻³ におけるイオン強度と固有透過度との関係を示す。図 4.1.2-5 からイオン強度が約 0.8 [mol kg⁻¹] 付近までは、イオン強度が大きくなるに伴い、固有透過度は大きくなる傾向を示すものの、イオン強度が約 3.4 [mol kg⁻¹] の固有透過度とイオン強度が約 0.8 [mol kg⁻¹] の固有透過度とを比較した結果、固有透過度は変わらず同程度の値が得られた。これらの理由として、透過する溶液

の塩濃度が除々に高くなることによって、ベントナイト層間中の交換性陽イオン量が高くなり、凝集などの作用により間隙構造が変化して、固有透過度も大きくなるが、ある一定濃度を超えると、間隙構造はそれ以上変化せず、固有透過度も同程度の値を示したと推察される。

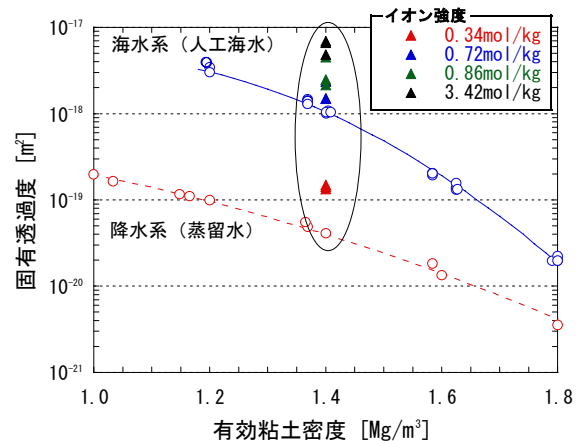


図 4.1.2-4 有効粘土密度と固有透過度の関係

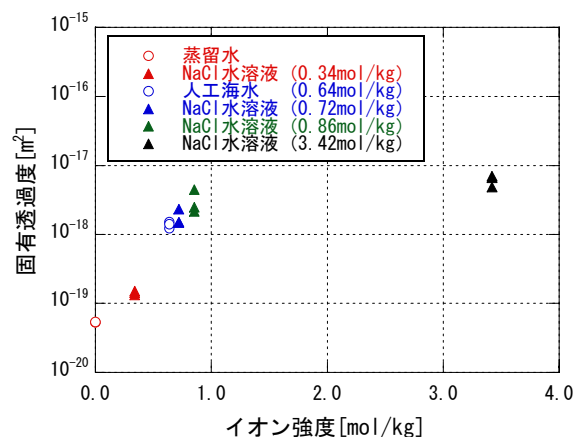


図 4.1.2-5 イオン強度と固有透過度の関係

iii) 熱特性

・面熱源法による熱物性測定試験の結果

熱特性に関しては、面熱源法による降水系地下水を用いたケイ砂混合体試料の熱物性データ（熱伝導率、熱拡散率および比熱を示す）の拡充を行い、熱伝導率に関しては、線熱源法との比較を、熱拡散率に関しては、点熱源法との比較をそれぞれ行った。熱伝導率および熱拡散率の比較を図 4.1.2-6、図 4.1.2-7 に示す。熱伝導率に関しては、線熱源法と比べ、各乾燥密度および含水比において、同等の値が得られた。また、熱拡散率に関しては、点熱源法に比べ若干低い値が得られた。これは、測定手法の違いにおいて、面熱源法で測定した場合、面による

測定のため試料表面の場を平均的に測定するのに対して、点熱源法の場合、測定点周辺の温度変化のみを測定してしまうことによって生じた違いと考えられる。(菊池・棚井, 2003a)

また、比熱と熱拡散率および熱伝導率の間には(4.1.2-1)式の関係がある。

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (4.1.2-1)$$

ここで、熱拡散率 α [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] は、熱伝導率 λ [W mK^{-1}] を比熱 [$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$] および単位体積重量 ρ [kg m^{-3}] で除したものであり、物質内の温度が非定常状態分布となる場合の熱拡散性の程度を示す係数である。このことから、面熱源法によって平成 14 年度に取得されたベントナイト単体試料および平成 15 年度に得られたケイ砂混合体試料の熱伝導率および熱拡散率データを基に緩衝材材料の比熱を実験的に求めた(菊池・棚井, 2003a)。

一方、土の比熱は、土を構成する固相・液相・気相の各々の比熱と単位体積当たりの重量比の積の総和で表すことが知られており、(4.1.2-2) 式で求められる。

$$c = c_s \rho_s + c_w \rho_w + c_a \rho_a \quad (4.1.2-2)$$

ここで c は比熱、添字 s, w, a はそれぞれ固相、液相および気相を表す。このうち、気相の項は他に比べて十分小さいため、無視し得ることから、(4.1.2-3) 式のように表される。ここで、 m は質量、 w は含水比を表す。

$$c = c_s \frac{m_s}{m_s + m_w} + c_w \frac{m_w}{m_s + m_w} = \frac{c_s + c_w w}{1 + w} \quad (4.1.2-3)$$

(4.1.2-3) 式から、固相の比熱 c_s を求めれば、緩衝材中の水分の増加に伴う比熱の変化も予想することができる。なお、緩衝材の固相の比熱 c_s は、含水比 0% における熱伝導率および熱拡散率から求めることができるが、測定値に多少バラツキがあるため、全測定値から最小二乗法によって得られた値を用いた。これらの結果と(4.1.2-3)式から、緩衝材の構成要素より予測される比熱 c [$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$] と含水比 w [%] の関係式は、以下のように定式化できる(菊池・棚井, 2003a)。

$$\text{ベントナイト単体} : c = \frac{63.10 + 4.18w}{100 + w} \quad (4.1.2-4)$$

$$\text{ケイ砂混合体} : c = \frac{67.32 + 4.18w}{100 + w} \quad (4.1.2-5)$$

なお、これまでに取得されたベントナイト単体およびケイ砂混合体試料に関して、実験的に求めた比熱および関係式から求めた予測値を図 4.1.2-8、図 4.1.2-9 に示す。

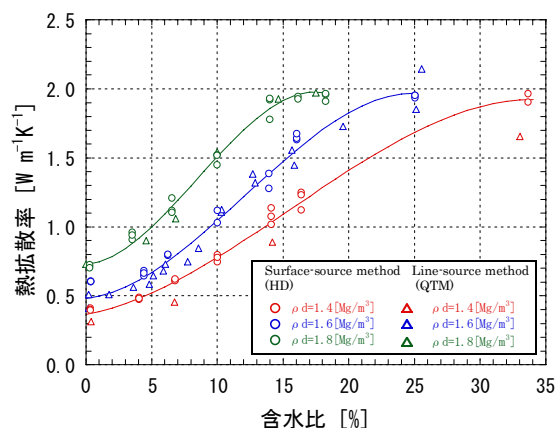


図 4.1.2-6 熱伝導率の測定結果(ケイ砂混合体)
HD : 面熱源法, QTM : 線熱源法

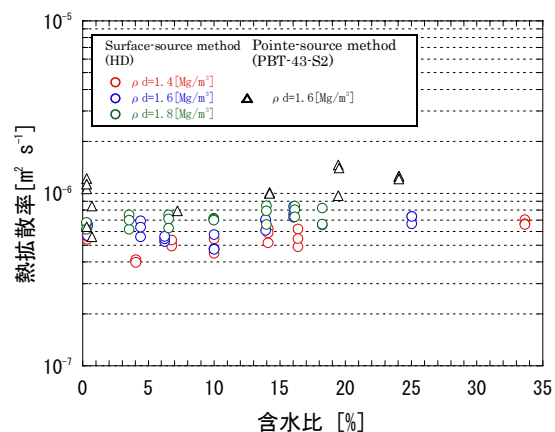


図 4.1.2-7 熱拡散率の測定結果(ケイ砂混合体)
HD : 面熱源法, PBT-43-S2 : 点熱源法

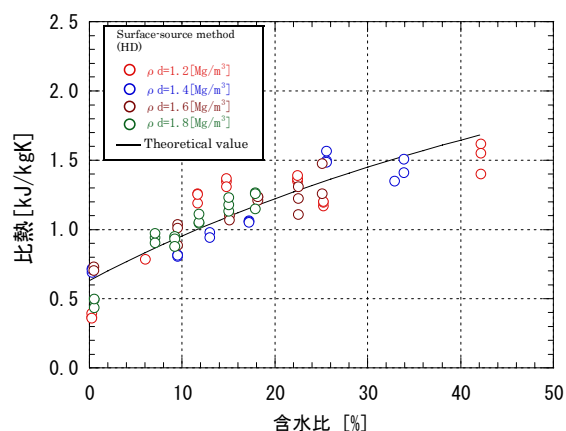


図 4.1.2-8 比熱の実験値と予測値の比較
(ベントナイト単体)

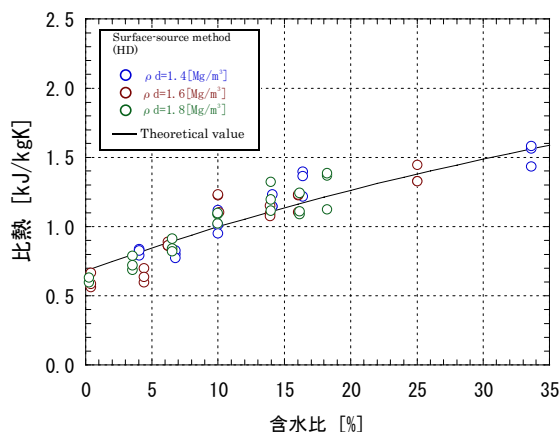


図 4.1.2-9 比熱の実験値と予測値の比較
(ケイ砂混合体)

iv) 緩衝材の基本特性データベース

・データベースの整備に向けた取り組み

緩衝材の基本特性データベースの構築に際しては、これまでに研究開発を進めている緩衝材の長期力学挙動や熱-水-応力-化学連成挙動などの人工バリアの長期挙動評価モデル開発や処分場・緩衝材の設計手法の検討などとのリンクを第一義的に考えて構築していくこととする。具体的には、設計・評価手法上必要となるデータ範囲やデータの取り扱いなどを十分に考慮し、それらとの整合をとった形でデータベースの体系を構築する。また、緩衝材の透水試験や膨潤試験などの基本特性試験によるデータの収集・蓄積および加工によりデータベースの構築並びに更新を行っていく上で、データの品質管理の観点から、データの取得手法やデータの加工履歴などに関する背景情報も重要であることから、これらの情報を含めた形でデータベースの骨格を構築していく。

平成 15 年度においては、緩衝材の基本特性データベースの整備に向けた取り組みとして、「第 2 次取りまとめ」までの知見および、平成 15 年度末までに取得した海水系地下水条件に関する各特性データをデータ集として取りまとめ、公開した（菊池・棚井, 2003b）。各特性データに関しては、CD-ROM データとして添付し、図 4.1.2-10 に示すように市販されている Microsoft 社製「EXCEL」を用いて特性ごとにデータシートを作成し、乾燥密度、ケイ砂混合率、水質などのパラメータごとに整理した。なお、データ取得時の背景や詳細な取得方法についても閲覧できるよう、引用公開資料としてデータごとのサイクル機構技術資料を PDF 化し、ハイパーリンクにて添付した。

③ まとめ

膨潤特性に関しては、スケール効果による膨潤応力へ与える影響を把握するために、圧縮成型時に発生する残留応力を除荷した供試体を用いてスケール効果による膨潤応力への影響確認試験データの拡充を行い、これまで同様、スケール効果によって膨潤応力が変化することが分かった。

飽和水利特性に関しては、塩濃度をパラメータとした海水系地下水の影響に関するデータの拡充を行い、透過する溶液の濃度の影響によって固有透過度は大きくなる傾向を示すものの、ある一定濃度に達した場合、塩濃度が変化しても固有透過度は変化せず一定の値となる傾向があることが分かった。

熱特性に関しては、異なった測定手法により得られたデータの比較検討を行うとともに、面熱源法によって得られた結果から解析上必要となる比熱と含水比における関係式の定式化を行った。

緩衝材の基本特性データベースに関しては、緩衝材の基本特性データ集として、平成 15 年度末までに取得されたデータを公開技術資料として取りまとめた。

今後は、緩衝材の基本特性に関して、温度や水質を考慮したデータの拡充や各特性における測定手法の標準化に関わる基盤情報の整備を継続するとともに、適宜データベースを更新し公開していく。一方、高レベル放射性廃棄物処分の事業化に向けては、幅広い仕様のベントナイトにも対応できるように、これらの基盤情報の汎用性を高めていくことも必要であると考えられる。そのため、海外産ベントナイト（MX-80 など）に係るデータを文献などより収集し、例えばモンモリロナイト含有率などによる関係式の一般化、あるいは、海外産ベントナイトと国産ベントナイト（クニゲル V1）との性能比較を通じた適用性評価など、いくつかの評価手法について検討していく。

参考文献

- 菊池広人, 棚井憲治, 松本一浩, 佐藤治夫, 上野健一, 鐵剛志 (2003): 緩衝材の透水特性-II, サイクル機構技術資料, JNC TN8430 2003-002.
- 菊池広人, 棚井憲治 (2003a): 緩衝材の熱物性測定試験 (III) - 面熱源法による緩衝材熱物性の取得 -, サイクル機構技術資料, JNC TN8430 2003-009.
- 菊池広人, 棚井憲治 (2003b): 緩衝材の基本特性データベース, サイクル機構技術資料, JNC TN8450 2003-010.
- 鈴木英明, 藤田朝雄 (1999): 緩衝材の膨潤特性, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-038.

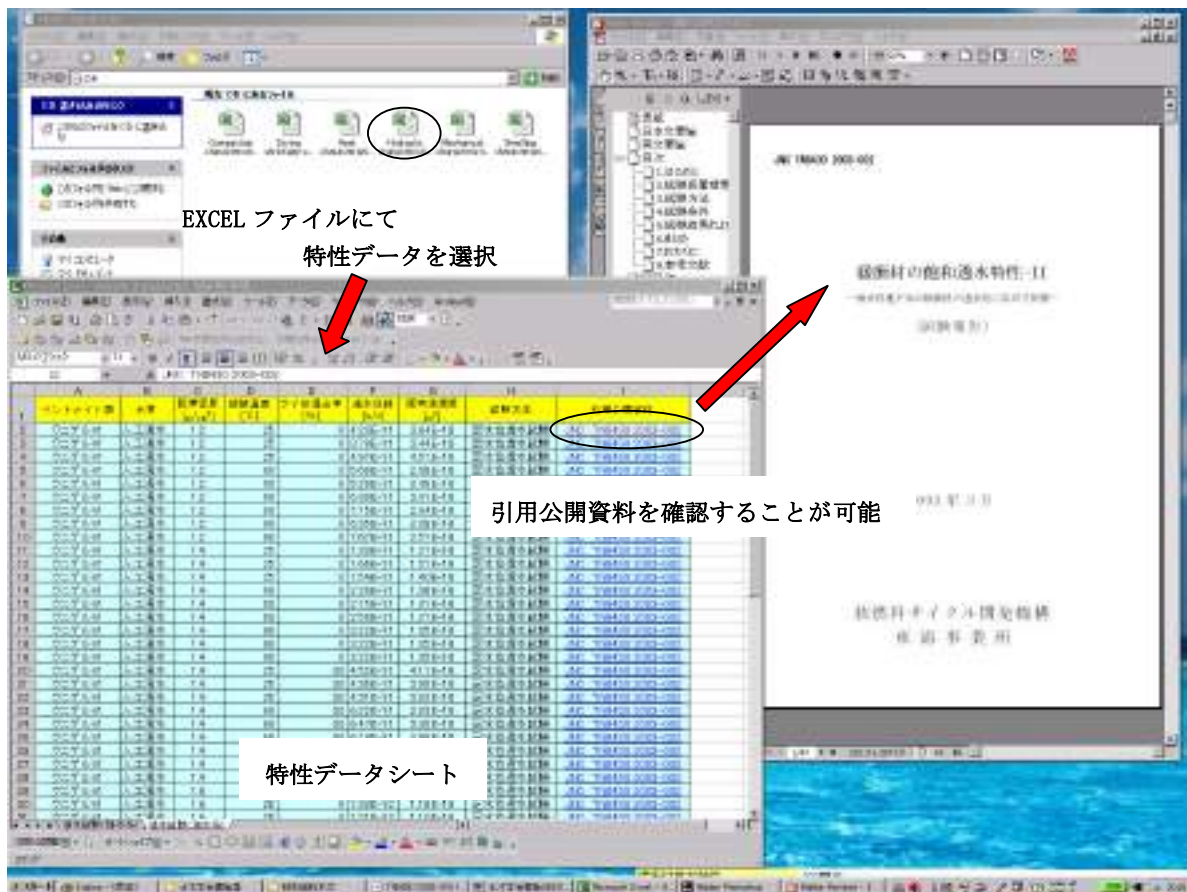


図 4.1.2-10 データファイル取り扱い方法

4.1.3 人工バリアの性能保証に関する基盤情報整備

① 課題と計画の概要

サイクル機構においては、国による安全基準・指針等の策定および実施主体が進める処分事業へ反映することを目的として、人工バリアの性能保証に関する基盤情報の整備を進めている。

平成 14 年度までに、i) 処分場の長期的安全性の確保の観点から人工バリアに期待する性能／性能保証項目の整理を行うとともに、安全基準・指針等の策定や処分事業の推進に資する基盤情報として体系的な整理を試みており、処分場を構成する要素（緩衝材、オーバーパック等）に関わる性能保証項目（案）の抽出、具体的評価（保証）方法、課題の抽出を行った。また、幌延の深地層の研究施設における原位置試験計画に向けた検討として、ii) 人工バリア性能のモニタリングに関わる検討およびiii) 人工バリアの搬送・定置に関わる検討を行っている。モニタリングの検討では、原位置での人工バリア試験における測定項目や計測技術の選定のために必要な情報の収集などを行い、海外における人工バリア性能確認モニタリングに関する考え方、取り組み状況を調査・整理した。搬送・定置に関わる検討では、人工バリア性能への影響を把握するとともに原位置での定置精度確認試験における具体化のために、人工バリアの搬送定置装置に求められる定置精度を検討する観点から、緩衝材／オーバーパック、緩衝材／岩盤間に生じる隙間の人工バリア機能への影響に関する検討を行い、オーバーパック腐食への影響、緩衝材の隙間充填挙動に関する基礎的な試験を実施した。これらは、処分場管理における人工バリア性能確認に関する考え方等の整理や人工バリアの搬送・定置装置の要求性能を策定するための基盤情報となる。

平成 15 年度は、処分場の長期安全性の確保に関する検討として、平成 14 年までの整理結果に基づき体系的な整理を進めた。人工バリア性能確認モニタリングに関しては、最新の計測技術の国内外の調査を実施した。また、定置精度に関わる検討としては、緩衝材の隙間充填挙動に関する試験を継続し、データの拡充を図った。

② これまでの成果

i) 処分場の長期的安全性の確保に関する検討

処分場を構成する各要素に対する性能保証項目（案）に基づき抽出した課題に対して、現状の取り組み状況を整理するため、サイクル機構および他の研究機関における具体的な取り組み状況について、計画中のもの（幌延深地層研究計画等）も含めて整理を行い、長期的安全性の観点から抽出した性能保証項目（案）とサイクル機構における研究開発との関係を明確にした（図 4.1.3-1 参照）（川上ほか，2004；栗原ほか，2004）。

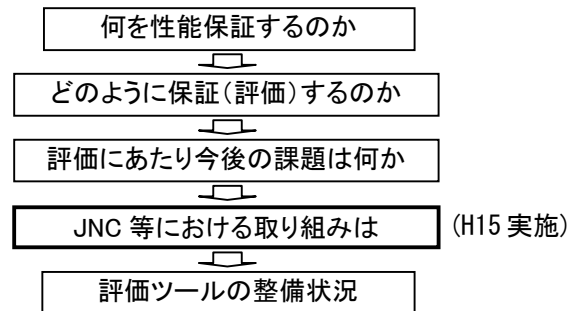


図 4.1.3-1 検討の手順

ii) 人工バリア性能のモニタリングに関わる検討

幌延の深地層の研究施設において、人工バリアおよびその周辺岩盤における熱的、力学的、水理的、化学的現象の時間／空間的変遷を把握するための原位置試験を計画している。この原位置試験に適用するために、国内外の計測技術について調査を行った（千々松ほか，2004）。調査の対象とした項目および処分環境に対して適用性が高いと判断される技術を、表 4.1.3-1 に示す。これらの調査に基づいて、緩衝材水分量測定技術、pH 測定技術、腐食速度測定技術、光ファイバーシステムに関して、幌延の原位置試験への適用に向けての概略的な開発計画を策定した。

表 4.1.3-1 計測技術に関する調査対象項目と調査技術

現象	対象項目	調査技術
熱	温度	光ファイバ、熱電対等
水理	緩衝材水分量	TDR 式、FDR 式
水理	間隙水圧	差動トランス型式、弦振動式、ファブリペロ型干渉計式
力学	応力・ひずみ	OSMOS、BOTDR、FGB、弦振動式
力学	変位	FBG、変位計
熱・力学・水理	密度	TDR 式
化学	pH	光ファイバ

TDR: Time Domain Reflectometry, FDR: Frequency Domain Reflectometry, OSMOS: Optical Strand Monitoring System, BOTDR: Brillouin Optical Time Domain Reflectometer, FGB: Fiber Bragg Grating

iii) 人工バリア搬送・定置に係る検討

緩衝材定置後初期にみられる緩衝材と岩盤の隙間における緩衝材の隙間膨潤に関する基礎試験を継続し、より長期のデータを取得した(杉田ほか、2003)。

試験装置は図 4.1.3-2 に示す装置を用いた。供試体(圧密ベントナイト)は、直径 36mm、高さ 35mm のパーツ 2 個(両端部)及び直径 36mm、高さ 30mm のパーツ 1 個(中心部)の 3 個のパーツを組み合わせて 1 つの供試体とした。試験カラム($\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$)と供試体の寸法の関係から、膨潤後の供試体の乾燥密度は初期の乾燥密度のほぼ半分になる。供試体の中心部には、中心部の位置の変化や密度分布測定における指標としての役割も含めて、模擬廃棄体としてステンレス材(重量軽減のため中は空洞でシリコンゴムを充填)を挿入した。試験カラムは、人工バリアの定置方式である横置きおよび縦置き方式に合せた設置とし、緩衝材を膨潤させて経時的な密度分布の変化、模擬廃棄体の位置の変化を観察した。試験期間は、最長 650 日である。

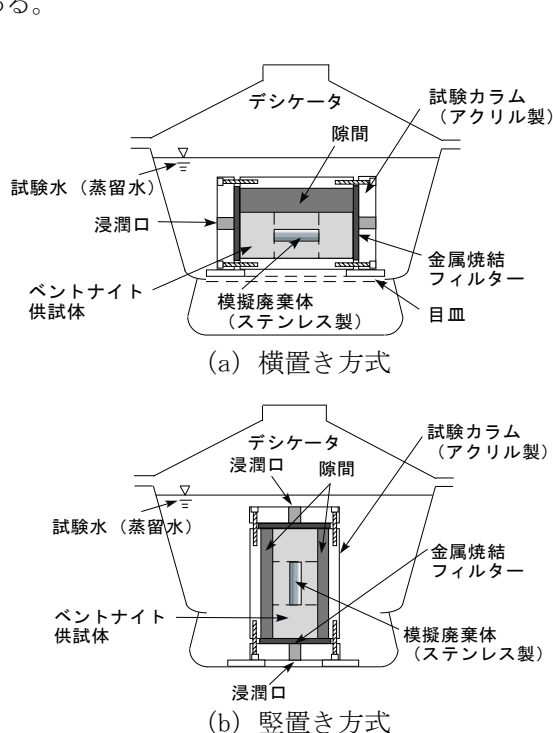


図 4.1.3-2 膨潤試験装置の概略図

横置き方式の試験における試験開始後の概観観察では、数時間で隙間は埋められることが分かった。図 4.1.3-3、図 4.1.3-4 に示す D、E 断面位置における密度測定結果より、試験初期においては密

度のバラツキは大きいですが、時間の経過とともにバラツキの幅が小さくなっており、供試体の密度が均一になる方向に向かっていることがわかった。また、模擬廃棄体の中心位置の経時変化は、図 4.1.3-5 のように時間の経過とともに上昇する傾向にあるが、試験カラム中心(25mm)の手前(24mm)でその上昇が止まりつつある。供試体が上部・側部・下部ともに均等に膨潤すれば、模擬廃棄体の位置はカラム中心まで移動するはずである。しかし、膨潤開始初期は、隙間側の供試体部分(上部および側部の外側)から膨潤が進行し、次に下部外側が膨潤することとなり、膨潤のタイミングのズレにより供試体中で密度差が発生する。この時、下部外側供試体が供試体を押し上げて膨らむよりも密度の低い側部の外側方向へ膨らみ、また、押された側部は上部の低密度側へ移動する。この現象が、模擬廃棄体を中心としてわずかながら生じたためと考えられる。この現象については、スケールアップ等を含めたさらなる検討が必要である。

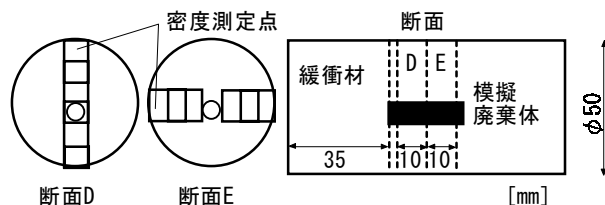


図 4.1.3-3 密度分布の測定位置

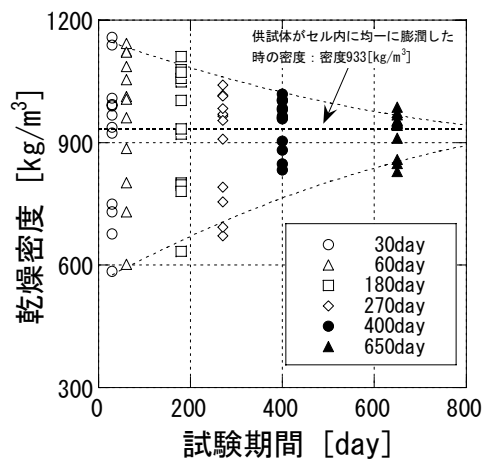


図 4.1.3-4 横置き方式での供試体の断面 D、E における密度分布の経時変化

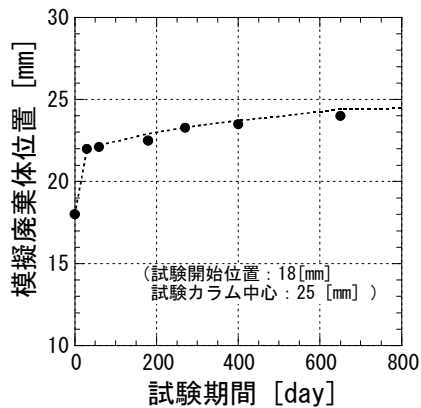


図 4.1.3-5 横置き方式での模擬廃棄体の中心位置の経時変化

③ まとめ

処分場の長期的安全性の確保に関する検討では、処分場を構成する各要素について、性能保証項目（案）に基づき抽出した課題について、サイクル機構における具体的取り組み状況を整理し、安全基準・指針の策定や事業の推進に資するための基盤情報として、処分に関わる人工バリア等の性能保証に関わる体系的な整理ができた。今後は、性能保証項目（案）に対して設定した評価内容に関する具体的評価ツール（モデル、データベース、実験方法）の整備状況を整理する。

人工バリアの性能確認モニタリングに関わる検討では、既存の計測技術の調査・整理を行い、幌延における原位置試験に向けた概略的な開発計画を策定した。今後は、策定した開発計画の詳細化等、幌延での原位置試験を想定した検討を行う。

人工バリアの搬送・定置に係る検討では、緩衝材ブロックの定置精度に着目し、緩衝材ブロックの隙間が人工バリアの長期挙動に及ぼす影響を確認するための隙間膨潤に関するデータ取得試験を行った。また、②では示していないが、「第2次取りまとめ」以降における隙間に関わる膨潤特性、力学特性、透水特性、熱影響および腐食影響に関するこれまでの成果を整理し、人工バリア性能への影響について取りまとめた（杉田ほか、2004）。今後は、内部状況のその場観察が可能なX線CT装置等を用いて初期の隙間充填挙動に着目したデータ取得を行い、より精緻なモデル化に資するデータの拡充を図る。

参考文献

千々松正和、今井 久、佐々木肇、茂呂吉司（2004）：

人工バリア性能確認に関する基盤情報取得方法の調査研究，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；株式会社間組），JNC TJ8400 2003-090.

川上 進，油井三和，栗原雄二，神徳 敬，杉田 裕（2004）：人工バリア等の性能保証に関わる研究のサイクル機構における取り組み，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-037.

栗原雄二，藤田朝雄，川上 進，神徳 敬，油井三和，杉田 裕（2004）：人工バリア等の性能保証に関わる研究のサイクル機構における取り組み（その2），サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-053.

杉田 裕，川上 進，谷口直樹，油井三和（2004）：要素試験に基づく隙間共存下におけるブロック緩衝材のバリア性能の評価，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-038.

杉田 裕，菊池広人，棚井憲治（2003）：人工バリアにおける緩衝材の隙間膨潤挙動に関する基礎研究（Ⅱ），サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2003-007.

4.2 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究

4.2.1 人工バリア等の変形・変質等の長期挙動に関する研究

1) 緩衝材/岩盤の力学的変形挙動に関する研究

1-1) 緩衝材クリープ現象に関する研究

① 課題と計画の概要

緩衝材に求められるオーバーパック支持性能や応力緩衝性能に関して、「第2次取りまとめ」においては、一般の粘性土で実績があり、パラメータの設定が比較的容易な力学評価モデルを用いて評価した。しかし、それらのモデルを、一般の粘性土に比べ膨潤性が高く、かつ評価期間が長期となる緩衝材について適用することの妥当性に関しては十分な検討を行う必要がある。そこで、緩衝材に適用性が高いモデルを既存モデルの体系的整理や室内要素試験のシミュレーション解析などから再選定し、再選定された力学評価モデルを用いてオーバーパック支持性能や応力緩衝性能の再評価を行う。また、模型試験の実施により、岩盤中の人工バリアを模擬した、周囲を拘束された境界条件下でのオーバーパック支持性能の把握も実施する。

② これまでの成果

i) 評価モデルの選定

平成14年度は、既存力学評価モデルを体系的に整理し、適用性の高い力学モデルを選定するとともに、力学モデルによる室内要素試験のシミュレーション解析を実施し、以下の結論を得た。

- ・ 圧密挙動とクリープ現象の評価が可能で実績があるモデルとして関口-太田モデルと足立-岡モデルが選定された。
- ・ 抽出された2つのモデルを用いて、クリープ試験のシミュレーション解析を試みた結果、両モデルによる解析結果はほぼ等しく、実験結果を適切に表現することが確認された。

平成15年度は、クリープ試験以外の室内要素試験に関しても選定された2つのモデルによるシミュレーション解析を実施した。その結果、全ての室内要素試験を1組のパラメータで評価することは困難であることがわかった(平井ほか, 2004a)。そこで、室内要素試験の結果に基づいて、緩衝材

の長期力学挙動を評価するために必要となるパラメータを複数設定することとした。それらのパラメータセットを表4.2.1-1に示す。表中の粘性パラメータAは三軸圧縮試験やクリープ試験を精度良く評価できるパラメータであり、粘性パラメータBは圧密試験を精度良く評価できるパラメータである。また、緩衝材は吸水膨潤特性が大きいため、弾性パラメータである膨潤指数 κ は、除荷・再載荷過程で異なる。そこで、図4.2.1-1のような圧密試験の除荷過程から3種類の膨潤指数 κ を設定した。

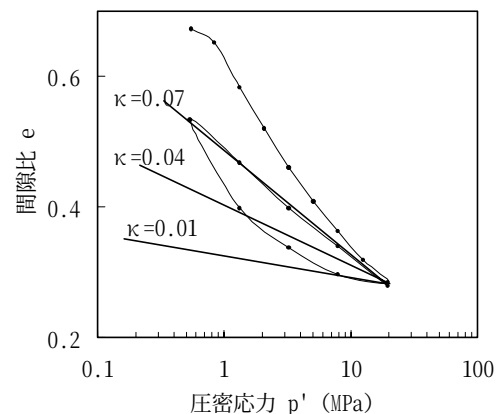


図4.2.1-1 圧密試験に基づく膨潤指数の設定

表4.2.1-1 評価モデルに用いるパラメータ

構成モデル		関口-太田		足立-岡	
	粘性パラメータ	A	B	A	B
		$\alpha = 4.5 \times 10^{-4}$ $\dot{V}_0 = 1.0 \times 10^{-15}$	$\alpha = 1.2 \times 10^{-3}$ $\dot{V}_0 = 1.2 \times 10^{-5}$	$m' = 63$ $C = 1.6 \times 10^{-15}$	$m' = 24$ $C = 1.9 \times 10^{-5}$
弾性パラメータ					
1	$\kappa = 0.070$ 、 $\nu = 0.001$	S0-A1	S0-B1	A0-A1	A0-B1
2	$\kappa = 0.040$ 、 $\nu = 0.166$	S0-A2	S0-B2	A0-A2	A0-B2
3	$\kappa = 0.010$ 、 $\nu = 0.400$	S0-A3	S0-B3	A0-A3	A0-B3

※ α , $\dot{V}_0$: 関口-太田モデルの粘性パラメータ（ただし $\dot{V}_0$ は排水距離1cmに対するもの）、 m' , C : 足立-岡モデルのパラメータ、 κ : 膨潤指数、 ν : ボアソン比

ii) 人工バリアの長期挙動評価

平成15年度は、再選定した関口-太田モデルと足立-岡モデルに表4.2.1-1のパラメータセットを用いて、「第2次取りまとめ」で実施された堅置き方式の場合の、人工バリアにおけるオーバーパックの自重沈下と腐食膨張の影響について再評

価した（平井ほか，2004a）。「第2次取りまとめ」において考慮されていなかった緩衝材上部の厚さ1mの埋め戻し材自重も評価対象とした。解析結果は，関ロー太田モデルと足立一岡モデルでほとんど差が無かったので，本報告では関ロー太田モデルの結果についてのみ報告する。

図 4.2.1-2 は，縦置き方式の場合にオーバーパックスの10,000年間の沈下量の経時変化を求めたものである。長期の沈下量は，粘性パラメータの影響が大きく，圧密試験より設定された粘性パラメータBでは沈下量が約26mmと「第2次取りまとめ」の5.1mmに比べて大きくなった。この変位は，核種移行経路短縮など安全評価上問題となる沈下量ではないと考えられるが，今後，緩衝材の密度分布や拡散場確保の確認など，安全評価の観点から詳細な検討を行う必要がある。

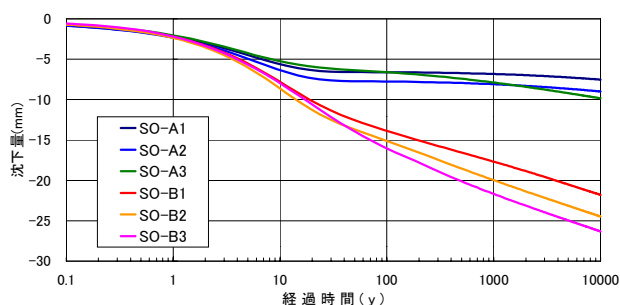


図 4.2.1-2 解析により得られるオーバーパックス沈下

図 4.2.1-3 は，オーバーパックスが「第2次取りまとめ」と同様に4,750年間で184.8mmまで一定の速度で腐食膨張すると仮定した場合の，オーバーパックスに作用する土圧の経時変化に関する解析結果を示したものである。オーバーパックスに作用する土圧は，前述の沈下とは逆にAグループの粘性パラメータを用いた結果が大きくなった。

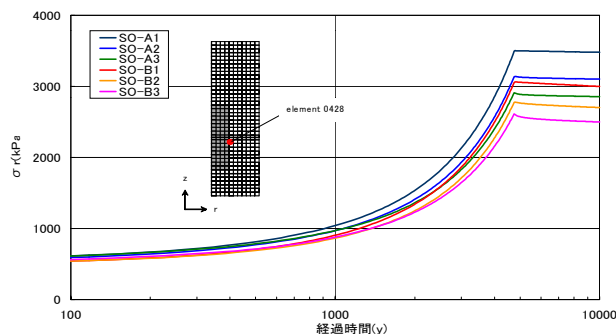


図 4.2.1-3 解析より得られるオーバーパックスに作用する土圧

iii) 評価モデルの改良

i), ii)より，関ロー太田モデルや足立一岡モデルにおいては，複数の室内要素試験を満足するパラメータセットを絞り込むことができず，人工バリアの長期力学挙動評価も幅をもった予測結果となった。このように，パラメータセットを決定できない原因としては，緩衝材が吸水膨潤性の高い材料であるため図 4.2.1-1 のように圧密試験結果の除荷過程での非線形性が大きいことが考えられる。

平成14年度は，関ロー太田モデルや足立一岡モデルの基本モデルであるCam-Clayモデルに，緩衝材の吸水膨潤特性を考慮した改良を試み，従来は唯一とされていた膨潤指数 κ を $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ の3種類に分割して用いる改良型モデルを提案した（平井・棚井，2003）。しかし，このモデルでは κ の設定手法が明確でなかったため，平成15年度はさらに改良を進めて κ を応力の関数とする改良を行った（平井ほか，2003）。改良モデルの従来モデルに対する変更点を以下に述べる。

・ 吸水膨潤ひずみの導入

新たに吸水膨潤ひずみ ε^s を導入し，全ひずみ ε^t が次式のように表されるものとした。

$$\varepsilon^t = \varepsilon^e + \varepsilon^s + \varepsilon^p \quad (4.2.1-1)$$

ここに， ε^e は弾性ひずみ， ε^p は塑性ひずみをそれぞれ表す。ただし，吸水膨潤ひずみはせん断ひずみの成分を持たず体積ひずみ成分のみ存在するものとする。

・ 非線形膨潤指数の導入

吸水膨潤体積ひずみと弾性体積ひずみの和 ε_v^{se} は，非線形膨潤指数 φ を用いて次式のように表されるものとした。

$$\varepsilon_v^{se} = \frac{\varphi(p', \dot{p}')}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p_0} \quad (4.2.1-2)$$

ここに， p' は平均有効応力， $\dot{p}'$ は平均有効応力の変化率， e_0 は初期間隙比， p_0' は初期平均有効応力である。さらに， φ は次式のように表すことができるものとした。

$$\varphi(p', \dot{p}') = a \ln \frac{\dot{p}'}{p_0} + b \quad (4.2.1-3)$$

ここに， a, b は除荷，再載荷など平均有効応力の変化率により変化する定数である。

上記のような改良の結果，圧密非排水三軸圧縮試験（CU試験）における正規化軸差応力-ひずみ関係は従来型モデルに比べ図 4.2.1-4 のように精度良く評価可能となった。

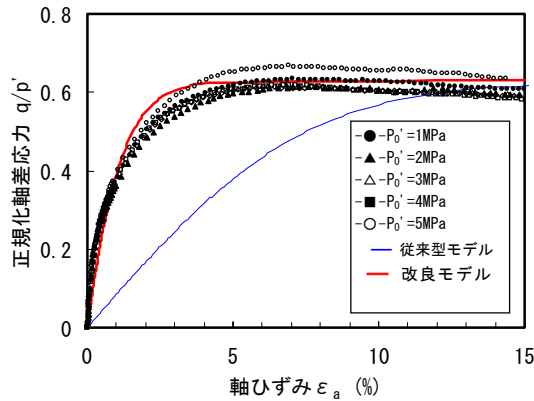


図 4.2.1-4 CU 試験に対する改良モデルと従来型モデルの解析結果

iv) 模型試験によるオーバーパック支持性能把握

平成 15 年度は、縮小模型試験によって縦置き方式におけるオーバーパック自重沈下やオーバーパック軸方向の腐食膨張に対する支持性能を把握するとともにシミュレーション解析を実施して現象解明を試みた(平井ほか, 2004b)。

図 4.2.1-5 に試験体の形状とピストン貫入部の形状を示す。試験は人工バリア中のオーバーパックが軸方向に腐食膨張する場合を想定し、対称条件によりその半断面を対象とした試験を実施した。試験は、加圧注水による緩衝材飽和完了後にピストンを所定の速度で貫入させた。試験ケースは貫入速度 0.15mm d^{-1} (CASE1) と 1.5mm d^{-1} (CASE2) の 2 ケースとした。

図 4.2.1-6 に、ピストン貫入時の载荷応力とピストンの変位の関係について試験結果と修正 Cam-Clay モデルによるシミュレーション解析結果を併せて示す。

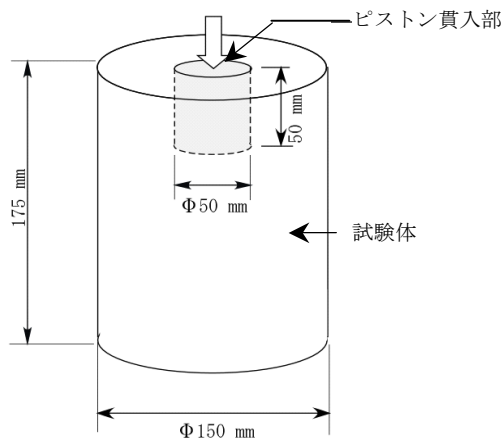


図 4.2.1-5 模型試験用試験体と载荷部

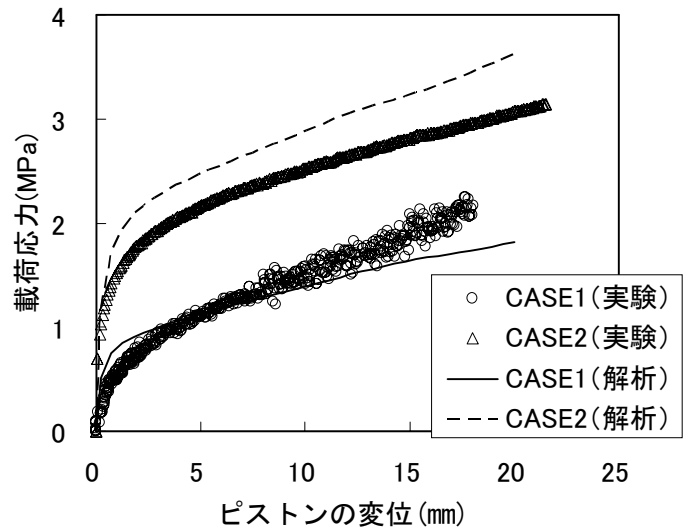


図 4.2.1-6 ピストン貫入時の载荷応力と変位の関係

载荷応力は、変位 $0.5 \sim 1.0\text{mm}$ 付近で降伏するものの変位に伴って増加し続け、極限状態には達しなかった。また、解析により载荷応力と変位の関係がある程度精度良く評価できていることがわかる。極限状態に達しない理由としては、人工バリアは周囲の変形が岩盤で拘束されており塑性流動などの変形が抑えられるためと考えられる。図 4.2.1-7 は、ピストン貫入速度をオーバーパックの腐食膨張速度 0.04mm y^{-1} とした場合の解析結果を含め、载荷応力を初期膨潤応力で除した正規化応力と変位をピストン(オーバーパック)直径で除した正規化変位の関係を両対数で示したものである。図よりこれらの関係は変位が大きくなると、まとまった直線群で示されることがわかる。この結果より、緩衝材のオーバーパック支持性能に関して保守的な推定式として次式が提案できる。

$$\ln\left(\frac{Q}{P_s}\right) = 0.2321 \ln\left(\frac{S}{D}\right) + 1.6011 \quad (4.2.1-4)$$

($S/D \geq 0.1$)

ここに、 Q は载荷応力(支持力)、 P_s は初期膨潤応力、 S は変位、 D は载荷面(オーバーパック)直径である。

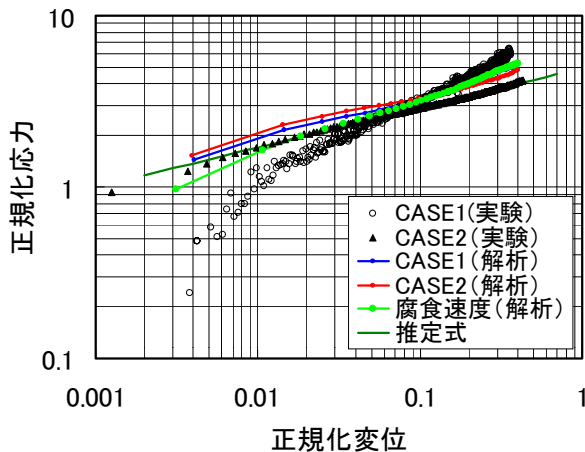


図 4.2.1-7 正規化応力と正規化変位の関係

v) 長期圧密試験に基づく長期挙動評価

人工バリアの力学挙動予測においては、通常 1,000 時間程度の短期間で実施される圧密試験に基づいて設定されたパラメータを用いて解析するため、10,000 年といった長期予測結果の信頼性が低下することが課題の 1 つと考えられた。そこで、平成 15 年度は、平成 14 年度から継続して実施された長期圧密試験結果に基づき長期の人工バリア挙動予測を試みた（平井ほか，2004b）。

図 4.2.1-8 に一定荷重を長期载荷した圧密試験結果を示す。一般に一次圧密以後の二次圧密においては、変位と時間の対数の関係は直線で表され、その傾き、すなわち二次圧密係数は定数である。しかし、試験結果においては、 $P=1.5\text{MPa}$ データの 30,000 分経過後に見られるように、変位と時間の対数との関係が直線から曲線の挙動に変化し、二次圧密係数が時間とともに増加する傾向が見られた。そこで、二次圧密係数が時間の対数に比例すると仮定して、10,000 年後の粘性パラメータを求めて解析を行った。その結果、10,000 年後のオーバーパックの沈下量は 103mm と「第 2 次取りまと

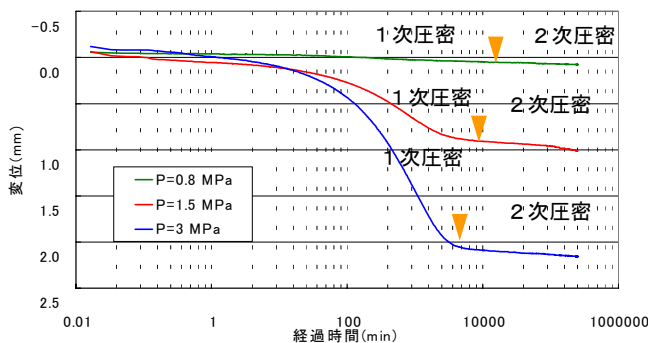


図 4.2.1-8 長期圧密試験結果

め」における予測結果より大きくなった。しかし、沈下によって核種移行経路が短縮されるが、圧密を受けた部分は緩衝材の密度が増大していると考えられ、この点について定量的に評価した上で、安全評価を検討する必要がある。

③ まとめ

平成 15 年度は、緩衝材の長期力学挙動評価モデルとして選定した 2 つのモデルを用いて室内要素試験のシミュレーション解析を実施した。その結果、全要素試験を精度良く解析可能な 1 セットのパラメータ設定が困難であることが分かった。そこで、室内要素試験より得られる複数のパラメータセットを用いた人工バリア挙動予測解析により緩衝材のオーバーパック支持性能と応力緩衝性能の各々の評価に必要なパラメータセットを把握した。また、長期圧密試験結果から二次圧密係数の設定を行いオーバーパックの沈下予測を行った結果、沈下量が約 100mm となり、他のパラメータセットに比較して大きくなった。今後、圧密沈下に伴う緩衝材の密度増大効果も含めて安全評価について検討すると共に、長期圧密試験の精度やパラメータの設定方法についても検討する必要がある。

その他今後の課題としては以下のようなものがある。

- ・ 海水系地下水環境下での長期力学評価モデルの適用性確認
- ・ 岩盤クリープと緩衝材の力学連成挙動の評価手法の構築

参考文献

- 平井 卓，棚井憲治，菊池広人，重野喜政，並河 努，高治一彦，大沼 敏(2004a)：緩衝材長期力学挙動評価モデルの検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-034.
- 平井 卓，棚井憲治，菊池広人，高治一彦，大沼 敏(2004b)：緩衝材のオーバーパック支持力性能に関する検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-031.
- 平井 卓，棚井憲治(2003)：緩衝材の弾塑性挙動評価モデルに関する検討，日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集，P9，p. 929.
- 平井 卓，棚井憲治，高治一彦，大沼 敏(2003)：圧縮ベントナイトを用いた緩衝材の弾塑性挙動評価モデルに関する研究，第 48 回地盤工学シンポジウム，地盤工学会，pp. 389-396.

1-2) 岩盤の力学的変形挙動に関する研究

① 課題と計画の概要

人工バリアの境界条件であるニアフィールド岩盤の長期力学挙動について、「第2次取りまとめ」では、コンプライアンス可変型モデル（大久保ほか, 1987）による解析的評価を行い、次のような知見を得た。

- ・硬岩系岩盤については、空洞掘削後も長期にわたって周囲の岩盤状態は安定である。
- ・軟岩系岩盤については、クリープ変形は年を経るごとに増加し、影響領域が広がる。

これまでに、評価の信頼性向上のために、主に軟岩を対象とし、岩盤の変形特性に関わる環境（熱の作用や含水状態の変化（宮野前ほか, 2002））や、拘束圧（支保や人工バリアからの反力）への依存性に関する基礎データの取得（大久保, 2003）など、ニアフィールドで想定される実現象に即した評価を実施してきた。今後、さらなる評価の信頼性向上のために、基礎的データを蓄積し、現象解明や時間依存性モデルの検証を継続する必要がある。また、既存の時間依存性モデルに対して、これまでに広く実施されてきた室内試験による検証では、長くとも数年程度のデータによる評価が限界であるため、数万年の長期安定性を担保しなければならない地層処分においては、長期への外挿手法を整備し、岩盤の長期変形挙動評価の体系化を図る必要がある。

② これまでの成果

平成 15 年度には、長期（数万年）への外挿と内圧（＝拘束圧）効果に着目した研究を実施した。具体的には、ナチュラルアナログ的アプローチによる岩盤の長期安定性評価指標の提案を行った。また、主に岩盤の変形特性の拘束圧依存性について、低拘束圧下における基礎データを取得し、実挙動を把握した。さらに、人工バリアー岩盤の力学的相互作用に関する解析を行った。

i) ナチュラルアナログ的アプローチ

地層処分の性能評価で取り扱うべき数千年から数万年を越える期間を対象とした場合、数年程度の室内試験による検証だけで、岩盤の長期挙動を明確に推定するには限界がある。よって、その不確実性を補うため、岩盤の挙動を長期へ外挿する手段を整備する必要がある。ここでは、長期へ

の外挿手段となりうるナチュラルアナログ的アプローチによる検証方法に着目した。その概念図を図 4.2.1-9 に示す。

ここで示した概念は、対象とする時間領域に対応して、数百年までを人工物の調査、数万年程度までを自然物の調査で担保しようという概念である。ナチュラルアナログ的アプローチのうち、とりわけ自然物の調査においては、過去から現在に至るまで観察される状況の遍歴に関する情報が乏しい場合が多く、室内試験に比べ受動的な解明方法となり不確実性が大きくなることは否めない。しかし、自然現象を活用すれば、室内試験に比べはるかに長期間にわたる現象を把握できる可能性がある。よって、ここではオーバーパックの耐用年数や地層処分の性能評価期間を睨み、自然物の調査を対象とし、比較的定量的な扱いがし易い地質現象に着目し、現場の経験より得た 1 つの考え方を提案した（大久保, 2004）。

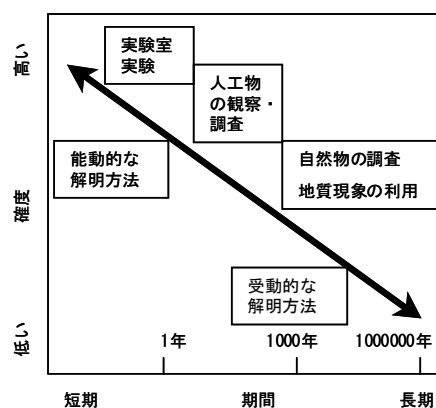


図 4.2.1-9 短期から長期への検証方法概念図

大久保ほか(1999)は、室内岩石試験結果に基づく考察より、十分長い時間が経過しても破壊に至らない安定領域は、岩盤内の応力状態が式(4.2.1-5)の範囲にあると仮定した。

$$0 < \sigma_3 < \sigma_1 < 2 \sim 6 \sigma_3 \quad (4.2.1-5)$$

ここで、 σ_3 は最小主応力、 σ_1 は最大主応力である。

次に、比較的長期間大きな変動がなかったと考えられる地点での地圧測定結果を用いて式(4.2.1-5)を検証した。これは、多くの場合、地圧は安定領域かその近傍にプロットされるか、安定領域でないならば、かなりの時間が経過後、安定領域に入り安定するという考えによるものである。検証に用いた地圧測定事例を表 4.2.1-2 に、地圧測定結果を図 4.2.1-10 に示す。

表 4.2.1-2 検討した地圧測定事例

文献	測定方法	場所
Kanagawa et al (1986)	応力解放法 (埋設式)	日本 23 箇所
Cai et al (1997)	応力解放法 (CSIRO)	中国金風鉱山 4 箇所
新ら (1996)	水圧破砕法	中国 1 箇所
Ljunggren and Amadei (1989)	同上	フィンランド
Haimson et al (1996)	同上	カナダ
Hayashi et al (1997)	同上	釜石鉱山

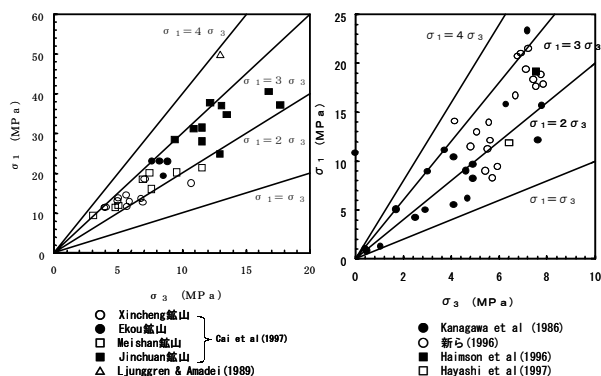


図 4.2.1-10 主応力線上に描いた地圧測定例

地圧測定結果は、1 点 (計測中の異常点) を除いて式 (4.2.1-6) の範囲にプロットできる。

$$0 < \sigma_3 < \sigma_1 < 4\sigma_3 \quad (4.2.1-6)$$

長い間、この応力状態で保たれてきたはずで、式 (4.2.1-6) の領域内にある岩盤は、安定領域に入っていることになり、式 (4.2.1-6) の範囲は、式 (4.2.1-5) の範囲と概ね一致しているといえる。つまり、一つの目安として、空洞掘削後の岩盤中の主応力比 (σ_1/σ_3) がおよそ 1~4 の範囲であればクリープ変形挙動は収束に向かい、長期 (数万年) にわたって安定する可能性が高いと推察される。

ここで、図 4.2.1-10 に示す地圧データが安定を保っている期間、つまり長期強度の検証期間について考察する。一般に地殻は少しずつひずみ続けており、そのひずみ速度は 10^{-14} s^{-1} 程度である (島崎ら, 1997) とされている。しかし、広い意味での地殻の持つ時間依存性や粘弾性は、岩盤・地殻の応力緩和やクリープ (大久保・福井, 1998) や、地殻内の弱部 (断層など) の間欠的な滑り (宇津, 1978) などにより応力変化を緩慢にすると考えられることから、実際の応力変化は解析上 (歪みの変化) $\times$ (ヤング率) で計算される値よりずっと小さくなる可能性が高い。よって、地質学的観点からすると、数万年程度の期間は比較的短期間であり、安定領域にある地圧の変化は些細な場合が多いと考えられる。

今回の知見は、限られた数のデータから導いた

結論であり、検証に用いた地圧の過去の変遷も不明であり、今後より詳細な検討が望まれる。

ii) 基礎データ取得

岩盤の長期変形挙動評価手法の信頼性を向上するためには、地層処分における環境条件を実現象に忠実に評価する必要がある。よって、ここでは、実現象のうち人工バリアや支保等からの反力による内圧効果に着目し、三軸応力下における岩盤の挙動を検証した。そして、掘削により坑道周辺に発生する剛性低下領域幅の経時変化や岩盤の長期にわたる変位量を解析的に推定するための基礎データを取得した。

岩盤に常温下、排水状態において、拘束圧下の三軸圧縮試験 (拘束圧 0MPa, 2MPa, 4MPa) を行った (大久保, 2004)。基礎データ取得にあたっては、幌延の地下施設での調査研究計画に資する目的で、幌延の HDB-3 孔の深度 420m 付近で採取された岩石を用いた。試験中の載荷速度を増減 (ひずみ速度を 3 s^{-1} と 30 s^{-1} で繰り返し) させ、そのときの応力の増減から拘束圧が岩石の粘弾性的性質に与える影響を把握した。試験より得られた応力-ひずみ曲線を図 4.2.1-11 に、三軸圧縮試験結果の平均値を表 4.2.1-3 に示す。ここで取得したデータは、軸差強度および時間依存性を示すコンプライアンス可変型モデル (大久保・福井, 1997) のパラメータ n, m で、 n が小さいほどクリープ変形が長期まで継続する。また、 m/n の比は延性脆性を示すパラメータでこの値が小さくなるほど延性的性質を示す。結果より、使用した岩石においては、拘束圧が作用すると、強度は増加し、クリープ変形は短期で収束し (n が大きくなる)、延性的になる (m/n が小) 傾向にあることがわかった。

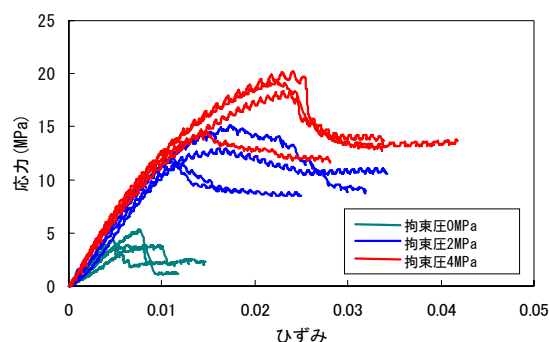


図 4.2.1-11 応力-ひずみ曲線

表 4.2.1-3 三軸圧縮試験結果(平均値)

拘束圧	軸差強度(MPa)	n	m	m/n
0MPa	4.4	39	28	0.69
2MPa	12.5	58	19	0.32
4MPa	17.6	71	24	0.34

これらを踏まえ、圧縮試験と同条件において多段階クリープ試験を行った(大久保, 2004)。クリープ応力は、各拘束圧下における圧縮試験より得られた強度(表 4.2.1-3)の約 20, 40, 60, 80, 100%で 1 時間ずつ载荷した。試験より得られたクリープひずみ-時間曲線を図 4.2.1-12 に、クリープひずみ速度-時間曲線を図 4.2.1-13 に示す。図 4.2.1-12 より、拘束圧が作用するほど、破壊に至るまで変形量が多い(延性的)のがわかる。図 4.2.1-13 にて破壊に至るまでのクリープひずみ速度の変化を見ると、一軸圧縮応力下では下に凸の曲線、拘束圧が作用すると直線もしくはやや上に凸の曲線を示し、拘束圧の作用によりクリープが早く収束する傾向を示した。ただし、この傾向は少ない試験数による結果であり、さらなるデータ取得による検証が必要である。

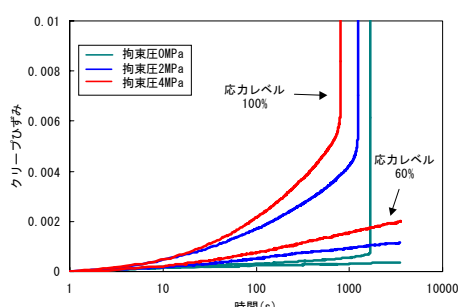


図 4.2.1-12 クリープひずみ-時間曲線

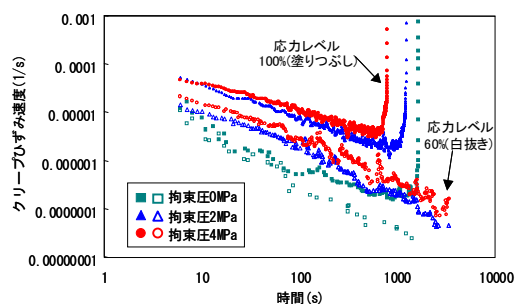


図 4.2.1-13 クリープひずみ速度-時間曲線

iii) 人工バリアー岩盤の相互作用解析

3.4.2-3) 深地層工学技術の基礎に関する研究にて設定された幌延の岩盤物性値より、表 4.2.1-4 および表 4.2.1-5 に示した地下深度 570m 付近の岩盤物性、初期応力を 1 例として用いて、処分孔(ピット)

ット) 堅置き方式の場合の原位置挙動をシミュレートした。この解析では、内圧効果として岩盤の変形に伴い発生する緩衝材からの反力が、岩盤の長期挙動に与える影響を解析的に示す(井上ほか, 2004)。また、ナチュラアナログ的アプローチで示した式 4.2.1-6 の概念をコンプライアンス可変型モデルにおいて検証した。

2 次元長期挙動解析に用いた解析モデル(平面ひずみ条件)を図 4.2.1-14(右)に示す。この解析モデルは、図 4.2.1-14(左)に示すように、ピットの坑道底盤から 2.5m の位置の水平断面で、図の Y 軸を坑道方向とした。また、ピット掘削時の安定性評価からピットに厚さ 10cm のコンクリート支保工を想定した。

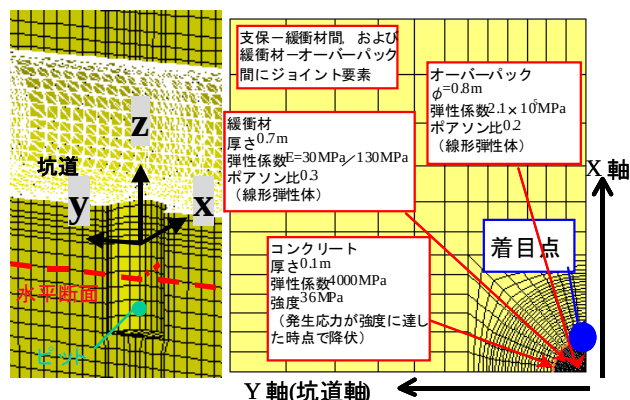


図 4.2.1-14 2 次元長期解析モデル(右)および水平断面位置(左)

表 4.2.1-4 岩盤物性

弾性係数 (GPa)	2.5
ポアソン比	0.2
粘着力 (MPa)	4
摩擦角 (°)	30
n	30
m	30

表 4.2.1-5 初期応力

鉛直応力 (MPa)	9
水平応力 (MPa) <坑道軸方向>	11
水平応力 (MPa) <坑道軸直交方向>	7

表 4.2.1-3 に示したコンプライアンス可変型モデル定数 n, m は、幌延の試験孔 HDB-3 の深度 420 m 付近で採取されたコアの試験結果で、本解析の対象岩盤におけるデータではないため本解析では用いていない。ここでは、地下深度 570m に対応する試験結果(大久保, 2003; 井上・南, 2003)に基づき、表 4.2.1-4 のように設定した n, m を用いている。緩衝材およびオーバーバックの仕様・物性は、「第 2 次取りまとめ」より図 4.2.1-14(右)のように設定し、緩衝材の弾性係数 E はパラメータとして $E=30\text{MPa}$, 130MPa と設定した。なお、「第 2 次

取りまとめ」と同様に、緩衝材の膨潤圧やオーバーパックの腐食膨張による圧力は考慮していない。

周辺岩盤には、坑道、およびピットの掘削の影響により、複雑な応力場が形成されることが推察されるため、事前に坑道掘削解析を3次元モデルにて行い、その解析結果をここでの2次元長期挙動解析の初期条件として設定した。次にピットを掘削し、応力解放率が65%になったところで支保を設置し、緩衝材、オーバーパックを設置した。以降、岩盤が時間依存性挙動を呈することとして解析を実施した。対象とする時間は、長期的な挙動を把握するため、オーバーパックの耐用年数を睨み、便宜的に1,000年間とした。

図4.2.1-14(右)に示すように、X軸上の岩盤と緩衝材の境界部を着目点とした。着目点におけるX軸方向（中心方向：正）変位の経時変化を図4.2.1-15に、剛性低下領域の経時変化を図4.2.1-16に示す。ここで変位は緩衝材設置後からの変位を示す。

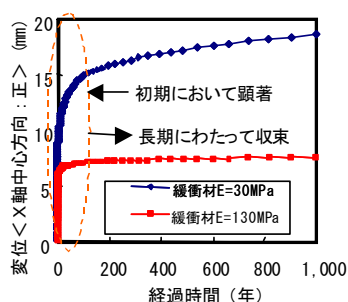


図 4.2.1-15 変位の経時変化

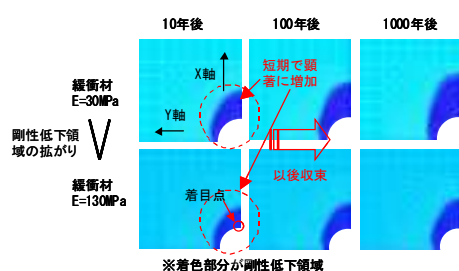


図 4.2.1-16 剛性低下領域の経時変化

次に、着目点を通るX軸方向における緩衝材の剛性が、 $E=30\text{MPa}$ のときの主応力比(σ_1/σ_3)の経時変化を図4.2.1-17に、同様に最大主応力比と剛性低下領域境界の経時変化を図4.2.1-18に示す。

図4.2.1-15～18より、ピット周辺岩盤の時間依存性挙動は、緩衝材の剛性（緩衝材からの内圧）に顕著に依存し、緩衝材設置後初期の段階におい

て顕著であり徐々に収束傾向を示すことがわかる。これは、ピット内部に緩衝材を設置しているため、ピット周辺岩盤が内側へ変形することによる、反作用として徐々に内圧が増加し、収束が早まったと推察される。今回の条件においては、変位や剛性低下領域の拡がり、岩盤中の最大主応力比3～4付近で急激に収束に向かっていているため、ナチュラアナログ的アプローチで示した式4.2.1-6が、概ねコンプライアンス可変型モデルで再現できていると考える。逆にナチュラアナログ的概念を適用すると、今回の条件では、1000年以降長期にわたって、急激に岩盤の力学挙動が顕著になることは考えにくいと言える。

今後、実現象を忠実に再現し、評価の信頼性を向上させるため、緩衝材の時間依存性挙動との相互作用評価を実施する必要がある。

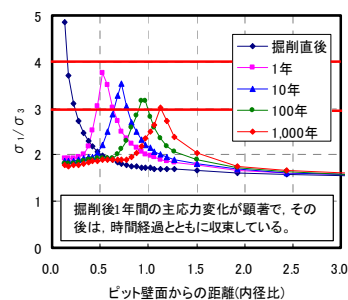


図 4.2.1-17 主応力比の経時変化

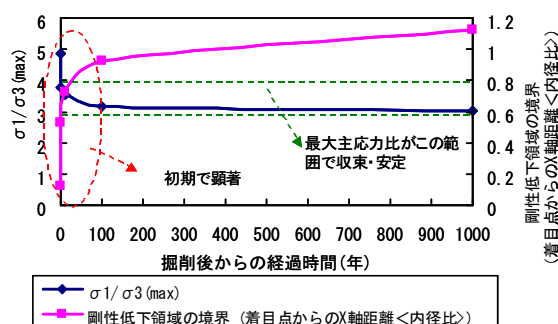


図 4.2.1-18 最大主応力比と剛性低下領域境界の経時変化

③ まとめ

ナチュラアナログ的アプローチによるニアフィールド岩盤の力学挙動外挿概念の一例を、地圧測定結果の検証を踏まえ提案した。平成15年度の検討で対象とした幌延の深地層の研究施設計画の研究所設置地区に分布する稚内層頁岩においては、室内試験結果の限られたデータによるものだが、

2MPa 以上の拘束圧下での岩盤の長期変形挙動の抑制効果が概ね確認できた。岩盤－緩衝材の相互作用解析結果より、ニアフィールド岩盤の時間依存性挙動は、内圧効果(緩衝材や支保工からの反力)に依存するとともに、緩衝材設置後初期の段階においては顕著であるが、時間の経過とともに徐々に収束傾向を示すことが確認できた。また、今回の相互作用解析結果から、提案した地圧現象の調査による長期への外挿概念は、コンプライアンス可変型モデルで概ね再現できることを確認した。

今後、より信頼性のある評価を行う目的で、緩衝材の時間依存性挙動との相互作用評価を含めた数値解析や室内試験、原位置試験といった基礎的研究を継続する。また、適度な拘束圧が岩盤に作用すれば、掘削影響領域の強度が回復する可能性があることが示唆されており(大久保ほか, 2001), このような観点も踏まえて長期への外挿方法の検討も継続して実施し、岩盤の長期変形挙動評価の高度化を図る予定である。

参考文献

- Cai, M., Qiao, L., Li, C. and Wang, S. (1997): Improvement on hollow inclusion technique and its application to in situ stress measurement in four Chinese metal mines, Proc. Int. Symp., Rock Stress (Kumamoto), p. 89-93.
- Haimson B.C., Lee M.Y., Feknous N. and Courval P. (1996): Stress Measurements at the Site of the SM3 Hydroelectric Scheme Near Sept Iles, Quebec, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 33, p. 487-497.
- Hayashi K., Sato A. and Ito T. (1997): In situ Stress Measurements by Hydraulic Fracturing for a Rock Mass with Many Planes of Weakness, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 34, p. 45-58,
- 井上博之, 吉野尚人, 宮野前俊一, 水谷和彦, 野田兼司 (2004): 軟岩の長期力学的変形挙動研究(II), サイクル機構技術資料(契約業務報告書; 前田建設工業株式会社), JNC TJ8400 2004-005.
- 井上博之, 南浩輔 (2003): 軟岩の長期力学的変形挙動研究, サイクル機構技術資料(契約業務報告書; 前田建設工業株式会社), JNC TJ8400 2002-061.
- Kanagawa T., Hibino S., Ishida T., Hayashi M. and Kitahara Y. (1986): In Situ Stress Measurements in the Japanese Islands, Over-coring Results from a Multi-element Gauge Used at 23 Sites, Int. J. Rock Mech. Mining Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 23, p. 29-39.
- Ljunggren C. and Amadei B. (1989): Estimation of Virgin Rock Stresses from Horizontal Hydrofractures, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 26, p. 69-78.
- 宮野前俊一, 小川豊和, 井上博之, 梨本 裕 (2002): 軟岩の長期力学的変形挙動に関する研究, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2002-015.
- 大久保誠介, 西松裕一, 緒方義弘 (1987): 非線形粘弾性モデルによる坑道変形のシミュレーション, 日本鉱業会誌, Vol. 103, pp. 293-296.
- 大久保誠介, 福井勝則 (1997): コンプライアンス可変型構成方程式の定数について, 資源と素材, Vol. 113, pp. 561-564.
- 大久保誠介, 福井勝則 (1998): 岩盤挙動の過去へのシミュレーション, 資源と素材, Vol. 114, No. 11, pp. 763-768.
- 大久保誠介, 福井勝則, 新 孝一 (1999): 岩盤の破壊基準と長期挙動に関する一考察, 資源と素材, Vol. 115, No. 4, pp. 213-218.
- 大久保誠介, 福井勝則, 杉田隆博 (2001): 緩み領域の強度回復に関する基礎研究, 資源と素材, Vol. 117, No. 8, pp. 631-638.
- 大久保誠介 (2003): 軟岩の長期挙動に関する研究, サイクル機構技術資料(研究委託報告書; 東京大学), JNC TJ8400 2002-062.
- 大久保誠介 (2004): ニアフィールド岩盤の長期安定性評価手法の検討, サイクル機構技術資料(研究委託報告書; 東京大学), JNC TJ8400 2003-081.
- 新孝一, 李方全, 大久保誠介 (1996): 水圧破砕による中国房山地点の岩盤応力測定 — 不連続面の少ない中国の花崗岩地域での水圧破砕実験(第2報) —, 資源と素材, Vol. 112, p. 921-928.
- 宇津徳治 (1978): 地震学(初版 3刷), 共立出版, pp. 229-235.

2) 緩衝材の流出・侵入挙動に関する研究

① 課題と計画の概要

緩衝材の流出・侵入挙動に関しては、岩盤亀裂中へのベントナイトの侵入および侵入したベントナイトゲルの浸食によって、緩衝材の密度の低下やベントナイトコロイドの生成が生じる。これらの挙動により、緩衝材自体の諸機能の低下や物質移行を促進することなどが考えられることから、これら2つの現象を定量的に把握し、緩衝材の諸機能へ及ぼす影響を評価する必要がある。

このため、「第2次取りまとめ」までに把握された降水系地下水条件における基本的な挙動を踏まえ、より信頼性のある流出・侵入挙動評価を行うために、実際の地質環境条件を考慮した侵入・浸食現象に関するデータの拡充や侵入現象モデルの構築を進めている。

② これまでの成果

i) 侵入現象試験

平成14年度までに、海水系地下水条件が緩衝材の侵入挙動に及ぼす影響に関して、時間と侵入距離に係る一部のデータの拡充を行い、降水系地下水と海水系地下水の挙動の比較を行った。

平成15年度は、平成14年度までの成果を踏まえ、海水系地下水の侵入挙動データの拡充を継続した。用いた供試体は、乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} ケイ砂混合体である。なお、亀裂幅は 1.5 mm で行った。図4.2.1-19に降水系地下水（蒸留水）と海水系地下水（人工海水）における経過時間 $\sqrt{t}$ と侵入距離 y の関係を比較して示す。

図から分かるように、海水系地下水では亀裂へ

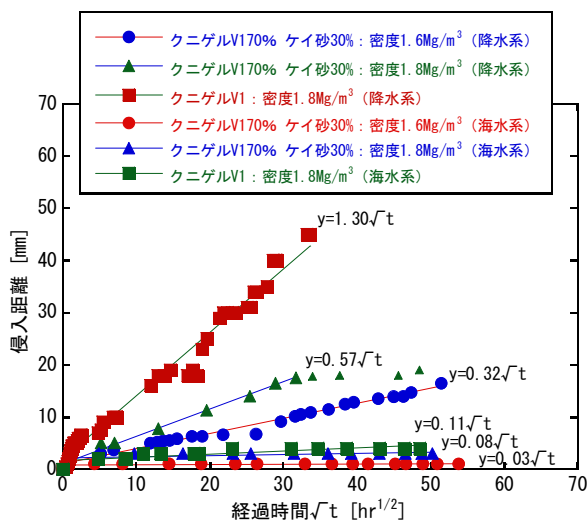


図 4.2.1-19 経過時間と侵入距離の関係

の侵入距離が降水系地下水よりも小さくなり、図4.2.1-20に示す有効粘土密度 ρ_b と比例係数 A の関係より、亀裂幅 d が 1.5 mm における海水系地下水の比例係数は、4.2.1-7式で表わされる。

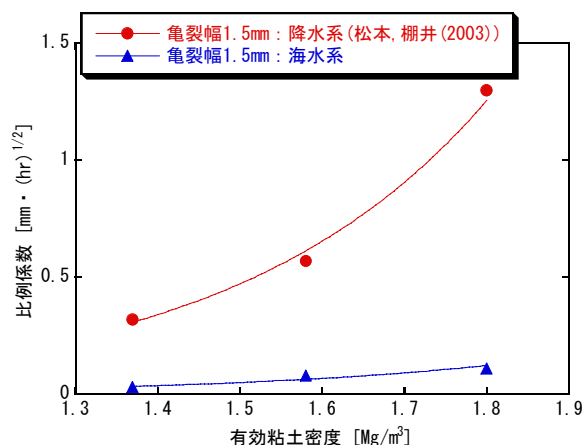


図 4.2.1-20 経過時間と侵入距離の関係

$$A = 5.4707 \times 10^{-4} \cdot \exp(3.0091 \rho_b) \quad (4.2.1-7)$$

一方、「第2次取りまとめ」において用いた侵入現象モデルの妥当性を検討するためには、これまでに取得してきた亀裂開口部への時間と侵入距離の関係以外に、侵入部におけるベントナイトゲルの密度分布に関するデータが必要となる。そこで、モデルの妥当性の検討、ならびに、構築に資するため、医療用 X 線 CT 装置（東芝製:Asteion VI）を適用した亀裂侵入ベントナイトの密度分布の把握を試みた。用いた供試体は、乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} ベントナイト単体、供試体寸法は、 $\phi 20 \times H20$, $\phi 30 \times H30$, $\phi 40 \times H40 \text{ mm}$ であり、亀裂開口幅は供試体高さの 3%とした。なお、X 線 CT の測定出力は、管電圧 135 kV , 管電流 150 mA , スキャン幅は、 1 mm で行った。図4.2.1-21に X 線 CT による測定断面画像の一例を示す。また、図4.2.1-22に侵入距離と乾燥密度分布の関係を示す。図の横軸 0 は、供試体の中心軸であり、図中の破線が供試体と単一平板模擬亀裂の境界を表わしている。図より、単一平板亀裂中における侵入ベントナイトの密度は、供試体から亀裂侵入部の先端位置にかけて非線形的な密度分布を示していることが分かる。また、分布図からは、供試体寸法が大きいケースほど、密度分布にバラツキがみられる。これらのバラツキの要因については、X 線の透過エネルギーの減弱や散乱線などによる測定精度への影響が表れているものと推察される（松本・棚井, 2004）。

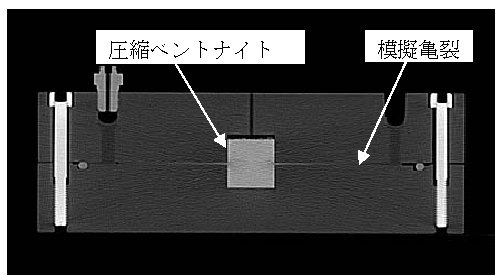


図 4.2.1-21 X線CTによる断面画像の一例

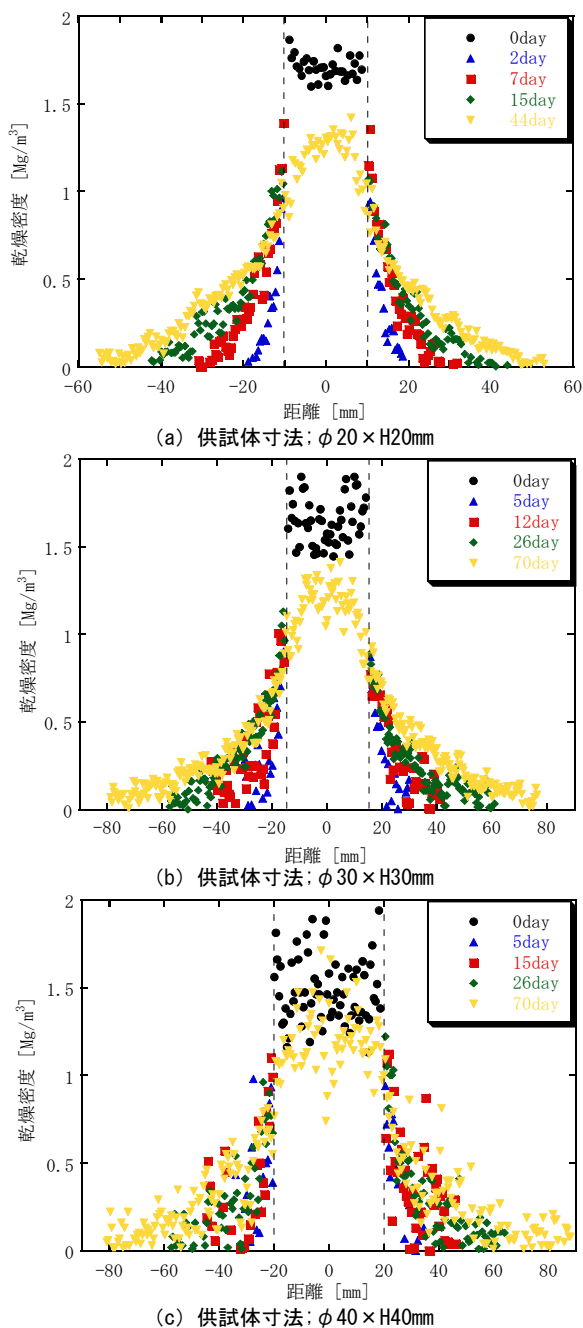


図 4.2.1-22 侵入距離と乾燥密度分布の関係

ii) 侵入現象のモデル化に関する検討

緩衝材の侵入現象のモデル化研究に関して、Kanno et al. (1999, 2001)は、中野ほか(1982)の固相拡散理論と粘性流体モデルを組み合わせ、拡散モデルを適用して緩衝材の侵入現象のモデル化を行っている。「第2次取りまとめ」においては、このモデルに基づいて処分場における緩衝材の侵入現象評価が行なわれた。それらは、モデル化に必要なとなる固相拡散係数の導出において、物性データである緩衝材の粘性係数が取得されていないために推定値を用いていることや、低密度領域の膨潤応力や透水係数を外挿による仮定をもとに評価している。したがって、これらの推定値の妥当性を確認することが必要であり、「第2次取りまとめ」における緩衝材侵入現象のモデル化では、次の3つの課題が挙げられた。

- ・ 推定値である緩衝材の粘性係数の妥当性
- ・ 外挿した低密度領域における緩衝材の膨潤圧と透水係数の妥当性
- ・ 侵入密度分布のデータの取得およびモデルとの比較

これらを踏まえ、平成14年度までに、ベントナイトゲルの粘性係数データの一部取得、ならびに、ベントナイトの低密度領域の膨潤圧や透水係数の物性データの検討を行い、モデルに必要な入力パラメータの固相拡散係数を見直すなどして、適用性の検討およびモデルの高度化を図った(菅野・岩田, 2003)。これまでの検討では、主として緩衝材の侵入距離の時間変化のみでモデルの適用性を評価しており、侵入に伴う密度分布との比較検討は実施できていない。

平成15年度においては、モデルの適用性を確認するために、侵入現象試験で得られた密度分布の測定結果と平成14年度に設定した固相拡散係数を用いて汎用有限要素解析コード ABAQUS Ver6.2 による解析結果との比較を行った。その結果、解析結果は、実験結果よりも侵入速度が小さくなることが分かった(図4.2.1-23)。したがって、侵入速度に影響する固相拡散係数を見直し、モデルの再検討を実施した。解析における亀裂中の固相拡散係数 D_s は、4.2.1-8式で表わされる。ここで、 σ は固相率、 d は亀裂幅、 μ_s は粘性係数、 Ps は膨潤圧である。

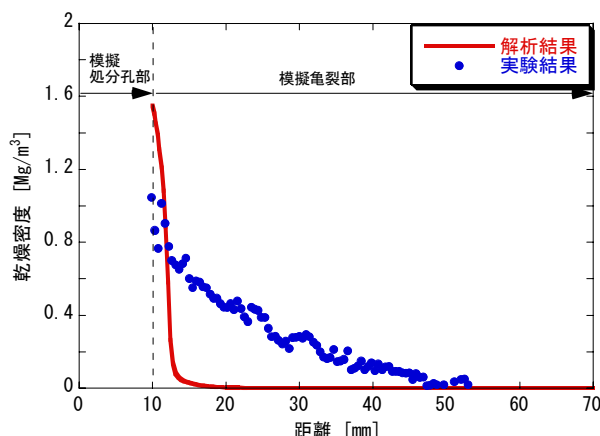


図 4. 2. 1-23 実験結果と解析結果の比較

$$D_s = \frac{\sigma d^2}{12\mu_s} \frac{dPs}{d\sigma} \quad (4.2.1-8)$$

解析的検討結果より、数値解析による侵入速度が実験結果よりも小さいことから、設定した固相拡散係数は、現状の設定値よりも大きいことが考えられる。したがって、実現象を表現するには、4.2.1-8 式における膨潤圧 Ps を大きくするか、もしくは、粘性係数 μ_s を小さくし、固相拡散係数を再設定する必要がある。膨潤圧に関しては、平成 14 年度の検討において、実測値によって検証されている膨潤評価式（小峯・緒方, 1999）に基づいて設定されているため、ここでは、固相拡散係数の変動要因が大きい粘性係数に関して、再検討を行った。平成 14 年度の粘性係数の検討においては、実測によるベントナイトゲルの粘性係数を冪乗則により外挿し（図 4.2.1-24）、侵入現象評価上の対象となる、せん断速度 $1.9 \times 10^{-5} [s^{-1}]$ における粘度の推定を行った。また、この粘度の推定値を含水比との関係（図 4.2.1-25）で整理し、これらの関係を指数型の関数であると仮定して近似を行い、

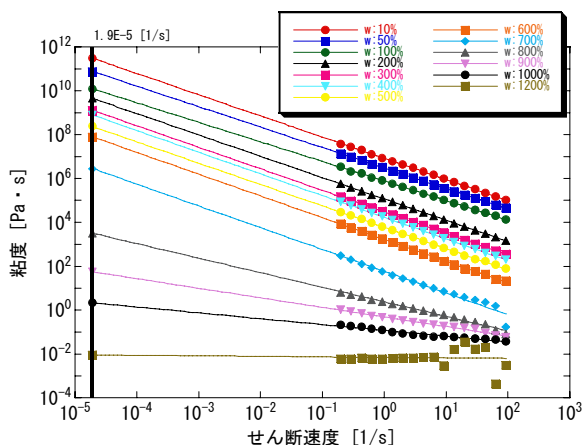


図 4. 2. 1-24 粘度測定結果の外挿

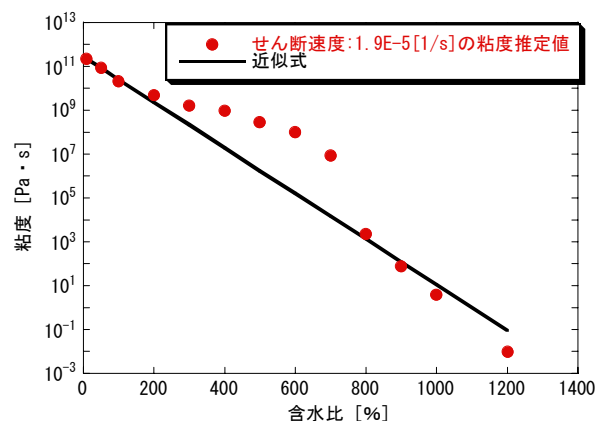


図 4. 2. 1-25 粘性係数の推定値

固相拡散係数を得るために必要である粘度評価式の導出を行った。これにより、4.2.1-9 式の粘度評価式が得られている。ここで、 w は含水比である。

$$\mu_s [Pas] = 2.86 \times 10^{11} \exp\left(-\frac{w[\%]}{41.7}\right) \quad (4.2.1-9)$$

実験結果を解析により表現するためには、4.2.1-9 式よりも小さい値を示す粘度評価式を設定する必要がある。図 4.2.1-24 より、せん断速度 $0.199 [s^{-1}]$ までは、粘度の実測データが得られていることから、これ以上の粘度であることが推察できる。したがって、実測から得られる粘度の近似式と、外挿によって設定した近似式との間で、粘度の評価式を再設定（図 4.2.1-26）して固相拡散係数を求め、これをパラメータとした感度解析を実施した。その結果、4.2.1-10 式に示す粘度評価式を用いて、固相拡散係数を設定した場合、比較的に実験結果と解析結果で整合性があることが分かった（図 4.2.1-27）。図 4.2.1-28 に解析結果の一例を示す（菅野・岩田, 2004）。

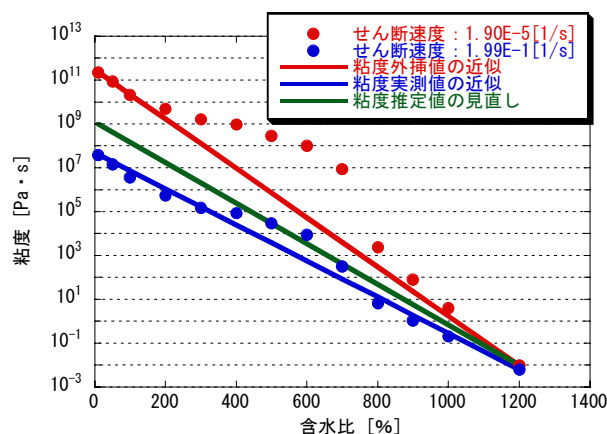


図 4. 2. 1-26 粘性係数の再設定

$$\mu_s [Pas] = 1 \times 10^9 \exp(-0.0213\omega) \quad (4.2.1-10)$$

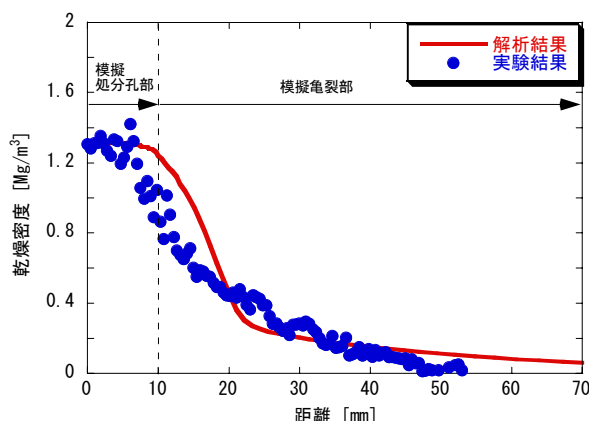


図 4.2.1-27 実験結果と解析結果の比較（固相拡散係数見直し後における評価）

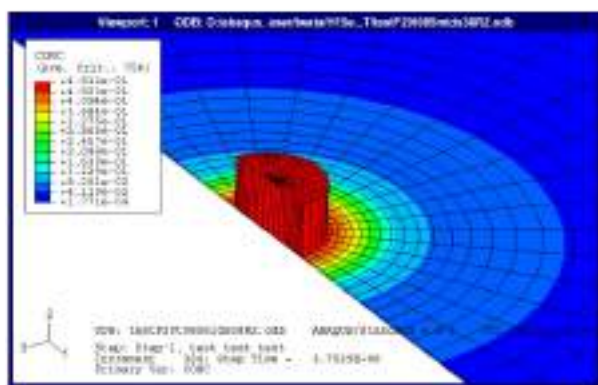


図 4.2.1-28 解析結果の一例

iii) 浸食現象試験

平成 14 年度までの浸食現象試験では、亀裂侵入ベントナイトへの水流による形状変形から浸食が発生する臨界流速値についての概略的な把握（菅野・松本, 1997）および、より詳細な現象把握としてベントナイトの浸食現象評価を再度検討し、浸食コロイドを定量的に把握するための試験を試みている。また、浸食現象に直接的に影響を与える水の流れは、亀裂侵入ベントナイトの先端部であるベントナイトゲル相と液相との境界部であることから、侵入ベントナイトの先端部近傍における流水場の評価に関して、三次元亀裂ネットワーク解析コード FracMan/MAFIC を用いた予測的評価なども合わせて実施した（松本・棚井, 2003）。

平成 15 年度においては、流速と浸食コロイド量との関係を把握するために、亀裂中の侵入ベントナイトに対して流水場を設け、排水液中に含まれるコロイドの濃度や特性（粒径分布、ゼータ電位）

についての定量的測定を行った。試験は、乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} に圧縮成型したベントナイトに水を供給し、膨潤によって単一平板模擬亀裂中にベントナイトを侵入させ、亀裂侵入状態を形成させた。亀裂中へのベントナイトの侵入が安定した状態より、測定を行った。なお、亀裂中の平均流速は $2 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ 、浸潤水には蒸留水を用いた。ベントナイトコロイドの濃度分析は、排水液の限外ろ過を行い、この限外ろ過前後の溶液について、ベントナイトの主要構成元素である Si, Al, Mg の濃度を ICP-AES（セイコーインスツルメンツ社製：SPS-1700VRS）または ICP-MS（ヒューレットパッカカード社製：HP4500）によって測定し、ろ別されたコロイド成分の定量を行った。図 4.2.1-29 に、経過時間と浸食コロイド濃度の関係を示す。

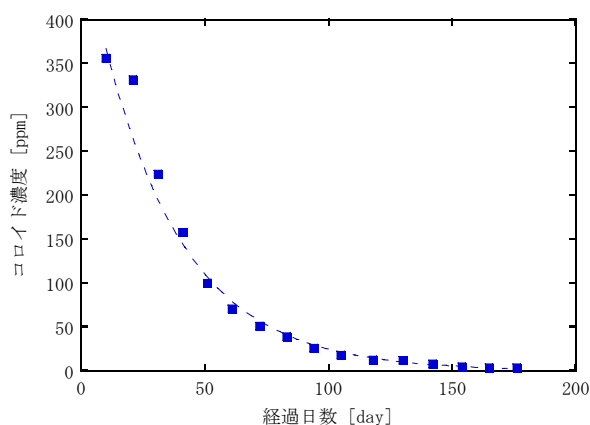


図 4.2.1-29 経過時間とコロイド濃度の関係

図より、時間の経過に伴い、コロイド濃度が減少する傾向にあることが分かる。亀裂侵入ベントナイトの形状は安定した状態であり、亀裂中における流速は一定である。これらの条件より、コロイド濃度の時間的変化の要因の一つとして、侵入ベントナイトのゲルフロント界面における状態的な変化が影響していることが考えられる。ゲルフロントの状態が流水初期と後期の段階では、状態変化が生じていること、すなわち、初期の段階では比較的剥離されやすい状態のコロイドが存在している、もしくは、分散したコロイドが存在していると仮定した場合、これらが移行した後は徐々に結合力のある（剥がれにくい）粒子相に近づいていることなどが推察される。コロイド濃度は、おおよそ 3ppm 程度で定常となったことから、緩衝材を起源とするベントナイトコロイドの生成濃度は、平均流速 $2 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ の条件において、3ppm

程度であることを概略的に把握した。一方、コロイドの粒径分布およびゼータ電位の測定は、ゼータサイザーナノ ZS（マルバーン社製）を用い、動的光散乱法およびレーザードップラー+M3-PALS 法による測定を行った。コロイドの粒子径は、時間の経過に伴い若干ではあるが増加する傾向がみられ、平均粒径は 300～400nm 程度であった。また、ゼータ電位は、おおよそ-35～-30mV であったことから、コロイドの凝集は起こっておらず、水溶液中において安定でいることが推察された。したがって、コロイド粒子径の増加は、ゲルフロント界面における粒子相の状態的な変化によるものであると考えられる。

これまでに、浸食現象の詳細なメカニズムに関しては把握できておらず、流速や水反応時間およびゲルフロントの状態などの種々の要因に影響されることを考慮し、なお詳細な検討を行う必要がある（松本・棚井, 2004）。

③ まとめ

緩衝材の流出挙動について、平成 14 年度以降、次のような知見が得られた。

- ・侵入現象；処分環境で想定される水質のうち、海水系地下水（人工海水）を用いて、時間と侵入距離の関係について、データの拡充を行った。その結果、海水系地下水では亀裂への侵入が降水系地下水よりも小さくなり、亀裂幅 1.5mm における単一平板模擬亀裂中への比例係数の実験式を得た。また、X 線 CT による亀裂侵入ベントナイトの密度分布の測定を試み、概略的に侵入ベントナイトの密度分布を把握した。
- ・侵入現象のモデル化；モデルの精度向上および妥当性を検討するために、侵入現象試験によって得られた密度分布の測定結果との比較を実施し、モデルの妥当性の確認を行った。その結果、平成 14 年度までに設定した固相拡散係数では、実験結果よりも侵入が遅い結果となった。そのため、感度解析による固相拡散係数の見直しを行い、再解析を実施した結果、実験結果と解析結果との整合性がある粘度評価式を得た。
- ・浸食現象；流速と緩衝材の浸食量の関係を定量的に評価するために、流速とベントナイトコロイドの浸食濃度の測定を実施した。その結果、平均流速 $2 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ の条件において、緩衝材を起源とするベントナイトコロイドの生成濃度は、おおよそ 3ppm 程度であることを概略的に把

握した。

今後は、より信頼性のある長期的な侵入挙動に関する評価を行うために、地質環境を考慮したデータを拡充し、侵入現象モデルの構築を進める。また、実験によって浸食が発生する臨界流速値をより詳細に把握するとともに、掃流力と浸食量の関係を定量的に評価し、人工バリアの長期安定性評価に反映させる予定である。当面の計画としては、侵入現象モデルの信頼性向上を念頭におき、X 線 CT を利用した非破壊検査によって、侵入に伴う緩衝材の密度分布などの把握を行う。また、浸食現象に関しても引続き試験を実施し、流速と浸食されるコロイド粒子の粒径や浸食量の関係を定量的に把握する。

参考文献

- 菅野 毅, 松本一浩 (1997)：ベントナイト緩衝材の流出特性の評価 (I), 動燃事業団技術資料, PNC TN8410 97-313.
- Kanno, T., K. Matsumoto & H. Sugino (1999)：Evaluation of extrusion and erosion of bentonite buffer. Proc. 7th Int. Conf. on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation (ICEM' 99). Nagoya.
- Kanno, T., Y. Iwata & H. Sugino (2001)：Modelling of bentonite swelling as solid particle diffusion, Clay Science for Engineering, Adachi & Fukui (eds), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 1579.
- 菅野 毅, 岩田裕美子 (2003)：緩衝材侵入現象モデルの検討 (I), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書；石川島播磨重工業株式会社), JNC TJ8400 2003-026.
- 菅野 毅, 岩田裕美子 (2004)：緩衝材侵入現象モデルの検討 (II), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書；石川島播磨重工業株式会社), JNC TJ8400 2003-083.
- 小峯秀雄, 緒方信英 (1999)：高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋戻し材の膨潤評価式の提案 — 砂とベントナイトの配合割合およびベントナイト中の陽イオンの種類・組成の影響 —, 電力中央研究所報告・研究報告, U99013.
- 松本一浩, 棚井憲治 (2003)：ベントナイト緩衝材の流出特性の評価 (II), サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-006.
- 松本一浩, 棚井憲治 (2004)：緩衝材の流出/侵入特性, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-035.
- 中野政詩, 雨宮悠, 藤井克己, 石田朋靖, 石井明俊 (1982)：不飽和粘土の浸潤と膨潤, 農土論集, No. 100, pp. 8-16.

3) 人工バリアの変質・劣化挙動に関する研究

① 課題と計画の概要

人工バリアの構成要素である緩衝材には、長期にわたり所期の性能が維持されることが期待されている。「第2次取りまとめ」における緩衝材の長期安定性評価では、緩衝材温度を100℃以下とすることおよびコンクリート材料として低アルカリ性セメントを利用し高アルカリ環境を回避することにより、緩衝材の顕著な変質を避けることができ、所期の緩衝材性能が長期にわたり維持されるとしている。その一方、オーバーパック腐食生成物との相互作用については長期の挙動を推定するデータが必ずしも十分ではないことや、アルカリ性環境での緩衝材変質に関するデータの充実が必要であることを指摘している。

このような状況を考慮し、鉄腐食生成物との相互作用に関しては、鉄共存系での水熱実験や天然現象の調査などから処分環境で発生する変質プロセスの同定を行うことが必要である。またアルカリ性環境での変質については、普通セメントの利用も考慮して、pH等の溶液条件をパラメータとしたスメクタイト溶解試験を実施し、溶解速度データを整備することも必要である。さらに、二次鉱物の生成や、緩衝材中での物質移行との連成を考慮した緩衝材変質・劣化モデルを構築し、長期的な評価を行う必要がある。これらの研究の実施により、セメントの選定（低アルカリ性セメントあるいは普通ポルトランドセメント）に資する情報を提供することを当面の目標とする。

また、緩衝材の変質・劣化に関する研究をより体系的に効率良く進めていくため、国内の粘土科学の専門家からなる評価委員会を平成14年度から設置し、緩衝材の長期安定性評価に関する課題の抽出・整理を行なった。平成15年度は、緩衝材の変質・劣化に関わるこれまでの技術的知見を集約し、緩衝材の長期安定性評価技術の現状について、評価委員会の専門家のレビューを受けながら取りまとめた。

② これまでの成果

i) 腐食生成物と緩衝材の相互作用

鋼製支保と5年半にわたり接触していたベントナイト鉱床の研究(Kamei et al., 1999)や炭素鋼試験片と圧縮ベントナイトを低酸素の海水条件で4年間接触させていた室内試験の評価(Shibata

et al., 2002)から、これらの環境条件では、交換性陽イオンの Fe^{2+} との交換(鉄型化)以外の変質は認められず、鉄と接触していた緩衝材部分も含水による亀裂修復能力を有していたことを例示してきた。一方、ベントナイトと鉄あるいは磁鉄鉱を接触させた変質加熱試験では、鉄が十分に供給される条件では、250℃程度で緑泥石/スメクタイト混合層の生成が確認され、また天然の堆積岩中に認められる緑泥石/スメクタイト混合層の化学組成の変化等から、緑泥石化はスメクタイトの溶解再結晶により起る可能性が高いことが示された(大場, 2003)。

平成15年度は、鉄とベントナイトの反応を加速する目的で鉄粉と粉末ベントナイトを蒸留水と混合し、約6年間にわたり、常温下で低酸素条件に静置しておいた試料の分析を行なった。その結果、試験後の試料にはスメクタイトの鉄型化が認められたのみであり、スメクタイトの構造の変化は観察されず、Kamei et al. (1999)によるベントナイト鉱床の事例における同様の観察を支持する結果が得られた(笹本ほか, 2004)。天然事例および室内試験の結果に基づけば、処分環境下で鉄腐食生成物との相互作用によりスメクタイトの鉄型化が生ずる可能性は高いと考えられる。そこで、鉄型化したスメクタイトが長期的にどのような変質挙動を示すかを明らかにするため、高温での加速試験として、鉄型化スメクタイトを出発物質とする水熱変質試験を開始した。

ii) 高アルカリ条件でのスメクタイトの溶解挙動

地下水が処分環境でセメントと接触すると、そのpHが12を超えるような高アルカリ性溶液となりえるので、緩衝材(ベントナイト)の主成分鉱物であるスメクタイトは熱力学的に不安定となつて、溶解、変質することが考えられる。一方、処分システムの性能への影響を検討する上で、スメクタイトの反応速度データが乏しく、スメクタイトの溶解についての速度論的データの整備が課題となっていた。このため、精製スメクタイトを試料としたバッチ式溶解速度試験を実施した(Ohmoto et al., 2004)。以下に試験の条件と結果を列記する。

- ・ 試験条件は温度=25-75℃, pH=7-13.5, 溶液中の初期 SiO_2 濃度=0-500ppm。試料はクニピアF®をさらに精製したNa型スメクタイト。
- ・ 閉鎖系におけるスメクタイトの溶解プロセ

スは初期、遷移期、長期安定期の3段階に区分でき、それぞれの時期における溶解速度が求められた。これらを順に R_{init} 、 R_{trans} 、 R_{LT} と表せば、 $pH=12$ 、 $T=25^{\circ}C$ のとき、 $\log R_{init.}=-9$ 、 $\log R_{trans.}=-10$ 、 $\log R_{LT}=-12$ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) の値となった。また、温度が 25 から $75^{\circ}C$ に上昇するとこれらの溶解速度は 1-2 桁上昇した。さらに、いずれの速度も pH の増大につれて増大する傾向を示した。また、溶液中の初期 SiO_2 濃度の増大につれて、 $\log R_{init.}$ は増大し、逆に $\log R_{trans.}$ と $\log R_{LT}$ は減少した。

- ・ 閉鎖系でのスメクタイトの溶解では、スメクタイトから溶出した Si, Al, その他の元素は部分的に非晶質物質(ゲル)として沈殿する。その組成は当初 Al に富むが、やがてスメクタイトに類似したものとなった。スメクタイトの見かけの溶解速度はこのゲルの生成速度とスメクタイト結晶の溶解速度に支配されていることが明らかとなった。

iii) 緩衝材の長期安定性評価技術の現状

緩衝材の長期安定性評価にあたっては、緩衝材の変質・劣化に関して「第2次取りまとめ」以降に報告された緩衝材の変質に関する最新の研究事例等も踏まえ、処分環境下で発生する可能性のある変質シナリオを列挙し、緩衝材の長期安定性評価フローを作成した。評価にあたっては、評価フローを基に、性能評価上の重要性を考慮し、温度による影響、人工バリア材であるオーバーパックとの相互作用による影響および軟岩系岩盤の支保工材料であるセメントとの相互作用による影響の3つに着目した。また、緩衝材の長期安定性について、緩衝材が曝される温度条件やニアフィールド構成要素であるセメント・オーバーパックとの相互作用について、地質環境である岩盤の種類と組み合わせ、以下の4ケースを想定し、評価を試みた(柴田ほか, 2004)。温度条件としては、「第2次取りまとめ」と同様に $100^{\circ}C$ を越えない条件を基本とするが、諸外国の性能評価報告書では、処分後数十年程度は緩衝材内部の最高温度が $100^{\circ}C$ を超える条件で評価が行なわれている例もあり、本検討でも $100^{\circ}C$ 以上の場合も想定した。地下水条件は、降水系および海水系地下水を想定した。評価結果の概要を以下に記す。

- a) ケース1: 硬岩系岩盤・緩衝材内部最高温度 $100^{\circ}C$ 以下

本ケースでは、緩衝材内部温度が $100^{\circ}C$ を超えず、支保工材料としてセメントも用いられないことから、緩衝材の長期安定性に影響を与えるような顕著な変質・劣化は起らないと考えられた。ただし、炭素鋼の腐食に伴い鉄に富む環境がもたらされた場合、スメクタイトがバーチェリンの様な非膨潤性の粘土鉱物に変る(Lantenois et al., 2002) 可能性もあり、今後、この様な非膨潤性粘土に変化する環境条件(鉄濃度や温度条件)を明らかにしていくことも必要である。

- b) ケース2: 硬岩系岩盤・緩衝材内部最高温度 $100^{\circ}C$ 以上

本ケースでは、ケース1における評価に加え、イライト化(規則型混合層への変換)やシリカセメンテーションによる緩衝材の長期安定性への影響も検討した。これまでに報告されているスメクタイトーイライト変換に伴うイライト化率の計算結果などに基づけば、本ケースでのイライト化(規則型混合層)の発生可能性は低いと推定された。一方、シリカセメンテーションについては、Stripa 鉱山における原位置での緩衝材加熱試験での評価例(Pusch et al., 1992)などに基づくと、発生可能性は高いと考えられ、発生した場合、緩衝材の硬化や膨潤性の低下が生じ、緩衝材の長期安定性に影響を及ぼすことが予想される。

- c) ケース3: 軟岩系岩盤・緩衝材内部最高温度 $100^{\circ}C$ 以下

本ケースでは、ケース1における評価に加え、支保工として用いられるセメント(普通セメントおよび低アルカリ性セメント)から浸出する高 pH 溶液による緩衝材の長期安定性への影響も検討した。その結果、鉱物による水酸化物イオンの消費に関するマスバランス計算に基づけば、「第2次取りまとめ」で想定された処分坑道・人工バリア設計仕様では、緩衝材中のスメクタイトの顕著な溶解・消失は生じず、緩衝材性能への顕著な影響は回避できると考えられた。また高 pH 溶液による変質の進展を推測する手法が整備されてきており、今後、解析に用いるデータ(スメクタイトの溶解速度等)の見直しや解析手法の改良を行い、より現実的な解析評価を行なうことも必要である。

- d) ケース4: 軟岩系岩盤・緩衝材内部最高温度 $100^{\circ}C$ 以上

本ケースでは、支保工として低アルカリ性セメントの利用を想定した。本ケースでは、ケース1における評価に加え、イライト化に関しては、セ

メント溶液からの K^+ の供給量によっては、定性的ではあるがケース 2 に比べ、イライト化が生ずる可能性が増すと推定された。今後、イライト変換に関する反応速度定数を基に評価する必要がある。またシリカセメンテーションについても、ケース 2 に比べ、発生の可能性や発生した場合の緩衝材性能への影響（膨潤性の低下など）も増すと予想され、緩衝材の長期安定性に影響を及ぼすことが予想される。

以上の様な評価を通じ、想定される処分環境下で緩衝材の変質・劣化が生じた場合の長期的影響に関する情報が必ずしも十分に整備されていない現象を抽出した。また、緩衝材内部最高温度が 100°C を超える場合や普通セメントが用いられる場合については、緩衝材性能への長期的影響に関する知見が乏しく、定量的な予測は困難であるため、現状では、「第 2 次取りまとめ」と同様に処分システムおよび緩衝材の設計により、イライト化やスメクタイトの顕著な溶解の発生を回避することが望ましいと考えられた。

③ まとめ

鉄腐食生成物との相互作用に関しては、天然事例および室内試験の結果により、処分環境下でスメクタイトの鉄型化の発生可能性が高いことが示めされた。また、鉄型化したスメクタイトが長期的にどの様な変質挙動を示すかを明らかにするため、高温での加速試験を開始した。

高アルカリ条件でのスメクタイトの溶解挙動に関しては、精製スメクタイトを用いたバッチ式試験により、スメクタイトの溶解プロセスや溶解速度が明らかになった。

緩衝材の長期安定性に関しては、「第 2 次取りまとめ」以降に報じられた緩衝材の変質に関する最新の研究事例も踏まえ、処分環境下で発生する可能性のある変質シナリオを列挙し、長期安定性評価フローを作成した。このフローに従い、現状の技術的知見を基に緩衝材の長期安定性について概略的な評価例を示した。今後は、緩衝材性能への長期的影響に関する情報整備が遅れている現象（鉄腐食生成物による変質、高 pH 溶液による変質、シリカセメンテーション等）について、情報整備を進め、より定量的な緩衝材の長期安定性評価に反映させていく必要がある。

参考文献

- Kamei, G., Oda, C., Mitsui, S., Shibata, M. and Shinozaki, T. (1999) : Fe (II) -Na Ion Exchange at Interlayers of Smectite: Adsorption-Desorption Experiments and a Natural Analogue, *Engineering Geology*, 54, pp.15-20.
- Lantenais, S., Plancon, A., Lanson, B., Jullien, M., Muller, F., and Bauer, A. (2002) : Iron-Clay interactions in Aqueous Solutions, Abstracts for International meeting on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, pp.149-150.
- 大場孝信 (2003) : スメクタイトの緑泥石化に関する研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 上越教育大学), JNC TJ8400 2003-004.
- Ohmoto, H., Spangler, K. R., Watanabe, Y., and Kamei, G. (2004) : Smectite dissolution kinetics in high-alkaline conditions, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 807, pp.723-728.
- Pusch, R., Karnland, O., Lajudie, A., Lechelle, J. and Bouchet, A. (1992) : Hydrothermal Field Test with French Candidate Clay Embedding Steel Heater in the Stripa Maine, SKB Technica Report, 93-02.
- 笹本 広, 陶山忠宏, 柴田雅博 (2004) : 鉄粉-ベントナイト反応に関わる室内試験, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-047.
- Shibata, M., Kubota, M., Nemoto, K., Kim, S.-Y., Fujishima, A. and Sato, T. (2002) : Analysis of Compacted Bentonite Contacted with Carbon Steel under Anaerobic Conditions, International Meeting on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Abstracts, pp.151-152.
- 柴田雅博, 笹本 広, 神徳 敬, 油井三和 (2004) : 緩衝材の長期安定性評価技術の現状, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2004-010.

4.2.2 熱-水-応力-化学連成挙動に関する研究

① 課題と計画の概要

高レベル放射性廃棄物地層処分における人工バリア定置後のニアフィールドの挙動は、人工バリアを中心とした化学的変遷が水理場や力学的安定性に影響を与えること等から、熱的、水理学的、力学的、化学的なプロセスが相互に影響を及ぼし合う連成挙動として捉えることが肝要である（図4.2.2-1）。「第2次取りまとめ」では、熱-水-応力連成モデル（解析コードを含む。以下同様）による再冠水時の人工バリア挙動評価として、緩衝材の再冠水時間を推定した。「第2次取りまとめ」以降、オーバーパックの腐食や核種移行の重要な環境条件となる緩衝材および間隙水化学の時間的・空間的変遷の把握や、化学的変遷を考慮した人工バリア中心のニアフィールド長期健全性評価に向けて、より現実的なニアフィールド連成挙動の時間的・空間的変遷の理解、および予測を目的とする、熱-水-応力-化学連成モデルの開発を進めている。

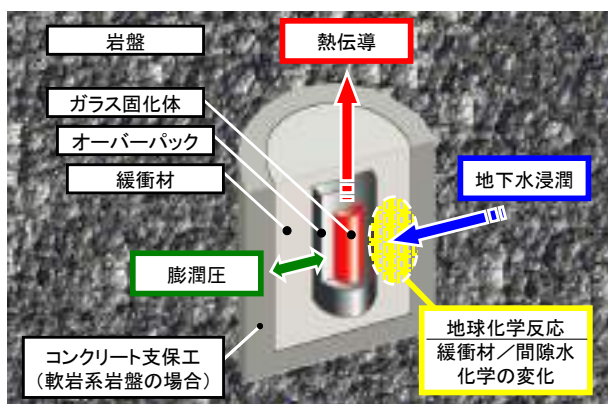


図4.2.2-1 ニアフィールドの熱-水-応力-化学連成挙動の模式図

平成14年度は、「第2次取りまとめ」の熱-水-応力連成モデルに平衡論に基づく地球化学モデルを導入し、これに伴う複雑な連成解析に対応可能な連成解析システムの構築を行った。また、コードの検証解析を実施した。

平成15年度は、国際共同研究を通じた連成モデルの検証、実験結果との比較による確認に関する取り組みを継続すると共に、人工バリア定置後に想定されるニアフィールドの連成挙動を定量的に把握することを目的に、エントリーの連成試験設

備 COUPLE にて連成挙動に関する室内試験を実施した。また、連成モデルの開発については、既報の連成モデルを用いたニアフィールド連成挙動の事例解析、および連成モデルの高度化に関する取り組みを実施した。

② 成果の概要

i) 国際共同研究を通じた連成モデルの検証・確認に関する取り組み

本研究では、国際共同研究 DECOVALEX（1999年～2003年:フェーズⅢ, 2004年～:DECOVALEX-THMC）、Prototype Repository Project における原位置人工バリア試験の予測・再現解析や他国の連成モデルとのベンチマークテスト解析を通じて、連成モデルの検証・確認を進めている（図4.2.2-2）。

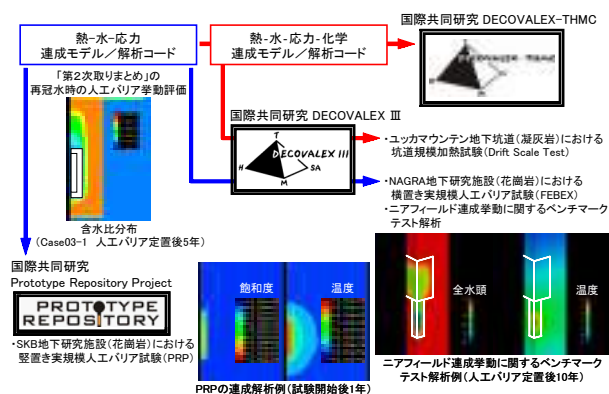


図4.2.2-2 連成モデルの検証・確認に関する取り組み

現在開発を進めている連成モデルについては、DECOVALEX IIIで唯一化学現象を含めた連成挙動をテーマとしているユッカマウンテン地下坑道での坑道規模加熱試験（Drift Scale Test）の連成解析を実施し、各国の結果と比較・検証し、連成挙動に関する情報の共有を行った。

「第2次取りまとめ」の再冠水時の人工バリア挙動評価に用いた熱-水-応力連成モデルについては、原位置人工バリア試験への適用性確認を通じた確認を目的として、予測再現解析に取り組んだ。解析の対象とした試験は、Prototype Repository ProjectにてSKB地下研究施設での縦置き実規模人工バリア試験（PRP）、DECOVALEX IIIにてNAGRA地下研究施設での横置き実規模人工バリア試験（FEBEX）であった。

また、DECOVALEX IIIでの各国の連成モデルの比較・検証として、仮想地質環境（人工バリアを含む。以下同様）におけるニアフィールド連成挙動に関するベンチマークテストにも取り組んだ。本タスク（Task3 BMT1）では、3つのサブタスクが設定された（Nguyen et al., 2003）。サブタスク A（BMT1A）では、原位置試験結果を対象とした連成解析コードの検証・確認として、釜石粘土充填・熱負荷試験の結果が採用された（Chijimatsu et al., 2003）。この後に、仮想地質環境におけるニアフィールド連成解析タスクとして、サブタスク B（BMT1B）では均質岩盤におけるニアフィールド連成挙動に関する検討（Millard et al., 2003）、サブタスク C（BMT1C）では亀裂が存在する岩盤におけるニアフィールド連成挙動に関する検討が実施された（Rutqvist et al., 2003）。本タスク（Task3 BMT1）に参加した機関および各機関が使用した解析コードは、表 4.2.2-1 に示す通りである。

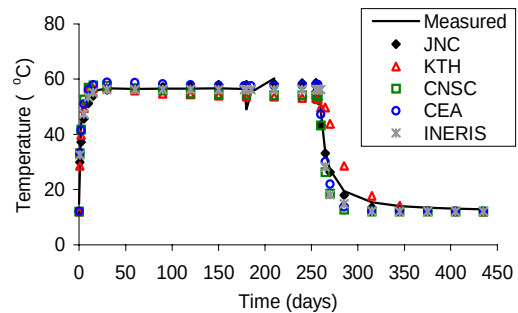
表 4.2.2-1 国際共同研究 DECOVALEX III の Task3 BMT1 に参加した機関および各機関が使用した解析コード

参加機関	解析コード
JNC（日本）	THAMES
KTH/SKI（スウェーデン）	ROCMAS
CNSC（カナダ）	FRACON
CEA/IRSN（フランス）	Castem 2000
INERIS/ANDRA（フランス）	FLAC
ISEB/ZAG（ドイツ）	RF/RM

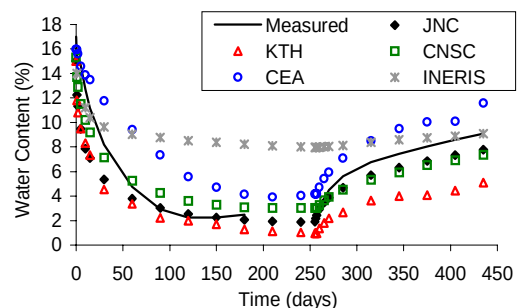
JNC: サイクル機構, KTH: Royal Institute of Technology, SKI: Swedish Nuclear Power Inspectorate, CNSC: Canadian Nuclear Safety Commission, CEA: French Atomic Energy Commission, IRSN: Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety, INERIS: National Institute for Environmental Protection and Industrial Risks Management, ANDRA: National Radioactive Waste Management Agency, ISEB: University of Hannover, ZAG: University of Tuebingen

サブタスク A（BMT1A）で実施された釜石粘土充填・熱負荷試験の連成解析結果の比較を図 4.2.2-3 に示す。比較は温度、含水比、応力、ひずみについて実施されている。温度に関しては、各チームとも実測値と良い一致が得られている。含水比に関しては、INERIS/ANDRA チームが実測値と大きな相違をなしている。これは、オーバーパックの取り扱いや温度勾配下における水分移動の物性値等の設定が不適切であったためと考えられる。応力およびひずみに関しては、各チームとも実測値との隔たりが認められるものの、定性的には測定値

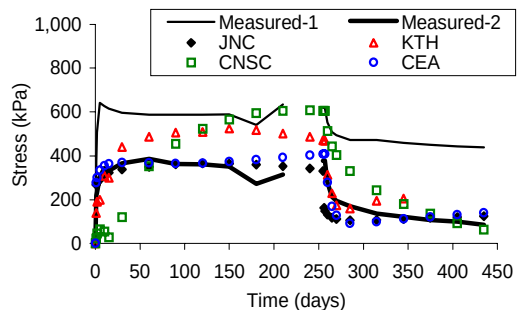
を再現する結果が得られている。本サブタスクにて、各機関の連成モデルが釜石粘土充填・熱負荷試験で観測された連成挙動を概ね表現可能であることが確認された。



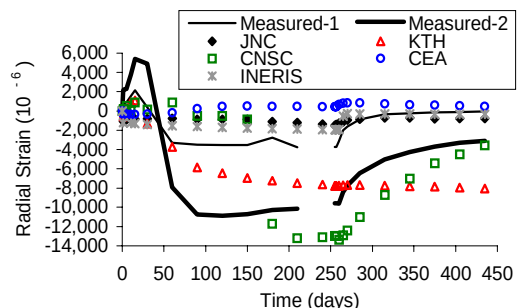
(a) 温度の経時変化（緩衝材中央）



(b) 含水比の経時変化（緩衝材内側）



(c) 応力の経時変化（緩衝材内側）



(d) ひずみの経時変化（緩衝材中央）

図 4.2.2-3 国際共同研究 DECOVALEX III の Task3 BMT1A で実施された釜石粘土充填・熱負荷試験の連成解析結果の比較

サブタスク B (BMT1B) の仮想地質環境 (均質岩盤) を想定した連成解析タスクでは、連成挙動を考慮した場合と考慮しない場合で、ニアフィールドにおいて重要と考えられる指標 (温度、再冠水挙動、緩衝材の膨潤応力、岩盤の安定性、岩盤の固有透過度) の解析結果にどの程度の差が現れるかという観点で検討が実施された。本検討結果を、表 4.2.2-2 にまとめる。表 4.2.2-2 で示されている “high”, “medium”, “low” は、連成の度合いを示すものであり、high に向かうほど連成解析の必要性が高いことを示す。ただし、岩盤の透水性に応じて連成解析の必要性の度合いが異なることも指摘された (本連成解析タスク (BMT1B) で設定された地質環境は低透水性である)。

表 4.2.2-2 国際共同研究 DECOVALEX III の Task3
BMT1B の検討結果の総括 (連成解析結果と非連成解析結果の比較)

ニアフィールド性能を代表する指標	THM	TH	TM	HM
温度	low	low	low	-
再冠水挙動	medium/ high	medium	-	low
緩衝材の膨潤応力	high	-	low	high
岩盤の安定性	high	-	low	high
岩盤の固有透過度	medium/ high	medium	medium	low

THM: 熱-水-応力連成解析結果と非連成解析 (熱解析, 水理解析, 応力解析) 結果の比較

TH: 熱-水連成解析結果と非連成解析 (熱解析, 水理解析) 結果の比較

TM: 熱-応力連成解析結果と非連成解析 (熱解析, 応力解析) 結果の比較

HM: 水-応力連成解析結果と非連成解析 (水理解析, 応力解析) 結果の比較

サブタスク C (BMT1C) の仮想地質環境 (亀裂が存在する岩盤) における連成解析タスクでも、サブタスク B (BMT1B) と同様の検討結果が得られている。ただし、水圧が作用する亀裂が処分孔と交差している場合、緩衝材の再冠水を促進する結果となった。

また、本タスク (Task3 BMT1) に携わった連成解析の専門家は、人工バリア定置後に支配的となる連成挙動のモデル化が、原位置モニタリングデータの理解・評価に非常に重要な役割を果たすことを強調した。

ii) 連成試験設備 COUPLE における熱-水-応力-化学連成挙動に関する室内試験

人工バリア定置後に想定される温度勾配条件下等におけるニアフィールドの連成挙動を定量的に

把握することを目的に、エントリーの連成試験設備 COUPLE にて熱-水-応力-化学連成挙動に関する室内試験を実施した (鈴木ほか, 2004)。

本試験に供した試験体は、モルタルで製作した模擬岩体の中心に、模擬処分孔を削孔し、廃棄体を模擬した中心ヒーターおよびベントナイトブロックで製作した緩衝材を設置したものであり (図 4.2.2-4), 緩衝材にはモルタルと反応した高い pH を示す溶液が浸潤する。

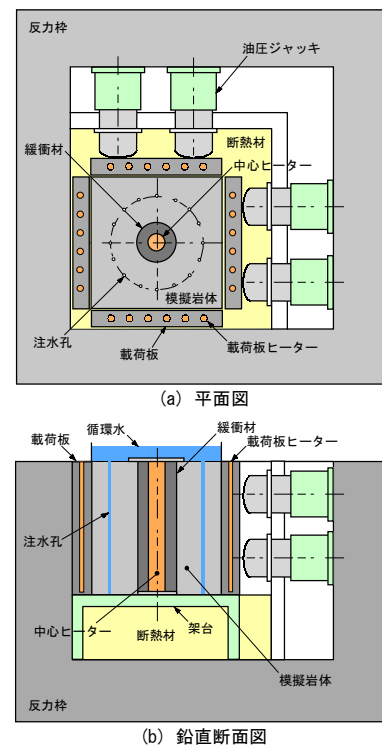


図 4.2.2-4 連成試験設備 COUPLE の模式図

試験は、180 日間、中心ヒーターの温度を 100℃、模擬岩体の外側面の温度を 70℃に設定し、緩衝材中に温度勾配を形成させた。試験開始後 90 日の試験体中の温度分布を図 4.2.2-5 に示す。本図には、熱-水-応力連成解析コード THAMES を用いた熱-水連成解析による温度の解析結果を併せて示す。本解析結果は、緩衝材および模擬岩体中の温度の計測値を良く再現するものであった。

モルタル反応溶液である循環水の pH の経時変化を図 4.2.2-6 に示す。計測には、Ion Sensitive Field Effect Transistor (以下、ISFET) 電極 pH 計を用いた。循環水の pH は、試験期間中、10.5 から 10 に低下した。これは、大気中の CO₂ の影響による連続的な方解石の沈殿でアルカリが消費されたもので、実際に循環水中には方解石の析出が確

認されている。

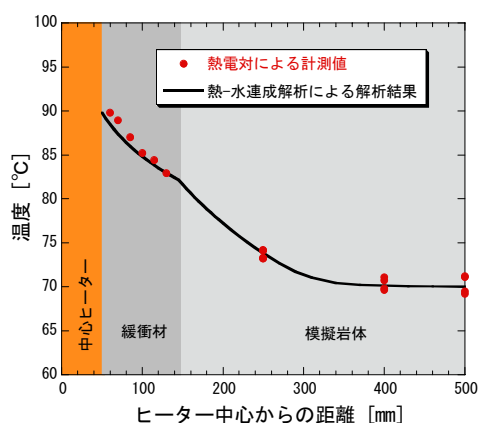


図 4.2.2-5 連成試験における試験体中の温度分布 (試験開始後 90 日)

図 4.2.2-6 には、地球化学解析コード PHREEQC を用いたモルタル-水反応の解析による pH の解析結果を併せて示している。解析では、モルタルに含まれるセメント水和物量を算出し、そのセメント水和物がイオン交換水と反応するものとした。地球化学反応は平衡論を仮定し、二次鉱物として方解石を仮定した。また、大気下の反応であることから、CO₂ ガスの影響を考慮した。モルタル反応溶液である循環水の pH の解析結果は 10.4 であり、計測値と良い一致を示した。

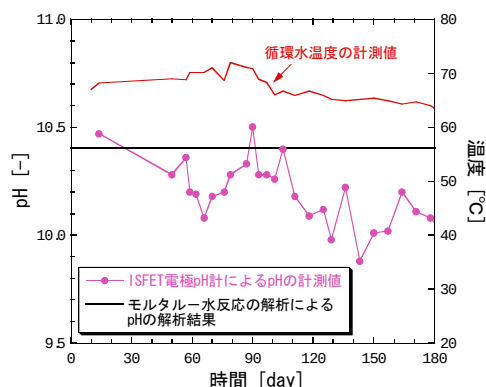


図 4.2.2-6 連成試験におけるモルタル反応溶液の pH の経時変化

緩衝材の含水比および pH の経時変化を図 4.2.2-7 に示す。本図には、前述の熱-水連成解析による含水比の解析結果を併せて示す。サイクロメータは、緩衝材が飽和に至ったと推察される 60 日程度で計測不能となったが、飽和に至るまでの浸潤過程で、含水比の計測値と解析結果は概ね一

致している。ISFET 電極 pH 計により計測した緩衝材間隙水の pH は、緩衝材が飽和した 60 日以降、僅かながら上昇傾向にあり、また、模擬岩体（モルタル）に近いほうが若干大きくなっている。なお、緩衝材中に埋設したガラス電極製の pH 計は、約 30 日後に計測不能となった。

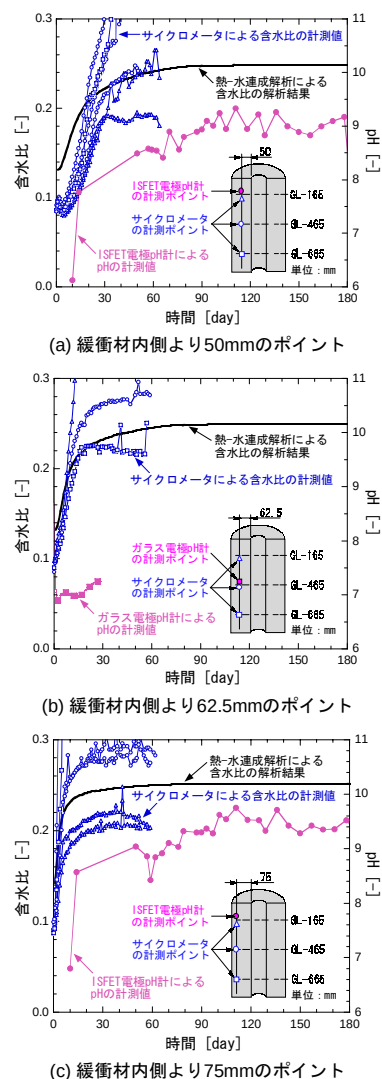


図 4.2.2-7 連成試験における緩衝材の含水比および pH の経時変化

図 4.2.2-8 は、試験終了後の緩衝材サンプリング試料の pH の計測結果である。計測には、プローブ形状の異なる二種類の ISFET 電極 pH 計および pH 試験紙を用いた。pH 試験紙による計測は、窒素ガス雰囲気制御ボックス内で、緩衝材サンプリング試料を圧縮し、間隙水を圧密排水させて行った。計測の結果、ISFET 電極 pH 計と pH 試験紙による計測値は概ね一致しており、ISFET 電極 pH 計による計測の妥当性を確認した。また、緩衝材中には pH

の勾配が形成されていることが分かった。

本連成試験では、予察解析として実施した熱-水連成解析およびモルタル-水反応の解析を通じて、試験体中の温度分布、緩衝材の浸潤過程、モルタル反応溶液の pH を概ね再現可能であることを確認

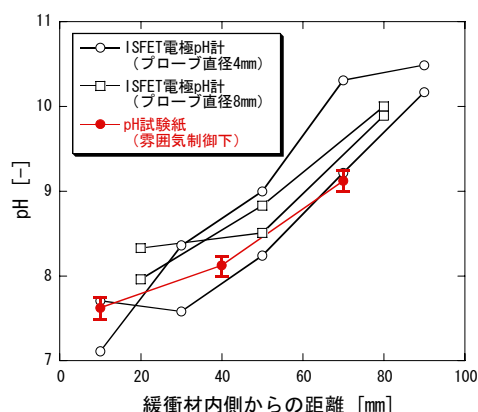


図 4. 2. 2-8 連成試験終了後の緩衝材サンプリング試料の pH の計測結果

した。また、緩衝材中の化学場の一指標となる緩衝材間隙水の pH の時間的・空間的な変遷を計測により把握することができた。

本連成試験は大気下 (CO_2 存在下) で実施しているため、モルタル-水反応、モルタル反応溶液-緩衝材反応をより複雑にしており、循環水中での方解石の沈殿が、モルタル反応溶液の pH および Ca 濃度を低下させ、アルカリによる緩衝材の化学的変遷が生じにくい環境となっているものと推察された。

また、本連成試験により、水分計等の計測センサーの耐久性や計測範囲の問題が明らかとなった。

iii) 熱-水-応力-化学連成モデルの開発

〔ニアフィールド連成挙動の事例解析〕

既報の連成モデルによる解析を例示すべく、ニアフィールド連成挙動に関する 3 次元事例解析(熱-水-化学連成解析)を実施した(Neyama et al., 2003)。解析領域は「第 2 次取りまとめ」の硬岩系岩盤における処分坑縦置き方式を基とし、対称性を考慮した廃棄体 1 体当りの占有面積の 1/4 を対象としたニアフィールド 3 次元領域とした(図 4. 2. 2-9)。初期条件は、緩衝材(ベントナイト 70wt% / ケイ砂 30wt% 混合体、乾燥密度 1.6 Mg m^{-3}) の飽和度 40%、岩盤(熱伝導率 $2.8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 、比熱 $1.0 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 、固有透過度 $1.0 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 、間隙率 0.005)

の全水頭 50m、温度は全域 45°C とし、間隙水組成は純水と構成鉱物の平衡溶液とした。境界条件は、解析領域上面および下面を、熱移動について 45°C の規定境界、水分移動について全水頭 50m の規定境界、物質移行について初期値の規定境界とし、解析領域側面を、熱移動について閉境界(断熱)、水分移動、物質移行についても閉境界(流入出なし)としている。また、本解析では、応力変形を考慮せず、解析領域の全節点を変位固定した。なお、本解析では試行として、緩衝材中の成分として方解石、玉髄、ス멕タイト、岩盤中の成分として方解石、玉髄を考慮し、これら構成鉱物の溶解および沈殿のみを鉱物-水反応として取り扱っている。

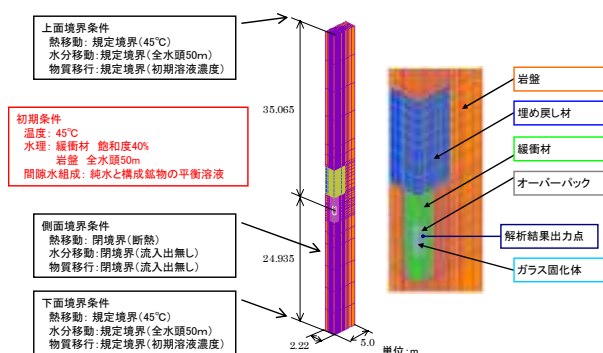


図 4. 2. 2-9 ニアフィールド連成挙動の事例解析条件

事例解析の結果を図 4. 2. 2-10 に示す。ガラス固化体の発熱量は時間の経過と共に減少するため、ニアフィールドの温度は、人工バリア定置後 1,000 年の時点ではほぼ定常に至るという結果が得られた。また、pH は、人工バリア定置後 1,000 年の間、過渡的な温度の変遷を受けて非定常な挙動を示している。これは、温度変化に伴う鉱物の溶解度の変化、および間隙水中の水溶性化学種組成の変化に起因すると推察される。図 4. 2. 2-9 中の解析結果出力点(オーバーバックと緩衝材の境界)において、人工バリア定置後 10~20 年の時点で温度が 90°C のピークに達し、人工バリア定置後 1,000 年の間、pH は約 0.8 の幅で変動する結果となった。また、ニアフィールドの温度がほぼ定常となる人工バリア定置後 1,000 年の時点では、pH も同様にほぼ定常となり、約 8.9 となった。本事例解析結果に関しては、緩衝材中の最高温度、緩衝材の再冠水時間、人工バリア定置後 1,000 年の緩衝材間

隙水の pH について、「第2次取りまとめ」との比較を実施し、概ね整合していることを確認した(表 4.2.2-3)。

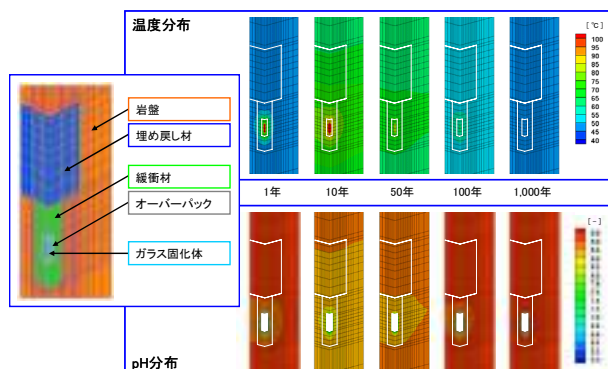


図 4.2.2-10 ニアフィールド連成挙動の事例解析結果

表 4.2.2-3 「第2次取りまとめ」と事例解析結果の比較

	「第2次取りまとめ」	事例解析結果 (熱-水-化学連成解析)
緩衝材中の最高温度	82°C(熱-水-応力連成解析) 98°C(熱解析)	90°C
緩衝材の再冠水時間	50 年以下 (熱-水-応力連成解析)	20 年
人工バリア定置後 1,000 年の緩衝材 間隙水の pH	8.4 (地球化学解析)	8.9

[熱-水-応力-化学連成モデルの高度化に関する取り組み]

・緩衝材再冠水段階において地球化学反応に寄与するガスの挙動に関するモデルの構築

人工バリア定置時の緩衝材中には大気が残存するため、緩衝材再冠水段階における化学現象には気相-液相間の相互作用が伴う。緩衝材中の酸素や二酸化炭素は、液相への溶解、さらに鉱物の溶解および沈殿等の地球化学反応に費やされ、緩衝材間隙水化学に影響を与える。したがって、緩衝材再冠水段階における化学現象を忠実に表現するためには、地球化学反応に寄与するガスの挙動に関するモデルが必要となる。以上の観点から、緩衝材再冠水段階において地球化学反応に寄与するガスの溶解/脱ガス、ガス拡散を考慮した化学現象の支配方程式を構築した。

・鉱物の溶解および沈殿に関する速度論モデルの

導入

緩衝材には、長期にわたりその性能が著しく変化しないことが期待されている。緩衝材に期待される膨潤性、低透水性等の性能は、主成分鉱物であるスメクタイトの物理化学的特性に依存することから、アルカリ性環境での変質に伴う緩衝材性能の長期安定性を予測するためには、速度論モデルに基づくスメクタイトの溶解および沈殿挙動の把握が肝要である。この観点から、緩衝材および間隙水化学の時間的・空間的変遷を予測する上で重要となる鉱物の溶解および沈殿挙動について、速度論モデルの採用を視野に入れることとした。

・熱-水-応力-化学連成モデルの概要

緩衝材再冠水段階において地球化学反応に寄与するガスの挙動に関するモデル、および鉱物の溶解/沈殿に関する速度論モデルを導入した熱-水-応力-化学連成モデルを構築した(伊藤ほか, 2004)。また、連成解析の高速化に向けて、地球化学解析の並列処理を可能とする連成解析体系を構築した。

③ まとめ

国際共同研究 DECOVALEX III TASK1~3 において得られた結果を以下にまとめる。

TASK1 ではNAGRA 地下研究施設における横置き実規模人工バリア試験を対象とした熱-水-応力連成解析を実施した。この結果、連成現象は廃棄体の設置方式の違いや緩衝材の違いがあっても本質的に変わらず、従来と同様のアプローチにより将来予測することが可能であることがわかった。

TASK2 では化学現象を含めた連成挙動をテーマとしているユッカマウンテン地下坑道での坑道規模加熱試験を対象とした熱-水-化学連成解析を実施した。この結果、温度に関して実測値と解析値が良好な一致を示した。

TASK3 ではサブタスク A,B,C を設定し、各国の連成モデルの比較・検証を行った。

サブタスク A では原位置試験結果を対象とした連成解析コードの検証・確認を実施し、各機関の連成モデルが原位置での連成挙動を概ね表現できることを確認した。

サブタスク B,C では仮想地質環境におけるニアフィールド連成挙動に関する検討を実施した。ここでは、連成解析結果と非連成解析結果を比較し、ニアフィールドを代表する指標(温度、再冠水挙動、緩衝材の膨潤応力、岩盤の安定性、岩盤の固

有透過度) が連成の影響を受ける度合いを明確にした。

今後は、熱-水-応力-化学連成挙動をメインテーマとする国際共同研究 DECOVALEX-THMC の取り組みの中で、熱-水-応力-化学連成モデルの開発、検証・確証を進めていく計画である。

連成試験設備 COUPLE における熱-水-応力-化学連成挙動に関する室内試験については、予察解析として実施した熱-水連成解析およびモルタル-水反応の解析を通じて、試験結果の解釈に取り組んだ。今後は、本予察解析を集約し、化学的プロセスを考慮した連成解析に着手する。また、軟岩系岩盤におけるコンクリート支保工を想定し、可能な限り CO₂ を排除した系で本連成試験を実施し、人工バリア定置後に想定されるニアフィールドの熱-水-応力-化学連成挙動の定量的な把握に取り組んでいく計画である。

「第2次取りまとめ」以降、開発に着手した熱-水-応力-化学連成モデルについては、既報の連成モデルを用いたニアフィールド連成挙動の事例解析、および連成モデルの高度化に関する取り組みについて報告した。ニアフィールド連成挙動の事例解析結果に関しては、緩衝材中の最高温度、緩衝材の再冠水時間、人工バリア定置後 1,000 年の緩衝材間隙水の pH について、「第2次取りまとめ」との比較を実施し、概ね整合していることを確認した。今後は、平成 15 年度に高度化を図った連成モデルを基に、「第2次取りまとめ」の地下水化学、緩衝材間隙水化学を忠実に表現した事例解析を通じて、緩衝材再冠水段階における過渡的な化学現象や、アルカリ性環境での変質に伴う緩衝材性能の長期安定性についてより現実的な予測を目指していく。また、幌延の深地層の研究施設計画の研究所設置地区の具体的な地質環境を用いた連成解析を実施し、原位置試験計画へ反映させる。

参考文献

- Chijimatsu, M., Jing, L., Millard, A., Nguyen, T.S., Rejeb, A., Rutqvist, J., Souley, M. and Sugita, Y. (2003): Building Confidence in the Mathematical Models by Calibration with a T-H-M Field Experiment, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp.181-186.
- 伊藤 彰, 川上 進, 油井三和 (2004): 高レベル放射性廃棄物地層処分におけるニアフィールドの熱-水-応力-化学連成モデル/解析コードの開発, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-032.
- Millard, A., Rejeb, A., Chijimatsu, M., Jing, L., De Jonge, J., Kohlmeier, M., Nguyen, T.S., Rutqvist, J., Souley, M. and Sugita, Y. (2003): Evaluation of THM Coupling on the Safety Assessment of a Nuclear Fuel Waste Repository in a Homogeneous Hard Rock, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp.199-204.
- Neyama, A., Ito, A., Chijimatsu, M., Ishihara, Y., Hishiya, T., Yui, M., Sugita, Y. and Kawakami, S. (2003): Prototype Code Development for Numerical Experiments on the Coupled Thermo-Hydro-Mechanical and Chemical Processes in the Near-Field of a High-Level Radioactive Waste Repository, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp.358-363.
- Nguyen, T.S., Chijimatsu, M., De Jonge, J., Jing, L., Kohlmeier, M., Millard, A., Rejeb, A., Rutqvist, J., Souley, M. and Sugita, Y. (2003): Implication of Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Processes on the Safety of a Hypothetical Nuclear Fuel Waste Repository, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp.212-217.
- Rutqvist, J., Chijimatsu, M., Jing, L., Millard, A., Nguyen, T.S., Rejeb, A., Sugita, Y. and Tsang, C.F. (2003): Evaluation of the Impact of Thermal-Hydrological-Mechanical Couplings in Bentonite and Near-Field Rock Barriers of a Nuclear Waste Repository in a Sparsely Fractured Hard Rock, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp.205-211.
- 鈴木英明, 伊藤 彰, 吉田 泰, 陶山忠宏, 川上 進, 笹本 広, 油井三和 (2004): 熱-水-応力連成試験設備 (COUPLE) における熱-水-応力-化学連成試験 (I), サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-033.

4.2.3 人工バリア性能の維持限界条件に関する研究

1) 緩衝材ガス透気回復挙動に関する研究

① 課題と計画の概要

炭素鋼オーバーパックの腐食により発生する水素ガスは、緩衝材自体が低透気性であるため、緩衝材とオーバーパックの界面に蓄積される。また、水素ガスが緩衝材中を移行する際、緩衝材中の間隙水を押し出すことも考えられる。これらの現象は、緩衝材の長期力学的安定性や核種移行に影響を及ぼすことが考えられることから、その影響を定量的に評価することが重要となる。このため「第2次取りまとめ」までの評価の信頼性を確認するため、わが国の幅広い地質環境条件を考慮したデータの拡充を行うとともに、現象のより詳細な把握に基づいたガス移行モデルの開発を目指して研究を進めている。

平成14年度までに、降水系地下水条件下でのデータを充足するとともに、乾燥密度および飽和度とCT値の関係や試料の飽和過程など、予備検討を踏まえガス移行可視化の可能性について検討した。一方、緩衝材中のガス移行モデルの開発については、国際共同研究(GAMBIT Club)において、ガス移行試験結果との比較検討を行いつつ、応力連成モデルの開発を継続した。

平成15年度は、海水系地下水条件下におけるデータの取得を開始するとともに、緩衝材中のガス移行挙動の把握を目的としたガス移行可視化研究を継続した。また、国内外におけるガス移行モデルの開発状況を踏まえ、現時点において適用可能と考えられるガス移行基本モデルの検討を行った。

② これまでの成果

i) 海水系地下水条件下におけるデータの拡充

平成14年度までに行ってきた降水系地下水条件下での試験結果を踏まえ、わが国の幅広い地質環境条件下での緩衝材の透気特性データの拡充という観点から、海水系地下水条件下におけるデータの取得を実施した。試験試料としては、ベントナイト単一材料を用い、乾燥密度 1.6Mg m^{-3} 、試料の厚さを38mmとした。試験溶液としては、人工海水(ASTM D-1141-98 基準)を用いた。試験手順の概略としては、図4.2.3-1に示す装置を用い、試料を人工海水にて飽和させたのち、背圧を5MPaで一

定に保持しつつ、一定流量(0.005ml min^{-1})にてヘリウムガスの供給を行った。

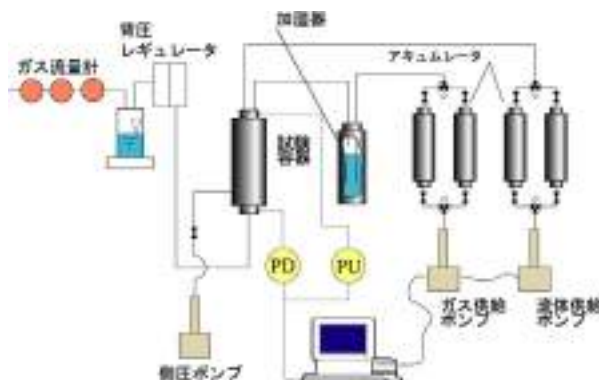


図4.2.3-1 ガス移行試験装置の概要

図4.2.3-2に圧力およびガス流量計の経時変化を示す。この図における差圧とは、試料上端から供給されているヘリウムの圧力と試料下端における背圧(水圧)との差である。ヘリウムガスは、一定流量にて試料へ供給されていることから、圧力は徐々に上昇し、約7.5MPaで透気したことが分かる。また、図4.2.3-3には差圧とガス有効浸透率の経時変化を示す。この図から破過後のガス有効浸透率は、おおよそ $5 \times 10^{-19}\text{m}^2$ となる。また、海水系および降水系条件下における試験の結果を有効粘土密度とガス有効浸透率との関係で整理したものを図4.2.3-4に示す。海水系条件下でのデータ取得は開始されたばかりであり、塩濃度の影響の有無などを評価するためにも、今後、さらなるデータの拡充を進めていく必要がある。

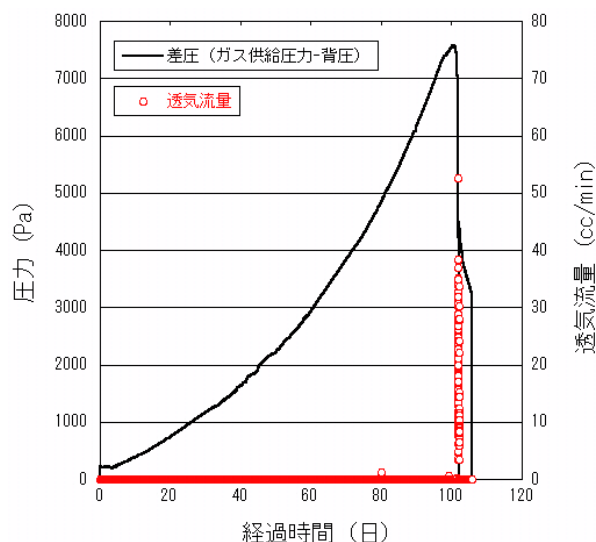


図4.2.3-2 圧力およびガス透気流量の経時変化

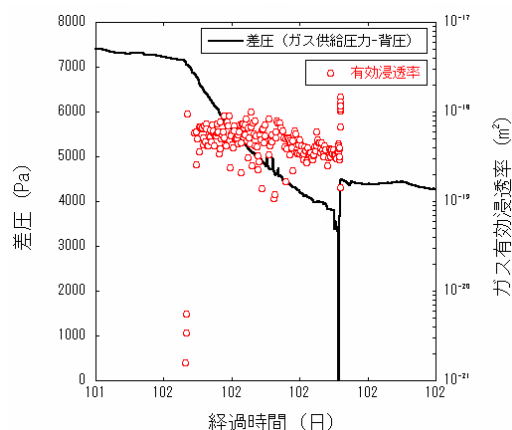


図 4.2.3-3 圧力とガス有効浸透率の経時変化

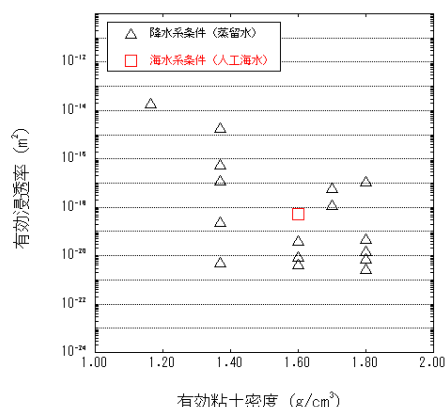


図 4.2.3-4 有効粘土密度と有効浸透率の関係

ii) 可視化研究

平成 14 年度は、X 線 CT によるガス移行過程の可視化の可能性について検討を行ったが、ガス移行現象の把握に資するような変化を捉えるには至らなかった（棚井ほか，2003）。そこで、平成 15 年度は、X 線 CT によるスキャン方法も含め再検討を行った。具体的には、平成 14 年度の実験では、試料全体をスキャンするために、ヘリカルスキャンにて撮影を実施し、試料全体の画像からガス移行領域を判別しようとしたのに対して、平成 15 年度はシングルスキャンにより常に同一箇所を撮影するとともに、CT 装置自体のノイズを軽減するために、同一時間に撮影するスキャン数を 30 枚として、それらの平均により導出された CT 値を利用することとした。これらの画像データをもとに、ガス供給前の飽和膨潤状態におけるスキャン画像を初期値として、ガス供給過程に撮影した画像との画像間演算を実施した。なお、スキャン条件は、管電圧 135kV、管電流 220mA、スキャン速度 0.75 秒、スライス厚さ 1mm である。図 4.2.3-5 に X 線 CT 装置の概観を示す。



図 4.2.3-5 X 線 CT 装置の概観

図 4.2.3-6 に初期状態および透気後の試料のスキャン画像を示す。図 4.2.3-6 の○印で囲われた箇所が初期状態に比べて若干白くなっているが、あまり明確ではない。そこで、画像間演算（差画像）処理を行ったデータをもとに作成した CT 値分布を図 4.2.3-7 に示す。なお、図 4.2.3-7 にはガス供給開始からの経過時間を併記した。なお、凡例の色は CT 値の大小（赤：CT 値大⇔青：CT 値小）を表している。この図から試験開始 40 日後まではほとんど変化が見られないのに対して、試験開始 75 日後から試料右下の部分の色が青く変化しており、また試験開始 95 日後においては、75 日後に比して CT 値の低下した箇所がかなり多くなってきている。すなわち、初期状態に比べて密度の低下領域が増大していることが分かる。緩衝材中のガスの移行は、しきい値となるある圧力を超えた時点で引張破壊により微小な亀裂を形成し緩衝材中を移行するといわれていることから、これらの密度低下領域が移行領域と考えられる。これらの結果から、X 線 CT 法の適用により緩衝材中のガス移行領域を視覚的に捉えることが可能であると考えられる。

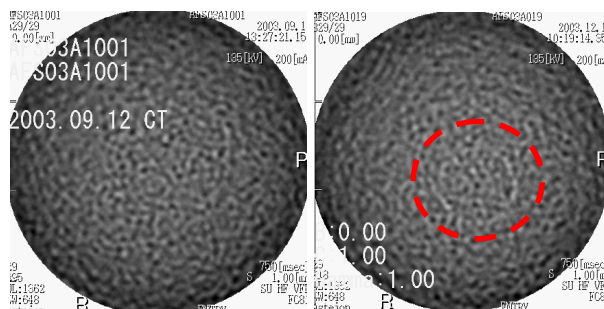


図 4.2.3-6 試料のスキャン画像
（左：初期状態，右：透気後）

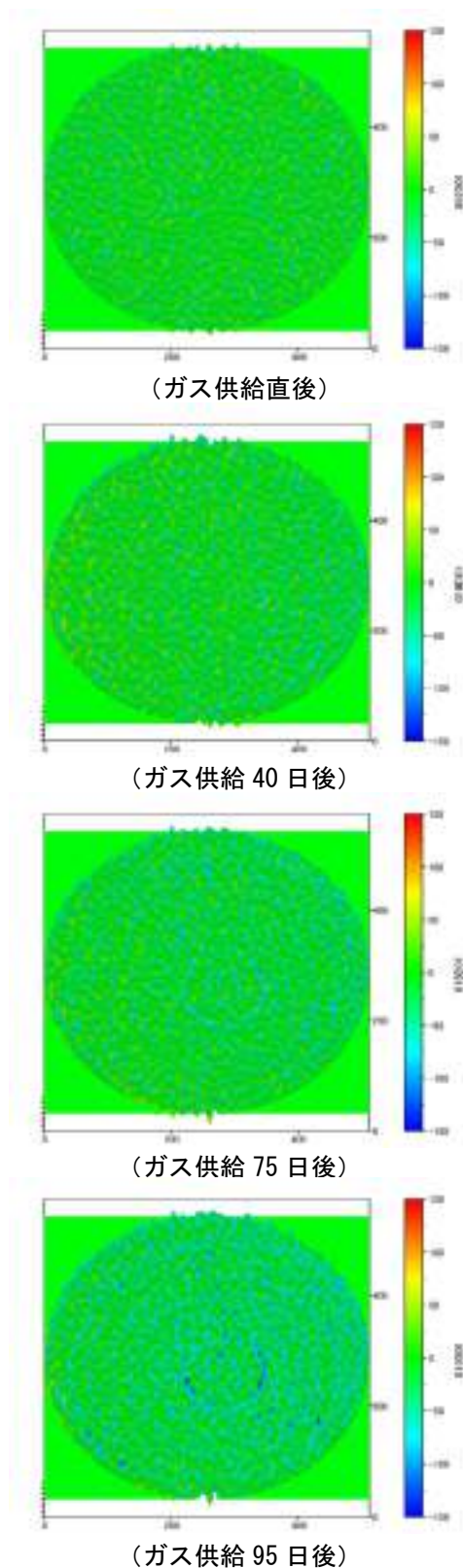


図 4.2.3-7 CT 値分布図

iii) 緩衝材中ガス移行モデルの開発

緩衝材中のガス移行モデルの開発については、SKB（スウェーデン）、NAGRA（スイス）、POSIVA（フィンランド）、ANDRA（フランス）、ENRESA（ス

ペイン）、JNC（日本）の 6 機関による GAMBIT Club 国際共同研究として進めてきた。これまで諸外国におけるガス移行試験の結果やガス移行モデルの概念などに関するレビューやイギリス地質調査所（BGS）における実験結果をもとにモデル化の検討を行ってきた。フェーズ 1 においては、ガスの圧力が一定のしきい値を超えると楕円形断面の亀裂が形成され、ガスの圧力と粘土結晶板間に吸着した水の層の結合力との関係によって亀裂先端が進展し、ガス圧力と等方から作用する拘束応力との関係から移行経路の断面積が決定される一次元の概念モデルを構築した。しかしながら、ガス移行経路の閉塞現象や間隙水の移行などについてモデル化されていないなどの課題があげられた。フェーズ 2 においては、フェーズ 1 での課題を考慮するとともに、粘土中の水の流れおよび膨潤、吸排水による応力場の変化の再現などについての改善を行った。さらに、フェーズ 3 においては、フェーズ 2 までの検討結果をもとに、応力場との連成を考慮してガス移行モデルの有限要素法応力解析プログラムへの組み込みについて検討を行ってきた。なお、応力との連成については、多孔質媒体の力学的変形と媒体中の物質移行の組み合わせに対して、Biot の圧密理論を適用することにより定式化が行われている。また、定式化された応力/歪モデルと気液移行モデルとの連成モデルは、力の平衡方程式、間隙流体を伴う等方弾性体について Hooke 則を一般化した巨視的応力/歪関係式および Darcy 則に基づく液相および気相に対する間隙流体の連続方程式によって構成されている（棚井・山本、2003）。平成 15 年度は、今後のモデル開発の方向性および必要な試験データの抽出を目的にフェーズ 4 という位置づけで GAMBIT ワークショップを実施した。本ワークショップにおける議論においては、

- ・ 飽和圧縮ベントナイト中のガス移行は、粒子の変位（亀裂の生成）によるものであり、間隙水の排出では生じない
- ・ 破過圧力が膨潤応力を上回る傾向が体積拘束条件下の実験で共通して認められる

ことなどが報告されたが、これらの結果を全て説明するためのデータは十分ではないため、今後拡充を進めていく必要があると結論づけられた。また、モデル開発の方向性についても結論が得られず、GAMBIT Club において再度検討することとした。

緩衝材中のガス移行に対する評価手法としては、

さまざまなモデルの適用，改良および開発が行われてきているが，未だに確立された手法は存在しない。そこで，現時点で適用可能と考えられるモデルについて，GAMBIT Club の開発状況を踏まえつつ，諸外国の代表的なモデルの調査を行い，そこで取り扱っている移行機構や基本数学モデル，特徴および問題点などを整理し，現時点においてニアフィールドの性能評価に適用し得ると思われる基本的なガス移行モデルの検討を行った（棚井・山本，2003）。その結果，BGS における MX-80 を対象としたガス移行試験結果との比較検討によりその再現性が確認されつつある，GAMBIT-GWS モデルが適用可能なモデルのひとつとして選定できると考えられた（図 4.2.3-8）。また，クニゲル V1 を対象としたガス移行試験結果との比較検討により試験結果の再現性が確認されている，Kozeny-Carman モデルを導入した改良型 TOUGH2 コードの適用可能性も考えられる（図 4.2.3-9）。なお，ベントナイト 20%+ケイ砂 80%などの低配合ベントナイトに関しては，従来の連続媒体 2 相流モデルの適用性検討などが室内試験や原位置試験によって行われていることから，このような材料仕様の場合，連続媒体 2 相流モデルの適用も可能であると考えられる。

③ まとめ

海水系地下水条件下におけるデータの拡充を開始するとともに，X 線 CT による可視化研究を継続した。その結果，X 線 CT により緩衝材中のガス移行挙動に関わる情報の入手が可能であることが分かった。また，ガス移行モデルの開発については，GAMBIT やその他諸外国におけるモデルの開発状況を踏まえつつ，現状で適用可能と考えられるモデルの検討を行った。その結果，GAMBIT-GWS モデル，改良型 TOUGH2 コードなどを選定した。なお，当該両モデルに関しては，それぞれに課題も残されていることから，試験結果との比較検討を継続して進めていく必要がある。今後は，海水系地下水におけるデータの拡充を継続するとともに，可視化試験の継続によりガス移行領域の三次元的な広がりなどを把握する。また，それらの結果をもとに改良型 TOUGH2 コードなどを用いたシミュレーションを行い，モデルの信頼性検討および改良を進めていく。

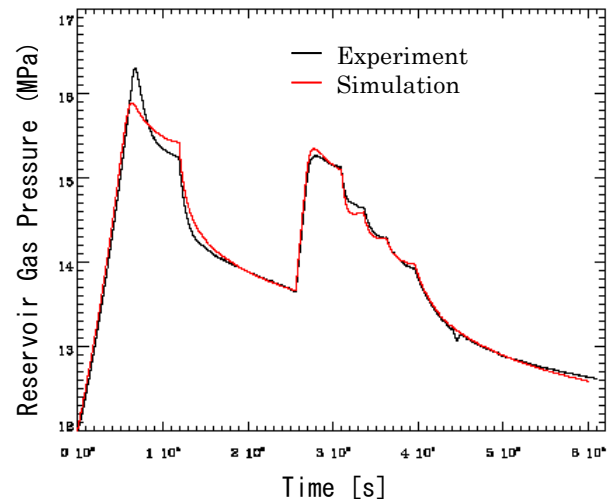


図 4.2.3-8 MX-80 ベントナイトに対する GAMBIT-GWS モデルの適用例

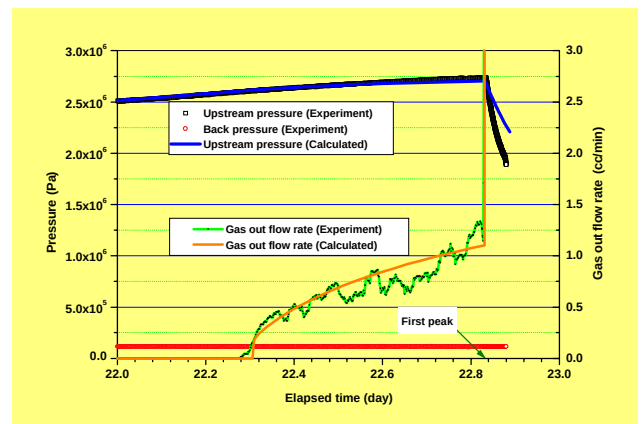


図 4.2.3-9 Kozeny-Carman モデルを付加した TOUGH2 コードによるシミュレーション例（Tanai and Yamamoto, 2003）

参考文献

- 棚井憲治，松本一浩，菊池広人（2003）：X 線 CT 法の適用性に関する検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2003-001.
- Tanai, K. and Yamamoto, M. (2003) : Experimental and Modeling Studies on Gas Migration in Kunigel V1 Bentonite, サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-024.
- 棚井憲治，山本幹彦（2003）：ガス移行挙動評価モデルに関する検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-051.

2) 人工バリアせん断応答挙動に関する研究

① 課題と計画の概要

「第2次取りまとめ」におけるわが国の地層処分概念では、地層処分システムに著しい影響を及ぼす可能性のある断層活動などの天然現象については、サイト選定によってその影響を避けることを基本としている。しかし、C級活断層（平均変位速度 $0.01\text{m}/1000$ 年オーダー）と言われる副次的に派生する断層は、断層変位速度が小さいため、自然の侵食により断層地形が残されないことが多く（池田ほか，2000），サイト選定の際に全てのC級活断層を完全には避けられない可能性も否めない。このため、このようなC級活断層の影響を受けた際の人工バリアの頑健性を明らかにし、安全機能の裕度を示す必要がある。平成14年度は断層を模擬した模型試験とシミュレーション解析により、せん断荷重とせん断変位の関係やオーバーパックへの作動土圧などについて検討を行った。しかし、せん断変位の大きい場合の応力分布を十分に評価できていなかったと考えられるため（平井ほか，2003），平成15年度は、検討対象とする断層挙動を定量的に把握するとともに、模型試験のシミュレーション解析において、モデル変更により応力分布を評価できるようにした。

② これまでの成果

i) 対象とする断層挙動

断層帯を避けた上で、さらに地表からのボーリング調査や物理探査を実施しても発見されない可能性がある、発生確率が低く小規模の地震断層であるC級活断層を検討対象とした。平成15年度は、具体的に対象とすべき断層挙動を設定した（平井ほか，2003）。

断層変位量に関しては、武村が1885年から1995年の間に発生したマグニチュード5.8以上の地震に対し、地表への断層発現率と気象庁マグニチュードの関係を図4.2.3-10のように示している（武村，1998）。この図よりマグニチュード6.5以下の地震は地表面に地震断層が現れず、調査で発見されない確率も上がると考えられた。そこで、マグニチュード6.5を対象とすべき最大の地震とし、次式に示す松田の式により対象とする断層変位を設定した。

$$\log D = 0.6M - 4.0 \quad (4.2.3-1)$$

ここで、Mはマグニチュード、Dは断層変位量(m)

を表す。上式より、マグニチュード6.5に対する断層変位量は79cmとなるが、専門家の意見もふまえ保守側に見積もり100cmを検討対象とした。

一方、断層変位速度については、佐藤らが断層変位速度とマグニチュードを過去の地震に対して図4.2.3-11のように整理している（佐藤ほか，1989）。この図よりマグニチュード6.5における変位速度は 80cm s^{-1} 程度と考えられるが、これについても専門家の意見を参考に保守側に見積もり、 100cm s^{-1} を検討対象とした。

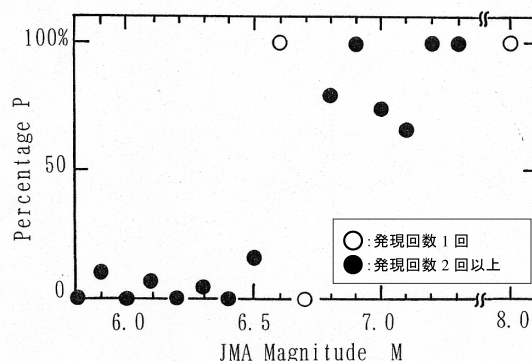


図 4.2.3-10 気象庁マグニチュードと断層地表出現率(武村，1998)

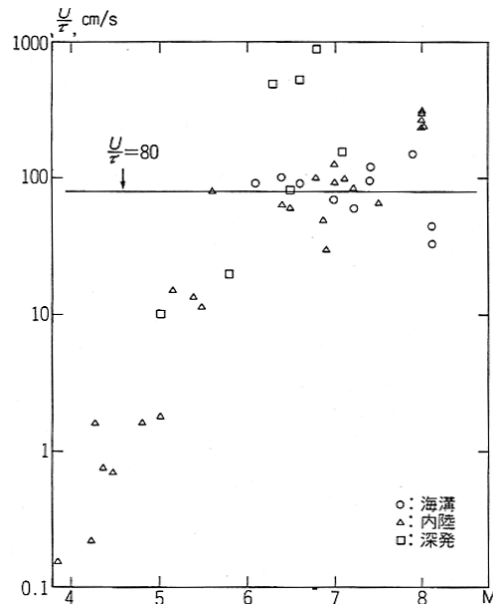


図 4.2.3-11 気象庁マグニチュード(M)と断層変位速度 (U/τ) (佐藤ほか，1989)

ii) 模型試験結果に対する解析

オーバーパック中央が断層にともなう岩盤ずれによりせん断される場合を想定し、図4.2.3-12のような試験装置を用いた1/20規模の模型試験を平

成 12 年度と平成 14 年度の 2 回実施した。ここのオーバーパックは腐食の進展していない健全な状態のものを用了。いずれの試験条件も変位を緩衝材厚さの 80% に相当する 4 cm, 変位速度を 1 cm s^{-1} とした。断層変位量に関しては実規模換算で 80 cm と, i) で対象として設定した断層変位量とほぼ等しいが, 変位速度に関しては試験装置の制約により, 対象として設定した断層変位速度の 1/10 と小さい速度とした。これらの試験結果より, この程度のせん断に対しては, オーバーパックは緩衝材中で回転し, オーバーパックには残留変形などの損傷が生じないことがわかった。

この模型試験に対する解析として, 平成 14 年度は緩衝材の構成モデルに Tresca モデル (山田, 1988) を適用した。しかし, このモデルでは, せん断変位が大きくなると解析結果と試験結果が乖離する結果となった。この原因として, Tresca モデルでは緩衝材中の間隙水の挙動を精度良く評価できないことが考えられる。そこで, 平成 15 年度は間隙水挙動を考慮できる修正 Cam-Clay モデルを適用した。図 4.2.3-13 は平成 14 年度に実施した Tresca モデルによる解析と平成 15 年度の修正 Cam-Clay モデルによる解析, および 2 回の模型試験より得られた試験容器に作用する土圧増分とせん断変位の関係を示したものである。ここで, 平成 14 年度の解析では変位の初期しか試験結果を評価できていないのに対し, 平成 15 年度の解析では, 変位が大きくなっても土圧が増加する傾向をある程度説明できていることがわかる。図 4.2.3-14 は, 平成 15 年度の解析による変位 40 cm の時の間隙水圧の分布であるが, 間隙水圧の上昇領域が広く分布しているのがわかる。このような間隙水圧の挙動により, せん断変位とともに作用土圧が増加すると考えられる。

③まとめ

平成 15 年度は人工バリアへの断層影響を評価する場合に対象とすべき断層の具体的な挙動を明らかにした。また, 模型試験の解析において修正 Cam-Clay モデルを適用することにより, ある程度試験結果を説明することが可能となった。

平成 16 年度以降は, 断層挙動に対する人工バリアの安全裕度の幅を明らかにするために, 対象とする断層挙動に対する人工バリアの力学的安定性を検討する必要がある。そこで, 模型試験においては, 試験可能な最大変位に対する試験とシミュ

レーション解析を実施し, 緩衝材が緩衝機能を発揮し得る断層変位や変位速度の限界状態を明らかにする予定である。また, 現状の試験装置では実施できない断層変位速度に対しては, 解析による検討を実施する予定である。

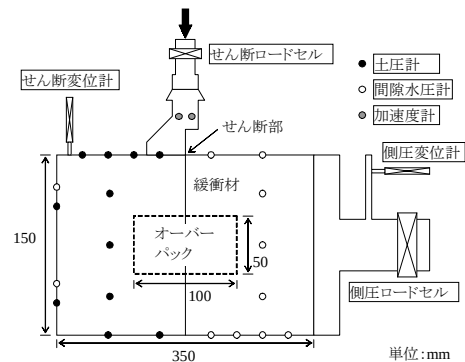


図 4.2.3-12 模型（断層模擬）試験装置

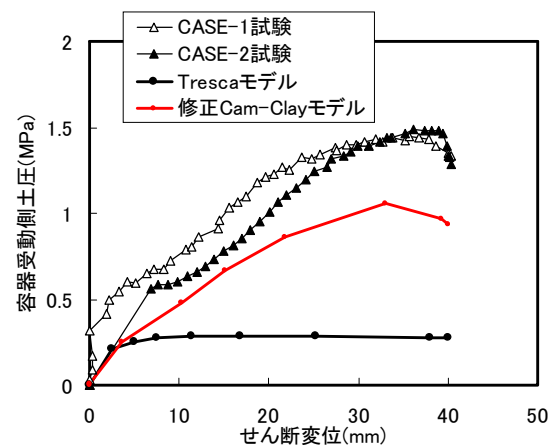


図 4.2.3-13 容器に作用する土圧増分とせん断変位

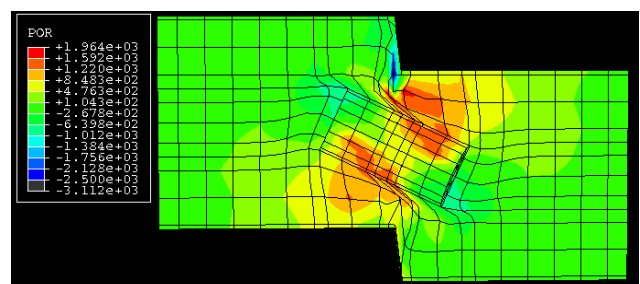


図 4.2.3-14 解析による間隙水圧増分の分布

参考文献

- 池田俊雄, 岡田勝也, 池田研一, 長谷川達也 (2000) : 活断層調査から耐震設計まで, 鹿島出版会, pp. 56-57.
- 平井 卓, 棚井憲治, 菊池広人, 鈴木英明, 高治一彦, 大沼 敏 (2003) : 断層ずれに伴う人工バリアの力学的挙動評価, サイクル機構技術資料, JNC TN8400

2003-009.

武村雅之(1998)：日本列島における地殻内地震のスケールリング則，地震，第2輯，51，pp. 211-228.

佐藤良輔，阿部勝征，岡田義光，野崎邦彦，鈴木保典
(1989)：日本の地震断層パラメータ・ハンドブック，
鹿島出版会，pp. 82-92.

山田嘉昭(1988)：塑性の有限要素法，科学技術出版社，
pp. 225-226.

4.2.4 人工バリア等のナチュラルアナログ研究

① 課題と計画の概要

サイクル機構では、処分場環境に類似した天然での現象を研究するナチュラルアナログ研究により、土中でのガラスの溶解変質、金属腐食に関する研究を実施している。「第2次取りまとめ」では、土中に100万年間埋設されたガラスの変質調査や、数十年間埋設された鉄管の調査により、それらが長期的健全性を有することの見通しを得た。

「第2次取りまとめ」以降は、人工バリア材の長期健全性評価に資するデータ取得を目的として、泥質岩、凝灰岩中に長期間埋設していた天然ガラスや数百年以上埋設された鉄製遺物の変質・腐食に関する研究や、それを補完する室内実験を実施している。この際、ナチュラルアナログの研究試料としては、処分場環境との類似性の把握に重点をおき、試料の履歴や保存環境の分析を同時に行い、データの蓄積による長期健全性評価の更なる信頼性向上を目指している。

② 成果の概要

i) ガラスの溶解変質に関するナチュラルアナログ研究

安全評価の結果の信頼性を支援するため、ガラスの溶解変質に関するナチュラルアナログ研究を実施している。

地中に埋設していた火山ガラスの評価には、長期間の試料環境の温度履歴や周囲の地下水環境の推定が重要であるとともに、多くの事例調査（データの蓄積）が必要である。本研究では、平成14年度より、南関東における深度2,000m程度のボーリングコアを選定し調査を実施している。このボーリングコアは、防災科学技術研究所が1994～1997年にかけて掘削した地殻活動観測井から得られたもの（鈴木・小村, 1999）であり、凝灰岩層中に含まれる火山ガラス（軽石）を調査対象としている。ボーリングコア中の火山ガラスは、埋設後の火山ガラス周辺温度が50℃と低いところでは変質が認められず、周辺温度が70℃では変質が認められ、化石海水との反応により、ガラス組成がモンモリロナイトおよび斜プチロル沸石に変質していることを確認した。

ii) 金属の腐食に関するナチュラルアナログ研究

炭素鋼オーバーパックの長期健全性の傍証とし

て、土壌中に長期に埋設していた鉄製遺物などの腐食調査を継続して実施している（本田ほか, 2002; 2003; Yoshikawa et al., 2003）。「第2次取りまとめ」では、処分場埋設環境における1000年間の炭素鋼オーバーパックの最大腐食深さは32mm程度（軟岩系岩盤／堅置き）と保守的に推定されている。炭山ほか(1999)は、圧縮ベントナイトに類似した土壌に長期に埋設されていた鋳鉄製水道管の腐食調査を行い、約70年間の最大腐食深さは2mm程度と評価している。また、Johnsonほか(1980)は、例えばエジプト・ツタンカーメンの遺物などの種々の環境に置かれていた考古遺物を調査し、通気されていない水中における鉄の腐食速度は相当に小さく、腐食量は1,000年間で1mm程度と評価している。本研究でもこれまでに、酸化雰囲気における腐食量は約750年間で3～5mm、弱酸化性から還元性環境で腐食量は最大でも2mm程度であり、試料によってはほとんど腐食していない状態が確認されている。これらのことから、弱酸化雰囲気での腐食状況をより明確にすることが重要と考えられる。平成15年度は宮崎県の4ヶ所の遺跡（4～7世紀）と青森県の3ヶ所の遺跡（9～10世紀）から出土した鉄器8点の腐食状況と埋蔵環境について調査した。ここでは、弱酸化性環境に埋設していたと考えられている宮崎県の地下式横穴墓群から出土した鉄器についての調査結果を示す。

宮崎県東諸県郡国富町の六野原台地に位置する地下式横穴墓（5世紀）から出土した短甲片の腐食量について、X線CTによる非破壊分析を実施した。地下式横穴墓は、深さ約1.5mの堅坑から水平方向に掘られた羨道と玄室から構成されている。堅坑と羨道の間は河原石で閉塞され、堅坑は土で埋められていた。埋土は、横穴墓構築時の廃土であるアカホヤ（火山灰）、黒褐色土、黒色土である。したがって、埋め戻し初期の埋蔵環境は大気雰囲気だが、その後は長く低酸素・高湿度雰囲気であったと考えられる。外観とX線CT撮像結果を図4.2.4-1に示す。

試料は、最大横幅130mm×最大縦幅50mmで厚さは約2mmである。表面は黒褐色をなしている。縁近くの貫通孔は鋳留孔で、腐食によって生じたものではない。図の下部、白黒写真がX線CT画像であり、試料の密度が高くなると白色になる。母材の鉄が多く残っていることが分かる。鍍の厚さはほぼ均一で0.5mm以下と薄い、ところどころに孔食（最

大深さ：2 mm）によると思われるピットも認められた。表面の付着層の極微量を採取し、形態と化学組成を調べた結果、付着層は鉄の腐食生成物のみであり、結晶相としてマグネタイト（ Fe_3O_4 ）が主であり、高次の鉄酸化物であるゲーサイト（ $\alpha\text{-FeOOH}$ ）とレピドクロサイト（ $\gamma\text{-FeOOH}$ ）は少量ないしは痕跡程度であった。この結果は、本試料が長期にわたり弱酸化雰囲気中に埋蔵されていたことを支持している。土壌は表4.2.4-1に示したように、塩化物イオンなどの腐食性イオン濃度のレベルは中程度（約200 mg kg^{-1} 以下）で、圧縮ベントナイト（炭山ほか，1999）並びに平均的な土壌環境（佐古，1986）と同じである。また、腐食量（孔食深さ）の評価結果は、1,500年間で最大2 mmであった。

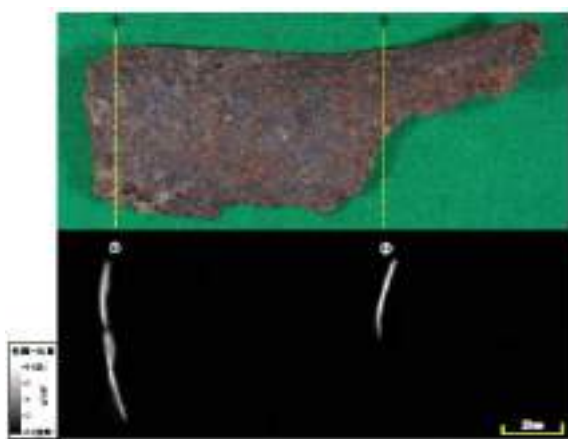


図4.2.4-1 短甲片の外観（上）とX線CT画像

表4.2.4-1 地下式横穴墳土壌の成分

イオン	Cl^-	SO_4^{2-}	S^{2-}
濃度(mg kg^{-1})	21	240	<10

③ まとめ

平成14年度に引き続き、ガラスの溶解変質に関して、南関東における凝灰岩層中に含まれる火山ガラス（凝灰岩類）を対象試料としたガラスの変質について調査を継続した。その結果、温度70℃で火山ガラス組成が化石海水との反応によりモンモリロナイトおよび斜ブチロル沸石に変質した事例であることが明確になった。

金属の腐食に関しては、地中に埋没していた鉄器の腐食についてX線CTによる調査を継続して実施した。堅坑が埋め戻され、大気と遮断された約

1500年前の地下式横穴墓から出土した鉄遺物の腐食量と周辺土壌の分析を実施した。鉄遺物は、長期にわたり弱酸化雰囲気中に埋蔵されていたと考えられる。塩化物イオンなどの腐食性イオン濃度は中程度で、土壌環境中での腐食性は弱いことがわかった。表面はマグネタイトを主とする錆に覆われ、孔食が生じていたが、1,500年間の腐食量は、最大孔食深さで2 mmであった。土壌の腐食性イオン濃度が中程度であれば、弱酸化雰囲気における腐食は酸化雰囲気と比べて腐食速度が抑制され、現在のところ、1,000年間の腐食量は数mm程度である事が観測された。本研究は、今後も引き続きデータの蓄積を行う。

参考文献

- 本田 卓，山口新吾，上野建一，吉川英樹，亀井玄人（2002）：遺跡で出土した鉄器のX線CTによる腐食評価，腐食防食協会第49回材料と環境討論会講演集，pp.201-204.
- Honda, T. Yamaguchi, S. Yoshikawa, H. Ueno, K. Yui, M. (2003): "X-Ray CT Analysis of Iron-Based Archaeological Remains Buried in Soil" 13th Asian-Pacific Corrosion Control Conference.
- Johnson, A. B. and Francis, B. (1980): "Durability of Metals From Archaeological Objects, Metal Meteorites, and Native Metals", PNL-3198/JC-70, Baattelle.
- 佐古光聡(1986)：日本瓦斯協会誌，Vol.33，p.73.
- 炭山守男，玉田明宏，三ツ井誠一郎，本田 明（1999）：ベントナイト中の炭素鋼オーバーパックの腐食挙動に関するナチュラルアナログ研究，材料と環境 '99講演集，p.224.
- 鈴木宏芳，小村健太郎（1999）：関東地域の孔井データ資料集，防災科学技術研究所資料集，第191号.
- Yoshikawa, H. Ueno, K. Honda, T. Yamaguchi, S. Yui, M. (2003): "Analysis of the Excavated Archaeological Iron Using Xray-CT" The 9th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation.

4.3 人工バリア等の工学技術の検証

4.3.1 閉鎖技術の検証試験

① 課題と計画の概要

閉鎖技術の開発に関して、「第2次取りまとめ」では、「人工バリアの性能に有意な影響を与えないように適切に処置するもの」として概念を提示にとどまっている。

そこで、平成14年度までには、「第2次取りまとめ」で示した閉鎖技術の構成要素（埋め戻し材、プラグ[コンクリート、粘土]、グラウトなど）のうち、プラグを含めた閉鎖システムに着目した検証試験を行い、閉鎖性能に関するデータを取得するとともに、閉鎖要素の要件の検討を進めた。

平成15年度は、引き続き閉鎖システムに着目した検証試験においてデータを蓄積するとともに、これまでの閉鎖要素の要件の検討に基づき埋め戻し材の性能に関わる具体的な検討を進めた。

② これまでの成果

i) 実規模原位置試験

閉鎖技術の構成要素のうち、コンクリートプラグおよび粘土プラグの閉鎖性能を検証するため、カナダ原子力公社（AECL）との共同研究「トンネルシーリング性能試験」（以下、「TSX 試験」）をAECLの地下研究施設（URL）で行っている（Martino et al., 2003；杉田ほか, 2003a）。

TSX 試験は、AECL の URL の深度 420 m の試験坑道（長軸 4.375 m、短軸 3.5 m の楕円断面）で実施しており、コンクリートプラグはAECLが開発した低発熱高流動コンクリート（低アルカリ性コンクリート）を、また、粘土プラグはケイ砂と国産 Na 型ベントナイト（クニゲルV1）を 3:7 の割合で混合したものを材料としている（杉田・升元, 2002）。両プラグ設置後、注水試験（注水圧 800kPa, 2000kPa, 4000kPa）、トレーサ試験、加熱試験を実施し、両プラグ及びその周辺岩盤の力学、水理、熱的挙動を連続計測している。

TSX 試験の加熱は2002年9月24日から2003年11月17日まで継続し、その時点でヒータを切って冷却段階に入った。図4.3.1-1は、2002年12月から2004年1月までの温度の経時変化を示す。また、図4.3.1-2は、2003年1月1日、2003年3月1日、2003年6月1日、2003年11月17日および2004

年1月5日の垂直長手方向断面の温度コンター図である。最大温度は、コンクリートプラグ及び粘土プラグの制御地点でそれぞれ63℃と56.1℃であった。2003年11月17日、コンクリートプラグ制御地点の温度は61.7℃、粘土プラグの制御地点の温度は55.7℃であった。2004年1月5日、空洞を2MPaまで減圧した日は、コンクリートプラグ制御地点の温度は42.1℃で粘土プラグ制御地点の温度は41.9℃であった。また、温度コンター図から、加熱水が主としてTSX試験トンネルの中央部を循環していることがわかる。

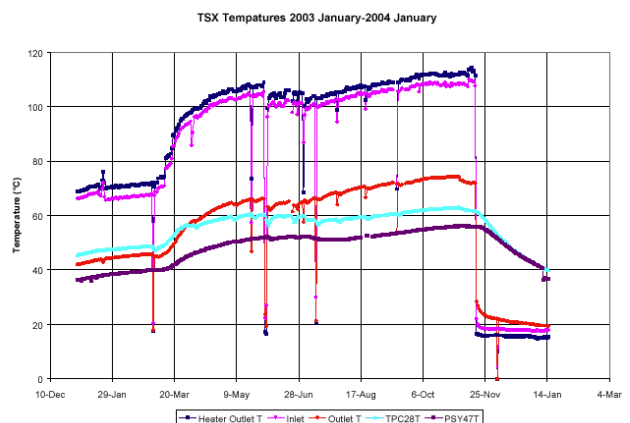


図 4.3.1-1 ヒータ及び坑道内の温度

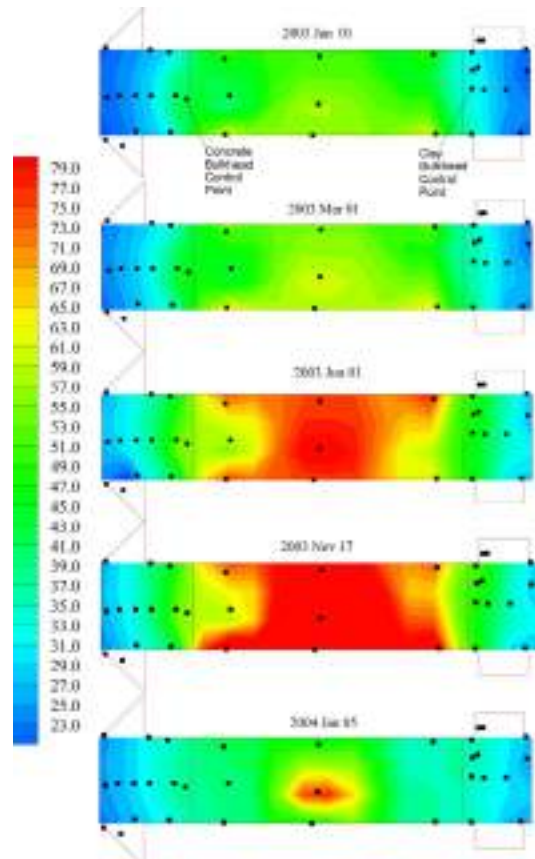


図 4.3.1-2 坑道内の温度分布

TSX 試験の解体・サンプリングのため、2004 年 1 月 5 日に TSX 試験坑道内の圧力を 2MPa まで減圧した。減圧は、トンネルから水を排水することによって行った。圧力を一週間 2MPa に維持し、2004 年 1 月 12 日にさらに減圧を行った。

図 4.3.1-3 に 2001 年 4 月から 2004 年 1 月までのコンクリートプラグで発生した湧水量を、また図 4.3.1-4 には同じ期間内に粘土プラグで発生した湧水量を示す。コンクリートプラグの湧水量は全般的に加熱と共に減少している。この湧水量の減少は、コンクリートの熱膨張による岩盤-コンクリート接合部の変化に関連しているものと考えられる。湧水量は、冷却しても大きくは変化しなかったが、圧力が下がると減少している。粘土プラグの湧水速度は約 1ml min^{-1} で比較的安定しており温度と共に増加している。

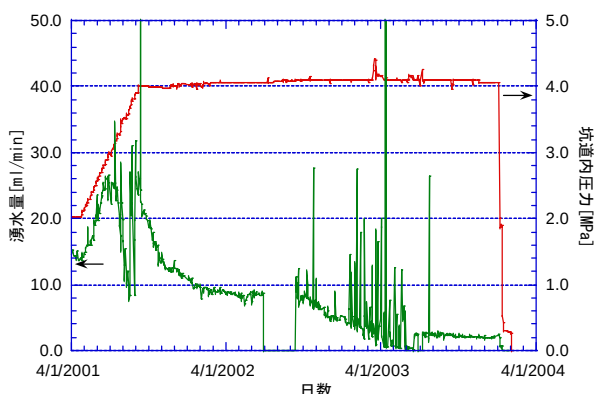


図 4.3.1-3 コンクリートプラグを通過する湧水

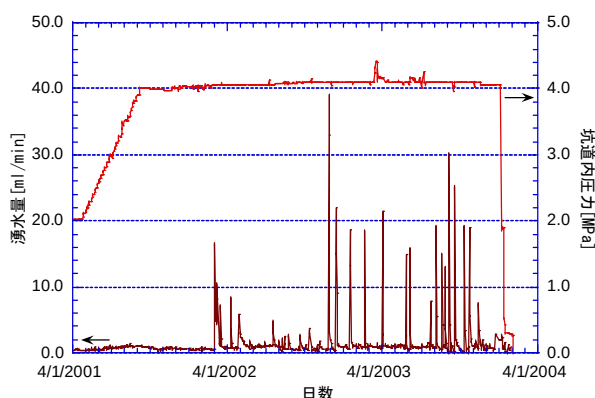


図 4.3.1-4 粘土プラグを通過する湧水

プラグの止水性に関わる温度の影響を把握するために、第 3 回トレーサ試験を 2003 年 7 月 2 日から実施した。第 1 回トレーサ試験で使用したヨウ化ナトリウムと第 2 回トレーサ試験で使用した臭化ナトリウムの濃度が粘土プラグの下流側で依然

として高かったため、イオントレーサは使用せず、代わりに可視トレーサとしてローダミンを使用した。注入の準備として、ローダミン 20% 溶液を全部で 945.5g (純粋ローダミン染料で 190.9g), 1435L の水に溶解し、濃度が 133mg l^{-1} のローダミンを 52000L の試験坑道に注入した。注入後の濃度は 3.67mg l^{-1} になる。ローダミンはコンクリートプラグで 50 時間から 150 時間、粘土プラグで約 800 時間 (2003 年 8 月 5 日から 8 日の間) で破過した。

ヨウ化ナトリウムを用いて、第 4 回目のトレーサ試験を 2003 年 9 月 13 日から実施した。今回の試験では、合計で 50kg のヨウ化ナトリウムを 1800L の水に溶かして混合し、濃度 21.7mg l^{-1} のヨウ化物を 52000L のトンネルに注入した。注入後の濃度は 845mg l^{-1} になる。ヨウ化ナトリウムはコンクリートプラグで 50~150 時間で、粘土プラグで約 600~700 時間 (2003 年 10 月 10 日と 14 日の間) で破過した。

これまでに、粘土プラグ下流側に木製の壁で囲った試験室を設け、注水圧の変化に伴う岩盤からの湧水量を把握している。高温状態での注水圧 4MPa における試験室全体の蒸発散量測定試験を実施した。計測結果を図 4.3.1-5 に示す。蒸発散量は約 10g min^{-1} であり、これまでの結果と同様に、水压や温度の影響はなくほぼ一定の値であった。

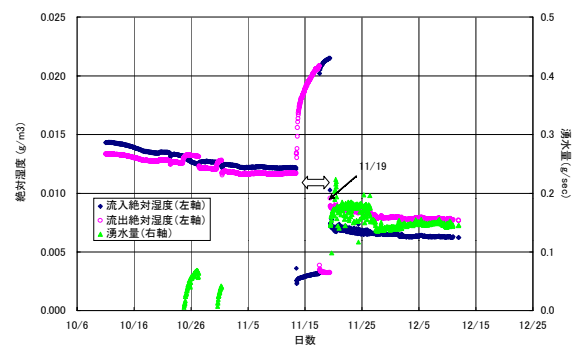


図 4.3.1-5 蒸発散量測定試験結果

これまでのトレーサ試験解析結果から、トレーサの移動経路は緩み領域が支配的となることが分かっており、プラグの切り欠き周辺の緩み領域の透水係数は、パラメトリックに設定されている。

そこで、本解析においては、トレーサの移行経路となる緩み域を中心に解析メッシュを再分割 (要素長: 従来モデルの 1/2) し、同時にメッシュ分割に整合するように時間刻みを再設定 (従来モデルの 1/4) して解析を実施した。解析用物性値を

図 4.3.1-6 に示す。

従来メッシュによる解析結果と新メッシュによる解析結果を図 4.3.1-7 に示す。比較すると、濃度の移流による流れ方向への進展、拡散による流れと直交方向への進展ともに、新メッシュの結果の方が緩やかであるうえ、分布形状も滑らかである。これは、本解析では濃度の進展を安定的に得るため、敢えて数値拡散項を発生させて時間差分を解いており、この効果により、メッシュ規模がより大きい方に拡散現象が顕著に見られるようになるためである。

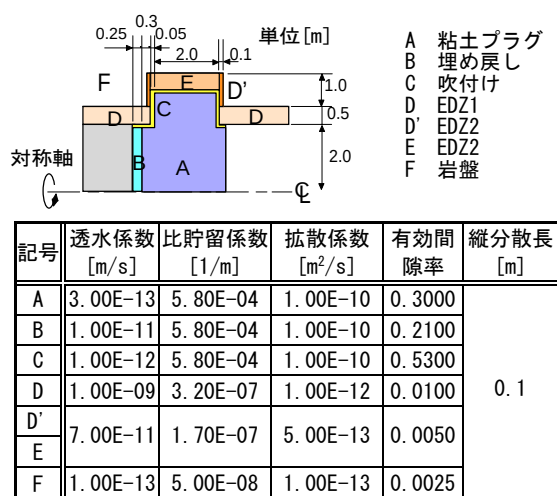
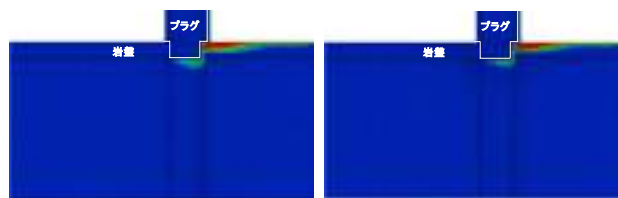


図 4.3.1-6 トレーサ解析の入力条件



(a) 従来メッシュ (b) 新メッシュ

図 4.3.1-7 メッシュの違いによる比濃度分布図 (330 日後)

2004 年 2 月より、粘土プラグ及びコンクリートプラグを解体し、サンプリングを実施している。今後、サンプリングに基づいた分析や物性値の把握及びトレーサ経路の把握を実施する予定である。

ii) 閉鎖要素の要件の検討

平成 14 年度まで実施してきた閉鎖要素の要件の検討（杉田ほか，2003b）に基づき埋め戻し材の性能に関わる具体的な検討を進めた（菊池ほか，2003）。

坑道に設置されたコンクリート製支保工は、例えば、地下水の浸潤後、長期的な変質によりセメントペースト分の溶解によりその体積が減少すると考えられる。仮に、図 4.3.1-8 に示すように時間の経過とともに、コンクリート製支保工の変質による体積減少→隙間の発生→埋め戻し材の膨潤による隙間の充填のようなプロセスを考える。このとき、埋め戻し材には、隙間充填性能と同時に、低透水性、膨潤圧・剛性等の性能が要求される。このような性能の把握に資するべく、埋め戻し材の隙間充填性能に着目した基礎試験を実施した。

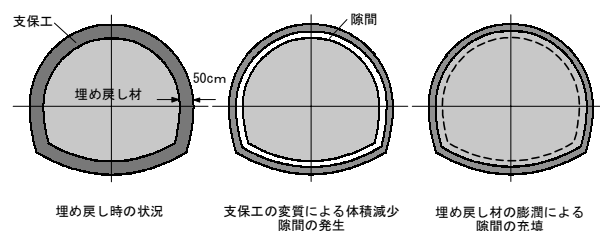


図 4.3.1-8 埋め戻し材の設置される坑道の時間変遷（菊池ほか，2003）

試験装置を、図 4.3.1-9 に示す。試験セルには埋め戻し材を模擬した供試体を設置し、その上部には、坑道に発生する隙間を模擬した隙間を設けた。供試体の両側面には孔径 2 μ m のプラスチックフィルタを設置し、上下蓋を取り付けた。試験セルを組み上げた後、デシケータ内に試験水（蒸留水および人工海水）を充填し、試験セルを沈め、試験セル内に残された空気を除去した後、自然給水によって試験を開始した。試験条件を表 4.3.1-1 に示す。供試体の材料には、3 号ケイ砂と国産 Na 型ベントナイト（クニゲル V 1）を用いた。隙間寸法に関しては、コンクリート製支保工の変質によって体積が 30% 減少すると仮定して約 10mm とした。

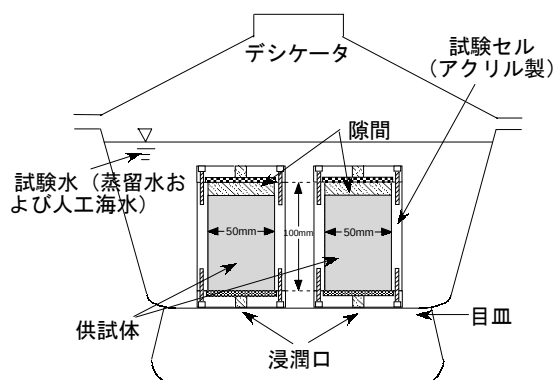


図 4.3.1-9 試験装置概観図

表 4.3.1-1 試験条件

供試体名	DW-1	SW-1	SW-2	SW-3	SW-4
初期乾燥密度 [Mg m ⁻³]	1.80				
ケイ砂混合率 [%]	85	85	60	50	45
有効粘土密度 [Mg m ⁻³]	0.64 (0.51)	0.64 (0.51)	1.22 (1.03)	1.37 (1.17)	1.43 (1.23)
初期含水比[%]	15	15	10	10	10
供試体寸法[mm]	φ50×h90				
隙間寸法[mm]	φ50×h10				
試験水	蒸留水	人工海水 (ASTM D-1141-98 基準)			
試験温度[°C]	室温 (約 20°C)				
試験期間[day]	約 14				

※有効粘土密度欄における () 内は、隙間充填後の供試体有効粘土密度を表す

供試体作成時の有効粘土密度と隙間体積に対する充填体積の割合（以下、「隙間充填率」）の関係を図 4.3.1-10 に示す。蒸留水を用いた DW-1 供試体は、隙間充填率が約 91%となった。一方、DW-1 供試体と同条件で人工海水を用いた場合（SW-1 供試体）29%となった。これらの違いは、試験水の成分がベントナイトの膨潤性能に対して影響したためである。また、人工海水を用いた場合でも、ベントナイト混合率を増加させると隙間充填率も増加する（SW-2, 3, 4）ことが示されている。

ここでは、閉鎖要素の要件の検討に基づき埋め戻し材の性能に関わる具体的なデータ取得を実施したが、今後も環境条件を考慮したデータの拡充が必要である。

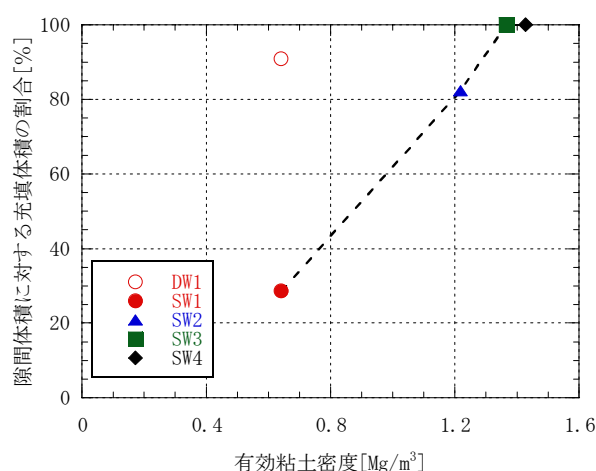


図 4.3.1-10 有効粘土密度と隙間体積に対する充填体積の割合の関係

③ まとめ

閉鎖技術の検証試験として、実規模原位置試験及び閉鎖要素の要件の検討を実施してきている。

実規模原位置試験では、注水試験に引き続き、トレーサ試験、加熱試験を実施してきており、実規模プラグが止水性能を発揮しているデータ（湧水量等）を継続して取得した。一方、閉鎖要素の要件の検討に関しては、平成 14 年度までの成果に基づき、埋め戻し材の隙間充填性能に関わる具体的なデータ（有効粘土密度と隙間充填量との関係）の取得を進めた。

今後は、実規模原位置試験の解体・サンプリングによるデータを蓄積するとともに、閉鎖要素の要件の検討を継続していく。

参考文献

- 菊池広人, 棚井憲治, 杉田裕 (2003): 海水系地下水条件下における埋め戻し材特性に関する基礎試験, サイクル機構技術資料, JNC TN8430 2003-008.
- Martino, J., Chandler, N., Dixon, D., Sugita, Y., Vignal, B. and Hansen, F. (2003): The Tunnel Sealing Experiment and Application to Repository Seal Design, Proceedings of the 10th International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas, 2003, pp.602-609.
- 杉田 裕, 升元一彦 (2002): トンネルシーリング性能試験におけるプラグの設計・施工技術, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2002-005.
- 杉田 裕, 川上 進, 戸井田克 (2003a): トンネルシーリング性能試験における試験環境条件および計測項目, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-002.
- 杉田 裕, 川上 進, 油井三和, 牧野仁史, 澤田 淳, 栗原雄二, 三原守弘 (2003b): 高レベル放射性廃棄物地層処分における閉鎖性能に関する検討 (平成 14 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-010.

4.3.2 人工材料の開発

① 課題と計画の概要

「第2次とりまとめ」では、セメント系材料に起因する高 pH 溶液の緩衝材や岩盤などへの影響を考慮し、坑道支保工である普通セメントの代替材料として低アルカリ性コンクリートを推奨している。このことから、サイクル機構では pH11 以下を目標とした低アルカリ性セメント HFSC (Highly Fly-ash contained Silicafume Cement) の開発を行っている。このセメントは普通ポルトランドセメント (OPC) にポゾラン物質であるシリカフューム (SF) とフライアッシュ (FA) を混入し、ポゾラン反応 (可溶性シリカと水酸化カルシウムが反応し、不溶性で硬化するシリカ質化合物を生成する現象) により高 pH の主な原因である水酸化カルシウムの低減をはかるものである。

開発課題としては以下の4項目を設定し、幌延の深地層の研究施設における原位置での施工性等の確認に向けた開発を行っている。

- ・施工性の確認：吹付けコンクリート、場所打ちコンクリート、グラウトとしての施工性を確認する。
- ・目標品質の達成：要求される圧縮強度を確保し、pH が 11 以下になることを確認する。
- ・品質変動の把握：FA の品質に起因するコンクリート品質の変動を把握する。
- ・耐久性の評価：鉄筋の腐食挙動を把握し、供用期間における耐久性を評価する。

上記の課題に対して、平成 14 年度までの開発では、グラウトを除く施工性はほぼ確認されている。また、目標品質である圧縮強度は現状での目標値を確保できたが、pH の値については室温条件で 11 以下となることを確認していない。品質変動の把握では、4 回の実験による圧縮強度等の変動を把握し、大きな問題とならないと判断した。耐久性の評価では、1 年間の腐食試験結果からひび割れ発生時期を予測したが、鉄筋腐食減量率が小さいためより長期の腐食試験が必要であることがわかった。

平成 15 年度は上記の結果を踏まえ、目標品質の達成として pH 低下挙動の測定と平成 13 年度に問題となった吹付けコンクリートの透水性調査、品質変動の把握として圧縮強度等のデータ蓄積を行った (入矢ほか, 2004)。

② これまでの成果

i) pH 低下挙動の把握

pH の低下挙動を測定するために、HFSC 硬化後に粉砕し水に浸漬した粉体浸漬と、硬化後ブロックで水中養生後に粉砕し水に浸漬したブロック浸漬を行った。平成 13 年度に材令 60 日までの測定を行い、65℃の条件で pH は短期間に 11 以下まで低下することが確認された。平成 15 年度は 20℃の室温条件で、より長期の測定を行った。また、pH の低下速度は水との接触条件すなわち粉体浸漬とブロック浸漬で差異が生じると予想されることから、両条件での調査を行った。

粉体浸漬ではセメント配合 OPC:SF:FA=4:2:4 と 3:2:5 の2種類について、水セメント比 (水と OPC+SF+FA の質量比) 27.3% で混練し、円柱供試体で 28 日間 20℃にて養生した後、0.5mm 以下に粉砕し蒸留水中に固液比 0.5g ml⁻¹、20℃で浸漬した。この時点を経材令 0 日とした浸漬水の pH の材令による変化を図 4.3.2-1 に示す。なお、浸漬水の pH は空気中の CO₂ によっても低下することから、この影響を極力排除するため浸漬は密閉容器にて行っているが、pH の測定時は大気接触状態となっていることもあり、CO₂ の影響の有無を確認する必要がある。このため、浸漬前後の試料の X 線回折試験および示差熱分析を行った結果、空気中の CO₂ が測定結果に影響をおよぼしていないことが確認された。

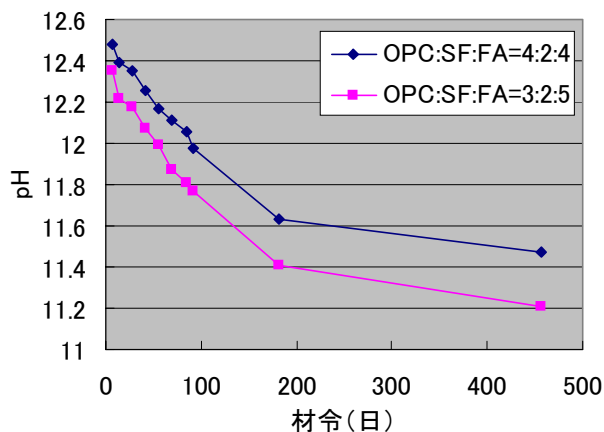


図 4.3.2-1 粉体浸漬における HFSC の pH 挙動

図 4.3.2-1 から pH 低下速度は 11.5 あたりから緩やかになり、この傾向はセメント配合による差は見られない。また、両配合の平均による低下速度は浸漬～200 日までは約 5×10^{-3} /日、これ以降は約 7×10^{-4} /日となっている。今後もこのような傾向が続くと仮定すると、目標である 11 以下となる

には、セメント配合 4:2:4 では 10 年程度を要することになる。

一方、ブロック浸漬ではセメント配合 4:2:4、3:2:5 に加えて 2:2:6 を対象に調査を実施した。各配合とも水セメント比 30% で混練し円柱供試体を 1 日養生した後脱枠し、密封容器内に 20℃ で水中養生した。この期間を材令として所定材令となった供試体をスライスし、7 日間真空乾燥した後 0.5mm 以下に粉砕して固液比 0.5g ml⁻¹ で蒸留水中に 20℃ で浸漬し、pH の平衡を確認後に測定を行った。この結果を図 4.3.2-2 に示す。

ブロック浸漬の場合は、約 500 日経過まで pH はほぼ直線的に低下し、低下速度は平均で 9×10^{-4} /日となっている。この後も同様の低下速度が続くと仮定した場合、セメント配合 4:2:4 では約 5 年後に pH11 以下となるが、粉体浸漬試験と同様 pH11.5 付近で低下速度がさらに小さくなる可能性もあり、pH11 となるまでにはさらに長期間を要することが考えられる。

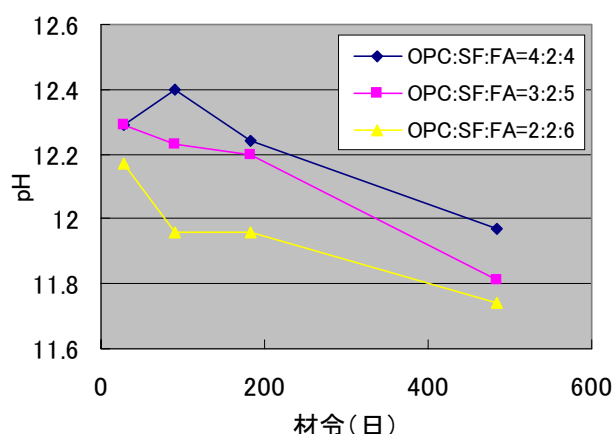


図 4.3.2-2 ブロック浸漬における HFSC の pH 挙動

HFSC の pH 低下挙動把握として、上記のような実験に加えてポズラン反応等 HFSC の水和に伴う化学反応のモデル化による解析評価が必要と考えられるが、これについては現在研究に着手した段階である。

ii) 吹付けコンクリートの透水性把握

吹付けコンクリートからコア採取した供試体の透水係数は、平成 13 年度の試験結果では OPC が 10^{-10} m s⁻¹ 程度であったのに対し、HFSC では 10^{-7} m s⁻¹ と 3 桁大きい結果となった。しかし、この実験では供試体の側面シールの止水性が失われていた可能性があったため、この検証を行う必要から、平

成 15 年度は事前に側面シールの確認を行った後に透水試験を実施した。

セメント配合 4:2:4 において 4 回の吹付け実験を行い、コア供試体による透水試験を行った結果、4 回とも透水係数は 10^{-10} m s⁻¹ 程度となり、セメント配合 4:2:4 の HFSC 吹付けコンクリートは、OPC と同等の透水性を持つことが確認された。

iii) 品質変動の把握

平成 14 年度の 4 回の FA サンプルングによる変動把握に加え、平成 15 年度はセメント配合 4:2:4 の場所打ちコンクリートの品質変動の把握を行った。

硬化前性状の品質としてスランプフローの変動を平成 14、15 年度の結果を合わせて図 4.3.2-3 に示す。目標とする値 65cm、目標とする管理範囲 ±5cm に対しこの範囲を大きく超える結果となっている。このことから、HFSC の混練時には品質のチェックや高性能減水剤添加量の調整など品質管理を十分に行う必要のあることがわかった。

なお、硬化後の品質である圧縮強度の変動は、通常の管理範囲内にあり、圧縮強度については品質管理上特に問題のないことがわかった。

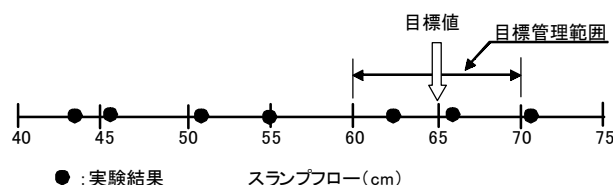


図 4.3.2-3 HFSC のスランプフローの変動

③ まとめ

HFSC の pH 低下は 20℃ の粉体浸漬条件で 11.5 付近まで 5×10^{-3} /日の割合で低下するが、これ以降の低下速度はこの 1/10 程度と緩慢になり、平成 15 年度の測定では目標とする 11 以下となることの確認には至っていない。また、20℃ のブロック浸漬条件での pH 低下速度は粉体浸漬条件より遅く、pH12.4～11.7 の範囲で約 9×10^{-4} /日となっている。pH の低下挙動については、試験による現象把握を行うとともに、モデル化による評価を試みる予定である。

HFSC の透水性については、吹付けコンクリートコアの透水試験により OPC と同等であることが確認された。

硬化後の圧縮強度については、品質変動上問題ないが、硬化前のコンクリートの流動性等は変動が大きく、十分な品質管理が必要であることがわかった。

今後はグラウトに適用可能な材料の開発、pH 低下挙動のモデル化、鉄筋腐食に関する耐久性評価を進め、幌延の深地層の研究施設において HFSC の総合的な適用性確認を行う予定である。

参考文献

入矢桂史郎，田島孝敏，納多勝(2004)：幌延深地層研究センターにおけるコンクリート材料の施工性に関する研究 (IV)，サイクル機構技術資料（契約業務報告書，株式会社大林組），JNC TJ5400 2003-08

4.3.3 幌延地下水環境下における緩衝材等の力学特性

① 課題と計画の概要

幌延の深地層の研究施設計画では岩盤・緩衝材クリープ試験、坑道閉鎖試験、定置精度確認試験、熱-水-応力-化学連成試験などの原位置試験が計画されている。これらの原位置試験は、「第2次取りまとめ」に示された人工バリア設計手法の具体的な地質環境に対する適用性の例示と評価、および人工バリアの長期的な現象理解と予測評価手法の信頼性向上を目的としている。そこで、原位置試験に用いる緩衝材の仕様（密度、ケイ砂混合率など）を検討するために、幌延の深地層の研究施設計画の研究用地（以下、幌延という）で採取された地下水や、NaCl 濃度水溶液を用いた室内試験を実施し、原位置試験位置で想定される海水系地下水環境での緩衝材の力学挙動を把握する。また、「第2次取りまとめ」に示された人工バリア設計手法の海水系地下水環境への適用性について確認し、必要であれば設計手法の見直しを行う。なお、これらは、岩盤・緩衝材クリープ試験、坑道閉鎖試験などの原位置試験基本計画を立案するための基礎データとなる。

② これまでの成果

i) 試験計画と試験条件

幌延の地下水環境下における、緩衝材などの圧縮ベントナイト混合材料の力学特性を把握するための試験としては、緩衝材のせん断挙動を把握するための一軸圧縮試験と、体積圧縮挙動を把握するための圧密試験を平成 15 年度に実施している（高治ほか，2004）。幌延の地下水環境に関しては、試験計画時点で得られている情報が限られており、原位置試験箇所における地下水を特定するには至っていない。そのため、本試験計画においては、サイト近傍のボーリング孔で採取された地下水を用いた試験を実施するとともに、地下水成分のばらつきを考慮した評価を実施するため、主要成分の NaCl に関して 2 種類の濃度の溶液を用いた試験もあわせて行った。図 4.3.3-1 に平成 15 年度の試験に用いたボーリング孔 HDB-6 の深度 GL-300m 付近で採取された地下水の成分分析図を示す。また、表 4.3.3-1 に平成 15 年度の試験項目と試験体および水質条件を、表 4.3.3-2 に試験体の仕様を示す。

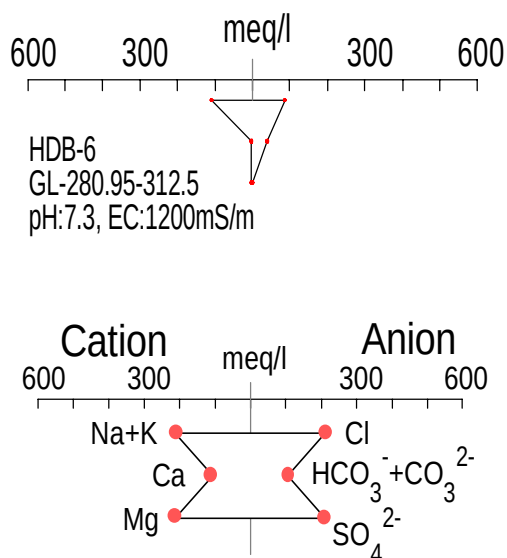


図 4.3.3-1 試験に用いた幌延地下水の成分 (HDB-6) (GL-300m 付近)

表 4.3.3-1 試験項目と水質条件の整理

試験種別	供試体仕様		試験溶液			
	有効粘土密度 [Mg/m ³]	珪砂混合率 [%]	蒸留水	幌延地下水	NaCl 溶液	
					低濃度 0.2 mol/l	中濃度 0.4 mol/l
一軸圧縮試験	1.2	30	○	○	—	—
	1.4	30	○	○	○	○
	1.6	30	○	○	—	—
圧密試験	1.4	30	—	○	○	—

表 4.3.3-2 試験体仕様

ベントナイト	クニゲル V1
ケイ砂混合率[wt%]	30 (重量比 3 号 : 5 号 = 1 : 1)
寸法[mm]	直径 φ 30 × 高さ h60
初期含水比[%]	10

ii) 一軸圧縮試験

0.2mol l⁻¹および 0.4mol l⁻¹の NaCl 溶液と蒸留水を用いた一軸圧縮試験の結果を以下に示す。図 4.3.3-2 は一軸圧縮強度を、図 4.3.3-3 は弾性係数を、それぞれイオン強度に対して示したものであ

る。これより、溶液のイオン強度が大きいほど、一軸圧縮強度および弾性係数は小さくなることが分かる。降水系環境である蒸留水に対して、イオン強度 0.4mol l^{-1} の NaCl 溶液では、強度、剛性が 2 割程度低下する結果となった。

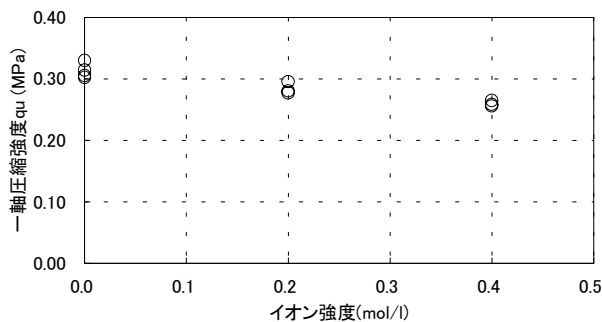


図 4.3.3-2 一軸圧縮強度とイオン強度の関係

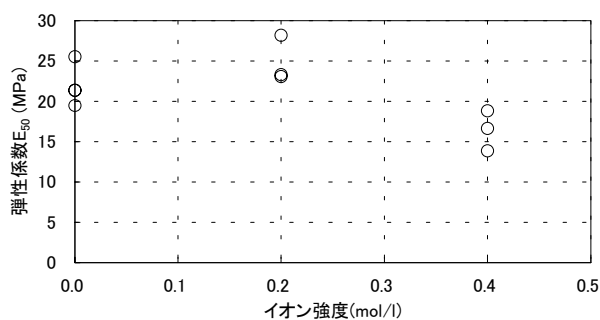


図 4.3.3-3 弾性係数とイオン強度の関係

iii) 圧密試験

図 4.3.3-4 に平成 15 年度に実施された圧密試験より得られる間隙比と圧密応力の対数(e-logp 曲線)の関係を示す。図には、蒸留水を用いた試験結果(高治・鈴木, 1999)もあわせて示した。蒸留水を用いた圧密試験結果は、除荷過程において非線形が強く現れ、除荷-再載荷において大きなヒステリシスが生じている。一方、NaCl 溶液や幌延地下水を用いた試験結果では、圧密過程においてはほぼ蒸留水と等しい挙動を示すが、除荷過程において高濃度の NaCl 溶液において蒸留水ほどの非線形性があらわれないことがわかる。これは、圧密試験における除荷過程では、圧縮ベントナイト特有の吸収による膨潤性が大きく影響して、非線形が現れると考えられるが、高濃度の NaCl 溶液中においては蒸留水中に比べて膨潤性が弱まるために除荷過程の非線形性が小さくなったと考えられる。

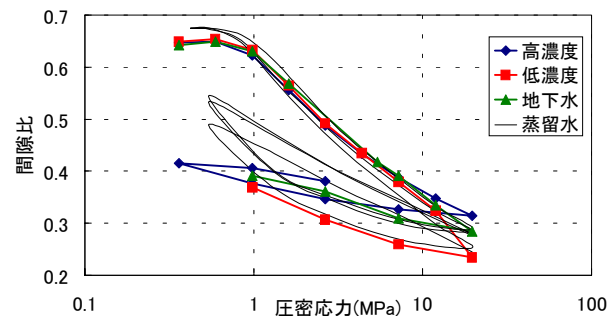


図 4.3.3-4 圧密試験結果

③ まとめ

平成 15 年度は海水系地下水である幌延の地下水環境下における緩衝材などの圧縮ベントナイト混合材料の力学特性について、降水系における力学特性との違いを概略的に把握した。

平成 16 年度以降は、幌延の地下水環境を対象として以下の項目に関する検討が必要と考えられる。

- ・ 含水比をパラメータとした一軸圧縮試験による不飽和状態の緩衝材の力学特性の把握。
- ・ 拘束圧下の力学特性を把握するための圧密非排水三軸圧縮試験の実施。
- ・ 得られたパラメータによる緩衝材の概略設計。

参考文献

- 高治一彦, 重野喜政, 下河内隆文(2004): 幌延の地下水環境下におけるベントナイト混合材料の力学特性に関する研究, サイクル機構技術資料(契約業務報告書; 株式会社竹中工務店), JNC TJ5400 2003-007.
- 高治一彦, 鈴木英明(1999): 緩衝材の静的力学特性, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-041.
- 核燃料サイクル開発機構(2004): 幌延深地層研究計画 平成 15 年度調査研究成果報告, サイクル機構技術資料, JNC TN5400 2004-001.

図 4.4-2 に示したように設計には多くの実験データが必要であり、現地の地質環境（主に地下水化学）を条件とした人工バリア材料の特性データを、既往のデータベースや知見により設定できない場合は、実験によるデータ取得が必要となる。

オーバーパックの設計には、取得に期間を要する腐食速度などの特性データが必要である。また、緩衝材の設計には、初期に現地の地下水条件における膨潤特性、透水特性、力学特性などの特性データが必要である。

人工バリア設計フローの検討と共に、入力データとなる地質環境と設計の関係の整理を行った。例えば、地下水の塩分濃度が高くなると緩衝材や埋め戻し材の膨潤性能が影響を受け、設計要件である自己シール性へ影響する可能性が生じる。この影響に対しては、モンモリロナイト含有量などの材料仕様での対応が適切と考えられる。このような地質環境と設計要件および設計での対応の関係を整理し、「第2次取りまとめ」における知見と合わせて、人工バリア設計に必要な地質環境データ項目を抽出した。これを表 4.4-1 に示す。

表 4.4-1 人工バリア設計に必要な地質環境データ

分類	必要な地質環境データ項目
地球化学	溶存酸素濃度 or Eh, pH 地下水組成
	優先: $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}/\text{H}_2\text{CO}_3^*$, SO_4^{2-} , $\text{HS}^-/\text{H}_2\text{S}$, Cl^- , イオン強度 (Na, Ca, K, Mg, 陰イオン) その他: P, NO_3^- , $\text{NH}_3(\text{aq})$, NH_4^+ , B
力学	地圧, 時間依存性パラメータ, 変形係数, ポアソン比, 一軸圧縮強度, 引張強度
水理	動水勾配, 地下静水圧, 流速
熱	温度, 熱伝導率, 比熱
その他	微生物 (硫酸塩還元菌, メタン生成菌, 鉄細菌), 岩盤の亀裂状態

表のデータ項目の殆どは数値で表示可能であり、代表値または数値の範囲で提示されることが望ましい。しかし、地表からの調査で得られる限られた情報から信頼性のある代表値を設定することは困難である場合も想定される。よって、設計用入力データを設定するに当たっては、地質環境モデルの構築などを通じた調査側と設計側の連携協力が不可欠である。

ii) 幌延の地質環境を条件とした原位置試験環境の検討

平成 15 年度は、上記 i) の概念的な設計検討とともに、これまでに幌延の深地層の研究施設計画で取得されたデータに基づき具体的な試験環境の

検討を実施した。

地下水化学は、人工バリア設計に影響を及ぼす重要事項であると共に、人工バリアに関する原位置試験に対しても重要な位置付けにある。地下水化学はコンクリート材料の有無、すなわち支保工の有無により大きく変わる。この支保工の有無は岩盤の物性ととも深度に依存することから、人工バリアに関する原位置試験環境の明確化にとって深度の設定は重要な位置付けにある。そこで、ここでは幌延の深地層の研究施設計画の研究所設置地区の地質環境条件を例にとり、深度とそれに応じた地山条件をパラメータとした原位置試験における試験孔の空洞安定性評価を行い、試験孔への支保工の必要性についての検討を行った。

ここで用いた岩盤の力学物性値や地圧条件、坑道支保工仕様、安定性の評価指標などは、「3.4.2 3) 深地層の工学技術の基礎に関する研究」におけるものと同様である。検討対象深度は2深度とし、1つは「第2次取りまとめ」における堆積岩系岩盤の処分深度であるとともに幌延の深地層の研究計画における地下施設の計画深度とされている500mとした。もう1つは、表 3.4.2-10 に示された地山条件の地下深部において空洞安定上最も有利、すなわち無支保の可能性の最も高いと予想される地山区分 13 (深度 549m~634m) を選定し、その上端部 549m からの余裕を考慮し 570m とした。また、地圧は、水平最大：水平最小：鉛直=1.2:0.8:1.0 と水平面内で異方性を持つことから、坑道方向は、断面方向の安定性において有利となる地圧最大方向と平行とした。坑道掘削後、坑道床面に掘削される試験孔の安定性においても、坑道をこの方向とする方が弾性論的には偏圧状態が緩和される方向にある。

解析は3次元有限差分法 (FLAC-3D) を用いて、図 4.4-3 に示すように、初期状態の自重解析→坑道掘削解析→試験孔掘削解析のステップで行った。

解析結果として試験孔を無支保とした場合の塑性領域とせん断ひずみ分布を図 4.4-4 に示す。500m, 570m 両深度とも塑性領域が発生しているが、500m 深度でより顕著である。せん断ひずみ分布では 500m 深度で限界ひずみの上限値を超える領域が見られる。なお、ここで限界ひずみとは、桜井によって提案された空洞安定性の評価指標であり (桜井, 1986), 「第2次取りまとめ」では中央値を超える部分が局所的であることを安定の条件としている。

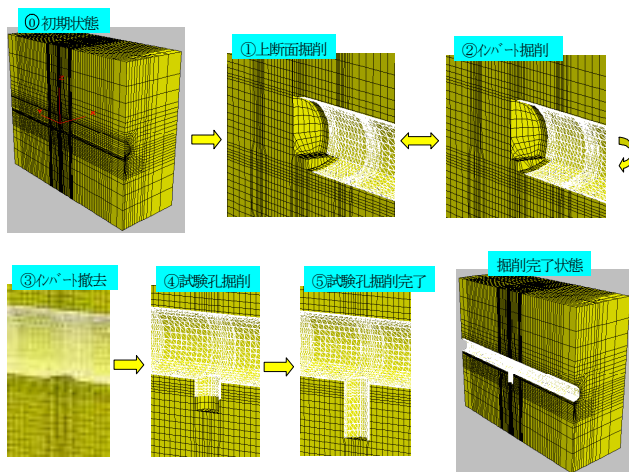
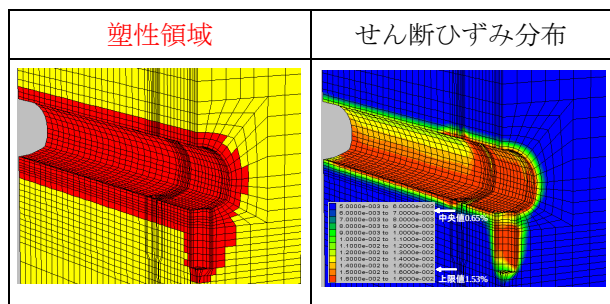


図 4.4-3 空洞安定解析のステップ

図 4.4-5 に試験孔を無支保とした場合と試験孔に厚さ 10cm のコンクリート支保工を設置した場合のひずみから算定した試験孔の壁面変位を示す。深度 500m では支保工を設置した場合でも限界ひずみから算定した変位の上限值と同程度の変位が生じるのに対し、深度 570m では無支保の場合でも中央値と同程度におさまる。

また、支保工の応力状態についても図 4.4-6 に示すように深度 500m では坑道床面と試験孔の一部にコンクリートの許容応力度 (9MPa) を越える部分が見られるのに対して深度 570m では許容内におさまっている。

< 深度 500m ・ 試験孔無支保 >



< 深度 570m ・ 試験孔無支保 >

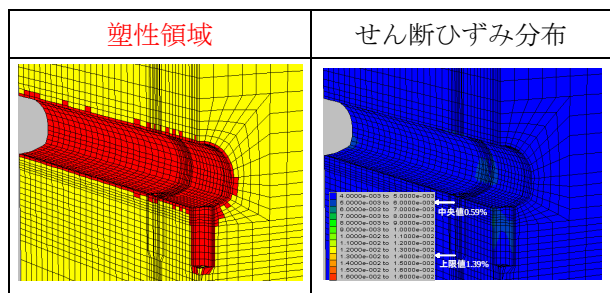


図 4.4-4 試験孔が無支保の場合の解析結果

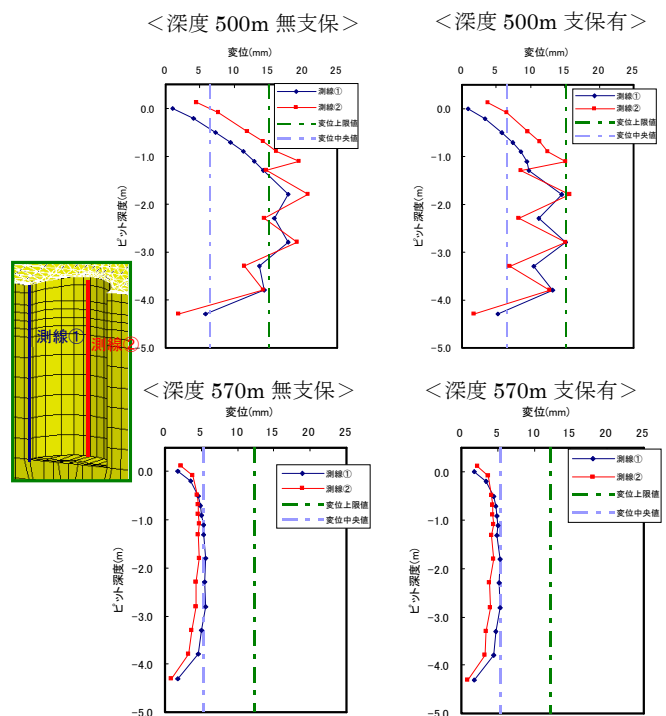


図 4.4-5 試験孔の壁面変位

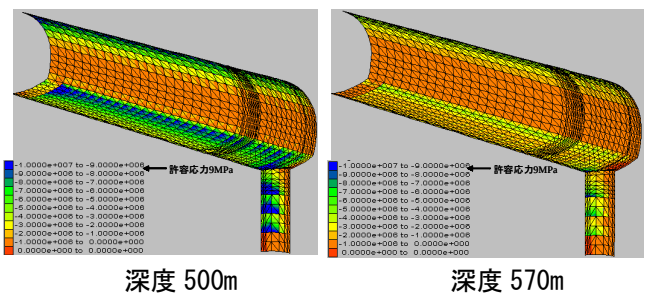


図 4.4-6 支保工の応力状態

以上の結果から原位置試験環境に影響を及ぼす支保工仕様の検討を行うと、深度 500m では厚さ 10cm の支保工条件で地山、支保工共に不安定状態となることから、より剛性の高い支保工材料や支保工厚さの設定が必要となる。さらに、試験孔掘削から支保工設置までの無支保状態での安定性確保も必要なことから、掘削方法や支保工の設置時期・方法など、空洞安定性を確保するための総合的な検討が必要となる。深度 570m でも塑性領域が発生していることから、亀裂など不均質部では試験孔壁面の肌落ちや岩塊の抜け落ちなどが生じる可能性がある。また、試験錐コアの性状として、乾湿繰り返しに対して強度低下を起こしやすく含水比の小さな変化に対しても敏感に反応するとの報告がある (井上・南, 2003)。よって、深度 570m では、原位置試験における安全確保の観点から支

保工設置が望ましいが、この深度では無支保状態で安定が保たれる可能性もある。よって、岩塊の抜け落ち等に対する措置が確保される場合は、原位置試験の目的に応じて試験孔を無支保とする試験環境が実現できる可能性がある。ただし、この深度により生じる空洞安定性の差異は、平成 15 年度に設定した地山区分および岩盤物性値の設定に起因するものである。

③ まとめ

実際の地質環境を条件として設計を行うとの観点から「第 2 次取りまとめ」における設計全体のフローを見直すとともに、人工バリア設計フローを設定した。また、設計に必要な地質環境データ項目の抽出を行った。

さらに、人工バリア設置環境および原位置試験環境に大きな影響を及ぼすコンクリート支保工の有無の検討として、幌延の現時点での地質条件を例にとり、人工バリアに関する原位置試験における試験孔の空洞安定性評価を行った。この結果、幌延地区に分布する堆積軟岩では、深度とそれに応じた地山条件によって、試験孔にコンクリート支保工が必要な場合もあることがわかった。

今後はここで設定された設計フローを参考として、幌延の地質環境を例とした人工バリア設計手法の適用性確認を進めていく予定である。

参考文献

- 井上博之，南 浩輔（2003）：軟岩の長期力学的変形挙動研究，サイクル機構技術資料（契約業務報告書，前田建設工業株式会社），JNC TJ8400 2002-061.
- 栗原雄二，油井三和，棚井憲治，川上 進，杉田 裕，谷口直樹，平井 卓，小川豊和，青柳茂男，松井裕哉，藤島 敦，中山 雅（2004）：人工バリア等の設計検討および幌延の地質環境を条件とした原位置試験環境の検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2004-006.
- 桜井春輔（1986）：NATM における現場計測と管理基準値，土と基礎，第 337 号／34-2，土質工学会，pp. 5-10.

【個別報告】

5. 安全評価手法の高度化

5. 安全評価手法の高度化

5.1 核種移行データベースの整備

5.1.1 放射性核種の熱力学データベースの整備

① 課題と計画の概要

これまでサイクル機構において構築してきた熱力学データベース(JNC-TDB)では、セレンやアクチニド元素などの酸化還元に鋭敏な元素の熱力学データの信頼性向上、幅広い地下水条件を対象に評価を行うための高イオン強度に対応できる活量係数モデルの整備などが重要な課題となっている。そのため、サイクル機構では熱力学データ取得とデータベース改良の両面から取り組んでおり、より信頼性の高いデータベースの構築を目指している。

このうち、熱力学データ取得については、評価対象元素のうち、特にIV価のアクチニドに重点を置いて取り組んでいる。これらの元素は、還元条件における熱力学データについては限られた情報しか存在しないため、熱力学データの拡充を進めている。

一方、データベース構築については、OECD/NEAにより編纂されたNp/Puのデータベース(Lemire et al., 2001)を複数の地球化学計算コードでの利用が可能な形に変換し、サイクル機構におけるデータベースシステムに取り込み公開するとともに、高イオン強度における溶解度評価を適切に行うために、活量係数モデルのひとつである、Pitzerモデル(Pitzer, 1987)に関するパラメータの調査とデータベース化を行うなど、データベースの内容と利用環境整備を継続している。

② これまでの成果

i) 炭酸共存下におけるネプツニウム(IV)の溶解度測定

本研究は、炭酸共存下、アルカリ性水溶液中におけるネプツニウム(IV)(Np(IV))の溶解度測定を行い、支配的な溶存化学種の熱力学データの導出を行ってきた。平成14年度は、高アルカリ性水溶液($\text{pH}_c = -\log [\text{H}^+] = 12.9$)におけるNp(IV)溶解度の全炭酸濃度(C_T)依存性を調べ、支配的な溶存化学種の同定を試みた。平成15年度は、平成14年度と同様に高アルカリ性水溶液中におけるNp(IV)の溶解度データの追加取得を行うことなどにより、

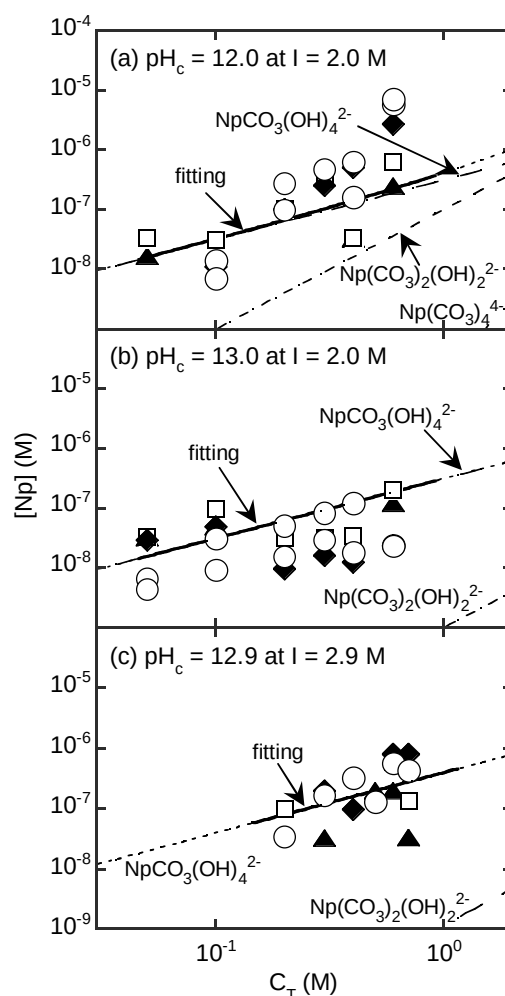


図 5.1.1-1 高アルカリ性水溶液中におけるNp(IV)溶解度の全炭酸濃度依存性

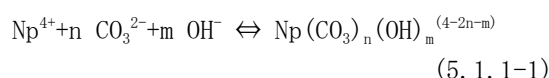
▲, □, ◆, ○は, (a) (b)ではそれぞれ0.5, 1, 3, 5 か月振とう後, (c)ではそれぞれ1, 2, 3, 4 か月振とう後の値を示す。実線は最小二乗法による適合結果を示し, 破線および点線はそれぞれ対応する化学種の寄与を示す。

より詳細な検討を行った。

平成14年度までは、溶液側に存在する過剰量のNpを沈殿させる過飽和法で溶解度測定を行ってきたが、平成15年度はNp(IV)の溶解度制限固相を溶解させる不飽和法で溶解度測定を行った。溶解度制限固相(非晶質酸化物 $\text{NpO}_2(\text{am})$ と推定)は、Npストック溶液にNaOHと還元剤 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ との混合溶液を加えることにより生成させた。液相を分画分子量 10^4 の限外ろ過フィルターで除去したのち、所定のイオン強度(I : 本実験条件では2.0M), pH_c (12もしくは13)および C_T (0.05~0.7M)に調製した溶液を添加することで、不飽和実験を開始した。実験開始から約1~5か月経過したのち、液相

の pH_c 、酸化還元電位（ORP：対銀/塩化銀電極），溶存 Np 濃度（[Np]）の測定を行った。実験はアルゴン雰囲気（酸素濃度 1ppm 未満）で行った。

実験結果を図 5.1.1-1 に示す。図 5.1.1-1 中の (a) および (b) が、平成 15 年度に新たに取得したもの、(c) は平成 14 年度に取得した過飽和法によるものである。いずれの図においても、 $\log [Np]$ の $\log C_T$ に対する傾き（Np 溶存化学種における炭酸イオン (CO_3^{2-}) の配位数を示す）が明確ではないため、傾き 1 の化学種と傾き 2 の化学種の両方の存在を仮定して、これまでに得られている溶解度の pH_c 依存性と併せて、最小二乗法による適合を行った。その結果、支配的な溶存化学種の炭酸イオン配位数は、1 であることがわかった。これらのことを踏まえて、これまでに報告してきた熱力学データ (Kitamura and Kohara, 2002) を訂正し、支配溶存化学種 $Np(CO_3)_2(OH)_2^{2-}$ と $NpCO_3(OH)_4^{2-}$ について、イオン強度 0 における熱力学データを導出した (Kitamura and Kohara, 2004)。導出された安定度定数 $\beta_{n,m}^0$ を表 5.1.1-1 に示す。なお、 $\beta_{n,m}^0$ は以下の反応式の平衡定数として定義される。



この $\beta_{n,m}^0$ を求める際には、Np(IV) 水和酸化物 $NpO_2 \cdot xH_2O$ の溶解度積として、 $10^{-56.7 \pm 0.5}$ (Lemire et al., 2001) を用いている。

表 5.1.1-1 溶解度試験から得られた Np(IV) ヒドロキソ炭酸錯体の安定度定数 $\beta_{n,m}^0$

元素	(n, m)	$\log \beta_{n,m}^0$	文献
Np	(2, 2)	46.4 ± 0.5	本研究
	(2, 2)	43.17	Rai et al., 1999a
U	(2, 2)	41.33	Rai et al., 1998
Pu	(2, 2)	44.76	Rai et al., 1999b
Np	(1, 4)	50.5 ± 0.5	本研究

アクチニド(IV)の炭酸／ヒドロキソ炭酸錯体の熱力学データについては、これまでもごくわずかの報告値しかなく、その信頼性にも疑問が残るものだったが、本研究によりその信頼性が向上したと考えられる。

ii) ネプツニウム(IV)水和酸化物の溶解度測定

平成 14 年度は、溶解度データの充実と熱力学デ

ータの信頼性向上を目的として、Np(IV) 水和酸化物の溶解度積を求めた。

Np(IV) 水和酸化物の溶解度積は地下水環境下での Np の溶解度を支配する重要な要素である。実験では過飽和法による溶解度測定を行った。まず、1M 過塩素酸中に溶解している Np(V) を水素窒素混合ガス (0.5%) バブリングにより、白金触媒を介して Np(IV) に還元させた。次にポリプロピレン製チューブに 1.0M $NaClO_4$ を入れ、これに還元させた Np の原液を加え、さらに NaOH, $HClO_4$ を用いて pH を調整した。試料水溶液は遮光したボックス内で固液平衡が確認されるまで室温で静置させた。静置後、溶液を分取し、分画分子量 3,000 のフィルターで遠心ろ過した。そのろ液を α 線半導体検出器で測定し、サンプルの Np 濃度を測定した。また、その時点でのサンプルの水素イオン濃度 (pH_c) および酸化還元電位を測定した。実験は酸素の影響を抑えるために、 N_2 ガス雰囲気のグローブボックス内で行った。

得られた試験結果と文献値を図 5.1.1-2 に示す (藤原・小原, 2004)。得られた溶解度は文献値と同様に pH_c の増加に伴い減少していたが、文献値と比較して高い傾向を示した。また、固相については目視による色の観察や液相の酸化還元電位から Np(IV) 水和酸化物であると考えられる。溶存化学種については TTA 抽出により、Np(IV) であることを確認した。

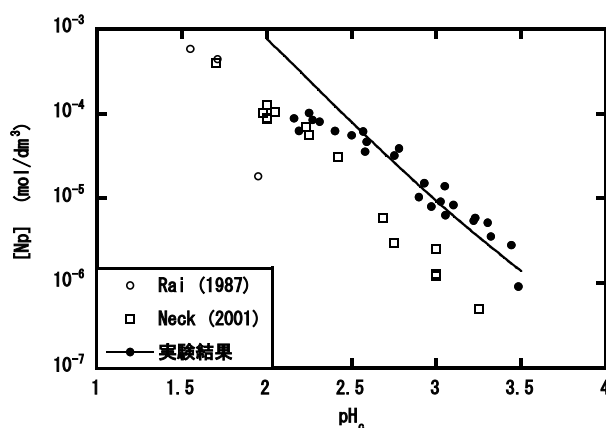
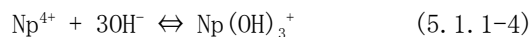
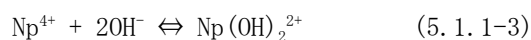


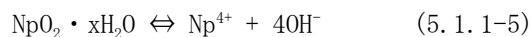
図 5.1.1-2 Np(IV) 水和酸化物の溶解度

次に、得られた溶解度の pH_c に対する傾きから、溶解している Np は (5.1.1-2～4) 式で表される加水分解を起こしていることが推定された。





これらのことを考慮して(5.1.1-5)式で表される見かけの溶解度積 (K_{sp}) を求めた。



得られた実験データを(5.1.1-2)～(5.1.1-5)式に最小二乗法で適合させることにより(図 5.1.1-2), 表 5.1.1-2 に示す溶解度積を求めた。

表 5.1.1-2 Np(IV) 水和酸化物の溶解度積

Ref.	Ionic strength(M)	log K_{sp}
Rai et al. (1987)	$I=0.03$	-53.3 ± 0.3
	$I=0$	-54.5 ± 0.3
Neck et al. (2001)	$I=0.1$	-54.4 ± 0.4
	$I=0$	-56.4 ± 0.4
本研究 (藤原・小原, 2004)	$I=1.0$	-53.1 ± 0.3
	$I=0$	-56.2 ± 0.3

このとき加水分解定数は多配位している加水分解種を唯一評価している文献値, $\log \beta_1^0 = 14.5 \pm 0.2$, $\log \beta_2^0 = 28.3 \pm 0.3$, $\log \beta_3^0 = 39.2 \pm 1$ (Neck and Kim, 2001) を用いた。イオン強度の補正は SIT 法 (specific ion interaction theory) (Grenthe et al., 1992) を用いた。補正の際には、以下に示すイオン相互作用係数 (ε) の値 (Grenthe et al., 1992) を用いた。

$$\varepsilon(\text{Np}^{4+}, \text{ClO}_4^-) = 0.82 \pm 0.05,$$

$$\varepsilon(\text{NpOH}^{3+}, \text{ClO}_4^-) = 0.5 \pm 0.2,$$

$$\varepsilon(\text{Np}(\text{OH})_2^{2+}, \text{ClO}_4^-) = 0.3 \pm 0.3,$$

$$\varepsilon(\text{Np}(\text{OH})_3^+, \text{ClO}_4^-) = 0.15 \pm 0.1,$$

$$\varepsilon(\text{OH}^-, \text{Na}^+) = 0.04 \pm 0.01$$

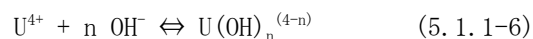
得られた溶解度積の値は Neck et al. (2001) の値に近く, Rai et al. (1987) の値と離れている。その原因は溶解度積を求める際に用いた加水分解反応および定数の評価の差であると考えられる。

iii) 高アルカリ水溶液中におけるウラン(IV)の加水分解種の熱力学データ取得

アクチニド(IV)イオンの加水分解種の熱力学データ取得の一環として, 高アルカリ性水溶液中におけるウラン(IV)の溶解度測定を行った。平成 14 年度は, イオン強度 1.0M における溶解度測定につ

いて報告した(森山, 2003)が, 平成 15 年度はイオン強度 0.5M および 2.0M における溶解度測定を行い, 実験データの拡充を行った。実験は過飽和法で行い, Ar 雰囲気グローブボックス中で, 光酸化の影響を排除するために暗所で試料の振とうを行った。イオン強度調整には NaClO_4 を, 還元剤には $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ を用いた。溶液の酸化還元電位から, U は IV 価で存在していると考えられる。振とう期間は最大 8 週間とし, 溶解度の経時変化を調べることで平衡到達の確認を行った。

得られた溶解度の pH_c およびイオン強度依存性を図 5.1.1-3 に示す。イオン強度が高くなると, 溶解度が低下していることがわかる。各イオン強度における見かけの熱力学データ(安定度定数 β_n) は, 次式で定義される。



本研究では, 各イオン強度における溶解度の pH_c 依存性から β_5 および β_6 を求め, それらのイオン強度依存性から, SIT 法を用いてイオン強度 0 における安定度定数 (β_5^0 および β_6^0) を決定した。得られた熱力学データは, $\beta_5^0 = 10^{48.02 \pm 0.39}$, $\beta_6^0 = 10^{49.11 \pm 0.31}$ であった。これらの安定度定数の報告は少なく, その文献 (Gayer and Leider, 1957; Ryan and Rai, 1983; Rai et al., 1990) でも β_5 の上限値しか得られておらず, イオン強度の評価もなされていないことから本研究で新規に得られた値である(森山, 2004; Fujiwara et al., 2003)。

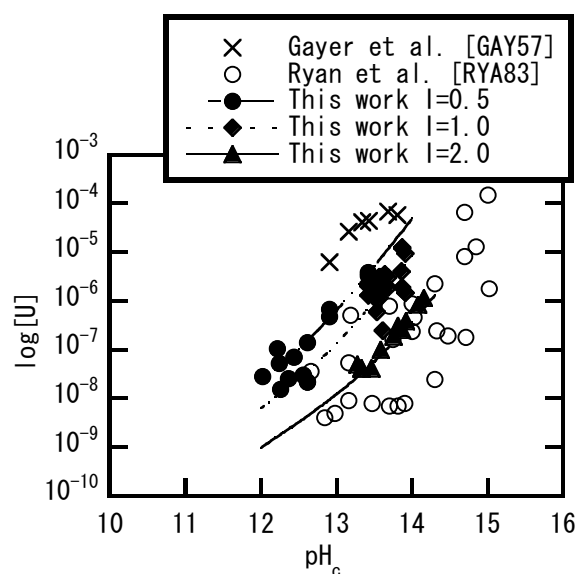


図 5.1.1-3 高アルカリ性水溶液中における U(IV) 溶解度
点は実験値, 線は解析値を表す。

また、アクチノイドイオンの加水分解定数の系統性に関する検討も引き続き実施した。静電相互作用に基づくモデルを用いて解析を行った結果、電気的中性の化学種（たとえば $U(OH)_4(aq)$ ）の熱力学データには多核化学種の影響が含まれているものが多く、値の信頼性に大きな疑問がある点などの指摘を行った（森山，2004）。

iv) 熱力学データベース利用環境の整備

溶液中の核種の溶解度や化学状態を求める方法の一つとして、地球化学計算コードを用いた計算があげられる。地球化学計算コードは、系に存在する化学種のトータルマスバランスと反応に関する熱力学データを用いた連立方程式を解くことにより平衡状態における溶液中の化学状態を求めるプログラムである。このプログラムは、熱力学データを格納した、独自フォーマットの熱力学データベースファイルが必要である。サイクル機構では「第2次取りまとめ」に向けて、独自の熱力学データの整備を進めてきたが（Yui et al., 1999a），OECD/NEA が国際プロジェクトとして、熱力学データの整備を進めており（Östholts and Wanner, 2000），参考のため、これらのデータについても各種の地球化学計算コードで利用可能な環境の整備を継続している。このプロジェクトでは、1992年にU（Grenthe et al., 1992），1995年にAm（Silva et al., 1995），1999年にTc（Rard et al., 1999）および2001年にNp/Pu（Lemire et al., 2001）について熱力学データの選定が行われて、2003年には、一部のデータのアップデートが行われている（Guillaumont et al., 2003）。サイクル機構では平成14年までにU，AmおよびTcデータについての熱力学データベースファイルの整備は終了しており，Np/Pu熱力学データについては，平成15年度にその整備を行った。Np/Puの熱力学データベースファイルはPHRREQE（Parkhurst et al., 1980）データベースフォーマットにまとめると同時にデータベースフォーマット変換プログラム（吉田・油井，2003）によりPHREEQC（Parkhurst, 1995），EQ3/6（Wolery, 1992）およびGeochemist's Workbench（Bethke, 1996）の各コードのフォーマットにも変換し整備した（吉田・笹本，2004）。整備を行ったデータベースは，サイクル機構 熱力学・収着データベースホームページ（<http://migrationdb.jnc.go.jp/>）にてダウンロード可能である（図5.1.1-4）。



図 5.1.1-4 サイクル機構 熱力学・収着データベースホームページ

v) 高イオン強度活量係数補正パラメータデータベースの整備

イオン強度の高い溶液中では化学種の濃度と活量の差が大きくなる傾向がみられる。この差を補正するパラメータとして活量係数が用いられる。活量係数は、系に存在する化学種の特性や溶液のイオン強度に依存して変化することが知られており，いくつかの活量係数補正法が提案されている（Langmuir, 1997）。地層処分の性能評価においては，イオン強度が0.6程度である海水系の地下水を想定する必要がある（Yui et al., 1999b），このような条件において，より精度よく活量係数補正が行える方法を検討することが求められている。

「第2次取りまとめ」における溶解度設定（東ほか，1999）では，イオン強度 $I=0.3$ 以上では活量係数を $I=0.3$ の値に固定する変形 Davies モデルを用いるとともに，高イオン強度条件に対して適用可能な Pitzer モデル（Pitzer, 1987）を用いて活量係数補正方法の妥当性を Am および Th の溶解度計算により議論した。しかしながら，東ほか（1999）が行った Pitzer モデルによる活量補正計算には，パラメータの充実により，より精度良く計算を行うことできる余地が残されているため，平成15年度においては，既往の Pitzer モデルのイオン間相互作用定数の報告値の調査とデータベースの整備を行い，最新の Pitzer パラメータデータベースを用いた解析を行った（吉田ほか，2004）。その結果，化学種の電荷の大きさに加えて，その

正負の違いにおいても、イオン強度変化に伴う活量係数の傾向性の違いが確認された。また、アメリカシウム（Am）の水酸化物錯体が支配的となる海水系地下水条件（ $I=0.6$ ）での溶解度計算では、顕著な差は見られなかったが、 $I=1$ を超える領域において、Davies モデルは Pitzer モデルに比べて過少に溶解度を評価していることが示された。

③ まとめ

還元条件下でのネプツニウム（Np(IV)）の溶解度測定を継続し、新たなヒドロキソ炭酸錯体の熱力学データを導出した。また、新たに Np(IV) 水和酸化物の溶解度積を得ることができた。今後は、Np(IV) 水和酸化物の溶解度積の値の信頼性を向上させるため、イオン強度をパラメータとした試験を継続して実施するとともに、Np(IV) の加水分解定数の値についても再評価を実施する。さらに、他のアクチニド(IV) と併せた、総合的な熱力学データの評価により信頼性向上を目指していく。

熱力学データベースの利用環境の整備としては、OECD/NEA で整備された Np/Pu の熱力学データを各地球化学コード用のフォーマットに変換・整備し利用可能とした。高イオン強度活量係数補正パラメータの整備としては、既往の Pitzer パラメータの報告値を調査し、データベースの整備を行った。今後も、国際的な最新情報に基づきデータベースの整備を継続する。

参考文献

- 東 侍郎, 柴田 雅博, 油井 三和, 澁谷 朝紀, 能登屋 信, 吉田 泰 (1999) : 地層処分研究開発第 2 次取りまとめにおける放射性元素の溶解度評価, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-071.
- Bethke, C. (1996) : Geochemical Reaction Modeling, Oxford Univ. Press, New York.
- 藤原 健壮, 小原 幸利 (2004) : Np(IV) 水和酸化物の溶解度積, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集, E-21.
- Fujiwara, K., Yamana, H., Fujii, T., Kawamoto, K., Sasaki, T. and Moriyama, Y. (2003) : Solubility of Uranium(IV) Hydrate in High pH Solution under Reducing Conditions., presented at 9th Int. Conf. on Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere, MIGRATION'03, Abstracts, pp. 51-52.
- Gayer, K. M. and Leider, H. (1957) : The Solubility of Uranium(IV) Hydroxide in Solutions of Sodium Hydroxide and Perchloric Acid at 25° C. Can. J. Chem. 35, p. 5.
- Grenthe, I., Fuger, J., Konings, R. J. M., Lemire, R. J., Muller, A. B., Nguyen-Trung, C. and Wanner, H. (1992) : The Chemical Thermodynamics of Uranium, OECD/NEA, North-Holland, Amsterdam.
- Guillaumont, R., Fanghänel, T., Neck, V., Fuger, J., Palmer, D. A., Grenthe, I. and Rand, M. H. (2003) : Update on the Chemical Thermodynamics of Uranium, Neptunium, Plutonium, Americium and Technetium, OECD/NEA, North-Holland, Amsterdam.
- Kitamura, A. and Kohara, Y. (2002) : Solubility of Np(IV) in Carbonate Media, J. Nucl. Sci. Technol., Suppl. 3, p. 294.
- Kitamura, A. and Kohara, Y. (2004) : Carbonate Complexation of Neptunium(IV) in Highly Basic Solutions, Radiochim. Acta, in press.
- Langmuir, D. (1997) : Aqueous Environmental Geochemistry, Prentice Hall, Inc.
- Lemire, R. J., Fuger, J., Nitsche, H., Potter, P., Rand, M. H., Rydberg, J., Spahiu, K., Sullivan, J. C., Ullman, W. J., Vitorge, P. and Wanner, H. (2001) : Chemical Thermodynamics of Neptunium and Plutonium, OECD/NEA, North-Holland, Amsterdam.
- 森山裕丈 (2003) : 超ウラン元素の加水分解及び錯生成に関する研究 II, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書), JNC TJ8400 2002-054.
- 森山裕丈 (2004) : 超ウラン元素の加水分解及び錯生成に関する研究 III, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書), JNC TJ8400 2003-058.
- Neck, V., Kim, J. I., Seidel, B. S., Marquardt, C. M., Dardenne, K., Jensen, M. P. and Hauser, W. (2001) : A Spectroscopic Study of the Hydrolysis, Colloid Formation and Solubility of Np(IV). Radiochim. Acta 89, p. 439.
- Neck, V. and Kim, J. I. (2001) : Solubility and Hydrolysis of Tetravalent Actinides. Radiochim. Acta 89, p. 1.
- Östholts, E. and Wanner, H. (2000) : The NEA Thermochemical Data Base Project, Ver. 25, OECD/NEA, France.
- Parkhurst, D. L., Thorstensen, D. C. and Plummer, L. H. (1980) : PHREEQE-A Computer Program for Geochemical Calculations, U. S. Geological Survey, Water-Resources Investigations 80-96.
- Parkhurst, D. L. (1995) : User's Guide to PHREEQC-A Computer Program for Speciation, Reaction-Path, Advective-Transport, and Inverse Geochemical Calculations, U. S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 95-4227.
- Pitzer, K. S. (1987) : Thermodynamic Model for Aqueous Solutions of Liquid-like Density. In Thermodynamic Modeling of Geological Materials: Minerals, Fluids and Melts, ed Carmichael, I. S. E. and Eugster, H. P., Reviews in Mineralogy 17, pp. 97-142. Min. Soc. Am.

- Rai, D., Swanson, J. L. and Ryan, J. L. (1987) : Solubility of $\text{NpO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}(\text{am})$ in the Presence of $\text{Cu(I)}/\text{Cu(II)}$ Redox Buffer. *Radiochim. Acta* 42, p. 35.
- Rai, D., Felmy, A. R. and Ryan, J. L. (1990) : Uranium(IV) Hydrolysis Constants and the Solubility Product of $\text{UO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}(\text{am})$. *Inorg. Chem.* 29, p. 260.
- Rai, D., Felmy, A. R., Hess, N. J., Moore, D. A., Yui, M. (1998) : A Thermodynamic Model for the Solubility of $\text{UO}_2(\text{am})$ in the Aqueous $\text{K}^+ - \text{Na}^+ - \text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2-} - \text{OH}^- - \text{H}_2\text{O}$ System. *Radiochim. Acta* 82, p. 17.
- Rai, D., Hess, N. J., Felmy, A. R., Moore, D. A. and Yui, M. (1999a) : A Thermodynamic Model for the Solubility of $\text{NpO}_2(\text{am})$ in the Aqueous $\text{K}^+ - \text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2-} - \text{OH}^- - \text{H}_2\text{O}$ System. *Radiochim. Acta* 84, p. 159.
- Rai, D., Hess, N. J., Felmy, A. R., Moore, D. A., Yui, M. and Vitorge, P. (1999b) : A Thermodynamic Model for the Solubility of $\text{PuO}_2(\text{am})$ in the Aqueous $\text{K}^+ - \text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2-} - \text{OH}^- - \text{H}_2\text{O}$ System. *Radiochim. Acta* 86, p. 89.
- Rard, J. A., Rand, M. H., Anderregg, G. and Wanner, H. (1999) : Chemical Thermodynamics of Technetium, OECD/NEA, North-Holland, Amsterdam.
- Ryan, J. L. and Rai, D. (1983) : The Solubility of Uranium(IV) Hydrous Oxide in Sodium Hydroxide Solutions under Reducing Conditions. *Polyhedron* 2, p. 947.
- Silva, R. J., Bidoglio, G., Rand, M. H., Robouch, P. B., Wanner, H. and Puigdomenech, I. (1995) : Chemical Thermodynamics of Americium, OECD/NEA, North-Holland, Amsterdam.
- Wolery, T. J. (1992) : EQ3/6, A Software Package for Geochemical Modeling of Aqueous Systems : Package Overview and Installation Guide (version 7.0), Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-MA-110662PT1.
- 吉田 泰, 油井 三和 (2003) : 熱力学データベースフォーマット変換プログラムの作成, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2002-024.
- 吉田 泰, 笹本 広 (2004) : OECD/NEA で整備された熱力学データベース利用環境の整備 その 1-Np および Pu の熱力学データ-, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-027.
- 吉田 泰, 笹本 広, 神徳 敬 (2004) : 高イオン強度条件下における活量係数補正パラメータの整備, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-043.
- Yui, M., Azuma, J. and Shibata, M. (1999a) : JNC Thermodynamic Database for Performance Assessment of High-level Radioactive Waste Disposal System, JNC Technical Report, JNC TN8400 99-070.
- Yui, M., Sasamoto, H. and Arthur, R. (1999b) : Groundwater Evolution Modeling for Second Progress Performance Assessment (PA) Report, JNC Technical Report, JNC TN8400 99-030.

5.1.2 収着・拡散データベースの整備

① 課題の計画と概要

「第2次取りまとめ」において、緩衝材および岩石中での収着、拡散現象に関わるパラメータは、バッチ式収着試験や拡散試験から得られる実測値に基づき設定した。設定にあたっては、既存文献のデータ調査を行い、バッチ式収着試験データと国内の岩石に対する拡散試験データをもとにデータベースとして整備(澁谷ほか, 1999; Sato, 1999)し、利用した。収着、拡散の既存データをデータベースとしてまとめることは、核種移行挙動の把握や安全評価における核種移行パラメータの信頼性評価の検討に必須であることから、今後とも更新、整備作業を継続する。また、データベースに含まれるデータには、海水系地下水条件でのデータが不足しているため、クオリティなどの施設において、データの拡充を行なっていく。さらに、データベース整備・取得を通じて得られた各種の実験方法の長所短所や、実験上留意すべき点などに関する知見を整理し、データ取得方法の標準化に資する基盤情報を整備するとともに、収着データベース(JNC-SDB)を用い、収着データの信頼度付与のための手法開発を行なう。

② これまでの成果

データの拡充あるいは信頼性向上の観点から必要と判断されたデータの取得を進めてきており、平成14年度は、ベントナイト及び堆積岩に対する海水系地下水でのセシウム(Cs)の収着に関する研究、砂岩中のセシウム(Cs)及びヨウ素(I)の拡散移行に関する研究を行なった。平成15年度は、Csのベントナイト及び堆積岩に対する海水系地下水での収着試験を継続しデータを拡充すると共に、固液界面の反応に関する収着モデルを用いて試験結果の解析を行なった。また、砂岩及び凝灰岩に対する海水系地下水でのスズ(Sn)、鉛(Pb)、トリウム(Th)の収着に関する研究を実施した。さらに、収着に関するデータの継続的な文献調査を行ない、「第2次取りまとめ」の際に整備した収着データベースの更新作業を行なった。

i) ベントナイトおよび堆積岩に対する海水系地下水でのCsの収着に関する研究

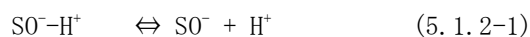
平成14年度までに、「第2次取りまとめ」で設定した還元性海水系モデル地下水(SRHP)における、

ベントナイト(クニゲルV1®)および堆積岩(砂岩および泥岩)に対するセシウム(Cs)の分配係数(K_d)を測定してきた。また、比較のために、塩化ナトリウム(NaCl)水溶液中におけるCsの K_d も測定した。その結果、ベントナイトに対する K_d では、同じイオン強度のSRHPとNaCl水溶液で同じ値を示した一方で、堆積岩に対する K_d では両者の値が一致しなかった。また、NaCl濃度依存性について調べた結果、ベントナイトでは明確に依存性がみられた一方、堆積岩では明確な依存性がみられなかった。

これらの結果を受けて、平成15年度は K_d 値の拡充を行ったほか、収着メカニズムの解明を目的として、固液界面の反応に関するモデルを用いた予察的な解析を試みることにした。 K_d 値の拡充としては、塩化カリウム(KCl)水溶液中における各固相に対する K_d の取得、NaClおよびKCl水溶液中における砂岩に対する K_d のCs濃度依存性の取得などを行った。実験は、これまでと同様にバッチ法を用いて行った。ポリプロピレン製容器に1gの固相(一部の試料は0.2g)とNaClもしくはKCl水溶液20mlを導入し、Cs-137トレーサーを含むCs水溶液を添加することで試験を開始した。水溶液中のKCl濃度は0.02、0.1および0.7Mとし、 K_d のCs濃度依存性を調べる実験では0.1MのNaClおよびKCl水溶液を用いた。実験開始から2週間および4週間経過したのち、溶存Cs濃度を定量することにより K_d を算出した。炭酸ガス等の混入を防ぐことを目的として、実験は N_2 雰囲気(O_2 濃度1ppm未満)のグローブボックス中で行った。

結果の例として、砂岩に対して得られた K_d のpH、NaCl濃度およびKCl濃度依存性の結果を図5.1.2-1に、平衡Cs濃度依存性を図5.1.2-2に示す。図5.1.2-1から、 K_d にNaCl濃度依存性がみられない一方、KCl依存性が明確にみられていることがわかる。このことは、砂岩に対しては、 Cs^+ は Na^+ とは競合せず K^+ とのみ競合する反応によって収着していることを示している。

このことから、 Cs^+ と K^+ の競合のみを考慮し、固液界面の反応に関する収着モデル(表面錯体モデル)を用いて、収着メカニズムの解明を試みることを目的とした予察的な解析を行うことにした。本研究では、固相表面に単一の収着基SOHが存在し、表面近傍における以下のような反応により Cs^+ および K^+ が収着するものとする。



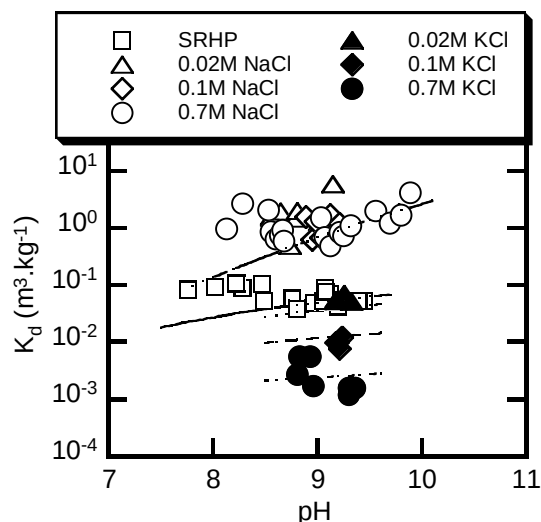


図 5.1.2-1 種々の水溶液における砂岩に対する Cs の分配係数 (K_d)
破線および実線は、表面錯体モデルを用いた解析結果を、プロットに対応する KCl 濃度ごとに示したものの。

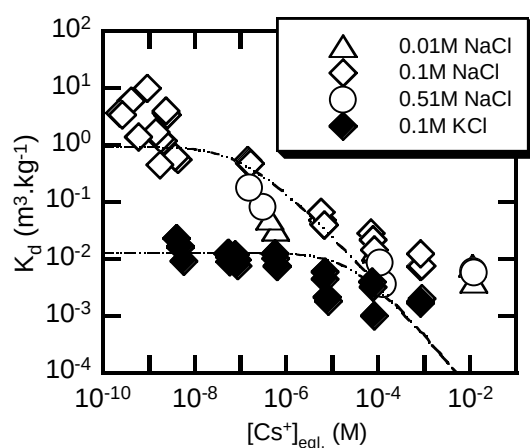


図 5.1.2-2 砂岩に対する Cs の分配係数 (K_d) の平衡 Cs 濃度 ($[Cs^+]_{eq.}$) 依存性 (pH: 約 8.5)
波線の説明については、図 5.1.2-1 を参照。



モデルでは、固液界面の表面電荷およびポテンシャルなどに関する式を連立し、表面電荷を求める式を導出した。さらに、この表面電荷から K_d を求める式を導出し、式(5.1.2-1)～(5.1.2-3)の各平衡定数および固液界面の静電容量をパラメータとして最小二乗適合を行い、パラメータの最適値を決定した。なお、NaCl 水溶液中の K^+ 濃度は、固相

から浸出するイオン濃度を測定した結果から、 1×10^{-4} M とした。

解析で得られた計算値を図 5.1.2-1 および図 5.1.2-2 に実線および波線で示す。 K_d の KCl 濃度依存性および Cs 濃度依存性が比較的良好に説明できていることがわかる。しかしながら、Cs 濃度の高い条件では実験値と計算値の不一致がみられており、複数の収着基の存在の可能性が示唆される。一方、泥岩に対して同様の解析を行ったところ、砂岩と同一のパラメータ最適値が得られたことから、今後他の堆積岩に対して、同様のパラメータが適用できるかどうか調べることを検討する。なお、支配的な収着基をもつ鉱物については明確にはなっていないが、Cs の収着が Na とは競合しないことと、砂岩中に含まれる粘土鉱物の粉末 X 線回折の結果とを併せて考えると、収着を支配する鉱物はイライトではないかと考えられる(北村ほか, 2004)。

ii) 砂岩及び凝灰岩に対する海水系地下水での Sn, Pb, Th の収着に関する研究

高レベル放射性廃棄物地層処分の性能評価上重要となる Sn, Pb, Th について、砂岩及び凝灰岩に対する収着データ (分配係数: K_d) を測定し、データを拡充するため、バッチ式収着試験を実施した。なお、サイクル機構の研究開発では、軟岩系の場合の坑道の支保工として低アルカリ性セメントを中心に研究開発を進めているが、処分事業においては、普通セメントを利用することも想定され、その場合、普通セメント反応溶液の影響により処分環境が高 pH 条件に曝される可能性がある。そこで、pH をパラメータとした高 pH 条件での収着試験も一部実施し、データ取得を行った(中澤ほか, 2004)。いずれの試験においても、事前に溶解度試験を行い、初期濃度が溶解度を越えない条件で収着試験を実施した。各元素に対する試験結果をまとめる。

a) Sn の試験結果

Sn については、蒸留水および人工海水と砂岩との反応後溶液に対する K_d を測定した。Sn の砂岩に対する K_d は、蒸留水系では、 $0.4 \sim 1.2 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 、人工海水系では、 $1.0 \sim 1.9 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ であった。固相分離方法としては、遠心分離、 $0.45 \mu\text{m}$ メンブレンフィルター、MWC010,000 の限外ろ過をシリーズで行い、溶液中の Sn 濃度を分析した。 K_d の幅は、固相分離方法の違いによる溶液中の Sn 濃度の違いを反映している。また pH 12 に調整した人工海水系溶

液を用いた場合、 K_d は、 $0.3 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 程度となった。 K_d は、pHが高くなるにつれ減少する傾向が認められるものの、オーダーで変化する様な違いは無かった。なお、収着試験に先立ち行なわれたSnの溶解度試験結果に基づけば、蒸留水系および人工海水では、溶解度制限固相は $\text{SnO}_2(\text{am})$ と推定され、支配化学種として $\text{Sn}(\text{OH})_4$ や $\text{Sn}(\text{OH})_5^-$ が考えられた。一方、pH 12に調整した人工海水系溶液の場合、溶解度制限固相は $\text{Ca}[\text{Sn}(\text{OH})_6]$ と推定され、支配化学種は $\text{Sn}(\text{OH})_6^{2-}$ と考えられた。この様な溶液系やpHの違いによる支配化学種の違いが K_d の違いに影響を与えていると考えられる。

b) Pb の試験結果

Pbについては、人工海水と砂岩および凝灰岩との反応後溶液に対する K_d を測定した。 K_d は、砂岩の場合 $1.7 \sim 3.3 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 、凝灰岩の場合 $3.5 \sim 7.1 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ であり、凝灰岩の方がやや K_d が大きかった。 K_d の幅は、固相分離方法の違いによる溶液中のPb濃度の違いを反映している。

c) Th の試験結果

Thについては、炭酸濃度をパラメータとし、人工海水と砂岩との反応後溶液に対する K_d を測定した。 K_d は、人工海水では $2.3 \sim 8.2 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ であったが、炭酸濃度を高めた場合、固相への収着量が非常に少なく、検出限界未満の値であった。この原因として、炭酸濃度が高い場合、水酸化炭酸錯体や炭酸錯体等の陰イオンがThの支配化学種となるため、固相への収着性が低くなったと考えられた。なお人工海水の場合の K_d の幅は、固相分離方法の違いによる溶液中のTh濃度の違いを反映している。

iii) 収着データベースの更新

「第2次取りまとめ」において、人工バリア及び天然バリアでの放射性核種の遅延能力を評価する上で重要となる収着データ（分配係数： K_d ）をとりまとめたデータベース（JNC-SDB）を整備した（澁谷ほか，1999）。JNC-SDBの整備後、約5年が経過しており、その間に収着に関する新たなデータが多数報告されている。そこで、JNC-SDB整備以降の最新の収着データを収集し、収着データベースを拡充・更新するため、国際的な原子力文献情報システムであるINIS（International Nuclear Information System）を用いて、1998年～2003年の間に公開された文献を対象に調査・データ収集を行ない、JNC-SDBの更新作業を行なった（陶山・

笹本，2004）。今回の更新作業により、Am, Cm, Cs, Np, Pb, Pu, Se, Tc, Uといった性能評価上重要な元素に加え、Ag, Ba, Co, Eu, Fe, I, Mn, Mo, Sr, Znについてもデータが増加し、全体で19元素に対し、1236件のデータが増加した。また、一部の元素については、これまでより K_d の頻度分布がより明確になり、データの分布を把握し易くなった（図5.1.2-3）。

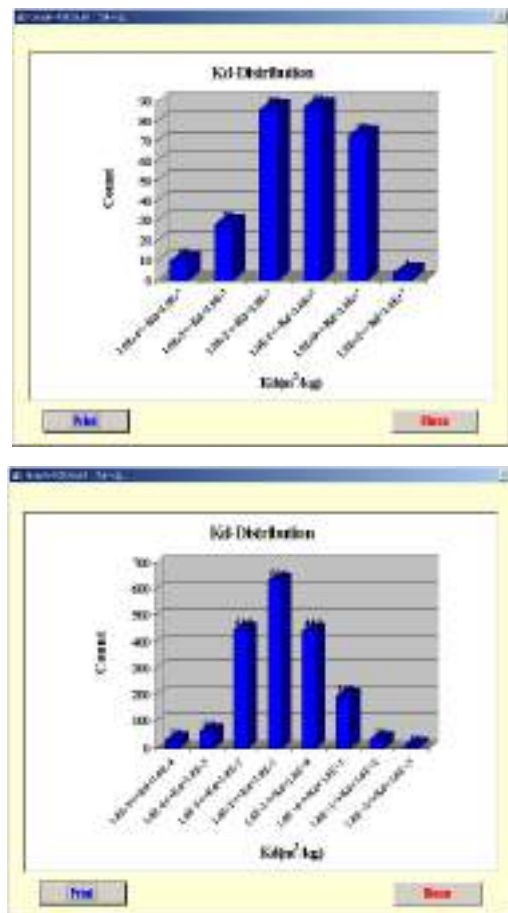


図 5.1.2-3 更新前、および更新後の収着データベースのヒストグラムの比較例（Sr 分配係数の全データ，更新前：上図，更新後：下図）

iv) JNC-SDB を用いた収着データの信頼度付与のための手法開発

JNC-SDBに含まれる放射性核種のベントナイトおよび岩石に対する収着データは、19,000件を超える（澁谷ほか，1999）。この様な膨大なデータを有するJNC-SDBには、様々な実験条件・手法で得られたデータが含まれているため、全てのデータを同一の条件や信頼度で評価することはできない。

そのため、個々のデータに対し、データの信頼度を付与し、信頼度に応じた評価を行なう必要がある。

そこで、収着データの信頼度を評価する際に、どのような実験条件等を考慮すれば良いか（例えば、初期濃度、固液分離方法など）を検討し、個々の収着データに対し信頼度を付与するための便宜的な基準を設定した（上田・久野，2004）。今回、設定した基準は、①報告書等に記載されている記述（実験方法、実験条件等）の網羅性、②実験方法・実験条件等に基づく個々の収着データの信頼性、③データ相互間の整合性、により構成される。②の基準については、信頼度のレベルをどう考慮すれば良いかについても検討した。

今後は、この基準をもとに、いくつかの放射性核種を例に JNC-SDB に含まれる収着データに対し信頼度評価を進めていく予定である。

③ まとめ

パッチ法により砂岩及び凝灰岩に対する海水系地下水での Cs, Sn, Pb, Th の収着データを取得し、海水系地下水でのデータを拡充した。Cs については、固液界面の反応に関する収着モデルを用いて試験結果の解析を行なった。

放射性核種の収着データに関しては、試験によるデータ取得と並行し、INIS を用いて文献調査を行ない、1998 年～2003 年の間に公開された文献データを JNC-SDB に取り込み、データベースの更新作業を行なった。

また、JNC-SDB を用いて収着データの信頼度付与のための手法開発に着手し、収着データに信頼度を与える上で考慮すべき項目とその信頼度レベルについて検討し、便宜的な基準を設定した。今後はこの基準の適用性について、JNC-SDB に含まれる収着データを用いて検討を進めていく。

参考文献

- 北村 暁, 戸村 努, 中山 雅, 佐藤治夫(2004) : 堆積岩に対するセシウムの分配係数に及ぼす競合イオンの影響, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集, H11, p. 817.
- 中澤俊之, 岡田賢一, 室井正行, 柴田雅博, 陶山忠宏, 笹本 広 (2004) : 海水系地下水における砂岩および凝灰岩に対する Sn・Pb・Th の分配係数, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-039.
- Sato, H. (1999) : Diffusivity Database (DDB) for Major Rocks : Database for the Second Progress Report, JNC Technical Report, JNC TN8400 99-065.

澁谷朝紀, 陶山忠宏, 柴田雅博 (1999) : 核種のベントナイトおよび岩石に対する収着データベース, サイクル機構技術資料, JNC TN8410 99-050.

陶山忠宏, 笹本 広 (2004) : JNC 収着データベース (JNC-SDB) の更新 : 1998 年～2003 年までに公開された文献データの追加, サイクル機構技術資料, JNC TN8410 2003-018.

上田真三, 久野義夫 (2004) : 核種移行に関する基盤データ構築手法の検討および個別モデルの高度化に関する研究, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書 ; 三菱マテリアル株式会社), JNC TJ 8400 2003-065.

5.2 安全評価モデルの高度化

5.2.1 岩盤中水理・物質移行モデルの高度化

1) 結晶質岩中における亀裂ネットワークモデルの改良・高度化研究

① 課題と計画の概要

亀裂ネットワークモデルは亀裂性岩盤を対象とした水理・物質移行モデルの候補のひとつに挙げられ、「第2次取りまとめ」においてもレファレンスケースモデル構築の基盤として用いられている。「第2次取りまとめ」では、サイトを特定せず、坑道周辺岩盤における物質移行の遅延特性に主眼を置いたニアフィールドアプローチの観点から、坑道より数十メートルから百メートルスケールの岩盤を対象としているが、「第2次取りまとめ」以降の研究開発においては、特定のサイトデータを対象とし、かつ地上からの調査のように大きなスケールから坑道周辺への小さなスケールへ展開される段階的な調査に応じたモデルの改良・適用事例の検討が必要となる。特に、地上からの調査段階においては、処分場周辺の地下水流動評価の必要性から数キロメートルから十数キロメートル四方を対象としたモデル化機能が必要となる。その場合、平成13年度に作成した

- ・地表面や不整合面、断層面といった曲面
- ・任意のモデル境界面形状

を合理的に表現する機能に加えて、亀裂ネットワークモデル固有の課題に対処する必要がある。すなわち、亀裂ネットワークモデルは透水性に寄与する個々の亀裂を陽にモデル化するため、計算機容量および計算時間の観点から、モデル化できる亀裂の数に限りがあるため、亀裂ネットワークモデルでモデル化可能なスケールに限界が生じることとなる。このような課題に対しては、亀裂のネットワーク構造を等価な多孔質媒体に近似し、多孔質連続体モデルでの浸透流問題に変換する試みが数多く行われてきた。しかしながら、等価多孔質媒体近似の過程には複数の仮定を含むことから、評価結果を調査現場へフィードバックすることが困難になる可能性があった。

その一方で、詳細な調査の対象となる領域は瑞浪超深地層研究所（例えば、3.3 節参照）のように空間的に限定される反面、より広域的な地下水流動を評価する領域（ローカルスケール）内においては、取得できるデータの質や量に粗密が生じる可能性も

ある。

以上の観点から、詳細な調査の対象となる領域においては亀裂ネットワークモデルを用いつつ、調査データの質や量が相対的に疎な周辺領域においては等価多孔質媒体近似を行う連続体モデルを用いることにより計算容量を低減させた入れ子式モデル化機能を開発した（図5.2.1-1）。

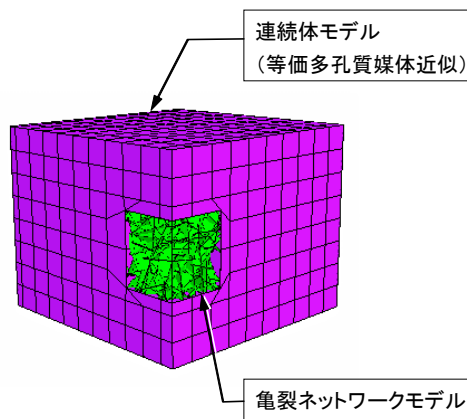


図 5.2.1-1 亀裂ネットワークモデルと等価不均質連続体モデルの入れ子式モデル概念図

② これまでの成果

亀裂ネットワークモデルの等価多孔質媒体近似にはクラックテンソル理論（Oda, 1985）を採用した。クラックテンソル理論は亀裂の幾何形状の分布データから透水テンソル K_{ij} を次式により求めるもので、亀裂間の連結性を陽に考慮できないなどの制約条件があるものの、これまでに様々な検討が試みられてきた（例えば、Oda et al., 1987；中屋ほか, 1995 など）。

$$K_{ij} = \frac{g}{\mu} \lambda (P_{ij}' \delta_{ij} - P_{ij}') \quad (5.2.1-1)$$

ここに、

μ : 水の動粘性係数 [Pa・s]

λ : 無次元定数 ($0 < \lambda < 1/12$)

δ_{ij} : クロネッカーデルタ

$$P_{ij}' = (1 - \alpha_0) P_{ij} \quad (5.2.1-2)$$

α_0 : 亀裂連結特性修正係数 ($0 < \alpha_0 < 1$)

$$P_{ij} = \frac{\pi \rho}{4} \langle t^3 \rangle \langle r^2 \rangle N_{ij} \quad (5.2.1-3)$$

ρ : 亀裂密度（単位体積中の亀裂の数）

t : 亀裂開口幅 [m]

$$\langle t^3 \rangle = \int_0^\infty t^3 g(t) dt \quad (5.2.1-4)$$

$g(t)$: 亀裂開口幅の確率密度関数

r : 亀裂長さ (直径) [m]

$$\langle r^2 \rangle = \int_0^\infty r^2 f(r) dr \quad (5.2.1-5)$$

$f(r)$: 亀裂長さの確率密度関数

$$N_{ij} = \int_\Omega n_i n_j E(n) d\Omega \quad (5.2.1-6)$$

$E(n)$: 亀裂方向の確率密度関数

n : 亀裂の単位法線ベクトル

また、亀裂ネットワーク構造による空間的に不均質な透水性分布および、亀裂の卓越方向に起因した透水異方性を考慮するために、下茂・山本 (1996) 等が用いた手法と同様に、亀裂ネットワークモデルと任意の連続体要素を重ね合わせ、個々の連続体要素に含まれる亀裂の幾何情報から透水テンソルを求める手法を用いた (図 5.2.1-2)。このことにより、従来の不均質連続体の浸透流解析手法を適用することが可能となる。

亀裂ネットワークモデルと連続体要素の接合部においては、隣接する節点を共有し、両者が同じポテンシャルを持つものと仮定した (図 5.2.1-3)。このことにより、亀裂ネットワークモデルと三次元連続体要素を重ね合わせた一つの有限要素マトリクスを構成することができる。

本手法により、5.4 節に記すように、地下水流動評価上重要な比較的広範な地域を含む領域を対象とした地下水流動解析が容易に実施できることとなる。加えて、詳細な調査の対象領域を亀裂ネットワークモデルでモデル化することにより、詳細な調査により求められる亀裂の地質学的、水理学的特性などのデータをモデルへ直接反映させることが可能となり、そのことにより本モデルを用いた地下水流動や物質移行評価結果を次の調査計画に反映させることができる。

③ まとめ

本手法は、瑞浪超深地層研究所周辺のように詳細な調査の対象となる領域においては、亀裂の地質学的、水理学的調査データなどから直接的に亀裂ネットワークモデルを用いてモデル化するとともに、その周辺領域は亀裂ネットワークモデルの等価多孔隙媒体近似によりモデルの簡素化を図るものである。

今後は、超深地層研究所計画で取得されたデータ

を用いた検討 (5.4 節参照) などを通じて抽出される問題点を解決していくことで解析ツールの整備を行っていく予定である。

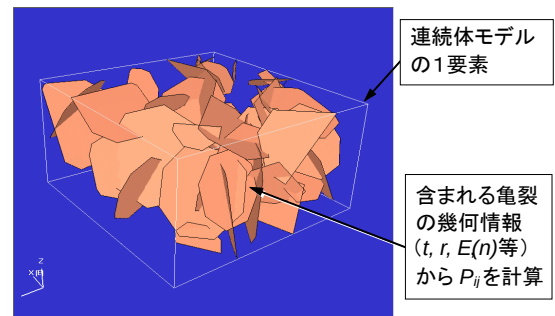


図 5.2.1-2 連続体要素に含まれる亀裂の幾何情報から透水テンソルを求める手法の概念図

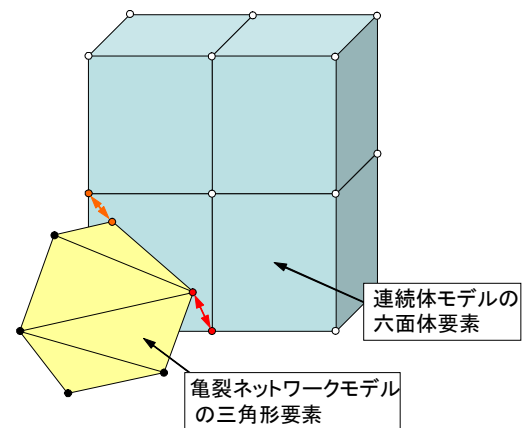


図 5.2.1-3 亀裂ネットワークモデルと連続体モデルの接合部概念図

- : 亀裂ネットワークモデルの節点
- : 連続体モデルの節点
- : 隣接する共有節点

参考文献

- 下茂道人, 山本肇 (1996) : 等価不均質連続体モデルによる亀裂性岩盤の浸透流解析手法, 大成建設技術研究所報, pp. 257-262.
- 中屋眞司, 金屋賢生, 長谷川明生, 平山鉄浩 (1995) : 亀裂性岩盤の透水係数テンソルの測定と水理学的等価開口幅, 地下水学会誌, 第 37 巻, 第 1 号, pp. 13-29.
- Oda, M. (1985) : Permeability tensor for discontinuous rock masses, Geotechnique, vol. 35, No. 4, pp. 438-495.
- Oda, M., Hatsuyama, Y., and Ohnishi, Y. (1987) : Numerical experiments on permeability tensor and its application to jointed granite at Stripa Mine, Sweden, Journal of Geophysical Research, vol. 92, No. B8, pp. 8037-48.

2) 結晶質岩中の移行パラメータの信頼性評価手法の開発研究

① 課題と計画の概要

地層処分における安全評価においては、処分場もしくは処分場周辺の地下水流量（もしくはダルシー流速）、処分場から生物圏へ至る地下水移行距離、移行時間、移行経路などが核種移行評価に必要な項目として挙げられる。「第2次取りまとめ」以降は、実際の地質環境データに基づいて上記項目を評価する技術を構築し体系化する必要がある。

平成14年度には、原位置試験データから求められる核種移行パラメータ値の不確実性を定量的に評価した。平成15年度は、地下水流動解析に必要な調査試験データ、あるいは解析で求められる値の空間的なバラツキが地下水移行距離、移行時間等に与える影響を定量化することを目的として、次の項目について検討を行った。

- ・ 透水係数とその分散の定量化手法の検討
- ・ 確率有限要素法による浸透流解析（嶋田ほか，1990）

また、任意点からの地下水移行経路とその到達点および到達範囲の定量化手法を、確率有限要素法に基づき考案した。そして、原位置のデータを用いた検討事例として、開発した浸透流解析プログラムを用いて二次元断面の解析を実施した。

② これまでの成果

i) 透水係数とその分散の定量化手法の検討

本研究では正馬様用地（動力炉・核燃料開発事業団，1997；核燃料サイクル開発機構，2001）のMIU-1～3孔のボーリングデータを用いることとし、これらのボーリング孔を含む鉛直2次元断面を対象領域とした。対象領域の模式図を図5.2.1-4に記す。MIU-1～3孔の研究対象領域は、上部に堆積岩（美濃堆積岩類）、下部に花崗岩（土岐花崗岩）が分布する地質構造となっている。このMIU-1～3孔から得られた透水係数、亀裂密度、亀裂開口幅は、空間データモデリング（間瀬・武田，2001）の「連続確率場からのサンプリングデータ」と考えることができる。すなわち、個々の透水係数などのデータは離散的に得られているが、実際には連続関数が存在し、その連続関数を推定することで、未知の領域の透水係数やその分散などを推定することが可能となる。本研究では、個々のサンプル値である透水係数に相関がある場合の解析例とし

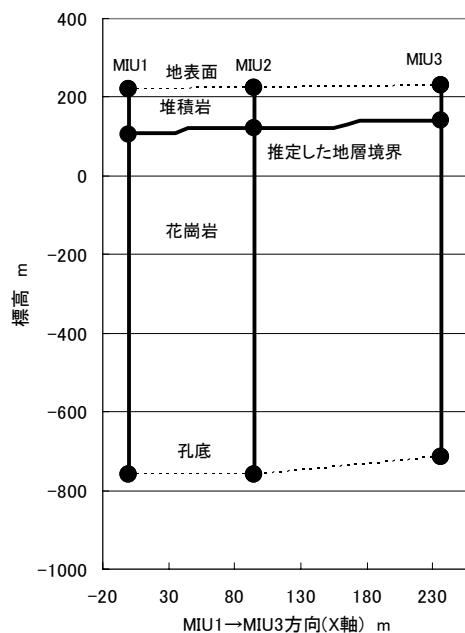


図 5.2.1-4 MIU1～3 孔の鉛直分布模式図と推定地表境界線

て、対象領域に対してクリギング（Krige, 1952）による空間データモデリングを行った。また、ここでは層内クリギングという手法を用いて、各地層で異なる確率場を仮定し透水場を設定した。図5.2.1-5に対象領域の透水場予測結果を示す。

ii) 確率有限要素法による浸透流解析

飽和・不飽和定常浸透流問題の支配方程式は、有限要素法により次式で表される。

$$[K]\{h\} = \{q\} \quad (5.2.1-7)$$

ここに、 $[K]$ は浸透マトリクス、 $\{h\}$ は節点全水頭ベクトル、 $\{q\}$ は節点流量ベクトルであり、 $[K]$ が M 個の不確定要因 $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M\} = \alpha$ の関数であるとすれば、 $\{h\}$ も α の関数となる。

$$h_i = h_{i(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M)} \equiv h_{i(\alpha)} \quad (5.2.1-8)$$

ここに、 h_i は節点 i の全水頭を表す。 h_i を α についてマクローリン展開し、2次以上の高次項を無視する線形一次近似理論を適用すると次式となる。

$$h_i \equiv h_{i(0)} + \sum \frac{\partial h_i}{\partial \alpha_{m(0)}} \alpha_m \quad (5.2.1-9)$$

ここで、 $\partial h_i / \partial \alpha_{m(0)}$ は、偏導関数 $\partial h_i / \partial \alpha_m$ の $\alpha = \{0, 0, \dots, 0\} = \mathbf{0}$ における値である。以下では、全ての α_m の期待値が 0 であり、さらに式の簡略化のためそれぞれの不確定要因は互いに独立であるとする。この時、節点 i の水頭 h_i の期待値 $E[h_i]$ と分散 $\text{Var}[h_i]$ は次式で与えられる。

$$E[h_i] = h_{i(0)} \quad (5.2.1-10)$$

$$\text{Var}[h_i] = \sum \left(\frac{\partial h_i}{\partial \alpha_{m(0)}} \right)^2 \text{Var}[\alpha_m] \quad (5.2.1-11)$$

節点 i の流量 q_i 、要素 e の流速 v_e などについても同様に求められる。以上から、節点の水頭と流量、要素内の流速および全節点の合計流入量の期待値は、 $\alpha = 0$ において式(5.2.1-7)を解くことによって求められる。また、これらの分散や共分散を求めるには、以下に示す偏導関数の $\alpha = 0$ における値が必要となる。

$$\frac{\partial \{h\}}{\partial \alpha_{m(0)}}, \frac{\partial \{q\}}{\partial \alpha_{m(0)}}, \frac{\partial \{v\}}{\partial \alpha_{m(0)}}; m=1, \dots, M \quad (5.2.1-12)$$

上記偏導関数の算出に関しては、まず式(5.2.1-7)を α_m で偏微分し、以下の式を得る。

$$\frac{\partial [K]}{\partial \alpha_m} \{h\} + [K] \frac{\partial \{h\}}{\partial \alpha_m} = \frac{\partial \{q\}}{\partial \alpha_m} \quad (5.2.1-13)$$

そして、与えられた境界条件と下記条件から式(5.2.1-13)を解く。

水頭固定境界にあるとき： $h_i = \bar{h}_i, \partial h_i / \partial \alpha_m = 0$

流量固定境界にあるとき： $q_i = \bar{q}_i, \partial q_i / \partial \alpha_m = 0$

対象領域内部にあるとき： $q_i = 0, \partial q_i / \partial \alpha_m = 0$

節点 i の流量 q_i 、要素 e の流速 v_e についても、 $\alpha = 0$ における値が同様に算出できる。このように $\partial \{h\} / \partial \alpha_m, \partial \{q\} / \partial \alpha_m, \partial \{v\} / \partial \alpha_m$ の $\alpha = 0$ における値を求めることで、 h (節点水頭)、 q (節点流量)、 v (要素流速)、 Q (全節点の合計流入量) について分散や期待値などを算出できる。

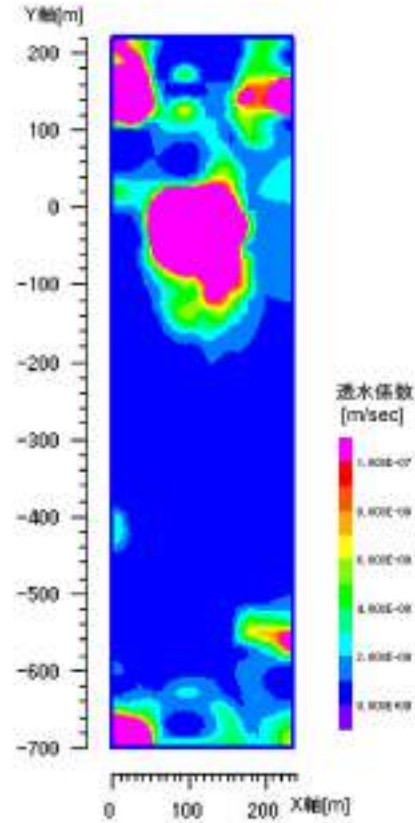
次に、確率有限要素法に基づいて考案した、特定移行経路における移行距離の不確実性を評価する方法について説明する。図 5.2.1-6 に示すような空間において位置 0 にあった地下水が時間 t だけ移行した後の位置を P とする。位置 0 を原点として図に示すように x, y 軸をとると、位置 P の座標 (X_t, Y_t) は次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} X_t \\ Y_t \end{Bmatrix} = \int_0^t \begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \end{Bmatrix} dt \quad (5.2.1-14)$$

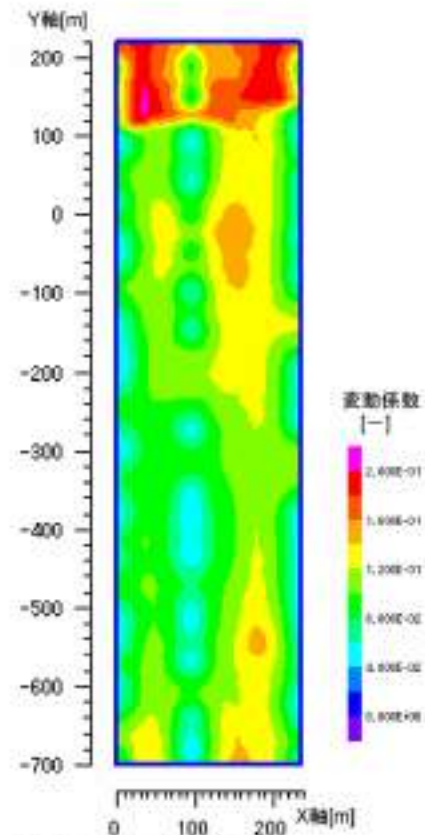
まず、 $0 \sim t$ を微小な時間間隔 Δt で Nt 等分 ($\Delta t = t/Nt$) すれば、式(5.2.1-14)右辺の時間積分は次式に示すように離散化された総和式で近似できる。

$$X_t = \int_0^t v_x dt \cong \Delta t \sum_{i=1}^{Nt} v_{x((i-1)\Delta t)} \quad (5.2.1-15)$$

ここで、解析対象領域を有限要素で分割し、各要素の透水係数は各々の期待値が 0 である M 個の



・透水係数の推定結果



・透水係数の変動係数の推定結果

図 5.2.1-5 各地層で異なる確率場としたときの透水場予測結果

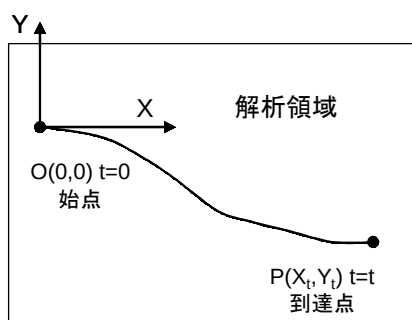


図 5.2.1-6 任意点からの地下水流れの模式図

確率変数 $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M\} = \alpha$ で表されるものとする。ある一つの要素 e 内では、地下水の流速ベクトルおよび α に関する流速ベクトルの偏微分がそれぞれ一定であるとする、式(5.2.1-15)について線形一次近似理論を適用することにより、 X_t の期待値と分散が以下の式で表される。

$$E[X_t] \equiv \sum_{e=1}^{N_e} \left\{ v_{x(e)} \Delta t_{(e)} \right\}_{(\alpha=0)} \quad (5.2.1-16)$$

$$\text{Var}[X_t] = \sum_{m=1}^M \left\{ \sum_{e=1}^{N_e} \left(\frac{\partial v_x}{\partial \alpha_m(e)} \Delta t_{(e)} \right) \right\}_{(\alpha=0)}^2 \text{Var}[\alpha_m] \quad (5.2.1-17)$$

ただし、 N_e は $\alpha=0$ のときの点 O から点 P にいたる移行経路を含む要素の個数、 $v_{x(e)}$ はこれらの要素のうちの e 番目の要素の x 方向流速ベクトル成分、 $\Delta t_{(e)}$ は e 番目の要素内にある間の移行時間、 $\partial v_x / \partial \alpha_m(e)$ は e 番目の要素における α_m に関する x 方向流速の偏微分であり、確率変数どうしは互いに独立であるとした。なお、 Y_t についても同様に算出できる。ここで、到達点 P の期待値 $\pm 1\sigma$ の予測範囲（正規分布の確率密度関数の $\pm 1\sigma$ で約 68.3%）は、図 5.2.1-7 に示すような楕円形で表される。

iii) 鉛直二次元断面での事例検討

図 5.2.1-5 に示した推定透水係数を用いて、鉛直二次元断面の確率有限要素法を用いた解析を実施した。なお、流速などの期待値とその分散を求める同様な手法としてモンテカルロ法によるシミュレーションがあるが、本解析手法はモンテカルロ法と比較して、計算時間の大幅な短縮、大規模問題に対して有効、という利点がある。確率有限要素法とモンテカルロ法による流速ベクトルおよびその分散の分布を図 5.2.1-8 に示す。それぞれの図の背景色は分散を表示しており、ほぼ同値であることから、本解析条件においてモンテカルロ法と整合のとれた結果が得られた。

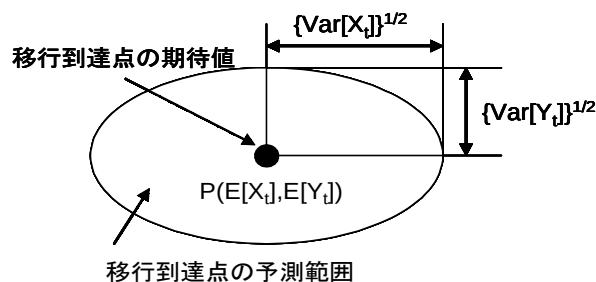


図 5.2.1-7 移行到達点の期待値および移行到達範囲を楕円形と仮定した予測範囲

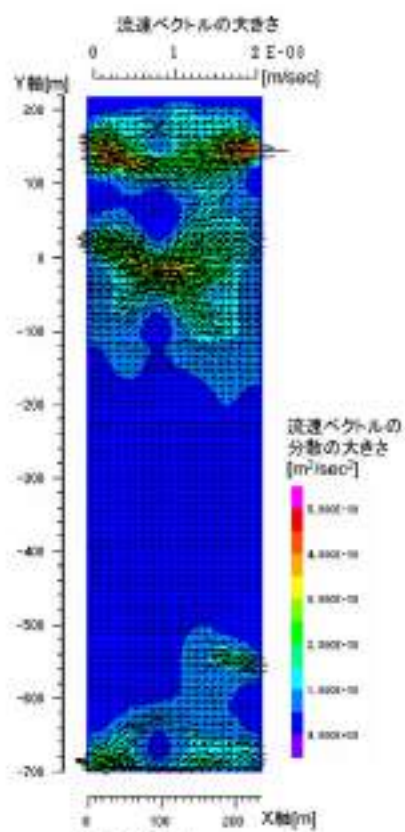
また、特定移行経路における移行距離の不確実性評価の一例として、MIU3 孔の深度 236.48m（海拔 0m）を始点とした場合の 1000 年、2000 年、3000 年後の到達点の予測範囲を図 5.2.1-9 に示す。図中の曲線は本手法で求めた地下水の移行距離の期待値であり、背景色は流速ベクトルの分散を表している。同図より、複雑な経路を長期間にわたって地下水が移行しており、そのバラツキが推定できていることがわかる。また、到達点のバラツキは始点から離れるほど大きくなることがわかる。

③まとめ

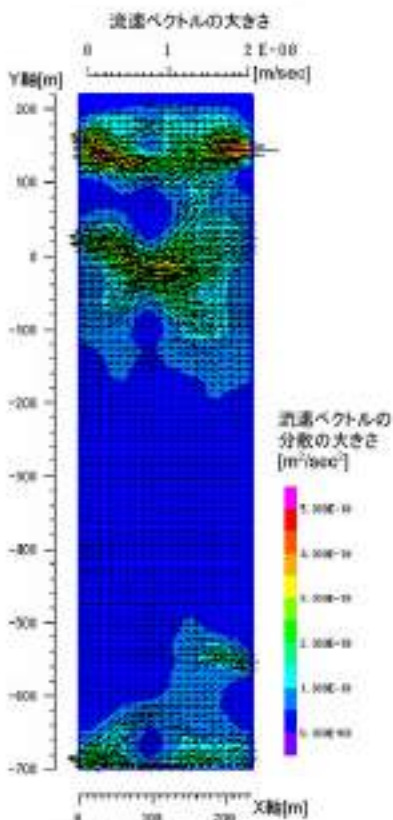
クリギングにより未知領域の透水係数の期待値とその分散を推定し、確率有限要素法により流速、流量などの期待値と分散を算出するとともに、特定移行経路における移行距離の不確実性を評価できる手法を整備し、例示的な解析を行った。しかしながら、H15 年度は二次元断面を対象としたものであり、地下水流動評価においては三次元的な空間的広がりを考慮する必要のあることから、本手法の三次元化や多様な境界条件への対応などの拡張が必要である。

参考文献

- 嶋田三朗，梨本裕，松井幹雄，相木克介（1990）：浸透流確率有限要素法，前田技術研究所報 VOL. 30，pp. 25-34.
- 動力炉・核燃料開発事業団（1997）：広域地下水流動研究基本計画書，動燃事業団計画資料，PNC TN7020 98-001.
- 核燃料サイクル開発機構（2001）：超深地層研究所地層科学研究基本計画，サイクル機構技術資料，JNC TN 7410 2001-009.
- 間瀬茂，武田純（2001）：空間データモデリング—空間統計学の応用—，データサイエンス・シリーズ⑦，共立出版株式会社.
- Krige, D. G. (1952) : A statistical approach to some basic mine valuation problems in the Witwatersrand, Journal of Chemical, Metallurgical and Mining



・確率有限要素法



・モンテカルロ法の分布

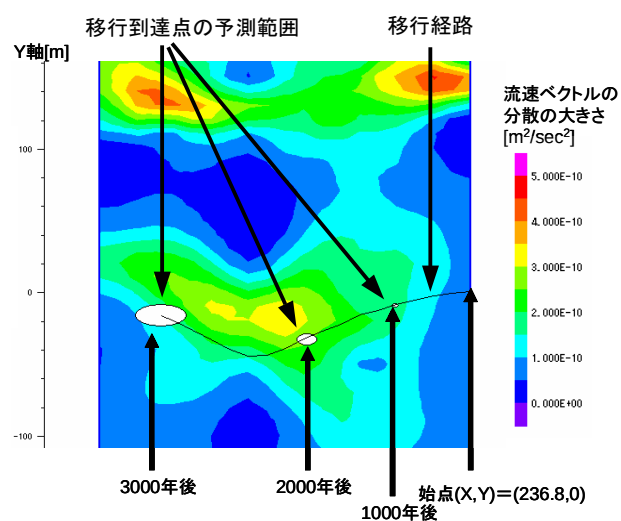


図 5.2.1-9 特定移行経路における移行距離の不確実性評価の一事例

図 5.2.1-8 確率有限要素法とモンテカルロ法による流速ベクトルおよびその分散の分布

3) 岩盤中の水理・物質移行モデルの信頼性向上研究

3-1) 単一亀裂に関する室内試験

① 課題と計画の概要

亀裂性岩盤を対象とした核種移行評価に関して、「第2次取りまとめ」では、亀裂の透水量係数の不均質性に着目して均質一次元平行平板モデルを重ね合わせた手法を採用している。実際の岩盤では、1) 巨視的には岩盤中の移行経路として亀裂のネットワーク構造の不均質性が、2) 微視的には個々の亀裂の亀裂表面形状、亀裂内充填物、他の亀裂との相互作用（亀裂の分岐や交差等に起因する亀裂内空隙構造の不均質性）が、地下水の流れや核種の移行現象に影響を与えることとなる。「第2次取りまとめ」以降の核種移行評価に関する課題として、上記1)や2)が地下水の流れや核種の移行現象に与える影響を把握する必要がある。ここでは、上記2)に着目して、亀裂内空隙構造の評価手法に関する検討および亀裂内空隙構造の不均質性が物質移行現象に与える影響を評価するための単一亀裂を対象としたトレーサー試験方法について検討を行った。まず亀裂内空隙構造評価手法については、最終的に天然の亀裂を含む50cmスケール岩体試料(縦50cm×横50cm×高さ50cm)の亀裂開口幅を測定するための試行段階として、人工の単一亀裂を有する10cmスケール岩体試料(縦10cm×横10.3cm×高さ10cm)の亀裂開口幅と亀裂形状を研削装置を用いて測定し、測定手法や測定精度について検討した。一方、トレーサー試験方法については、10cmスケールの亀裂を対象にしたトレーサー試験において精度の高いデータを取得できるよう、試験方法の改良を行った。

② これまでの成果

i) 亀裂開口幅測定技術の検討

花崗岩等の亀裂性岩盤を対象とした物質の移行では、重要なパラメータとなる亀裂内の透水性や亀裂の表面積(マトリクス拡散寄与面積)を把握する必要がある。平成14年度まで、亀裂開口部の透水性の把握としては、単一亀裂を対象とした50cmスケールの岩盤を用いた亀裂性媒体水理試験設備(LABROCK)による透水・トレーサー試験を実施し、開口幅分布が不均質で亀裂内に充填物を含む試験体の平均的な水理学的開口幅と物質移行開口幅の

関係、チャンネル構造(Neretnieks, 1983)の有無等を示した(吉野・内田, 2001; 吉野・佐藤, 2002; 佐藤・吉野, 2002; 吉野ほか, 2003b)。また亀裂交差部を有する50cmスケールの岩盤を用いた、亀裂ネットワーク岩体水理物質移行試験設備(NETBLOCK)を使用して透水試験を実施し、亀裂交差部に沿った部分の透水性が他の亀裂部の透水性に比べて卓越しており、亀裂交差部は優先的な物質移行経路となり得ることを示した(山田ほか, 2001; 鐵・澤田, 2001; 鐵・澤田, 2003)。

またマトリクス拡散寄与面積の把握を目的として、亀裂内空隙構造の不均質性に関する知見を深めるために、10cmスケールの単一亀裂を持つ結晶質岩を使用し、接触式の3次元測定装置(株式会社ミットヨ製BRIGHT710)およびX線CT(東芝メディカル株式会社製Asteion(医療用X線CT))による亀裂開口幅評価技術に関する検討を実施している(吉野ほか, 2003a, b)。

3次元測定装置は亀裂面を直接的に測定するため亀裂表面形状の詳細かつ正確な測定が可能であり、測定誤差も小さい。しかし、亀裂表面形状測定のため亀裂面を一度引き離すと元の状態に復元することは難しく、また複数の亀裂が交差する場合には適用困難となり単一亀裂のみに限定した測定方法となる。X線CT(Computed Tomography)は非破壊で岩石内部の亀裂開口部を観察することが可能である。しかしX線CTの測定限界(分解能)の問題や造岩鉱物の不均質性がCT値に及ぼす影響により、X線CTから推定された亀裂開口幅の分布は全体の概略的な傾向は表現できるが詳細な部分(結晶質岩の微細亀裂)は表現できず、透水特性の正確な評価が困難であることが明らかとなった。

亀裂内空隙構造評価技術に関する研究として、平成15年度は研削による岩体の亀裂開口幅の測定を実施した。この測定方法では、亀裂の開口幅や形状を直接計測することが可能であるため、信頼性の高いデータの取得が期待できる。図5.2.1-10に、岩体研削のイメージを示す。試験には、岩体のほぼ中央に人工割裂単一亀裂を有する、縦10cm×横10.3cm×高さ10cmの花崗岩(以下、10cm岩体という)を使用した。この岩体は、これまでに3次元測定装置およびX線CTにより亀裂開口幅を測定した岩体である(吉野ほか, 2003a)。

10cm岩体の亀裂開口部の空隙形状を詳細に測定することを目的として、1mm以下の精度で岩体表面の研削を繰り返し、各研削断面の亀裂を撮影した。

岩体試料研削には平面研削盤（黒田精工製 GS-64PF（以下、研削装置という））を用いた。この装置では、最大で縦 60cm×横 40cm×高さ 60cm のサイズの岩体試料を、最高 0.1 μm の精度で研削可能である。研削断面における亀裂形状観察には高解像度デジタルカメラ（KODAK 製 DCS760（画像解像度：600 万画素））を用いた。デジタルカメラは、カメラレンズを岩体上面に対し平行に固定する形で研削装置に取付けている。撮影したデジタル画像データは、パソコンに転送し保存する。一回の撮影範囲は約 11cm×11cm であり、これより大きな範囲を撮影するためには、画像をつなぎ合わせる必要がある。このため、画像解析用の亀裂開口幅測定プログラムを、画像診断支援ソフト（株式会社ニコン技術工房製 NikonGS-1）をベースに作成した。この装置およびプログラムにより取得可能なデータは、図 5.2.1-10 での Z 方向の亀裂開口幅データ及びその亀裂の中央位置座標データである。

10cm 岩体の研削は、亀裂面に対して平行な Y 方向に 1mm ピッチで行い、合計 100 断面（0mm～99mm 断面）の亀裂部をデジタル画像データとして撮影、取得した。また、これらのデジタル画像データより、1mm 間隔で合計 10,300 点（X（横）方向 103 点×Y（高さ）方向 100 点）の亀裂の中央点座標データと亀裂開口幅データを取得した。図 5.2.1-11 に、亀裂の中央点座標データより求めた亀裂表面形状を示す。図中の色は基準面（研削開始面）から Z（縦）方向の距離であり、赤色の部分で高く、青色の部分で低い形状を示す。また、図 5.2.1-12 に、亀裂開口幅データより求めた亀裂表面の開口幅分布を示す。図中の色は亀裂の開口幅を示し、赤色の部分で大きく、青色の部分で小さい。デジタルカメラの画像解像度は 23.2pixel/mm（0.0431mm/pixel）であった。研削により取得したデータより計算して求めた亀裂表面形状と、精度よく測定できる接触式の三次元測定器による亀裂表面形状を比較した結果、亀裂表面形状の傾向が一致した。これにより、研削によるデータの妥当性を確認できた。亀裂開口幅は、実際の開口幅を直接測定するため精度が高いデータが得られたと考える。

ii) 10cm 岩体トレーサー試験方法の改良

平成 15 年度は、単一亀裂を有する岩体の物質移行特性を把握するためのトレーサー試験のデータの測定精度向上を目的として、トレーサー試験方法の改良を行い、平行平板試験体を用いて測定精

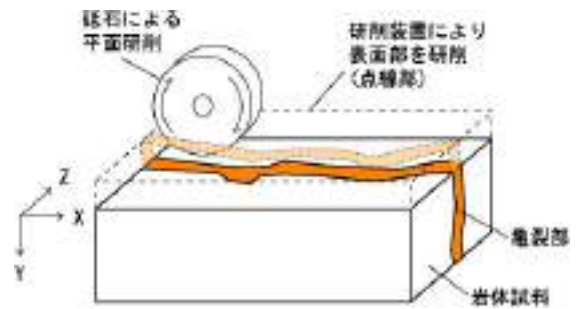


図 5.2.1-10 岩体研削のイメージ

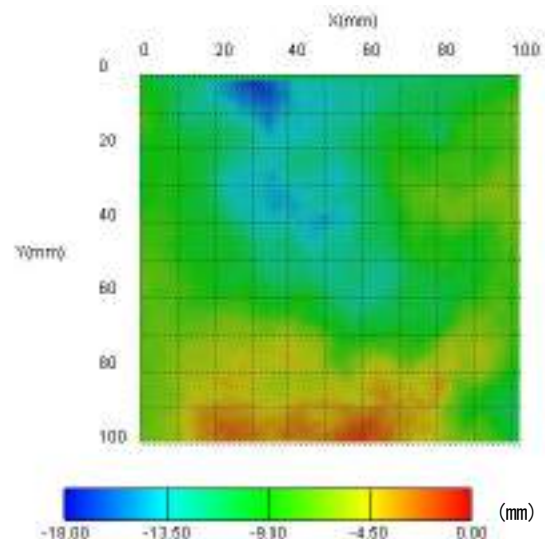


図 5.2.1-11 研削による亀裂中央点座標データ

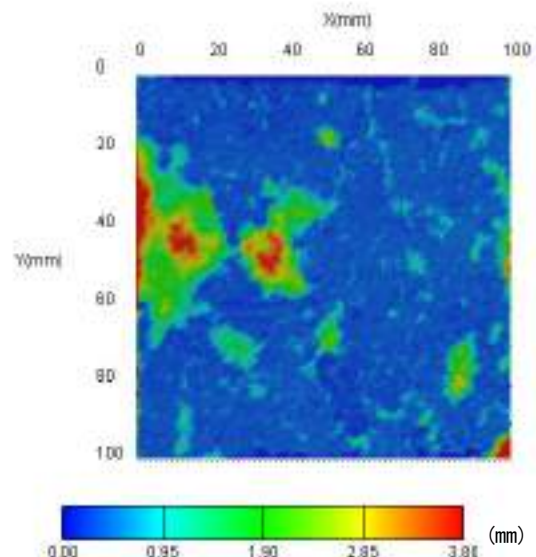


図 5.2.1-12 研削による亀裂開口幅分布データ

度についての検討を行った。

トレーサー試験を行うにあたり、亀裂開口部の容量が配管・注排水ポート等の容量（以下「デッ

ドボリューム」という。) に比べて小さい場合には以下の問題が生じる。

- ・ トレーサーの移行時間がデッドボリュームにより遅延される。
- ・ ポート内でトレーサーが分散する。
- ・ トレーサーが一様に亀裂内に浸透しない。

これらの問題により、トレーサー移行時間及び分散を過大に評価してしまうため、精度の高いトレーサー試験結果を取得することは難しい。そこで、トレーサーの注入方法を改良して、デッドボリュームの影響を受けないトレーサー試験方法を考案した。改良したトレーサー注入方法の概念図を図 5. 2. 1-13 に示す。注入方法の特徴として、注排水ポートでフラッシングを行う機構を取り付けた。ポート内を亀裂内に比べて大きな流量でフラッシングすることにより、注入ポートではポートに到達したトレーサーは速やかにポート内を置換し、電気伝導度計に到達する。排出ポートではポートに到達したトレーサーはフラッシングにより速やかに電気伝導度計に達する。この方法により、配管及び注排水ポートでトレーサー移行時間の遅延の影響を取り除くことができる。

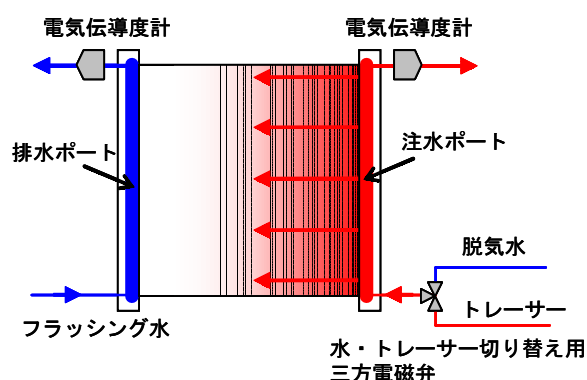


図5. 2. 1-13 フラッシング機構を採用したトレーサー注入方法

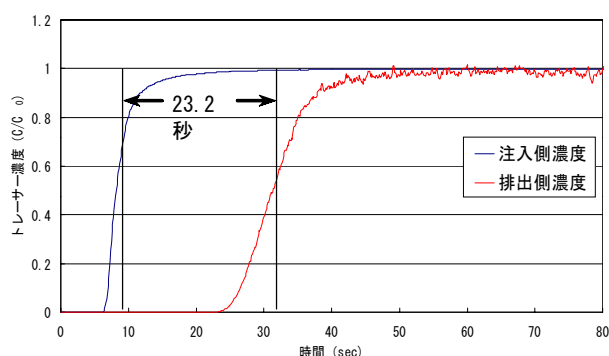


図5. 2. 1-14 トレーサー試験でのブレイクスルーカーブの一例

また、トレーサーが速やかにポート内を置換することから、トレーサーが一様に亀裂内に浸透し、ポート内での分散も少なくなる。

この試験方法によるトレーサー試験結果の精度を確認するために、透明アクリルにより平行平板を模擬した試験体を用いた試験を行った。この試験体は幅 10cm、長さ 10cm、厚さ 3cm のアクリルブロックの間に厚さ 0.1mm、幅 5mm のステンレス製スペーサーを挟んだものである。理想的な平行平板の場合、幾何学的開口幅、透水試験結果から得られる水理学的開口幅、トレーサー試験から得られる物質移行開口幅は等しくなることから、この試験体を用いて幾何学的開口幅測定、透水試験、トレーサー試験を行い、各開口幅がほぼ等しい値となればこのトレーサー試験方法により精度の高いデータが得られることを確認できる。

図 5. 2. 1-14 にトレーサー試験結果の一例を示す。トレーサーには 1%NaCl 水溶液を使用し、電気伝導度計によりトレーサー濃度を測定している。トレーサー移行時間は、注入側の C/C_0 が 50% に達してから排出側の C/C_0 が 50% に達するまでの時間とした。図のブレイクスルーカーブから求められるトレーサー移行時間は 23.2 秒となった。この結果から求められた物質移行開口幅は 0.17mm である。次に同じ試験条件で着色したトレーサーを使用して、トレーサー試験を行いながら 2 秒間隔で写真撮影をし、写真から求められる滞留時間とブレイクスルーカーブから得られる滞留時間の比較を行った。図 5. 2. 1-15 に写真撮影の結果を示す。亀裂内を流れ方向に一様にトレーサーが移行していることが観察できる。また、ブレイクスルーカーブから求められるトレーサー移行時間が 23.2 秒に対して、写真から求められたトレーサー移行時間は 24 秒前後であり、両者はほぼ一致していることから、ブレイクスルーカーブから得られるトレーサー移行時間は信頼できる値であることが確認できた。また、透水試験結果を用いて算出した水理学的開口幅は 0.18mm である。

亀裂の幾何学的開口幅は接触式三次元測定器により計測した。図 5. 2. 1-16 に開口幅算出方法を示す。亀裂開口幅 b はスペーサーを挟んで上下面を重ねた高さ h_3 、上面の高さ h_1 、下面の高さ h_2 を計測し、 $h_3 - (h_1 + h_2)$ により求めた。この手法で求めた全計測点の算術平均値は 0.19mm (幾何学的開口幅の平均値) である。

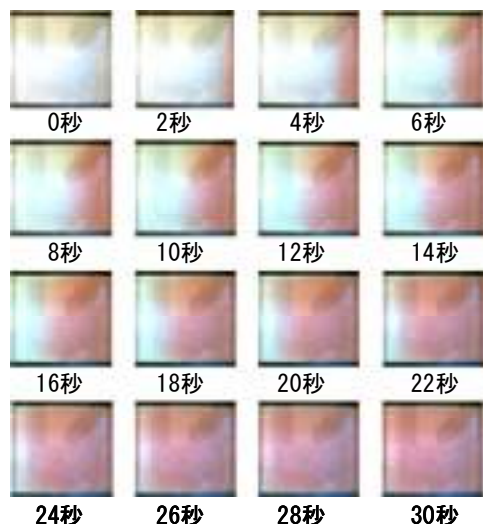


図5. 2. 1-15 写真撮影によるトレーサー移行状況

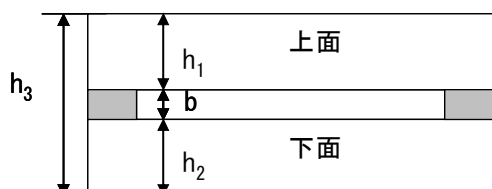


図 5. 2. 1-16 接触式三次元測定器を用いた開口幅算出方法

上記各試験結果から、幾何学的開口幅、水理学的開口幅、物質移行開口幅はそれぞれ 0.19mm, 0.18mm, 0.17mm が得られ、ほぼ同様の値となった。

以上の結果より、今回考案したフラッシング機構を採用することにより、従来のトレーサー試験装置における問題を解決し、精度の高い試験データの取得が可能になった。

③ まとめ

亀裂内空隙構造の不均質性に関する知見を深めるために、10cm スケールの単一亀裂岩体を用いて亀裂空隙構造評価技術に関する検討およびトレーサー試験方法の改良を行った。

亀裂空隙構造評価技術に関しては、研削による亀裂形状及び開口幅の測定を行い、その技術的な可能性を確認した。しかし研削やデータ処理に要する時間や費用の観点から取得できるデータ数には限界がある。そのため今後は、今回の研削により取得したデータにより、亀裂内の水理・物質移行解析に必要な精度の情報が得られていることの確認を行うとともに、必要に応じ研削の測定精度向上、作業効率向上を行う。そして、室内試験を実

施してきた天然の単一亀裂及び交差亀裂を有する 50cm スケールの岩体試料について、研削を用いて三次元的な開口幅分布及び亀裂開口部の形状データを取得する。

一方、トレーサー試験方法の改良については、10cm スケールの亀裂において、精度の高いトレーサー試験データの取得が可能となった。今後は、不均質な亀裂開口幅分布を持つ亀裂（開口幅が既知の人工亀裂等）を対象に本研究で採用した方法を用いた透水・トレーサー試験を行い、亀裂開口幅分布と単一亀裂内の透水・物質移行特性の関係についての検討を行う。

これらの検討を通じて、幾何学的開口幅、水理学的開口幅、物質移行開口幅、マトリクス拡散寄与面積率の関係を明らかにすることにより、「第2次取りまとめ」で使用した平行平板モデルの妥当性を示していく。

参考文献

- Neretnieks, I. (1983) : A Note on Fracture Flow Mechanisms in the Ground, Water Resources Res., 19, pp. 364-370.
- 佐藤 久, 吉野尚人 (2002) : 応力依存性を考慮した透水・トレーサー試験, 第 57 回土木学会年次学術講演会講演概要集, CS10-021, pp. 423-424.
- 鐵 桂一, 澤田 淳 (2001) : 高粘性流体を用いた天然亀裂岩体の透水試験—NETBLOCK 試験報告—, サイクル機構技術資料, JNC TN8430 2001-006.
- 鐵 桂一, 澤田 淳 (2003) : 高粘性流体を用いた天然亀裂岩体の透水試験 2—NETBLOCK 試験報告—, サイクル機構技術資料, JNC TN8430 2003-004.
- 山田直之, 鐵 桂一, 澤田 淳 (2001) : 実岩体を用いた透水試験—NETBLOCK 試験報告—, サイクル機構技術資料, JNC TN8430 2001-003.
- 吉野尚人, 内田雅大 (2001) : 天然単一亀裂の水理特性に関する一考察, 土木学会第 56 回年次学術講演概要集, 共通セッション, pp. 42-43.
- 吉野尚人, 佐藤 久 (2002) : 亀裂状媒体水理試験設備 (LABROCK) による透水・トレーサー試験—2001 年度までの成果—, サイクル機構技術資料, JNC TY8400 2002-001.
- 吉野尚人, 澤田 淳, 佐藤 久 (2003a) : 岩盤亀裂開口幅評価に関する検討, 土木学会第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 347-352.
- 吉野尚人, 佐藤 久, 内田雅大 (2003b) : 亀裂状媒体水理試験設備 (LABROCK) による天然亀裂内の透水・物質移行特性評価, サイクル機構技報, No. 8, JNC TN1340 2002-004, pp. 51-58.

3-2) 単一亀裂に関するモデル開発

① 課題と計画の概要

「第2次取りまとめ」では、花崗岩等の結晶質岩をレファレンスケースとして亀裂性岩盤を対象とした核種移行評価が実施されている。その際、亀裂毎の透水量係数の不均質性に着目した均質一次元平行平板モデルを重ね合わせた手法が用いられているが、「第2次取りまとめ」以降の課題として亀裂内不均質性の検討が安全評価の信頼性向上のための課題として挙げられている（平成13年度報告書）。平成14年度は、亀裂開口幅の不均質性が亀裂の流体・物質移行特性に与える影響について検討することを目的として、微細かつ複雑な亀裂表面形状を比較的容易に取り扱うことが可能な解析手法である、セルオートマトン法の一種の格子ガスオートマトン法（以下 LGA 法）を適用した流体・物質移動解析コードを開発した（吉野ほか, 2003）。平成15年度は、平成14年度に開発した解析コードを用いて、以下のことに重点をおいて検討を行った。

- ・ LGA の解析結果と実際の物理量との対比
- ・ 亀裂開口幅の不均質構造が亀裂の平均特性（透水量係数など）に与える影響

② これまでの成果

i) LGA の解析結果と実際の物理量の対比

LGA 法の計算アルゴリズムには物理量の概念が存在しないため、圧力・流量などの物理量を直接計算することができない。そのため、LGA 法によって得られる解析メッシュ点での粒子の微視的状态（粒子の個数と運動方向）を「疎視化」（時間間隔や空間領域を設定して統計的なばらつきを有する粒子の微視的状态を平均化）することで、圧力・流量などの物理量を得るようにした（加藤ほか, 1998 ; 薦原ほか, 2001）。

まず、疎視化に必要な空間領域、時間間隔を平均化する範囲を、疎視化に妥当な誤差範囲、妥当な空間領域、時間間隔などの観点から検討した。疎視化の空間範囲として、x 及び y 方向の二次元領域を考え、これに時間ステップ数を組合せて、平行平板モデルの圧力と質量流量の計算値について統計的なばらつきを検討した（検討対象については、空間格子数 1×1, 5×5, 10×10, 20×20 の4通り、時間ステップ数は、50, 100, 500, 1000 の4通りの全 16 通りである）。以上より、単一亀裂モデル

の流体解析に使用する疎視化範囲として、統計的なばらつきの消去のためには最低限「空間格子数=5×5, 時間ステップ数=500」が必要と考えられた。

次に、流体力学の Navier-Stokes 方程式との対比による LGA 流体解析結果の物理量への変換方法を検討する。なお、物理量の記号と対応している LGA 法の記号には、時間及び距離に関する演算子も含めてすべて「*」を付し、名称は「*」で囲んで現実の物理量と区別することとする。LGA 法の粒子衝突則と並進過程から、“密度” ρ^* 及び“質量流量”ベクトル $(\rho \mathbf{u})^*$ はマッハ数 M (=流速/音速) が小さい場合は、非圧縮性近似による3次元 Navier-Stokes 式に類似した次式に従うことが示されている (Frisch et al., 1987)。なお、第4次元については右辺第1項が存在しないので、ここでは3次元のみ考える。

$$\frac{\partial}{\partial t^*} (\rho \mathbf{u})^* + \frac{\mathbf{g}^*(\rho_0^*)}{\rho_0^*} (\rho \mathbf{u})^* \cdot \nabla^* (\rho \mathbf{u})^* \\ = -c_s^2 \nabla^* \rho^* + \nu^* (\rho_0^*) \nabla^{*2} (\rho \mathbf{u})^* \quad (5.2.1-18)$$

ここで、 ρ^* : “密度”, ρ_0^* : ρ^* の平均値, $\mathbf{g}^*$: “密度” の関数, c_s : “音速”, ν^* : “粘性係数” (“密度” の関数) である。また、式 (5.2.1-18) の右辺第1項は、Navier-Stokes 式の圧力勾配項に相当するものであり、LGA 法における“圧力” p^* は、次式で表される。

$$p^* = c_s^2 \rho^* \quad (5.2.1-19)$$

式 (5.2.1-18) 及び (5.2.1-19) を Navier-Stokes 式と対比するため、LGA モデルでの物理量を実際の物理量に変換するスケーリング定数を次式で定義する (Somers and Rem, 1992)。

$$\tau \equiv t/t^* \quad (5.2.1-20)$$

$$l \equiv L/L^* \quad (5.2.1-21)$$

$$\alpha_{\rho u} \equiv \rho u / (\rho u)^* \quad (5.2.1-22)$$

$$\alpha_v \equiv \nu / \nu^* (\rho_0^*) \quad (5.2.1-23)$$

$$\alpha_p \equiv (p_{in} - p_{out}) / (p_{in}^* - p_{out}^*) \quad (5.2.1-24)$$

$$\alpha_\rho \equiv \rho / \rho_0^* \quad (5.2.1-25)$$

ここで、 τ : 時間スケーリング定数[s], t : 時間[s], l : 長さスケーリング定数[m], L : 代表長さ[m], $\alpha_{\rho u}$: 質量流量スケーリング定数[kg m⁻² s⁻¹],

ρu : 質量流量ベクトル [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$], α_v : 粘性係数スケーリング定数 [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$], ν : 粘性係数 [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$], α_p : 圧力スケーリング定数 [Pa], p_{in} : 入口圧力 [Pa], p_{out} : 出口圧力 [Pa], α_ρ : 密度スケーリング定数 [kg m^{-3}], ρ : 密度 [kg m^{-3}], である。また, 圧力の絶対値を決めるスケーリング定数を p_0 [Pa] とすると, 圧力の定義式は次式ようになる。

$$p = p_0 + \alpha_p p^* \quad (5.2.1-26)$$

式(5.2.1-20)～(5.2.1-25)を式(5.2.1-18)、および式(5.2.1-19)に代入して LGA モデルの無次元量を消去すると次式を得る。

$$\begin{aligned} & \frac{\tau}{\alpha_{\rho u}} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \frac{g^*(\rho_0^*) \alpha_\rho l}{\rho \alpha_{\rho u}^2} (\rho u) \cdot \nabla (\rho u) \\ &= -\frac{l}{\alpha_p} \nabla p + \frac{l^2}{\alpha_{\rho u} \alpha_v} \nu \nabla^2 (\rho u) \quad (5.2.1-27) \end{aligned}$$

式(5.2.1-27)が通常の Navier-Stokes 式と一致するためには, 式(5.2.1-20)～(5.2.1-26)で示した7つのスケーリング定数が次の3つの関係式を満足する必要がある。

$$\alpha_\mu = \alpha_p l / \alpha_v \quad (5.2.1-28)$$

$$\alpha_\rho = l^2 \alpha_p / g^*(\rho_0^*) \alpha_v^2 \quad (5.2.1-29)$$

$$\tau = l^2 / \alpha_v \quad (5.2.1-30)$$

つまり, 7つのスケーリング定数のうち4つが決まれば, 残りの3つは式(5.2.1-28)～(5.2.1-30)から求められる。これらの定数から LGA 解析結果

の疎視化諸量を物理量に変換することができる。

次に, 単純モデルである平行平板モデルについて, LGA 解析結果から変換した物理量と既知の理論値とを比較する。平行平板モデルの LGA 解析に代入する物理量として, 流体の物性値(密度 ρ [kg m^{-3}], 粘性係数 ν [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$], 重力加速度 g [m s^{-2}]), メッシュ間隔 l [m] (長さスケーリング定数に相当), 入口及び出口水頭 (H_{in} [m], H_{out} [m]) を入力し, 出力として厚さ方向 (z 方向) を平均化した質量流量 ρu_{cal} [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$] (定常状態到達後) を求め, 理論値 ρu_{ana} と比較した。亀裂開口幅に対応している厚さ方向の解析メッシュ数, 及び注入粒子密度はパラメータとし, 14 ケースの解析を実施した。疎視化のための格子数 (x, y 方向) は 5×5 , 時間ステップ数は 500 とした。二次元ポアズイユ流れで, 入口から十分離れた領域の厚さ方向平均質量流量の x 方向成分の理論値 ρu_{ana} は次式で与えられる。

$$\rho u_{\text{ana}} = \frac{\rho g}{12\nu} \left(\frac{\Delta H}{\Delta x} \right) B^2 \quad (5.2.1-31)$$

ここで, $\Delta H / \Delta x$: 動水勾配 [m/m] ($= (H_{\text{in}} - H_{\text{out}}) / L$, $L = l \times [\text{流れ方向メッシュ点数}]$), B : 開口幅 [m] である。全解析ケースについて, 厚さ方向平均質量流量の計算値と理論値の比較を図 5.2.1-17 に, 厚さ方向平均質量流量計算値と開口幅 (厚さ方向のメッシュ数) の関係を図 5.2.1-18 に, それぞれ示す。図から, 計算値は理論値の傾向を良く表しているものの, そのバラツキが大きい。この原因としては, 粒子密度の流れ方向の変動割合が大きく, 非圧縮性近似の成立条件を満足していないためと考えられる。これは, 解析コードで採用している流入・流出の境界条件に起因している可能性が考

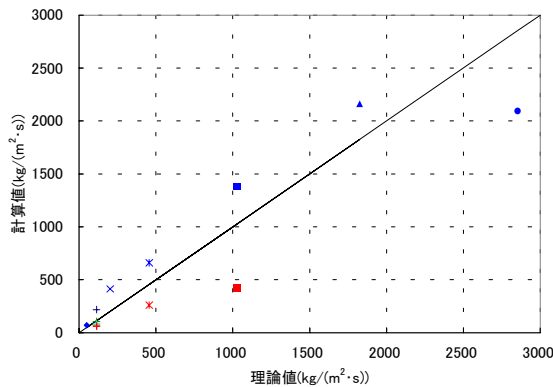


図 5.2.1-17 質量流量の計算値と理論値の比較

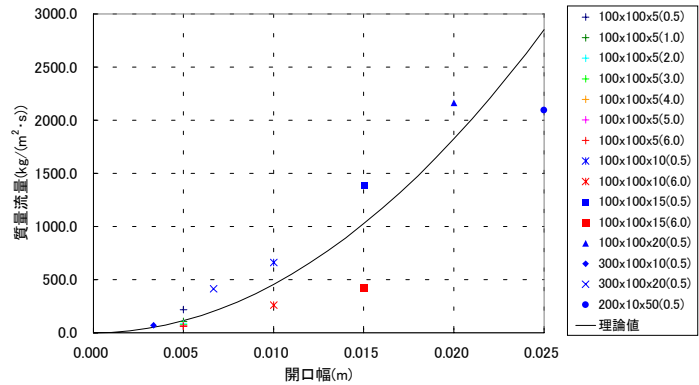


図 5.2.1-18 質量流量の計算値と開口幅の関係

えられる。そのため、2次元ポアズイユ流れにおける粒子密度の流れ方向の変動割合と計算誤差の関係を明確にし、その結果に基づいて、計算精度向上を目的として周期境界条件や流速一定条件の採用など、流入・流出境界条件について再検討する必要がある。

ii) 亀裂内不均質性評価パラメータの選定と三元モデルの作成

亀裂開口幅の不均質性は、亀裂面の凹凸形状、開口幅のバラツキなどで表現できると考えられる。そこで、不均質性を表現するパラメータの選定のため、既往研究の調査を行った。既往研究 (Moreno et al., 1990; Brown, 1987; Babadagli and Develi, 2000; Tsang and Witherspoon, 1983) によると、水理学的影響については、開口幅の分散や破面の凹凸形状が流体・物質移動特性に大きな影響を及ぼすこと、相関長やフラクタル次元に関しては二次的な影響に止まることが指摘されている。この結果から流体・物質移動特性に影響を及ぼすパラメータとして、①亀裂破面高さの標準偏差 σ_s (破面粗さを表現したパラメータ)、②亀裂開口幅の標準偏差 σ_a (開口幅不均質性を表現したパラメータ) の2つを選定した。

また、単一亀裂の不均質な形状の数値モデル作成手法には、亀裂モデルに対して使用実績のある Glover ら (1997) のモデルに注目した。Glover らのモデルによって生成される亀裂は、亀裂を構成する1対の破面形状 (高さ分布) を持っているので、流体・物質移動の三次元的な取り扱いや二次元分布のみ用いる Reynolds の方法にも適用可能である。よって、三次元流体・物質移動解析の亀裂モデル生成手法として Glover の数学モデル手法を使用した。この数学モデルに基づいて、三次元亀裂モデル生成コードを作成した。

iii) LGA 法による流体・物質移動解析と結果

亀裂の不均質性が流体・物質移行特性に与える影響検討のため、ii) の手法により構築した亀裂モデルを用いて、LGA 解析コードによる流体・物質移動解析を実施した。流体・物質移動特性に及ぼすパラメータ (σ_s と σ_a : ii) ①, ②参照) を10パターン設定し、また粒子の流れ方向に関してはそれぞれの亀裂モデルに対して正方向 (+x 方向)、その逆方向 (-x 方向)、亀裂面と平行に90度回転方向 (+y 方向)、その逆方向 (-y 方向) の計4方向を設定し、計

40 ケースの解析を実施した。ただし開口幅の平均値を比較的大きな値に設定したため、実際の亀裂と違い閉塞部分は存在しない。解析結果の代表例として、基本ケースである Case01 ($\sigma_s=0.6$, $\sigma_a=0.2$) の結果を図 5.2.1-19~5.2.1-21 に示す。亀裂開口幅分布を図 5.2.1-19 に、+x 方向流れの流速ベクトル分布を図 5.2.1-20 に、+x 方向流れのトレ

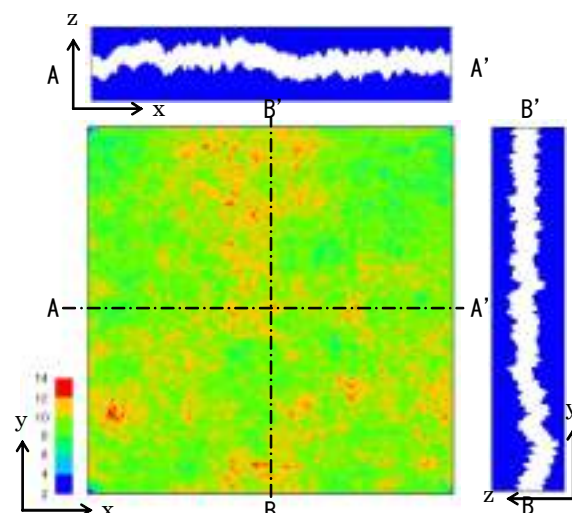


図 5.2.1-19 亀裂開口幅分布 (Case01)

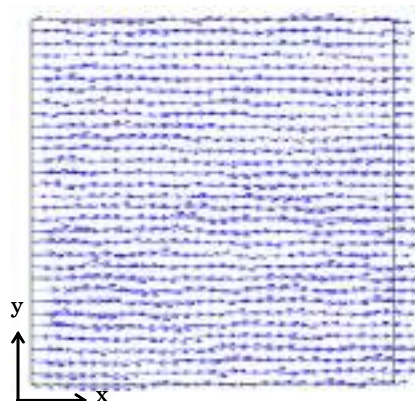


図 5.2.1-20 +x 方向の流速ベクトル分布

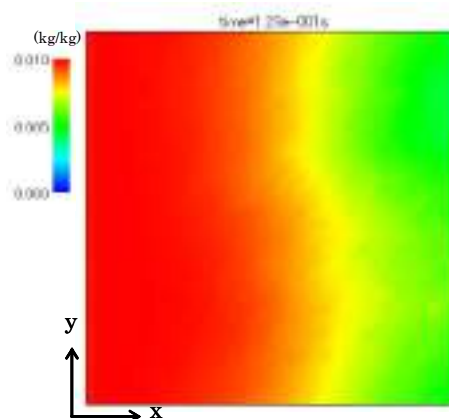


図 5.2.1-21 +x 方向のトレーサ濃度分布 (注入濃度 50%到達時)

一サ濃度分布（出口平均トレーサ濃度が注入濃度の50%到達時）を図5.2.1-21に示す。以上の解析から、物質移動解析結果に与える亀裂内不均質性パラメータの影響について以下の結論を得ることができた。

- 流体解析について、亀裂破面高さの標準偏差 σ_s の増加とともに透水量係数が減少する。これは3次元流路長の増加と亀裂破面の凹凸の増大による鉛直方向速度成分の増加によるものと考えられる。一方、亀裂開口幅の標準偏差 σ_a が増加すると水平方向流線の偏りが大きくなりチャンネルが発生するが、透水量係数への影響は小さい。これは本検討においては、閉塞部が存在しないように、開口幅の平均値を大きな値に設定しているため、実現現象とは異なる可能性がある。
- 物質移動解析について、各ケースの注入濃度50%到達時のトレーサ濃度分布を見ると、 σ_s はトレーサ濃度分布への影響は小さいが流速に大きく影響し、 σ_s の増大とともにトレーサ流速が減少する。これは亀裂破面の凹凸が大きくなり3次元流路長が増加するためと考えられる。また、 σ_a が増加するとチャンネル

に沿ってトレーサが速く進み、大きな偏りをもつ分布となるが、平均的なトレーサ流速への影響は小さい。ただしこれも上記と同じく、実現現象とは異なる可能性がある。

- 異方性のある亀裂では、流れ方向によってトレーサ流速が変わるが、その大きさは亀裂の各方向の σ_s の大きさによって決まると考えられる。
- 図5.2.1-22に各解析ケースの各開口幅（水理学的開口幅 b_h 、物質移行開口幅 b_t 、マスバランス開口幅 b_m 〔透水試験とトレーサ試験から定義される開口幅〕）と σ_s の関係を、図5.2.1-23には各開口幅と σ_a の関係を示す。Sillman (1989)の分類による各開口幅の大小関係「 $b_t < b_h < b_m$ 」は σ_s 、 σ_a に関係なく成立している。また図5.2.1-22では σ_s の増加により b_h と b_t が減少するが、図5.2.1-23では σ_a に関係なく各開口幅はほぼ一定値を保っている。つまり、亀裂破面の粗さが b_t 、 b_h 、 b_m に大きく影響することがわかった。

③ まとめ

無次元量であったLGA解析結果を物理量で表現する手法を検討し、物理量が推定できる見通しを得た。また、流体・物質移動特性に影響を及ぼす不均質性パラメータを既往の文献調査から2種類選定し、そのパラメータを用いてケーススタディーによる亀裂モデルを作成し、LGA解析コードにより、不均質性パラメータが流体・物質移動特性に与える影響を検討した。しかし、物理量との対比では精度の向上が課題として残り、また不均質性パラメータの流体・物質移動特性に及ぼす影響検討では、実際の亀裂を対象とした検討を行い、LGA解析値と実験値の比較、および不均質性の影響検討を実施する必要があることがわかった。

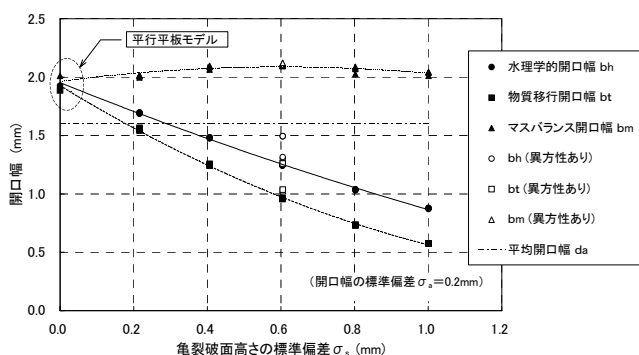


図 5.2.1-22 各開口幅(b_h , b_t , b_m)と亀裂破面高さ標準偏差 σ_s の関係

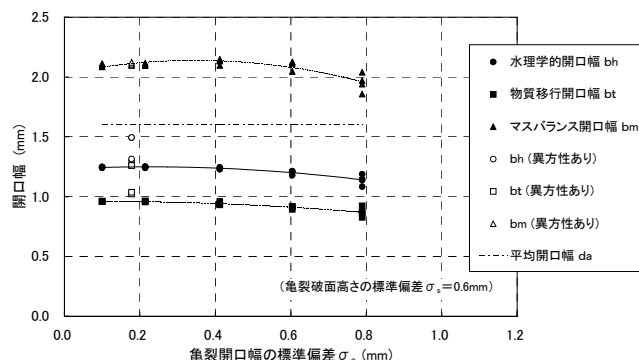


図 5.2.1-23 各開口幅(b_h , b_t , b_m)と亀裂開口幅標準偏差 σ_a の関係

参考文献

- Babadagli, T. and Develi, K. (2000) : Fractal Analysis of Natural and Synthetic Fracture Surfaces of Geothermal Reservoir Rocks, Proc. World Geothermal Congress 2000, Kyusyu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, 2000, pp. 2515-2520.
- Brown, S.R. (1987) : Fluid Flow Through Rock Joints : The Effect of Surface Roughness, J. Geophys. Res., Vol. 92, No. B2, pp. 1337-1347.
- Frisch, U., d'Humieres, D., Hasslacher, B., Lallemand, P., Pomeau, Y. and Rivet, J.P. (1987) : Lattice Gas Hydrodynamics in Two and Three Dimensions, Complex Systems, Vol. 1, pp. 649-707.

- Glover, P. W. J., Matsuki, K., Hikima, R. and Hayashi, K.
(1997) : Fluid flow in fractally rough synthetic fractures, Geophys. Res. Lett., Vol. 24, pp. 1803-1806.
- 加藤恭義, 光成友孝, 築山洋 (1998) : セルオートマトン法, 森北出版, pp. 41-71.
- Moreno, L., Tsang, C. F., Tsang, Y. W. and Neretnieks, I.
(1990) : Some Anomalous Features of Flow and Solute Transport Arising from Fracture Aperture Variability, Water Resour. Res., vol. 26, No. 10, pp. 2377-2391.
- Silliman, S. E (1989) : An Interpretation of the Difference Between Aperture Estimates Driven from Hydraulic and Tracer Tests in a Single Fracture, Water Resources Research, vol. 25, No. 10, pp. 2275-2283.
- 薦原道久, 高田尚樹, 片岡武 (2001) : 格子気体法・格子ボルツマン法, コロナ社, pp. 36-51.
- Somers, J. A. and Rem, P. C. (1992) : Obtaining Numerical Results from the 3D FCHC-Lattice Gas, Lecture Notes in Physics, Vol. 398, pp. 59-78.
- Tsang, Y. W. and Witherspoon, P. A. (1983) : The Dependence of Fracture Mechanical and Fluid Flow Properties on Fracture Roughness and Sample Size, J. Geophys. Res., Vol. 88, No. B3, pp. 2359-2366.
- 吉野尚人, 青山裕司, 高瀬博康, 澤田淳, 内田雅大 (2003) : セルオートマトン法による流体・物質移動解析手法の開発, 土木学会第 58 回年次講演会講演集, CS7, pp. 403-404.

3-3) 亀裂ネットワーク・原位置試験（原位置トレーサー試験に対する概念モデルの不確実性解析）

① 課題と計画の概要

結晶質岩における核種移行評価において、処分孔から直近の断層までのニアフィールド岩盤は、天然バリア中の核種の移行遅延上最も重要な役割を果たしている。ニアフィールド岩盤は、坑道から数10m～数100m程度の規模が考えられており、ブロックスケールと呼ばれている。このスケールにおいては母岩中の亀裂ネットワークが重要となる。このスケールに対しては、世界的に精力的にトレーサー試験が行われている。しかしながら、OECD/NEAのGeotrapプロジェクト(OECD/NEA, 1996)で指摘されているように、トレーサー試験の性能評価における役割は必ずしも明確に示されているとは言えない。また、トレーサー試験のような短期の試験結果を性能評価のような長期の予測に反映するためには、どのプロセスがどの時間スケールにおいて支配的に寄与するかを検討が必要である。このため、トレーサー試験で把握すべき性能評価において重要な項目を明らかにすることにより、性能評価側から調査側への要求を明確化することが必要である。

「第2次取りまとめ」においては、亀裂ネットワークモデルが一次元平行平板モデルでの近似を行う際に用いられたが、これらのモデルにおいては、亀裂中の充填物の影響が考慮されていない。また、亀裂ネットワークモデルの亀裂パラメータに対する核種移行への感度解析においてもトレーサー試験に対するキャリブレーションは実施されておらず、トレーサー試験から得られるパラメータが性能評価結果をどの程度拘束可能かの検討は行われていなかった。

このような観点から、スウェーデンSKBが主催する水理・物質移行モデリングタスクフォースにおいて、タスク6:PASCプロジェクト(サイト特性調査データを用いた性能評価)をサイクル機構が提唱し、各国の賛同を得て検討が開始された。このタスクは、トレーサー試験を説明可能な短期・長期両方のプロセスを考慮した複数の現実的モデルを構築し、それらのモデルを用いて性能評価の流速条件および時間スケールでの挙動を比較することにより、性能評価に大きな影響をもたらすプロセスとそれに必要なパラメータを検討するもので

ある。

タスク6は、SKBがエスポ地下研究施設で実施したトレーサー試験データを用いて以下の6段階に分けて実施されている。

- ・タスク6A: 単一亀裂の概念モデルの検討を目的として、単一亀裂を対象として行われた5m規模のSTT-1bトレーサー試験のモデル化
- ・タスク6B: 6Aで評価した移行経路での性能評価条件の流速(動水勾配0.1%)および性能評価時間スケールでのトレーサーの長期移行挙動予測
- ・タスク6B2: トレーサー放出源を処分孔を模擬した長さ2mの線放出源とし、自然状態の流れ場と流速を想定した境界条件による性能評価時間スケールでの長期移行挙動予測
- ・タスク6C: 亀裂ネットワークスケールでの予測解析を行うためのTRUE Block Scale試験サイトを対象にした水理地質構造モデルの構築
- ・タスク6D: 亀裂ネットワークを対象として実施された移行経路長66mのC2トレーサー試験のモデル化
- ・タスク6E: 上記モデルの性能評価条件の流速(動水勾配0.1%)および性能評価時間スケールでのトレーサーの長期移行挙動予測

サイクル機構では、亀裂内に存在する亀裂充填物質(ガウジ)が大きな空隙率および拡散係数を有しているため、短期のトレーサー試験において亀裂充填物質中の拡散が支配的プロセスとなる可能性があることに着目して、亀裂充填物質を考慮した検討を行った。また、亀裂ネットワークについては亀裂パラメータの違いや亀裂充填物質の有無を考慮した検討を行っている。

本タスクは、平成13年度に開始され、現在タスク6Dが実施中である。以下に平成15年度までに行ったタスク6A, 6B, 6B2の結果および6Dの進捗状況について述べる。

② これまでの成果

i) タスク6A

本タスクは、TRUE-1試験(単一亀裂におけるトレーサー保持機能理解試験)(図5.2.1-24, 25)の一環として、Feature Aと呼ばれる亀裂において行われたSTT-1bトレーサー試験(Winberg et al., 2000)のモデル化(タスク4)(Elert and Svensson, 2001, Mazurek and Jacob, 2001など)を受けて行われた。

STT-1bトレーサー試験における流れ場は、注入孔での加圧を行うことなく揚水孔から揚水するた

め、揚水孔に収斂する(Radially Convergent) 流れ場であり、亀裂中を移行するトレーサーの幅は亀裂開口幅の違いにより変化するものの、大きく広がることや分岐することがないと推定されるため、トレーサーの移行を一次元モデルで表現することとした。

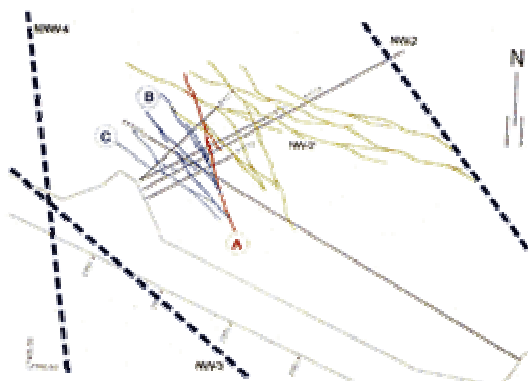


図 5.2.1-24 Feature A の位置

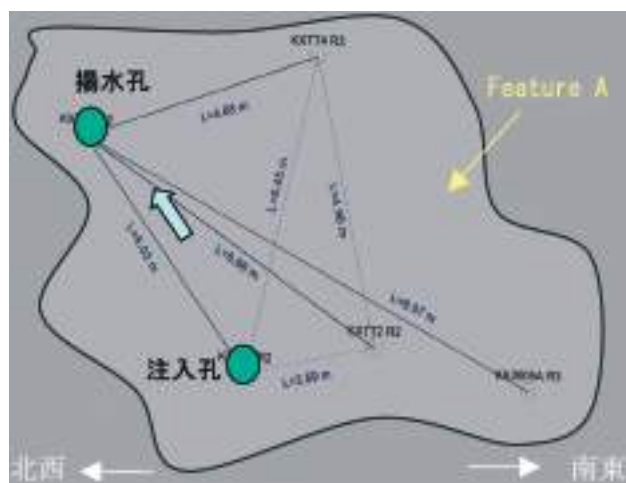


図 5.2.1-25 Feature A を貫通する STT-1b
トレーサー試験のボーリング孔配置

移行経路の概念モデルを図 5.2.1-26 に示す。ここでは、亀裂の移流空隙→マイロナイト→変質部→健岩部 (A1→A4→A5→A6) という従来のマトリクス拡散に加え、亀裂の移流空隙→亀裂内充填物への拡散 (A1→A3) を考慮した。

キャリブレーション (実測値を再現するようモデルのパラメータを調整すること) に当たっては、非収着性トレーサー、収着性トレーサーの2段階に分けて行った。STT-1b トレーサー試験においては、非収着性トレーサーとして HT0, I-131 が、収着性トレーサーとしては Sr-85, Co-58 が解析対象となっている。非収着性トレーサーのキャリブレーション

ョンにおいては、開口幅、移流速度、分散長、充填物の拡散深さ、充填物の空隙率、変質部の拡散深さ、

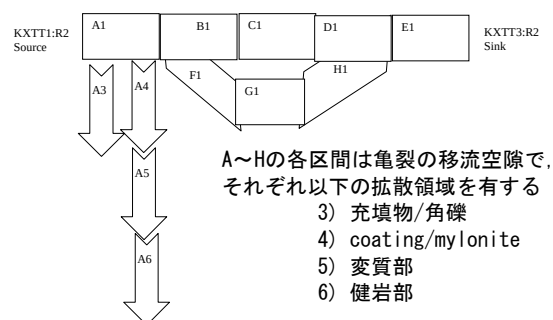
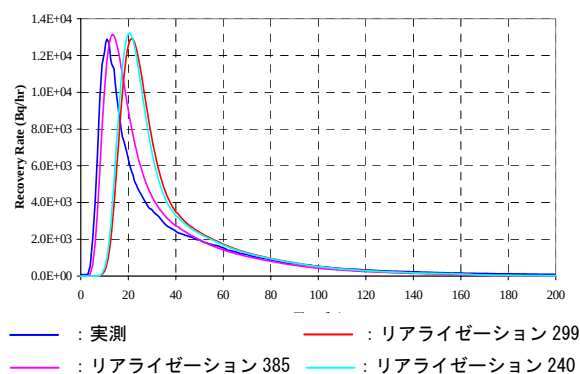


図 5.2.1-26 移行経路の概念モデル

変質部の空隙率、健岩部の拡散深さ、健岩部の空隙率の範囲を一様分布で定義し、パラメータをモンテカルロ法によりサンプリングして作成したモデルを 400 リアライゼーション (確率密度関数で定義されたパラメータの分布から、モンテカルロ法などによりパラメータをサンプリングして作成したモデル) 作成し、モデルから予測された破過曲線が実測値に最も近いリアライゼーションを抽出した。実測への適合度は性能指標を設定し、これに基づき判断した。性能指標としては、 t_{05} , t_{50} , t_{95} (破過曲線の最大濃度の 5%, 50%, 95% に到達する時間)、ピーク放出時間、ピーク放出率のそれぞれの誤差 (%) の二乗和の合計を用いた。収着性トレーサーのキャリブレーションにおいては、非収着性トレーサーに対するキャリブレーション結果に加え、Sr-85 を用いた K_d のキャリブレーションを行った。Sr-85 に対するキャリブレーション後の破過曲線を図 5.2.1-27 に示す。



*リアライゼーションの番号は、400 個発生させた際の ID 番号

図 5.2.1-27 キャリブレーションにより選択されたリアライゼーションでの Sr-85 の破過曲線

ii) タスク 6B

タスク 6A で抽出したトレーサー試験を再現するリアライゼーションを用いて、性能評価の条件下での挙動を比較するため、動水勾配を 0.1% に低減しモデルの挙動を比較した。Am-241 の例を図 5.2.1-28 に示す。

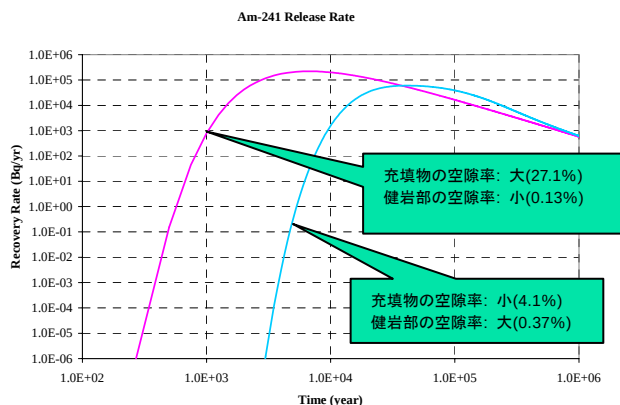


図 5.2.1-28 パラメータの異なるモデルの性能評価流速での挙動比較

図に示すように、充填物の空隙率を低くかつ健岩部の空隙率を高く見積もったモデル（図中水色の破過曲線）は、充填物の空隙率を高くかつ健岩部の空隙率を低く見積もったモデル（図中ピンク色の破過曲線）より最大ピーク時間が遅い。前者のモデルは、充填物の影響を小さく見積もったモデルであり充填物を全く考慮しない従来の性能評価で用いているモデルに近い挙動を示すものと考えられ、従来の性能評価で用いているモデルでトレーサー試験の解釈を行う場合には、トレーサー試験のような短期で遅延上支配的となる亀裂充填物による遅延効果を健岩部の特性として評価してしまうため、その特性を性能評価にそのまま用いると非保守的な結果になることを示している。

iii) タスク 6B2

次に単一亀裂中の透水量係数（亀裂開口幅）の不均質性（チャンネルリング）の影響を検討することを目的に、図 5.2.1-29 に示すように Feature A を横切る Fracture（亀裂）X, Y を想定し、その間で動水勾配 0.1% を仮定し、下流側の亀裂 Y における核種の放出率を評価することにより、自然の条件に

近い境界条件での解析を行った。このような境界条件の場合には、タスク 6B に比べて、流れ場は不均質性の影響を受けやすくなると考えられる。

タスク 6B2 においては、不均質性の影響を検討するために、表 5.2.1-1 および図 5.2.1-30～33 に示す 4 つの異なる透水量係数の不均質場を想定した。

各不均質場について、STT-1b トレーサー試験を図 5.2.1-29 のレイアウトでモデル化し、HTO, I-131, Sr-85, Co-58 について物質移行開口幅と Kd のキャリブレーションを行った。

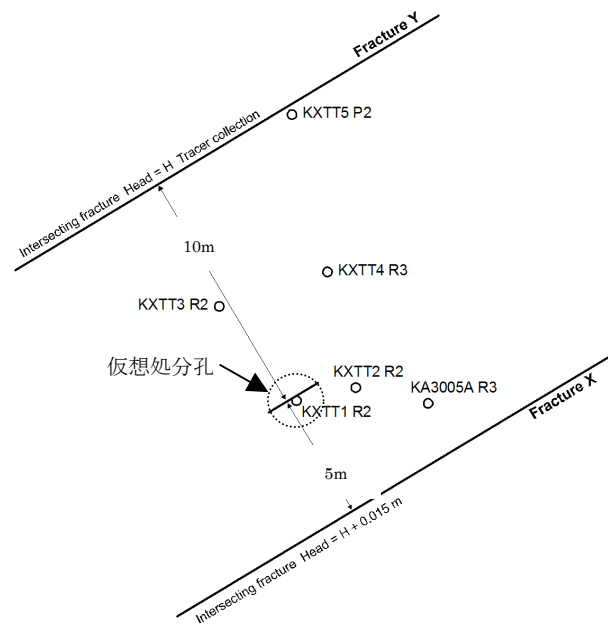


図 5.2.1-29 タスク 6B2 の境界条件

表 5.2.1-1 透水量係数の不均質場とパラメータ

ケース	透水量係数の不均質性の特徴	統計的相関モデル（バリオグラム）	パラメータ T_{mean} : 平均透水量係数 T_{std} : 透水量係数の標準偏差 Cov : 共分散 Dimension: 次元
1	幅の広いチャンネル	指数関数モデル	$T_{\text{mean}} 10^{-6}$ $T_{\text{std}} 5 \times 10^{-6}$ $\text{Cov} 2$ Dimension 2
2	幅の狭いチャンネル	指数関数モデル	$T_{\text{mean}} 10^{-6}$ $T_{\text{std}} 5 \times 10^{-6}$ $\text{Cov} 1$ Dimension 3
3	チャンネルなし（幅広い不均質性パターン）	指数関数モデル	$T_{\text{mean}} 10^{-6}$ $T_{\text{std}} 10^{-6}$ $\text{Cov} 1$ Dimension 2
4	チャンネルなし（幅狭い不均質性パターン）	Null モデル	$T_{\text{mean}} 10^{-6}$ $T_{\text{std}} 10^{-6}$

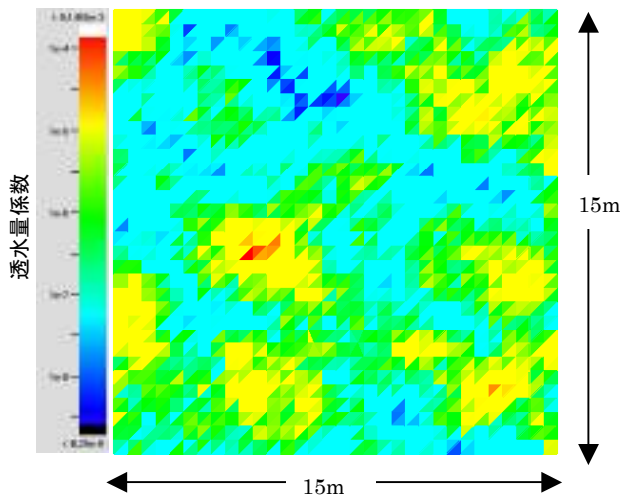


図 5.2.1-30 ケース 1 の透水量係数の不均質場

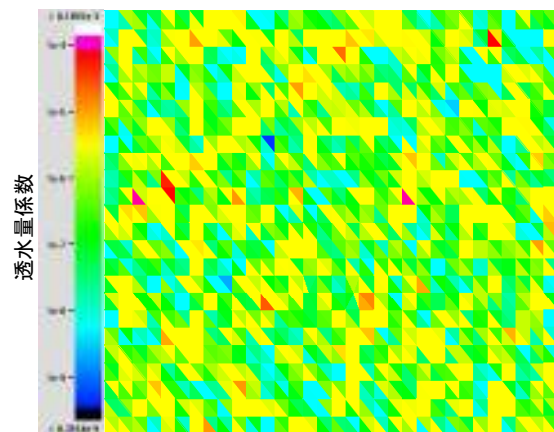


図 5.2.1-31 ケース 2 の透水量係数の不均質場

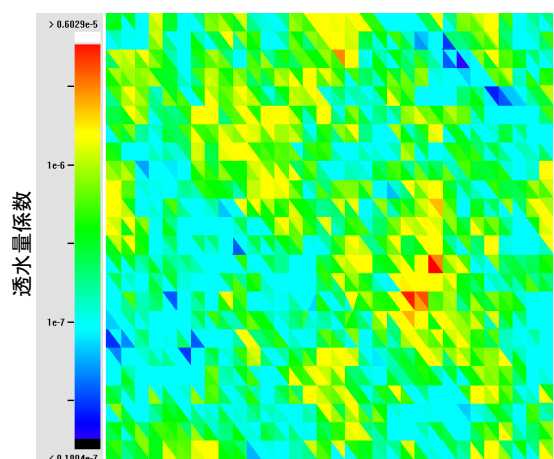


図 5.2.1-32 ケース 3 の透水量係数の不均質場

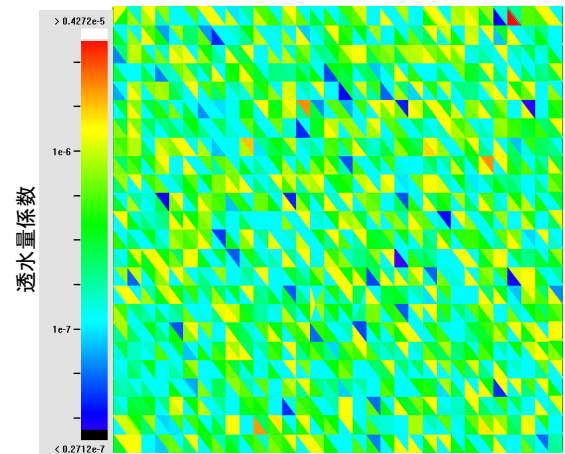


図 5.2.1-33 ケース 4 の透水量係数の不均質場

キャリブレーションを行った後に、上述の性能評価条件の境界条件を適用し、下流側の亀裂Yにおけるトレーサーの放出率を表す破過曲線を比較した。Am-241 の例を図 5.2.1-34 に示す。図に示されるように、不均質場の影響はピーク時間が数倍以内の差しかなく、Task6B に比べて小さい。このことから、トレーサー試験に基づきキャリブレーションを行ったモデルが性能評価条件下での挙動のパラッキを拘束していることが分かる。

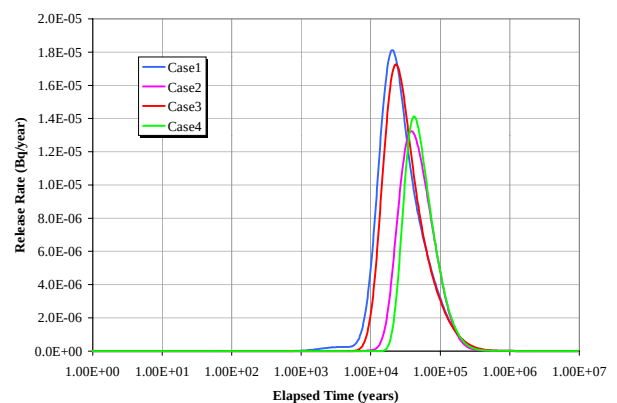


図 5.2.1-34 Am-241 の性能評価条件下での破過曲線

iv) タスク 6D

本タスクにおいては、TRUE ブロックスケール試験 (Andersson et al., 2002) で実施された C2 トレーサー試験のモデル化が行われた。TRUE ブロックスケール試験サイトのモデル化は、図 5.2.1-35, 36 に示すように一辺が 200m の領域を対象として実施された。図に示すように、地質構造モデルでは複数のボーリングで把握された決定論的構造と、1 本

のボーリングのみで観測されるか統計的に存在を推定したバックグラウンド亀裂がモデル化された。C2 トレーサー試験においては、図 5. 2. 1-37 に示すように決定論的構造 23 よりトレーサーを注入し、決定論的構造 22, 20 を経由して決定論的構造 21 より回収された。

表 5. 2. 1-2 に、決定論的構造の透水量係数と構造内の微視的構造の区分を示す。

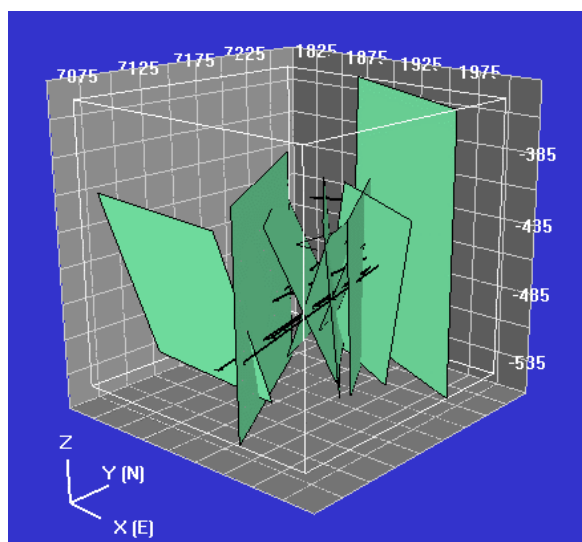


図 5. 2. 1-35 タスク 6D の地質構造モデル
(決定論的構造のみ表示)

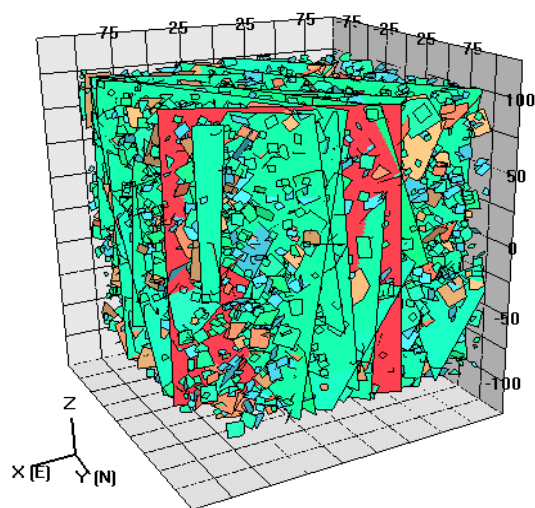


図 5. 2. 1-36 タスク 6D の地質構造モデル
(全亀裂および構造を表示)

バックグラウンド亀裂は亀裂の方向により 2 つの亀裂セットに分けられ、透水量係数については、亀裂セット毎に定義された。亀裂セット 1 は平均 $1.09 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 、標準偏差が $2.01 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 、亀

裂セット 2 は平均 $1.03 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 、標準偏差が $1.60 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ が設定された。

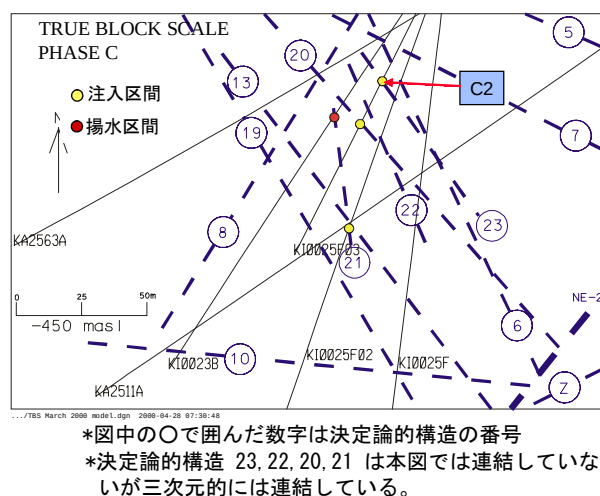


図 5. 2. 1-37 TRUE ブロックスケール試験の
レイアウト

表 5. 2. 1-2 決定論的構造の透水量係数と構造
内の微視的構造

決定論的構造 ^{*1}	透水量係数 ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)	物質移行開口幅 (m)	微視的構造 ^{*2}
5	4.02×10^{-7}	2.917×10^{-4}	Type 1
6	1.91×10^{-7}	2.010×10^{-4}	Type 2
7	9.76×10^{-8}	1.437×10^{-4}	Type 2
10	2.98×10^{-8}	7.941×10^{-5}	Type 1
13	1.38×10^{-8}	5.404×10^{-5}	Type 1
19	1.02×10^{-7}	1.469×10^{-4}	Type 1
20	1.43×10^{-7}	1.740×10^{-4}	Type 1
21	6.02×10^{-8}	1.129×10^{-4}	Type 2
22	2.19×10^{-8}	6.807×10^{-5}	Type 2
23	1.66×10^{-7}	1.874×10^{-4}	Type 2
24	8.51×10^{-8}	1.342×10^{-4}	Type 2

*1: 数字は図 5. 2. 1-37 中の番号と対応

*2: Type 1: 断層, Type 2: 節理

サイクル機構は、本トレーサー試験では亀裂ネットワークが課題であることから、主要な構造は決定論的に与えられていることから、決定論的構造の間の母岩中のバックグラウンド亀裂に着目し、以下の不確実性について検討することとした。

- ① 亀裂の方向のバラツキの影響
- ② 亀裂の大きさの影響
- ③ 亀裂サイズの下限カットオフの影響

- ④構造内の微視的構造の違いの影響
⑤構造の分岐・合流の影響

このうち、④については断層 (Type 1) と節理 (Type 2) によって図 5. 2. 1-38 に示すように構造内の微視的構造の違いがあり、前者には断層ガウジが含まれるのに対し、後者には含まれないことからその影響を検討することとした。また、⑤については一本の構造であっても規模が大きい場合は、数本に分岐し、その本数が分岐・合流のため空間的に変化することが報告されている。このため、枝構造の本数により各決定論的構造は 5 段階に区分された。

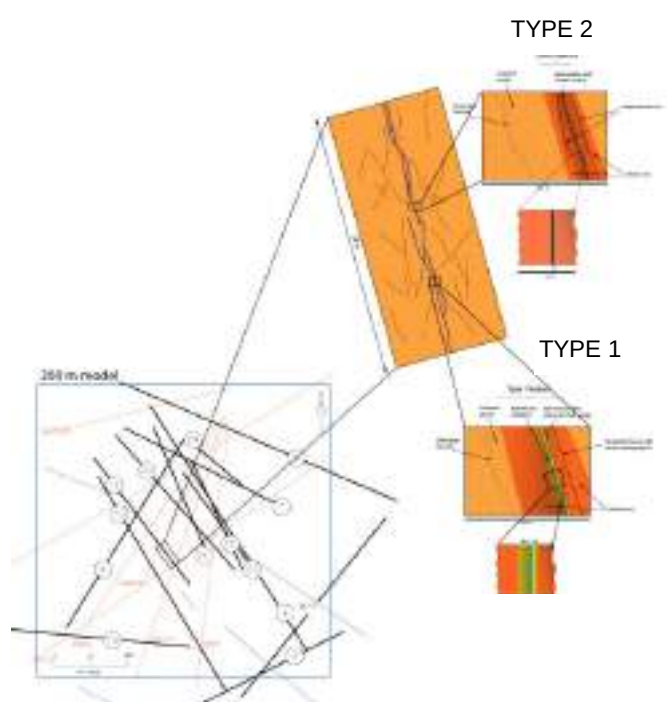


図 5. 2. 1-38 断層 (Type 1) と節理 (Type 2) の微視的構造

平成 15 年度においては、トレーサー試験に対するキャリブレーションに先立って上記②、③、④についての感度解析の検討を行った。②亀裂大きさの影響については、対数正規分布で平均値 2m、標準偏差 2m の場合と平均値 6m、標準偏差 3m の場合についての検討を行った。③亀裂サイズの下限カットオフの影響については、カットオフ値を 2m と 3m とした場合について検討を行った。④構造内の微視的構造の違いの影響については、Type 1、Type 2 を指定通り割り当てた場合と全てを Type 2 とした場合の比較を行った。解析ケースは、表 5. 2. 1-3 のよ

うに設定した。結果を図 5. 2. 1-39 に示す。これらの解析の結果、バックグラウンド亀裂の半径が大きくカットオフ値の大きいケース 4 の場合に実測値より早い破過が生じていることがわかる。この原因は以下のように推定される。本解析では、トレーサー試験をモデル化するために注入孔、回収孔に一定流量の内部境界条件を与えているため、他のケースでは、決定論的構造とバックグラウンド亀裂の透水量係数の差が少ないため、バックグラウンド亀裂を経由する経路への流量の分配が起き、移行距離が長くなるため実測値より遅い破過となった。一方、ケース 4 ではバックグラウンド亀裂が大きく、またカットオフ値が大きいいため、モデル化された亀裂数が少なくなることにより、バックグラウンド亀裂自体が形成する移行経路が減少し、決定論的構造 21, 23 に流量が集中した。この場合移行距離が短くまた透水性も高いため破過が早くなったものと考えられる。微視的構造の設定の違いについては、今回の解析では大きな違いは認められなかった。これは、もともと主要な移行経路である決定論的構造 20, 21, 22, 23 が 20 を除いて Type 2 であったためと考えられる。

表 5. 2. 1-3 感度解析ケース

	ケース番号			
	1	2	3	4
亀裂半径密度関数	対数正規分布			
	平均値(m)	2	6	6
	標準偏差(m)	2	3	3
サイズカットオフ(m)	2	2	2	3
Type	1,2	1,2	2	2

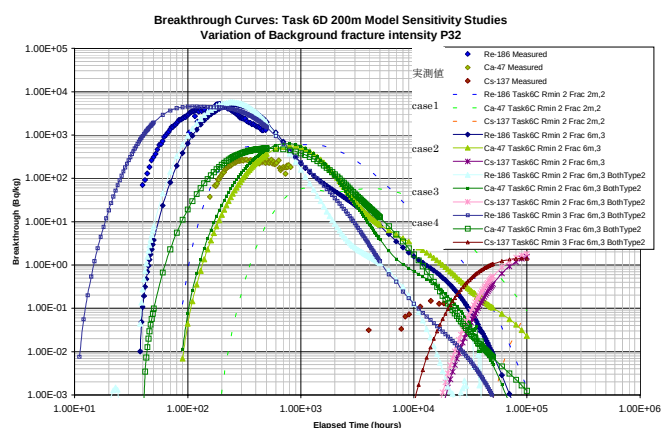


図 5. 2. 1-39 感度解析の結果

③ まとめ

水理・物質移行モデリングタスクフォースにおいて、「第2次取りまとめ」で用いた亀裂中の核種移行概念モデルでは考慮していなかった亀裂充填物の影響、亀裂内の開口幅の不均質性の影響、亀裂ネットワークの実際の特徴と考えられる亀裂間の亀裂の大きさの違いなどの影響について評価を行った。その結果、亀裂充填物については、実際のトレーサー試験に性能評価で用いるモデルを適用し性能評価に用いるパラメータを得た場合には、それを用いた評価が非保守的になる可能性があることが示された。このことは、世界的にも原位置トレーサー試験の性能評価に対する役割が議論されている中で、時間におけるスケールアップに対する一つの留意点を示唆するものと考えられる。

単一亀裂中の透水量係数の不均質性（チャネルリング）の違いが性能評価に与える影響は、今回の解析ケースではさほど大きくないことが推定された。

このように、キャリブレーションにより原位置トレーサー試験結果を同様に説明可能な複数のモデルを作成し、性能評価時間スケールでの挙動を比較することにより、原位置トレーサー試験がどの程度性能評価時間スケールでのモデルの挙動を拘束可能か、また不確実性として何が残っておりどのような情報を追加すべきかを明らかにすることが可能となると考えられる。

今後は、決定論的構造からなるネットワークにおいて行われた原位置トレーサー試験を説明可能な複数のモデルについて性能評価の流速条件下での挙動を比較することにより、原位置トレーサー試験が性能評価条件下でのモデルの挙動をどの程度拘束可能かについて引き続き検討を行い、原位置トレーサー試験で取得すべきパラメータの明確化を図っていく予定である。

参考文献

- Andersson, P., Byegård, J., Dershowitz, B., Doe, T., Hermanson, J., Meier P., Tullborg, E. and Winberg, A. (2002): Final Report of the TRUE Block Scale Project 1. Characterisation and model development, SKB Technical Report TR-02-15 など
- Elert, M. and Svensson, H. (2001): Evaluation of modelling of the TRUE-1 radially converging tests with sorbing tracers, SKB Technical Report TR-01-12.
- Mazurek, M. and A. Jacob (2001): Evidence for matrix diffusion in the TRUE-1 Block at Äspö based on

- fracture characterization and modeling of tracer tests, Geological Evidence and Theoretical Bases for Radionuclide Retention, Workshop Proceedings, Oskarshamn, Sweden, 7-9 May 2001, OECD NEA, Paris.
- OECD/NEA (1996): Field tracer experiments: Role in the prediction of radionuclide migration, Synthesis and proceedings of an NEA/EC Geotrap Workshop, Cologne, Germany 28-30 August 1996.
- Winberg, A., Andersson, P., Hermanson, J., Byegård, J., Cvetkovic, V. and L. Birgersson (2000): Final report of the first stage of the tracer retention understanding experiments, SKB Technical Report TR-00-07.

3-4) 亀裂を有する堆積軟岩の水理特性

① 課題と計画の概要

地層処分システムの性能評価においては、天然バリアである地層を構成する岩盤の水理および物質移行特性を、実際の地質環境から得られる調査試験結果に基づき適切に評価し、モデルの選定・構築やパラメータ値の設定に反映させることが重要である。「第1次取りまとめ」では、わが国の岩盤を亀裂内の流れが支配的な亀裂性岩盤と粒子間隙中の流れが支配的な多孔質岩盤に分類した。しかしながら、わが国の多くの岩盤は、亀裂内の流れが支配的となる可能性が確認されるとともに、新第三紀堆積岩においては粒子間隙以外にも亀裂中の流れも有意であることが観察されたことから（井尻ほか、1999a）、「第2次取りまとめ」では、わが国の岩盤を亀裂性岩盤および、亀裂性岩盤と多孔質岩盤の特性をあわせ持つ岩盤の2つに分類した。

後者の岩盤については、亀裂部を亀裂ネットワークモデル、岩石基質部を連続体モデルによりそれぞれ核種移行解析を行い、両者の解析結果を重ね合わせるにより評価を行った（井尻ほか、1999b）。しかしながら、亀裂性岩盤と多孔質岩盤の特性をあわせ持つ岩盤中に存在する核種は、本来、亀裂部と岩石基質部双方の影響を受けながら移行すると考えられることから、上述した亀裂部と岩石基質部の解析結果を重ね合わせる方法の信頼性を定量的に明らかにすることが重要である。

そこで、亀裂性岩盤と多孔質岩盤の特性をあわせ持つ岩盤の代表として、亀裂を有する堆積軟岩に着目し、その一般的な水理及び物質移行特性を文献調査や幌延地域の堆積岩を一例とした室内試験を通して理解するとともに、亀裂を有する堆積軟岩中の地下水流動および物質移行現象を記述する概念モデルの構築を目的とした研究を平成14年度より実施している。

平成14年度は、文献調査によるわが国の堆積軟岩の基本物性の収集・整理、堆積軟岩コア試料を用いた室内透水試験とトレーサー試験、軟岩コア試料の分析およびモデル化に関する検討を行った（下茂ほか、2003）。

本報告では、新第三紀泥岩の亀裂のない試料および亀裂を有する試料を用いて行った室内試験（透水試験、拡散試験、トレーサー試験）および解析的検討について述べる。

② これまでの成果

i) 試験試料

試験試料は、幌延深地層研究計画として幌延地域の堆積軟岩を対象に実施している地上からの調査研究において、平成14年度に掘削した試験孔（HDB-4孔）より得られたボーリングコアから採取した。同試験孔は、掘削深度が約500mと深く、深部岩盤内の新鮮なコアが採取可能であり、また、深度方向に続成作用の違いが確認されていることから、同試験孔の試料により続成作用の違いによる水理・物質移行特性の比較が可能である。同試験孔を利用した調査結果によると、深度128m付近までの上部の珪藻質泥岩を声間層、それ以深の硬質頁岩を稚内層としている（例えば、「平成14年度報告」）。本試験では、稚内層を対象として、3ヶ所の深度（200, 300, 450m 付近）のボーリングコア（直径86mm）を孔軸と直交方向に再コアリングし、直径・高さともに50mmのコア試料に整形した。試料の主な基本物性値のうち、乾燥密度は1.47～1.67g cm⁻³、有効間隙率は33.2～41.4%、弾性波（S波）速度は0.98～1.15km s⁻¹であった。

ii) 室内試験の方法・試験ケース

上述の試料を用いた事前の予備試験において、亀裂の有無により試料の透水性に大きな差が確認できたため、亀裂の有無に応じた試験方法を選択した（表5.2.1-4）。亀裂のない試料（以下、「インタクト試料」）については、透水性が非常に低いことが想定されたことから、透水試験については低透水性岩石への適用実績のあるランジェントパルス法を、物質移行特性については、低透水性のために移流・分散効果を見逃しうると考えられることから、岩石マトリクス部の拡散係数を求めることを目的とした拡散試験を行った。一方、亀裂を有する試料（以下、「亀裂試料」）については、透水性が比較的高いことが想定されたことから、定流量透水試験およびトレーサー試験を実施した。

表 5.2.1-4 室内試験内容

	透水試験	物質移行試験
インタクト試料	ランジェントパルス法	拡散試験(透過拡散法)
亀裂試料	定流量透水試験法	トレーサー試験

iii) インタクト試料における試験

a) 透水試験（トランジェントパルス法）

トランジェントパルス法による透水試験は、一定の封圧条件下に置いたコア試料に対して、上流側貯留槽に瞬時に水压を作用させ、上流側及び下流側の貯留槽における圧力の経時変化から透水係数を求める方法である（図 5. 2. 1-40）。

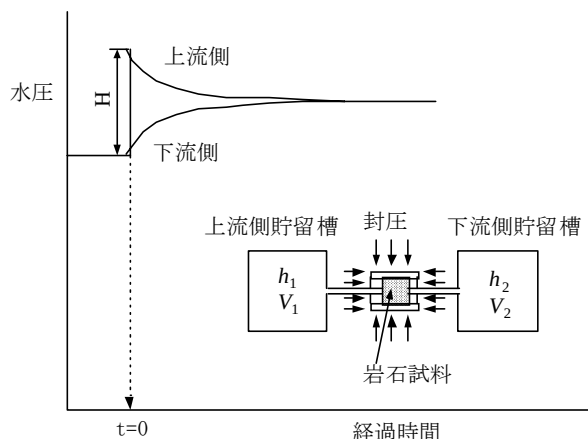


図 5. 2. 1-40 トランジェントパルス法の測定原理

透水係数の算定にあたっては、Brace 法 (Brace et al., 1968) および、Hsieh 法 (Hsieh et al., 1981) での温度による解析誤差を低減するために上流側と下流側の水压の差をとる方法（下茂ほか，2003）（以下、「差圧を用いた Hsieh 法」）を用いた。

試験結果から、今回の試験で用いたインタクト試料の透水係数は $10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ オーダーであり（表 5. 2. 1-5）、同等の有効空隙率（約 30～40%）を有する同種の岩石に比べ透水性が極めて低いことが分かった。

表 5. 2. 1-5 インタクト試料透水試験結果一覧

採取深度 (m)	透水係数 (m s^{-1})		比貯留係数 (m^{-1})
	Brace 法	差圧を用いた Hsieh 法	差圧を用いた Hsieh 法
200	4.83×10^{-12}	5.49×10^{-12}	1.12×10^{-5}
300	4.83×10^{-12}	4.88×10^{-12}	6.08×10^{-6}
450	1.69×10^{-12}	1.63×10^{-12}	8.11×10^{-6}

b) 拡散試験

拡散試験は、試料を直径 30mm、厚さ 5mm の円盤状に再整形し、周囲をエポキシ系樹脂で固めたものを試料として用い、透過拡散法により行った。

まず試料をはさんだ両側のセルに脱イオン水を注入して試料を含水した後、トレーサーセル側の脱イオン水をトレーサー溶液（ヨウ化カリウム水溶液： I^- 濃度 = 500 mg L^{-1} ）と交換し、測定セル側のトレーサー濃度の経時変化を測定した（図 5. 2. 1-41）。トレーサー濃度の測定には、測定セルから定期的にサンプリングした溶液を、ICP 発光分光分析法（定量下限値： 0.01 mg L^{-1} ）を用いて測定した。

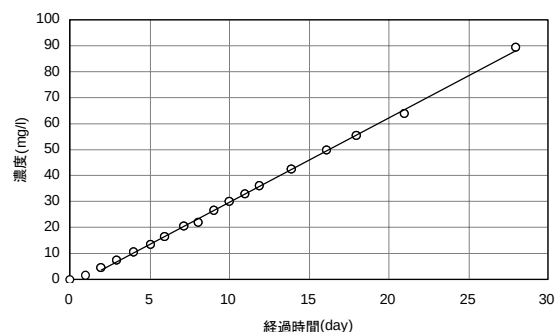


図 5. 2. 1-41 拡散試験結果（採取深度 200m のインタクト試料）

この試験結果（図 5. 2. 1-41）を用いて、定常状態における一次元拡散方程式から導出される近似式 (5. 2. 1-32) により実効拡散係数 D_e ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$) を求めた。

$$C_d = \frac{S_r \cdot H \cdot C_0}{V_m} \left(\frac{D_e \cdot t}{H^2} - \frac{\alpha}{6} \right) \quad (5. 2. 1-32)$$

ここで、 C_d : 測定セル中のトレーサー濃度 (mg L^{-1})、 S_r : 試料の断面積 (m^2)、 H : 試料の厚さ (m)、 C_0 : トレーサーセル中のトレーサー濃度 (mg L^{-1})、 V_m : 測定セル中の溶液体積 (m^3)、 t : 時間 (s) であり、収着容量 α は、 $\alpha = n_e + \rho \cdot K_d$ (n_e : 試料の有効空隙率、 ρ : 試料の乾燥密度 (kg m^{-3})、 K_d : 分配係数 ($\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}$)) で与えられる。

また、見かけの拡散係数 D_a ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$) は次式により求めた。

$$D_a = \frac{H^2}{6T_{int}} = \frac{D_e}{\alpha} \quad (5. 2. 1-33)$$

ここで、 T_{int} は (1) 式を外挿して求められる濃度 $C_d = 0$ での時間 (s) である。

拡散試験の結果を表 5. 2. 1-6 にまとめる。拡散係数について「第 2 次取りまとめ」で整理した既往の新第三紀泥岩・凝灰岩での値との比較（図 5. 2. 1-42）を行ったところ、本試験から得られた

値は、同程度の有効空隙率を有する新第三紀泥岩・凝灰岩の平均的なものであることが示された。また、収着容量から求めた分配係数が 0 に近い値であることから、試料へのトレーサーの収着量は極めて小さいものと考えられる。

表 5. 2. 1-6 拡散試験結果一覧

採取深度 (m)	実効 拡散係数 D_e ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	見かけの 拡散係数 D_e ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	収着容量 α (-)	分配係数 K_d ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)	有効 空隙率 n_e (-)
200	2.34×10^{-11}	6.86×10^{-11}	0.342	0.000	0.414
300	2.55×10^{-11}	3.36×10^{-11}	0.758	0.244	0.384
450	8.16×10^{-12}	3.84×10^{-11}	0.212	0.000	0.332

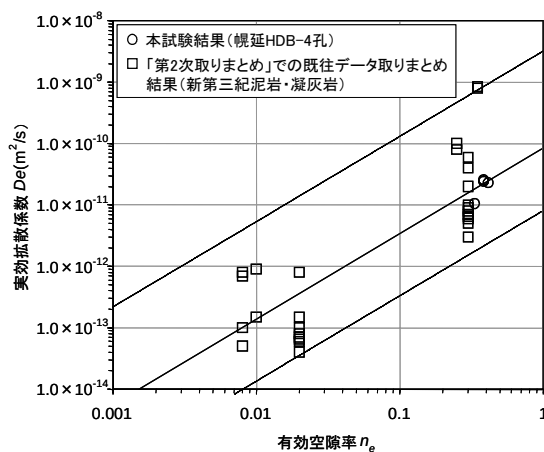


図 5. 2. 1-42 実効拡散係数と有効空隙率の関係
(既往データとの比較)

iv) 亀裂試料における試験結果

a) 定流量透水試験

試料採取深度の有効応力に相当する封圧条件下に置いたコア試料に対して通水し、定常状態での流量と圧力を測定した。流量は上流側の注入量を電子天秤にて、注入圧力は上流側に設置した圧力計にてそれぞれ測定を行った。

試験で得られた流量と圧力から、亀裂の透水量係数 T_f ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) (試料の直径と同じ幅を有する単一亀裂内のみを水が通ると仮定) および、試料の透水係数 K ($\text{m} \text{s}^{-1}$) (試料の全断面を水が通ると仮定) を求めた結果、亀裂の透水量係数 T_f は $10^{-11} \sim 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 、試料の透水係数 K は $10^{-9} \sim 10^{-8} \text{m} \text{s}^{-1}$ のオーダーであった (表 5. 2. 1-7)。試料の透水係数は、亀裂を有しないインタクト試料よりも 3~4 オーダー大きい値となった。

また、亀裂の透水量係数と封圧との関係 (図 5. 2. 1-43) から、封圧の増加に伴い透水性が低下

する傾向が確認された。これは、封圧の増加に伴って亀裂が閉塞したことにより透水性が低下したものと考えられる。

表 5. 2. 1-7 亀裂試料透水試験結果一覧

採取深度 (m)	封圧 (Mpa)	亀裂の 透水量係数 T_f ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	試料の 透水係数 K ($\text{m} \text{s}^{-1}$)
200	2.4	2.18×10^{-10}	5.56×10^{-9}
	0.8	1.44×10^{-10}	3.67×10^{-9}
300	1.6	9.35×10^{-11}	2.38×10^{-9}
	2.4	5.94×10^{-11}	1.51×10^{-9}
	3.2	4.41×10^{-11}	1.12×10^{-9}
450	2.4	4.00×10^{-10}	1.02×10^{-8}

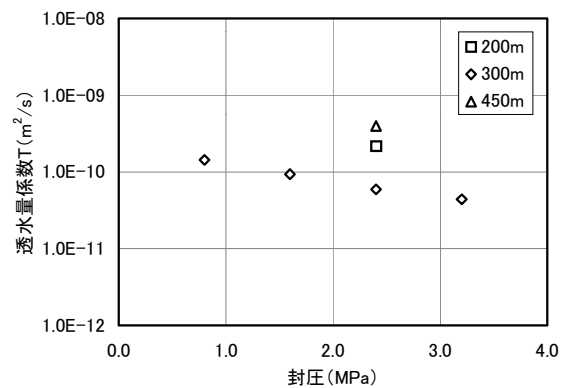


図 5. 2. 1-43 亀裂試料での封圧と透水量係数の関係

b) トレーサー試験

三軸セル内の試料に所定の封圧を載荷した状態で、試料の下側から上側へトレーサー溶液 (ヨウ化カリウム水溶液: I^- 濃度 = $1,000 \text{mg L}^{-1}$) および脱イオン水を注入し、排出されるトレーサー濃度の経時変化を、電気伝導度計を用いて測定した。トレーサー濃度の測定結果を確認するために定期的にサンプリングした溶液の分析には、拡散試験と同様 ICP 発光分光分析法を用いた。

試験で得られた破過曲線 (図 5. 2. 1-44) において、トレーサー濃度が注入濃度 ($C/C_0=1$) に達する前にほぼ安定していることや、注入する液体をトレーサー溶液から脱イオン水に切り替えた後の濃度低下が遅れて生じていることなどから、トレーサー溶液が試料内部の岩石基質部へ拡散している可能性が考えられる。このことを確認するために、岩石基質部への拡散と単一亀裂内移流分散の両者を考慮した解析を行った。

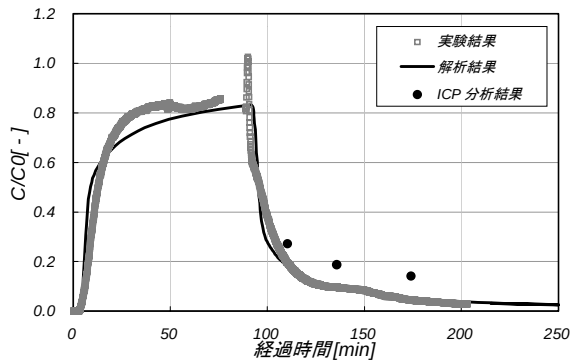


図 5.2.1-44 トレーサー試験結果
(200m 試料, 封圧 0.8MPa)

解析には 3 次元物質移行解析コード FRAC3DVS (Therrien and Sudicky, 1999) を用いた。解析により得られた破過曲線と試験結果とをフィッティングすることにより、亀裂部の物質移行開口幅および分散係数（分散長）を求めた（表 5.2.1-8）。

表 5.2.1-8 トレーサー試験解析結果一覧

採取深度 (m)	封圧 (Mpa)	実流速 v (m s^{-1})	水理学的 開口幅 e_H (m)	物質移行 開口幅 e_T (m)	分散長 α (m)
200	2.4	8.94×10^{-4}	6.69×10^{-6}	1.00×10^{-5}	0.0015
	0.8	1.19×10^{-3}	5.83×10^{-6}	7.00×10^{-6}	0.0015
300	1.6	1.31×10^{-3}	5.05×10^{-6}	8.00×10^{-6}	0.0015
	2.4	1.52×10^{-3}	4.34×10^{-6}	8.00×10^{-6}	0.0015
	3.2	1.81×10^{-3}	3.93×10^{-6}	8.00×10^{-6}	0.0015
450	2.4	1.15×10^{-3}	8.19×10^{-6}	1.40×10^{-5}	0.0015

解析結果は、試験結果から得られた破過曲線をよく再現している（図 5.2.1-44）。また、分散長は既往の実験結果（新藤・井伊，1995）とほぼ同じ傾向にあり（図 5.2.1-45）、物質移行開口幅 e_T は透水係数から逆算した水理学的開口幅 e_H よりやや大きな値となった。透水性に寄与する水理学的開口幅は、開口幅の狭い部分の影響が支配的であるのに対し、物質移行開口幅は、平均的な開口幅の影響を受けるため、水理学的開口幅よりも数倍以上大きくなることが報告されている（Abelin, et al., 1985）。本試験の結果では、物質移行開口幅 e_T は水理学的開口幅 e_H の最大で 1.7 倍程度であったが、これは、亀裂が十分に密着しており、開口幅の面内不均一性が低かったためと推察される。また、既往の原位置トレーサー試験結果では、花崗岩地域（釜石鉱山（岩手県））の亀裂において物質移行開口幅 e_T と透水量係数 T の間に $e_T = 2\sqrt{T}$ の関係が示されており（Shimo et al., 1999）、本試験

の結果は、この傾向とも概ね整合的である（図 5.2.1-46）。

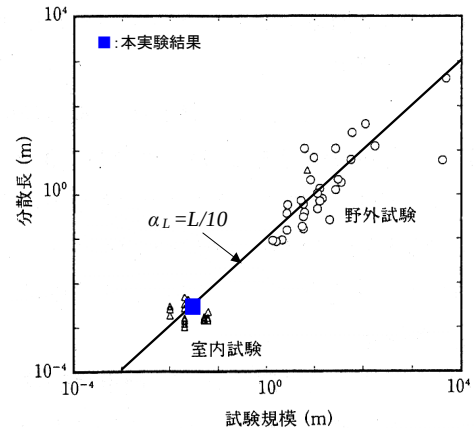


図 5.2.1-45 分散長と試験スケールの関係

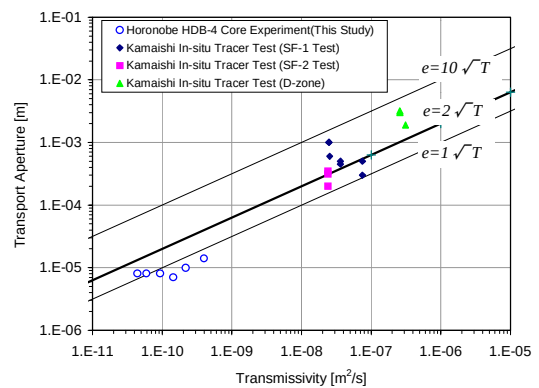


図 5.2.1-46 透水量係数と物質移行開口幅の関係

③ まとめ

亀裂性岩盤と多孔質岩盤の特性をあわせ持つ亀裂を有する堆積軟岩の水理および物質移行特性の把握を目的とした室内試験および解析を行った。この結果から、同等の有効空隙率を有する同種の岩石における既往データに比べて、岩石基質部の透水係数が $10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ オーダーと極めて低い値であるのに対し、拡散係数は平均的な値が得られた。これは、本試験で用いた軟岩の個々の空隙径が極めて小さく、水の流れに対する抵抗力が大きいため、透水係数の増加に寄与しないためであると考えられる。

また、亀裂内の物質移行開口幅や分散長については、既往データと整合的な結果が得られた。特に、花崗岩地域の試験結果と同様、物質移行開口幅を透水量係数と関連づけて整理できる可能性を示した。

今回の試験結果から、試料採取地点周辺では、

地下水流動に関しては粒子間隙よりも亀裂が卓越した水みちを形成する可能性が高く、物質移行に関しては、亀裂内の移流分散だけでなくマトリクス拡散による遅延効果も大きいものと考えられる。

今後、幌延深地層研究計画で得られる異なる地層や深度の試料を用いた透水試験および物質移行試験により、データの蓄積に努めるとともに、亀裂を有する堆積軟岩中の地下水流動と物質移行現象を表現する概念モデルの確立をめざし、試験データに基づいたモデル化の検討を進めていく。

参考文献

- Abelin, H., Neretnieks, I., Tunbrant, S. and Moreno, L. (1985) : Migration in a single fracture : Experimental results and evaluation, final report, Stripa project, Tech. Rep. 85-03 SKB.
- Brace, W. F., Walsh, J. B. and Frangos, W. T. (1968) : Permeability of granite under high pressure, Journal of Geophysical Research, Vol. 73, No. 6, pp. 2225-2236.
- Hsieh, P. A., Tracy, J. V., Neuzil, C. E., Bredehoeft, J. D. and Silliman, S. E. (1981) : A Transient Laboratory Method for Determining the Hydraulic Properties of 'Tight' Rocks - I. Theory, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 18, pp. 245-252.
- 井尻祐二, 澤田 淳, 赤堀邦晃 (1999a) : 我が国の岩盤の水理特性について, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-090.
- 井尻祐二, 澤田 淳, 坂本和彦, 亘真吾, Erik K. Webb, 中島研吾, 長坂和佳, 野邊 潤 (1999b) : 多孔質岩盤を対象とした天然バリア中の核種移行解析, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-092.
- Shimo, M., Yamamoto, H., Uchida, M., Sawada, A., Doe, T. W. and Takahara, Y. (1999) : In-situ test on fluid flow and mass transport properties of fractured rocks, Proc. 9th ISRM Congress, Vol. 2, pp. 1401-1404.
- 下茂道人, 山本 肇, 熊本 創 (2003) : 亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象に関する研究, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書 ; 大成建設株式会社), JNC TJ8400 2003-028.
- 新藤静夫, 井伊博行 (1995) : 表層における地下水流動, 放射性廃棄物と地質科学 (島崎英彦, 新藤静夫, 吉田鎮男編), 東京大学出版会.
- Therrien, R. and Sudicky, E. A. (1996) : Three-dimensional analysis of variably-saturated flow and solute transport in discretely-fractured porous media, J. Contaminant Hydrology, 23, pp. 1-44.

4) 堆積軟岩の不均質性評価手法の研究

① 課題と計画の概要

堆積岩中に存在する地下水は、地層の有する不均質性の程度に依存して様々な挙動を示す。このため、サイト特性調査及びそれに基づき実施する性能評価解析において、堆積岩の不均質場の特性を定量的に把握することが重要な課題となる。

一般に、地下深部における堆積岩の不均質性を評価する際には、試錐データなどを統計的に解析する手法が用いられている。しかし、試錐孔の本数が限られる場合、堆積岩の性状が試錐の間隔より小さいスケールで側方変化する場合や、試錐から離れた場所の岩相を推定する際には、従来の統計学的手法では十分に対応できない可能性がある。

この問題点を解決する手法として、本研究では、堆積岩の形成プロセス、すなわち碎屑物の運搬・堆積過程や圧密・固結過程について、ある基準となる時刻から順方向に計算する際に一般的に用いられる「フォワード(前進的)モデリング」と呼ばれる手法を適用し、堆積岩の不均質性について岩相モデリングを試みた。研究対象とした地層は、幌延深地層研究計画において各種地質データを取得している幌延地域の声間層と稚内層である。

平成15年度は本研究の初年度であり、前進的モデリングソフトウェアの構築と並行して、シミュレーションを実行する際に必要となる入力情報を整理するため、地層形成過程における古環境や堆積場の形態、地層の鉱物組成や圧密特性について、コア分析結果、物理検層データおよび地震探査断面解釈結果に基づいた多角的な検討を試みた。

② これまでの成果

i) 試料の採取

泥質堆積岩の化学組成と細孔径分布・空隙率などの物理的な性質との間にどのような関連性が見られるかについて検討を行うことを目的として、蛍光X線全岩化学組成分析および水銀ポロシメーターを用いた細孔径分布測定を実施した。試料は幌延深地層研究計画のHDB-1孔より採取した。採取深度の選定に際しては、堆積岩の岩質の違いを反映するとされる自然γ線検層結果に着目し、短い深度区間で自然γ線量が連続的に変化する区間を抽出し、各々の区間について複数の試料を採取した。試料採取深度を図5.2.1-47に示す。

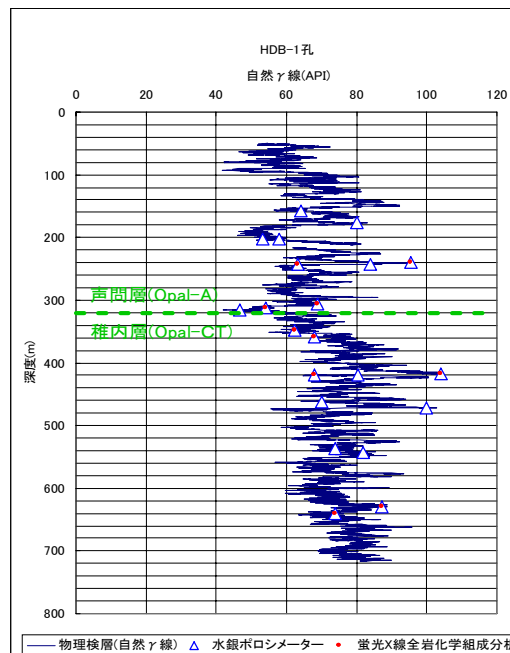


図 5.2.1-47 自然γ線検層結果と試料採取深度 (HDB-1 孔)

ii) 空隙率と自然γ線検層結果との関係

図5.2.1-48に試料採取深度(m)と自然γ線量(API)のクロスプロットを示す。また個々のプロットについて、水銀圧入ポロシメーターより求めた空隙率(%)を重ねて表示した。

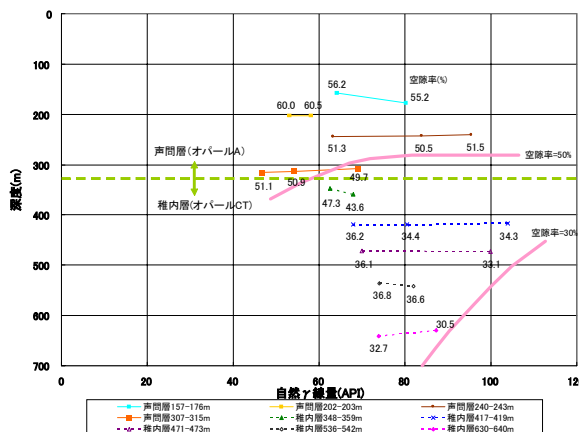


図 5.2.1-48 深度、自然γ線量と空隙率の関係

空隙率は深度の増加に伴い小さくなる傾向にある。また、ほぼ同じ深度で採取した試料を比較した場合、多くの試料において、若干ではあるが、自然γ線量が大きい値を示す試料ほど空隙率が小さくなる傾向が見られる。一般に自然γ線量は粘土鉱物含有量の指標となるとされている (Schlumberger Corporation, 1989)。本地域にお

いて、ほぼ同じ深度で採取した試料を比較した場合、自然 γ 線量値が大きく粘土鉱物含有量が多いと推定される試料ほど空隙率が小さくなる傾向があることを読み取ることができる。

iii) 珪藻起源堆積物含有量算出の試み

蛍光 X 線全岩化学組成分析を行った結果、声問層および稚内層の SiO_2 量 (wt%) は約 75~80 wt% の範囲にある。標準的な泥岩の SiO_2 含有量が約 60 wt% (例：独立行政法人産業技術総合研究所ホームページ：岩石標準試料データベース) であるのに比べて多くなっている。

これは、本地域の地層が珪藻 ($\text{SiO}_2=100\%$) に由来する泥質物を多く含むことに起因すると考えられる。研究対象地域の声問層および稚内層では、砂粒子起源の SiO_2 がほとんど含まれない。このため、珪藻起源 SiO_2 含有量 (wt%) は、標準的な泥岩に含まれる SiO_2 含有量 (wt%) との差で表すことができるものと仮定し、珪藻起源の SiO_2 の含有量の算出を試みた。

蛍光 X 線全岩化学組成分析結果を図 5. 2. 1-49 に示す。珪藻起源の SiO_2 の成分について試算したところ、声問層および稚内層における珪藻起源の堆積物の含有量は、おおむね 30 wt% から 50 wt% まで約 20% の幅で変化するという計算結果が得られた。

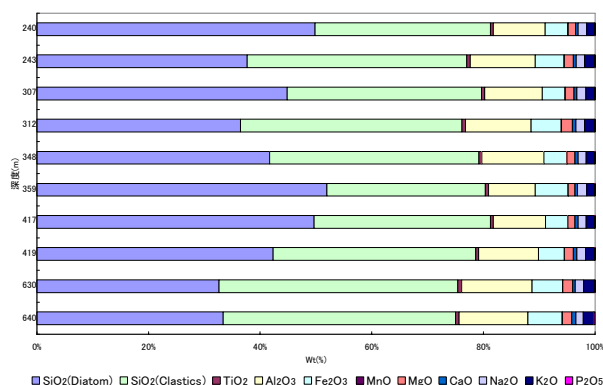


図 5. 2. 1-49 蛍光 X 線全岩化学組成分析結果

(SiO_2 (Diatom) は珪藻起源 SiO_2 成分の試算結果)

iv) 珪藻含有量と孔隙径特性との関連性

図 5. 2. 1-50 は、水銀圧入ポロシメーターを用いて測定した声問層および稚内層における細孔径分布累積曲線の例である。

声問層においては 1000 Å 付近に細孔径分布のピークがあるのに対し、稚内層においては、1000 Å

を越えるような孔径は殆ど見られなくなり、細孔径分布の集中は数百 Å 付近と数十 Å 付近に見られバイモーダルとなる。

また、表 5. 2. 1-9 は、各試料について自然 γ 線量および計算より求めた珪藻起源の SiO_2 の量 (wt%) と陸源碎屑物の量 (wt%) および水銀ポロシメーターを用いて測定した孔径中央値 (Å) が示してある。

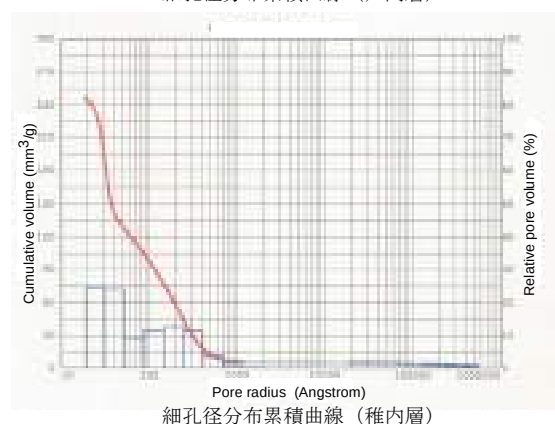
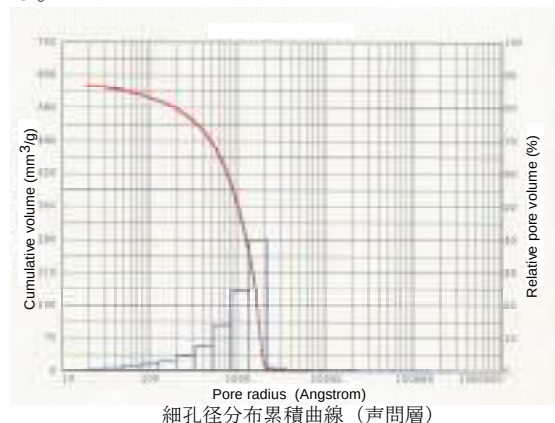


図 5. 2. 1-50 細孔径分布累積曲線

(赤色曲線が累積曲線、青色バーがヒストグラム)

表 5. 2. 1-9 珪藻含有量と孔径中央値の関係

試料番号	採取深度 (m)	地層名	岩質	シリカ (珪藻起源) (wt%)	シリカ (碎屑物起源) (wt%)	シリカ (中央孔径値) (Å)	比表面積 (m^2/g)
5	240.38~240.48	声問層	珪藻質粘土	33.34	41.60	787	28.02
7	243.70~243.80	声問層	珪藻質粘土	32.66	42.71	756	29.26
8	307.09~307.21	声問層	珪藻質粘土	42.30	36.26	778	28.57
9	312.84~312.91	声問層	珪藻質粘土	49.66	31.56	810	29.02
11	348.25~348.45	稚内層	珪質粘土	51.93	28.40	618	44.77
12	359.00~359.10	稚内層	珪質粘土	41.67	37.47	405	51.80
13	417.15~417.25	稚内層	珪質粘土	36.47	39.65	75	82.83
15	419.45~419.55	稚内層	珪質粘土	44.83	34.79	58	94.56
20	630.10~630.20	稚内層	珪質粘土	37.66	39.31	88	55.30
21	640.90~641.00	稚内層	珪質粘土	49.82	31.39	81	60.66

声問層の試料では、ほぼ同じ深度において採取した試料について中央孔径値を比較した場合、珪藻の含有量 (wt%) が多くなると中央孔径値が大きくなる傾向がある。一方、稚内層で採取した試料については、中央孔径値は 58~85 Å の範囲に収ま

り大きな変化は見られなくなるが、同一深度の試料を比較した場合、珪藻起源の SiO_2 含有量(wt%)の多い試料において中央孔径値が小さくなる傾向にある。

一般に珪藻の直径は、数 μm ～100 μm であるとされる(水谷ほか, 1987)。これは、ほぼシルトの粒子径(1/256～1/16mm)であり、粒子径は粘土の粒子径(<1/256 mm)より大きいと考えられる。声問層中に含まれる珪藻化石は泥質な陸源碎屑物に比べて粒子径が大きいため、珪藻化石が多く含まれる試料では、珪藻化石が少ない試料に比べて中央孔径値が大きくなったものと考えられる。また稚内層において、珪藻は Opal-A から Opal-CT に相転移するが、相転移に伴って Opal-CT に変化した珪藻の粒子径が陸源碎屑物より小さくなるとすれば、中央孔径値を小さくする方向に作用するものと考えられる。

v) 堆積岩の形成プロセスを考慮したモデリングソフトウェアの開発

一般的な堆積岩について、堆積盆スケールでの堆積岩過程を前進的に再現する堆積モデリングソフトウェアの開発を行った。本ソフトウェアは数値シミュレーションにより堆積岩の三次元分布を予測する。概念設計では、基本ソフトウェア構築のために堆積岩形成プロセスのモデル化を行った。堆積岩形成プロセスは、堆積過程と、堆積後埋没し堆積岩となる過程(以後、圧密過程)の二つに分類した。

堆積過程のモデルは、各タイムステップにおける堆積量を推定する「層序モデル」をベースとして構築し、堆積過程の一部については、流体力学を基礎にして各々の粒子の運搬様式を数値化する「物理的堆積モデル」の結果を堆積関数に反映させることを考えた。

声問層と稚内層の堆積システムの構成要素である堆積物種類および堆積様式を表 5. 2. 1-10 に示す。

表 5. 2. 1-10 堆積物種類と堆積様式

堆積物種類	堆積様式
砂質物	一次堆積 (定常的)
泥質物	二次堆積 (イベント的)
珪藻	

声問層と稚内層の堆積物は、砂質物、泥質物、珪藻の三種類に分類され、また性質の異なる二つの堆積様式が認められる。堆積様式のひとつは、定常的な堆積(以後、「一次堆積」とよぶ)であり、「層序モデル」を適用した。もうひとつは乱泥流のような密度流による堆積(以後、「二次堆積」とよぶ)であり、「物理的堆積モデル」を適用した。

図 5. 2. 1-51 は堆積物と堆積様式の概念図である。海岸線は直線であると仮定し、水深および一次堆積物の堆積速度は海岸線からの距離の一次関数とした。二次堆積物のイベント堆積量は、海岸線上のある定点から二次関数とし、関数決定の際には、物理的堆積モデルの結果を利用した。

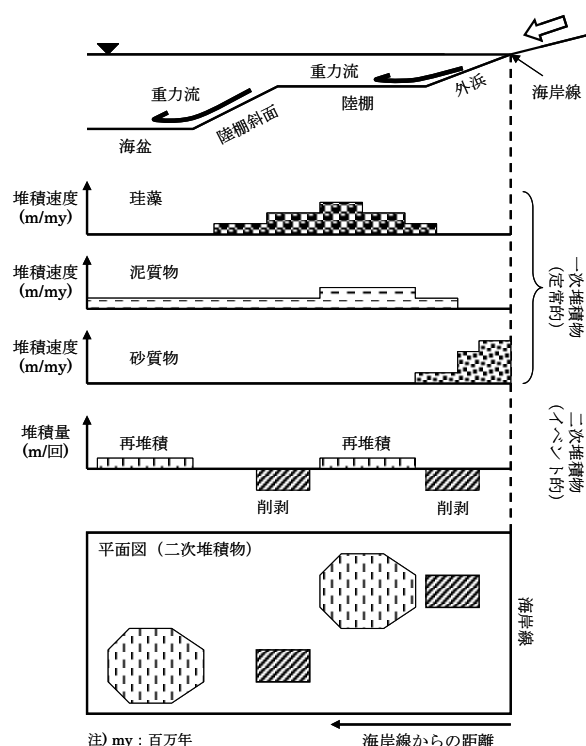


図 5. 2. 1-51 堆積物と堆積様式の概念図

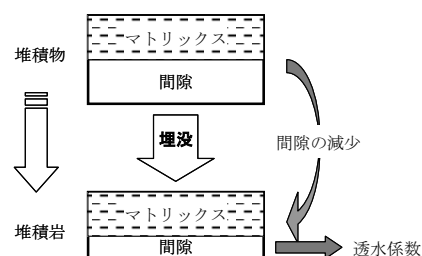


図 5. 2. 1-52 圧密過程モデルの概念図

圧密過程のモデルは堆積過程のモデルと同様に層序モデルの考え方を採用し、各堆積物種の空隙

率を深度の関数（圧密曲線）として定義し埋没深度より堆積岩の空隙率を推定した。また各堆積物種の透水係数は空隙率の関数として推定を試みた。

圧密過程モデルの概念図を図 5.2.1-52 に示す。各堆積物種の空隙率は深度の関数とし、深度の五次式もしくは深度の指数関数（圧密関数）を用いて計算できるようにした。指数関数は、

$$\phi = \phi_0 \times e^{-cz} \quad (5.2.1-34)$$

ϕ : 空隙率(v/v), ϕ_0 : 初期空隙率(v/v),
 c : 圧密係数(m⁻¹), z : 深度(m)

であり、圧密係数を入力値として与える。

透水係数は空隙率の関数とし、空隙率の五次式、Berg 式、Bryant 式から選択して計算できるようにした。Berg 式は砂質岩についての経験式で、

$$k = 5.3 \times 10^3 \times n^{5.1} \times Dn^2 \quad (5.2.1-35)$$

k : 浸透率 (md), n : 空隙率 (%),
 Dn : 粒径分布 P90 値, もしくは,
 算術平均値－標準偏差

であり (Berg, 1975), Dn を入力値として与える。Berg 式の解は浸透率であるため、係数 9.7×10^{-7} (cm s⁻¹ md⁻¹) を用いて透水係数に変換する。

Bryant 式は、泥質岩についての経験式で、

$$k = e^{14.30 \times n - 26.30} \quad (5.2.1-36)$$

k : 透水係数(cm s⁻¹), n : 空隙率(v/v)

である (Bryant et al, 1975)。

仮想入力情報を用いて基本ソフトウェアのテストランを実施した。対象地域のセル数は、80×100×100 = 800,000 セルとした。対象とする堆積物は砂岩・泥岩・珪藻の3種類とし、二次的堆積作用、海岸線位置変動、二次的堆積作用発生頻度、最大埋没深度を考慮してシミュレーションを実施した。図 5.2.1-53 はシミュレーションで再現された砂質岩の分布であり、二次的堆積作用によって再堆積した砂質岩の分布域が示されている。また、図 5.2.1-54 は透水係数の分布のシミュレーション結果であり、埋没深度の増加と共に、地層の圧密によって透水係数が小さくなる様子や、堆積物の供給源の近くでは砂質岩が堆積し透水係数が大きく、供給源から離れるに従い透水係数が小さくなる様子がシミュレートされている。

③ まとめ

蛍光X線全岩化学組成分析結果より、珪藻起源のシリカ(SiO₂)の含有量の算出を試みた結果、声問層・稚内層について概ね 30 から 50 wt%までの約 20%の幅で変化するという試算結果が得られた。

水銀圧入ポロシメーターを用いて測定した中央孔径値は、Opal-A 帯に属する声問層において、珪藻含有量が多いほど大きくなるが、Opal-CT 帯へ続成転移する稚内層においては細孔径が急激に小さくなり、珪藻含有量が多いほど小さくなる傾向が見られた。

堆積岩の形成プロセスを再現する前進的モデリングについて基本機能の開発を行い、堆積岩の堆積過程と圧密過程を再現できる基本ソフトウェアを開発しテストランを実施した。今後、孔井データの検討結果から見出された堆積岩の不均質性と堆積環境の変化との関連性について検討を行うと共に、前進的モデリングソフトウェアのパラメータを充実させることにより幌延地域の地層の不均質性のモデル化を試みる予定である。

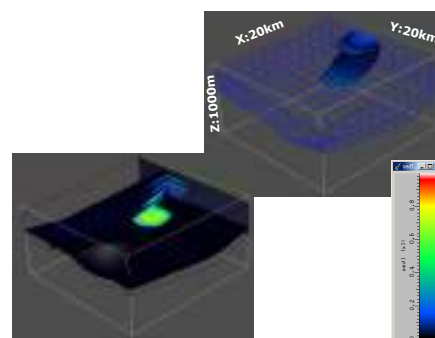


図 5.2.1-53 基本ソフトウェアの出力情報の三次元表示例(砂質岩の分布)

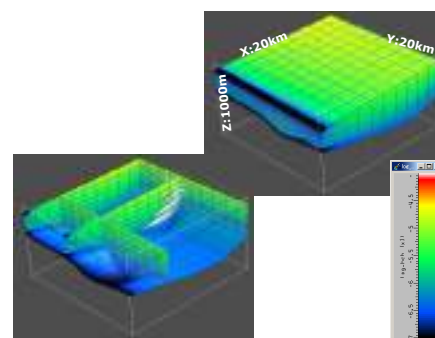


図 5.2.1-54 基本ソフトウェアの出力情報の三次元表示例(透水係数の分布)

参考文献

- Berg, R. R. (1975) : Capillary Pressure in Stratigraphic Traps, AAPG Bull., Vol. 59, No. 6 pp. 939-956.
- Bryant, W. R., Hottman, W. and Trabant, P. (1975): Permeability of unconsolidated and consolidated marine sediments, Gulf of Mexico: Marine Geotechnology, Vol. 1, p. 113.
- 水谷伸二郎, 斉藤靖二, 勘米良亀齡(1987): 日本の堆積岩, 岩波書店, p. 226.
- Schlumberger Corporation (1989) : Log Interpretation Principles /Applications, Schlumberger Educational Services, pp. 3-8.

5.2.2 地下水・間隙水水質形成モデルの高度化

① 課題と計画の概要

地下水に関しては、「第2次取りまとめ」において、既存地下水水質データの統計学的解析と地球化学的解釈に基づき地下水水質の分類を行うとともに、安全評価の観点から重要となる因子（pH, Eh, イオン濃度）について、それらを支配する地球化学プロセスを整理し、化学平衡に基づくモデルにより、安全評価に用いるべき一般化した地下水水質の設定を行った。今後は具体的な地質環境を対象にした地下水水質形成過程の理解とそれに基づく将来の変動の可能性に関する推定が重要な課題である。そこで、幌延深地層研究計画で得られた実測地下水データを一例に、「第2次取りまとめ」で用いられた地下水水質形成モデルの妥当性を検証する。また、人工バリアの設計や核種移行評価上重要となるパラメータ（pH, Eh など）の実測値の信頼性について地球化学モデルをもとに検討し、信頼性が低いと判断された場合、地球化学モデルをもとに実測値の補正を行う。なお、信頼性の高い実測地下水に対しては、地球化学的反応や地下水流動にともなう混合といった現象を考慮した地下水水質形成モデルによる解釈も行い、このようなモデル化の試みを通じて、限られたボーリング調査により得られた地質環境情報から、地下水水質の空間分布を推定する手法についての検討も実施する。平成14年度は、幌延深地層研究計画で得られた実測地下水データをもとに熱力学的解析をおこない、幌延深地層研究所設置地区周辺における深部地下水の水質形成機構に関して予察的考察を行なった。平成15年度は、実測地下水データの信頼性について、地球化学モデルをもとに検討を開始した。

緩衝材中の間隙水水質に関しては、「第2次取りまとめ」においては、緩衝材構成鉱物の表面反応や溶解沈殿平衡反応を取り込んだモデル開発を行い、同モデルによる推定を行ったが、腐食生成物の取り扱いや、初期の不飽和条件を含む時間空間変化の取り扱い等について信頼性向上のための課題がある。また、圧縮ベントナイトの微細間隙構造内の水を通常の水溶液として取り扱って良いのかという、科学的観点からの本質的な課題がある。今後は、間隙水水質に関する実測データを充実するとともに、これらの課題に対応したより高度なモデルの開発を行う。平成14年度は、圧縮ベ

ントナイト中間隙水の時間空間変化に関わる信頼性の高いデータを取得するための手法開発を行い、データ取得を開始した。平成15年度は、データ取得を継続し、圧縮ベントナイト中における間隙水pH やスメクタイトの陽イオン交換サイトに収着しているイオンの時間空間変化を明らかにした。

また、処分環境でのセメント系材料の利用に伴う高アルカリ条件下での緩衝材間隙水水質への影響を把握する上で必要な地球化学元素の熱力学データを整備するため、平成15年度から関連する文献の調査を開始した。

② これまでの成果

i) 地球化学モデルによる実測地下水データの補正例

地表からの調査段階では、限られたボーリング調査に基づき地質環境を推定することになるため、得られた実測地下水データ（pH, Eh およびイオン濃度等）の信頼性評価が重要となる。特に pH や Eh などのパラメータは、温度、圧力の変化や大気との接触による影響を受け易いため、地下深部より採水された地下水の地表での測定値は、地下での状態を反映しているとはいえない。そこで、幌延深地層研究所設置地区における深部地下水組成を予察的に推定するため、地表で測定された実測地下水データの熱力学的な解釈をもとに、一般的に考えられている深部地下水に関する地球化学的知見に基づき、実測値の補正を試みた。補正にあたっては、研究所設置地区周辺のボーリング孔である HDB-1, HDB-3 および HDB-6 で得られた揚水地下水の測定値およびボーリングコアより観察された鉱物組成等（HDB-1: 山本ほか, 2002）を参考にした。

実測地下水データの補正にあたっては、揚水時に大気等の擾乱を受けたと考えられる測定値をもとに熱力学的な解析を行なった。例えば、HDB-1, HDB-3 および HDB-6 孔の地下水は、方解石に対して過飽和であり、これは一般的に考えられている深部地下水に関する地球化学的知見（深部地下水は方解石に対し飽和）と一致しない。この原因としては、揚水に伴い地下水中に溶存していた炭酸ガスが脱ガスし、地下水の pH が変化したためと推定される。そこで、炭酸ガスの脱ガスによる影響を考慮し、地下水組成を補正した。この他に、揚水に伴い変化を受けたと考えられるパラメータ（Eh, Fe 濃度、炭酸濃度など）については、pH 補正の場合と同様に、一般的に考えられる地球化学的な仮

定を基に補正を加え、深部地下水組成を推定した。また、この様な地球化学モデルに基づく補正を行なう場合、モデル化における仮定の不確実性、熱力学データの不確実性なども考慮する必要がある。本検討では、鉱物との平衡を仮定し補正を加えたデータに対し、飽和指数で±0.5の幅を与え、地球化学モデルに基づく補正值の不確実性の幅とした。この様な手法により、予察的に推定された研究所設置地区での深部地下水組成幅を表 5.2.2-1 に示す。なおこれらの値は、HDB-1、HDB-3 および HDB-6 孔で得られた限られた実測地下水データをもとにしたものであり、幌延地域や研究所設置地区における地下水組成を代表しているものではない。また、今回の補正において利用した地球化学的知見は、一般的ではあるが、今回の補正に用いることに関しての妥当性が検証されているわけではない。

表 5.2.2-1 HDB-1、HDB-3 および HDB-6 孔の実測地下水データを基に予察的に推定された研究所設置地区での深部地下水組成幅（単位：mol kg⁻¹-water）

	pH が低い場合	pH が高い場合
pH	5.893	7.144
pe	-2.100 ~ -3.097	-3.346 ~ -4.194
Eh	-124mV ~ -183mV	-198mV ~ -248mV
Ionic strength	1.323E-01 ~ 4.192E-01	
Total Na	1.192E-01 ~ 3.620E-01	
Total K	2.197E-03 ~ 9.992E-03	
Total Ca	1.928E-03 ~ 8.979E-03	
Total Mg	1.926E-03 ~ 1.060E-02	
Total Cl	9.650E-02 ~ 3.641E-01	
Total Si	9.2E-5 ~ 9.8E-4	
Total Fe	6.000E-04~1.682E-05	6.000E-05~3.507E-06
Total S	Total S: 3.675E-10 (pH が低く Eh が高い条件) ~ 3.500E-09 (pH が高く Eh が低い条件) [H ₂ S(aq)] : 4.105E-11 ~ 3.512E-09 [HS ⁻] : 2.857E-11 ~ 3.768E-10	
Total C	Total C : 6.963E-02 ~ 1.054E-01 [HCO ₃ ⁻] : 1.955E-02 ~ 2.637E-02 [CO ₃ ²⁻] : 5.175E-07 ~ 1.719E-05	

* : Na, K, Ca, Mg, Cl については、実測地下水データに基づく幅。それ以外のパラメータは、一般的に考えられる地球化学的知見に基づき補正された値である。

今後は、原位置で測定された信頼性の高い実測

地下水データやより詳細な鉱物情報などをもとに、今回の補正において利用した地球化学的知見の妥当性を確認していく必要がある。

ii) 圧縮ベントナイト中間隙水の時間空間変化に関するデータ取得

間隙水水質形成モデルを改良し、モデルの高度化を図るため、圧縮ベントナイト中での間隙水 pH、間隙水組成およびスメクタイトの陽イオン交換サイトに収着しているイオンの時間空間変化に関する実験データを取得した。

試験は、圧縮成型したベントナイト（長さ 40mm、直径 40mm）をカラムに充填し、試験溶液とフィルタを介して接触させる方法でおこなった。試験溶液としては、蒸留水、人工海水および低アルカリ性セメント平衡液を用いた。試験後、ベントナイト試料を 1mm にスライスし、pH 試験紙および含水パッドを挟み、間隙水 pH の測定および間隙水の抽出をおこなった。抽出された間隙水は、Na⁺、Ca²⁺などのイオン濃度分析をおこない、試験後のベントナイトについては、元素分析、陽イオン交換サイトに収着しているイオン濃度分析を実施した。

表 5.2.2-2 に各試験溶液に対する深さ方向での圧縮ベントナイト中間隙水の pH 測定結果を示す。間隙水の pH は、いずれの場合においても、カラム外側の試験溶液に比べて低い値を示した。蒸留水および低アルカリ性セメント平衡液の場合、溶液とベントナイトの接触面付近では、時間の経過とともに間隙水の pH が低下する傾向（蒸留水：pH=8→7.5、低アルカリ性セメント平衡液：9.5→8）がみとめられたが、ベントナイト内側では、ほぼ一定の pH を示した（蒸留水：pH=8.5、低アルカリ性セメント平衡液：9~9.5）。一方、人工海水の場合、溶液とベントナイトの接触面付近では、間隙水の pH は、pH=6.5~7 でほぼ一定であったが、ベントナイト内側では、時間とともに pH が低下する傾向（pH=7→6~6.5）がみとめられた（磯貝ほか、2004）。今後、この様な間隙水 pH の時間空間変化の原因について検討する予定である。

一方、元素分析の結果、蒸留水、低アルカリ性セメント平衡液の場合、溶液接触面に近い部分で Ca²⁺、SO₄²⁻量のみ減少した。人工海水の場合、変化はみられなかった。陽イオン交換サイトのイオン量は、蒸留水、低アルカリ性セメント平衡液の場合、空間変化はみられなかったが、時間とともに Ca²⁺の増加傾向が見受けられた。人工海水では、長

期後の空間変化はみられず、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} の増加、 K^+ の減少後、安定しているように見受けられた（図 5.2.2-1）（磯貝ほか，2004）。間隙水については、十分な分析精度を得るだけの含水パッドへの吸水が得られず、また含水パッドからの溶存成分の影響も考えられたため、有意な測定結果が得られなかった。

今後、圧縮ベントナイト中の間隙水取得方法を改良した試験を行うと共に、間隙水組成の時間空間変化に関わるモデル開発を行なう予定である。

表 5.2.2-2 圧縮ベントナイトの深さ方向における間隙水 pH の測定結果

接触面からの距離 (mm)	蒸留水 pH=9 に調整 期間(d)		人工海水 pH=9 に調整 期間(d)		低アルカリ性 セメント平衡液 pH=11 期間(d)	
	163	490	490	732	182	497
	圧縮ベントナイト間隙水 pH					
0	7.5~8.5	7~8	6.5~7	6.5~7	9.5	7.5~8.5
3	8~10			6~6.5		8.0~10.0
4		8~9	6.5~7		9.5	8.5~10.0
6	8~8.5					8.5~10.0
8		8~9	6.5~7	6~6.5	9~9.5	
10						9.0~10.0
12	8~9	8~9	6.5~7	6~6.5	9~9.5	
15						9.0~10.0
16	8~9	8~9	6.5~7	6~6.5	9~9.5	
20	8~9	8~9	6~7	6~6.5	9~9.5	8.5~9.5

iii) 高アルカリ条件下での緩衝材の変質に関する鉱物等の熱力学データの整備

鉱物等の熱力学データについては、「第2次取りまとめ」において、地下水・間隙水水質のモデル化で必要となる重要な鉱物等を選定し、データベースとして整備した（Arthur et al., 1999）。このデータベースには、処分環境でセメント系材料が用いられた場合に想定される様な高アルカリ溶液と緩衝材が反応した場合の生成物や高アルカリ条件下で支配的な化学種についてのデータは含まれていない。そこで、平成15年度は、室内試験やナチュラアナログ研究等の結果をもとに、高アルカリ溶液と緩衝材が反応した場合、どの様な二次

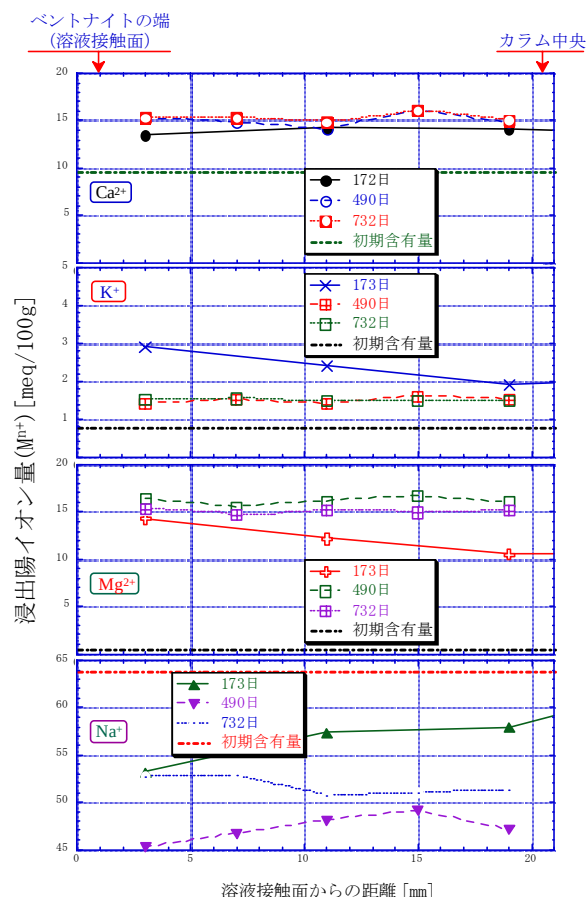


図 5.2.2-1 陽イオン交換サイトに収着しているイオン濃度分析結果（外側溶液：人工海水，期間：173d，490d，732d）

鉱物が生成される可能性があるかを整理した。

文献調査の結果、高アルカリ溶液と緩衝材の反応の進展に伴い、a) スメクタイトの層構造の部分的変化やアモルファス化、b) 混合層中でのスメクタイトの選択的な溶解やそれに伴う異なるタイプのスメクタイト（バイデライト、サポナイトなど）の生成、c) イライトの生成、d) 沸石（フィリップサイトやアナルサイムなど）の沈殿、e) カリ長石や石英の沈殿、の順に二次鉱物が変化し、これらのいずれの段階においても、炭酸塩鉱物、CSH・CASHゲルや Ca-Mg 水酸化物の沈殿・溶解が生ずることがわかった。但し、実験等で認められた生成物の多くは、非晶質、低結晶度の固相であり、これらの固相に対する熱力学データは、多くの場合よく判っていない。またこの様な準安定相は、時間の経過とともに結晶度の高い安定な固相へと変遷していくと考えられるが、安定な固相の多くは複雑な組成を持つ固溶体であり、実験的に求められた熱力学データの数も乏しい。従って、実験データ

をもとに導出された熱力学的特性のみで、高アルカリ条件下での緩衝材の変質に関する鉱物等の熱力学データを整備するのは現状では困難である。この様な現状を踏まえると、高アルカリ条件下での緩衝材変質鉱物の熱力学データ整備にあたっては、鉱物の構造や組成に基づき計算により熱力学データを算出する経験的な手法(例えば, Tardy and Garrels, 1974 ; Chipera and Apps, 2001) も併用し、データ整備を行うことが必要である。今後は、高アルカリ条件下での評価上重要となるスメクタイト、CSH・CASH ゲル、イライト、沸石類を優先して、この様な経験的な手法により熱力学データの算出を試みると共に、導出された鉱物の熱力学データの信頼性について、室内試験やナチュラアナログ研究等の結果との比較を基に検討を進めて行く予定である。

③ まとめ

地下水に関しては、幌延深地層研究計画におけるボーリング調査から得られた実測地下水データの熱力学的解釈、および一般的に考えられている深部地下水に関する地球化学的知見に基づく地球化学モデルにより、実測地下水データを補正し、研究所設置地区における深部地下水組成を予想的に推定した。

間隙水に関しては、圧縮ベントナイト中間隙水の時間空間変化に関する現象理解のため、室内試験によるデータ取得を実施した。今後、地球化学反応と物質移行を連成させたモデル開発も実施する。

鉱物等の熱力学データについては、文献調査により、高アルカリ溶液と緩衝材が反応した場合、どのような二次鉱物が生成される可能性があるかを整理した。今後、評価上重要となる鉱物について、データの信頼性を評価しながら、データベースの整備を行っていく予定である。

参考文献

- Arthur, R. C., Sasamoto, H., Shibata, M., Yui, M. and Neyama, A. (1999) : Development of Thermodynamic Databases for Geochemical Calculations, JNC Technical Report, JNC TN8400 99-079.
- Chipera, S. J. and Apps, J. A. (2001) : Geochemical Stability of Natural Zeolites, In: Natural Zeolites: Occurrence, Properties Applications (D. L. Bish and D. W. Ming, eds.), Mineral. Soc. Amer. Reviews in Mineralogy, 45, pp. 117-161.

磯貝武司, 神徳 敬, 笹本 広 (2004) : 圧縮ベントナイト中の間隙水組成の測定－蒸留水・人工海水・低アルカリ性セメント浸漬液系試験の結果－, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-050.

Tardy, Y. and Garrels, R. M. (1974) : A Method of Estimating the Gibbs Energies of Formation of Layer Silicates, Geochim. Cosmochim. Acta, 38, pp. 1101-1116.

山本卓也, 下茂道人, 藤原 靖, 服部弘道, 田所照夫, 岩間彦衛, 名合牧人, 熊本 創 (2002) : 幌延深地層研究センターにおける試錐調査 (HDB-1 孔), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 大成建設株式会社), JNC TJ1400 2002-010.

5.2.3 現象論的核種移行モデルの開発

1) ガラスの長期溶解挙動及び核種の溶解現象に関する研究

① 課題と計画の概要

地層処分環境を想定した、長期の人工バリア材料の健全性を理解する上で、ガラスの長期溶解挙動を把握することは重要である。また、核種の溶解挙動に関する現実的な評価を行う上では、共沈現象を考慮した核種の溶解度評価が重要である。

これらの点を踏まえて以下のような研究を実施している。

[ガラスの長期溶解現象]

- ・ 表面変質層の形成・鉱物化現象と浸出挙動へ与える影響の把握
- ・ α 放射性核種含有ガラス固化体を用いた原位試験 (CORALUS プロジェクト) における核種移行解析の実施

[核種の溶解現象]

- ・ アクチニド非晶質酸化物の共沈現象の検討
- ・ 炭酸塩沈殿時における Ra (アナログ元素として Ba)-Ca-CO₃ 系での Ra (Ba) の共沈現象の検討

② これまでの成果

i) ガラスの長期溶解現象

これまでに九州大学と共同で、ガラスの溶解現象に関して、模擬ガラス固化体 (P0798 ガラス) の蒸留水やアルカリ性溶液による変質試験を実施した。Na 濃度条件によっては Na-バイデライトの生成や、Cs の浸出挙動に変化を及ぼすことが分かった (稲垣, 2003)。

平成15年度は、溶解/変質速度の温度依存性およびベントナイト共存下での溶解/変質挙動をより詳しく理解することを目的とした浸出/変質実験および解析を行った (稲垣, 2004)。

溶解/変質速度の温度依存性については、0.001M NaOH + 0.1M NaCl 水溶液 (pH10.8) 中での模擬ガラス固化体 (P0798 ガラス) の溶解/変質速度をガラスマトリックス中への水分子の拡散を基にした拡散方程式を用いて解析し、拡散係数として $2 \times 10^{-21} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (60°C) $\sim 5 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (120°C)、活性化エネルギーとして 52 kJ mol^{-1} の値を得た。

ベントナイト共存下での溶解/変質挙動については、Cs についての浸出試験を実施した。図5.2.

3-1に結果を示した。Cs の浸出量はBの浸出量の1/10 以下と小さいところから、その多くはガラス表面変質層あるいはベントナイトに固定化されていると考えられる。そこで、実験後ベントナイトからのCs の脱離試験を行った。Cs 脱離試験の結果を図5.2.3-2に示す。脱離4 回における脱離割合が0.9 以上となることから、Cs はBなどの可溶性元素と同じようにガラスから浸出し、浸出したCs のほぼすべてがイオン交換によりベントナイトに吸着されていることが分かった。

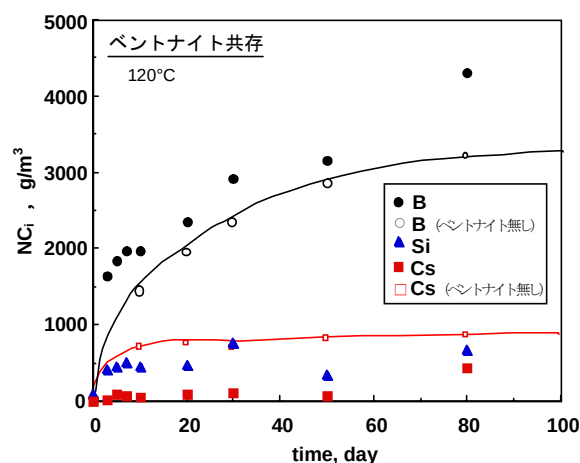


図5.2.3-1 BおよびSi浸出量に及ぼすベントナイト共存の影響

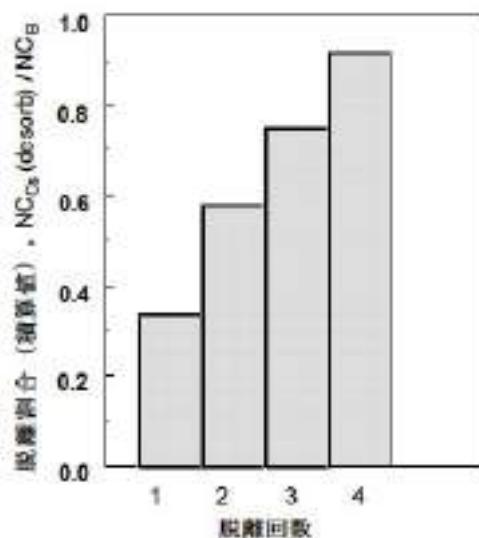


図5.2.3-2 実験後のベントナイトからのCsの脱離試験結果

ii) 核種の溶解挙動

「第2次取りまとめ」において溶解度制限固相の重要性を示したが、アクチニド元素 (4 価) の溶解度制限固相としては保守的に非晶質酸化物を選

定し評価を行った。長期的には非晶質から結晶性固相への固相の変遷により溶液中の核種濃度がより低減することが期待される。この固相変遷現象を明らかにするために、溶解度制限固相の変遷に関する研究として、米国 DOE (PNNL) との共同研究を進めている。平成 14 年度は、これまで実施してきた酸化還元条件に鋭敏でないトリウムについての $\text{ThO}_2(\text{am})$ から $\text{ThO}_2(\text{cr})$ への固相の変化の研究(Rai et al., 2000)に引き続き、酸化還元条件に鋭敏なウランの研究を行い、 $\text{UO}_2(\text{am})$ から $\text{UO}_2(\text{cr})$ への固相の変化と、それに伴う溶解度の変化を確認した。(Rai et al., 2002)

平成 15 年度は、溶解度制限固相の変遷に関する研究の一環として、固溶体の研究に着手した。固溶体を形成する元素の溶解度評価にあたっては、現状では、実験データが不足していることが OECD/NEA の国際的専門家からも指摘されている(OECD/NEA, 2001)。そこで、実験データが不足している 4 価のアクチニド元素である U(IV) と Np(IV) を対象に実験を開始した。U(IV) および Np(IV) の固溶体に関わる熱力学的特性を把握するため、U(IV) の割合を 0.05 から 0.95 に変えた $(\text{U}_x\text{Np}_{1-x})\text{O}_2(\text{am})$ 沈殿物を作成し、低濃度から高濃度の K_2CO_3 および KHCO_3 溶液中で溶解度を測定した(Rai et al., 2004) (図 5.2.3-3)。

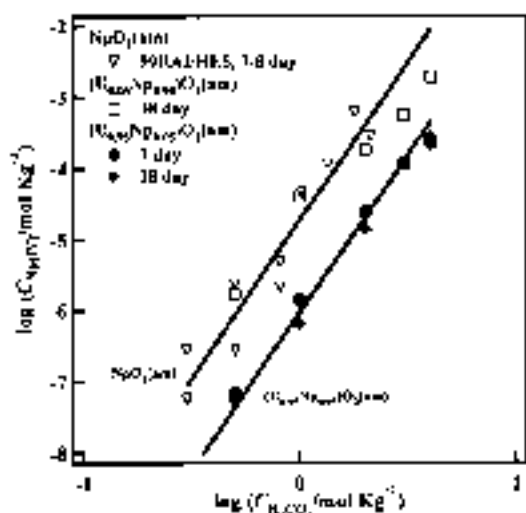


図 5.2.3-3 K_2CO_3 溶液中における $\text{NpO}_2(\text{am})$, $(\text{U}_{0.95}\text{Np}_{0.05})\text{O}_2(\text{am})$, $(\text{U}_{0.05}\text{Np}_{0.95})\text{O}_2(\text{am})$ の実験結果と理想的な固溶体を仮定した計算結果(直線)との比較

その結果、SEM-EDS, EXAFS, X 線回折を用いた固相分析に基づけば、溶解度制限固相は非晶質であ

ること、U および Np はいずれも 4 価であること、平衡時の共沈物が U と Np の固溶体であることが推定された。また、理想的な固溶体を仮定した場合の Np(IV) や U(VI) の溶解度の計算結果が実験値とほぼ一致することから、U(IV) と Np(IV) は、理想的な固溶体を形成していると推定された (図 5.2.3-3)。

核種の共沈現象に関する研究では、Ra-Ca- CO_3 系の共沈試験を行っている(中澤ほか, 2004)。地層処分環境下においては、例えば、セメント系材料から溶出した Ca イオンと地下水中に存在する炭酸イオンとの反応により炭酸塩が生成・沈殿する際に微量の放射性核種が共存した場合、本来、溶解度以下の濃度であるため沈殿しないはずの放射性核種が炭酸塩とともに沈殿する可能性が考えられる。そこで、炭酸塩として方解石を考え、その沈殿時における Ra の共沈に関するデータを、Ba をアナログ元素として用いることにより取得するとともに、Ra の共沈現象を考慮するためのモデルを検討した。

共沈試験はフリー・ドリフト法 (Meece et al., 1992) で行った。本法は方解石飽和溶液中の溶存炭酸ガス濃度 (P_{CO_2}) を高濃度側から低濃度側へ変化させ、pH が変化することにより過飽和とし、方解石を沈殿させる方法である。このとき、トレーサ元素として添加された Ba は方解石とともに共沈する。試験は、トレーサ元素の初期濃度および P_{CO_2} をパラメータとして行った。

Ba (初期濃度 0.1, 1 および 10 mg L^{-1}) との共沈試験の結果を図 5.2.3-4 に示す。

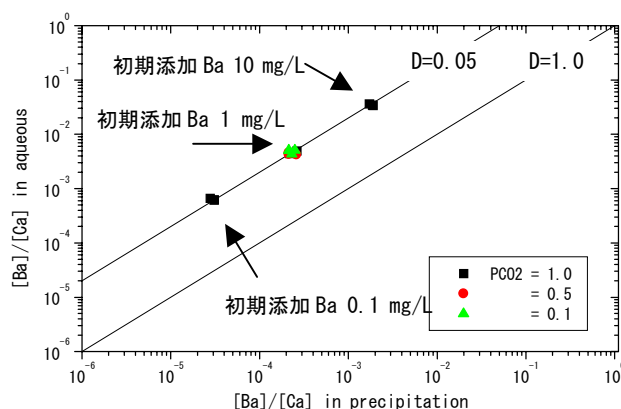


図 5.2.3-4 Ba をトレーサとして用いた炭酸塩との共沈試験結果

Ba の方解石との共沈は、初期濃度や P_{CO_2} には依存せず、液相中の Ca と Ba の濃度比と固相中の濃

度比が常に一定となるように沈殿していることがわかった。この時、溶液中と固相中の Ba/Ca の濃度比から求まる元素分配比 ($D = ([Ba]/[Ca])_{pr} / ([Ba]/[Ca])_{aq}$) は 0.05 となる。この結果により、トレーサ元素の方解石との共沈現象による溶解度について、元素分配比を用いたモデルにより評価することができる可能性が示された。

iii) α 放射性核種含有ガラス固化体を用いた原位置試験 (CORALUS プロジェクト)

ベルギーモルの HADES 地下研究施設において Np, Pu, Am, Cs を含む放射性ガラスとベントナイトを用いた系での原位置試験 (通称 CORALUS プロジェクト) (Iseghem et al., 1998) が実施されている。サイクル機構では、この国際プロジェクトに参加し、平成 14 年までにガラス溶解および核種移行挙動に関する解析を実施してきた。平成 15 年度の専門家会議では、試験の進捗状況を把握すると共にサイクル機構による解析結果へのコメント対応を行った。原位置試験の実施が約 1 年遅れており、今回の会議では、原位置試験結果が報告されず、解析結果との比較検討は未実施であるが、今後、原位置試験の進捗に合わせて試験結果を解析評価する予定である。

③ まとめ

模擬ガラス固化体 (P0798 ガラス) を用いた溶解／変質速度の温度依存性については、拡散係数、活性化エネルギーの算出を行った。ベントナイト共存下での溶解／変質挙動については、Cs についての浸出試験を実施し、浸出した Cs の大部分はガラス表面変質層ではなく、ベントナイトにイオン交換によって収着されることがわかった。

溶解度制限固相の変遷に関する研究の一環として実施した米国 DOE との共同研究を通じ、U(IV) と Np(IV) の固溶体に関する溶解度評価を行なった。その結果、U(IV) と Np(IV) は理想的な固溶体を形成しており、これらの溶解度は熱力学的に評価することが可能であることがわかった。

核種の共沈現象に関する研究では、炭酸塩沈殿時の Ra の共沈現象に関して Ba をアナログ元素として行った試験の結果、Ba の方解石との共沈は、初期濃度や P_{CO_2} には依存せず、液相中の Ca と Ba の濃度比と固相中の濃度比が常に一定で沈殿していることが分かった。この結果から、トレーサ元素の方解石との共沈現象による溶解度について、

元素分配比を用いたモデルにより評価することができる可能性が示された。

CORALUS プロジェクトでは、原位置試験の進捗に合わせて試験結果を解析評価する予定である。

参考文献

- 稲垣八穂広 (2003) : ガラス固化体の長期鉱物化に関する研究 (II), サイクル開発機構技術資料 (研究委託報告書; 九州大学), JNC TJ8400 2003-014.
- 稲垣八穂広 (2004) : ガラス固化体の長期鉱物化に関する研究 (III), サイクル開発機構技術資料 (研究委託報告書; 九州大学), JNC TJ8400 2003-055.
- Vam Iseghem, P., Valcke, E., N., Jockwer, (1998) : CORALUS: an integrated in situ corrosion test on α -active glass, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 506, pp. 961-967.
- Meece, D.E. and Benninger, L.K. (1993) : The coprecipitation of Pu and other radionuclides with $CaCO_3$, *Geochemica et Cosmochimica Acta* 57, pp. 1447-1458.
- 中澤俊之, 岡田賢一, 室井正行, 吉川英樹, 鐵 剛志, 吉田泰 (2004) : 炭酸塩生成時の放射性核種の共沈現象に関するデータ取得およびモデル開発, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集, p855.
- OECD/NEA (2001) : The Use of Thermodynamic Databases in Performance Assessment: Workshop Proceedings, Barcelona, Spain, 29-30 May 2000, Hosted by Enresa, OECD
- Rai, D., Moore, D. A., Oakes, C. S. and Yui, M. (2000) : Thermodynamic model for the solubility of thorium dioxide in the $Na^+-Cl^--OH-H_2O$ system at 23°C and 90°C, *Radiocnhimica Acta*, 88, pp. 297-306.
- Rai, D., Yui, M. and Moore, D. A. (2002) : Solubility and solubility product at 22°C of $UO_2(cr)$ precipitated from aqueous U(IV) solutions, *J. Solution Chemistry*, 32, pp. 1-17.
- Rai, D., Hess, N. J., Yui, M., Felmy, A. R. and Moore, D. A. (2004) : Thermodynamic and solubility of $(U_xNp_{1-x})O_2(am)$ solid solution in the carbonate system, Presented at Migration 03.

2) 核種の収着・拡散現象に関する研究

① 課題と計画の概要

人工バリアおよび天然バリアに対する放射性核種の収着、遅延現象は安全評価上重要であり、より現象理解を進め、信頼性を高めることが重要である。固相への収着の程度を示す指標として分配係数が用いられているが、分配係数は溶液の pH やイオン強度などに依存する値である。したがって、処分環境における分配係数の設定にあたっては、分配係数をより基本的な収着機構に基づいて説明することが必要であるとともに、環境条件の変化が分配係数に与える影響を予測可能とすることが重要な課題となっている。この課題への取り組みとして、評価上重要な元素に着目して、溶液条件を変化させた収着試験を実施し、それにとまなう分配係数の変化を説明する収着現象解析モデルの構築を試みている。また、国際共同プロジェクトである OECD/NEA 収着プロジェクトに参加し収着モデルの適用可能性などについての議論をまとめた報告書のレビューを行った。

さらに、処分環境における核種の遅延現象は、バッチ法による収着試験で観察される収着現象のみならず、物質の移行挙動とあわせた現象理解と評価が重要である。特に、緩衝材のような微細間隙構造を有する媒体中の移行では、間隙構造やそこでの溶質の存在状態などの理解が必要となる。また、拡散試験から導出される分配係数が、バッチ収着試験で得られるそれと必ずしも一致しないことから、この原因の究明や相互補完の手法の確立も重要な課題となっている。これらの課題への取り組みとして、環境条件や試験の規模を適切に変化させた条件での拡散試験を実施することを通じて、拡散メカニズムを理解するとともに、分子シミュレーションなどの手法を用いた微視的なモデルの検討を実施している。

結晶質岩のマトリクス部（基質部）への拡散（マトリクス拡散）については、「第2次取りまとめ」では、深度方向への拡散距離に対する知見が不十分なため、ナチュラルアナログの知見からマトリクス拡散深さを設定しているが、拡散深さの妥当性を評価することは、安全評価上非常に重要であり、平成15年度から実験的研究に着手している。

なお、本項に関連する収着試験研究は、収着・拡散データベースの整備の一環としても実施されており、その詳細は5.1.2項に記載されている。

② これまでの成果

i) OECD/NEA 収着プロジェクト報告書のレビュー

OECD/NEA では、性能評価における分配係数設定を補完する目的として利用されている熱力学的収着モデル(Thermodynamic sorption model: TSM)の適用性および比較結果をまとめた報告書の出版を2004年に予定している。報告書では、バッチ法による収着試験結果をモデル化するに当たっての方針と、サイクル機構を含む各機関が行った様々な試験結果を例題としたモデル化結果の比較に基づき、表面錯体反応を中心としたモデル化手法の適用性の現状がまとめられている。サイクル機構では、その報告書の内容のレビューを行った。

報告書では、このプロジェクトで実施された TSM によるモデル化が、単純な系および複雑な系のいずれの鉱物および水溶液条件のもとでも分配係数 (K_d) の実測値を説明でき、かつ他の溶液条件下での K_d を予測できること、その結果、実際の処分場における性能評価での K_d 値選定の補完として使用できることがまとめられている。現在残っている問題として、複雑な天然材料(岩石や土壌)に対する TSM の適用限界が示されており、その要因としてモデル開発に有用である体系的な実験データの不足が挙げられている。

今後の研究として、収着サイトをブラックボックスとして扱わざるを得ない複雑な系での収着現象のモデル化(ブラインドモデリング)の妥当性を調べるため、新たな実験データ取得を厳密に行い、モデル化結果から不足データを確認し、最終的に必要となるデータセットが得られるような改良された実験デザインを開発することが考えられている。

ii) 結晶質岩のマトリクス拡散深さに関する研究

「第2次取りまとめ」では、結晶質岩のマトリクス部（基質部）への拡散距離をウラン系列核種の移行に関するナチュラルアナログ研究 (Ota et al., 1999) から見積もられた最大値に基づいて0.1 mと設定した。しかし、次のような既往の事例に基づけば新鮮な花崗岩のように有効間隙率が小さい未変質な岩石中にも深さ方向に制限のないマトリクス拡散が起こることが想定される。

- ・地盤の隆起とともに海水から陸水へ地下水環境が変化した後に、花崗岩中の亀裂から数メートルの深さにわたって塩分濃度が低下していた (Olinand and Valkiainen, 1990)。

- ・室内と原位置において変質部と未変質部の有効間隙率や実効拡散係数には顕著な差は認められず、未変質部中への拡散が認められた（動力炉・核燃料開発事業団，1996）。
- ・有効間隙率が1%以下の新鮮な花崗岩中へも拡散することがスルーディフュージョン法による室内試験より認められた（Yamaguchi and Nakayama 1998）。

拡散は、岩石間隙中の水を介して進展するため、マトリクス拡散深さを把握するためには間隙が深度方向に連続性をもつことを確認する必要がある。

しかし、既往の室内実験は核種の拡散係数の導出をその研究目的としているため、岩石試料の厚さが数 mm～1cm 程度であり、マトリクス拡散がどの程度の深さまで生ずるかの知見が不十分であった。そこで、長さ 50, 100, 200mm で、いずれも直径 60mm の花崗閃緑岩のコアを用い、10,000ppm の NaI 溶液に接触させる非定常拡散試験を進めている。図 5.2.3-5 に長さ 50mm、溶液との接触期間 50d の間隙水中のヨウ素イオン濃度の試験結果を、Sato et al. (1997) に報告されている Cl^- の見かけの拡散係数値 ($5.6 \times 10^{-12} \sim 1.7 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) を用いた解析結果と併せて示す。

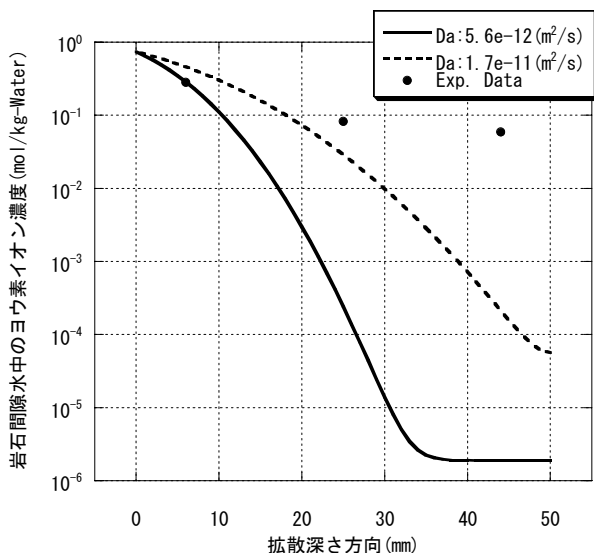


図 5.2.3-5 岩石中のヨウ素濃度分布（浸漬期間 50d）

この予察的結果では、マトリクス拡散が文献値に基づく解析結果に比べて早くなっているが、この理由については明らかになっていない。今後再試験による再現性の確認や試験方法の妥当性を含め、検討を行う必要がある。

また、原位置の岩盤は、地圧の影響を受けており、地圧が解放された試料と比較すると、形状因子が 20～70%低下すること（Ohlsson et al., 2001）が知られている。今後は、原位置の岩盤での拡散係数を測定する手法を開発し、室内試験結果と比較することにより、サンプリングされた試料の状態が拡散係数に及ぼす影響の程度を定量的に把握することも必要である。

iii) 圧縮ベントナイト中の陰イオンの拡散挙動に及ぼすケイ砂混合率および間隙水中塩濃度の影響

地層処分安全評価において重要なパラメータであるベントナイト中の放射性核種の実効拡散係数 (D_e) および見かけの拡散係数 (D_a) は、地下水中の塩濃度の影響を受けることが知られている。そのため、平成 14 年度には、取り扱いの容易さと TRU 廃棄物処分への適用も考え、 CO_3^{2-} , Cl^- , I^- について、乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} のクニゲル V1（クニミネ工業製）試料を用い、パラメータとしてケイ砂混合率：0, 30, 50wt%, NaNO_3 濃度： $0.01 \sim 5 \text{ mol l}^{-1}$ の条件での透過拡散試験を行い、その結果を報告した（石寺ほか，2004）。

平成 15 年度は、この結果に基づいて、ベントナイト中の陰イオンの拡散メカニズムについて詳細に検討した。

試験の結果、ケイ砂混合率の増加に伴って CO_3^{2-} , Cl^- , I^- の D_e および D_a は増大する傾向が見られた。また、乾燥密度の異なる試料でも D_e および D_a の変化が観察された。これらのイオンは、クニゲル V1 中のスメクタイト部分を主要な拡散経路としており、このケイ砂混合率などの変化に伴う D_e および D_a の変化は、クニゲル V1 中のスメクタイトの部分のみの密度と相関関係があると考えられる。そこで、スメクタイト部分の密度（スメクタイト部分密度）を Sato and Miyamoto (2001) の式により求めた。

$$\rho_{dm} = \frac{(1-f_s)f_m\rho_d}{1 - \left\{ \frac{(1-f_s)(1-f_m)}{\rho_{im}} + \frac{f_s}{\rho_s} \right\} \rho} \quad (5.2.3-1)$$

ここで、 ρ_{dm} はスメクタイト部分密度 (Mg m^{-3})、 ρ はベントナイト乾燥密度 (Mg m^{-3})、 ρ_{im} は随伴鉱物の密度 (2.7 Mg m^{-3})、 ρ_s はケイ砂の密度 (2.7 Mg m^{-3})、 f_s はケイ砂混合率 (0～0.5)、 f_m はスメクタイト含有率 (0.5) である。スメクタイト部分密度に対す

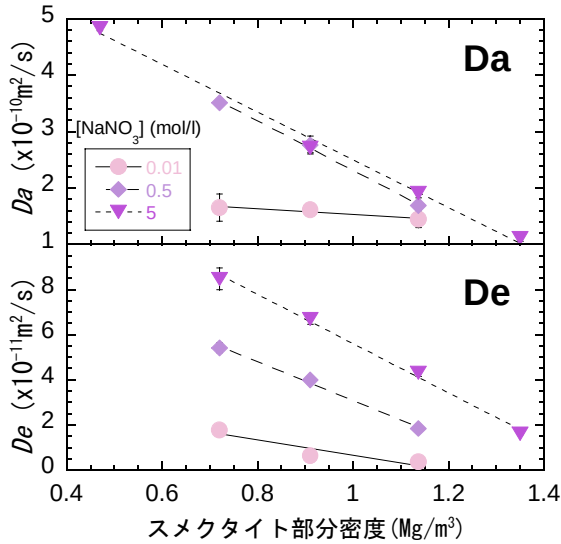


図 5.2.3-6 I⁻のベントナイトに対する D_e および D_a におけるスメクタイト部分密度依存性

る I⁻の D_e および D_a の変化を図 5.2.3-6 に示す。スメクタイト部分密度の増加に伴って D_e および D_a は直線的に減少する関係が得られた。このことから、スメクタイト部分密度で規格化することにより、ケイ砂混合率などの変化に伴う D_e および D_a の変化を推定することが十分有効であると考えられた。

一方、 CO_3^{2-} 、 Cl^- 、 I^- の D_e は NaNO_3 濃度の増加に伴って増大する傾向が見られた。陰イオンは、スメクタイト表面の負電荷の反発によりその表面から排除されると考えられている（陰イオン排除効果）。そのため、ベントナイト中で陰イオンが拡散可能な間隙は限定されると考えられている（Muurinen, 1989; Eriksen and Jansson, 1996; 鈴木, 2002; Lehtikoinen, et al., 1996）。一方、間隙水のイオン強度が高くなると陰イオン排除効果が低下し、陰イオンの拡散可能な間隙が増大するため、 D_e は増大すると考えられている。そのため、イオン強度が低い条件では、陰イオンの拡散可能な間隙の割合は全間隙率 ε よりも低くなり、間隙水のイオン強度が高くなると拡散可能な間隙の割合は増大し、全間隙率 ε に近づくと考えられる。 CO_3^{2-} 、 Cl^- 、 I^- が拡散可能な間隙の割合は、保持因子 α より見積もることが可能である。

$$D_e = \alpha D_a \quad (5.2.3-2)$$

$$\alpha = \varepsilon_{eff} + \rho K_d \quad (5.2.3-3)$$

ここで、 ε_{eff} は拡散に寄与する間隙のみを対象とした場合の間隙率、 K_d は分配係数である。 CO_3^{2-} 、 Cl^- 、 I^- の収着がない($K_d=0$)と仮定すると、 D_e と D_a から求められる保持因子 α は、これらのイオンの拡散に寄与する間隙率(ε_{eff})と等しくなる。図 5.2.3-7 に α の NaNO_3 濃度依存性を示す。 Cl^- 、 I^- および CO_3^{2-} の α は含水前後の重量差により求められた全間隙率 ε (0.40) よりも低い値を示し、 NaNO_3 濃度の増加に伴って増大した。この傾向は、陰イオン排除効果の低下を示すものと考えられる。

NaNO_3 濃度が 5 M 程度のイオン強度が高い条件では、スメクタイト表面の負電荷の影響領域は非常に小さく、保持因子 α と全間隙率 ε が一致すると考えられる。しかしながら、 Cl^- 、 I^- については、 α は常に ε を下回った。この結果は、陰イオン排除効果の影響以外にも Cl^- 、 I^- が存在できない間隙が存在することを示している。ベントナイト中の全間隙はスメクタイト粒子中の層間間隙と粒子間間隙から構成されると考えられる。本試験の条件において層間間隙は粒子間間隙に比べ間隙サイズが小さいため、 Cl^- 、 I^- が層間間隙に侵入できず、粒子間間隙のみを拡散経路としている可能性が考えられる。この場合、 α は全間隙率 ε ではなくベントナイト試料中の粒子間間隙のみの間隙率と等しくなる。粒子間間隙のみの間隙率は全間隙率 ε に対する粒子間間隙の割合から以下の式により求められる。

$$\varepsilon_p = f_p \varepsilon \quad (5.2.3-4)$$

$$f_p = 1 - \frac{A_m d \rho_w}{2} \cdot \frac{\rho V f_m (1 - f_s)}{W_{wet} - W_{dry}} \quad (5.2.3-5)$$

ここで、 ε_p は粒子間間隙のみの間隙率、 f_p は粒子間間隙の割合、 A_m はモンモリロナイト層間の比表面積 ($6.55 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$)、 d は層間距離 (0.9 nm)、 ρ_w は水の密度 ($1 \times 10^3 \text{ Mg m}^{-3}$)、 V はベントナイト試料の体積 (m^3) である (Kozaki et al., 2001)。乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 30wt% において f_p は 60% 程度と見積もられ、 ε_p は 0.24 程度となる。図 5.2.3-7 に示すように、 NaNO_3 濃度が高くなると α は ε_p に近づき、 NaNO_3 濃度が 5 M の条件では両者がよく一致する。このことから、ベントナイト中を拡散する Cl^- 、 I^- はスメクタイト粒子中の層間間隙に侵入できず、拡散経路はスメクタイト粒子間間隙のみに限定されていると推測された。

CO_3^{2-} については、 NaNO_3 濃度が 0.5 および 5 M の条件において α が ε よりも大きくなるという結果

が得られた。これは、ベントナイト中に CO_3^{2-} が保持されている可能性を示している。この原因として、クニゲル V1 中に含まれる方解石の影響が考えられる。本試験における条件 (pH12.5) では、方解石は間隙水中で以下の平衡を保っていると考えられる。



トレーサーとして拡散している $^{14}\text{CO}_3^{2-}$ はこの化学平衡により一定量が方解石として沈殿し、クニゲル V1 中に保持されると考えられる。

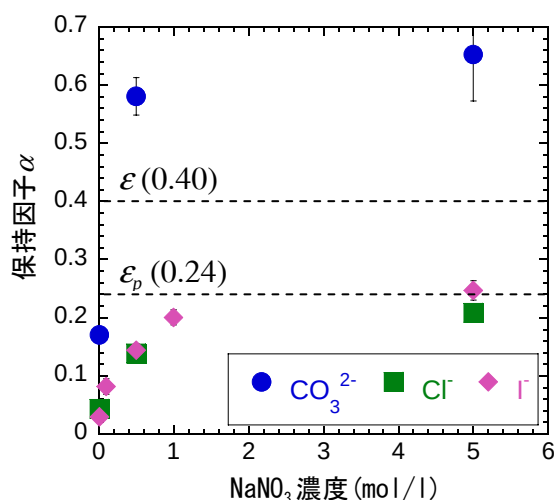


図 5.2.3-7 保持因子 α の NaNO_3 濃度依存性

iv) 凝灰岩中の陰イオンの拡散挙動に及ぼす間隙水中塩濃度の影響

地層処分の安全評価において、地質媒体中の放射性核種の実効拡散係数 (D_e) は、その移行挙動を把握する上で重要なパラメータである。 D_e は間隙水中の塩濃度に影響されることが考えられ、その影響を定量的に把握することが必要となる。そのため、地質媒体試料として、まず標本として入手可能な凝灰岩 (大谷石) を選定し、塩濃度をパラメータとした陰イオンの透過拡散試験を行い、 D_e を取得するとともに、拡散挙動に及ぼす塩濃度の影響を評価した (石寺ほか, 2004)。

セレンをはじめとして、安全評価上重要な元素のいくつかは、想定される処分環境条件で陰イオンの形態をとる。アクチニド元素も、炭酸錯体やヒドロキソ炭酸錯体として存在することを考慮すると、陰イオンの移行挙動を理解することは重要である。しかしながら、セレンなどの評価対象元素は、酸化還元の影響を受けるなど実験的な困難

さを伴うことから、本試験では、TRU 廃棄物処分の安全評価への適用も考え、取扱が比較的容易で、TRU 廃棄物処分の評価における重要元素である、炭素 (C)、塩素 (Cl)、ヨウ素 (I) (それぞれ、 CO_3^{2-} 、 Cl^- 、 I^-) を用いることとした。また、塩濃度の調整は NaNO_3 で行い、処分場でのセメント系材料の利用も考慮し、高 pH 条件における試験を実施した。

試料は凝灰岩、溶液は NaOH により pH12.5 に調整し、パラメータとして NaNO_3 濃度: 0.01~5 M の条件で試験を行った。試験は、凝灰岩試料 (ϕ 30x10mm もしくは 30x20mm) を拡散セルに設置し、試験溶液を加え減圧下で含水させた後、トレーサーを添加し拡散試験を開始した。所定の期間毎に試験溶液をサンプリングし、溶液中のトレーサー濃度の測定を行い、得られた破過曲線より D_e を求めた。

試験の結果、得られた CO_3^{2-} 、 Cl^- 、 I^- の D_e の値は $10^{-11} \sim 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 程度であり、それぞれの NaNO_3 濃度で、 D_e は $\text{C} < \text{Cl} < \text{I}$ の順で大きくなる傾向が見られた。図 5.2.3-8 に CO_3^{2-} 、 Cl^- 、 I^- の D_e の NaNO_3 濃度依存性を示す。これらの D_e は NaNO_3 濃度が増加するに伴って低下する傾向が見られた。この傾向はベントナイトの試験で観察された傾向と異なっており、凝灰岩はス멕タイト含有率が低く、間隙サイズが大きいために、陰イオン排除効果に関わる影響が少なかったことが考えられた。また D_e が低下した原因として、塩濃度の増加に伴う CO_3^{2-} 、 Cl^- 、 I^- の水中の拡散係数の低下や岩石表面に変質層が生成したことによる間隙率の低下が考えられた。

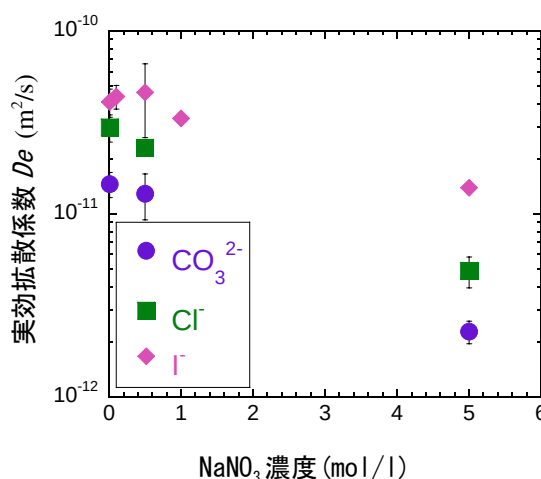


図 5.2.3-8 CO_3^{2-} 、 Cl^- 、 I^- の凝灰岩に対する D_e の溶液中 NaNO_3 濃度依存性

v) 緩衝材中の核種移行挙動に影響を及ぼす処分環境因子に関する基礎的研究

圧縮ベントナイト中の核種の拡散挙動については、これまで多くの実験データが取得され、そのメカニズムについて精力的な議論がなされてきている。しかしながら、これらの実験データは、塩濃度の低い条件で取得されたものがほとんどであり、また、その大部分が室温で取得されている。そのため、海水系地下水を想定した高塩濃度条件での実験や、実際の処分場の温度を考慮した実験を行いデータを取得し、メカニズムを検討しなければならない。そこで本研究では、Na 型モンモリロナイト中の Na^+ イオンの拡散挙動の塩濃度依存性のメカニズムを議論するとともに、塩濃度および温度をパラメータとして Cl^- の見かけの拡散係数を非定常拡散試験法により取得した。

Na^+ イオンの拡散の活性化エネルギーは、塩濃度が 0 から 0.1 M に増加すると 14kJ mol^{-1} から 23kJ mol^{-1} に増加し、塩濃度が 0.5 M に増加すると 17kJ mol^{-1} に減少する。この変化は、塩濃度が増加するにつれて、 Na^+ イオンの支配的な拡散プロセスが空隙拡散、表面拡散、層間拡散の間で移り変わるためと考えられた。一方、 Cl^- イオンの見かけの拡散係数は塩濃度の増加とともにわずかに増加することが明らかになった。また、 Cl^- イオンの拡散の活性化エネルギーはほぼ一定 (約 12kJ mol^{-1}) であり、塩濃度によらず拡散プロセスが一定であると考えられた。しかしながら、自由水中の値 (17.4kJ mol^{-1}) (Person, 1959) より低い活性化エネルギーが得られていることから、支配的な拡散プロセスが間隙中の拡散のみではないことが示唆された。(小崎・佐藤, 2004)

vi) 分子動力学法および均質化手法を用いた緩衝材中の物質移行に関する基礎的研究

緩衝材中の核種移行現象を支配するスメクタイト結晶近傍での水やイオンの微視的なふるまいを、分子シミュレーション法のひとつである分子動力学法を用いた解析により明らかにすることを目的とした研究を進めている。

平成 14 年度に実施した、シミュレーションの基本となる水分子などの原子間相互作用モデルの改良に引き続き、平成 15 年度は層状ケイ酸塩鉱物の結晶構造や物性の再現性を高めるために、相互作用モデルのパラメータを改良した。新しいモデルを用い、Na 型、Ca 型、Cs 型のスメクタイトにつ

いて分子動力学計算を行うことで、水分子と交換性陽イオンの自己拡散係数を導出した。その結果、およそ次の関係が認められた。

$D(\text{H}_2\text{O in Ca 型}) < D(\text{H}_2\text{O in Na 型}) < D(\text{H}_2\text{O in Cs 型})$

$D(\text{Ca in Ca 型}) < D(\text{Na in Na 型}) < D(\text{Cs in Cs 型})$

この傾向は、イオンの価数とイオン半径の観点から合理的な傾向であると言える(河村, 2004)。さらに、均質化手法による拡散現象のシミュレーションとして、微視的レベルの粘土鉱物の結晶端面に対する Cs の収着を考慮した、拡散現象の解析を実施し、緩衝材中の微視的濃度変化の傾向を再現することができた。しかしながら、シミュレーションにおける収着現象の取り扱いについては、全収着サイト数に対して対象とするイオンが収着しているサイト数を決定する方法に改善の余地があり、継続した改良が必要であると考えられる(河村, 2004)。

③まとめ

OECD/NEA 収着プロジェクトに関しては、熱力学的収着モデル(TSM)の適用性をまとめた OECD/NEA の報告書内容についてレビューを行った。報告書では、単純な系では TSM を性能評価での K_d 値選定の補完として使用できること、複雑な天然材料に対する TSM モデルの開発が実験データの不足より適用限界にあることが示されている。今後の課題として、ブラインドモデリングとその比較のための新たなデータ取得の実施、モデル化に必要なデータを得るための実験デザインの開発などが指摘されている。

結晶質岩のマトリクス拡散深さに関する研究では、長さ 50mm の花崗閃緑岩のコアを用いた非定常拡散試験を行い、解析結果と比較したが、予察的な試験結果と解析結果との間に差異が見られた。今後、100mm および 200mm のコアの試験結果も参考にしつつ、試験結果と解析結果の差の原因について検討を進めていく予定である。

緩衝材中の拡散挙動については、緩衝材および凝灰岩中の陰イオンの拡散に対する塩濃度の影響に関するデータ取得を行うとともに、観察された現象に基づき、拡散メカニズムの考察を行った。今後も、継続して系統的なデータ取得を行うとともに、移行遅延パラメータ設定の信頼性向上のために拡散メカニズムを明らかにする予定である。

参考文献

- 動力炉・核燃料開発事業団 (1996) : 地層処分研究情報交換会報告書, PNC TN1100 96-010.
- Eriksen, T. E. and Jansson, M. (1996) : Diffusion of I^- , Cs^+ and Sr^{2+} in Compacted Bentonite - Anion Exclusion and Surface Diffusion, SKB 96-16.
- 石寺孝充, 佐藤治夫 (2004) : 凝灰岩中の C, Cl, I の拡散挙動に及ぼす $NaNO_3$ の影響, 日本原子力学会 2004 春の年会要旨集 H46, p. 852.
- 石寺孝充, 宮本真哉, 佐藤治夫 (2004) : 圧縮ベントナイト中の C, Cl, I の拡散挙動に及ぼすケイ砂混合率及び $NaNO_3$ の影響, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2004-001.
- 河村雄行 (2004) : ベントナイト中の物質移行モデルの高度化研究(II) (研究委託報告書; 東京工業大学), JNC TJ8400 2004-001.
- 小崎完, 佐藤正知 (2004) : 緩衝材中の核種移行挙動に及ぼす処分環境因子に関する基礎的研究 (研究委託報告書; 北海道大学), JNC TJ8400 2003-075.
- Kozaki, T., Inada, K., Sato, S. and Ohasi, H. (2001) : Diffusion Mechanism of Chloride Ions in Sodium Montmorillonite, J. Contaminant Hydrology, 47, pp. 159-170.
- Lehikoinen, J., Carlsson, T., Muurinen, A., Olin, M. and Salonen, P. (1996) : Evaluation of Factors Affecting Diffusion in Compacted Bentonite, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 412, pp. 675-682.
- Ohlsson, Y., Lofgren, M. and Neretnieks, I. (2001) : Rock matrix diffusivity determinations by in-situ electrical conductivity measurements, J. Cont. Hyd. Vol. 47, pp. 117-125.
- Olin, M. and Valkiainen, M. (1990) : Concentration profiles of anions in granite bedrock caused by postglacial land uplift and matrix diffusion, IVO Technical Report, 90-1.
- Ota, K., Amano, K. and Ando, T. (1999) : Brief overview of in situ contaminant retardation in fractured crystalline rock at the Kamaishi in situ test site, Proceedings of an International Workshop for the Kamaishi in situ Experiments, Kamaishi, Japan, 24-25 August 1988, pp. 67-76, JNC Technical Report, JNC TN 7400 99-007.
- Persons, R. (1959) : Handbook of electrochemical constants, Butterworth Sci. Publ., p. 79.
- Sato, H., Shibutani, T., Tachi, Y., Ota, K., Amano, K. and Yui, M. (1997) : Diffusion Behavior of Nuclides Considering in Fractured Crystalline Rocks, PNC Technical Report, PNC TN8410 97-127.
- Sato, H. and Miyamoto, S. (2001) : A Study on Diffusion and Migration of Lead in Compacted Bentonite - The Effect of Dry Density, Silica Sand Content and Temperature on Diffusion and Migration of Pb-210 in Sodium Bentonite -, JNC TN8400 2001-018.
- 鈴木寛 (2002) : 人工バリアにおける核種拡散過程に関する研究, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2002-006.
- Muurinen, A. (1989) : Diffusion of Chloride and Uranium in Compacted Sodium Bentonite, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 127, pp. 743-747.
- Yamaguchi, T. and Nakayama, S. (1998) : Diffusivity of U, Pu and Am carbonate complexes in a granite from Inada, Ibaraki, Japan studied by through diffusion, J. Contaminant Hydrology, 35, pp. 55-65.

5.2.4 コロイド等の影響評価モデルの開発

1) コロイドの影響評価モデルの開発

① 課題と計画の概要

天然の地下水中には、種々のコロイドが存在する。また、放射性廃棄物の地層処分システムにおいて、緩衝材としてベントナイトを用いた場合、長期的には地下水の浸食作用を受けることにより、ベントナイトコロイドが生成する可能性も指摘されている。これらのコロイドは、岩石と同様に負に帯電し、その大きさ故にマトリクス拡散が起こりにくいことから、地層による遅延作用を受けずに移行すると推測される。これらのコロイドに放射性核種が収着されると、核種の移行遅延作用として期待される岩石への収着やマトリクス拡散が起こりにくくなると考えられるために、コロイドが存在しない場合に比べて、その移行が促進されることが指摘されている。一方で、大きなコロイドが狭い亀裂や細孔を通過できずに捕捉される、いわゆるろ過効果が起こることも知られている。この場合、コロイドに収着した核種は、コロイドが存在しない場合に比べて、その移行が大きく遅延されることとなる。したがって、天然バリア中における放射性核種の移行挙動を評価する上で、コロイドの影響評価は重要であり、「第2次取りまとめ」においても、天然バリアについてのモデル変更ケースとしてその評価を行った。

「第2次取りまとめ」以降、さらに信頼性の高いコロイド影響評価モデルの開発を目指し、以下のような課題に取り組んでいる。

- ・ベントナイトコロイドに対する放射性核種の収着性に関する検討
- ・岩盤（亀裂性および多孔質媒体）中でのコロイド共存系の核種移行評価
- ・結晶質岩中の透水性亀裂を対象としたコロイド共存下での放射性核種移行原位置試験（Nagra・グリムゼル岩盤試験場における CRR プロジェクト）結果の解析

② これまでの成果

i) ベントナイトコロイドに対する放射性核種の収着性に関する検討

「第2次取りまとめ」では、核種移行挙動に及ぼすコロイドの影響を評価する際、コロイドに対する核種の分配係数が重要なパラメータであると

述べられている。平成14年度は、地下水コロイドに対する A_m の収着特性を調べ、分配係数が $10^{-2} \sim 10^1 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ のオーダーで、 A_m 濃度依存性を示すことが分かった。平成15年度は、ベントナイトコロイドに対する C_s および N_p の収着挙動を調べた。

C_s の収着挙動について、クニピア F から調製したクニピア F 起源のコロイドに対する収着試験および脱離試験を実施した（飯島ほか、2004a）。初期コロイド濃度 1.02 g l^{-1} 、初期 C_s 濃度 $10^{-4} \sim 10^{-9} \text{ M}$ の条件でバッチ式収着試験を実施し、分配係数を得た。結果を図 5.2.4-1 に示す。分配係数として、約 $20 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ の値が得られ、平衡時の C_s 濃度 $10^{-11} \sim 10^{-5} \text{ M}$ 、収着期間 1~72 日、 $\text{pH} 7 \sim 8.5$ の間では、分配係数に対するこれらの依存性は認められなかった。一方、コロイドの粒径分布を調べたところ、 200 nm より大きい粒子が大部分を占めていることがわかった。また、コロイド断面の透過型電子顕微鏡写真から、コロイド粒子のスメクタイト結晶シートの積層数は、多いもので 6~7 層、少ないものでは 2~3 層程度であることが観察された。コロイドに対する収着の分配係数は、粉末状のベントナイトに対して得られた値より大きな値を示したが、その原因としては、溶液中の競合イオンの違い、含まれるスメクタイトの性質の違い（たとえば、粒径は大きい積層数は少ない薄片状のコロイド形状になることにより表面積が増加し、結果として収着サイトが増加）などが考えられた。

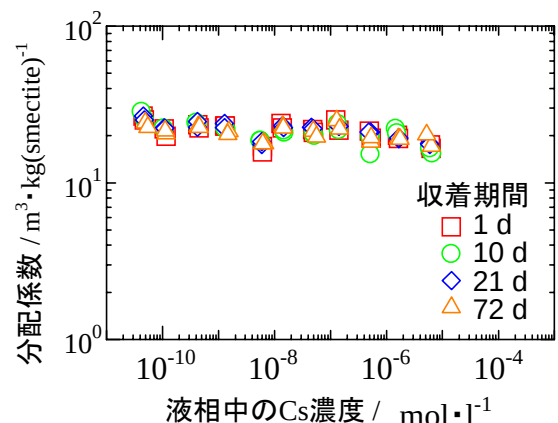


図 5.2.4-1 ベントナイトコロイドに対する C_s の分配係数

一方、 N_p の収着挙動については、クニピア F 及びクニゲル V1 から調製したベントナイトコロイドに対するバッチ収着試験を実施した。まず、初期 N_p 濃度 10^{-5} M で、 N_p のほとんど全てが $N_p(\text{V})$ とし

て存在すると考えられる系において、分配係数を求めた。クニゲルV1起源のコロイド(初期濃度 $0.41 \sim 0.47 \text{ g l}^{-1}$) については、pH 6~10 で $0.16 \sim 0.28 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 、クニピア F 起源のコロイド(初期濃度 1.40 g l^{-1}) については、pH 8 で $0.29 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ であった。初期 Np 濃度 10^{-9} M で、Np の 10~20% 程度が Np(IV)、それ以外が Np(V) として存在すると考えられる系において、分配係数を求めたところ、クニピア F 起源のコロイド(初期濃度 1.40 g l^{-1}) について、pH 8 で $0.48 \sim 0.53 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ であった。クニピア F 起源のコロイドに対する Np(IV) の分配係数は、Np(IV)/Np(V) 共存系での分配係数から、Np(V) の寄与分(溶液中の Np(V) 濃度と、上記の Np(V) のみの系における分配係数に基づき、Np(V) の収着量を見積もった)を差し引くことにより求め、 $3.35 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ の値を得た。

核種の移行挙動に及ぼすコロイドの影響は、コロイドへの核種の収着が不可逆的であると、さらに顕著になる。今後は、コロイドからの核種の脱離試験を行い、核種の収着の可逆性を評価していく。

ii) 岩盤(亀裂性および多孔質媒体)中でのコロイド共存系の核種移行評価

本研究では、粘土系コロイド共存下での核種の亀裂中移行実験を通して、核種移行評価に及ぼす核種-亀裂表面、および核種-コロイドでの収着反応速度の影響について検討した。実験では、収着性核種として Cs を $1.0 \times 10^{-6} \text{ g l}^{-1}$ ($7.5 \times 10^{-9} \text{ M}$) の濃度で、コロイドとしてベントナイトコロイドを $3.5 \times 10^{-3} \text{ g l}^{-1}$ の濃度で使用した。また、人工的に単一亀裂(寸法 $50 \times 50 \times 0.5 \text{ mm}$) を加工した花崗岩をカラムに充填して用いた。移行実験の結果については、核種-亀裂表面、および核種-コロイドでの収着反応を平衡論および速度論で扱うことができる核種移行計算コード COLFRAC を用いて解析した(Ibaraki and Sudicky, 1995)。その結果を図 5.2.4-2 に示す。核種-コロイドの収着反応を平衡論で扱うか速度論で扱うかにより解析結果(破過性)は異なり、収着の反応速度について解析上考慮することが重要であることが示唆された。さらに、本実験結果に基づけば、亀裂中でコロイドがろ過されることに伴いコロイドに収着した核種は亀裂内に留まることから、核種の放射能減衰が期待されると考えられる。したがって、コロイドの影響を考慮した核種移行解析モデルの高

度化にあたっては、コロイドのろ過効果を考慮することも必要であると考えられる

また、本研究では、上記 COLFRAC コードを改良して、亀裂ならびに多孔質媒体の両方においてコロイドの移行を取り扱う計算コード COLFRAC-MRL の開発にも取り組んでいる。それにより、コロイドの影響による核種の移行現象を亀裂中だけでなく、多孔質媒体中においても評価を行うことが可能となり、コード検証のための実験を実施している(上田・久野, 2004)。

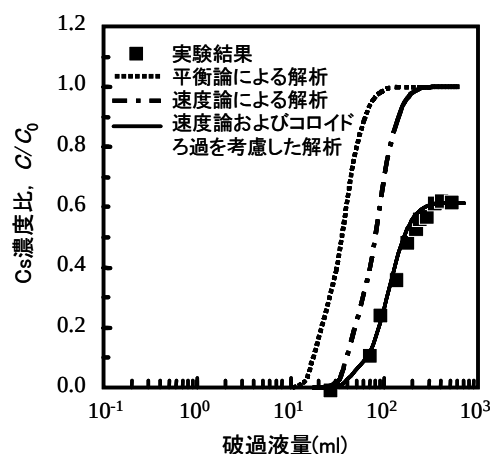


図 5.2.4-2 ベントナイトコロイド共存系での Cs の移行に関する実験と解析の比較

iii) グリムゼル原位置試験(CRR プロジェクト)の解析

サイクル機構では、1998 年よりスイス放射性廃棄物管理共同組合(Nagra)との共同研究の一環として、グリムゼル岩盤試験場(スイス)の花崗岩中の透水性亀裂を利用したコロイドと核種の原位置移行試験プロジェクト(CRR: Colloid and Radionuclide Retardation)に参画した。本研究では、原位置核種移行試験結果から、コロイド共存/非共存下での核種移行挙動について考察するとともに(飯島ほか, 2004b)、高度化を進めるコロイドの影響を考慮した核種移行計算コード COLFRAC-MRL を使用して、実験対象亀裂での核種移行解析を実施した(黒澤ほか, 2004)。図 5.2.4-3 および図 5.2.4-4 に、ベントナイトコロイド非共存/共存系における核種移行(Am, I)に関する実験結果と解析結果の例を示す。その結果に基づけば、コロイド非共存系での核種の移行に関しては、核種の亀裂表面への収着速度が遅いことから非収着性の ^{131}I と同様に移行遅延が見られなかったものと考えられる。一方、コロイド共存系では、核

種はコロイドに収着しやすく、かつその脱着速度が遅いことから、イオンの場合の移行特性とは異なり、コロイドの移行特性に伴って核種移行が促進された可能性が示唆された（黒澤ほか，2004）。

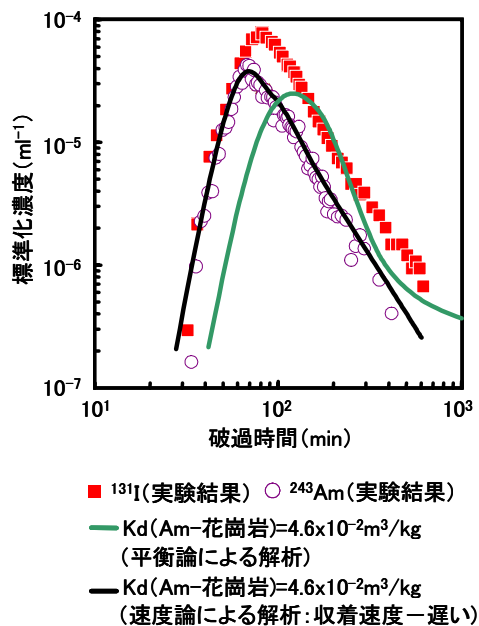


図 5.2.4-3 グリムゼル原位置試験におけるコロイド非共存系での核種移行に関する解析結果の例

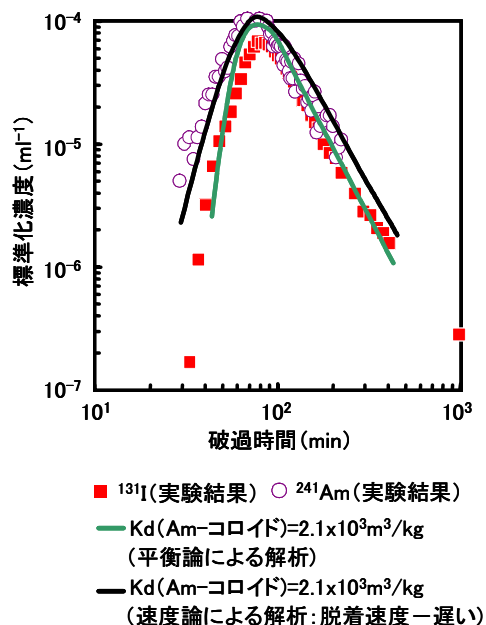


図 5.2.4-4 グリムゼル原位置試験におけるコロイド共存系での核種移行に関する解析結果の例

③ まとめ

天然バリア中でのコロイドの影響を考慮した放射性核種の移行評価モデルの開発とその信頼性向上を目的として、平成 15 年度に実施した主な成果をまとめる。

- ・ベントナイトコロイドに対する Cs, Np(V) 及び Np(IV) の収着試験を実施し、分配係数を取得した。
- ・室内および原位置における核種およびコロイドの移行実験に関する解析を実施した。その結果、核種-亀裂表面および核種-コロイドでの収着反応に関する反応速度を考慮することの重要性が示された。
- ・亀裂中でコロイドがろ過されることに伴い、コロイドに収着した核種も亀裂内に留まることが認められ、それによる核種の放射能減衰が期待される。したがって、コロイドの影響を考慮した核種移行解析モデルの高度化にあたっては、コロイドのろ過効果を考慮することもあると考えられる。
- ・多孔質媒体中におけるコロイドの影響による核種の移行現象を評価できる計算コードの開発を行った。

今後は、コロイドに収着した核種の脱離試験を実施し、核種の収着の可逆性に関するデータや、ろ過効果に関するデータを取得し、モデル化に向けた検討を行っていく。

参考文献

- Ibaraki, M. and Sudicky, E. A. (1995) : Colloid-facilitated contaminant transport in discretely fractured porous media-1. Numerical formulation and sensitivity analysis, Water Resources Research, 31, pp. 2945-2960.
- 飯島和毅, 増田嗣也, 戸村努 (2004a) : ベントナイトコロイドに対する Cs の収着挙動, サイクル技報, No. 23, pp. 51-61
- 飯島和毅, 太田久仁雄, 油井三和, Alexander, R. (2004b) : グリムゼル岩盤試験場における亀裂中の核種及びコロイドの移行(1)-方法と試験結果-, 日本原子力学会 2004 年春の年会予稿集, p. 810
- 黒澤進, 茨木希, 油井三和, James, S., 飯島和毅, Alexander, R. (2004) : グリムゼル岩盤試験場における亀裂中の核種及びコロイドの移行(2)-モデル解析-, 日本原子力学会 2004 年春の年会予稿集, p. 811
- 上田真三, 久野義夫 (2004) : 核種移行に関する基盤データ構築手法の検討および個別モデルの高度化に関する研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 三菱マテリアル株式会社), JNC TJ8400 2003-065.

2) 天然有機物・微生物の影響評価モデルの開発

2-1) 天然有機物の影響評価モデルの開発

① 課題の計画と概要

天然の地下水中に存在する有機物や緩衝材であるベントナイトから生成する有機物は、放射性核種と相互作用を起こし、溶解度や岩石への収着挙動に影響を与える可能性がある。しかし、特に天然の有機物は、起源や生成過程によって分子構造が異なり、核種との相互作用も一定ではないため、一般化した定量的な議論は難しい。「第2次取りまとめ」においては、溶解度に及ぼす影響は、他の配位子（例えば炭酸イオン）との競合を考慮すると顕著ではないと推定できるため、移行挙動に及ぼす影響は無機コロイドと同様の扱いが可能として、有機物に特化した議論は行っていない。今後、地質環境が特定されれば、天然有機物の特性評価や核種移行挙動に及ぼす定量的な評価が具体的に実施されることとなる。そのため、天然有機物の特性や有機物と核種との相互作用に関する情報を収集し、特性評価あるいはモデル化を含めた影響評価手法について検討しておく必要がある。

そこで、「第2次取りまとめ」以降は、相互作用に関するデータの取得及び核種移行挙動への影響評価に関する基本モデルの提示を目指し、以下のような課題に取り組んでいる。

- ・フミン酸と核種（特に Np(IV)）との相互作用に関するデータの取得
- ・圧縮ベントナイト中の有機物透過性に関するデータの取得

② これまでの成果

i) フミン酸と放射性核種の相互作用に関するデータの取得

有機物と核種の相互作用評価の一つとして、フミン酸と Np(IV) の相互作用評価を継続した。フミン酸は地層中に存在する代表的な天然有機物である腐植物質の一種である。平成 14 年度報告では、Np(IV) の溶解度実験により、フミン酸濃度の増加に伴い Np(IV) 濃度も増加する傾向が見られ、Np(IV) - フミン酸錯体の形成が示唆されることが報告されている。また、Np(IV) との相互作用に及ぼすフミン酸分子量の影響を調べ、分子量 3,000 ~ 10,000 及び 10,000 ~ 50,000 のフラクションで、Np(IV) 濃度とフミン酸濃度の関係に、大きな違い

は認められないことが報告されている。

平成 15 年度は、精製した Aldrich 製フミン酸の酸塩基滴定を行って酸解離挙動を評価し、得られた電荷密度の値を用いて、フミン酸と Np(IV) の錯生成の安定度定数 β_0 を求めるとともに、錯体の結合の強さに関する考察を行った（飯島ほか, 2004）。

まず、フミン酸の酸塩基滴定結果から、錯生成定数の導出に必要な pH 8 におけるフミン酸の負電荷密度を求め、 4.35 meq g^{-1} の値を得た。次に、初期 Np 濃度 $1.1 \times 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$ 、pH 8 で、フミン酸濃度が $5 \sim 500 \text{ mg l}^{-1}$ の時の Np(IV) 溶解度を調べた。フミン酸濃度が 5 mg l^{-1} の場合でも、溶液中の全 Np 濃度は、フミン酸が存在しない場合に比べ 1 桁以上増加することが認められ、他に競合する配位子が存在しない条件下では、溶解度の上昇が顕著であることが示された。また、フミン酸濃度が 50 mg l^{-1} より高い場合、添加した $10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$ の Np 全てが溶存化学種として存在した。

Np の原子価を確認するために、TTA-キシレン溶液による溶媒抽出を行う場合、抽出効率を上げるために pH を 0 付近まで下げるが、その時にフミン酸とともに一部の Np が沈殿し、回収されていない可能性がある。このような Np は、解離しにくい強い結合の Np(IV) - フミン酸錯体と考えられる。溶媒抽出時に有機相及び無機相に存在する Np の割合に及ぼす Np とフミン酸の錯生成反応時間の影響を図 5.2.4-5 に示す。フミン酸濃度が 50 mg l^{-1} より高い場合、回収される Np は、時間とともに減少した。これは、pH を下げた際にフミン酸とともに沈殿する Np が時間とともに増加していることを示してい

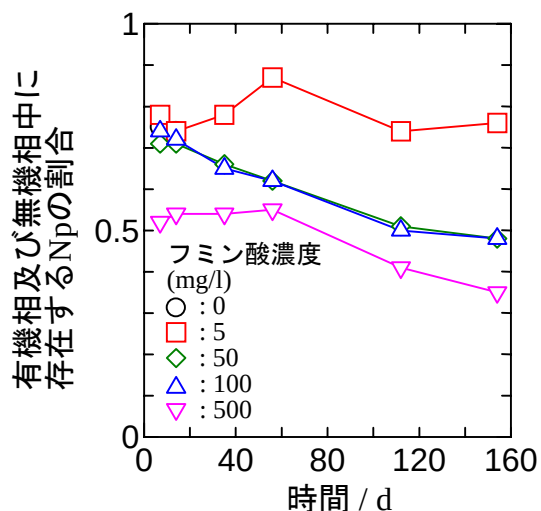


図 5.2.4-5 有機相及び無機相中に存在する Np の割合の時間変化

る。つまり、解離しにくい強い結合の Np(IV)-フミン酸錯体が時間とともに増加していると推測される。フミン酸の電荷密度データ及びフミン酸共存下での Np(IV)溶解度データから、Np(IV)-フミン酸錯体の安定度定数として $\log \beta_{\alpha}=26.31$ が得られた。

今後は、Np(IV)-フミン酸錯体の安定度定数の信頼性確認、強い結合を示す Np(IV)-フミン酸錯体生成の可逆性を検討するとともに、詳細なフミン酸の分子量分布等の特性評価を進めていく。

ii) 圧縮ベントナイト中の有機物透過性評価

圧縮ベントナイトのろ過効果について、「第2次取りまとめ」では、降水系地下水条件下では、概ね分子量10万を超える有機物は圧縮ベントナイトを透過できない、としている。一方、海水系地下水のような高イオン強度の環境では、ベントナイトの微細間隙構造が変化し、ろ過効果が低減する可能性がある。そこで、平成14年度より、海水系地下水条件下における圧縮ベントナイトの有機物に対するろ過効果の評価試験を実施している。

対象有機物には、腐植物質の模擬物質として、既知の分子量と均一な官能基を持つポリアクリル酸を用いた。圧縮ベントナイト(クニゲル V1)を乾燥密度 1.2 Mg m^{-3} でステンレスカラムに充填し、ここに分子量15,000あるいは300,000のポリアクリル酸を含む蒸留水あるいは人工海水を、膨潤圧と同等の圧力で送液した。一定期間毎にベントナイトを透過した溶液を採取し、ゲル浸透クロマトグラフィーで溶液中のポリアクリル酸の分子量及び濃度を測定した。人工海水系の透過液量は、蒸留水のその約2倍であった。透過液中の分子量15,000のポリアクリル酸濃度変化を図5.2.4-6に示す。人工海水の場合、50日頃からポリアクリル酸の破過が認められ、濃度は急激に増加した。蒸留水の場合100日過ぎからわずかに破過が認められた。このように破過挙動が大きく異なるのは、人工海水のような高イオン強度条件下では、ベントナイトの微細間隙構造が変化し、ろ過効果が低減したためと推測される。一方、分子量300,000のポリアクリル酸については、蒸留水及び人工海水とも130日まで破過が認められず、 1.2 Mg m^{-3} の圧縮ベントナイトのろ過限界が、分子量15,000から300,000辺りに存在する可能性が高いことがわかった。

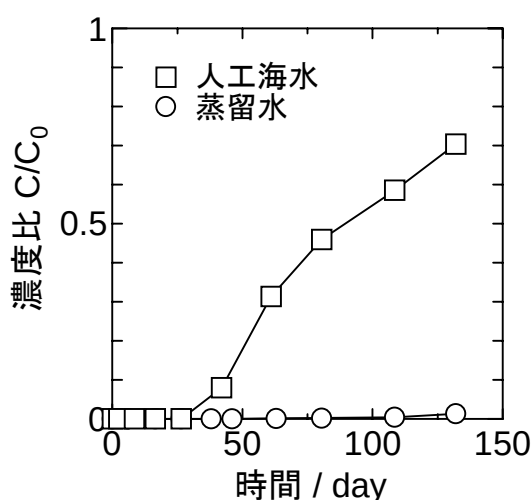


図 5.2.4-6 圧縮ベントナイトからのポリアクリル酸(分子量10,000)の破過曲線

今後は、フミン酸の透過性や、有機物透過性に及ぼす圧縮ベントナイトの乾燥密度の影響等について検討していく予定である。

③ まとめ

天然有機物と核種の相互作用に関するデータの取得及び核種移行挙動への影響評価に関する基本モデルの提示を目的として、平成15年度に実施した主な成果をまとめる。

- ・フミン酸と Np(IV)の錯生成試験及びフミン酸の特性評価試験を実施し、フミン酸と Np(IV)の錯生成の強さに関する知見及び安定度定数を取得した。
- ・圧縮ベントナイト中のポリアクリル酸の透過試験を実施し、蒸留水と人工海水中での圧縮ベントナイトのろ過効果の違いに関する知見を得るとともに、ろ過効果の限界分子量に関する情報を得ることができた。

今後は、フミン酸と核種の錯生成の可逆性に関するデータを取得するとともに、天然有機物の特性評価手法を検討し、錯生成の基本モデル選定を進める。また、圧縮ベントナイトのろ過効果に及ぼす乾燥密度の影響に関するデータを取得していく。

参考文献

飯島和毅, 飛塚早智子, 小原幸利(2004): Np(IV)とフミン酸の錯生成挙動, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2004-005.

2-2) 核種移行評価モデルにおける微生物の取扱いに関する検討

① 課題と計画の概要

放射性廃棄物の地層処分システムの核種移行評価においては、地下深部にも微生物が存在することが示されていることから、処分環境中に存在する微生物が影響を与える可能性が指摘されている（吉川ほか，1999）。しかしながら、微生物の影響に関しては、環境中での存在量などの測定や核種との相互作用に関する研究は行われているものの、核種移行評価の観点からモデルにどのように組み込むかについての検討は行われていない。

そこで、本研究では、処分環境中で予想される微生物の挙動に関する情報を整理するとともに、微生物をコロイドとして見なすことにより核種移行評価が行い得るかを検討した。

② これまでの成果

平成 14 年度までに、性能評価の観点から微生物影響をモデル化する考え方を検討し、コロイド影響評価モデルを応用することによる微生物影響評価の可能性を整理した。

平成 15 年度は、平成 14 年度に実施した影響評価モデルの適用可能性を再整理し、微生物の挙動をコロイド相当として扱うことが可能なケースを示した。その結果、表 5.2.4-1 に示すように、地下環境中での微生物の存在量、核種－微生物間の収着性に関して適切なデータを設定することにより、核種移行に及ぼす微生物の影響の程度を評価し得るものと考えた。

図 5.2.4-7 には、文献調査の結果に基づき核種－微生物の分配係数 $10 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ を設定して、Np-237 の岩盤中の核種移行率を予察的に計算した結果を示す。計算には、コロイドの影響評価に用いる既存の核種移行計算コード COLFRAC（Ibaraki and Sudicky, 1995）を用いた。その結果、早い時期（約 100 年程度）に微生物の濃度が増加すると仮定すると、核種移行率に大きな影響を及ぼす可能性が示された。このように、核種が微生物に収着して、かつ微生物が岩盤中を遅延されることなく移行する場合には、微生物存在量やその移行挙動などを考慮しつつ、処分場からの核種移行率への影響を検討する必要があると考えられる。

③ まとめ

微生物の挙動をコロイド相当として扱うことを基調として COLFRAC 計算コードを利用し、微生物濃度、核種－微生物間の収着性に関して文献調査に基づきデータを設定することにより核種移行に及ぼす微生物の影響を予察的に評価した。その結果、早い時期（約 100 年程度）に微生物の濃度が増加すると仮定すると、核種移行率に大きな影響を及ぼす可能性が示された。今後は、核種移行を促進させる可能性として、微生物が核種を不可逆的に取り込む事象、核種移行を遅延させる可能性としてバイオフィームが核種移行に及ぼす影響などの詳細な現象をパラメータとして設定する手法を検討し、核種移行計算を実施する必要があると考えられる。

表 5.2.4-1 微生物影響評価モデルの考え方

微生物の挙動	性能評価への影響	モデル化の考え方	コロイド影響評価モデルの適用可能性
核種の取込み	生息している微生物や有機コロイド（微生物死滅後に形成）により核種を運搬する。	核種－コロイド（微生物）－岩盤間の核種の分配係数を設定する。	○
	核種を収着しかつ移動できない場合、沈殿形成等により、地下水中の核種濃度は低減する。	核種を収着する非移動性のコロイド（微生物）として評価する。	○
バイオフィームの形成	岩表面に微生物が収着することにより、核種－岩盤間の分配係数が低下する。	核種－岩盤間の核種の分配係数を低く設定する。	○
	核種を収着し地下水中の核種濃度は低減する。	核種－岩盤（バイオフィーム）間の核種の分配係数を高く設定する。	○
酸化還元作用	核種化学形態が変化することにより、溶解度や分配係数が変化する。	微生物作用を地下水化学（化学形態の計算）に組み込む。	×
その他の生物学的作用	ガスの発生により緩衝材のバリア機能が変化する。	バリア機能として主に透水性の変化を組み込む。	×
	代謝作用により酸が放出し、人工バリアの機能が低下する。	バリア機能として主に透水性の変化を組み込む。	×
	代謝作用により有機分解生成物が生成し、溶解度や分配係数が変化する。	分解生成物の存在を地下水化学（化学形態の計算）に組み込む。	×

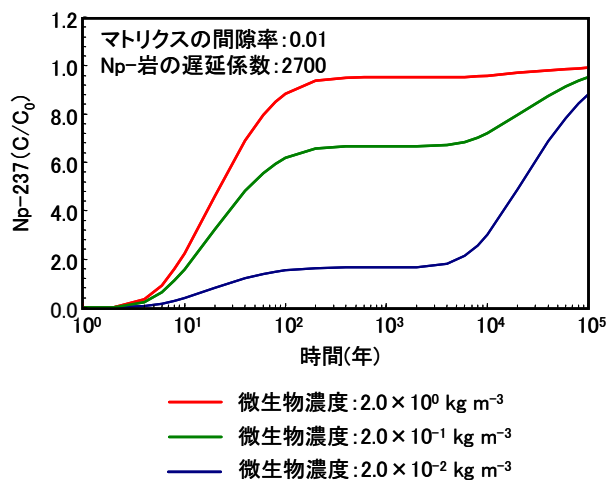


図 5.2.4-7 微生物への収着を考慮した岩盤中の
Np-237 の移行率

参考文献

- Ibaraki, M. and Sudicky, E. A. (1995): Colloid-facilitated contaminant transport in discretely fractured porous media – 1. Numerical formulation and sensitivity analysis, Water Resources Research, 31, pp. 2945-2960.
- 吉川英樹, 嶺達也, 三原守弘 (1999): 地層処分システムにおける微生物の影響について, 月刊海洋, No. 19, pp. 116-123.

5.2.5 生物圏評価モデル

① 課題と計画の概要

地層処分安全評価における生物圏の評価は、地層処分による影響を放射線量などの指標を用いて定量的に評価することを目的とする。このための手法として、国際共同研究プロジェクト（BIOMOVs II および BIOMASS）においてレファレンスバイオスフィアの考え方（地層処分に起因する放射線影響を算出するための場として生物圏を捉えるという考え方）（BIOMOVs II, 1996; IAEA, 2003）が提唱されている。

「第2次取りまとめ」においては、この考え方に基づき、わが国における幅広い地質環境を対象とした地表環境および人間の生活環境や様式のモデル化と評価を行ってきた。一方、今後は、わが国での処分事業の進捗に応じて、具体的な地表環境に関する情報の種類、量および質が高まっていくことが予想される。また、安全規制に関する検討も進むことになると考えられる。そのため、「第2次取りまとめ」以降は、具体的な地表環境が与えられた場合に、その特徴を生物圏モデルおよびデータ設定に反映していくための技術開発に重点的に取り組んできている。

平成14年度までに、多様な地表環境に対応するためのモデルの改良、地下環境と生物圏とのインターフェイス（Geosphere-Biosphere Interface；以下「GBI」という）のより具体的な設定に向けた検討の着手、多数の生物圏評価パラメータから重要度の高いパラメータを抽出するための感度解析の着手、を行った。また、放射線量を補完する安全指標（天然放射性核種の濃度やフラックスなど）について、IAEAの国際共同研究プロジェクトに参画し情報提供を行った。

平成15年度は、重要度の高いパラメータを抽出するための感度解析の継続と重要度の高いパラメータの設定状況の整理を行った。また、GBIのより具体的な設定に向けた検討を継続した。

② これまでの成果

i) 重要なパラメータの抽出と設定状況の整理

生物圏評価で取り扱うパラメータの数は非常に多く（各核種で100種類以上）、それら全てについて信頼性の高い設定を行うことは困難である。そこで、評価結果に対して重要度の高いパラメータを把握すること、およびそのパラメータの現在の

設定状況を把握することは、たとえば、今後具体的な地表環境を対象としたパラメータの設定のためのデータの取得・整備を行おうとするときに、評価の信頼性に対して重要性が高くかつデータが十分に取得・整備されていない部分にハイライトできるようにするなど、研究開発の効率的な実施に資する基盤的な技術になると考える。

以上のことから、これまで構築してきた生物圏モデルに対するパラメータの感度解析と、その結果に対する重回帰分析を行うことにより、相対的重要度が高いパラメータを抽出し、さらにそれらパラメータの現在の設定状況の整理を試みた（加藤ほか, 2003; Kato et al., 2003）。

感度解析の内容は以下の通りである：

- ・モデル：河川水、河川堆積層、深井戸、沿岸海域水、沿岸海域堆積層、潮間帯、周辺海洋を GBI としたモデルを対象とした
- ・対象核種：安全評価上特に重要と考えられる Cs-135, Se-79, Np-237 を対象とした
- ・対象パラメータ：各パラメータの最大値・最小値を諸外国の文献や国内の統計資料などに基づいて設定した（馬場ほか, 1999; 加藤ほか, 2001）。パラメータの分布形については、最大値・最小値の幅が1桁以下のものについては一様分布、1桁を超えるものについては対数一様分布とした。
- ・モンテカルロシミュレーション：パラメータの最小値・最大値の範囲内（最大で5桁程度）でサンプリングした5000組のパラメータセットを入力として、モンテカルロシミュレーションにより「線量への換算係数（地層処分に起因する放射性核種の移行率を生物圏で人間が受ける放射線量に換算する係数）」を算出した。感度解析は、AMBER[®]（Enviros Consulting）を用いて行った。
- ・重回帰分析：モンテカルロシミュレーションの結果に対して、線量への換算係数に対する各パラメータの感度を重回帰分析により定量化し、得られた偏回帰係数の絶対値の上位10パラメータを相対的重要度の高いパラメータとして抽出した。重回帰分析は、統計解析ツール SAS（SAS Institute Inc.）を用いた。

感度解析の結果の例として、図5.2.5-1に河川水と沿岸海域水を GBI としたモデルにおける、Cs-135 についての上位5パラメータを示す。

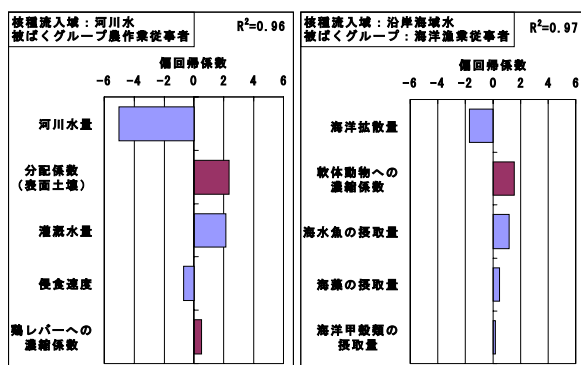


図 5.2.5-1 感度解析の結果例 (Cs-135)

全てのモデル・対象核種についての感度分析の結果を総括すると、以下ようになる：

- ・ 地表環境での核種移行パラメータ（河川水量、灌漑水量、侵食速度、地下水流、海洋拡散量など）、分配係数、農畜産物・海産物への濃縮係数、食物などの摂取量（農作物、海産物、土壌）が上位を占めた。
- ・ パラメータの最大値・最小値の幅での変化により線量への換算係数を1桁以上変動させる（偏回帰係数の絶対値が1以上）のは、上位3～4パラメータであった。

次に、感度解析の結果をもとに、それぞれのモデル・対象核種における相対的重要度の上位10パラメータの現在の設定状況を整理した。その手法としては、地層処分生物圏評価手法に関する国際共同研究 BIOMASS において検討されたデータ選定手法（IAEA, 2003）を参考に、表 5.2.5-1 に挙げるような観点からパラメータの設定状況を整理した。

表 5.2.5-1 パラメータ設定状況の整理の観点

		信頼性		
		確定的 (Prescribed)	理解の程度が高い (Well-characterised)	理解の程度が低い (Poorly-characterised)
パラメータのタイプ	一般	ICRP, IAEA	国内外の推奨データ (例：放射線防護基準)	国外の理解の程度が低いデータ
	わが国固有	国内の基準	国内統計資料	国内の理解の程度が低いデータ
	サイト固有	評価の前提条件に基づいて定められるデータ (例：インベントリ情報)	サイト調査データ	サイト固有の理解の程度が低いデータ

整理結果をパラメータのタイプと信頼性の2軸にプロットしてまとめたものを図5.2.5-2に示す。なお、ここで示したプロットの座標位置には厳密な意味はなく、おおよその領域にプロットされるかを示したものである。



図 5.2.5-2 パラメータ設定状況の整理結果

以上のような整理により、相対的重要度の高いパラメータの現在の設定状況を把握することができるようになり、これは今後のデータ取得・整備の優先度などを考えるうえでの基盤的な情報となる。例えば、今後具体的な地表環境を対象としたパラメータの設定を行うことを考えた場合、まず検討に着手する段階での各パラメータの設定状況をこの2次元空間の位置として把握したうえで、新たに目標とすべき位置を生物圏評価の目的や対象とする場で取得可能な情報の種類などを勘案して設定することにより、対処の方向性や優先度などを明らかにすることができると考える。

ii) GBI のより具体的な設定に向けた検討

GBI のより具体的な設定のためには、地下環境と生物圏とのインターフェイスをより詳しく理解する必要がある。深部を含む地下環境と地表環境との関係のみならず、その間に存在する比較的新しい第四紀の泥や砂質の未固結堆積物など（以下「表層環境」という）を考慮していくことが重要になると考えられる。近年諸外国でもこの部分に特に着目した検討が行われつつある（Wörman, 2003 ; Parkin, 1999）。

そこで、地下環境、表層環境および地表環境の特徴を考慮した GBI の検討を行うための準備として、わが国の地理条件、地形条件、地質条件、水文条件および人間活動の特徴について、国内の統計情報や環境関連文書などを利用した調査を開始した。あわせて、これら調査結果や諸外国での検討例を参考にしながら、地下環境、表層環境および地表環境を包含する仮想的な環境モデルを設定し、そこに地理条件、地形条件、地質条件、水文

条件および人間活動の特徴をあてはめてみることに
により, GBI 設定の検討を行うための具体的な例題
を設定することを試みている。さらに, それらの
特徴に応じた GBI をどのような手順と視点で考え
設定すべきかについての検討を開始している。具
体的には, 平成 14 年度までに検討した GBI 設定手
順のフローを参考として, 流出域をどのように考
えるか, それに基づき GBI の候補をどのように抽
出するか, その過程で表層環境がどのように係わ
るのか, および表層環境の特徴を適切に取り込む
ためにはどのような調査が必要か, などについて
の検討を進めている。本件については, 今後も継
続的な検討を行っていく必要があるが, 現在まで
の検討において, 表層環境での地下水流れや被
圧・不圧帯水層の存在などに関する情報が, 流出
域の把握と GBI 候補の設定において重要となる可
能性が見出されている(小山田・池田, 2004)。

③ まとめ

平成 15 年度は, 感度解析による相対的重要度の
高いパラメータの抽出を行うだけではなく, その
結果に基づきパラメータの現在の設定状況を整理
することを試みた。その結果, データ取得・整備
の優先度などを考えるための基盤となる情報を整
備できる見通しが得られた。さらに, 具体的な環
境を仮想的に設定し, それを例題として GBI をど
のように考え設定していくかについての具体的な
作業手順や作業内容を検討するという取り組みを
開始している。

今後は, 特に GBI の設定についての検討を重点
的に実施し, 具体的な環境が与えられた時に適用
可能な GBI 設定手法の構築を行う予定である。

参考文献

- BIOMOVs II (1996) : Development of a Reference
Biospheres Methodology for Radioactive Waste
Disposal, BIOMOVs II Technical Report No. 6,
Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm,
Sweden.
- IAEA(2003): "Reference Biospheres" for solid
radioactive waste disposal, Report of BIOMASS
Theme 1 of the BIOsphere Modelling and ASSEssment
(BIOMASS) Programme, Part of the IAEA Co-ordinated
Research Project on Biosphere Modelling and
Assessment (BIOMASS), IAEA-BIOMASS-6.
- 加藤智子, 鈴木祐二, 牧野仁史, 内田雅大 (2003) : 地
層処分生物圏評価パラメータの設定に関わる検討ー
感度解析による重要パラメータの抽出と設定状況の

整理ー, 日本原子力学会 2003 年秋の大会予稿集,
p. 609.

- Kato, T., Suzuki, Y., Makino, H. and Uchida, M.
(2003): Biosphere Assessment for High-level
Radioactive Waste Disposal: Modelling Experiences
and Discussion on Key Parameters by Sensitivity
Analysis in JNC, International Symposium on
Radioecology and Environmental Dosimetry,
Abstracts.
- Wörman, A. (2003) : Exchange processes at
geosphere-biosphere interface - Current SKB
approach and example of coupled
hydrological-ecological approach, SSI rapport
2003:14.
- Parkin, G. et al., (1999): A physically based approach
to modeling radionuclide transport in the
biosphere, J. Radiol. Prot., Vol. 19, No. 4,
pp. 319-331.
- 小山田潔, 池田孝夫 (2004) : 地層処分安全評価におけ
る生物圏評価手法の高度化に関する検討(IV), サイク
ル機構技術資料 (研究委託報告書; 日揮株式会社),
JNC TJ8400 2004-006.

5.2.6 天然現象影響評価モデル

① 課題と計画の概要

天然現象によって地層処分システムに重大な影響が及ぶ可能性については、適切なサイト選定と工学的対策により十分に低くできると考えられる。しかしながら、超長期においては天然現象発生の不確実性は増していくものと考えられ、天然現象の影響を評価する技術を整備し総合的な安全性の議論に供することが必要である。

「第2次取りまとめ」においては、隆起・侵食、気候・海水準変動、火山・火成活動、地震・断層活動などの天然現象を対象に、簡便で保守的なシナリオの検討および影響評価を例示的に行った。

「第2次取りまとめ」における天然現象影響評価は、what-if シナリオとして天然現象の発生をあえて想定し、それにより地層処分システムが被る特徴的な影響に焦点をあて、その影響を簡略的かつ保守的なシナリオやモデルとして表現し、評価するという手法が用いられた。

今後は、サイト選定のプロセスに応じた、より現実に即した検討・評価を行うことが求められるものと考えられる。そのために、過度に保守的な評価にならないように、現実的な範囲内で適切とみなせる程度に保守的な想定に基づいて天然現象の影響評価を行うための手法が必要とされる。

まずサイト選定がなされていない現段階では、ジェネリックな評価ではあるが現実的な現象に関する知見を可能な限り取り入れた、適用性の高い評価技術を整備することとした。また、このような評価により得られる知見は、サイト選定や工学的対策の検討にも活すことができると考えられる。

そのために、平成14年度では、「全体的な整合性の向上」と「包含性と合理性」を取り組みの方針として設定し、天然現象影響評価の作業手順を検討した。

平成15年度においては、平成14年度の検討を踏まえ、特に、天然現象の発生から処分場近傍の地質環境や天然バリアおよび人工バリアの環境とそれらによるシステム性能（以下、「処分環境・システム性能」とする）への影響の抽出・整理について、実作業を通した作業手順と作業内容の具体化を行った。

② これまでの成果

i) 作業手順の検討

まず天然現象の発生から処分環境・システム性能への影響を抽出する作業手順について検討する。

おおよその作業の流れとしては、

- ・どのような様式（事象、規模など）の天然現象が発生するか（以下「天然現象の発生様式」とする）を検討する、
- ・それに伴いどのような様式（温度、岩盤物性、地下水質、地下水流動の変化など）の地質環境への影響が想定されるか（以下「地質環境への影響様式」とする）を検討する、
- ・それら発生様式と影響様式の組合せに対して、処分環境・システム性能への影響を想定し、モデル化・影響評価を実施する

という流れが考えられ、これを作業手順として整理すると、以下のような5つのレベルを考えることができる（図5.2.6-1参照）。

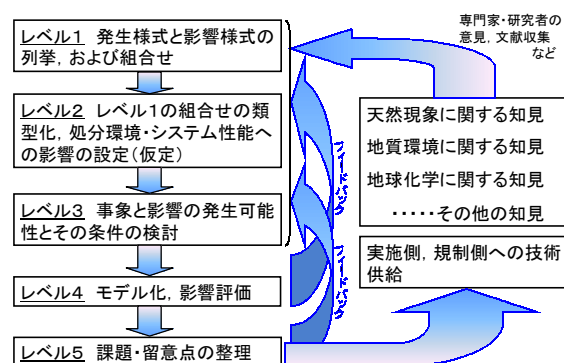


図 5.2.6-1 天然現象影響評価の作業手順

ここで、上記の作業を行う際に、(a)最初に処分場を想定し、それに対して天然現象の発生を想定し処分場に影響が及ぶことを考える、(b)天然現象による地質環境への影響領域をまず考えた上で影響領域内の任意の位置に処分場を配置してみることで処分場への影響を考える（天然現象の発生位置に対して処分場の配置を変数的に扱う）、という二つのアプローチがあり得る。

従来は、(a)の処分場を中心に天然現象を相対的に配置する前者の手順をとっている。これは、「第2次取りまとめ」のように処分場の存在を仮定し、それに対してどのような影響が及ぶのかをwhat-if シナリオとして例示する場合には有効なものであった。

しかしながら、サイトが特定されていないジェネリックな段階ではありつつも、サイトへの適用可能性にも配慮しながら評価手法を検討していくためには、以下のような問題点があるものと考えられる。

- ・処分場にある程度以上の影響を与える天然現象の発生を前提としているため、天然現象による影響を過度に保守的に想定しがちになる。
- ・発生する天然現象の規模と処分場からの距離の組合せのバリエーションを検討しにくい。

以上の問題点に対応するため、本検討では(b)の処分場の位置を変数的に配置するアプローチを採用した。これにより、以下のような効果が期待できる。

- ・天然現象の発生と地質環境への影響を想定する際に、客観的な事実として既存の研究事例などの成果を利用しやすくなる。
- ・処分場領域よりも大きいと考えられる天然現象による地質環境への影響領域に対して、処分場を変数的に配置することにより、天然現象による地質環境への影響のバリエーションが処分環境・システム性能に及ぼす影響を過度な保守性に偏らずに合理的に想定することが可能となる。

以下では、上記のアプローチを基にした各レベルにおける作業内容について紹介する。特に、レベル1～3については、「火山・火成活動」への適用を先行的に試行しながら作業内容の具体化を進めていることから、より詳しく述べることとする。

ii) 各レベルの具体的な作業内容

a) レベル1

レベル1では、天然現象の発生様式とそれに伴う地質環境への影響様式（以下「発生－影響様式」とする）を可能な限り列举・整理することを目的とし、2段階ステップの作業を実施する。

STEP 1 : 「天然現象の発生様式の列举」

天然現象、地質環境、地球化学およびその他の知見を文献収集や専門家・研究者との意見交換を通して収集し、考えうる天然現象の発生様式を可能な限り網羅的に且つ抜けがないように列記する。この時点では、個々の天然現象の発生確率については考慮しない。

具体的な作業方法としては、「¹⁾マグマが、²⁾地下に貫入・定置し、³⁾熱エネルギーを発生する」

のような定型化した記入形式により列举する。この場合、単純には「[1]の個数」×「[2]の個数」×「[3]の個数」ケースの組合せの天然現象の発生様式が列举される。なお、この段階で明らかに不合理な組合せは排除する。

STEP 2 : 「地質環境への影響様式の列举」

STEP 1 で列举した天然現象の発生様式に対応する地質環境への影響について既往の文献や研究者・専門家による研究成果などに基づいて記述する。天然現象はその発生様式によって、地質環境に対する影響が異なり、例えば同一の発生様式であっても距離によって影響の程度が異なる。従って、天然現象が地表下約1,000m程度までの地質環境に、どのような種類の影響を、どれくらいの範囲に、どの程度与え得るのかを列举する（図5.2.6-2(a)参照）。

具体的な記述内容は、以下のとおりである。

- ・周辺温度（温度勾配、温度の変化など）
- ・地下水水質（pH、酸化・還元状態の変化など）
- ・地下水流動（透水係数、流動方向、流速の変化など）
- ・水－岩石反応（反応速度の変化など）
- ・岩盤物性（岩盤物性値の変化など）
- ・岩盤化学組成（鉱物組成の変化など）
- ・その他考えられる変化

レベル1では「発生－影響様式」を列举することを目的としている。しかしながら、天然現象の発生や地質環境への影響に関する現象論的な研究は、事例的研究も含め現在進行中であり、現段階で全ての発生様式や影響様式について網羅できるわけではない。また今後、現象に対する新しい発見や新しい解釈などが提示される可能性もある。従って、まずは、現在の研究において得られている範囲の知見に基づき「発生－影響様式」を列举することとする。

b) レベル2

レベル2では、レベル1において列举・整理した多数の発生－影響様式の類型化などを行い、処分環境・システム性能への影響を設定することを目的とする。レベル2においては、以下に示す2段階ステップの作業を実施する。

STEP 3 : 「類型化」および「影響が及ぶ範囲の設定」

レベル 1 において抽出・整理した発生－影響様式の組合せを、例えば「地質環境に対して類似した影響」が想定されるものを統合するなどの視点で「類型化」する。これは、発生－影響様式の組合せについて、影響の現れ方の観点で同様のものをまとめるなど整理し、処分環境・システム性能への影響を考えるべき組合せの数を効果的に減らすことを目的とする。

次に STEP 2 の地質環境への影響の程度などの情報を用いて、地質環境へ影響が及んでいる範囲内に、複数段階の「影響領域」を設定する。ジェネリックな検討段階においては定量的な表現が困難であることが考えられるため、「影響領域」については「数 km～十数 km」、あるいは、例えば現象のサイズなどを基準とした場合の「数倍、十数倍」などの定性的ないし半定量的表現で区分する。その「影響領域」での影響の程度を「very high」, 「high」, 「low」, 「very low」など、として設定する。

STEP 4 : 「処分環境・システム性能への影響の設定」

STEP 3 で設定した複数の「影響領域」に処分場を変数的に配置することを想定することにより（図 5.2.6-2(b) 参照）、それぞれの配置に対応する処分環境・システム性能への影響を STEP 3 までの情報も活用しながら設定する。

具体的な記述内容は、以下のとおりである。

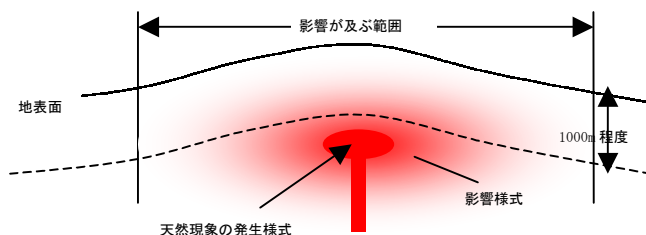
- ・ 処分場温度（上昇／低下など）
- ・ バリア機能（劣化／喪失など）
- ・ 移行特性（溶解度、吸着・収着、分配係数の増加／減少など）
- ・ 移行経路（新規経路の発生／経路短縮など）
- ・ 地下水流動（増加／減少など）
- ・ その他考えられる変化

c) レベル 3

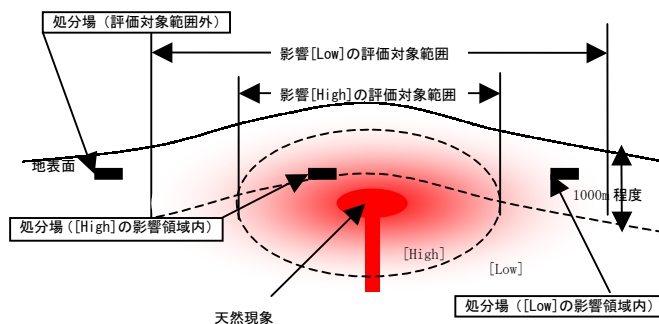
レベル 3 では、レベル 1 および 2 で検討してきた天然現象発生から処分環境・システム性能への影響について、発生時刻の想定、および発生条件・可能性の条件付けを行う。レベル 3 においても以下に示す 2 段階ステップの作業を実施する。

STEP 5 : 「発生時刻の想定」

天然現象の発生による影響についての評価結果は、



(a) レベル 1 : STEP 1～2 の作業イメージ



(b) レベル 2 : STEP 3～4 の作業イメージ

図 5.2.6-2 レベル 1～2 の作業イメージ

発生時刻の想定によって大きく異なるものと考えられる。

例えば、工学的に特徴的な時期としては、オーバーパック破損を仮定する時期（処分後 1,000 年後）などが考えられる。また、テクニクな見地からは、現在の応力場の状況が持続すると考えられる期間（例えば、処分後 10 万年程度）などが検討の目安になるものと考えられる。一方、隆起・侵食のような緩慢な変動については、1,000 年後のような近未来の想定は無意味な場合もある。そのため、各事象毎に、その影響の特徴を合理的に取り込んだ評価となるような発生時刻を想定することが必要となる。

STEP 6 : 「発生条件と発生可能性の検討」

次のレベル 4 では天然現象が発生し、それが処分場に影響することを想定したモデルを作成し、影響評価を行う。そのため、このステップで、STEP 5 までで整理してきたことについて、それらの発生条件（必要な条件や制約条件など）と発生可能性を検討し、どのような場合にどのような現象と影響について具体的な評価のための検討をするべきかを判断するための材料を整理する。

まず、主に天然現象が発生し地質環境へ影響が生ずるために必要な条件について考察する。例え

ば、火成活動については、地下深部においてマグマを生成させる温度・圧力条件が必要である。更にそのマグマが蓄積するための空間（マグマ溜まり）、マグマ溜まりから地表付近まで上昇するための圧力と岩盤内の弱線部が必要な条件になる。また、地質環境への影響に関しては、その影響を受ける岩盤の物性や鉱物組成・化学組成などの地質環境特性が制約条件となる。

以上のように、実際の天然現象がどのような条件の「場」で発生しているか、あるいは発生していたかを把握し、発生－影響様式と「場」を連結し、発生条件を検討する。具体的には、STEP 5までの事項のそれぞれに対し、既存の知見を最大限活かして発生条件を記述する。

上記を検討したのち発生可能性の検討を行う。天然現象の発生可能性は、日本全地域において同じではない。つまり上記で検討した発生条件が揃いやすい地域とそうではない地域では、発生可能性は異なる。従って、天然現象の発生条件まで考慮した上で、発生可能性を検討することに意味がある。

しかしながら、ジェネリックな検討を実施している現段階では特定の地域を想定した発生可能性の検討は不可能である。現状では先の発生条件と組合わせて新規現象の発生可能性、既存の現象の継続・再活動の可能性などのケースを想定して検討し、「highly likely」「likely」「unlikely」「highly unlikely」などの定性的な表現で整理する。

レベル1～3までの段階で、類型化され発生条件と可能性について検討された「発生－影響様式」と「処分環境・システム性能への影響」の記述が得られる。また、このような進め方により、それぞれの専門毎に役割分担しながらの共同作業が容易となる。実際、本検討は東濃地科学センターと東海事業所が、各々の専門に応じた役割分担のもとに作業を進めている。また、これらの検討を作業手順に沿って体系的に進めることにより、検討内容の整合性を取りやすく、追跡性が確保できるようになるものと考えられる。更に、「発生－影響様式」の列挙について、過度に保守的な想定に偏らず、比較的客観的な作業が可能になるものと考えられる。

現段階の検討で対象外としているものとしては、

例えば火道の処分場直撃などの接近シナリオがある。これについては、他の研究事例などを調査し、考え方などを整理した上で具体的な取り組みを検討していく。

また、火成活動によるマグマ貫入により隆起が発生したり、マグマ貫入域近傍に亀裂（断層）が発生するなどの「複合した現象」も考えられるが、その取り組みについては、個別の現象についての検討結果や他の研究事例などを踏まえて検討していく。

d) レベル4

レベル4では、レベル1～3での天然現象の発生から処分システムへの影響までの整理結果に基づき、影響評価のためのモデル化を行い、影響評価解析を実施する。もし情報の不備などがあれば、レベル1～3の段階へフィードバックする。

e) レベル5

レベル5では、レベル1～4までの作業手順と作業内容の適用性を評価し、課題・留意点を抽出する。もし、全体を通しての見直すべき点などがあれば、レベル1～4の段階へフィードバックする。

最後に、レベル1～4までの作業手順と作業内容を体系化し、天然現象影響評価手法として整理する。

③ まとめ

平成15年度では、天然現象の影響評価についての検討を進めるにあたって必要となる作業手順および作業内容を実作業を通して具体化した。

作業手順としては、天然現象の発生様式と地質環境への影響様式を学術的な知見に基づき記述し、その上で処分環境・システム性能への影響を検討する際に処分場の位置を変数的に配置し、合理的な影響評価につなげていくという作業手順を5つのレベルに整理した。特に、「発生－影響様式の設定」、「処分環境・システム性能への影響の設定」、「発生時刻、発生条件・可能性の検討」（レベル1～3）までの作業内容を、「火山・火成活動」について先行的に試行しながら具体化した。

今後は、先行している「火山・火成活動」について、レベル1～3の充実と、次のレベルであるモデル化・影響評価まで実施し、技術的な問題点の抽出と総合的な適用性の確認を行うとともに、適宜他の事象への拡張を図る予定である。

5.3 安全評価手法の整備・高度化

5.3.1 シナリオ等の安全評価基盤

1) 安全評価の基本事項の検討

① 課題と計画の概要

本課題については、地層処分安全規制指針や基準の策定に資するため、国際的な動向にも配慮しつつ安全評価の進め方に関する検討を進めている。平成13年度までに、「第2次取りまとめ」に基づき評価の時間枠に関する論点を整理し、天然の安全指標を用いた補完的な安全評価技術に関する方法論やデータベースの整備を実施した。平成14年度には、安全評価の基本となる段階的意思決定の進め方及びセーフティケースの役割について国際的な検討状況を整理した。平成15年度はより高い信頼性をもって地層処分の安全性を示すための手法について国際的な事例を参考に整理した。

② これまでの成果

i) 複数のアプローチによる論証の必要性

地層処分による安全の確保については、廃棄物が埋設され、制度的な管理の下で一定期間について環境の安全確認が終了するまでの段階（事業段階）と、それ以降制度的な管理によらず多重バリアシステムにより安全が保証される段階（処分段階）とに区分して考えるのが一般的である。地層処分を実施するためには、事業段階において処分段階における安全が実施側・規制側の独立した保証によって予測的に示され、社会的な受容が得られる必要がある。

地層処分においては、地層という不均質な場と極めて長い時間を考慮することから、地層処分システムの性能を予測的に評価する際、取り除けない不確実性が残る。これに関し上記の二つの段階を比較すると、前者に対し後者の時間枠は指数級数的に長いこと必然的に多くの不確実性が含まれる。このため性能の予測（安全評価）結果について幅広い関係者や公衆の信頼を得るための努力が求められる。

すなわち、安全評価の結果が環境安全の観点から所定の線量やリスクの値（拘束値）を超えないこと、あるいは、超えるような事象の発生可能性が事前の対策により合理的に達成可能な範囲で十分に低減できることを明示するだけでなく、サイ

ト選定、処分場設計などの対策そのものの信頼性についても明らかにすることが求められる（ICRP, 2000；IAEA, 2003）。

このためには目的や対象に応じて様々な手法を組み合わせ用い、地層処分の安全性が極めて長期にわたり信頼性をもって示すことができるよう、段階的に判断材料となる論拠を積み上げていくことが重要となる。

以下では、複数のアプローチによる論証として、次の観点から事例をまとめるとともに、これらを検討する上で時間スケールがどのように関わるかについて整理する。

- 頑健な性能を有する処分システムの構築
- 性能評価による処分システムの信頼性の提示

ii) 頑健な性能を有する処分システムの構築

地層処分システムは、複数のバリアを組み合わせ、十分に余裕のある核種の保持・閉じ込め機能が期待できる多重バリアシステムを構築することにより、システム全体の性能として、様々な不確実性の影響を被りにくい頑健なものとする 것을基本とする。

このような処分システムが有するべき頑健性は、個々のシステムの性能に十分余裕を付与したり（例えば、オーバーパックの厚さを設計で求められるものよりも十分厚くするなど）、安全機能の重複性を与えることによって得られる。また、将来予測が比較的容易な地質環境や設計オプションを選択することにより、処分システムに関する信頼性の向上に寄与すると考えられる。

対策の信頼性確認については、対策により鍵となる安全機能（例えば、オーバーパックによる閉じ込めや緩衝材による核種保持・移行遅延など）が発揮し得るシステム性能を確保できることや、システム性能の評価に関し、不確実性を低減できること、あるいは不確実性の影響を被りにくくすることができることを示すことが考えられる（OECD/NEA, 1999a）。また、実績があり信頼性が評価されている工学的、技術的手立てがとられていることや、それぞれの対策の品質について保証するとともに、処分事業に関わる管理上の原則が守られていることを確認することも、対策の信頼性確認にとって重要となる（ICRP, 2000；IAEA, 2003；OECD/NEA, 1999a）。

品質保証のための計画は、段階を踏んだ処分事

業に柔軟に対応できるよう繰り返しレビューを受け、適宜見直しを行うことが重要である(IAEA, 1997)。

iii) 性能評価による処分システムの信頼性の提示 不確実性の取扱い

地層処分システムの長期挙動を理解し、その性能を評価する上で、不確実性をどのように取り扱うかが重要となる。不確実性としては、処分システム、シナリオ、モデル、データに関わるものに分類されている(IAEA, 2003)。

処分システムに関わる不確実性の取扱いについては、上述の「頑健な性能を有する処分システムの構築」で述べたように、対策の信頼性を事前に確認することが重要となる。また、シナリオの不確実性については、システム性能に影響を及ぼすと考えられる主要なものに抜け落ちのないことを示すことが重要であり、そのためのアプローチの例を 5.3.1 2) に示す。また、データの不確実性の取扱いについての検討例を 5.3.2 に示す。

性能評価において不確実性に適切に対処し、処分システムの安全性に関する議論を裏づけるため、以下に示す項目を組み合わせで論証することが考えられる(IAEA, 1997)。

- ・複数の解析手法の活用(決定論的評価、確率論的評価など)
- ・自然のシステムの観察結果(古水理地質学的な痕跡など)やナチュラルアナログの活用
- ・複数の概念モデルの選択
- ・保守的で簡略な評価と現象をより精緻にとらえる評価の組合せ
- ・線量やリスク以外の指標の適用など

信頼をもって利用できる情報や根拠を十分に活用し、普遍的な科学的・技術的知見と整合がとられるべきであることは言うまでもない。

ここでは、上記の不確実性の取扱いに関するアプローチについて個々に述べるのではなく、処分システムの信頼性の提示において、鍵となる論点の例について整理する。

不確実性の影響を被りにくい評価

性能評価において取り扱う不確実性の幅は、システム性能の裕度を大きくする側と小さくする側が考えられるものの、とくに性能評価においては、後者の不確実性の影響を被りにくいものとするため、保守側の取扱いであることが明らかなことを示すことが考えられる。また、解析における境界

条件の設定のしかたや評価対象の次元やスケールに対し、評価結果が影響を受けにくいものであるべきである。そのためには、性能を評価するための適切な指標を選ぶことも重要となる。さらに、できるだけ簡略で理解しやすく、評価の目的にかかっており、十分に確立された理論に基づいて進めるべきであると考えられる。

このような評価は、すべてのシステム要素に対してというよりも、不確実性を被りにくい評価であることを示すのに有効なシステム要素(例えば、性能に余裕を持たせた人工バリア)に対し、適用することが重要である。

モデルの信頼性とレビュー

また、性能評価に用いるモデルについては、評価の目的に沿ったものであるとともに、信頼性を高めておくことが重要である。モデルによる解析結果が地層処分システムの長期挙動を詳細に予測することはできないものの、特定のシステム構成要素の挙動について、実測データ(原位置試験、ナチュラルアナログ研究、サイト特性調査や処分場操業期間中での測定など)との比較によりモデルの信頼性を論ずることは可能である。

さらに実測データとの比較以外にも、客観的なレビュー、解析解、並びに他のコードや性能評価報告書との比較などにより、モデルの信頼性を示すことも可能である。不確実性の影響が重要となる現象に対して、系統的なデータ整備を行い、レビューによりモデルを見直すことが考えられる。なお、客観的なレビューは、独立の専門家がレビューの目的をよく理解し、独立の技術的な寄与をするのであれば、科学的・技術的な信頼性を高め有効なものとなると考えられている(IAEA, 1997)。

簡略な取扱いと様式化アプローチ

専門家でないに人も理解できるような簡単な手法により処分システムの性能を例示することは、より精緻な解析結果を理解する助けとなり、信頼を高めるのに役立つ。このような簡略な取扱いとしては、簡略なモデルを用いた感度解析やシステム性能の理解のためのナチュラルアナログの適用(システム構成要素の長期健全性、プロセスの理解向上、プロセスを支配する要因の抽出、概念モデルの開発、好ましいケースの作成、モデルの検証)などが考えられる。

不確実性に起因する事象から考えて、そもそも定量化することや低減することが不可能な以下に

起因する事象が挙げられる（例えば、OECD/NEA, 1999b）。

- 意図しない人間の侵入
- 生物圏や地表環境の時間的推移 など

性能評価においては、これらの不確実性の要因を様式化した簡略なやり方で取り扱うことにより、無制限に様々な憶測をめぐらしてしまうことを避けることが考えられている。

事象に応じて理にかなった様式化を図ることが重要であり、その事象の取扱いに関わる様々な分野の専門家との意見交換や規制側との意見交換を踏まえて、様式化した取扱いとして適切なものが検討され、シナリオやアプローチなどが設定される。その際、対象とする事象の特徴やシステム性能への影響を適切にとらえ、その影響に対するシステム性能の頑健性を示すとの観点が重要と考えられる。

様式化を念頭においた天然現象の取扱いアプローチの検討例を 5.2.6 に示す。

リスク論的取扱い

事象の発生可能性が対策により合理的に低減されているかどうかを示すため、将来発生する可能性を否定できないシナリオに対して、確率を設定してリスクを評価するという考え方、すなわち「潜在被ばく」（例えば ICRP, 1991）には、以下の留意点がある。

- 取り扱うべきすべてのシナリオに生起確率を設定して（全シナリオの発生確率の総和は 1）包括的に評価を行うことが求められる。
- 取り扱うシナリオの追加や、不確実性を考慮してパラメータの幅を広くとることにより、個々のシナリオに対するリスクが小さくなる（リスク希釈）。

国際放射線防護委員会（ICRP）は報告書 ICRP81（ICRP, 2000）の中で、上記のような潜在被ばくのリスク評価を否定してはいないものの、併せてシナリオの半定量的な発生可能性と、影響の大きさを勘案して総合的に判断するという手法を示した。

この手法では、個々のシナリオの発生確率の設定を厳密に求めている。これは、全シナリオの発生確率の総和を 1 とすることを前提とせず、代表的と考えられるシナリオ各々に半定量的発生可能性を与えるものであり、安全性の判断に必要な

情報がより多く得られると考えられる。

半定量的な発生可能性を用いることを念頭においた天然現象の取扱いアプローチの検討例を 5.2.6 に示す。

iv) 時間スケールに応じた検討

以上のような頑健な処分システムの構築とそのシステムの有効性を性能評価により示すためには、時間スケールに応じて検討することが重要となる。

ICRP 81 では、評価の時間スケールについて以下の考え方を示している。

- 1000～10,000 年のオーダーでは、線量またはリスクの定量的評価結果に基づき、人間の健康への影響を直接判断する。
- より長期においては、様式化したアプローチを適宜用いることによる定量的評価結果や定性的な議論に基づき、評価期間に応じて結果を判断することが考えられる。

上記のような評価の時間スケールの考え方は、地層処分システムによる核種の閉じ込め・保持の性能が、以下のように段階的に変化することと関連づけて論ずることが必要である。

- 一定期間の完全な閉じ込め（例えば、1000 年間オーバーパックによって核種と地下水との接触を完全に阻止）
- 多重バリアシステムにより地下水による核種移行を抑制（例えば、10 万年を超える時間スケールまで）
- さらに長期において、処分場にあった放射性核種は減衰し、かつ地質環境中にゆっくりと分散することから、天然に存在するウラン鉱床などと同等の水準とみなせるようになる。

とくに長期における上記のような状況に鑑み、ICRP81 の勧告にみられるように線量やリスクを用いた定量的な評価の意味が短期のものに比べ厳密なものではなくなるため、長期においては、線量・リスク以外の指標（例えば、平成 14 年度報告の 5.2.5 参照）や様式化アプローチを用いた簡略化した評価あるいは定性的な議論により安全性の論拠を支えていくことが適切と考えることができる。

③ まとめ

様々な観点からの定性的・定量的な論拠を駆使することにより、地層処分システム性能の評価結

果や、処分システムがどのようにして、どのような理由で人間とその環境を防護しうるのかについて説明することが求められている。このことは、処分事業における段階的な意思決定において重要な役割を果たすため、意思決定の直接の参加者だけではなく幅広い聴衆が理解できるよう説明していくことが重要であるため、論拠の構成を十分に練るとともに信頼性については十分な検討が今後とも必要と考えられる。

参考文献

- IAEA (1997) : Regulatory Decision Making in the presence of uncertainty in the context of the disposal of long lived radioactive wastes, IAEA-TECDOC-975, International Atomic Energy Agency Vienna.
- IAEA (2003) : Geological Disposal of Radioactive Waste, Draft Safety Requirements, DS154, IAEA Safety Standards Series, International Atomic Energy Agency Vienna.
- ICRP (1991) : 1990 Recommendations of the ICRP, ICRP Publication 60, Pergamon Press, Oxford and New York.
- ICRP (2000) : Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of long lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publication 81, Pergamon Press, Oxford and New York.
- OECD/NEA (1999a) : Confidence in the Long-Term Safety of Deep Geological Repositories: Its Development and Communication, OECD/NEA, Paris.
- OECD/NEA (1999b) : Geological Disposal of Radioactive Waste Review of Developments in the Last Decade, OECD/NEA, Paris.

2) シナリオ開発技術の高度化

① 課題と計画の概要

シナリオ開発は、安全評価においてどのような FEP（特性：Features，事象：Events，現象：Processes）を考慮するか、それらの相互関係をどのように取り込むか、さらにそれらの将来の挙動をどのように考えるかを検討するものであり、安全評価の枠組みを設定するために重要な作業となる。一方、シナリオの開発は、百を超える FEP を基盤として、シナリオ、モデルおよび解析ケースの設定へとつなげていくものであり、煩雑で複雑な作業となる。そのため、シナリオ開発のプロセスと内容を適切かつわかりやすく提示できるような方法論を構築することが必要となる。

「第2次取りまとめ」におけるシナリオ開発では、サイトを特定せずに幅広い地質環境を対象として、国際的なコンセンサスの得られている体系的なアプローチ（OECD/NEA，1991）を踏襲しながらシナリオの作成を行った。これに対し、「第2次取りまとめ」のドラフトに対する国際レビュー（OECD/NEA，2000）において、シナリオから解析ケースを設定する流れについてよりわかりやすくすべきとの指摘を受けた。また、「安全規制の基本的考え方」においては、地下水シナリオを合理性のある範囲で設定する必要性や、安全評価で考慮すべき天然現象に起因する接近シナリオを適切に取捨選択することの重要性が指摘されている。

これらのことを踏まえ、「第2次取りまとめ」におけるシナリオ開発技術を出発点に、その高度化として、実際の地質環境への適用を念頭におきながら、十分性、透明性および追跡性などを確保しつつ、シナリオから解析ケースへの設定の流れも含めたシナリオ開発のプロセスおよび内容をよりわかりやすく提示できるような方法論の検討を行うこととした。

平成14年度までに、シナリオ開発に関する国際的な動向および「第2次取りまとめ」の特徴と課題を整理した上で、シナリオ開発プロセスの透明性と追跡性を確保するための手法について概念検討を行った。その結果、FEPの相関関係の表現を工夫することにより、シナリオ開発プロセスで行うべき複数の処理をスムーズにつなげることができる可能性を見出した。

平成15年度は、平成14年度までの概念検討の結果を踏まえたシナリオ開発の方法論の具体化の

一部として、FEPの相関関係の具体的な表現・整理方法について検討した。

② これまでの成果

シナリオ開発においては、まず FEP の相関関係を適切に表現・整理する必要があり、従来からプロセス・インフルエンス・ダイアグラムのようなフロー形式での整理が行われてきた。これに対し、平成14年度の検討において、マトリクス形式を基盤として、対角要素に特性や状態量を表す Features を、対角要素の Features を入出力とする Processes や Events を非対角要素に配置するという形で FEP の相関関係を整理することにより、FEP とシナリオあるいはモデルとが対応付けしやすくなる可能性を見出した。ただし、マトリクス形式での整理は、個々の相関関係が確認しやすいことや計算機上に展開しやすいことなどの利点がある反面、複数の FEP 間の相関関係を視覚的に把握しにくいという欠点もある。この欠点を補うための方策としては、FEP とその相関関係の意味的なまとまりを見出すことにより、FEP の相関関係を整理する層（従来のマトリクス形式での整理に相当）に加えて、意味的なまとまりを用いて FEP の相関関係を簡潔に写像するより高次のレベルの層を追加することにより、マトリクスに階層性を持たせることが考えられる。このとき、FEP とその相関関係の意味的なまとまりをどのように設定するかが重要となるが、その一つの方法として、システムの各要素に期待する機能を表す安全機能を導入することが考えられる。すなわち、安全機能が複数の FEP により表現されるものであることを利用し、安全機能を単位として FEP とその相関関係の意味的なまとまりを設定することを考える。ここで、安全機能間の相関関係を整理する第1層（安全機能マトリクス）、FEP 間の相関関係を整理する第2層（FEP マトリクス）を設定し、さらに安全機能と FEP との関係性を第1層と第2層の相関関係として整理することにより、3次元的な構造となる（図5.3.1-1）。このとき、システム性能を0次層として考えることが可能である。

このような整理により、先に述べた FEP などの相関関係をマトリクス形式で整理することの利点を活かしつつ、必要に応じて安全機能というより高次のレベルで全体像を鳥瞰する、あるいはある安全機能を入り口として下位の FEP のレベルまで詳しく見ていくなど、作業の目的に応じた柔軟な

利用が可能になる。また、階層的なマトリクスのある特定の部分を抜き出し、比較的単純なプロセス・インフルエンス・ダイアグラムとしてよりわかりやすく表現することも容易になる。さらに、引き続き行う必要のあるシナリオさらにはモデルの具体化に対しては、複雑な FEP の相関関係をいきなりシナリオやモデルと対応させるのではなく、一度安全機能というシナリオやモデルの要素と対応しやすい形でまとめることになり、適切な準備が行えることになる。

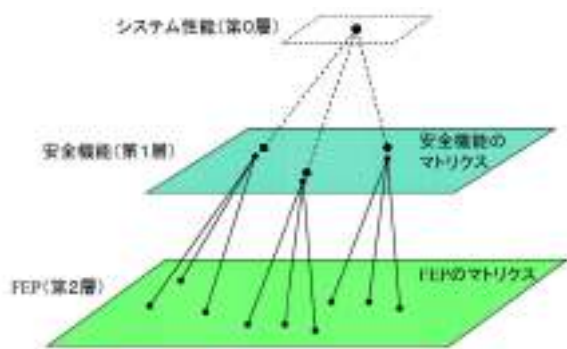


図 5.3.1-1 階層的なマトリクスのイメージ

以上のことから、意味がわかりやすく、かつ、FEP（原因側）と最終的な関心事であるシステム性能（結果側）の双方と対応がつきやすく、またシナリオやモデルとの対応もつきやすい安全機能を中間層として導入することにより、百を超える FEP からシステム性能に至る影響の経路が見えやすくなるなど、シナリオ開発プロセスの効率化への寄与が期待される。

一方、FEP を上記のように使いやすく整理できたとして、それをシナリオさらにはモデルの具体化へと展開していくためには、各階層での要素およびその相関関係の重要性に濃淡をつけ、多数の経路の中から重要な経路を効率的に抽出することが必要になる。従来は、この作業に専門家の判断を用いることが多い。しかしながら、その判断が個別に行われるなどして、判断の内容や根拠が十分に追跡できないなどの問題が生ずる可能性があり、何らかの対処を考えておくことが必要になる。このための対処の一つとしては、例えば、FEP 間の関係および FEP と安全機能との関係などについて影響度などの指標を設定し値を与える（大久保、2004）とともに、3 次元的なマトリクス構造に沿った適切な演算処理を行えるようにすることにより、FEP から安全機能を介してシステム性能に至る影

響の伝搬経路を抽出することが考えられる。このときの演算処理の手法としては、例えばミニマックス定理などを利用することが考えられる。ここで、先述したマトリクスによる整理が計算機上に展開しやすいことは、このような情報処理機能を加えること、さらには指標設定の根拠などを情報として付加・管理することにより追跡性を確保すること、などについて有利に働く。なお、指標の設定においては、安全機能を発揮させる上での重要さを表すためのものと、安全機能の変化に対する重要さを表すためのもの、など複数の視点があり得ることから、実用化にあたっては、それらを適切に区別し利用できるようにすることが必要である。

③ まとめ

シナリオ開発の方法論の具体化について検討し、FEP の相関関係をマトリクス形式で整理すること、および安全機能を介した階層的な整理の考え方を導入することにより、原因となる FEP から結果となるシステム性能に至る影響の経路をより効果的に表現できる可能性が見出された。さらに、重要な経路を効率的に抽出するための方法について検討した。

今後は、FEP の相関関係の表現・整理以外についても手法の具体化を進めるとともに、例題を対象とした試行なども行いながら、シナリオ開発プロセスでの具体的な作業手順や作業内容の詳細化と実用性の確認を行う。あわせて、具体化した作業手順や作業内容の一部を計算機を用いて効率的に実施するためのツールの開発・整備を順次進める予定である。

参考文献

- OECD/NEA (1991) : Review of Safety Assessment Methods, A Report of the Performance Assessment Advisory Group of the Radioactive Waste Management Committee, OECD Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2000) : OECD/NEA International Peer Review of the Main Report of JNC's H12 Project to Establish the Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Report of the OECD Nuclear Energy Agency International Review Group, NEA/WM/PEER(99)2.
- 大久保博生 (2004) : 地層処分の性能評価におけるシナリオ解析の高度化 (Ⅲ), サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 三菱総合研究所), JNC TJ8400 2004-008.

5.3.2 不確実性評価技術

① 課題と計画の概要

地層処分の安全評価では、時間の経過に伴う地質環境条件やシステムの変化、天然の地層が有する場の不均質性、理解や情報の不十分さ、などに起因した不確実性が内在し、それらを完全に排除することは困難である。このため、種々の不確実性(シナリオ、モデル、データについての不確実性)を適切に安全評価に取り込み、それら不確実性が安全評価結果に及ぼす影響を定量的に評価することが重要である(例えば、OECD/NEA, 1991)。

「第2次取りまとめ」における安全評価では、決定論的なアプローチを用いることにより、種々の不確実性の影響を個別に評価し、安全評価上重要な要因を整理した。また、「第2次取りまとめ」以降は、処分事業や安全規制で実施される安全評価での不確実性の取り扱いに関する技術基盤の構築を目指し、以下の項目について検討を進めている。

- (1) 不確実性の考え方や分類に関する検討
- (2) 不確実性の定量化技術に関する検討
- (3) 不確実性の影響評価に関する検討
- (4) 感度分析技術に関する検討

具体的には、平成14年度までに、データの不確実性の影響を網羅的に考慮することが可能な解析コードを構築するとともに、データの不確実性が安全評価結果に及ぼす影響を定量化するための手法の検討(例えば、若杉ほか, 2002)や、評価結果に対するパラメータの重要度を定量的に評価するための感度分析手法の検討を行った(例えば、牧野ほか, 2003)。また、モデル不確実性の影響評価に関する検討として、「第2次取りまとめ」の安全評価において、保守的な観点から考慮されなかったプロセスや簡略化されて取り扱われたプロセスを整理した上で、掘削影響領域中の核種移行遅延効果の影響について検討した(若杉ほか, 2003)。なお、シナリオの不確実性については、天然現象の影響を考慮した検討を継続している(5.2.5 参照)。

平成15年度は、データの不確実性を定量化するための技術の検討や、感度分析技術の拡充を中心に進めると共に、不確実性の考え方や分類に関する検討にも着手した。以下では、このうち、データの不確実性に関する定量化技術の検討、および感度分析技術の拡充に関する成果を報告する。

② これまでの成果

データの不確実性を考慮して、パラメータの幅や分布として定量化することは、影響評価のための入力を適切に設定する観点から、決定論的な手法においても、確率論的な手法においても、重要な課題である。特に、データが十分でない場合においては、定量化に用いることのできる情報が限られるため、専門家の知見などを適切かつ有効的に用いることが重要になると考えられる。このため、データの不確実性を定量化するための技術基盤の構築を目指し、文献調査を通して分布設定の一般的な方法論を整理するとともに、まずデータが十分でない場合についての分布設定手法について、より実務に即した形に具体化するための検討を行った。

また、感度分析技術に関する検討については、これまでの感度分析が主にパラメータの重要度の把握を目的としてきたことを考慮し、新たな分析の切り口として重要度の把握に加えてパラメータの定量的な条件を把握することを目的として、決定木分析(Decision Tree Analysis)という多変量解析手法の適用性確認を実施した。

以下に、これらの検討結果をまとめる。

i) データの不確実性の定量化技術の検討

a) 分布設定手法の整理

不確実性を考慮してパラメータの分布を設定する手法は、利用できるデータの量に応じて以下の3つに大別される(Mishra, 2002)。

- ・データが十分でない場合
- ・データが十分にある場合
- ・既存の分布に対してデータが追加された場合

ここでは、主に「データが十分でない場合」および「データが十分にある場合」の分布設定手法について説明する。

データが十分でない場合には、データが十分にある場合と比較して分布設定に利用できる客観的情報が少ないため、専門家の定量的・定性的な知見を適切かつ有効的に活用することが重要となる。このため、まず、専門家、解析者および管理者から構成されるチームを組織し、複数の専門家から情報を体系的に引き出す方法(以下、誘出法)を用いることが望まれる(図5.3.2-1 参照)。誘出法を利用しない場合には、最大エントロピー原理を用いて、情報からエントロピー(平均情報量)が最大になる分布を設定することとなる。さらに、

最大エントロピー原理も利用しない場合は、個々の専門家の主観に基づいて分布を設定することとなる。

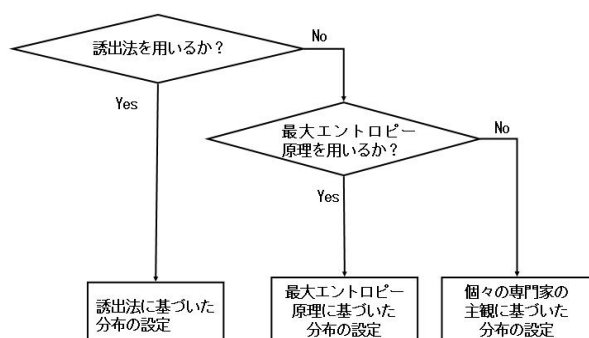


図 5.3.2-1 データが十分でない場合の分布設定手法

次に、データが十分にある場合には、データのばらつきを合理的に分布として表現していくことが重要となる（図 5.3.2-2 参照）。ここでは、収集したデータを品質保証などの観点からレビューした後、ヒストグラムなどでのデータ整理を介して、確率分布（正規分布、対数正規分布又はワイブル分布など）にフィッティングさせることが可能かどうかを判断する。もし、上記分布にフィッティングしない場合には、ヒストグラムなどをそのまま分布として設定することになる。

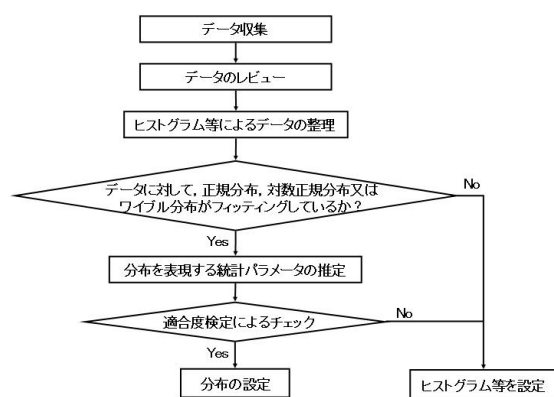


図 5.3.2-2 データが十分にある場合の分布設定手法

なお、既存の分布に対してデータの追加があった場合には、条件付き確率の計算方法であるベイズ統計学を用いて、追加されたデータが分布の形へ与える影響を考慮し、分布の更新を行う。

b) 「誘出法」の試行による手順の具体化

今後の処分事業や深地層の研究施設計画での研究においては、まずデータが十分でない段階から検討を始めることになると考えられるため、専門家の定量的・定性的な知見に基づいた分布の設定の重要性が高くなると考えられる。そこで本試行では、データが十分でない場合の手法のうち、誘出法に着目し、概念的に記述されている誘出法の各手順をより実務に即した形へ具体化することを目的とした試行を行った。なお、試行においては、今後のデータの拡充に伴う検討の発展性も勘案して、対象領域を幌延深地層研究計画の研究所設置地区、対象パラメータを母岩 Kd と設定した。分布設定においては、0, 50, 100 パーセンタイル（データを昇順に並び替えた時に、0%, 50%, 100%の位置にある値）に相当する Kd 値を設定することとした。Mishra (2002) に示された誘出法をベースに、本試行で具体化した手順を図 5.3.2-3 に示す。なお平成 15 年度は分布を仮設定する手順 6 までを実施した。

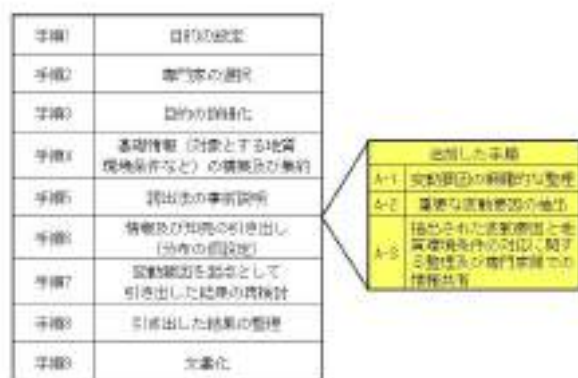


図 5.3.2-3 誘出法の手順

手順 1 から手順 3 までは、Mishra (2002) に示された誘出法に準拠し、分布設定の作業を進めることができたが、手順 4 から 6 を実施するにあたり、専門家間で、母岩 Kd の設定に影響を及ぼす要因（以下「変動要因」）のとりえ方や理解のレベルの相違が表面化し、分布設定において重要となる変動要因の情報に関する共有化を十分に行っておくことの必要性が認識された。この対策として、変動要因の情報の明確化、絞込みおよび共有化のための作業として、「変動要因の網羅的な整理」、「重要な変動要因の抽出」、および「抽出された変動要因と地質環境条件の対応に関する整理および専門家

間での情報共有」を手順 5 と 6 の間に追加して実施した（図 5.3.2-3 の A-1 から A-3 参照）。このような手順を追加することにより、分布の仮設定の実務において、専門家が必要とする個別具体的な基礎情報および変動要因の情報の円滑な準備と共有が可能になった。

手順 1～6 を試行することにより仮設定された分布の一例を図 5.3.2-4 に示す。

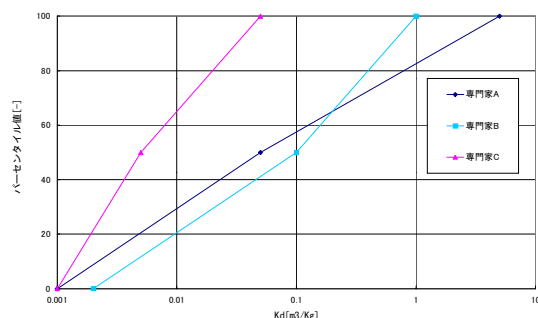


図 5.3.2-4 専門家が設定した各パーセンタイルにおける声問層 Cs の母岩 K_d [m^3/kg]

仮設定された分布では、50 パーセンタイル、および 100 パーセンタイルに相当する K_d の値に大きな違いが見られた。これは、重視した変動要因の項目やその定量的な取り扱いの違い、各専門家が用いた K_d 値の導出手法の違いなどが原因として考えられる。

以上の検討を通じて、分布設定手法の整理を行うとともに、データが十分でない場合の分布設定手法の一つである誘出法について、その手順をより実務に即した形に具体化し、実際に分布の設定を試行することにより、誘出法の適用可能性についての見通しを得た。なお、分布の設定の実務においては、変動要因について情報を整理し専門家間で共有するという手順を踏むことが、専門家が分布設定を行うために必要とする個別具体的な情報を適切に提供するという意味で重要となることがわかった。

今後は、最終的な分布の設定のために、各専門家が仮設定した分布を比較し、重要な変動要因の定量的な取り扱いを専門家間で共有するなどした上で、最終的な分布の設定を手順 7 以降で実施していく予定である。

ii) 感度分析技術の検討

ここでは、データの不確実性の影響を網羅的に

考慮した既存の解析（以下「モンテカルロシミュレーション」）から得られた総線量の最大値に対して、そのばらつきに寄与するパラメータならびに定量的な条件を把握するという目的を設定し、そのための手法として決定木分析の適用性の確認を行った（仲島・牧野, 2004）。

決定木分析とは、分析の対象物がいくつかのカテゴリに分類できる（されている）時に、対象物がどのカテゴリに属するかのもっとも効率的な判別を行うためのパターンや規則性を自動的にかつ段階的に探索するものである。また、その判別は体系的な質問群により階層的に行われる。決定木分析では、その判別を行なう対象となる変数（目的変数）を分析の目的に応じて、任意または自動でいくつかのカテゴリに分ける。そして目的変数に関係を持つデータ群（説明変数）の中からカテゴリの判別において重要度の高い変数を自動的に選択し、かつ、定量的な分岐点を見出して判別する。これを順次実行することにより、枝分かれ状に階層的に細分化されて最終的にはある特定のカテゴリに属すると判別される小グループ（終端ノード）に分けられる。

ここでは、既存のモンテカルロシミュレーションから得られた総線量の最大値を目的変数とし、そのばらつきを図 5.3.2-5 に示す 4 つのカテゴリの違いとして表現したうえで、ばらつきを特徴付けるパラメータに加え、その定量的な条件を抽出することを目的として、決定木分析を適用した。

図 5.3.2-6 に分析の結果として得られる決定木を示す。これにより、カテゴリの違いがモンテカルロシミュレーションで考慮した 50 のパラメータのうちの 4 つのパラメータのみで説明できることがわかる。

また、決定木分析の結果として得られる各カテゴリの違いを特徴付けるパラメータとその定量的条件の情報は、図 5.3.2-6 の決定木に全て含まれているが、各パラメータの条件およびその組み合わせとカテゴリの違いの関係は必ずしもわかりやすくはない。そこで、図 5.3.2-7 のように、決定木に含まれる情報を 2 次元にマッピングすることにより、どのパラメータがどのような条件の組み合わせの時にカテゴリの違いが生ずるかを一目で把握することができるようにした。決定木分析において得ることのできるパラメータの定量的条件を、このような形で整理することにより、以下のような検討にも活用することが可能になる：

- ・ あるパラメータの定量的な条件が与えられたときに、総線量の最大値がどのカテゴリーに属するかを容易に推定できる。
- ・ ある目標とする線量が与えられた時、それを上回る又は下回るパラメータの組合せおよびその範囲を容易に把握することができる。
- ・ 調査・試験によりパラメータの不確実性が低減され、パラメータの幅が減少した場合に、総線量の最大値がどのようになるかをカテゴリー単位で容易に推定することができる。すなわち、不確実性低減の効果を推定することができる。

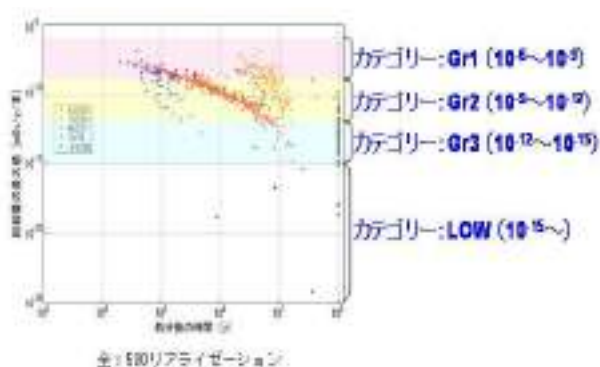


図 5.3.2-5 総線量の最大値に対する決定木分析のカテゴリー設定

③ まとめ

不確実性の定量化技術に関する検討として、安全評価で考慮すべき不確実性のうち、データの不確実性に着目し、既往の文献に基づきパラメータの分布設定手法について整理した。また、それらを、より実務に即した形に具体化するために、データが十分でない場合を想定し、誘出法の試行を行った。この結果、誘出法の適用可能性について見通しを得るとともに、対象とするパラメータの変動要因とその情報を整理し、専門家間で共有しておくことの重要性が見出された。

また、感度分析技術の検討として、決定木分析の適用性を検討し、その結果として、総線量の最大値のカテゴリーの違いを特徴付ける少数のパラメータを多数の入力パラメータから抽出し、かつ



図 5.3.2-6 決定木分析の分析結果の例 (決定木)

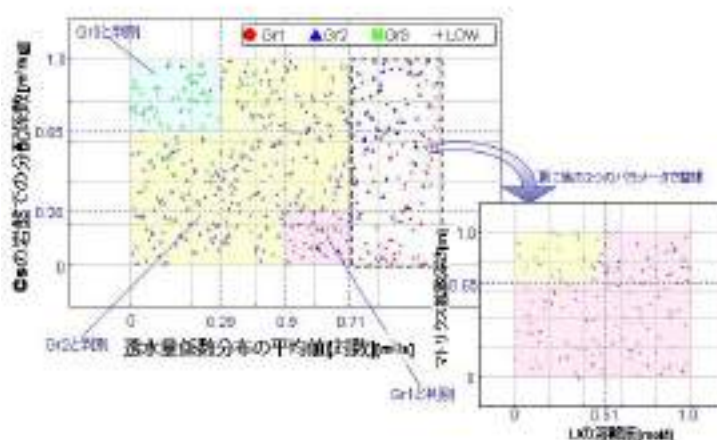


図 5.3.2-7 決定木分析の分析結果の例
(各カテゴリーに属することを特徴付ける
パラメータの定量的条件のまとめ)

その定量的な条件および組み合わせを提示することができることを確認した。

今後は、引き続き、データの不確実性の定量化技術に関する検討を進めることにより、パラメータの分布設定に関する実務レベルでのノウハウの蓄積や留意点の整理を行うとともに、試行を通じて得られた変動要因を室内試験や地質環境調査などのデータ取得項目に反映していく。また、感度分析技術に関する検討においては、これまでに検討した分析手法も含め、目的に応じた分析が行えるようにするための感度分析手法の整理と体系化を実施していく。さらに、不確実性の考え方や分類に関する検討や不確実性の影響評価に関する検討も継続して進める。これらにより、処分事業や安全規制に係わる基盤技術とするための、より体系的な不確実性評価技術の構築を実施していく予定である。

参考文献

- OECD/NEA (1991) : Review of Safety Assessment Methods, A Report of the Performance Assessment Advisory Group of the Radioactive Waste Management Committee, OECD Nuclear Energy Agency.
- Mishra, S. (2002) : Assigning probability distributions to input parameters of performance assessment models, SKB TR-02-11.
- 仲島邦彦, 牧野仁史 (2004) : 決定木分析を用いた核種移行解析結果の感度分析の検討, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集, p. 843.
- 牧野仁史, 若杉圭一郎, 小尾 繁 (2003) : 核種移行解析結果に対する感度分析の方法論の検討, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, p. 942.
- 若杉圭一郎, 小尾 繁, 牧野仁史 (2002) : モンテカルロシミュレーションによる高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価に対するデータ不確実性解析, サイクル機構技報, No14, pp. 149-160.
- 若杉圭一郎, 牧野仁史, 小尾 繁 (2003) : 2次元核種移行解析モデルによる掘削影響領域の遅延効果に関する検討, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, p. 872.

5.3.3 技術情報統合システム開発の現状

① 課題と計画の概要

地層処分技術に関する研究開発においては、具体的な地質環境への適用などを通じて地層処分技術の信頼性向上を図っていくことが必要であり、そのためには研究開発を分野内および分野間で連携しながら効率的かつ効果的に進めていくことが重要である。

ここで、研究開発の進展にともなって、研究成果を含む種々の技術的な情報の量的な増加と質的な多様化、および情報受け渡しの多様化・複雑化といった状況が生じると考えられる。このような状況においては、技術的な情報の不整合の発生、技術的な情報の共有の困難さの発生、情報管理の負担増大などが問題点となる可能性がある。

こうした問題点に対処するためには、技術的な情報の適切な登録・更新・受け渡し、および技術的な情報の効果的・効率的な共有などの実現を図り、あわせてこれらの対処による情報管理の負担を低減するといったアプローチが必要となる。

上記で挙げたようなアプローチを実現するために技術情報統合システム（JGIS = JNC Geological Disposal Information Integration System）の開発を行うこととした。

本システムの開発にあたっては、平成14年度までに上記で述べたアプローチを実現するための基盤となる、技術的な情報の流れの体系化の検討とシステム機能の検討を含むシステム設計を実施した。平成15年度は、システム機能の最終仕様の決定（サイクル機構、2003）と、技術情報統合システム（JGIS）の基本システムの製作を行った（石原ほか、2003；土屋ほか、2003）。

② これまでの成果

本システムの開発にあたっては、上記の問題点に対処するアプローチを具体化するために、システムで実現すべき主要な機能として図5.3.3-1に示す3つを考えた。これら3つの主要な機能を中心としたシステムの特徴を図5.3.3-2に概念図として示す。



図 5.3.3-1 問題点に対するアプローチとシステムで実現する機能の対応

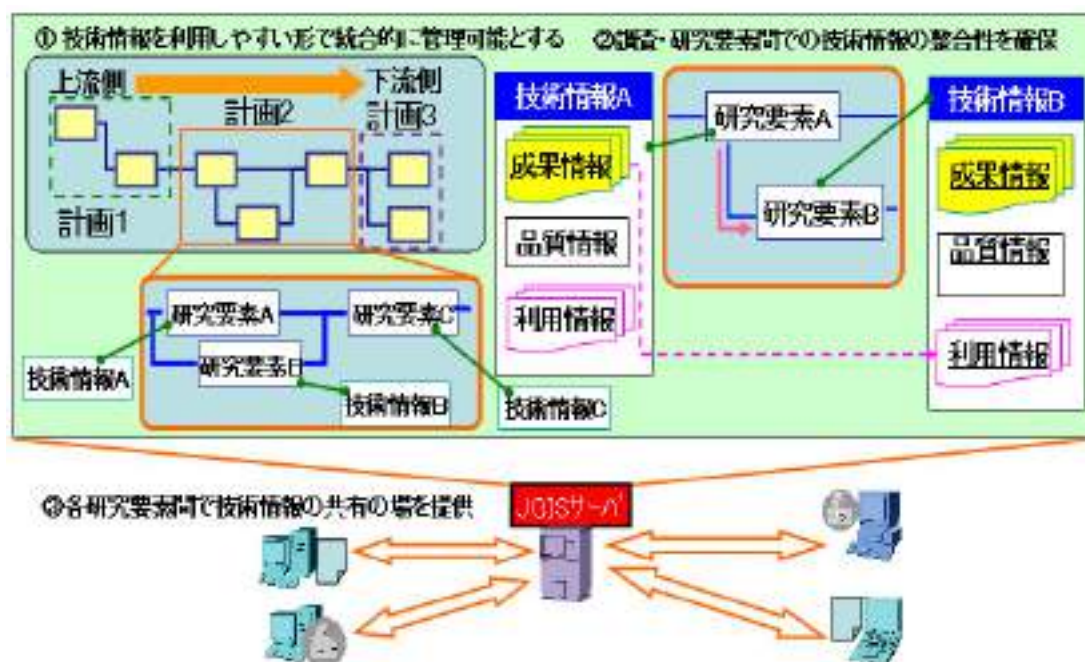


図 5.3.3-2 3つの主要機能を中心とするシステムの特徴

以下では、各主要機能について説明する。

i) 技術的な情報の統合的な管理について

個々の研究成果などの技術的な情報の管理、およびその受け渡しの多くは各研究者で個別に実施される場合が多い。これは、全体的にみると技術的な情報が十分に整理されないで、ばらばらに存在している状態である。こうした状態では、ある研究者は、自分の担当している研究成果がどのように利用されていくかが不明確であったり、ある研究者は、研究要素間の相互関係が不明であるために、自分の研究の位置づけを認識できなかったり、ある研究者は自分の研究に必要な技術的な情報を探すために多くの時間と労力を要するといった状況が生じる。こうした状況は、研究要素間での研究成果の不整合を発生させる原因となり、研究成果に対する信頼性向上の妨げになる(図 5.3.3-3)。

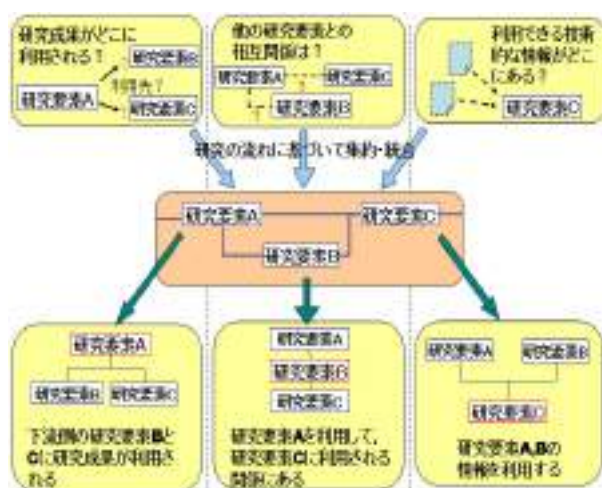


図 5.3.3-3 技術的な情報を集約・統合する体系化の考え方

そこで、技術的な情報を研究の流れに基づいて集約・統合する体系化の考え方を導入した(図 5.3.3-3)。

本システムでは、個々の研究要素を単位として、その研究要素をある目的に応じて計画される研究の流れに沿って結ぶことにより、体系化することを可能としている。この体系化された複数の研究要素を「計画」という単位として管理する。さらに、計画の中の体系化された研究要素に研究成果を登録することで、その相互関係や位置づけを明らかにし、研究成果の統合的な利用を可能とする。このように、技術的な情報を体系化の考え方によ

って集約し統合的に管理することは、不整合発生の可能性を低減する対策のひとつとなる。

ii) 研究内容の整合性の確保

上記のような体系化の中で、ある研究要素が研究の流れに沿って、別の研究要素の研究成果を利用する場合を考える。この場合、利用するための条件が満たされていることを確認することが重要になるが、研究成果のみが存在している場合には、その判断をするために必要な研究成果が導き出された背景や前提条件あるいは制約条件などの関連する情報が十分に入手できない、あるいは全く入手できない状況が発生する。こうした状況もまた不整合を発生させる原因となり得る。

こうした問題点に対して、本システムでは、研究要素ごとに、研究成果とともに研究成果に関連する情報をまとめて管理する方法を導入した。本システムにおいて、各研究要素に登録される情報のイメージを図 5.3.3-4 に示す。

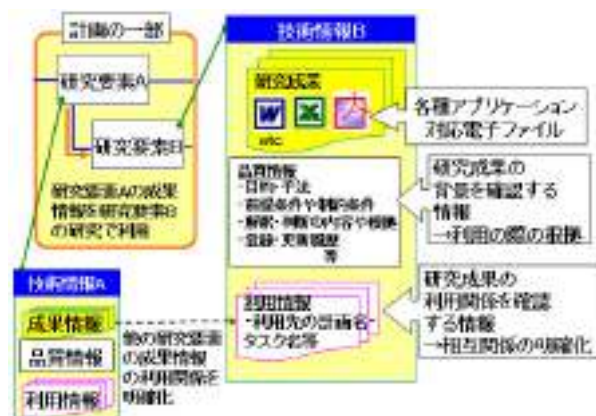


図 5.3.3-4 各研究要素に登録する研究成果とその関連情報

この、図 5.3.3-4 の中の「研究成果」は、最も重要な研究の成果を各種アプリケーションに対応する電子ファイルとして複数登録することができる。次に「品質情報」は、成果情報に対して、成果が導かれた背景としての前提条件・制約条件および解釈や判断などを記述する。さらに、「利用情報」は、図中の研究要素 B が研究要素 A の研究成果を利用している場合に、そのことを明確に表すことができるようにしている。これにより、研究要素間での複雑な情報の受けわたしに関して追跡性を確保することができる。また、利用している研究成果が更新された時に、適切な対処をするためにも重要な情報となる。

上記で説明した「研究成果」・「品質情報」・「利用情報」の三つをまとめて「技術情報」と呼び、本システムでの情報の管理単位とする。こうした形で管理によって、研究成果が不適切に利用されることを避けたり、更新に伴う対処を適切に行うことができるようになり、不整合の可能性を低減することができる。

iii) 技術情報共有とコミュニケーションの場の提供

上記で例に挙げたような研究要素間で技術情報の利用関係があるとき、ある研究要素の技術情報の更新が発生した際に、それを利用している研究要素の研究者は整合性を保つために更新内容の確認や検討、また必要に応じて議論などを経て自分の研究成果も変更していく必要がある。こうした対応を適切に開始するためには、更新の発生がタイムリーに関係者に伝わるが必要となる。

本システムでは、図 5.3.3-5 に示すように、ある研究要素の技術情報が新規に登録された場合や、上記の例のように更新が発生した場合に、システム側から関係者へ向けて電子メールによる通知を行うことにより、関係者に適切なタイミングで通知できるようにしている。

さらに、通知を受けた関係者が、新規登録や更新された技術情報について技術的な議論や検討ができるように、システムを通じて質問や意見のメールを関係者へ送信したり、掲示板を利用した意見交換ができるようにしている。

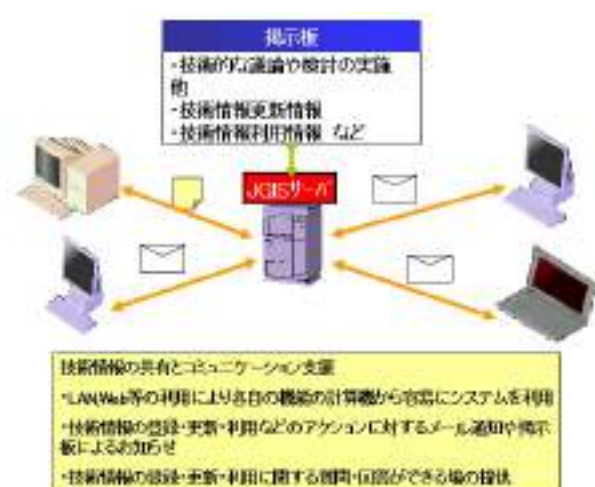


図 5.3.3-5 技術情報共有とコミュニケーション支援

このような機能により、関係者間を中心にしつつも、必要に応じて全ての研究者を含めて、技術情報の共有の困難さを低減することができる。

以上で説明してきたように、本システムは、技術情報の統合的な管理、整合性の確保、および共有やコミュニケーションが行える機能を有しており、連携を含めた研究開発を支援するとともに、本システムの利用により情報管理の負担を低減することができる。さらに、そうした表面的な効果だけでなく、各研究者が自分の研究の位置づけや意義を確認したり、自分の研究成果が使われていることを実感してモチベーションを向上させることなどの効用も期待することができる。

なお、本システムは LAN および Web 技術の利用により、各作業用パソコンからイントラネットを通じて利用することが可能である。

③ まとめ

平成 15 年度は、これまでに実施してきたシステムの検討および設計に基づいて、技術情報の統合的な管理、研究内容の整合性の確保、技術情報共有の場の提供を実現する技術情報管理システムの基本システムの製作を実施した。

今後の予定としては、平成 16 年度からサイクル機構内での地質環境分野、処分場（設計）・安全評価分野を含めた試験的な運用を開始する計画である。この試験的な運用を通じてノウハウを蓄積するとともにシステム機能の改良点の抽出とその改良などを実施していく予定である。さらに、試運用の実施後、サイクル機構内での本運用開始を開始し、これによって各研究分野間・分野内での研究進展および連携を支援していく予定である。

参考文献

- 柴田勝志，牧野仁史，若杉圭一郎，内田雄大（2003）：技術情報統合化システム（JGIS）開発への取り組み，サイクル機構技報，No. 21，pp. 79-88.
- 石原義尚，伊藤貴司，小林茂樹，根山敦史（2004）：処分技術・安全評価分野についての技術情報統合システムの製作，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；三菱重工業株式会社），JNC TJ8440 2004-005.
- 土屋真，上田真三，大橋東洋（2004）：地質環境分野についての技術情報統合システムの製作，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；三菱マテリアル株式会社），JNC TJ8440 2004-006.

5.4 安全評価手法の適用性確認

① 課題と計画の概要

本課題においては、平成14年度報告において、地質環境調査と安全評価の連携を具体化していくにあたっての研究の進め方について概観した。

ここでは、安全評価手法の適用性確認の考え方を整理するとともに、地上からの調査の段階を対象にした地下水流動モデル構築例として、結晶質岩地域ならびに堆積岩地域の検討例について報告する。

② これまでの成果

i) 適用性確認の考え方

「最終処分法」で示された段階的な事業の進め方と照らして、安全確保の考え方に基づく処分場概念の段階的構築を考える場合、まず、文献調査の段階で地層処分にとって安定な地質環境を確保できるとの見通しを得、概要調査以降、重大な見落としなどがないことを確認することにより、前の段階で示した見通しが確かなものであるとの信頼を積み上げていくことになるものと考えられる。

ここで、概要調査以降の計画を策定していくためには、「最終処分法」に基づき実際の地質環境に対し、処分場概念をどのように段階的に構築していくのかについての考え方を示し、それに基づき処分場の設計と安全評価の段階的な進め方を検討していくことが重要である。

段階的な処分場概念モデルの構築においては、主に概要調査以降における情報に基づき、適切な深度を選び、レイアウトを設定することにより、鍵となる安全機能を発揮するための地質環境条件を段階的に確認しつつ処分システムを構築することを念頭におく必要がある。

特に、鍵となる安全機能が有効に発揮し得ることの見通しを得るためには、地下深部における地下水流量、流速や移行経路に関する特性を段階的に把握していくことが重要となる。

これらの特性は、地質環境における地質構造の不均質性を反映し、サイト特性調査によって得られるものは、限られた範囲の情報、あるいは直接測定、観測できないものもあるため、水理地質構造モデルを作成し、これに基づく地下水流動解析などによる間接的な評価に基づき把握されることとなる。

したがって、水理地質構造モデルや地下水流動に関わる数値モデルを、地表からの調査から地下施設での調査へと段階的に進めるサイト特性調査結果に

基づいて、いかにして構築していくかが重要な課題となる。その際、調査数量が限定されていること、地質媒体の不均質性等が存在することを考慮すると、評価に用いるモデルやデータなどの不確実性を適切に取り扱う必要がある。

ii) 結晶質岩地域を対象とした検討事例

広域地下水流動研究(3.2節参照)および超深地層研究所計画(3.3節参照)で取得されたデータを用いて、5.2.1項で開発した亀裂ネットワークモデルと等価不均質連続体モデルを併用した入れ子式モデルの有効性について検討した。本検討の比較対象は、①亀裂ネットワークモデル、②等価不均質連続体モデルおよび③入れ子式モデル(5.2.1節参照)である。①においては、計算容量などの制限から相対的に小さな亀裂を間引いてモデルに含まれる亀裂の総数を少なくして計算を実施している。②は①の全ての亀裂を考慮してクラックテンソル理論により連続体近似したものである。

解析対象領域は瑞浪超深地層研究所を含む“ローカルスケール”とした(3.2節参照、図5.4-1参照)。ローカルスケールは瑞浪超深地層研究所周辺の地下水流動に影響を与える領域として求められた(稲葉ほか、2003)ものであり、日吉川を中心に土岐川および分水嶺に囲まれた領域である。解析対象領域には、日吉川周辺において複数のボーリング調査がなされているものの、瑞浪超深地層研究所とその周辺で実施されている調査(ボーリング調査、地質調査、物理探査など)に比べてデータの量が格段と少ない。そこで、亀裂ネットワークモデルの構築においては正馬様用地および瑞浪超深地層研究所周辺で取得されたデータを用いた。

本検討で対象とした地質・地質構造を表5.4-1に、モデルの主要パラメータ値を表5.4-2～3に示す。これらの値を用いて作成した亀裂ネットワークモデル、亀裂ネットワークモデルの等価多孔質媒体近似により得られた等価不均質連続体モデルの中に亀裂ネットワークモデルを入れ子式に加えたモデルをそれぞれ図5.4-2、図5.4-3、図5.4-4に示す。これらの図から、等価多孔質媒体モデルでは、調査が集中している瑞浪超深地層研究所周辺が調査の解像度に比べて極端に大きなサイズのメッシュで表現されているため、解析結果と調査結果との対比が困難であり、メッシュ間隔の最適化の検討が必要と考えられる。その一方で、亀裂ネットワークモデルや入れ子式モデルにおいては、瑞浪超深地層研究所周辺において

個々の亀裂のスケールで詳細にモデル化することにより、モデル化および解析結果と調査結果との直接的対比が可能となる。しかしながら、表 5.4-4 に示すように、亀裂ネットワークモデルは計算容量が膨大で、計算時間も 1 ケース当たり 2 日以上と他のモデルに比べて極端に長いことがわかる。

解析結果の一例として、粒子追跡法の解析結果を図 5.4-5 に示す。粒子追跡法の出発点は瑞浪超深地層研究所内である。亀裂ネットワークモデルと入れ子式モデルはほぼ同じ方向に移行していることが分かる。

入れ子式モデル化手法は、詳細調査の対象となる領域においては、亀裂の地質学的、水理学的調査データなどから直接的に亀裂ネットワークモデルを用いてモデル化するとともに、その周辺領域は亀裂ネットワークモデルの等価多孔質媒体近似によりモデルの簡素化を図るものである（5.2.1 項参照）。超深地層研究所計画のように詳細な調査領域を対象とした地下水流動評価においても、瑞浪超深地層研究所周辺の地下水流動に影響を及ぼすと考えられるより広い領域を包含したモデル化・解析が必要である。その場合、着目しているスケールに応じてモデル化の解像度を変えて入れ子式モデル化手法を採用することで、計算容量・時間が飛躍的に改善され、①調査データとの対比をしながらトライアンドエラー的にモデル構築、②概念モデルやデータの不確実性を考慮した複数のケース設定、などのモデル化や解析作業を効率的に実施できるものと期待される。

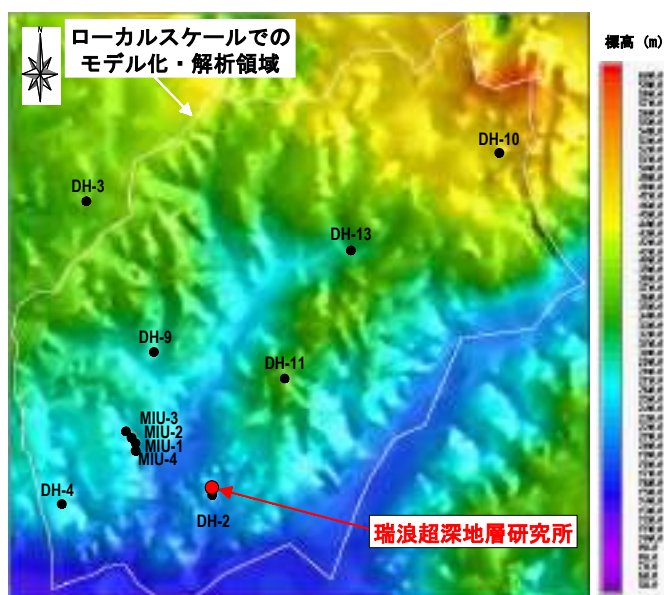


図 5.4-1 解析対象領域

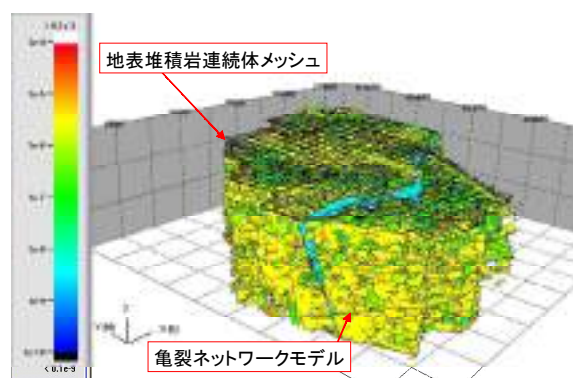


図 5.4-2 亀裂ネットワークモデル

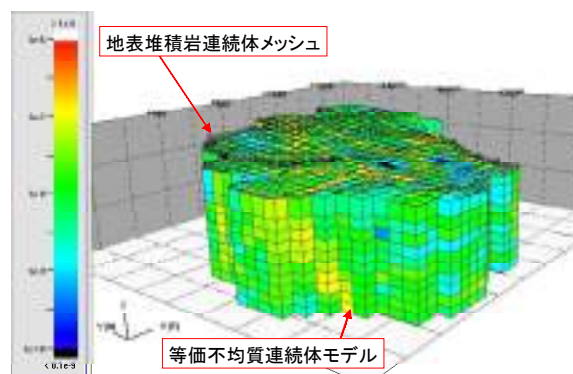


図 5.4-3 等価不均質連続体モデル

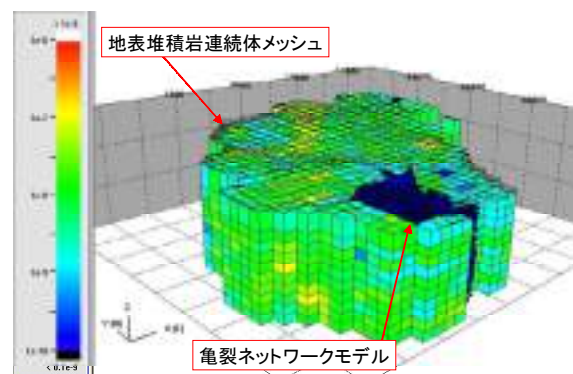


図 5.4-4 入れ子式モデル

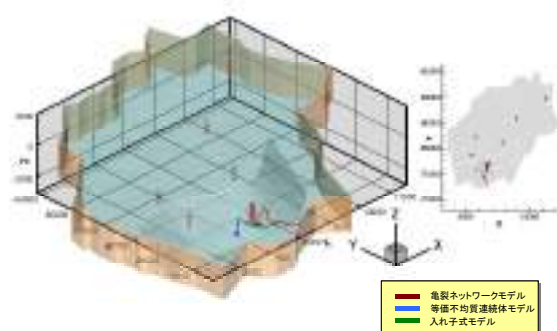


図 5.4-5 粒子追跡法解析結果例

表 5. 4-1 モデル化の対象とした地質・地質構造

地質・地質構造	モデル化区分
瀬戸層群	地表体積岩
瑞浪層群	
土岐花崗岩	上部割れ目帯
	月吉断層に伴う割れ目帯
	健岩部
月吉断層 ^{*1}	月吉断層

^{*1}：他の主要なリニアメント構造を含む

表 5. 4-2 モデル主要パラメータ値（地表堆積岩）

パラメータ	分布モデル	値
透水係数	対数正規分布	対数平均：-6. 5 標準偏差：0. 95

表 5. 4-3 モデル主要パラメータ値（土岐花崗岩）

パラメータ	分布モデル	値
空間モデル	Enhanced Baecher	
亀裂方向	Bootstrap	正馬様用地のボーリング孔で観測された開口亀裂をデータベースとする
亀裂半径	べき乗分布	べき指数：2. 6
亀裂密度	上部割れ目帯：0. 080 m ² m ⁻³ 月吉断層に伴う割れ目帯 上盤側：0. 749 m ² m ⁻³ 下盤側：0. 140 m ² m ⁻³ 健岩部：0. 046 m ² m ⁻³	
透水量係数	対数正規分布 上部割れ目帯：対数平均：-6. 5 標準偏差：0. 5 月吉断層に伴う割れ目帯 ：対数平均：-5. 0 標準偏差：0. 7 健岩部：対数平均：-6. 0 標準偏差：0. 5	
亀裂開口幅	2×（透水量係数） ^{1/2}	

表 5. 4-4 モデル容量と計算時間の比較（1 ケース当たり）

	亀裂ネットワークモデル *1	等価不均質連続体モデル	入れ子式モデル
亀裂メッシュ数	900, 000	0	105, 000
連続体メッシュ数	4, 000	26, 500	24, 000
節点数	600, 000	6, 500	57, 200
定常水理解析時間	50 時間	3. 5 分	17 分
粒子追跡解析時間	20 分	2 分	4 分

注）数字はおおよその値

^{*1}）小さな亀裂などを間引いたモデル

iii) 堆積岩地域を対象とした検討事例

幌延深地層研究計画（3. 4 節参照）などのボーリング調査で取得された地下水位データに基づいて、幌延地域を対象とした水理地質構造モデル構築に関する検討を行った。具体的には、稚内層において観測されている高い間隙水圧に着目し、各地層（図 5. 4-6）の地下水位データ（D-1 孔（動燃事業団，1987）、HDB-1 孔（山本ほか，2002a）、HDB-2 孔（山本ほか，2002b））に基づいて透水係数分布の推定を行った。透水係数を推定する対象は、稚内層の上部に存在する（1）声問層上部、および（2）声問層上部と稚内層として、推定には逆解析水理コード（Finsterle and Persoff, 1997；Finsterles and Najita, 1998）を用いた。

対象領域で存在が推定されている大曲断層および N 系断層群については、透水性に関する詳細なデータがないことから、予察的に、（1）亀裂の発達した高透水性部に粘土化した低透水性部がはさまれたサンドイッチ構造、および（2）低透水性部のみの 2 ケースを設定した。

透水係数の設定には、既存の報告の値（今井ほか，2002）を用いた（表 5. 4-5）。

逆解析の結果、声問層上部および稚内層の透水係数は、既存の報告の値（今井ほか，2002）に比べ、それぞれ 1/10、1/100 程度の値となり（表 5. 4-6）、高い間隙水圧が観測された稚内層およびその上部の声問層上部に透水性が低い部分が存在する可能性が示唆された。

一方、逆解析による HDB-1 孔、HDB-2 孔の全水頭分布は、D-1 孔に比べ、実測値との差が大きい結果となった（図 5. 4-7）。これは、地下水位データの量

の違いのほか、広域を対象としたモデルにおいて、局所的な地質構造の不均質性等が十分表現できていないことが考えられる。

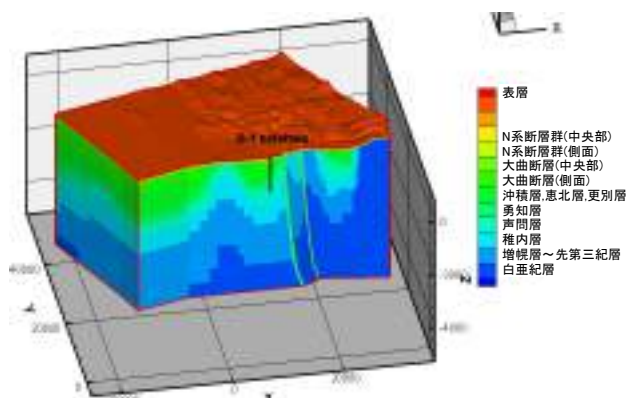


図 5.4-6 各地層の分布

表 5.4-5 設定した透水係数

[単位: m s^{-1}]

地層, 断層		断層の設定	
		サンドイッチ構造	低透水性
表層		2.0×10^{-6}	
沖積層, 恵北層, 更別層		1.0×10^{-6}	
勇知層		1.0×10^{-7}	
声間層	上部	未知パラメータと設定	
		1.0×10^{-9}	
稚内層		1.0×10^{-10} あるいは	
		未知パラメータと設定	
増幌層～先第三紀層		5.0×10^{-10}	
白亜紀層		1.0×10^{-11}	
大曲断層, N系断層群	側部	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-10}
	中央部		

表 5.4-6 逆解析による透水係数推定結果

断層の設定	透水係数 [m/sec]	
	声間層上部	稚内層
サンドイッチ構造	7.92×10^{-11}	既存の値を設定
	9.97×10^{-11}	9.97×10^{-13}
低透水性	1.26×10^{-11}	既存の値を設定
	6.29×10^{-11}	9.97×10^{-11}

断層に関しては、深部（増幌層以深）で高い間隙水圧が観測された例（兼清，1999）などから、本検討で設定した2ケースのうちでは、サンドイッチ構造の方が実測値をよく表現しているものと考えられる。

今後、モデルの妥当性を検討する上で、逆解析によるモデル化の結果と対比するための間隙水圧以外の情報として、当該地域の地下水に含まれる塩分やガス等の濃度分布データが重要であると考えられる。

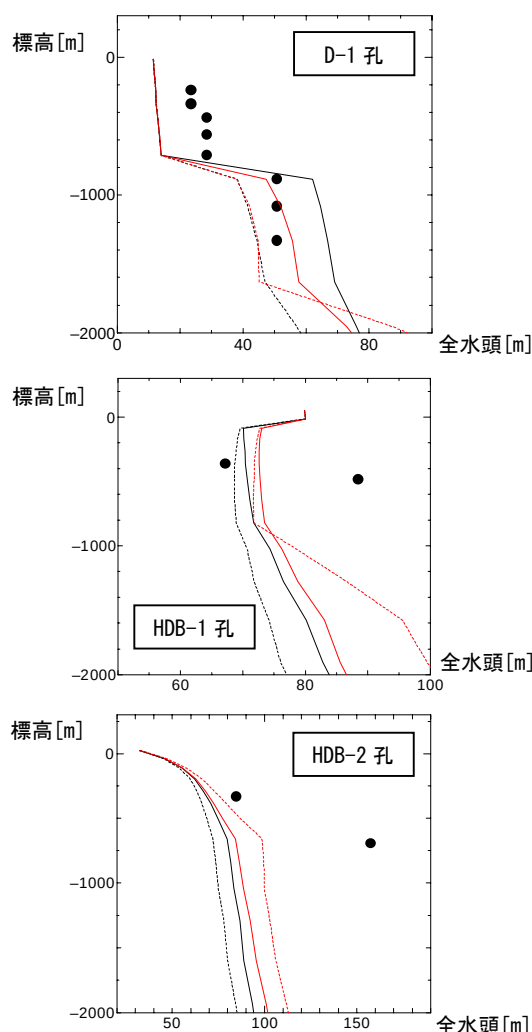


図 5.4-7 逆解析結果に基づく各ボーリング孔での全水頭分布

- : 実測値
- : 声間層上部未知／断層＝サンドイッチ構造
- ... : 声間層上部＋稚内層未知／断層＝サンドイッチ構造
- : 声間層上部未知／断層＝低透水性
- ... : 声間層上部＋稚内層未知／断層＝低透水性

③ まとめ

本課題においては、地層処分の安全機能に大きな影響を及ぼす因子である地下深部の地下水流量、流速や移行経路情報に着目し、それらを評価するための地下水流動モデル構築手続きとそれに付随する種々の不確実性について事例的に検討した。

今後は、超深地層研究所計画や幌延深地層研究計画の進捗に合わせて、新しく取得されたデータを用いて構築したモデルの整合性の確認や、モデルの更新などを繰り返すことを通じて調査の進捗に応じたモデル化手法やそれらに付随する不確実性について整理していく予定である。

参考文献

- 動力炉・核燃料開発事業団（1987）：貯蔵工学センター立地環境調査報告書，動燃事業団技術資料，PNC TJ1027 98-012.
- Finsterle, S. and Persoff, P. (1997) : Determining permeability of tight rock samples using inverse modeling, Water Resource Research, Vol. 33(8), pp. 1803-1811.
- Finsterles, S. and Najita, J. (1998) : Robust estimation of hydrogeologic model parameters, Water Resource Research, Vol. 34(11), pp. 2939-2947.
- 今井 久, 前田信行, 塩崎 功, 雨宮 清, 千々松正和 (2002) : 幌延深地層研究計画における地下水流動解析に関する検討, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 株式会社間組), JNC TJ1400 2002-004.
- 稲葉 薫, 三枝博光, 中野勝志, 小出 馨 (2003) : 深部地下水の流動系を把握するためのモデル化領域とその境界条件の設定に関する検討, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 359-364.
- 兼清豊比古 (1999) : 北海道北部地域における地質環境データ収集・整理, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 株式会社地球科学総合研究所), JNC TJ1440 99-005.
- 山本卓也, 下茂道人, 藤原靖, 服部弘通, 田所照夫, 岩間彦衛, 名合牧人, 熊本 創 (2002a) : 幌延深地層研究センターにおける試錐調査 (HDB-1 孔), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 大成建設株式会社), JNC TJ1400 2002-010.
- 山本卓也, 下茂道人, 藤原靖, 服部弘通, 田所照夫, 岩間彦衛, 名合牧人, 熊本 創 (2002b) : 幌延深地層研究センターにおける試錐調査 (HDB-2 孔), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 大成建設株式会社), JNC TJ1400 2002-011.

6. おわりに

6. おわりに

サイクル機構では、「第2次取りまとめ」を公表したのち、平成13年度に策定された「全体計画」に沿って、地層処分技術に関する研究開発を行ってきた。「第2次取りまとめ」以降の4年あまりの間に、東濃鉱山における調査試験研究が収束に向かった一方、瑞浪超深地層研究所および幌延深地層研究センターの2つの深地層の研究施設に関わる組織を設立し、ボーリング調査などを経て地下施設の建設を開始した。深地層の研究施設計画の一環として実施されている各種現地調査や解析については、着実に成果を挙げてきており、解析結果の一部については本報告書で紹介できるまでに至った。また、これら深地層の研究施設に関する業務が進展するのと並行して、東海事業所処分研究部において、処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化に関する研究開発を進めてきた。深地層の研究施設で得られた情報をもとにした物質移行解析等については、東海事業所処分研究部を中心に研究を開始した。本報告書では、平成15年度において実施された、深地層の研究施設計画等における地上からの調査研究の進展、処分技術や安全評価に関わるデータの蓄積、モデルの高度化などについての成果および進捗を紹介した。

第2章で述べたように、サイクル機構では平成17年度を目途に、地上からの調査研究と処分技術や安全評価に関する成果を取りまとめる予定である。この取りまとめにあたっては、概要調査地区の選定および、これに引き続く概要調査や安全審査基本指針の策定等への反映を念頭に置くことを予定している。このことから、「第2次取りまとめ」以降の各分野の研究開発成果を取りまとめて報告するだけでなく、本報告書で個別に報告してきた「深地層の科学的研究」「処分技術の信頼性向上」および「安全評価手法の高度化」の3分野が連携し、地上からの調査段階での調査および評価手法等の主要成果の重要部分を集約することを計画している。

平成17年度には、日本原子力研究所との統合が予定されているが、統合後の新法人においても、瑞浪および幌延の深地層の研究施設や東海事業所の地層処分放射化学研究施設などを活用し、地層処分技術に関する研究開発を継続することが必要であると位置づけられている。したがって、今後とも地層処分技術の信頼性向上のための基盤的な

研究開発を進めるほか、研究開発成果の公表、深地層の研究施設などの施設の公開、国内外の関係機関や大学との研究協力などを積極的に進めていく。また、技術の継承や研究者の育成にも努めていく。

地層処分技術に関する研究開発を着実に進めていくためには、関連する分野の専門家のみならず、一般市民の方々の理解を得ることが重要である。サイクル機構では、今後とも研究開発成果を積極的に公開し、多くの議論を通じて透明性の確保や信頼性の向上をはかるとともに、各研究施設においては安全確保を第一に作業を遂行し、地域との共生に努めながら、開かれた研究開発を目指していく所存である。

本報告書で紹介した研究成果は、国内外の数多くの研究者や研究機関等のご協力をいただいたものである。ご協力いただいた関係者の方々に感謝の意を表するとともに、今後ともよりいっそうのご支援とご指導をいただければ幸いである。

【付録 A】

平成 15 年度の業務実施体制および
各研究開発課題の実施担当組織

付録 A(1) 地層処分技術に関する研究開発に係る平成 15 年度の業務実施体制(事務管理部門除く)

組織	業務概要
本社	
バックエンド推進部	高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発全体の推進・管理・対外調整等
総括・調整グループ	部内関連業務の全体調整および情報普及等
地層処分研究計画グループ	地層処分研究開発と地層科学研究に係る計画立案・調整, 成果取りまとめの推進等
深地層研究施設計画グループ	2つの深地層の研究施設に関する計画立案・調整
東濃地科学センター	東濃地科学センターで実施する地層科学研究の推進・管理等
地質環境研究グループ (陸域地下構造フロンティア研究プロジェクトを含む)	超深地層研究所計画を除く地層科学研究(広域地下水流動研究, 地質環境の長期安定性に関する研究, 東濃鉱山における調査試験研究)の実施等
瑞浪超深地層研究所	超深地層研究所計画の推進・管理等
研究調整グループ	センターで実施する研究開発に係る業務執行の調整, 予算編成取りまとめ等
研究情報化グループ	地層科学研究の計画, 情報収集・解析, および成果の取りまとめ情報発信等
超深地層研究グループ	研究所における研究の実施等
施設建設グループ	研究所の建設施工計画の策定, 各種許認可の申請と官庁との調整, 建設の施工管理等
幌延深地層研究センター	幌延深地層研究計画の推進, 管理等
研究調整グループ	幌延深地層研究計画の研究開発に係る業務遂行の調整, 業務品質保証活動の推進, 予算編成取りまとめ等
深地層研究グループ	幌延深地層研究計画に係る地層科学研究および地層処分研究開発の実施等
施設建設グループ	研究所の建設施工計画の策定, 各種許認可の申請と官庁との調整, 建設の施工管理等
東海事業所	
処分研究部	放射性廃棄物の処分に係る研究開発の推進, 管理等
研究計画グループ	部内研究業務の全体調整, 対外調整等
処分バリア性能研究グループ	人工バリア等の処分技術開発, 地球化学や核種移行に関するモデル開発の実施等
放射化学研究グループ	放射性核種を用いた核種移行データの取得, データベース開発と個別現象モデル開発の実施等
システム解析グループ	岩盤中の水理・物質移行モデル開発, 安全評価手法の開発と, システム性能解析・評価, 分野間の連携に関する検討等

付録 A(2) 各研究開発課題の実施担当組織（本報告書作成分担）

目次項目（研究開発課題）	実施（報告書作成）担当組織
1. はじめに	本社)地層処分研究計画 Gr. ／深地層研究施設計画 Gr.
2. 研究開発計画と成果の概要	
2.1 地層処分技術に関する研究開発の全体概要	
2.1.1 サイクル機構の役割	本社)地層処分研究計画 Gr. ／深地層研究施設計画 Gr.
2.1.2 研究開発目標と進め方	
2.1.3 研究開発の取り組みの現状と当面の計画・課題	
2.2 各研究開発分野における計画と成果の概要	
2.2.1 深地層の科学的研究	東濃)研究情報化 Gr. ／幌延)研究調整 Gr.
2.2.2 処分技術の信頼性向上	東海)処分バリア性能研究 Gr.／放射化学研究 Gr. ／システム解析 Gr.
2.2.3 安全評価手法の高度化	
3. 深地層の科学的研究	
3.1 広域地下水流動研究と超深地層研究所計画の役割と研究の進め方	東濃)研究情報化 Gr.
3.2 広域地下水流動研究	
3.2.1 研究の概要	東濃)地質環境研究 Gr.／研究情報化 Gr.
3.2.2 各調査研究の成果	東濃)地質環境研究 Gr.
1) 地質・地質構造に関する調査研究	
2) 岩盤の水理に関する調査研究	
3) 地下水の地球化学に関する調査研究	
3.2.3 調査研究の統合	東濃)地質環境研究 Gr.／研究情報化 Gr.
3.3 超深地層研究所計画	
3.3.1 計画の概要	東濃)研究情報化 Gr.／超深地層研究 Gr.
3.3.2 第1段階の調査研究	
1) 各分野の調査研究の成果	東濃)超深地層研究 Gr.
1-1) 地質・地質構造に関する調査研究	
1-2) 岩盤力学に関する調査研究	
1-3) 岩盤の水理に関する調査研究	
1-4) 地下水の地球化学に関する調査研究	
1-5) 調査技術開発	
2) 深地層の工学技術の基礎に関する研究	東濃)施設建設 Gr.
3) 調査研究の統合	東濃)超深地層研究 Gr.／研究情報化 Gr.
3.3.3 第2段階の調査研究	東濃)研究情報化 Gr.
1) 調査研究計画	東濃)超深地層研究 Gr.
2) 施設建設の進捗状況	東濃)施設建設 Gr.
3.4 幌延深地層研究計画	
3.4.1 幌延深地層研究計画の役割と研究の進め方	幌延)研究調整 Gr.
3.4.2 第1段階の調査研究	
1) 地質環境調査技術開発	幌延)深地層研究 Gr.
1-1) 地質・地質構造に関する調査研究	
1-2) 岩盤力学に関する調査研究	
1-3) 岩盤の水理に関する調査研究	
1-4) 地下水の地球化学に関する調査研究	
2) 地質環境モニタリング技術	

2-1) ボーリング孔を用いたモニタリング技術開発	幌延)深地層研究 Gr.
2-2) 遠隔監視システムの開発	
3) 深地層の工学技術の基礎に関する研究	幌延)施設建設 Gr.
4) 調査研究の統合	幌延)研究調整 Gr.
5) 地質環境の長期安定性に関する研究	幌延)深地層研究 Gr.
6) 環境調査	幌延)施設建設 Gr.
3.4.3 第2段階の調査研究	幌延)研究調整 Gr.
3.5 東濃鉱山における調査試験研究	
3.5.1 研究の概要	東濃)地質環境研究 Gr.
3.5.2 各調査試験研究の成果	
1) ナチュラルアナログ研究	
2) 岩盤の力学的安定性に関する試験研究	
3) 坑道周辺の地質環境に関する調査研究	
3.6 地質環境の長期安定性に関する研究	
3.6.1 研究の概要	東濃)地質環境研究 Gr.
3.6.2 各成果の成果	
1) 隆起・侵食／気候・海水準変動に関する研究	
2) 火山活動に関する研究	
3) 地震・断層活動に関する研究	
4) 知的基盤・研究情報基盤の整備	
4-1) 地質環境の長期安定性に係わるデータベースの整備	
4-2) 次世代の高精度物理探査技術等に係わる基盤研究	東濃)研究情報化 Gr.
4-3) 活断層帯での地殻活動研究	東濃)地質環境研究 Gr.
4. 処分技術の信頼性向上	
4.1 人工バリアの基本特性データベースの整備	
4.1.1 オーバーパックの基本特性	東海)処分バリア性能研究 Gr.
1) 炭素鋼オーバーパックの腐食挙動に関する研究	
2) 代替オーバーパック材料の腐食挙動に関する研究	
4.1.2 緩衝材の基本特性	
4.1.3 人工バリアの性能保証に関する 基盤情報整備	
4.2 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究	
4.2.1 人工バリア等の変形・変質等の長期挙動に関する研究	
1) 緩衝材／岩盤の力学的変形挙動に関する研究	
1-1) 緩衝材クリープ現象に関する研究	東海)処分バリア性能研究 Gr.
1-2) 岩盤の力学的変形挙動に関する研究	東海)システム解析 Gr.
2) 緩衝材の流出・侵入挙動に関する研究	東海)処分バリア性能研究 Gr.
3) 人工バリアの変質・劣化挙動に関する研究	
4.2.2 熱-水-応力-化学連成挙動に関する研究	
4.2.3 人工バリア性能の維持限界条件に関する研究	
1) 緩衝材ガス透気回復挙動に関する研究	
2) 人工バリアせん断応答挙動に関する研究	
4.2.4 人工バリア等のナチュラルアナログ研究	
4.3 人工バリア等の工学技術の検証	
4.3.1 閉鎖技術の検証試験	東海)処分バリア性能研究 Gr.
4.3.2 人工材料の開発	東海)システム解析 Gr.
4.3.3 幌延地下水環境下における緩衝材等の力学特性	東海)処分バリア性能研究 Gr.
4.4 設計手法の適用性確認	東海)システム解析 Gr.

5. 安全評価手法の高度化	
5.1 核種移行データベースの整備	
5.1.1 放射性核種の熱力学データベースの整備	東海)放射化学研究 Gr./処分バリア性能研究 Gr.
5.1.2 収着・拡散データベースの整備	東海)処分バリア性能研究 Gr.
5.2 安全評価モデルの高度化	
5.2.1 岩盤中水理・物質移行モデルの高度化	東海)システム解析 Gr.
1) 結晶質岩中における亀裂ネットワークモデルの改良・高度化研究	
2) 結晶質岩中の移行パラメータの信頼性評価手法の開発研究	
3) 岩盤中の水理・物質移行モデルの信頼性向上研究	
3-1) 単一亀裂／亀裂交差部室内試験（移流・分散）	
3-2) 単一亀裂・モデル開発（LBNL 共同研究）	
3-3) 亀裂ネットワーク・原位置試験	
3-4) 亀裂を有する堆積軟岩の水理特性	
4) 堆積軟岩の不均質性評価手法の開発	
5.2.2 地下水・間隙水水質形成モデルの高度化	東海)処分バリア性能研究 Gr.
5.2.3 現象論的核種移行モデルの開発	
1) ガラスの長期溶解挙動及び核種の溶解現象に関する研究	
2) 核種の収着・拡散現象に関する研究	東海)放射化学研究 Gr./処分バリア性能研究 Gr.
5.2.4 コロイド等の影響評価モデルの開発	
1) コロイドの影響評価モデルの開発	東海)処分バリア性能研究 Gr.
2) 天然有機物・微生物の影響評価モデルの開発	
2-1) 天然有機物の影響評価モデルの開発	東海)処分バリア性能研究 Gr./放射化学研究 Gr.
2-2) 核種移行評価モデルにおける微生物の取り扱いに関する検討	東海)処分バリア性能研究 Gr.
5.2.5 生物圏評価モデル	東海)システム解析 Gr.
5.2.6 天然現象影響評価モデル	
5.3 安全評価手法の高度化	
5.3.1 シナリオ等の安全評価基盤の整備	
1) 安全評価の基本事項の検討	本社)地層処分研究計画 Gr. ／東海)システム解析 Gr.
2) シナリオ開発技術の高度化	東海)システム解析 Gr.
5.3.2 不確実性評価技術	
5.3.3 技術情報統合システムの整備	
5.4 安全評価手法の適用性確認	東海)システム解析 Gr.
6. おわりに	本社)地層処分研究計画 Gr. ／深地層研究施設計画 Gr.
付録	
付録 A 業務実施体制および各研究開発課題の実施担当組織	本社／東濃／幌延／東海
付録 B 平成 15 年度の主な業務実績	
付録 C 国内外の関係機関との研究協力体制と平成 15 年度の協力状況	
付録 D 公開文献リスト（平成 15 年度）	

【付録 B】

平成 15 年度の主な業務実績

付録 B(1) 地層処分技術に関する研究開発に係る本社・各事業所の平成 15 年度の主な業務実績

	本社(各事業所共通の項目を含む)	東濃地科学センター	幌延深地層研究センター	東海事業所処分研究部
主要イベント (報告会・関係自治体説明・計画の進捗等)	・地層処分技術に関する研究開発報告会(16 年 2 月) ¹⁻¹⁾	・平成 15 年度地層科学研究情報・意見交換会(11/10, 11) ²⁻¹⁾ ・瑞浪市との土地賃貸借に係る協定書に基づく同市への説明(瑞浪超深地層研究所の平成 15 年度事業計画)(4 月) ・関係自治体等へのセンター事業計画説明(4～6 月) ・瑞浪超深地層研究所研究坑道掘削開始(7 月) ・東濃鉱山における地層科学研究を終了(3 月)	・平成 15 年度調査研究計画を北海道、幌延町に説明(3 月) ・平成 15 年度調査研究計画説明会(4 月) ・平成 14 年度調査研究成果を北海道、幌延町へ説明(6 月) ・造成工事着工(7 月)	・エントリー国際ワークショップ(10 月) ⁴⁻¹⁾
主要な計画・報告書等の公表	・高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発ー平成 14 年度報告ー(年度成果報告書)の公表(6 月) ¹⁻²⁾	・広域地下水流動研究、超深地層研究所計画、東濃鉱山における調査試験研究および地質環境の長期安定性に関する研究の平成 15 年度計画書および平成 14 年度報告書の公表(4～7 月) ²⁻²⁾ - 2-9)	・平成 15 年度調査研究計画の公表(4 月) ³⁻¹⁾ ・平成 14 年度調査研究成果報告の公表(6 月) ³⁻²⁾	
機構内の委員会・検討部会等	・深地層の研究施設における研究計画等検討部会(10 月, 16 年 3 月)	・地質環境の長期安定性研究検討部会 WG(計 7 回)		・平成 15 年度地層処分研究開発検討委員会(16 年 3 月)
国、関係機関との調整・協力等	・原子力発電環境整備機構との協力協定に基づく運営会議の開催と技術情報の提供 ・土木学会処分技術 WG への協力(幹事としての参加及び体系化報告書の執筆作業など) ・(財)電力中央研究所との研究協力の推進	・資源エネルギー庁・瑞浪市主催「おもしろ科学館 2003 in みずなみ」への参加(8 月)	・(財)電力中央研究所との「幌延深地層研究計画における地質・地下水環境特性評価に関する研究」に関する共同研究契約締結(9 月) ・財団法人北海道科学技術総合振興センター幌延地圏環境研究所との研究協力に関する協定締結(3 月) ・資源エネルギー庁・幌延町主催「おもしろ科学館 2003 in ほろのべ」への参加(9 月)	・原子力学会標準委員会 深地層分配係数分科会及び浅地中処分安全評価分科会への協力(主査代理及び委員としての参加など) ・原子力学会誌「地層処分連載講座」への協力(原稿執筆など) ⁴⁻²⁾ ・日本原子力研究所との研究協力に基づく情報交換会議 ・(財)原子力環境整備促進・資金管理センターとの共同研究会議の開催 ・経済産業省公募型研究受託契約(2 件)
主な国際会議への参加・報告	・環太平洋原子力協議会での報告(11 月)	・第 27 回「放射性廃棄物管理のための科学的基礎」国際シンポジウム(MRS2003)にて発表(6 月) ²⁻¹⁰⁾ ・「地質環境中におけるアクチニドと核分裂生成物の化学および移行挙動」国際会議(Migration' 03)にて発表(9 月) ²⁻¹¹⁾ ・第 9 回環境修復・放射性廃棄物管理国際会議(ICEM' 03)にて発表(9 月) ²⁻¹²⁾ ・国際測地学地球物理学連合(IUGG)にて発表(6-7 月) ・その他、米国地球物理学学会連合(AGU)秋季会議, Goldschmidt Conference などの会議にて 20 件発表	・第 13 回ゴールドシュミット国際会議にて発表(9 月) ^{3-3), 3-4)} ・環境生物化学国際シンポジウムにて発表(9 月) ³⁻⁵⁾ ・GeoProc2003 国際会議にて発表(10 月) ³⁻⁶⁾ ・EC CLUSTER 国際会議にて発表(11 月) ³⁻⁷⁾ ・第 14 回 Pacific Basin Nuclear 会議にて発表(3 月) ³⁻⁸⁾	・第 27 回「放射性廃棄物管理のための科学的基礎」国際シンポジウム(MRS2003)にて 2 件発表(6 月) ^{4-3), 4-4)} ・国際共同研究 CRR プロジェクト会議(9 月) ・「地質環境中におけるアクチニドと核分裂生成物の化学および移行挙動」国際会議(Migration' 03)にて 4 件発表(9 月) ^{4-5) - 4-8)} ・第 9 回環境修復・放射性廃棄物管理国際会議(ICEM' 03)にて発表(9 月) ⁴⁻⁹⁾ ・熱-水-応力-化学連成挙動に関する国際会議(GeoProc2003)にて 9 件発表(10 月) ^{4-10) - 4-18)} ・アジア-太平洋防食会議(13th APCCC)にて発表(11 月) ⁴⁻¹⁹⁾ ・土質における X 線 CT に関する国際ワークショップ(GeoX 2003)にて 1 件発表(11 月) ⁴⁻²⁰⁾
主な国内学会への参加・報告	・日本原子力研究所 NUCEF セミナーにて 8 件(各事業所の発表を含む)発表(16 年 2 月) ・日本原子力学会「2004 年春の年会」にて 21 件(各事業所の発表を含む)発表(16 年 3 月)	・地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会にて 31 件発表(5 月) ・日本原子力学会「第 19 回バックエンド夏期セミナー」にて 4 件発表(7-8 月) ・その他、日本地震学会, 土木学会, 日本地下水学会, 日本地質学会, 日本応用地質学会, 日本地球化学会などの学会にて 50 件発表 ・応用地質学会誌, 第四紀研究, 地球化学等の学会誌に報告	・地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会にて 2 件発表(5 月) ・日本原子力学会「第 19 回バックエンド夏期セミナー」にて 4 件発表(7-8 月) ・その他, 資源素材学会, 物理探査学会, 日本地下水学会などの学会にて 9 件発表	・日本原子力学会「第 19 回バックエンド夏期セミナー」にて 4 件発表(7-8 月) ・日本原子力学会「2003 年秋の大会」にて 4 件発表(9 月) ・土木学会「全国大会」にて 6 件発表(9 月) ・(財)環境科学技術研究所主催のシンポジウムにて 1 件発表(10 月) ・岩盤力学シンポジウムにて 1 件発表(H16 年 1 月) ・JNCー原研合同安全研究成果報告会にて 1 件発表(16 年 2 月)
その他の情報普及活動	・第 2 次取りまとめや年度成果報告書等の報告書や関連する CD-ROM, パンフレット等について, 希望者や関係機関への提供を継続 ・ホームページによる情報提供を継続(情報の更新) ・IAEA の放射性廃棄物研究データベースに, JNC の地層処分技術に関する研究開発の実施状況の英文要旨を登録(26 テーマ)	・日本地下水学会 2003 年秋季講演会に展示出展(10 月) ・東濃地球科学セミナーの開催(9 月) ・東濃エネルギーセミナーの開催(2 月) ・地層研ニュースの発行(毎月) ・東濃鉱山の見学(平成 15 年度見学者はのべ 1,773 名) ・瑞浪超深地層研究所の見学(H15. 10～, のべ 1,090 名) ・ホームページによる情報提供を継続(情報の更新) ・TV, 新聞, 雑誌等の取材対応と新聞などへの取材記事掲載	・幌延フォーラム(12 月) ・広報用パンフレットの更新および関係機関などへの提供 ・広報誌の発行(4 回) ・試錐現場などの見学(平成 15 年度見学者はのべ 225 名) ・ホームページによる情報提供を継続(英文ホームページの作成および情報の更新) ・TV, 新聞, 雑誌等の取材対応と新聞・雑誌などへの取材記事掲載 ・TV, ラジオコマーシャルによる情報提供	・核種移行データベースをホームページ上で公開(8 月) ・日刊工業新聞への記事掲載<出雲大社出土鉄遺物のナチュラルアナログ研究>(11 月 21 日付)

付録 B(2) 平成 15 年度の主な業務実績に関わる公開文献リスト

[本社(各事業所共通の項目を含む)]

- 1-1) 核燃料サイクル開発機構 (2003) : 平成 15 年度地層処分技術に関する研究開発報告会一処分技術の信頼性向上のための基盤整備に向けて, JNC TN1400 2003-014.
- 1-2) 核燃料サイクル開発機構 (2003) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発一平成 14 年度報告一, JNC TN1400 2003-004.

[東濃地科学センター]

- 2-1) 核燃料サイクル開発機構 (2003) : 平成 15 年度地層科学研究情報・意見交換会一要旨集一, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2003-002.
- 2-2) 核燃料サイクル開発機構 (2003) : 広域地下水流動研究 年度計画書 (平成 15 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2003-004.
- 2-3) 天野健治, 岩月輝希, 上原大二郎, 佐々木圭一, 竹内真司, 中間茂雄 (2003) : 広域地下水流動研究 年度報告書 (平成 14 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7400 2003-002.
- 2-4) 核燃料サイクル開発機構 (2003) : 超深地層研究所計画 年度計画書 (平成 15 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2003-005.
- 2-5) 太田久仁雄, 天野健治, 熊崎直樹, 松岡稔幸, 竹内真司, 升本一彦, 藪内 聡, 三枝博光, 稲葉 薫, 向井 圭, 片岡達彦, 岩月輝希, 佐藤稔紀, 中間茂雄, 今津雅紀, 玉井 猛, 見掛信一郎, 大澤英昭, 川瀬啓一, 小出 馨 (2003) : 超深地層研究所計画 年度報告書 (平成 14 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2003-006.
- 2-6) 核燃料サイクル開発機構 (2003) : 東濃鉱山における調査試験研究 年度計画書 (2003 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2003-003.
- 2-7) 笹尾英嗣, 中間茂雄, 竹内真司, 岩月輝希 (2003) : 東濃鉱山における調査試験研究 年度報告書 (2002 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7400 2003-001.
- 2-8) 核燃料サイクル開発機構 (2003) : 地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書 (平成 14 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7440 2003-001.
- 2-9) 核燃料サイクル開発機構 (2003) : 地質環境の長期安定性に関する研究 年度計画書 (平成 15 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7440 2003-002.
- 2-10) White, M. J. and Saegusa, H. (2004) : Representation of fracture zone interpretation uncertainty in 3D geological models of the Mizunami Underground Research Laboratory, Japan, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 807, pp. 533-538.
- 2-11) Ota, K., Iwatsuki, T., Arthur, R. and Metcalfe, R. (2003) : Solubility Constraints on Uranium Concentrations in Groundwaters of the Tono Uranium Deposit, Japan, (Migration'03).
- 2-12) Sato, T., Mikake, S., Sakamaki, M., Aoki, K., Yamasaki, S., Shigeta, N. and Takeda, S. (2003) : Underground Research Laboratories in Japan - What are the important factors for facilities design, Proceedings of ICEM' 03, ICEM03-4736 pp.1-7.

[幌延深地層研究センター]

- 3-1) 核燃料サイクル開発機構 (2003) : 幌延深地層研究計画平成15年度調査研究計画, サイクル機構技術資料, JNC TN1410 2002-002.
- 3-2) 核燃料サイクル開発機構 (2003) : 幌延深地層研究計画平成14年度調査研究成果報告, サイクル機構技術資料, JNC TN5400 2003-001.
- 3-3) Hama, K. and Mackenzie, A. B. (2003) : REDOX investigation around the drift in the Tono Uranium Mine, Japan, ABSTRACTS 13th Annual V. M. Goldschmidt Conference, p.A130, Sept. 2003.
- 3-4) Kunimaru, T. and Metcalfe, R. (2003) : Isotopic study of the groundwater at Horonobe, northern Hokkaido, Japan, ABSTRACTS 13th Annual V. M. Goldschmidt Conference, p.A239, Sept. 2003.
- 3-5) Aoki, K., Kato, K., Hama, K. and Kunimaru, T. (2003) : Preliminary Microbial Analysis of Groundwater in Horonobe, Japan, 16th International Symposium on Environmental Biogeochemistry, p.201, Sept. 2003.

- 3-6) Kurikami, H., Kobayashi, A., Chijimatsu, M., Sugita, Y. and Ohnishi, Y. (2003) : Effect of Coupling Behavior of Near Field on Groundwater Flow of Far Field for Geological Disposal of High Level Radioactive Waste, Proceedings GeoProc 2003 (International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geosystems), pp. 403-408, Oct. 2003.
- 3-7) Matsui, H., Sugihara, K. and Sato, T. (2003) : In-situ Experiments on Excavation Disturbance in JNC' s Geoscientific research program, Proceedings EC CLUSTER Conference (Impact of the Excavation Disturbed Zone on the Performance of Radioactive Waste Geological Repositories), pp. 271-275, Nov. 2003.
- 3-8) Yamasaki, S. (2004) : Underground Research Laboratory Program of Japan; Its Technical and Social Aspects, Abstracts 14th Pacific Basin Nuclear Conference, pp. 166-167, Mar. 2004.

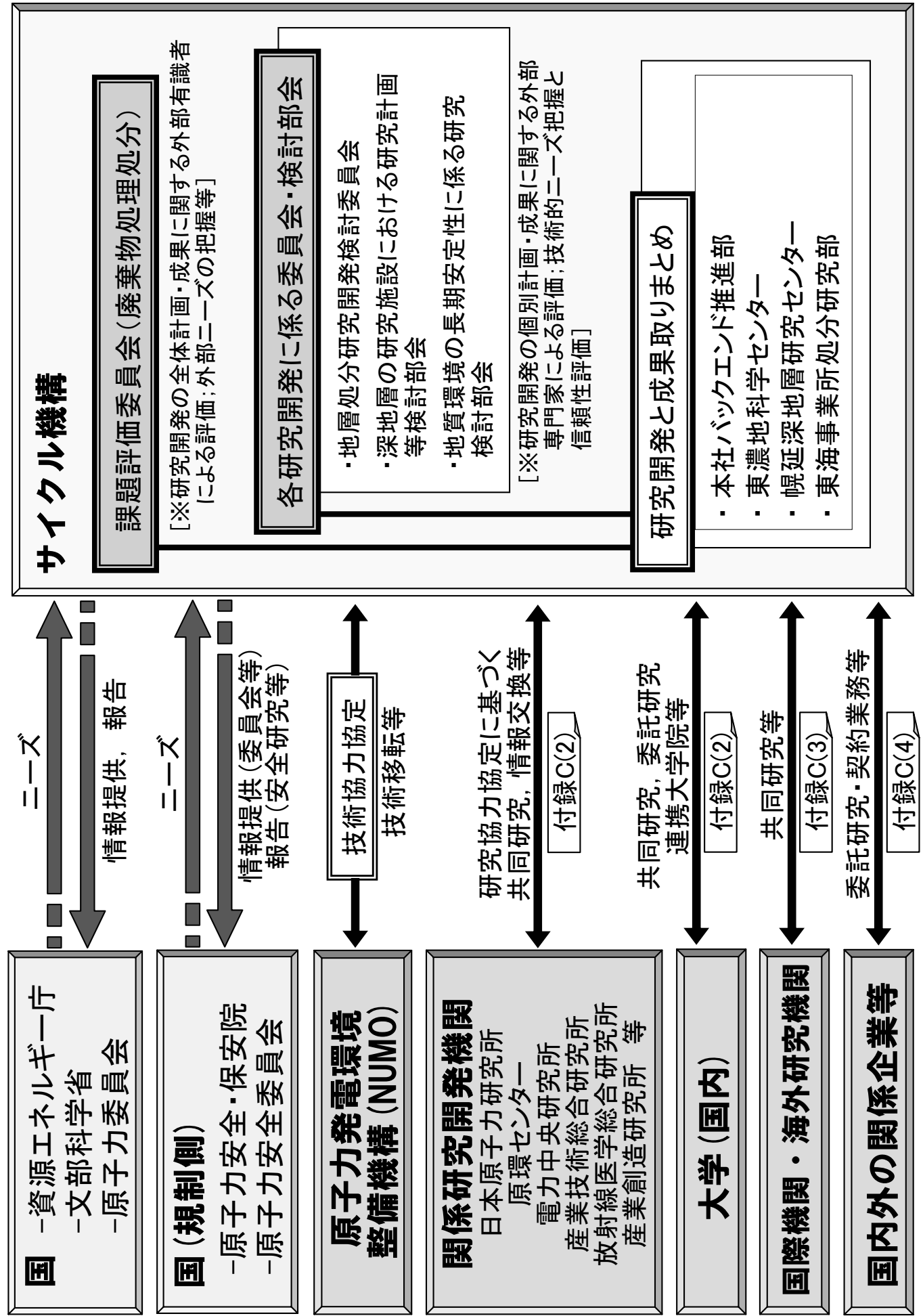
[東海事業所処分研究部]

- 4-1) Ishikawa, H., Yui, M., Uchida, M. and Kamei, G. (2004) : ENTRY 2003 - The International Workshop on Reliable Performance Assessment through Laboratory Experiments and Ground Surface Investigations - 10th Anniversary of ENTRY, JNC TN8200 2003-004.
- 4-2) 北山一美, 油井三和 (2003) : 連載講座 放射性廃棄物の処分 第3回 高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する工学技術, 日本原子力学会誌, Vol. 45, No. 12, pp. 787-797.
- 4-3) Kitamura, A., Shibata, M. and Kitao, H. (2003) : Solubility Measurement of Iron-Selenium Compounds under Reducing Conditions, International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society, Abstracts, Kalmar, Sweden, pp. 177-178.
- 4-4) Sato, H. (2003) : Diffusion and Migration of Ions in Sedimentary Rock Matrix: Effects of Ionic Strength and Tracer Concentration on Diffusion of Cs and I in Sandstone, International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society, 2003, Kalmar, Sweden, Abstracts, pp. 65-66.
- 4-5) Ishidera, T., Miyamoto, S. and Sato, H. (2003) : The Effects of Silica Sand Content and NaNO₃ Concentration on Diffusion of C, Cl and I in Compacted Bentonite, 9th International Conference on Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere, MIGRATION' 03, Abstracts, p. 145.
- 4-6) Kitamura, A. and Kohara, Y. (2003) : Carbonate complexation of Neptunium(IV) in Highly Basic Solutions, 9th International Conference on Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere, MIGRATION' 03, Abstracts, p. 59.
- 4-7) Sato, H. (2003) : Diffusion and Migration of Ions in Sedimentary Rock Matrix: Thermodynamic Properties of Porewater in Sandstone, 9th International Conference on Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere, MIGRATION' 03, Abstracts, pp. 147-148.
- 4-8) Suzuki, S. and Sato, H. (2003) : Study on the Diffusion of Sr, I and Deuterated Water in a Compacted Mixture of Silica Sand and Bentonite, 9th International Conference on Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere, MIGRATION' 03, Abstracts, pp. 150-151.
- 4-9) Yoshikawa, H., Ueno, K., Honda, T., Yamaguchi, S. and Yui, M. (2003) : Analysis of the Excavated Archaeological Iron Using X-ray-CT, The 9th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation (ICEM' 03).
- 4-10) Chijimatsu, M., Jing, L., Millard, A., Nguyen, T. S., Rejeb, A., Rutqvist, J., Souley, M. and Sugita, Y. (2003) : Building Confidence in the Mathematical Models by Calibration with a T-H-M Field Experiment, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp. 181-186.
- 4-11) Ito, A., Yui, M., Sugita, Y. and Kawakami, S. (2003) : A Research Program for Numerical Experiments on the Coupled Thermo-Hydro-Mechanical and Chemical Processes in the Near-field of the High-level Radioactive Waste Repository, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp. 346-351.
- 4-12) Kobayashi, A., Sugita, Y. and Chijimatsu, M. (2003) : Effect of the fracture geometry on the coupled phenomena in large scale, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp. 245-250.
- 4-13) Komine, H., Kurikami, H., Chijimatsu, M., Kobayashi, A. and Ohnishi, Y. (2003) : COUPLED THERMAL, HYDRAULIC AND MECHANICAL SIMULATION WITH THEORETICAL MODEL FOR SWELLING CHARACTERISTICS, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp. 550-555.
- 4-14) Millard, A., Rejeb, A., Chijimatsu, M., Jing, L., De Jonge, J., Kohlmeier, M., Nguyen, T. S., Rutqvist, J., Souley, M. and Sugita, Y. (2003) : Evaluation of THM Coupling on the Safety Assessment of a Nuclear Fuel Waste Repository in a Homogeneous Hard Rock, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp. 199-204.

- 4-15) Neyama, A., Ito, A., Chijimatsu, M., Ishihara, Y., Hishiya, T., Yui, M., Sugita, Y. and Kawakami, S. (2003) : Prototype Code Development for Numerical Experiments on the Coupled Thermo -Hydro -Mechanical and Chemical Processes in the Near-Field of a High-Level Radioactive Waste Repository, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp.358-363.
- 4-16) Nguyen, T. S., Chijimatsu, M., De Jonge, J., Jing, L., Kohlmeier, M., Millard, A., Rejeb, A., Rutqvist, J., Souley, M. and Sugita, Y. (2003) : Implication of Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Processes on the Safety of a Hypothetical Nuclear Fuel Waste Repository, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp.212-217.
- 4-17) Rutqvist, J., Chijimatsu, M., Jing, L., Millard, A., Nguyen, T. S., Rejeb, A., Sugita, Y. and Tsang, C. F. (2003) : Evaluation of the Impact of Thermal-Hydrological-Mechanical Couplings in Bentonite and Near-Field Rock Barriers of a Nuclear Waste Repository in a Sparsely Fractured Hard Rock, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp.205-211.
- 4-18) Sugita, Y., Chijimatsu, M., Ito, A., Kurikami, H., Kobayashi, A. and Ohnishi, Y. (2003) : THM simulation of the full-scale in-situ engineered barrier system experiment in GTS in Switzerland, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp.102-107.
- 4-19) Taniguchi, N., Kawasaki, M., Kawakami, S. and Kubota, M. (2003) : Propagation behavior of localized corrosion of Carbon steel in alkaline groundwater environment, Proceedings of 13th APCCC, Paper No.H-06.
- 4-20) Yoshino, N., Sawada, A. and Sato, H. (2003) : An Examination of Aperture Estimation in Fractured Rock, International workshop on geotechnical X-ray CT (GeoX 2003), pp. 255-261.

【付録 C】

国内外の関係機関との研究協力体制と 平成 15 年度の協力状況



付録 C(2) 地層処分技術に関する研究開発に係る国内の大学・関係機関との協力状況（平成 15 年度の共同研究等の実施状況）

研究機関	組織	共同研究等テーマ名	実施期間(予定)	JNC 実施担当	備考(協力形態等)
【大学との共同研究】					
北海道大学	大学院工学研究科社会基盤工学専攻	軟弱な堆積地層における力学的な初期状態と施工性の評価システムの開発	平成 13～15 年度	東濃)地質環境研究 Gr. 東海)システム解析Gr.	公募型研究(共同研究)
北海道大学	大学院地球環境科学研究科	天然環境における有機物の化学特性に関する研究	平成 14～16 年度	東濃)超深地層研究 Gr.	共同研究
筑波大学	地球科学系	わが国のウラン鉱床に関するナチュラリアナログ研究 ー特に東濃ウラン鉱床についてー	平成 13～15 年度	東濃)地質環境研究 Gr.	公募型研究(共同研究)
東京大学	大学院理学系研究科附属地殻化学実験施設	ストロンチウム同位体比及び希ガスを用いた地球化学的研究手法の確立	平成 13～15 年度	東濃)地質環境研究 Gr.	公募型研究(共同研究)
静岡大学	理学部生物地球環境科学科	遺伝子解析技術等による地下深部微生物調査:遺伝子プローブを用いた微生物群集構造の解析とその定量的評価	平成 15～17 年度	幌延)深地層研究 Gr.	先行基礎工学研究 (共同研究)
京都大学	大学院農学研究科地域環境科学専攻	緩衝材およびその周辺岩盤の力学的安定基準の作成	平成 14～16 年度	東海)処分バリア性能研究Gr.	公募型研究(共同研究)
京都大学	大学院工学研究科都市環境工学専攻	セルオートマン法による亀裂マイクロ構造を考慮した流体物質移行解析	平成 15～17 年度	東海)システム解析 Gr.	先行基礎工学研究 (共同研究)
岡山大学	環境理工学部環境デザイン工学科	長期モニタリングシステムの開発に関する研究:光ファイバーを用いた長期モニタリング装置の開発	平成 14～16 年度	東濃)超深地層研究 Gr.	先行基礎工学研究 (共同研究)
九州大学	大学院工学研究科附属環境システム科学研究センター	オーバーパック材腐食生成物が緩衝材性能に及ぼす影響に関する研究:緩衝材中の鉄イオン及びネプツニウムイオンの拡散挙動	平成 13～15 年度	東海)放射化学研究 Gr.	先行基礎工学研究 (共同研究／研修生)
【大学・学協会への委託研究】					
北海道大学	低温科学研究所	永久凍土が地質環境に与える影響に関する研究		東濃)地質環境研究 Gr.	
北海道大学	大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻	緩衝材中の核種移行挙動に及ぼす処分環境因子に関する基礎的研究	平成 15 年度～	東海)放射化学研究Gr.	
埼玉大学	地圏科学研究センター	割れ目系岩盤を対象とした地質構造のモデル化に関する研究		東濃)地質環境研究 Gr.	
東京大学	大学院新領域創成科学研究科	長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究	平成 6 年度～	東濃)超深地層研究 Gr.	
東京大学	地震研究所	逆断層帯の地質構造の三次元的モデル化のための弾性波探査手法に関する研究	平成 15 年度	東濃)地質環境研究 Gr.	
東京大学	大学院新領域創成科学研究科環境学専攻	核種の有機系コロイドへの収着挙動および多孔質媒体中での有機系コロイドの移行挙動に関する研究	平成 13～15 年度	東海)処分バリア性能研究Gr.	
東京大学	大学院新領域創成科学研究科	ニアフィールド岩盤の長期安定性評価手法の検討	平成 15 年度～	東海)システム解析Gr.	
東京工業大学	大学院理工学研究科地球惑星科学専攻	ベントナイト中の物質移行モデルの高度化研究	平成 14 年度～	東海)放射化学研究Gr.	
名古屋大学	大学院環境学研究科	長期岩盤挙動評価のための微視的観点による基礎的研究	平成 6 年度～	東濃)超深地層研究 Gr.	
名古屋大学	大学院環境学研究科附属地震火山・防災研究センター	GPS データを用いた地殻変動解析手法に関する研究	平成 15 年度～	東濃)地質環境研究 Gr.	
京都大学	大学院工学研究科	超ウラン元素の加水分解及び錯生成に関する研究	平成 13～15 年度	東海)放射化学研究Gr.	
大阪府立大学	総合科学部自然環境科学科	古地磁気学的手法を用いたテクトニクスの復元に関する基礎研究	平成 13 年度～	東濃)地質環境研究 Gr.	
愛媛大学	理学部生物圏科学科／地球深部ダイナミクス研究センター	花崗岩中の割れ目・断層系の形成メカニズムに関する基礎研究	平成 13 年度～	東濃)地質環境研究 Gr.	
九州大学	大学院工学研究院エネルギー量子工学部門	ガラス固化体の長期鉱物化に関する研究	平成 13 年度～	東海)処分バリア性能研究Gr.	
(社)資源・素材学会	三次元応力場の同定手法に関する研究委員会	三次元応力場の同定手法に関する研究	平成 13 年度～	東濃)超深地層研究 Gr.	
	深部地質の調査・解析技術の体系化に関する研究委員会	深部地質の調査・解析技術の体系化に関する研究	平成 15 年度～	東濃)研究情報化 Gr.	
(財)原子力安全研究協会	緩衝材の長期安定性評価に関する調査専門委員会	人工バリアの長期安定性、長期耐食性評価に関する調査研究及び技術レビュー	平成 15 年度～	東海)処分バリア性能研究Gr.	
	オーバーパックの長期安定性に関する調査専門委員会				
	核種移行調査専門委員会	核種移行評価の信頼性向上に関する調査及び技術的レビュー	平成 13 年度～	東海)放射化学研究Gr.	
【関係機関との共同研究】					
日本原子力研究所	燃料サイクル安全工学部処分安全研究室	深部地下環境下における核種移行データの取得及びデータベースの整備	平成 13～17 年度	東海)処分バリア性能研究Gr.	技術情報交換
	燃料サイクル安全工学部廃棄物安全評価研究室	安全評価におけるシナリオ・モデルの不確実性に関する研究	平成 13～17 年度	東海)システム解析Gr.	技術情報交換
産業技術総合研究所	地圏資源環境研究部門	岩盤の力学的特性に関する計測・評価手法の検討	平成元～15 年度	東濃)地質環境研究 Gr.	
	地球科学情報研究部門／地圏資源環境研究部門	地質環境の長期予測に関する研究	平成 13～15 年度	東濃)地質環境研究 Gr.	
	計測標準研究部門	地震計の高精度絶対校正に関する研究	平成 14 年度～	東濃)地質環境研究 Gr.	
(財)原子力環境整備促進・資金管理センター	事業環境整備研究プロジェクト	オーバーパック溶接部の耐食性評価に関する研究	平成 15 年度～	東海)処分バリア性能研究 Gr.	
(財)電力中央研究所	バックエンド研究センター	地質・地下水環境特性評価に関する研究(コントロールボーリング技術開発を含む)	平成 15 年度～	幌延)深地層研究 Gr.	

付録 C(3) 地層処分技術に関する研究開発に係る国際共同研究の平成 15 年度の実施内容

機関名・プロジェクト名	協定等の概要・経緯	研究実施項目	平成 15 年度の主な実施内容・進捗 [本文関連箇所]
Nagra (スイス放射性廃棄物処分 協同組合)	Nagra/JNC 放射性廃棄物管理分野の研究開発に 関する協力(2 国間協力) [昭和 63 年より実施]	・グリムゼル原位置試験場での原位置試験 (HPF, CRR) ・深地層の研究施設計画の立案支援(瑞浪, 幌延) ・ナチュラルアナログ研究(東濃鉱山, マカーリン) ・核種移行研究, インベントリデータ不確実性評価, 研究者の交 換, 他	グリムゼル原位置試験研究では, 結晶質岩中の亀裂を対象に「高アルカリブルームの影響評価 (HPF)」および「コロイドと放射性核種 の遅延評価(CRR)」[5. 2. 4 1)]の 2 つのプロジェクトにおいて原位置試験やモデル解析を継続した。また, 新たな「コロイド生成評価 (CFM)」プロジェクトの計画作成に参加した。東濃ウラン鉱床でのナチュラルアナログ研究[3. 6. 2 1)]および 2 つの深地層の研究施設 計画について, 計画や成果の技術的評価など, 研究手法や調査技術の整備に向けた取り組みを行った。また, ヨルダンでの高 pH 地下 水のナチュラルアナログ研究(マカーリンプロジェクト)について, 最終レポートに関する情報収集を行った。なお, 政情不安のため, 現地調査やワークショップの参加は見合わせた。さらに, インベントリ解析について複数コード間のクロスチェックを実施している。
AECL (カナダ原子力公社)	AECL/JNC 放射性廃棄物管理分野の研究開発に 関する協力(2 国間協力) [平成 6 年より実施]	・URL でのトンネルシーリング試験(熱水環境試験) ・坑道周辺のゆるみ領域シーリング試験 ・坑道周辺の化学的特性の評価(特にセメント周辺)	シーリングに関する施工性や基礎データの取得を目的として, 平成 7 年より実規模(粘土, コンクリート)プラグの止水性能等に関する 試験を実施している。現在は, 4MPa までの昇圧及び温水注水を行うことを中心としたフェーズ 2 試験段階に移行している。このフェー ズ 2 においては, シーリングに関する工学技術の検証に加えて, サイクル機構からの提案に基づき, セメント材料を起源としたニアフ ィールドにおける化学的な影響等についても評価項目に加えている。また, 平成 15 年にシーリングに関する性能試験を終了し, 解体・ サンプリングを実施している。[4. 3. 1]
ANDRA (フランス放射性廃棄物管 理機関)	ANDRA/JNC 放射性廃棄物処分分野における協力(2 国間協力)[平成 11 年より実施]	・岩盤クリープに関するモデルの検証 (ベンチマーク) および地 下水地球化学モデルの検証 (ベンチマーク) を予定していたが, ANDRA 側の研究計画見直しに伴い、現在具体的な研究協力項目選 定のための協議中。	具体的な共同研究を立ち上げるための準備を進めている。
CEA (フランス原子力庁)	CEA/JNC 先端技術(廃棄物処理処分を含む)に 関する協力(2 国間協力)[平成 3 年より実施]	・廃棄物パッケージの長期挙動に関する共同研究 ・コロイド移行, 金属容器材料腐食, 粘土中ガス移行等に関する 情報交換	広範に情報交換を行ったうえで, ガラスの浸出挙動, 核種移行の熱力学・収着データベース, セメント環境中での金属腐食等について, 今後とも情報交換を行っていくことで合意した。
SKB (スウェーデン核燃料廃棄 物管理会社)	スウェーデン地下研究施設 (HRL) に関する国際共 同研究(2 国間協力)[平成 3 年より実施; 平成 11 年より電力中央研究所と共同参画]	・原位置における核種移行試験 (TRUE Block Scale) ・水理・物質移動モデリングタスクフォース ・実規模処分技術の実証試験 (Prototype Repository Project: PRP)	原位置での水理・物質移行試験 (TRUE Block Scale 試験) および水理・物質移行モデリングタスクフォース(平成 16 年 1 月に開催), 並 びに実規模処分技術の実証試験 (Prototype Repository Project: PRP) [4. 2. 2]に参加し, 解析モデルの検証および室内試験において取 得されたデータの確認に反映してきている。
US/DOE (米国エネルギー省)	DOE/JNC 放射性廃棄物管理分野の研究開発に 関する協力(2 国間協力)[昭和 61 年より実施]		
LBNL (ローレンスバークレー国 立研究所)	上記協力協定に基づく「岩盤中の水理・物質移動 に関する共同研究」	・サイト特性調査手法及びモデル化手法の開発 ・亀裂性岩盤中の性能評価と特性調査の連携に係る方法論	幌延地域で実施した試錐調査で得られたデータ及び既存の文献データに基づいて構築した水理地質構造モデルを使用して, 幌延地域の 地層中の特徴(高間隙水圧等)を再現するためのモデル解析に着手した。また, スウェーデンエスボ島 (HRL) で実施されているトレーサ 試験データを使用して, 亀裂性岩盤中の性能評価とサイト特性調査連携のための方法論について検討し, 性能評価の時間スケールでの 移行現象を評価した。
PNNL (パシフィックノースウェ スト国立研究所)	上記協力協定に基づく「熱力学, 吸着の基本デー タ取得に関する共同研究」	・アクチニド元素の熱力学データの整備 ・核種の吸着モデル及び評価用データベース取得整備 ・核種の浸出モデル及び熱力学データの検証, 他	アクチニド元素の水溶液中での固相の結晶化に関する研究を共同で進め, アクチニド元素である U(IV) と Np(IV) を対象とした共沈デー タの取得を行うとともに, 固溶体モデルによる評価を行った。
SNL (サンディア国立研究所)	上記協力協定に基づく「地層処分システムの性能 評価と実験的研究」	・岩石中拡散及びコロイド移行挙動に関する試験, モデル化 ・性能評価手法開発	性能評価研究の一環として地質媒体表面へのコロイド付着に関する実験的研究及び評価モデルの開発を行うとともに, 二次元拡散実験 に基づく亀裂充填物中の拡散現象の把握を行っている。また, 幌延における水理解析結果を用いて, 物質移行感度解析を実施している。
LLNL (ローレンスリバモア国立 研究所)	上記協力協定に基づく「ニアフィールド現象と人 工バリアの性能に関する共同研究」	・人工バリア材料の相互影響についての THC, THMC 連成モデリン グ ・Pitzer データベースの拡張と適用	THC・THMC モデルの開発・連成方法の検討や Pitzer アクチニドデータベースに関する開発を共同研究として実施している。
KAERI (韓国原子力研究所)	KAERI/JNC 地層処分研究開発分野における協力取 り決め(2 国間協力)[平成 15 年 3 月締結]	・地質環境の調査手法の開発 ・工学バリアの長期性能に関する研究 ・放射性核種の挙動及び移行に関する研究 ・性能評価／安全評価手法の開発	平成 16 年 1 月に開催した二機関会議にて, 地質環境の調査手法, 工学バリアの長期性能等に関する具体的な協力テーマを選定し, 情 報交換, 研究者の派遣交換等の研究協力を進めることに合意した。
UCB (カリフォルニア大学パー クレー校)	UCB/JNC 国際共同研究「広域安全評価モデルの統合 化に関する研究」	・亀裂中緩衝材膨潤侵入過程モデル化研究 ・ニアフィールド岩盤における亀裂ネットワークモデル開発・解 析 ・処分場全体性能評価モデルの統合に関する研究	これまで開発してきた, 亀裂中緩衝材膨潤侵入過程モデル, ニアフィールド岩盤における亀裂ネットワークモデル, 処分場全体性能評 価モデルについて信頼性を高めるための改良を行うとともに, これらの個別モデルを統合化し処分場全体領域の性能評価を行うための 手法検討を実施している。
DECOVALEX-III (9 カ国, 14 機関)	熱-水-応力連成モデルの開発確証に関する国際共 同研究プロジェクト [平成 7 年より実施; これまで Phase1, 2 を終了]	・グリムゼル原位置試験場(スイス)での人工バリア試験 (FEBEX), ユッカマウンテン(アメリカ)でのヒーター試験に対する解析と 解析結果比較検討 ・再冠水問題, スケール効果問題に関するベンチマークテスト ・性能評価における連成現象の取扱いに對しての科学的見解の取 りまとめ ・DECOVALEX-THMC の実施内容の検討・調整	DECOVALEX-III として行った FEBEX 試験に関する予測解析, ユッカマウンテンの坑道規模加熱試験に関する THC 解析および「第 2 次取り まとめ」の硬岩系堅置き方式に関する再冠水挙動の THM 解析, 亀裂情報を用いた岩盤物性のスケール効果に関する解析・検討について 成果を取りまとめた[4. 2. 2]。また, 次期フェーズ (DECOVALEX-THMC; 平成 16 年開始予定) の実施内容について, 検討・調整を行った。
Mt. Terri プロジェクト(ス イス連邦水理・地質調査所 主催, 6 カ国 10 機関)	Mt. Terri 地下研究所(オバリナス粘土層を対象)に おける原位置試験研究に関する国際共同研究プロ ジェクト[平成 8 年より参加]	・オバリナス粘土層中の間隙水の地球化学的評価試験	難透水性堆積岩における空隙水の水質の把握および水質形成プロセスのモデル化に関する共同研究を継続的に実施している。
GAMBIT Club (SKB 主催, 6 カ国 6 機関)	緩衝材粘土中のガス移行モデル開発に関する国際 共同研究プロジェクト [平成 8 年より実施; これまでに Phase1~4 が終了]	・緩衝材中ガス移行モデルの開発及び検証 ・新規データのレビュー及び解析 ・力学連成モデルによる実験結果の比較検討	諸外国におけるガス移行試験の結果やガス移行モデルの概念等に関するレビューを進めるとともに, 今後のモデル開発の方向性につい て検討を行った。
NEA/TDB (12 カ国 17 機関)	熱力学データベースプロジェクト (Phase3) [平成 10 年より参加; Phase1 には参加していない]	・Th, Fe, Sn, Mo データのレビュー ・固溶体モデル開発のガイドライン作成	平成 15 年度より Phase3 が開始され, Th, Fe, Sn, Mo のデータベース開発および固溶体モデル開発のガイドライン作成のための活動が 開始された。
NEA/Sorption WG (11 カ国 14 機関)	収着モデル開発プロジェクト (Phase2) [平成 9 年の Phase1 開始より参加]	・収着現象解析モデルにおけるベンチマーク解析の取りまとめ, 報告書の作成等	サイクル機構はモデリングチームの 1 つとして, ベンチマーク計算のためのモデル化作業を実施し, 性能評価の観点からの熱力学的収 着モデルの適用性についての情報の取りまとめを行った[5. 2. 3 2)]。
SCK・CEN (ベルギー原子力研究セン ター)	モル原位置試験場における「CORALUS- α 放射性高 レベルガラスの複合原位置試験」に関する国際共 同研究[平成 12 年より実施中]	・JNC 核種移行モデルやデータベースの検証作業 ・ベントナイト中の間隙水化学のモデル化 ・核種移行パラメータ設定と核種移行解析 他	実施中の原位置試験の体系を対象として, 粘土中の間隙水化学, ガラス溶解, 核種移行を考慮した予測解析を実施し, 11 月のワークシ ョップで報告するとともに, モデルの妥当性に関する議論を行った。[5. 2. 3 1)]
IAEA-CRP (13 カ国 15 機関)	地質環境条件下における高レベル廃棄体の化学的 耐久性と性能評価に関する国際共同研究プロジェ クト[平成 11 年より実施中]	・高レベル放射性廃棄体の化学的耐久性や性能評価手法に関する 研究	ガラス固化体等の高レベル放射性廃棄体の化学的耐久性試験や性能評価手法等に関して, 最新情報の共有や手法開発について共同研究 を進めている。

【付録 D】

公開文献リスト（平成 15 年度）

付録 D 公開文献リスト（平成 15 年度）

【本社】

- 石黒勝彦（2004）：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の現状（1）地層処分技術に関する研究開発の全体概要，日本原子力学会 2004 年春の年会，総合講演・報告。
- 核燃料サイクル開発機構（2003）：平成 15 年度地層処分技術に関する研究開発報告会―処分技術の信頼性向上のための基盤整備に向けて，JNC TN1400 2003-014。
- Neall, F. B. and Smith, P. A. (2004) : H12: Examination of Safety Assessment Aims, Procedures and Results from a Wider Perspective, JNC Technical Report (Collaborative Study between Nagra and JNC), JNC TN1400 2004-001.
- 清水和彦（2004）：地下研究施設計画について，第 7 回 NUCEF セミナー要旨集。
- 清水和彦，石丸恒存，前川恵輔（2004）：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の展開，土木学会論文集，No. 756，VI-62，pp. 1-20。

【東濃地科学センター】

- Alexander, W. R., Ota, K. and Frieg, B. (eds.) (2003) : Grimsel Test Site Investigation Phase IV (1994-1996) : The Nagra-JNC In Situ Study of Safety Relevant Radionuclide Retardation in Fractured Crystalline Rock, II: The RRP Project Methodology Development, Field and Laboratory Tests, Nagra Technical Report, NTB 00-06.
- 天野健治，岩月輝希，上原大二郎，佐々木圭一，竹内真司，中間茂雄（2003）：広域地下水流動研究 年度報告書（平成 14 年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2003-002。
- Arthur, R. (2003) : 東濃地域を対象とした地球化学モデルの構築，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；三菱商事株式会社），JNC TJ7400 2003-007。
- Arthur, R., Iwatsuki, T., Murakami, Y., Metcalfe, R., Sasao, E., MacKenzie, A. B., Berke, M., McKibben, M. and Ota, K. (2003) : The Tono Natural Analogue Project: Geochemical constraints on uranium mobility within the Tono uranium deposit, Japan, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(18S), p. A24.
- 浅森浩一，梅田浩司，小川康雄，武田祐啓，千葉昭彦，趙 大鵬，鍵山恒臣（2003）：雲仙岳下における比抵抗及び地震波速度構造，地球惑星科学関連学会合同大会予稿集（CD-ROM），V055-034。
- Debski, W. (2003) : The Indirect Location Algorithm: A Combination of the GPS and Acoustic Ranging Techniques, Abstracts, 2003 Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting（CD-ROM），S047-004。
- Debski, W., Jin, A. and Ando, M. (2003) : Tomography by Monte Carlo Sampling-Western Tottori Case, Abstracts of XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG 2003), p. A. 450.
- 藤原 治，池原 研，七山 太（2003）：地震イベント堆積物研究の展望―トピックセッションの趣旨―，日本地質学会第 110 年学術大会講演要旨，p. 27。
- 藤原 治，鎌滝孝信（2003）：内湾における津波堆積シーケンスとフィリピン海プレート北東縁の津波ポテンシャル，地球惑星科学関連学会合同大会予稿集（CD-ROM），J078-P007。
- 藤原 治，鎌滝孝信（2003）：堆積物からみた南関東におけるプレート間地震の再来間隔. 第 20 回歴史地震研究発表会講演要旨集，p. 26。
- 藤原 治，鎌滝孝信（2003）：津波堆積物の堆積シーケンス内での分布―南関東の完新世内湾堆積物の例―，日本堆積学会第 1 回記念例会プログラム講演要旨，pp. 96-97。
- 藤原 治，鎌滝孝信，松本 弾（2003）：内湾における遡上過程を反映した津波堆積物の水平方向の岩相変化―房総半島南部の完新統の例―，地球惑星科学関連学会合同大会予稿集（CD-ROM），J078-005。
- 藤原 治，柳沢幸夫，島本 昌憲（2003）：FT 年代と珪藻化石層序からみた長町―利府断層のテクトニックインバージョンの時期，地球惑星科学関連学会合同大会予稿集（CD-ROM），G015-004。

- Furue, R., Iwatsuki, T., Mizuno, T. and Mie, H. (2003) : Data Book on Groundwater Chemistry in the Tono Area, JNC Tech. Rep., JNC TN7450 2003-001.
- 古江良治, 岩月輝希, 水野 崇, 彌榮英樹 (2003) : 試錐孔を利用した地下水の地球化学特性調査手法と品質管理, サイクル機構技術資料, JNC TN7520 2003-001.
- Ghimire, H. N., Ishijima, Y., Sugawara, T and Nakama, S. (2004) : Development of Stress Measuring System by Overcoring Method Suitable for Soft Rocks, 資源と素材, 120, pp.32-38.
- Gautam, M. R., Watanabe, K. and Saegusa, H. (2003) : Analysis of hydraulic pressure fluctuation in deep geologic formations in Tono area, Japan using artificial neural networks, Journal of Hydrology, 284, pp.174-192.
- 郷家光男, 多田浩幸, 堀田政國, 若林成樹 (2003) : 研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の透水性変化予測解析, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 清水建設株式会社), JNC TJ7400 2003-003.
- 後藤和幸, 升元一彦, 向井 圭, 竹内真司 (2004) : 水圧モニタリングデータの地球潮汐・気圧変動成分の分離解析, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.445-450.
- Hasada, Y. and Kumazawa, M. (2003) : Travel Time Analysis of Frequency-Domain Data Obtained by ACROSS System, Abstracts of XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG 2003), p. A.145.
- 羽佐田葉子, 熊澤峰夫, 鶴我佳代子, 國友孝洋, 長尾大道, 茂田直孝 (2003) : 能動的な地殻状態常時監視システムー (5) ACROSS アレイデータの解析手法の開発ー, 日本地震学会講演予稿集秋季大会, p.273.
- Hasi, B. and Takeuchi, A. (2003) : Behavior and geometry of complicated strike-slip fault system -A case of Atotsugawa fault system, central Japan, Abstracts, 2003 Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting (CD-ROM) , J027-P020.
- Hirahara, K., Hyodo, M. and Ooi, Y. (2003) : Strain Accumulation Model on the Atotugawa Fault System, an Inland Active Fault System, Located in the High-Strain Rate Zone, Central Japan, Abstracts of XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG 2003), SS03/07P/A02-012.
- 穂刈利之, 澤口 廣, 堀田政國 (2003) : 超深地層研究所計画における浅層試錐孔への地下水長期観測システムの購入・設置, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 清水建設株式会社), JNC TJ7440 2003-006.
- 細田 宏, 下山昌宏, 竹村聖吾 (2003) : MIU-2、MIU-3 号孔への MP システムの再設置, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 応用地質株式会社), JNC TJ7440 2003-007.
- 市川康明 (2003) : 長期岩盤挙動評価のための微視的観点による基礎的研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 名古屋大学), JNC TJ7400 2003-002.
- Imanishi, K., Ito, H., Kuwahara, Y. and Kano, Y. (2003) : Detection of Stopping Phases by Borehole Observations, Abstracts of XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG 2003), p. A.475.
- 今西和俊, 伊藤久男, 桑原保人, 加納靖之, 柳谷 俊, 伊藤 潔, 和田博夫 (2003) : 断層セグメント境界の理解へ向けて (2) 一跡津川断層稠密地震観測による震源パラメータの推定ー, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), S052-008.
- 稲葉 薫, 三枝博光, 竹内真司 (2003) : ローカルスケールを対象とした地下水流動のモデル化・解析領域の設定, 第 19 回バックエンド夏期セミナー資料集, pp.2.16-1 - 2.16-6.
- 石井英一, 天野健治, 水野 崇, 竹内真司 (2003) : 瑞浪超深地層研究所における地質学的研究ー土岐花崗岩を対象とした地下水の流動経路に関する研究事例ー, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), G018-011.
- Ito, K., Wada, H., Ohmi, S., Ueno, T. and Yoshii, K. (2003) : Detailed Seismicity and Crustal Structure in the Atotsugawa Fault a Party Creeping Fault, Central Honshu, Japan, Abstracts of XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG 2003), p. A.149.
- 伊藤 茂, 阿部雅人, 渡辺雅人, 中居 優, 東山久代 (2003) : 東濃地科学センターにおけるペレトロン の現状, 第 16 回タンデム型加速器及びその周辺技術の研究会報告集, pp.8-11.
- Itoh, Y., Amano, K. and Kumazaki, N. (2003) : Early Miocene paleomagnetic data of core samples obtained from the Mizunami Area, central Japan, Abstracts, 2003 Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting (CD-

ROM) , E012-P008.

Iwatsuki, T., Arthur, R., Ota, K. and Metcalfe, R. (2003) : Solubility Constraints on Uranium Concentrations in Groundwaters of the Tono Uranium Deposit, Japan, MIGRATION'03, Abstracts, pp.170-171.

Iwatsuki, T., Furue, R. and Mizuno, T. (2003) : Geochemical conceptual model at an Underground Research Laboratory (URL) construction site, Mizunami, Japan, Geochimica et Cosmochimica Acta, 67(18S), p.A182.

岩月輝希, 古江良治, 水野 崇 (2003) : 瑞浪超深地層研究所における地球化学研究 (その 1) - 堆積岩中の地下水の化学組成について -, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), G018-P001.

岩月輝希, 彌榮英樹, 古江良治, 水野 崇 (2003) : 深部地質環境の長期安定性に関する研究, 第 19 回バックエンド夏期セミナー資料集, pp.2.15-1 - 2.15-4.

岩月輝希, 村上由記, 長沼 毅 (2003) : 東濃地域における地下深部の生物化学的な酸化還元緩衝能力について, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), B001-P012.

岩月輝希, 村上由記, 長沼 毅, 濱 克宏 (2003) : ウラン鉱床の長期保存に関わる岩盤の酸化還元緩衝能力ー東濃地域における天然環境の水ー鉱物ー微生物システムの研究例ー, 地球化学, 37, pp.71-82.

核燃料サイクル開発機構 (2003) : 超深地層研究所計画 年度計画書 (平成 15 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2003-005.

核燃料サイクル開発機構 (2003) : 地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書 (平成 14 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7440 2003-001.

核燃料サイクル開発機構 (2003) : 地質環境の長期安定性に関する研究 年度計画書 (平成 15 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7440 2003-002.

核燃料サイクル開発機構 (2003) : 平成 15 年度 地層科学研究情報・意見交換会一要旨集一, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2003-002.

核燃料サイクル開発機構 (2003) : 広域地下水流動研究 年度計画書 (平成 15 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2003-004.

核燃料サイクル開発機構 (2003) : 東濃鉱山における調査試験研究 年度計画書 (2003 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2003-003.

角田地文, 梅田浩司, 棚瀬充史, 福田大輔 (2003) : 紀伊半島南部における温泉湧出裂か系と温泉水・温泉ガスの地球化学, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), H060-007.

鎌滝孝信, 藤原 治 (2003) : 津波などの急速な堆積イベントを示す貝類化石群, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), J078-P006.

片岡達彦, 前村庸之, 竹内真司, 松井裕哉, 向井 圭 (2003) : 坑道周辺における不飽和領域の原位置計測手法の研究ーキャリブレーション試験の簡略化と計測装置の開発についてー, サイクル機構技報, No. 19, pp.41-50.

片岡達彦, 竹内真司, 中間茂雄, 前村庸之 (2003) : TDR による岩石の体積含水率の測定, 資源・素材 2003 (宇部) 大会プログラム, p.31.

加藤春實 (2003) : DH-2 孔のコアを用いた土岐花崗岩の異方性に関する室内試験, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 同和公営株式会社), JNC TJ7400 2003-001.

加藤春實 (2003) : 深部岩盤における初期応力測定プローブの改良および原位置適用試験, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 同和公営株式会社), JNC TJ7410 2003-003.

加藤春實, 佐藤稔紀, 中間茂雄, 長 秋雄 (2003) : ボーリングコアの三次元弾性波速度分布と初期応力の関係について, 資源・素材 2003 (宇部) 大会プログラム, pp.69-70.

加藤俊樹, 松木浩二, 坂口清敏, 中間茂雄, 佐藤稔紀 (2004) : 断層を含む不均一岩体の広域応力場評価法, 資源・素材学会平成 16 年度春季大会講演集(I)資源編, pp.11-12.

河村秀紀, 納多 勝, 西川直仁, 佐藤晶子, 田中達也 (2003) : 地質環境特性調査・評価技術に関する情報収集・分析と地質環境特性に関する研究への適用, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 株式会社大林組), JNC TJ7410 2003-002.

Kawasaki, S., Nakamura, K., Sato, T., Nakama, S. and Kaneko, K. (2003) : Estimation of Regional Stress and Stress Distribution, Rock Stress (Sugawara, Obara and Sato eds.), pp.419-424.

- 木村直樹, 松木浩二, 中間茂雄, 佐藤稔紀 (2003): 不均一岩体の広域応力場評価法, 資源と素材, 119, pp.655-662.
- 木下博久, 原口 強, 高田圭太 (2003): ジオスライサーによる定方位地層採取方法, 日本応用地質学会中部支部平成 15 年度支部研究発表会・講演会予稿集, pp.21-24.
- 郡谷順英, 野原 壯, 鈴木元孝 (2003): 稠密なボーリングコアデータから推定できる月吉断層の形態と活動履歴について, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), G015-P003.
- 工藤 健, 古本宗充 (2003): リソスフェア強度の異方性についてー (1) 北米グレート・ベーズンにおける検証ー, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), T054-005.
- Kudo, T., Nohara, T., Kinoshita, H., Yamamoto, A. and Shichi, R. (2003): Variations of Standard Deviation of Gravity Anomalies in Chugoku District, Japan: Relationship with Distributions of Topographic Lineaments, Abstracts of American Geophysical Union 2003 Fall Meeting, p.F1428.
- Kumazaki, N., Ikeda, K., Goto, J., Mukai, K., Iwatsuki, T. and Furue, R. (2003): Synthesis of the Shallow Borehole Investigations at the MIU Construction Site, JNC Tech. Rep., JNC TN7400 2003-005.
- 熊崎直樹, 池田幸喜, 後藤淳一, 向井 圭, 岩月輝希, 古江良治 (2004): 超深地層研究所計画における地表からの地質環境特性調査ー繰返しアプローチに基づく調査の事例ー, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集, p.807.
- Kumazawa, M., Kunitomo, T., Nakajima, T., Tsuruga, K., Hasada, Y., Nagao, H., Matsumoto, H. and Shigeta, N. (2003): The Monitoring Methodology of Underground States by ACROSS (Accurately Controlled, Routinely Operated Signal System) as a Measurement Method of Linear Dynamic System, Abstracts of XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG 2003), p.A.145.
- 熊澤峰夫, 國友孝洋, 鶴我佳代子, 羽佐田葉子, 茂田直孝, 中島崇裕, 長尾大道, 松本裕史 (2003): 能動的な地殻状態常時監視システムー (1) ACROSS アレイの構想ー, 日本地震学会講演予稿集秋季大会, p.118.
- 熊澤峰夫, 鶴我佳代子, 茂田直孝, 中島崇裕, 永井 亨 (2004): 不均質媒体中の波動支配方程式の線形力学系 システム関数への変換による波動場計算法, 第 53 回理論応用力学講演会講演論文集, p.5.
- 國友孝洋, 熊澤峰夫 (2003): 回転型 ACROSS 送信装置における周波数変調の最適化, 日本地震学会講演予稿集秋季大会, p.271.
- Kunitomo, T. and Kumazawa, M. (2003): Optimum FM Signal for Monitoring the Underground States by Means of the Seismic ACROSS, Abstracts of XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG 2003), p.A.145.
- 國友孝洋, 熊澤峰夫, 長尾大道, 鶴我佳代子, 羽佐田葉子, 茂田直孝 (2003): 能動的な地殻状態常時監視システムー (2) 東濃鉱山における弾性波 ACROSS 連続送信ー, 日本地震学会講演予稿集秋季大会, p.271.
- Kunitomo, T., Kumazawa, M. and Yamaoka, K. (2003): The Broadcast Station of ACROSS Signals on Seismic Observation Networks for Monitoring the Earth's Crust, the Start at Tono Mine, Abstracts of XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG 2003), p.A.145.
- 黒澤英樹, 野原 壯, 三輪敦志, 浅森浩一 (2003): 鳥取県西部地震震源断層近傍の地下水位の変化とその原因について, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), S043-P002.
- 栗栖圭太郎, 中村圭太, 川崎 了, 金子勝比古, 佐藤稔紀, 中間茂雄 (2004): 地盤内三次元応力分布の評価法, 資源・素材学会平成 16 年度春季大会講演集(I)資源編, pp.13-14.
- 前村庸之, 細野高康, 片岡達彦 (2003): TDR による岩盤の水分飽和度の原位置計測, 日本地下水学会 2003 年秋季講演会講演要旨, pp.10-13.
- 前村庸之, 細野高康, 竹内真司, 片岡達彦 (2003): 誘電率測定法による原位置岩盤の水分飽和度測定, 全地連「技術 e フォーラム 2003」さいたま講演集, 7.
- Mamada, Y., Kuwahara, Y., Ito, H. and Takenaka, H. (2004): Discontinuity of the Mozumi-Sukenobu fault low-velocity zone, central Japan, inferred from 3-D finite-difference simulation of fault zone waves excited by explosive sources, Tectonophysics, 378, pp.209-222.
- Mamada, Y., Kuwahara, Y., Ito, H. and Takenaka, H. (2003): Discontinuity of the Mozumi-Sukenobu Fault Low-Velocity Zone Inferred from 3D Finite-Difference Simulation of the Fault Zone Waves Excited by Explosive Sources, Abstracts of XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG 2003), p.A.457.

- Mandernack, K. W., Iwatsuki, T. and Murakami, Y. (2003) : The Biogeochemistry of Deep Subsurface Environment of the Tono Mine, Toki, Japan, Applied Isotope Geochemistry 2003 (CD-ROM).
- Martin, A. J., Takahashi, M., Umeda, K. and Yusa, Y. (2003) : Probabilistic Methods for Estimating the Long-Term Spatial Characteristics of Monogenetic Volcanoes in Japan, *Acta Geophysica*, 51, pp.271-189.
- Martin, A. J., Takahashi, M., Yusa, Y., Umeda, K. and Tanemura, M. (2003) : Joining Geothermal Data by Bayesian Inference to Improve Volcanic Risk Assessment, Abstracts of XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG 2003), p.A.564
- Martin, A. J., Takahashi, M., Yusa, Y., Umeda, K. and Tanemura, M. (2003) : Utilizing Point Processes to Model Vent Alignments and Shifts in the Higashi-Izu Monogenetic Volcano Group, Japan, *Geophysical Research Abstracts Vol 5*, European Geophysical Union, EAEo3-A-04936.
- 升元一彦, 向井 圭, 竹内真司 (2004) : 花崗岩地域における大深度長期間隙水圧モニタリング, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 277-282.
- 升元一彦, 片岡達彦, 竹内真司 (2003) : 連続波レーダーと TDR を用いた坑道周辺の不飽和領域の評価, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp. 191-194.
- 升元一彦, 竹内真司 (2003) : 遮水性能を有する断層近傍における水圧モニタリング, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, CS7-070, pp. 417-418.
- 松本裕史, 茂田直孝, 熊澤峰夫, 中島崇裕 (2003) : アクロス計測による複素誘電率スペクトル測定－4. 改良四極法による 1/f 型誘電分散の測定－, 日本地震学会講演予稿集秋季大会, p. 235.
- Matsumoto, H., Shigeta, N., Kumazawa, M. and Nakajima, T. (2003) : Study of dielectric dispersion in moist rocks at low frequency as a possible clue for sounding of H₂O in the Earth's crust, Abstracts of American Geophysical Union 2003 Fall Meeting, p.F525.
- Matsumoto, H., Shigeta, N., Kumazawa, M. and Nakajima, T. (2003) : Study of Dielectric Dispersion of Ionic Conductors as a Possible Observables of ACROSS, Abstracts of XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG2003), volume A, p.17.
- 松本裕史, 茂田直孝, 中島崇裕, 熊澤峰夫 (2003) : アクロス計測による複素誘電率スペクトル測定 III. イオン伝導体のバルク物性と界面物性, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), I019-P005.
- Matsuura, Y. and Takeuchi, A. (2003) : Tectonic Creep of the Atotsugawa Fault System, Inferred from GPS Observation, Abstracts of XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG 2003), JSG01/08P/D-007.
- 松浦友紀, 竹内 章, Hasi, B. (2003) : GPS 観測からみた跡津川断層系のクリープ運動, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), D007-P010.
- Metcalf, R. (2003) : 放射性塩素同位体比 (³⁶Cl/³⁵Cl) に基づく地球化学解析, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 三菱商事株式会社), JNC TJ7400 2003-006.
- Metcalf, R., Takase, H., Sasao, E., Ota, K., Iwatsuki, T., Arthur, R. C., Stenhouse, M., Zhou, W. and MacKenzie, A. B. (2003) : The Tono Natural Analogue Project: A system model for the origin and evolution of the Tono uranium deposit, Japan, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(18S), p.A288.
- 彌榮英樹, 岩月輝希, 古江良治, 水野 崇 (2003) : 岐阜県東濃地域における地下水の地球化学特性に関する調査例について, 日本地下水学会 2003 年秋季講演会講演要旨, pp. 22-25.
- 見掛信一郎, 北川義人, 佐藤稔紀, 坂巻昌工 (2003) : 瑞浪超深地層研究所の建設計画, 原子力学会中部支部研究発表会
- 見掛信一郎, 佐藤稔紀, 下野正人, 田口洋輔, 亀村勝美 (2003) : 超深地層研究所施設建設へのリスクマネジメント手法の適用について, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, CS7-028, pp. 333-334.
- 宮原智哉, 若松尚則, 小田川信哉, 片岡達彦, 竹内真司 (2003) : 樹林部における蒸発散量算定手法の適用性検討－超深地層研究所計画用地における検討例－, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp. 385-388.
- 水野 崇, 岩月輝希, 古江良治 (2003) : 瑞浪超深地層研究所における地球化学調査 (その 2) －花崗岩中の地下水水質形成プロセスについて－, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), G018-P002.
- 水野 崇, 岩月輝希, 古江良治, 彌榮英樹 (2003) : 瑞浪超深地層研究所における地下水の地球化学特性について, 日本地球化学学会年会講演要旨集 (第 50 回), p. 21.

- Mizuno, T., Nishigami, K., Ito, H. and Kuwahara, Y. (2003): Deep Structure of the Nojima and the Mozumi-Sukenobu Faults, Japan, by Subsurface Observation of Fault-Zone Trapped Waves, Abstracts of XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG 2003), p.A.459.
- 水田義明, 金子勝比古, 松木浩二, 菅原勝彦, 須藤茂韶 (2003): 3次元応力場の同定手法に関する研究 (その2), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 社団法人資源・素材学会), JNC TJ7400 2003-004.
- Möri, A., Mazurek, M., Adler, M., Schild, M., Siegesmund, S., Vollbrecht, A., Ota, K., Sndö, T., Alexander, W. R., Smith, P. A., Haag, P. and Bühler, Ch. (2003): Grimsel Test Site Investigation Phase IV(1994-1996); The Nagra-JNC in Situ Study of Safety Relevant Radionuclide Retardation in Fractured Crystalline Rock, IV: The in Situ Study of Matrix Porosity in the Vicinity of a Water Conducting Fracture, Nagra Technical Report, NTB 00-08.
- 森 孝之, 田部井和人, 岩野圭太, 中間茂雄, 佐藤稔紀, 松井裕哉 (2004): 亀裂開口現象を考慮した大深度坑道掘削の解析的検討, 第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.457-462.
- Murakami, Y., Fujita, Y., Iwatsuki, T. and Naganuma, T. (2003): Abundance and Viability of Subsurface Microbial Communities in Sedimentary and Igneous Rock Aquifers, Land and Marine Hydrogeology (Taniguchi, Wang and Gamo eds.), pp.115-140.
- 村上由記, 岩月輝希, Mandernack, K., 長沼 毅 (2003): 東濃地域の地下水における硫酸還元菌の活性と電子供与体利用能, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), B001-P013.
- 村上由記, 岩月輝希, 長沼 毅 (2003): 東濃地域における地下水化学と地下微生物の相互作用, 地学雑誌, 112, pp.277-287.
- Murakami, Y., Mandernack, K. W., Iwatsuki, T. and Naganuma, T. (2003): Activity and Electron Donor Utility of Sulfate-Reducing Bacteria in Groundwater of the Tono Uranium Deposit, 16th International Symposium on Environmental Biogeochemistry Abstracts (I), p.39.
- 長沼 毅, 岩月輝希, 村上由記, 濱 克宏, 岡本拓士, 谷本大輔, 藤田夕佳 (2003): 深部地質環境に対する微生物の影響に関する研究—地下微生物群集の種組成と代謝の多様性に関する研究—, サイクル機構技術資料 (先行基礎工学分野に関する研究詳細報告書; 広島大学), JNC TY7400 2003-001.
- 長尾大道, 中島崇裕, 熊澤峰夫, 國友孝洋 (2003): 重みつきスタッキング法によるアクロス受信信号の SN 比の向上, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), E011-P014.
- Nagao, H., Nakajima, T., Kumazawa, M. and Kunitomo, T. (2003): Weighted Stacking Method for Received Signals in ACROSS System, Abstracts of XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG 2003), p.A.145.
- 長尾大道, 中島崇裕, 熊澤峰夫, 國友孝洋 (2003): 最適重みつきスタッキング法による高 SN 比アクロス受信信号の取得, 第114回 地球電磁気・地球惑星圏学会講演会講演予稿集, C22-14.
- 長尾大道, 中島崇裕, 熊澤峰夫, 國友孝洋, 鶴我佳代子, 羽佐田葉子 (2003): 能動的な地殻状態常時監視システム—(4) 最適重みつきスタッキング法による高 SN 比 ACROSS 信号の取得—, 日本地震学会講演予稿集秋季大会, p.272.
- 長尾敬介, 上田 晃, 亀井淳子, 後藤綾子, 川村 淳, 岩月輝希, 濱 克宏 (2003): 岐阜県東濃地域地下水の希ガス・Sr 同位体研究, 第51回質量分析総合討論会 (2003) 講演要旨集, pp.306-307.
- 長田和洋, 梶川和弘, 水落幸広 (2003): 改良設計のための指向性レーダー適用試験, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 株式会社物理計測コンサルタント), JNC TJ7420 2003-001.
- Nakajima, T., Kunitomo, T., Kumazawa, M., Sigeta, N. and Nagao, H. (2003): Observations of the Transfer Function Using an Electromagnetic Sounding System, Abstracts of EM-ACROSS, XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG 2003), p.A.146.
- 中島崇裕, 國友孝洋, 長尾大道, 熊澤峰夫, 茂田直孝 (2003): 東濃電磁アクロスシステムによる連続送受信試験, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), E011-P015.
- 中島貴弘, 中間茂雄, 林 叔民, アイダンオメル (2003): 堆積軟岩における水平試験孔の孔壁崩壊現象の計測, 資源・素材 2003 (宇部) 秋季大会企画発表・一般発表(A)(B)資料, pp.77-78.
- 中間茂雄, 中島貴弘, 青木俊朗, 佐藤稔紀 (2003): DH-2 号孔の岩芯を用いた力学特性調査結果, サイクル機構技術資料, JNC TN7400 2003-003.

- 中間茂雄, 佐藤稔紀 (2003) : 超深地層研究所計画における岩盤力学研究の現状－東濃地域を例とした様々なスケールを対象とした初期応力評価－, 資源・素材 2003 (字部) 大会プログラム, pp.127-130.
- Nakama, S., Sato, T., Kato, H. and Kikuchi, S. (2003) : Development of the three-dimensional in-situ stress measurement equipment with the overcoring method and its field application for deep boreholes, Rock Stress (Sugawara, Obara and Sato eds.), pp.327-332.
- 並木和夫, 鈴木健一郎, 小田匡寛, 中間茂雄 (2003) : 比抵抗計測を用いた大型岩石供試体の損傷の可視化 (その 2), 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, III-340, pp.679-680.
- 鳴橋龍太郎, 須貝俊彦, 藤原 治, 栗田泰夫 (2003) : ボーリングコアの解析からみた完新世における桑名断層の活動間隔評価, 日本第四紀学会 2003 年大会講演要旨集, 33, pp.26-27.
- 新里忠史 (2003) : 東濃ウラン鉱床におけるナチュラルアナログ研究－ウラン鉱床分布域における月吉断層の活動履歴－, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), G018-P004.
- Niizato, T., MacKenzie, A. B., Iwatsuki, T., Ota, K. and Sasao, E. (2003) : The Tono Natural Analogue Project: Uranium migration in sedimentary rocks, the Tono uranium deposit, Japan, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(18S), p.A334.
- Nishigami, K., Fujisawa, I., Tadokoro, K., Ito, K. and Wada, H. (2003) : Seismological Investigation of Deep Structure of the Atotsugawa Fault, Central Japan, Abstracts of XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG 2003), p.A.459.
- 野原 壯, 郡谷順英, 鈴木元孝 (2003) : 第三紀月吉断層近傍の中新統中の小断層と地震に伴う地下水流動の変化との関係について, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), S043-P003.
- Nohara, T., Nakatuka, N. and Takeda, S. (2003) : Research of fault activity in Japan, "Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Argillaceous Media" (OECD/NEA), pp.47-51.
- 大井陽一, 平原和朗, 安藤雅孝, 細 善信, 和田安男 (2003) : GPS 観測による跡津川断層系および NKTZ におけるひずみ速度場の詳細解析, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), S075-005.
- 及川輝樹, 梅田浩司 (2003) : 中部日本における火山活動の時空分布－両白・飛騨・北部フォッサマグナ・信越・関東山地地域の火山活動様式の変遷からみた後期鮮新世以降の地殻応力場の変遷－, 日本火山学会講演予稿集, p.163.
- 及川輝樹, 梅田浩司, 棚瀬充史, 二宮 淳, 原山 智 (2003) : 飛騨山脈およびその周辺の新生代応力場の変遷－岩脈群と火山活動様式からみた 2～3Ma における応力場の転換期－, 日本地質学会第 110 年学術大会講演要旨, p.263.
- Ota, K. and Amano, K. (2003) : Characterisation of Water-Conducting Fractures in Crystalline Rocks: Experience from Kamaishi URL Programme to Current MIU Programme, MRS2003 Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII Abstracts, pp.155-156.
- 太田久仁雄, 天野健治, 熊崎直樹, 松岡稔幸, 竹内真司, 升本一彦, 藪内 聡, 三枝博光, 稲葉 薫, 向井 圭, 片岡達彦, 岩月輝希, 佐藤稔紀, 中間茂雄, 今津雅紀, 玉井 猛, 見掛信一郎, 大澤英昭, 川瀬啓一, 小出 馨 (2003) : 超深地層研究所計画 年度報告書 (平成 14 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2003-006.
- 太田久仁雄, 佐藤稔紀, 小出 馨, 坂巻昌工 (2004) : 超深地層研究所計画－地層科学研究の現状－, 第 7 回 NUCEF セミナー要旨・スライド集, W-17.
- 太田久仁雄, 湯佐泰久 (2003) : 放射性廃棄物地層処分概念とナチュラルアナログ研究の役割, 「資源環境地質学－地球史と環境汚染を読む－」 (資源地質学会), pp.379-386.
- Reeves, P. C., McKenna, S. A., Takeuchi, S. and Saegusa, H. (2003) : Evolution of Neural Networks for the Prediction of Hydraulic Conductivity as a Function of Borehole Geophysical Logs: Shobasama Site, Japan, Proceedings of the AGU Fall Meeting (CD-ROM), H11F-0909.
- 三枝博光, 稲葉 薫, 天野健治, 竹内真司 (2003) : 広域地下水流動特性評価に関する調査研究の現状と今後の取り組みについて, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, CS7-065, pp.407-408.
- Saegusa, H., Inaba, K., Maeda, K., Nakano, K. and McCrank, G. (2003) : Hydrogeological Modeling and Groundwater Flow Simulation for Effective Hydrogeological Characterization in the Tono Area, Gifu, Japan, Groundwater Engineering - Recent Advances (Kono, Nishigaki and Komatsu eds.), pp.563-569.
- 三枝博光, 澤田 淳, 稲葉 薫, 竹内真司, 中野勝志 (2003) : 複数のモデル化手法を用いた地質環境特性調査における地

- 地下水流動特性評価の不確実性の検討, サイクル機構技報, No. 20, pp. 75-89.
- 斎藤和春, 三枝博光, 渡辺邦夫, Gautamn, M. (2003): 岩盤割れ目密度の予測手法の検討ーニューラルネットワーク (ANN) と情報論的エントロピーを用いた検討ー, 応用地質, 44, pp. 283-293.
- 坂井哲郎, 奥園昭彦 (2003): 地下坑道における自然通気圧発電の概念構築の試み, 平成 15 年度資源・素材関係学協会合同秋季大会, 企画発表・一般発表 (A) (B) 資料, pp. 347-348.
- 坂巻昌工, 佐藤稔紀, 見掛信一郎, 今津雅紀 (2003): 国内における立坑・斜坑のデータベース化と瑞浪超深地層研究所の立坑内径, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, VI-046, pp. 91-92.
- 佐々木圭一, 梅本和裕 (2004): リニアメントによる割れ目の累積頻度の推定, 平成 15 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp. 439-440.
- 笹尾英嗣 (2003): 東濃ウラン鉱床におけるナチュラルアナログ研究ーウラン鉱床の隆起・沈降量の見積もりー, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), G018-P003.
- 笹尾英嗣, 中間茂雄, 竹内真司, 岩月輝希 (2003): 東濃鉱山における調査試験研究 年度報告書 (2002 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7400 2003-001.
- Sasao, E., Ota, K., Iwatsuki, T., Arthur, R. C., Stenhouse, M., Zhou, W., Metcalfe, R., Takase, H. and MacKenzie, A. B. (2003): The Tono Natural Analogue Project: An overview, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(18S), p. A413.
- 佐藤 誠, 長沼 毅 (2003): 地下微生物の鉄還元作用に関する研究, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), B001-P015.
- 佐藤稔紀, 青木俊朗, 中間茂雄 (2004): 瑞浪層群の物理・力学特性に関するデータ集, サイクル機構技術資料, JNC TN7450 2003-002.
- Sato, T., Mikake, S., Sakamaki, M., Aoki, K., Yamasaki, S., Shigeta, N. and Takeda, S. (2003): Underground Research Laboratories in Japan - What are the important factors for facilities design, *Proceedings of ICEM' 03*, ICEM03-4736, pp. 1-7.
- 佐藤稔紀, 見掛信一郎, 田口洋輔, 亀村勝美, 下野正人 (2003): 超深地層における研究坑道建設プロジェクトのリスクマネジメント, *JCOSSAR2003 論文集*, pp. 209-212.
- 佐藤稔紀, 見掛信一郎, 今津雅紀, 延藤 遵, 西川洋二 (2003): 瑞浪超深地層研究所主立坑の地震時健全性について, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, CS7-060, pp. 397-398.
- Sato, T., Mikake, S., Sakamaki, M., Aoki, K., Yamasaki, S., Shigeta, N. and Takeda, S. (2003): Underground Research Laboratories in Japan - What are the Important Factors for Facilities Design, *Proceedings of ICEM' 03: The 9th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management*, 4736.
- 佐藤稔紀, 見掛信一郎, 玉井 猛, 今津雅紀, 坂巻昌工 (2003): 地下 1,000m に向けてー瑞浪超深地層研究所の建設計画ー, サイクル機構技報, No. 20, pp. 31-43.
- Sato, T. and Shirato, N. (2004): Underground Research Laboratories for R&D on HLW, *Tunneling Activities in Japan 2004*, p. 24.
- 相馬宣和, 及川寧己, 山口勉, 中島貴弘, 中間茂雄 (2004): 封圧環境下における AE/DRA 法による原位置岩盤応力推定の試みー東濃鉱山の堆積岩を対象としてー, 資源・素材学会平成 16 年度春季大会講演集 (I) 資源編, pp. 117-118.
- Soma, N., Seto, M., Nakajima, T., Nakama, S., Miyamasa, A. and Katsuyama, K. (2003): Evaluation of Vertical Stress in Sedimentary Rock by the AE Method Under Confining Pressure, *Rock Stress* (Sugawara, Obara and Sato eds.), pp. 277-282.
- 杉原弘造 (2003): 高レベル放射性廃棄物の地層処分と岩盤工学, *材料*, 52, pp. 1012-1017.
- 鈴木健一郎, 並木和夫, 小田匡寛, 中間茂雄 (2003): 空洞模型試験による周辺岩盤の損傷評価, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, III-340, pp. 681-682.
- 須山泰宏, 戸井田克, 名児耶薫, 升元一彦, 片岡達彦 (2003): 連続波レーダーによる不飽和領域計測の適用性検討, 日本地下水学会 2003 年秋季講演会講演要旨, pp. 2-5.
- 高田圭太, 中田 高, 野原 壯, 原口 強, 池田安隆, 伊藤 潔, 今泉俊文, 大槻憲四郎, 鷺谷 威, 堤 浩之 (2003): 震源断層となりうる活断層とリニアメントの検討ー中国地方を事例としてー, *活断層研究*, 23, pp. 77-91.

- Takahashi, Y., Amano, K., Hama, K., Mizuno, T., Yoshida, H., and Shimizu, H. (2003) : Reply to the Comment by T. Monecke, U. Kempe, J. Monecke on "W- and M-type Tetrad Effects in REE Patterns for Water-Rock Systems in the Tono Uranium Deposit, Central Japan", Chem. Geol., 202, pp.185-189.
- 高倉 望, 中間茂雄, 大久保誠介 (2003) : 粗粒砂岩におけるコンプライアンス可変型構成方程式の定数について, 第 38 回地盤工学研究発表会平成 15 年度発表講演集, pp. 527-528.
- 高倉 望, 中間茂雄, 大久保誠介 (2003) : 堆積軟岩を対象とした低応力レベルにおけるクリープ解析, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, CS7-057, pp. 391-392.
- 武田精悦 (2003) : サイクル機構における深地層の研究施設計画の現状-超深地層研究所計画-, 第 19 回バックエンド夏期セミナー資料集, pp.1.4-1 - 1.4-13.
- 武田精悦 (2004) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の現状 (2) 東濃地科学センターにおける深地層の科学的研究の現状, 日本原子力学会 2004 年春の年会, 総合講演・報告.
- 竹村貴人, 小田匡寛, 亀田 篤, 鈴木健一郎, 中間茂雄 (2003) : 弾性波速度とクラックテンソルによる岩石の脆性破壊機構, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, III-323, pp. 645-646.
- Takeuchi, A. and Matsuura, Y. (2003) : Faulting and Creep Behavior of Complicated Strike-Slip Fault System - A Case of the Atotsugawa Fault System, Central Japan, Abstracts of XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG 2003), SS03/08A/D-037.
- 竹内真司, 天野健治, 下茂道人, 松岡清幸 (2003) : 電気伝導度検層を用いた亀裂性岩盤中の水みち検出技術, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, CS7-068, pp. 413-414.
- 竹内真司, 平田洋一, 西垣 誠 (2003) : 光ファイバーを用いた地下水圧観測装置の開発, 日本地下水学会 2003 年秋季講演会講演要旨, pp. 6-9.
- Takeuchi, S., Shimo, M., Doughty, C. and Tsang, C.-F. (2004) : Identification of the Water-Conducting Features and Evaluation of Hydraulic parameters using Fluid Electric Conductivity Logging, Proceedings of the Second International Symposium on Dynamics of Fluids in Fractured Rock, pp.349-354.
- 竹内真司, 下茂道人, 城まゆみ, Tsang, C.-F. (2004) : 電気伝導度検層による深部花崗岩中の水みちの抽出と水理特性の評価, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 451-456.
- 滝 充弘, 浅井士郎 (2003) : 日吉川流域における河川流量観測, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 株式会社シーテック), JNC TJ7440 2003-005.
- 戸井田克, 須山泰宏, 名児耶薫, 渥美博行 (2003) : 東濃鉱山における連続波レーダーによる不飽和領域の計測, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 鹿島建設株式会社), JNC TJ7440 2003-001.
- 戸井田克, 須山泰宏, 塩釜幸弘, 渥美博行, 阿部泰典, 古市光昭 (2003) : 統計解析手法による地質環境の不均一性評価法, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 鹿島建設株式会社), JNC TJ7410 2003-004.
- 徳永朋祥, 中田智浩, 茂木勝郎, 渡辺正晴, 嶋田 純, 張 勁, 蒲生俊敬, 谷口真人, 浅井和見, 三枝博光 (2003) : 沿岸海底から湧出する淡水性地下水の探査および陸地地下水との関連に関する検討-黒部川扇状地沖合での例-, 地下水学会誌, 45, pp.133-144.
- 徳永朋祥, 谷口真人, 嶋田純, 長 勁, 稲葉 薫, 三枝博光, 岩月輝希 (2003) : 沿岸部および沿岸海底地下水の水理・地球化学環境の評価に関する研究, サイクル機構技術資料 (公募型研究に関する共同研究報告書; 東京大学), JNC TY7400 2003-003.
- Tsuruga, K., Kunitomo, T., Kumazawa, M. and Shigeta, N. (2003) : Secondary Calibration Method of Seismometers by Using ACROSS Signals and Reference Accelerometers, Abstracts of XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG 2003), p. A. 146.
- 鶴我佳代子, 國友孝洋, 熊澤峰夫, 茂田直孝, 羽佐田葉子, 長尾大道 (2003) : 能動的な地殻状態常時監視システムー (3) ACROSS 稠密地震観測アレイの構築と受信技術の開発ー, 日本地震学会講演予稿集秋季大会, p. 272.
- 上原大二郎, 石丸恒存, 棚瀬充史, 小川康雄, 鍵山恒臣 (2003) : MT 法におけるファーマトリファレンス処理の効果と紀伊半島南部地域の深部比抵抗構造, 応用地質, 44, pp. 164-174.
- 上原大二郎, 小川康雄, 角田地文, 工藤 健, 梅田浩司, 棚瀬充史, 武田祐啓, 千葉昭彦, 菊池 晃, 鍵山恒臣 (2003) : 紀伊半島南部地域における MT 法による深部比抵抗構造調査 (2) -比抵抗構造と重力異常の総合考察-, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), E011-P006.

- 梅田浩司, 古沢 明 (2003) : テフラ層序からみた東北日本, むつ燧岳火山の活動史, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), G017-P001.
- 梅田浩司, 梶原竜哉, 内田洋平 (2003) : 日本列島における坑井温度プロファイルのコンパイルと一次元熱輸送モデルによる熱流束, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), T032-P002.
- 梅田浩司, 野原 壯, 藤原 治, 中司 昇 (2004) : 地質環境の長期安定性に関する研究, 第 7 回 NUCEF セミナー要旨・スライド集, W-16.
- 梅田浩司, 上原大二郎, 小川康雄, 工藤 健, 角田地文 (2003) : 広域帯 MT 法による紀伊半島の中新世珪長質火成岩体の深部構造, 火山, 48, pp. 461-470.
- 梅本和裕, 地主卓弥, 篠田繁幸, 森 大 (2003) : 広域地下水流動研究領域における航空写真判読および地表調査, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 国際航業株式会社), JNC TJ7400 2003-005.
- 若浜 洋, 中田充彦, 廣木峰也, 二口克人, 岡田秋夫 (2003) : DH-2 号孔への地下水長期観測システムの購入設置, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 株式会社ダイヤコンサルタント), JNC TJ7440 2003-004.
- 渡辺史子, 三好達夫, 長沼 毅 (2003) : 地下の微生物現存量と多様性の経時変化に関する研究, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), B001-P014.
- 渡辺邦夫, Gautam, M. R., 三枝博光 (2003) : ニューラルネットワークを用いた地下水モニタリング解析に関する研究 - A Study of Groundwater Monitoring Data Analysis Using Artificial Neural Network Model, サイクル機構技術資料 (先行基礎工学分野に関する研究詳細報告書; 埼玉大学), JNC TY7400 2003-002.
- White, M. J. and Saegusa, H. (2003) : Representation of fracture zone interpretation uncertainty in 3D geological models of the Mizunami Underground Research Laboratory, Japan, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 87, pp. 533-538.
- 藪内 聡, 竹内真司 (2003) : 深層岩盤を対象とした単孔式透水試験, 日本地下水学会 2003 年秋季講演会講演要旨, pp. 32-35.
- 柳澤孝一, 大澤英昭, 武田精悦, 高瀬博康, 青山裕司, 古市光昭, 戸井田克, 須山泰宏, 若松尚則 (2003) : 3 次元水理地質モデルについての不確実性解析手法の開発 - 東濃地域における例題演習 -, 第 19 回バックエンド夏期セミナー資料集, pp. 2. 17. 1 - 2. 17-4.
- 柳澤孝一, 大澤英昭, 武田精悦, 高瀬博康, 青山裕司, 古市光昭, 戸井田克, 須山泰宏, 若松尚則, 西垣 誠 (2003) : 地質環境特性評価の不確実性解析手法の東濃地域への適用, 日本地下水学会 2003 年秋季講演会講演要旨, pp. 26-31.

【幌延深地層研究センター】

- Aoki, K., Kato, K., Hama, K. and Kunimaru, T. (2003) : Preliminary Microbial Analysis of Groundwater in Horonobe, Japan, 16th International Symposium on Environmental Biogeochemistry, p.201.
- 青木和弘, 杉田 裕, 千々松正和, 奥村滋子, 川上 奏, 田崎和江 (2003) : 釜石鉱山での熱－水－応力連成試験における微生物分析, 日本原子力学会秋の大会予稿集, p. 623.
- 浴 信博, 東中基倫, 太田陽一 (2003) : 幌延深地層研究計画における堆積岩を対象とした物理探査 (2), 物理探査学会平成 15 年度第 109 回学術講演論文集, pp. 206-209.
- Goto, J. and Hama, K. (2003) : Horonobe Underground Research Laboratory Project Plans for Surface-based Investigation (Phase 1), サイクル機構技術資料, JNC TN5510 2003-002.
- Hama, K. and Mackenzie, A. B. (2003) : REDOX investigation around the drift in the Tono Uranium Mine, Japan, 13th Annual V. M. Goldschmidt Conference, p.A130.
- Hama, K., Takahashi, K., Ishii, E., Takeuchi, R., Sasaki, M., Kunimaru, T., Eki, N. and Matsui, H. (2003) : Working Program for Deep Borehole Investigations -HDB-6, 7, 8 borehole-, サイクル機構技術資料, JNC TN5400 2003-002.
- 畠山信也, 白戸伸明 (2003) : 幌延深地層研究計画～地下施設空洞の安定性と防災計画～, 日本原子力学会第 19 回バックエンド夏期セミナー資料集, p. 2. 21-1.
- 今井 久 (2003) : 幌延を例とした地下水解析の概要と解析結果, エネルギー振興協会 平成 15 年度地圏科学研究会第二回研究部会.
- 今井 久, 塩崎 功, 尾方伸久, 國丸貴紀, 竹内竜史 (2003) : 幌延地域を対象とした広域地下水流動特性の影響要因の感度解析の検討, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp. 381-384.
- 今井 久, 塩崎 功, 尾方伸久, 國丸貴紀, 竹内竜史 (2003) : 深部地下水環境のモデル化手法に関する研究－幌延地域を例として－, ハザマ研究年報 2003, pp. 1-12.
- 石井英一, 竹内竜史, 安江健一, 高橋一晴, 操上広志, 松井裕哉, 福島龍朗 (2004) : 幌延深地層研究計画－新第三紀堆積岩における岩盤の水理地質学的特性調査－, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), G018-P006.
- 石井英一, 安江健一, 高橋一晴, 松井裕哉, 福島龍朗 (2004) : 幌延深地層研究計画－新第三紀堆積岩における割れ目の地質学的特性調査－, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), G018-P005.
- 國丸貴紀 (2003) : 幌延深地層研究計画 ～地下水の地球化学特性調査の現状～, 日本原子力学会第 19 回バックエンド夏期セミナー資料集, pp. 2. 19-1 - 2. 19-3.
- Kunimaru, T. and Metcalfe, R. (2003) : Isotopic study of the groundwater at Horonobe, northern Hokkaido, Japan, 13th Annual V. M. Goldschmidt Conference, p. A239.
- 國丸貴紀, 竹内竜史, 瀬尾昭治 (2003) : 幌延深地層研究計画における地下水の地球化学特性調査について, 日本地下水学会 2003 年秋季講演会要旨, p. 36-39.
- Kurikami, H., Kobayashi, A., Chijimatsu, M., Sugita, Y. and Ohnishi, Y. (2003) : Effect of coupling behavior field on groundwater flow of far field for geological disposal of high level radioactive waste, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp. 403-408.
- 松井裕哉 (2003) : 幌延深地層研究計画における岩盤力学調査の現状, 資源・素材学会北海道支部 平成 15 年度春季講演会講演要旨集, pp. 51-52.
- 松井裕哉, 栗原雄二, 牧野仁史 (2004) : 幌延深地層研究計画 第 2、第 3 段階における全体研究計画案, サイクル機構技術資料, JNC TN5400 2003-004.
- Matsui, H., Sugihara, K. and Sato, T. (2003) : In-situ Experiments on Excavation Disturbance in JNC's Geoscientific research program, Proceedings of a European Commission CLUSTER Conference, pp. 271-275.
- 松井裕哉, 山本卓也 (2004) : 幌延地域の第三紀堆積岩の力学特性, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM) . (印刷中)
- 森岡宏之, 白戸伸明, 瀧 治雄 (2004) : 幌延深地層研究計画における地下施設坑道の安定性の検討, 土木学会北海道支部 平成 15 年度年次技術研究発表会論文報告集, p. 826-827.

- 中川嘉文, 藤井義明, 菅原隆之, 石島洋二, 富永英治, 松井裕哉 (2003): 幌延泥岩を用いた AE 法による地殻応力推定の試み, 資源・素材学会北海道支部 平成 15 年度春季講演会講演要旨集, p. 33-34.
- 尾方伸久, 國丸貴紀, 竹内竜史, 塩崎 功, 今井 久 (2003): 幌延地域の深部地下水に含まれる塩分濃度に着目した解析検討, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, p. 187-190.
- 坂井哲郎, 水野正勝, 白戸伸明, 松村修治, 窪田 茂 (2003): 深地層の研究施設における防災対策について, 資源・素材 2003 (宇部) 大会プログラム, pp. 345-346.
- 下茂道人, 文村賢一, 竹内竜史 (2003): デコンボリューション法によるスラグテストの解析, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, III-402, p. 803-804.
- 塩崎 功, 尾方伸久, 竹内竜史, 國丸貴紀, 米田哲朗, 今井 久 (2003): 地史を考慮した幌延地域の地下水流動モデルに関する一考察, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, p. 377-380.
- 白戸伸明 (2003): 幌延深地層研究計画～地下施設設計計画の現状～, 日本原子力学会第 19 回バックエンド夏期セミナー資料集, p. 2. 20-1.
- 白戸伸明, 畠山信也, 森岡宏之 (2004): 幌延深地層研究計画における地下施設計画, 土木学会北海道支部 平成 15 年度年次技術研究発表会論文報告集, p. 824-825.
- 高橋一晴, 石井英一, 安江健一, 福島龍朗 (2004): 幌延深地層研究計画 新第三紀堆積岩の岩石・鉱物学的特性 (その 2), 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), G018-P004.
- 高橋一晴, 守屋俊文, 福島龍朗 (2003): 北海道幌延町における研究所設置地区の新第三紀系層序及び有機地球化学的特徴, 第 21 回有機地球化学シンポジウム (2003 年札幌シンポジウム) 講演要旨集, o-24.
- 寺本雅子, 嶋田 純, 國丸貴紀 (2003): 低透水性堆積岩盤における地下水挙動の同位体水文学的研究, 2003 年度日本水文科学学会学術大会発表要旨集, vol. 18, pp. 32-33.
- 山本卓也, 松井裕哉 (2004): 幌延深地層研究計画における堆積軟岩を対象とした初期地圧測定結果, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 265-270.
- 山本卓也, 松井裕哉 (2004): 断層近傍での堆積軟岩の初期地圧測定, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM) . (印刷中)
- 山崎真一 (2003): サイクル機構における深地層の研究施設計画の現状「幌延深地層研究計画」, 日本原子力学会第 19 回バックエンド夏季セミナー資料集, pp. 1. 5-1 - 1. 5-14.
- Yamasaki, S. (2004) : Underground Research Laboratory Program of Japan; Its Technical and Social Aspects, Abstracts 14th Pacific Basin Nuclear Conference, pp. 166-167.
- 山崎真一 (2004): 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の現状 (3) 幌延深地層研究計画の現状, 日本原子力学会 2004 年春の年会, 総合講演・報告.
- 安江健一, 石井英一, 浴 信博, 福島龍朗 (2004): 北海道北部, 幌延町北進地域の段丘堆積物の特徴, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), Q042-P004.
- 安江健一, 石井英一, 高橋一晴, 浴 信博, 福島龍朗 (2004): 北海道, 幌延地域西部における鮮新世広域火山灰層の年代とネオテクトニクス, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), G015-004.
- 安江健一, 高橋一晴 (2003): 北海道幌延地域におけるヌカナン断層群の断層露頭とその意義, 日本地質学会第 110 年学術大会講演要旨, p. 218.

【東海事業所処分研究部】

- Altman, S. J., Uchida, M., Tidwell, V. C., Boney, C. M. and Chambers, B. P. (2004) : Use of X-ray absorption imaging to examine heterogeneous diffusion in fractured crystalline rocks, Journal of Contaminant Hydrology, Vol.69, pp.1-26.
- 有馬立身, 出光一哉, 夏 暁彬, 石寺孝充, 飯島和毅 (2004) : 緩衝材中の鉄イオン及びネプツニウムイオンの拡散挙動, サイクル機構技術資料 (先行基礎工学分野に関する研究詳細報告書; 九州大学), JNC TY8400 2004-005.
- 千々松正和, 雨宮 清 (2003) : DECOVALEX における解析評価研究, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 株式会社間組), JNC TJ8400 2003-010.
- 千々松正和, 雨宮 清 (2003) : 実規模人工バリア試験の解析評価研究, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 株式会社間組), JNC TJ8400 2003-019.
- 千々松正和, 雨宮 清 (2003) : 実規模人工バリア試験の解析評価研究 (概要), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 株式会社間組), JNC TJ8400 2003-020.
- 千々松正和, 今井 久, 福留和人, 粥川幸司, 佐々木 肇, 茂呂吉司 (2003) : ニアフィールド連成挙動の解析評価研究, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 株式会社間組), JNC TJ8400 2003-089.
- 千々松正和, 今井 久, 佐々木 肇, 茂呂吉司 (2004) : 人工バリア性能確認に関する基盤情報取得方法の調査研究, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 株式会社間組), JNC TJ8400 2003-090.
- Chijimatsu, M., Jing, L., Millard, A., Nguyen, T. S., Rejeb, A., Rutqvist, J., Souley, M. and Sugita, Y. (2003) : Building Confidence in the mathematical models by calibration with a T-H-M field experiment, Abstract, GeoProc 2003.
- Chijimatsu, M., Jing, L., Millard, A., Nguyen, T. S., Rejeb, A., Rutqvist, J., Souley, M. and Sugita, Y. (2003) : Building Confidence in the Mathematical Models by Calibration with a T-H-M Field Experiment, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp.181-186.
- 千々松正和, 杉田 裕, 伊藤 彰 (2003) : ニアフィールド連成解析における隙間の影響評価検討, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, CS7-040, pp.357-358.
- Chijimatsu, M., Sugita, Y. and Kurikami, H. (2003) : Coupled Thermo-hydro-mechanical analysis of the Prototype Repository Project using numerical code THAMES, LARGE SCALE FIELD TESTS IN GRANITE/ENRESA 2003/11 SPAIN, Sitges.
- 蛭名貴憲, 牧野仁史 (2004) : 地層処分性能評価のガラス溶解評価におけるガラス固化体中の亀裂発生に伴う表面積増加の影響, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集 (第Ⅲ分冊), H28, p.834.
- 藤原健壮, 小原幸利 (2004) : Np(IV)水和酸化物の溶解度積, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集 (第Ⅲ分冊), E21, p.736.
- Fujiwara, K., Yamana, H., Fujii, T., Kawamoto, K., Sasaki, T. and Moriyama, H. (2003) : Solubility of Uranium(IV) Hydrous Oxide in High pH Solution under Reducing Conditions, 9th International Conference on Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere, MIGRATION'03, Abstracts, pp.51-52.
- 原 彰男 (2004) : 堆積岩の水理・物質移行特性に関するデータ取得—幌延泥岩の孔径分布と化学組成—, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-052.
- Hara, A. and Uchida, M. (2004) : Evaluating heterogeneity in mudstones based on geologic processes at Horonobe, Japan, 66th EAGE Conference & Exhibition abstracts.
- 畑 明仁, 細野賢一, 井尻裕二, 澤田 淳 (2003) : グリムゼルにおける原位置トレーサー試験の逆解析による不確実性評価, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, CS7-064, pp.405-406.
- 畑 明仁, 井尻裕二, 細野賢一, 澤田 淳 (2003) : 原位置トレーサー試験の逆解析による同定パラメータ値の不確実性評価, 日本原子力学会第 19 回バックエンド夏期セミナー資料集, pp.2.14-1 - 2.14-4.
- 畑中耕一郎 (2004) : 亀裂を有する軟岩の透水性および物質移行特性に関する室内試験, 第 7 回 NUCEF セミナー要旨・スライド集, W-13.

- 畑中耕一郎, 内田雅大, 下茂道人, 山本 肇, 熊本 創 (2004) : 亀裂を有する軟岩の透水性および物質移行特性に関する室内実験, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 313-318.
- 畑中耕一郎, 内田雅大, 下茂道人, 山本 肇, 熊本 創 (2004) : 亀裂を有する堆積性軟岩の水理・物質移行特性評価に関する実験的研究, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集 (第Ⅲ分冊), H3, p. 809.
- 平井 卓, 棚井憲治 (2003) : 緩衝材の弾塑性挙動評価モデルに関する検討, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集 (第Ⅲ分冊), P9, p. 929.
- 平井 卓, 棚井憲治, 菊池広人, 鈴木英明, 高治一彦, 大沼 敏 (2003) : 断層ずれに伴う人工バリアの力学的挙動評価, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-009.
- 平井 卓, 棚井憲治, 菊池広人, 高治一彦, 大沼 敏 (2003) : 断層ずれによる人工バリアのせん断挙動に関する縮小模型実験, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, CS7-048, pp. 373-374.
- 平井 卓, 棚井憲治, 菊池広人, 重野喜政, 並河 努, 高治一彦, 大沼 敏 (2004) : 緩衝材長期力学挙動評価モデルの検討, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-034.
- 平井 卓, 棚井憲治, 菊池広人, 高治一彦, 大沼 敏 (2004) : 緩衝材のオーバーパック支持力性能に関する検討, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-031.
- 平井 卓, 棚井憲治, 高治一彦, 大沼 敏 (2003) : 圧縮ベントナイトを用いた緩衝材の弾塑性挙動評価モデルに関する研究, 第 48 回地盤工学シンポジウム論文集, pp. 389-396.
- Honda, T., Yamaguchi, S., Yoshikawa, H., Ueno, K. and Yui, M. (2003) : X-Ray CT Analysis of Iron-Based Archaeological Remains Buried in Soil, 13th Asian-Pacific Corrosion Control Conference.
- 飯島和毅, Van Loon, L., Müller, W. (2003) : オパリナス粘土中の HTO 拡散の活性化エネルギーと拡散経路, 日本原子力学会 2003 年秋の大会予稿集 (第Ⅲ分冊), K56, p. 631.
- 飯島和毅, 太田久仁雄, 油井三和, Alexander, R. (2004) : グリムゼル岩盤試験場における亀裂中の核種およびコロイドの移行 (1) - 方法と試験結果 -, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集 (第Ⅲ分冊), H4, p. 810.
- 飯島和毅, 飛塚早智子, 小原幸利 (2004) : Np(IV) とフミン酸の錯生成挙動, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2004-005.
- 飯島和毅, 増田嗣也, 戸村 努 (2004) : ベントナイトコロイドに対する Cs の収着挙動, サイクル機構技報, No. 23, pp. 51-61.
- 稲垣八穂広, 三ツ井誠一郎, 牧野仁史, 石黒勝彦, 亀井玄人, 河村和廣, 前田敏克, 上野健一, 馬場恒孝, 油井三 (2003) : 高レベル放射性廃棄物ガラス固化体一性能評価の現状と課題一, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-036.
- 稲垣八穂広 (2004) : ガラス固化体の長期鉱物化に関する研究 (Ⅲ), サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 九州大学), JNC TJ8400 2003-055.
- 井上博之, 南 浩輔 (2003) : 軟岩の長期力学的変形挙動研究, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 前田建設工業株式会社), JNC TJ8400 2002-061.
- 井上博之, 吉野尚人, 宮野前俊一, 水谷和彦, 野田兼司 (2004) : 軟岩の長期力学的変形挙動研究 (Ⅱ), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 前田建設工業株式会社), JNC TJ8400 2004-005.
- 入矢桂史郎, 田島孝敏, 納多 勝 (2004) : 幌延深地層研究センターにおけるコンクリート材料の施工性に関する研究 (Ⅳ), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 株式会社大林組), JNC TJ5400 2003-008.
- Ishidera, T., Miyamoto, S. and Sato, H. (2003) : The Effects of Silica Sand Content and NaNO_3 Concentration on Diffusion of C, Cl and I in Compacted Bentonite, 9th International Conference on Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere, MIGRATION'03, Abstracts, p. 145.
- 石寺孝充, 宮本真哉, 佐藤治夫 (2004) : 圧縮ベントナイト中の C, Cl, I の拡散挙動に及ぼすケイ砂混合率及び NaNO_3 の影響, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2004-001.
- 石寺孝充, 宮本真哉, 佐藤治夫 (2004) : 圧縮ベントナイト及び凝灰岩中の C, Cl, I の拡散挙動に及ぼす NaNO_3 の影響, 第 7 回 NUCEF セミナー要旨・スライド集, W-15.
- 石寺孝充, 佐藤治夫 (2004) : 凝灰岩中の C, Cl, I の拡散挙動に及ぼす NaNO_3 の影響, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集 (第Ⅲ分冊), H46, p. 852.

- 石原義尚, 千々松正和, 根山敦史, 田中由美子, 雨宮 清, 塩崎 功, 伊藤隆哉 (2003) : 熱-水-応力-化学連成挙動に関する研究 (Ⅱ) - 成果報告書 -, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 三菱重工業株式会社, 株式会社間組), JNC TJ8400 2003-032.
- 石原義尚, 千々松正和, 根山敦史, 田中由美子, 雨宮 清, 塩崎 功, 伊藤隆哉 (2003) : 熱-水-応力-化学連成挙動に関する研究 (Ⅱ) - 概要報告書 -, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 三菱重工業株式会社, 株式会社間組), JNC TJ8400 2003-033.
- 石原義尚, 伊藤貴司, 小林茂樹, 根山敦史 (2004) : 処分技術・安全評価分野についての技術情報統合システムの製作, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 三菱重工業株式会社), JNC TJ8440 2004-005.
- Ishikawa, H., Yui, M., Uchida, M. and Kamei, G. (2004) : ENTRY 2003 - The International Workshop on Reliable Performance Assessment through Laboratory Experiments and Ground Surface Investigations - 10th Anniversary of ENTRY, JNC TN8200 2003-004.
- 石川博久 (2004) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の現状 (4) 処分技術と安全評価に関する研究開発の現状, 日本原子力学会 2004 年春の年会, 総合講演・報告.
- 磯貝武司, 神徳 敬 (2003) : 圧縮ベントナイト中の間隙水組成の測定, 日本原子力学会 2003 年秋の大会予稿集 (第Ⅲ分冊), K25, p. 600.
- 磯貝武司, 神徳 敬, 笹本 広 (2004) : 圧縮ベントナイト中の間隙水組成の測定 - 蒸留水・人工海水・低アルカリ性セメント浸漬液系試験の結果 -, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-050.
- 伊藤 彰, 川上 進, 油井三和 (2004) : 高レベル放射性廃棄物地層処分におけるニアフィールドの熱-水-応力-化学連成モデル/解析コードの開発, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-032.
- 伊藤 彰, 杉田 裕, 川上 進, 油井三和, 石原義尚, 千々松正和, 根山敦史, 菱谷智幸 (2003) : 高レベル放射性廃棄物地層処分におけるニアフィールドの熱-水-応力-化学連成挙動に関する数値解析の取り組み, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, CS7-041, pp. 359-360.
- 伊藤 彰, 杉田 裕, 川上 進, 油井三和, 石原義尚, 千々松正和, 根山敦史, 菱谷智幸 (2003) : 高レベル放射性廃棄物地層処分におけるニアフィールドの熱-水-応力-化学連成挙動に関する研究, 日本原子力学会第 19 回バックエンド夏期セミナー資料集, pp. 2.1-1 - 2.1-4.
- Ito, A., Yui, M., Sugita, Y. and Kawakami, S. (2003) : A Research Program for Numerical Experiments on the Coupled Thermo-Hydro-Mechanical and Chemical Processes in the Near-field of the High-level Radioactive Waste Repository, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp. 346-351.
- 岩田裕美子, 菅野 毅, 松本一浩, 棚井憲治 (2004) : 緩衝材の流出/侵入現象評価 (2) - 固相拡散モデルの開発 -, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集 (第Ⅲ分冊), H20, p. 826.
- 神徳 敬, 柴田雅博, 吉田 泰, 陶山忠宏 (2003) : 岩石およびベントナイトに対する核種の収着モデルの検討 (OECD/NEA Sorption Project), サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-048.
- 神徳 敬, 柴田雅博, 吉田 泰, 陶山忠宏 (2003) : OECD/NEA Sorption Project における収着モデルの検討, サイクル機構技報, No. 21, pp. 65-77.
- Kamei, G. (2003) : A natural analogue of iodine migration : the source and behavior of iodine in the Mobara gas field, Japan, 3th V.M. Goldschmidt Conference 2003, Geochim. Cosmochim. Acta., Vol. 67, No. 185, p. A196.
- Kamei, G., Mitsui, S., Sakuramoto, Y., Futakuchi, K. and Hashimoto, S. (2003) : Kinetics of long-term illitization of montmorillonite - A natural analogue of thermal alteration of bentonite in the radioactive waste disposal system, 11th International Conference, High Temperature Materials Chemistry, Abstract p. 195.
- 菅野 毅, 岩田裕美子 (2003) : 緩衝材侵入現象モデルの検討 (Ⅰ), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 石川島播磨重工業株式会社), JNC TJ8400 2003-026.
- 菅野 毅, 岩田裕美子 (2004) : 緩衝材侵入現象モデルの検討 (Ⅱ), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 石川島播磨重工業株式会社), JNC TJ8400 2003-083.
- 加藤智子 (2003) : 高レベル放射性廃棄物地層処分安全評価における安全指標の考え方について, 放射線と地球環境生態系への影響を考える (村松康行, 土居雅広, 吉田 聡編), pp. 206-213, 研成社.
- 加藤智子, 鈴木祐二, 牧野仁史, 内田雅大 (2003) : 地層処分生物圏評価パラメータの設定に関わる検討 - 感度解析によ

- る重要パラメータの抽出と設定状況の整理一，日本原子力学会 2003 年秋の大会予稿集（第Ⅲ分冊），K34，p. 609.
- 加藤智子，鈴木祐二，牧野仁史，内田雅大（2003）：地層処分生物圏評価パラメータの相対的重要度に関する感度解析検討，日本保健物理学会第 37 回研究発表会講演要旨集，p. 70.
- Kato, T., Suzuki, Y., Makino, H. and Uchida, M. (2003) : Biosphere Assessment for High-level Radioactive Waste Disposal: Modelling Experiences and Discussion on Key Parameters by Sensitivity Analysis in JNC, International Symposium on Radioecology and Environmental Dosimetry, Abstracts.
- 川上 進，杉田 裕，栗原雄二，神徳 敬，油井三和（2004）：地層処分における人工バリア等の性能保証に関わる研究，日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集（第Ⅲ分冊），H34，p. 840.
- 川上 進，油井三和，栗原雄二，神徳 敬，杉田 裕（2004）：人工バリア等の性能保証に関わる研究のサイクル機構における取り組み，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-037.
- 川上 進，油井三和，杉田 裕（2004）：高レベル放射性廃棄物地層処分における閉鎖性能に関する研究，第 7 回 NUCEF セミナー要旨・スライド集，W-12.
- 河村雄行（2004）：ベントナイト中の物質移行モデルの高度化研究（Ⅱ），サイクル機構技術資料（研究委託報告書；東京工業大学），JNC TJ8400 2004-001.
- 川崎 学，谷口直樹，川上 進（2003）：大気吹き込み下での模擬地下水における純銅の腐食速度と腐食局在化，第 50 回材料と環境討論会講演集，pp. 199-202.
- 川崎 学，谷口直樹，川上 進（2004）：大気吹き込み下での模擬地下水における純銅の腐食速度と腐食局在化，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-041.
- 菊池広人，棚井憲治（2003）：緩衝材の熱物性測定試験（Ⅲ）一面熱源法による緩衝材熱物性の取得一，サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2003-009.
- 菊池広人，棚井憲治（2003）：緩衝材の基本特性データベース，サイクル機構技術資料，JNC TN8450 2003-010.
- 菊池広人，棚井憲治，松本一浩，佐藤治夫，上野健一，鐵 剛志（2003）：緩衝材の透水特性一Ⅱ，サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2003-002.
- 菊池広人，棚井憲治，佐藤治夫（2003）：海水条件下における圧縮ベントナイトの透水性，土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集，CS7-033，pp. 343-344.
- 菊池広人，棚井憲治，杉田 裕（2003）：海水系地下水条件下における埋め戻し材特性に関する基礎試験，サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2003-008.
- Kitamura, A., Shibata, M. and Kitao, H. (2003) : Solubility Measurement of Iron-Selenium Compounds under Reducing Conditions, International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society, Abstracts, Kalmar, Sweden, pp.177-178.
- 北村 暁，戸村 努，中山 雅（2003）：海水系におけるベントナイトおよび堆積岩に対するセシウムの収着挙動，日本原子力学会第 19 回バックエンド夏期セミナー資料集，pp. 2. 7-1 - 2. 7-4.
- Kitamura, A. and Kohara, Y. (2003) : Carbonate complexation of Neptunium(IV) in Highly Basic Solutions, 9th International Conference on Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere, MIGRATION'03, Abstracts, p. 59.
- 北村 暁，中田弘太郎，田中 知，戸村 努，亀井玄人（2003）：マグネタイト表面におけるネプツニウム(V)の還元，2003 日本放射化学学会年会・第 47 回放射化学討論会，1P42.
- 北村 暁，中山 雅，佐藤治夫，戸村 努（2004）：堆積岩に対するセシウムの分配係数に及ぼす競合イオンの影響，日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集（第Ⅲ分冊），H11，p. 817.
- Kitamura, A., Shibata, M. and Kitao, H. (2004) : Solubility Measurement of Iron-Selenium Compounds under Reducing Conditions, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 807, pp.609-614.
- Kitamura, A. and Kohara, Y. (2004) : Carbonate Complexation of Neptunium(IV) in Highly Basic Solutions, Radiochim. Acta. (in press)
- 北山一美，油井三和（2003）：連載講座 放射性廃棄物の処分 第 3 回 高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する工学技術，日本原子力学会誌，Vol. 45, No. 12, pp. 787-797.
- Kobayashi, A., Sugita, Y. and Chijimatsu, M. (2003) : Effect of the fracture geometry on the coupled

- phenomena in large scale, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp.245-250.
- Komine, H., Kurikami, H., Chijimatsu, M., Kobayashi, A. and Ohnishi, Y. (2003) : COUPLED THERMAL, HYDRAULIC AND MECHANICAL SIMULATION WITH THEORETICAL MODEL FOR SWELLING CHARACTERISTICS, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp.550-555.
- 小尾 繁, 若杉圭一郎, 牧野仁史, 内田雅大 (2004) : サイクル機構における核種移行解析モデル開発の現状, 日本原子力学会第 19 回バックエンド夏期セミナー資料集, pp.2.12-1 - 2.12-4.
- 小崎 完, 佐藤正知 (2004) : 緩衝材中の核種移行挙動に及ぼす処分環境因子に関する基礎的研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書 ; 北海道大学), JNC TJ8400 2003-075.
- 栗原雄二, 藤田朝雄, 川上 進, 神徳 敬, 油井三和, 杉田 裕 (2003) : 人工バリア等の性能保証に関わる研究のサイクル機構における取り組み (その 2), サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-053.
- 栗原雄二, 油井三和, 棚井憲治, 川上 進, 杉田 裕, 谷口直樹, 平井 卓, 小川豊和, 青柳茂男, 松井裕哉, 藤島 敦, 中山 雅 (2004) : 人工バリア等の設計検討および幌延の地質環境を条件とした原位置試験環境の検討, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2004-006.
- 操上広志, 千々松正和, 小林 晃, 杉田 裕, 大西有三 (2003) : グリムゼル試験場における熱-水-応力連成原位置試験の解析, 土木学会論文集, No.757, III-66, pp.127-137.
- 操上広志, 小林 晃, 大西有三, 千々松正和, 小峯秀雄, 杉田 裕, 伊藤 彰 (2003) : 膨潤評価式を導入した熱-水-応力連成解析コードの適用性に関する検討, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, CS7-039, pp.355-356.
- 黒澤 進, 茨木 希, 油井三和, James, S., 飯島和毅, Alexander, R. (2004) : グリムゼル岩盤試験場における亀裂中の核種及びコロイドの移行 (2) -モデル解析-, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集 (第Ⅲ分冊), H5, p.811.
- 牧野仁史, 若杉圭一郎, 小尾 繁 (2003) : 核種移行解析結果に対する感度分析の方法論の検討, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集 (第Ⅲ分冊), P22, p.942.
- Martino, J. B., Chandler, N., Dixon, D., Sugita, Y., Vignal, B. and Hansen, F. (2003) : The Tunnel Sealing Experiment and Application to Repository Seal Design, Proceedings of the 10th International High-Level Radioactive Waste Management Conference, American Nuclear Society, pp.602-609.
- 増田嗣也, 飯島和毅, 戸村 努 (2004) : ベントナイトコロイドに対するネブツニウム収着特性, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集 (第Ⅲ分冊), H12, p.818.
- 増井泰裕, 川田耕司, 加藤 新, 辻 隆司, 諏訪部瑞恵 (2004) : 前進的モデルを用いた不均質性堆積岩評価手法の研究, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書 ; 株式会社地球科学総合研究所), JNC TJ8400 2003-093.
- 増井泰裕, 川田耕司, 加藤 新, 辻 隆司, 諏訪部瑞恵 (2004) : 前進的モデルを用いた不均質性堆積岩評価手法の研究 (概要版), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書 ; 株式会社地球科学総合研究所), JNC TJ8400 2003-094.
- 松本一浩, 棚井憲治 (2003) : ベントナイト緩衝材の流出特性の評価 (Ⅱ), サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-006.
- 松本一浩, 棚井憲治 (2004) : 緩衝材の流出/侵入特性, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-035.
- 松本一浩, 棚井憲治 (2004) : 緩衝材の流出/侵入現象評価 (1) -X 線 CT を用いた亀裂侵入ベントナイトの密度分布の把握-, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集 (第Ⅲ分冊), H19, p.825.
- Millard, A., Rejeb, A., Chijimatsu, M., Jing, L., De Jonge, J., Kohlmeier, M., Nguyen, T. S., Rutqvist, J., Souley, M. and Sugita, Y. (2003) : Evaluation of THM Coupling on the Safety Assessment of a Nuclear Fuel Waste Repository in a Homogeneous Hard Rock, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp.199-204.
- 森山裕丈 (2003) : 超ウラン元素の加水分解及び錯生成に関する研究Ⅱ, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書 ; 京都大学), JNC TJ8400 2002-054.
- 森山裕丈 (2004) : 超ウラン元素の加水分解及び錯生成に関する研究Ⅲ, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書 ; 京都大学), JNC TJ8400 2003-058.
- 村岡 保, 佐藤成二, 山本隆一, 山本朝男, 箭竹陽一, 浅野林一 (2004) : 亀裂内不均質性を考慮した流体解析, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書 ; 株式会社ベスコ), JNC TJ8400 2003-074.
- 長崎晋也 (2004) : 核種の有機系コロイドへの収着挙動および多孔質媒体中での有機系コロイドの移行挙動に関する研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書 ; 東京大学), JNC TJ8400 2003-064.

- 仲島邦彦, 牧野仁史 (2004) : 決定木分析を用いた核種移行解析結果の感度分析の検討, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集 (第Ⅲ分冊), H37, p. 843.
- 中澤俊之, 岡田賢一, 室井正行, 柴田雅博, 陶山忠宏, 笹本 広 (2004) : 海水系地下水における砂岩および凝灰岩に対する Sn・Pb・Th の分配係数, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-039.
- 中澤俊之, 岡田賢一, 室井正行, 吉川英樹, 鐵 剛志, 吉田 泰 (2004) : 炭酸塩生成時の放射性核種の共沈現象に関するデータ取得およびモデル開発, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集 (第Ⅲ分冊), H49, p. 855.
- 並河 努, 油井三和, 棚井憲治, 平井 卓, 重野喜政, 高治一彦, 大沼 敏 (2004) : 圧縮成型ベントナイトの力学挙動に対する弾粘塑性モデルの適用性に関する研究, 土木学会論文集, No. 764, III-67, pp. 367-372.
- Neyama, A., Ito, A., Chijimatsu, M., Ishihara, Y., Hishiya, T., Yui, M., Sugita, Y. and Kawakami, S. (2003) : Prototype Code Development for Numerical Experiments on the Coupled Thermo-Hydro-Mechanical and Chemical Processes in the Near-Field of a High-Level Radioactive Waste Repository, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp. 358-363.
- Nguyen, T. S., Chijimatsu, M., De Jonge, J., Jing, L., Kohlmeier, M., Millard, A., Rejeb, A., Rutqvist, J., Souley, M. and Sugita, Y. (2003) : Implication of Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Processes on the Safety of a Hypothetical Nuclear Fuel Waste Repository, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp. 212-217.
- 大場孝信 (2003) : スメクタイトの緑泥石化に関する研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 上越教育大学), JNC TJ8400 2003-004.
- Ohmoto, H., Spangler, K. R., Watanabe, Y. and Kamei, G. (2004) : Smectite dissolution kinetics in high-alkaline conditions, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 807, pp. 723-728.
- 大久保誠介 (2003) : 軟岩の長期挙動に関する研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 東京大学), JNC TJ8400 2002-062.
- 大久保誠介 (2004) : ニアフィールド岩盤の長期安定性評価手法の検討, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 東京大学), JNC TJ8400 2003-081.
- 大久保博生 (2004) : 地層処分の性能評価におけるシナリオ解析の高度化 (Ⅲ), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 株式会社三菱総合研究所), JNC TJ8400 2004-008.
- 小山田潔, 池田孝夫 (2004) : 地層処分安全評価における生物圏評価手法の高度化に関する検討(Ⅳ), サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 日揮株式会社), JNC TJ8400 2004-006.
- Rai, D., Hess, N. J., Yui, M., Felmy, A. R. and Moore, D. A. (2004) : Thermodynamic and solubility of $(U_xNp_{1-x})O_2(am)$ solid solution in the carbonate system, 9th International Conference on Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere, MIGRATION'03, Abstracts, pp. 29-30.
- Rutqvist, J., Chijimatsu, M., Jing, L., Millard, A., Nguyen, T. S., Rejeb, A., Sugita, Y. and Tsang, C. F. (2003) : Evaluation of the Impact of Thermal-Hydrological-Mechanical Couplings in Bentonite and Near-Field Rock Barriers of a Nuclear Waste Repository in a Sparsely Fractured Hard Rock, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp. 205-211.
- Saeki, K., Wada, S. and Shibata, M. (2003) : Ca(Ⅱ)-Fe(Ⅱ) and Ca(Ⅱ)-Mn(Ⅱ) exchange selectivity of kaolinite, montmorillonite and illite, Soil Science, Vol. 169, No. 2, pp. 125-132.
- 齋藤茂幸, 佐々木良一, 加藤智子, 石黒勝彦 (2003) : ナチュラルフラックス評価の方法論の検討, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 (CD-ROM), G018-009.
- 佐々木良一, 齋藤茂幸, 加藤智子, 石黒勝彦 (2003) : 天然放射性元素等の濃度データの収集整理, 日本原子力学会第 19 回バックエンド夏期セミナー資料集, pp. 2. 13-1 - 2. 13-4.
- 笹本 広, 陶山忠宏, 柴田雅博 (2004) : 鉄粉-ベントナイト反応に関わる室内試験, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-047.
- 佐藤治夫 (2003) : 堆積岩系岩石マトリクス中のイオンの拡散移行過程に関する研究: バッチ法による砂岩への Cs^+ 及び I^- イオンの収着分配係数の測定, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2003-012.
- Sato, H. (2003) : Diffusion and Migration of Ions in Sedimentary Rock Matrix: Effects of Ionic Strength and Tracer Concentration on Diffusion of Cs and I in Sandstone, International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society, 2003, Kalmar, Sweden, Abstracts,

pp. 65-66.

Sato, H. (2003) : Diffusion and Migration of Ions in Sedimentary Rock Matrix: Thermodynamic Properties of Porewater in Sandstone, 9th International Conference on Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere, MIGRATION'03, Abstracts, pp.147-148.

佐藤治夫 (2003) : 国際会議参加報告 : MIGRATION 国際会議 (MIGRATION'03) - 第 9 回地中でのアクチニドおよび核分裂生成物の化学および移行挙動に関する国際会議, サイクル機構技術資料, JNC TN1200 2003-005.

佐藤治夫 (2003) : 国際会議参加報告 : 米国材料学会 (MRS'03) 第 27 回放射性廃棄物管理の科学的基礎に関する国際シンポジウム, サイクル機構技術資料, JNC TN1200 2003-002.

佐藤治夫 (2003) : 堆積岩系岩石マトリクス中のイオンの拡散移行過程に関する研究 : 砂岩中の間隙水の熱力学特性, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2003-010.

佐藤治夫 (2003) : 堆積岩系岩石マトリクス中のイオンの拡散移行過程に関する研究 : 幌延泥岩の物理化学特性評価, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2003-003.

Sato, H. (2004) : Diffusion and Migration of Ions in Sedimentary Rock Matrix: Effects of Ionic Strength and Tracer Concentration on Diffusion of Cs^+ in Sandstone, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.807, pp. 597-602.

Sato, H. (2004) : Effect of the Orientation of Clay Particles and Ionic Strength on Diffusion and Activation Enthalpies of I^- and Cs^+ Ions in Compacted Bentonite, International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society, 2003, Kalmar, Sweden, Abstracts, pp.511-512.

佐藤治夫 (2004) : ベントナイト中の Cs^+ および I^- イオンの拡散および活性化エネルギーに及ぼす粘土粒子の配向およびイオン強度の影響, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2003-016.

佐藤治夫 (2004) : 圧縮ベントナイト中の I^- および Cs^+ イオンの拡散および活性化エネルギーに及ぼす粘土粒子の配向およびイオン強度の影響, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集 (第Ⅲ分冊), H6, p.812.

佐藤治夫 (2004) : 砂岩及びベントナイトに対する物理化学特性評価, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2003-013.

佐藤治夫 (2004) : 放射性廃棄物処分における緩衝材及び岩石マトリクス中の核種拡散移行過程での固液界面現象と移行モデルの高度化に関する研究, 第 34 回核種移行調査専門委員会大洗ワークショップ, 東北大学金属材料研究所, 核種移行評価の信頼性向上に関する調査及びレビュー, サイクル機構技術資料, JNC TJ8420 2003-002, pp. 付-1 (96) - 付-1 (102).

Sato, H. and Miyamoto, S. (2004) : Diffusion Behaviour of Selenite and Hydroselenide in Compacted Bentonite, Applied Clay Science, Vol.26, pp.47-55.

Sato, H. and Muraoka, T. (2003) : Diffusion and Migration of Ions in Sedimentary Rock Matrix: Behaviour of Cesium and Iodide in Micropores of Sandstone, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.807, pp.541-546.

Sato, H. and Suzuki, S. (2003) : Fundamental Study on the Effect of an Orientation of Clay Particles on Diffusion Pathway in Compacted Bentonite, Applied Clay Science, Vol.23, pp.51-60.

Sawada, A., Saegusa, H. and Ijiri, Y. (2004) : Uncertainty evaluation of groundwater flow by multiple modeling approach at Mizunami Underground Research Laboratory Project, Japan, Dynamics of Fluids in Fractured Rock, pp.232-236.

柴田勝志, 牧野仁史, 若杉圭一郎, 内田雅大 (2003) : 技術情報統合化システム (JGIS) 開発への取り組み, サイクル機構技報, No. 21, pp. 79-88.

柴田雅博, 笹本 広, 神徳 敬, 油井三和 (2004) : 緩衝材の長期安定性評価技術の現状, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2004-010.

重野喜政, 並河 努, 高治一彦 (2003) : 緩衝材長期力学挙動構成モデルの検討 (Ⅱ), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書 ; 株式会社竹中工務店), JNC TJ8440 2003-002.

重野喜政, 油井三和, 平井 卓, 高治一彦, 並河 努 (2003) : 緩衝材長期挙動構成モデルの検討 (その 2) - オーバーパックの腐食膨張と自重沈下を同時に考慮した緩衝材の長期挙動解析 -, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, CS7-046, pp. 369-370.

下茂道人, 文村賢一, 尾原雄三, 佐藤 晃, 菅原勝彦 (2003) : X 線 CT による亀裂開口幅評価, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書 ; 大成建設株式会社), JNC TJ8403 2003-021.

下茂道人, 文村賢一, 尾原祐三, 佐藤 晃, 菅原勝彦 (2004) : X 線 CT による亀裂開口幅評価 (Ⅱ), サイクル機構技術資

- 料（契約業務報告書；大成建設株式会社），JNC TJ8400 2003-091.
- 下茂道人，山本 肇，熊本 創（2003）：亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象に関する研究，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；大成建設株式会社），JNC TJ8400 2003-028.
- 下茂道人，山本 肇，熊本 創（2003）：亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象に関する研究（概要版），サイクル機構技術資料（契約業務報告書；大成建設株式会社），JNC TJ8400 2003-036.
- Sugita, Y., Chijimatsu, M., Ito, A., Kurikami, H., Kobayashi, A. and Ohnishi, Y. (2003) : THM simulation of the full-scale in-situ engineered barrier system experiment in GTS in Switzerland, Proceedings of GeoProc2003, Part 1, pp.102-107.
- Sugita, Y., Chijimatsu, M., Ito, A., Kurikami, H., Kobayashi, A. and Ohnishi, Y. (2003) : THM simulation of the full-scale in-situ engineered barrier system experiment in GTS in Switzerland, Abstract, GeoProc 2003.
- Sugita, Y., Chijimatsu, M. and Suzuki, H. (2003) : Fundamental properties of bentonite pellet for Prototype Repository Project, Large Scale Field Tests in Granite/SKB UPC ANDRA Clay-Technology ENRESA, 2003/11/12-14.
- 杉田 裕，藤田朝雄，川上 進，油井三和，戸井田克（2003）：原位置における実規模プラグのシーリング性能に関する研究（Ⅱ），日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集（第Ⅲ分冊），H21，p.827.
- 杉田 裕，伊藤 彰，千々松正和，大西有三，小林 晃（2003）：熱-水-応力連成解析技術に関する国際共同研究の紹介，日本原子力学会第 19 回バックエンド夏期セミナー資料集，pp.2.2-1 - 2.2-3.
- 杉田 裕，川上 進，千々松正和，雨宮 清（2003）：膨潤ベントナイトペレットの人工海水下での止水性能確認，土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集，CS7-034，pp.345-346.
- 杉田 裕，川上 進，谷口直樹，油井三和（2004）：要素試験に基づく隙間共存下におけるブロック緩衝材のバリア性能の評価，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-038.
- 杉田 裕，川上 進，戸井田克（2003）：トンネルシーリング性能試験における試験環境条件および計測項目，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-002.
- 杉田 裕，川上 進，油井三和，牧野仁史，澤田 淳，栗原雄二，三原守弘（2003）：高レベル放射性廃棄物地層処分における閉鎖性能に関する検討（平成 14 年度），サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-010.
- 杉田 裕，菊池広人，棚井憲治（2003）：人工バリアにおける緩衝材の隙間膨潤挙動に関する基礎研究（Ⅱ），サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2003-007.
- 杉田 裕，栗原雄二，川上 進，神徳 敬，油井三和（2003）：高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア等の性能保証に関わる研究の進め方と反映先（その 2），サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-015.
- 鈴木治雄，畑 祐二，島田 透，山田 真（2003）：緩衝材とオーバーパックの相互作用に関する腐食挙動評価研究（Ⅱ），サイクル機構技術資料（契約業務報告書；鋼管計測株式会社），JNC TJ8400 2003-027.
- 鈴木英明，伊藤 彰，吉田 泰，陶山忠宏，川上 進，笹本 広，油井三和（2004）：熱-水-応力連成試験設備（COUPLE）における熱-水-応力-化学連成試験（Ⅰ），サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-033.
- Suzuki, S. and Sato, H. (2003) : Study on the Diffusion of Sr, I and Deuterated Water in a Compacted Mixture of Silica Sand and Bentonite, 9th International Conference on Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere, MIGRATION'03, Abstracts, pp.150-151.
- Suzuki, S. and Sato, H. (2003) : A Technical Problem in Through-Diffusion Experiments for Compacted Bentonite, Journal of Nuclear Science and Technology Vol.40, No.9, pp.698-701.
- Suzuki, S., Sato, H., Ishidera, T. and Fujii, N. (2004) : Study on Anisotropy of Effective Diffusion Coefficient and Activation Energy for Deuterated Water in Compacted Sodium Bentonite, Journal of Contaminant Hydrology, Vol.68, pp.23-37.
- 鈴木英明，杉田 裕，川上 進（2003）：熱特性からみた隙間充填材としてのベントナイトペレットの適用性，土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集，pp.311-312.
- 鈴木宏幸，谷口直樹，川上 進（2003）：還元性環境下におけるチタンの腐食速度と水素吸収挙動，土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集，CS7-017，pp.311-312.
- 鈴木宏幸，谷口直樹，川上 進（2004）：還元性環境下におけるチタンの腐食速度と水素吸収挙動-Ⅱ，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-042.

- 鈴木祐二，加藤智子，牧野仁史，内田雅大（2003）：地層処分生物圏評価モデルのパラメータ感度解析，日本原子力学会 第 19 回バックエンド夏期セミナー資料集，pp. 2. 11-1 - 2. 116.
- 立川博一（2004）：核種移行評価の信頼性向上に関する調査及び技術的レビュー（平成 15 年度），サイクル機構技術資料（契約業務報告書；財団法人原子力安全研究協会），JNC TJ8420 2003-002.
- 立川博一（2004）：人工バリアの長期安定性，長期耐食性評価に関する調査研究及び技術レビュー，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；財団法人原子力安全研究協会），JNC TJ8400 2003-082.
- 高治一彦，重野喜政，下河内隆文，白武敏和，田村博邦（2003）：緩衝材長期力学挙動構成モデルの検討（Ⅲ），サイクル機構技術資料（契約業務報告書；株式会社竹中工務店），JNC TJ8440 2003-007.
- 高治一彦，重野喜政，下河内隆文（2004）：幌延の地下水環境下におけるベントナイト混合材料の力学特性に関する研究，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；株式会社竹中工務店），JNC TJ5400 2003-007.
- 高治一彦，油井三和，平井 卓，重野喜政，並河 努（2003）：緩衝材長期挙動構成モデルの検討（その 1）ーベントナイトの力学特性に関する弾粘塑性構成モデルの適用性ー，土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集，CS7-045，pp. 367-368.
- 棚井憲治，松本一浩，菊池広人（2003）：X 線 CT 法の適用性に関する検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2003-001.
- Tanai, K. and Yamamoto, M.（2003）：Experimental and Modeling Studies on Gas Migration in Kunigel V1 Bentonite，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-024.
- 棚井憲治，山本幹彦（2003）：ガス移行挙動評価モデルに関する検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-051.
- 谷口直樹（2003）：高レベル放射性廃棄物地層処分におけるオーバーパック腐食研究の現状，表面技術，vol. 54, No. 12, pp. 951-956.
- 谷口直樹（2003）：高レベル放射性廃棄物地層処分における処分容器材料の腐食寿命評価の現状と課題，材料と環境，vol. 52, No. 4, pp. 178-184.
- Taniguchi, N., Kawasaki, M. Kawakami, S. and Kubota, M.（2003）：Propagation behavior of localized corrosion of Carbon steel in alkaline groundwater environment，Proceedings of 13th APCCC, Paper No.H-06.
- 谷口直樹，川崎 学，川上 進，久保田 満（2004）：還元性雰囲気における緩衝材中での炭素鋼の腐食挙動，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-040.
- 谷口直樹，建石 剛，西村 務，川上 進（2004）：模擬腐食生成物中 Fe(Ⅲ)/Fe(Ⅱ)比による炭素鋼の腐食挙動への影響，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-049.
- 鐵 桂一，澤田 淳（2003）：高粘性流体を用いた天然亀裂岩体の透水試験 2-NEBLOCK 試験報告ー，サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2003-004.
- 鐵 桂一，澤田 淳，内田雅大（2003）：亀裂交差部に沿った方向の透水特性の評価，土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集，CS7-069，pp. 415-416.
- 鐵 桂一，澤田 淳，内田雅大（2004）：亀裂交差部に沿った方向の透水特性の評価，サイクル機構技報，No. 23, pp. 63-70.
- 飛塚早智子，小原幸利，飯島和毅，佐藤治夫（2003）：還元条件における Np の溶解度に及ぼすフミン酸の影響，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2003-018.
- 戸井田克，笹倉 剛，渥美博行，須山泰宏，小林一三，川端淳一，伊藤圭二郎（2003）：カナダシーリング性能共同研究の解析評価，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；鹿島建設株式会社），JNC TJ8400 2003-088.
- 戸井田克，塩釜幸弘，渥美博行，須山泰宏，川端淳一，伊藤圭二郎，奥津一夫（2003）：実規模シーリングシステムに関する研究（Ⅲ），サイクル機構技術資料（契約業務報告書；鹿島建設株式会社），JNC TJ8400 2003-022.
- 戸井田克，塩釜幸弘，渥美博行，須山泰宏，川端淳一，伊藤圭二郎，奥津一夫（2003）：実規模シーリングシステムに関する研究（Ⅲ）概要，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；鹿島建設株式会社），JNC TJ8400 2003-023.
- 陶山忠宏，笹本 広（2004）：JNC 収着データベース（JNC-SDB）の更新：1998 年～2003 年までに公開された文献データの追加，サイクル機構技術資料，JNC TN8410 2003-018.
- 土屋 真，上田真三，大橋東洋（2004）：地質環境分野についての技術情報統合システムの製作，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；三菱マテリアル株式会社），JNC TJ8440 2004-006.

- 塚田泰博, 小林 晃, 山本清仁, 青山咸康 (2003) : 一軸載荷応力状態での大型モルタル供試体の水圧破碎解析, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, CS7-004, pp. 285-286.
- Tsukada, T., Kobayashi, A., Yamamoto, K., Aoyama, S. and Sugita, Y. (2003) : Hydraulic fracturing test of large scale mortar specimen under uniaxial compression condition, International workshop on Prediction and Simulation Method in Geomechanics/ISSMGE・TC34 2003/10/14-15.
- Uchida, M., Makino, H., Wakasugi, K. and Shibata, K. (2003) : Development of JNC Geologic Disposal Technical Information System - An approach to integrate and share technical information among safety assessment, repository design and site investigation, OECD/NEA Amigo project, First Workshop on building confidence using multiple lines of evidence, Yverdon-les-Bains, Switzerland, 3-5 June, 2003.
- 上田真三, 久野義夫 (2004) : 核種移行に関する基盤データ構築手法の検討および個別モデルの高度化に関する研究, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書 ; 三菱マテリアル株式会社), JNC TJ8400 2003-065.
- 和田隆太郎, 西村 務, 中西智明, 藤原和雄, 井上隆夫, 建石 剛, 舩形 剛 (2003) : チタンオーバーパックの水素吸収に関する研究, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書 ; 株式会社神戸製鋼所), JNC TJ8400 2003-092.
- 若杉圭一郎 (2004) : 高レベル放射性廃棄物地層処分安全評価における不確実性解析の現状と課題, 日本原子力学会関東・甲越支部第 2 回若手研究会発表討論会予稿集, pp8-9.
- 若杉圭一郎, 牧野仁史, 小尾 繁 (2003) : 2 次元核種移行解析モデルによる掘削影響領域の遅延効果に関する検討, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集 (第Ⅲ分冊), 027, p. 872.
- 若杉圭一郎, 宮原 要, 牧野仁史, 石黒勝彦, 澤村英範, 根山敦史, 西村和哉 (2003) : ガラス固化体からの放射線量に関する検討, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-022.
- Xia, X., Idemitsu, K., Arima, T., Inagaki, Y., Ishidera, T., Kurosawa, S., Iijima, K. and Sato, H. (2003) : Corrosion of Carbon Steel in Compacted Bentonite and Its Effect on Neptunium Diffusion under Reducing Condition, 10th Conference of the European Clay Groups Association, EUROCLAY 2003, June 22-26, 2003, Modena, Italy, Abstracts, pp. 290-291.
- Xia, X., Shibata, M., Kitamura, A. and Kamei, G. (2004) : Model development on radionuclide sorption in a sedimentary rock/groundwater system (1): Effect factor on cesium sorption onto a sedimentary rock under saline groundwater condition, 日本原子力学会 2004 年春の年会要旨集 (第Ⅲ分冊), H10, p. 816.
- 吉田 泰, 笹本 広 (2004) : OECD/NEA で整備された熱力学データベース利用環境の整備 その 1-Np および Pu の熱力学データ, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-027.
- 吉田 泰, 笹本 広, 神徳 敬 (2004) : 高イオン強度条件下における活量係数補正パラメータの整備, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-043.
- 吉田 泰, 油井三和 (2003) : 熱力学データベースフォーマット変換プログラムの作成, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2002-024.
- Yoshikawa, H., Ueno, K., Honda, T., Yamaguchi, S. and Yui, M. (2003) : Analysis of the Excavated Archaeological Iron Using X-ray-CT, The 9th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation (ICEM' 03).
- 吉野尚人, 梨本 裕, 松井幹雄, 伊藤節男, 野本康介 (2004) : 移行パラメータ信頼性評価手法の確立, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書 ; 前田建設工業株式会社), JNC TJ8400 2003-071.
- Yoshino, N., Sawada, A. and Sato, H. (2003) : An Examination of Aperture Estimation in Fractured Rock, International workshop on geotechnical X-ray CT (GeoX 2003), pp. 255-261.
- 吉野尚人, 澤田 淳, 内田雅大, 青山裕司, 高瀬博康 (2003) : セルオートマトン法による流体・物質移動解析手法の検討, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, CS7-063, pp. 403-404.
- 油井三和, 佐々木規行 (2004) : 深地層分配係数の測定方法の標準化への検討状況 (3) 分配係数をめぐる国内外の動向, 日本原子力学会 2004 年春の年会, バックエンド部会総合講演, p. 15.
- 油井三和, 中山真一, 上田真三 (2004) : 深地層分配係数の測定方法の標準化への検討状況 (5) 分配係数の標準的な方法の提案, 日本原子力学会 2004 年春の年会, バックエンド部会総合講演, p. 17.

JNC

Japan Nuclear Cycle Development Institute

<http://www.jnc.go.jp/>

正誤表

「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成 15 年度報告－」
に印刷上の不具合がありましたので、以下のとおり訂正いたします。

該当箇所：2-10 頁の図 2.2.1-6 および 3-8 頁の図 3.2.2-2（同一の図です）

