JNC TN1400 2002-003

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－

2002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大字村松4-49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部　技術協力課

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)
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－」の刊行にあたって

－ 歴史の創造に向けて －

人類の営みの記録の累々とした蓄積によって，人類の歴史が形作られる。歴史を振り返ることにより，我々は今ある自らの姿の拠って来るところを確認でき，将来歩むべき道への示唆を得ることができる。

20世紀の初頭，16億人ほどであった世界人口は，21世紀への変わり目では約3.7倍となり60億人を超えた。世界のエネルギー消費に至っては，20世紀の初頭，石油換算で年間10億キロリットルに満たなかったのが，100年後の今日では10倍以上に急増し，年間100億キロリットルに近づいている。毎日東京ドーム20杯分の消費に相当する。その約90%は化石燃料の消費であり，大量の炭酸ガス放出による地球の温暖化が進み始めている。

20世紀半ば，人類が全く新たなエネルギー源として原子力を手にしたことは，人類史上のタイミングとしては奇跡的とも思える。地球の有限性を真剣に憂慮せざるを得ないほどに世界人口の増加とエネルギー需要の伸びが続くなかで，人類は，温暖化防止のために化石燃料の使用を抑制しなければならないという，きわめて深刻で困難な事態に遭遇している。将来エネルギーとして，太陽エネルギーなどの新エネルギーへの期待が高まりはじめてから，すでに四半世紀以上になるが，それらが確実に人類にとっての主たるエネルギー供給源となりうるという見通しはいまだ立っていない。化石燃料の大幅な使用抑制を可能とし，何世紀にもわたり大量のエネルギー供給を可能とする将来エネルギーとして，現実的に本当に期待できるのは，今のところ，そしておそらく将来も原子力しかない。

人類と原子力の最初の出会いは，原爆という極めて不幸なかたちをとることになった。しかしそれから半世紀以上を経過し，それを人々の生活や生産活動を支えるエネルギーとして利用することについては，大変な経験を積み，相当熟練してきているといえよう。その一方で，その大きな便益享受の結果として発生する放射性廃棄物，とりわけその中で最も重要な，高レベル放射性廃棄物については，残念ながらこの半世紀のうちにはこれを適切に処分できるところまで至らなかった。しかし，原子力発電を進める多くの国が，この問題解決に向けて，永年にわたり真剣に取り組んできた。その結果，地層処分が最も望ましい解決策であるという国際コンセンサスが確立され，その技術への自信と理解が深まり，21世紀に入り幾つかの国で地層処分実施に向けての具体的な活動が開始されている。

我が国においても，1999年の11月に，核燃料サイクル開発機構（サイクル機構）が，四半世紀にわたる研究開発の成果をいわゆる「第2次取りまとめ」として総合的に取りまとめ，日本における地層処分の技術的信頼性を示した。これを技術的根拠として，20世紀最後の年である西暦2000年に，特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律が制定され，処分の実施主体としての原子力発電環境整備機構（原環機構）が設立された。こうして21世紀の幕開けは，我が国にとっても地層処分具体化に向けて第一歩を踏み出す年となった。

サイクル機構の地層処分技術に関する研究開発も，21 世紀入りを契機に，単なる研究開発の段階から，国家的に重要な事業である処分事業の円滑な推進を支えるための研究開発へと脱皮することとなった。またこの大事な時期に，長年膠着状態にあった幌延と瑞浪における二つの深地層の研究施設の計画が，地元の協力を得て前進できることになった。我々は，新たな役割を十分認識し，期待される研究開発を着実に推進することにより，地層処分にかかわる信頼性をより高いものにし，原環機構が進める処分事業の円滑な推進や，国による規制整備に積極的に貢献していく必要がある。今回，新しい段階の研究開発計画の初年度にあたる，2001 年度（平成 13 年度）の研究開発業務の進展とその成果を報告書として取りまとめた。本当の成果が出るのはこれからではあるが，我々の毎年の研究の進展と成果を，広い範囲の方々に評価していただき，ご批判を含めいろいろとご意見を拝聴するための素材としたい。

地層処分の安全性についての大きな特徴は，それが現在の我々にとってだけでなく，これから 1,000 年，あるいは 10,000 年先の子孫に対する安全性を議論の対象とするところにある。我々は，地質環境特性の地球科学史的変遷を学ぶことからはじめ，物質の物理的・化学的挙動についての深い知見を加味することにより，地層処分にともなう 1,000 年，あるいは 10,000 年先の子孫へのリスクを全く心配ないレベルに抑え込むための方策を提示した。地層処分という事業は，地球の歴史と現代科学を土台に，1,000 年，あるいは 10,000 年先の環境を計画する，いわば歴史の創造ともいえる事業である。さらに地層処分事業の成功は，原子力を人類が何世紀にもわたって頼ることができる主要エネルギー源として本当に定着させるための必須の要件であり，その意味でも地層処分は歴史の創造につながる重要事業ということができる。そういう気概をもってこの大事な仕事に取り組んでいきたい。

経営企画本部　バックエンド推進部長*
河田　東海夫
（平成 14 年 3 月　記）

*現在，企画部研究主席

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－

－ 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計画の概要 ····· 2-1
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 ····· 2-12
2.2.3 安全評価手法の高度化 ····· 2-18

3. 深地層の科学的研究 ····· 3-1
3.1 広域地下水流動研究 ····· 3-1
3.1.1 研究の概要 ····· 3-1
3.1.2 各調査研究の成果 ····· 3-4
1) 地質・地質構造に関する調査研究 ····· 3-4
2) 岩盤の水理に関する調査研究 ····· 3-7
3) 地下水の地球化学に関する調査研究 ····· 3-10
3.2 超深地層研究所計画 ····· 3-12
3.2.1 計画の概要 ····· 3-12
3.2.2 各調査研究の成果 ····· 3-15
1) 地質・地質構造に関する調査研究 ····· 3-15
2) 岩盤の水理に関する調査研究 ····· 3-18
3) 地下水の地球化学に関する調査研究 ····· 3-23
4) 岩盤力学に関する調査研究 ····· 3-25
5) 深地層の工学技術の基礎に関する研究 ····· 3-29
3.3 東濃鉱山における調査試験研究 ····· 3-31
3.3.1 調査試験研究の概要 ····· 3-31
3.3.2 各調査試験研究の成果 ····· 3-33
1) ナチュラルアナログ研究 ····· 3-33
2) 岩盤の力学的安定性に関する試験研究 ····· 3-36
3) 坑道周辺の地質環境に関する調査研究 ····· 3-39
3.4 地質環境の長期安定性に関する研究 ····· 3-41

3.4.1 研究の概要 …… 3-41
3.4.2 各研究の成果 …… 3-43
1) 隆起・侵食に関する研究 …… 3-43
2) 気候・海水準変動に関する研究 …… 3-47
3) 火山活動に関する研究 …… 3-50
4) 地震・断層活動に関する研究 …… 3-55
5) 地質環境の長期予測に関する研究 …… 3-59
3.5 広域深地層研究計画 …… 3-61
3.5.1 計画の概要 …… 3-61
3.5.2 地質環境調査技術開発 …… 3-64
1) 地表から地下深部までの地質環境データの取得 …… 3-64
1-1) 物理探査 …… 3-64
1-2) 地質調査 …… 3-67
1-3) 岩盤水理調査 …… 3-71
1-4) 試錐調査 …… 3-75
1-5) 地表からの調査のまとめ …… 3-83
2) 地質環境のモデル化と地下施設建設に伴う地質環境の変化の予測 …… 3-85
2-1) 地質構造モデル …… 3-85
2-2) 岩盤の水理モデル …… 3-88
2-3) 地下水の地球化学モデル …… 3-90
3) 調査技術・調査機器開発 …… 3-93
3.5.3 地質環境モニタリング技術の開発 …… 3-94
1) 試錐孔を用いたモニタリング技術開発 …… 3-94
2) 通廊監視システムの開発 …… 3-96
3.5.4 深地層における工学的技術の基礎の開発 …… 3-98
3.5.5 地質環境の長期安定性に関する研究 …… 3-101
1) 地震研究 …… 3-101
2) 天然現象に関する研究 …… 3-102
3.5.6 環境調査 …… 3-104

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 ····· 4-8
4.1.3 人工バリアの性能保証に関する基盤情報整備 ····· 4-11
4.2 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究 ····· 4-16
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 ····· 4-16
1) 緩衝材／岩盤の力学的変形挙動に関する研究 ····· 4-16
1-1) 緩衝材クリープ現象に関する研究 ····· 4-16
1-2) 岩盤の力学的変形挙動に関する研究 ····· 4-18
2) 緩衝材の流出・侵入挙動に関する研究 ····· 4-21
3) 人工バリアの変質・劣化挙動に関する研究 ····· 4-24
4.2.2 熱-水-応力-化学連成挙動に関する研究 ····· 4-26
4.2.3 人工バリア性能の維持限界条件に関する研究 ····· 4-31
1) 緩衝材ガス透気回復挙動に関する研究 ····· 4-31
2) 人工バリアせん断応答挙動に関する研究 ····· 4-34
4.2.4 人工バリア等のナチュラルアナログ研究 ····· 4-36
4.3 人工バリア等の工学技術の検証 ····· 4-40
1) 閉鎖技術の検証試験 ····· 4-40
2) 人工材料の開発 ····· 4-43

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 ····· 5-5
5.2 安全評価モデルの高度化 ····· 5-7
5.2.1 岩盤中水理・物質移行モデル ····· 5-7
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 ····· 5-7
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 ····· 5-10
3) 結晶質岩の水理・物質移行モデルの信頼性向上研究 ····· 5-14
3-1) 単一亀裂／亀裂交差部・室内試験（移流・分散） ····· 5-14
3-2) 単一亀裂・室内実験（充填物質中拡散試験） ····· 5-17
3-3) 単一亀裂・原位置トレーサー試験／室内試験（グリムゼル原位置試験研究） ····· 5-21
3-4) 単一亀裂・モデル開発（LBNL 共同研究） ····· 5-25
3-5) 亀裂ネットワーク・原位置トレーサー試験（TRUE ブロックスケール試験） ····· 5-29
3-6) サイトスケール・原位置試験（水理－地下水化学総合モデル） ····· 5-31
3-7) トレース長のフラクタル性 ····· 5-35
4) 不均質堆積岩中の物質移行評価 ····· 5-39

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 ····· 5-45
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 ····· 5-45
2) 核種の収着・拡散現象に関する研究 ····· 5-47
5.2.4 コロイド等の影響評価モデルの開発 ····· 5-51
1) コロイドの影響評価モデルの開発 ····· 5-51
2) 天然有機物の影響評価モデルの開発 ····· 5-54
5.2.5 生物圏評価モデル ····· 5-57
5.3 安全評価手法の整備・高度化 ····· 5-61
5.3.1 シナリオ等の安全評価基盤の整備 ····· 5-61
1) 安全評価の基本事項の検討 ····· 5-61
2) シナリオ開発技術の高度化 ····· 5-65
5.3.2 不確実性評価技術 ····· 5-69
5.3.3 統合解析システムの整備 ····· 5-73
1) 統合解析システムの整備 ····· 5-73
2) 広域安全評価モデルの統合化に関する研究 ····· 5-76

6. おわりに ····· 6-1

付録A 地層処分技術に関する研究開発に係る主な業務と国際共同研究の実績（平成13年度）
付録B 公開文献リスト(本社・各事業所：平成12～13年度)

－ 図リスト －

図 2.1-1　関係機関の役割と関係 …… 2-1
図 2.1-2　目標「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」の概念 …… 2-2
図 2.1-3　目標「地層処分システムの長期挙動の理解」の概念 …… 2-3
図 2.1-4　二つの研究開発目標に向けた研究開発課題の設定 …… 2-3
図 2.1-5　サイクル機構の研究開発施設 …… 2-4
図 2.1-6　二つの目標に向けた分野間の連携と情報の流れ …… 2-4
図 2.1-7　成果の取りまとめと反映先 …… 2-5
図 2.2-1　地層処分にとって重要な天然現象と地質環境の特性 …… 2-6
図 2.2-2　乾燥密度 1.6g/cm³，ケイ砂混合率 30%の緩衝材中における酸素圏の不動態化条件 …… 2-13
図 2.2-3　人工海水及び蒸留水に対する透水係数 …… 2-14
図 2.2-4　X 線 CT を用いた亀裂内粘土の可視化 …… 2-15
図 2.2-5　熱-水-応力-化学連成場の概念 …… 2-16
図 2.2-6　湧水量の経時変化 …… 2-17
図 2.2-7　HFSC の pH 低下状況 …… 2-17
図 2.2-8　安全評価手法の高度化における研究開発課題 …… 2-18
図 2.2-9　ネプツニウム(IV)溶解度の pH 依存性およびその解析結果 …… 2-18
図 2.2-10　亀裂性岩盤中各領域における拡散係数 …… 2-19
図 2.2-11　圧縮ベントナイト中の HTO の拡散結果と MD-HA 結合解析結果の比較 …… 2-20
図 2.2-12　ベントナイトコロイド共存下での放射性核種の移行・遅延挙動
（グリムゼル原位置試験結果の一例） …… 2-20
図 2.2-13　海域を GBI とした生物圏モデルを用いて算出した線量への換算係数
（海洋漁業従事者グループ） …… 2-21
図 2.2-14　総湧水量の最大値の散布図 …… 2-22
図 2.2-15　統合解析システム概念図 …… 2-22

図 3.1-1　広域地下水流動研究の研究実施領域 …… 3-1
図 3.1-2　研究実施領域周辺の地質状況 …… 3-2
図 3.1-3　試錐孔位置図 …… 3-2
図 3.1-4　ガンマ線強度と地表での花崗岩の分布 …… 3-4
図 3.1-5　地上電磁探査による標高 200m での比抵抗分布平面図 …… 3-4
図 3.1-6　地上電磁探査結果から推定した基盤不整合面等高線図 …… 3-5
図 3.1-7　リニアメントと地表剪断割れ目の方向性 …… 3-5
図 3.1-8　試錐孔中の断層の地上投影部近傍に判読されるリニアメント …… 3-5
図 3.1-9　推定された大規模不連続構造と高密度電気探査の測線位置 …… 3-6
図 3.1-10　水収支観測点位置図 …… 3-7
図 3.1-11　各年度の降水量と岩盤浸透量との相関 …… 3-7
図 3.1-12　研究実施領域における水頭分布 …… 3-8
図 3.1-13　土岐花崗岩の透水係数と深度との関係 …… 3-8
図 3.1-14　土岐花崗岩の透水係数分布 …… 3-8
図 3.1-15　地下水流動解析結果（全水頭分布） …… 3-9
図 3.1-16　地下水の全水頭分布 …… 3-9

図 3.1-17 土岐花崗岩中の地下水水質形成モデル ····· 3-10
図 3.1-18 広域地下水流動研究における試錐孔位置 ····· 3-11
図 3.2-1 統合化データフローの例（地質・地質構造） ····· 3-12
図 3.2-2 調査・研究の繰り返しアプローチ ····· 3-13
図 3.2-3 地質概要 ····· 3-13
図 3.2-4 正馬様用地におけるこれまでの調査・研究の概要 ····· 3-13
図 3.2-5 今後の地表からの調査・研究の展開 ····· 3-14
図 3.2-6 反射法弾性波探査の測線配置 ····· 3-15
図 3.2-7 反射法弾性波探査の調査結果と不連続面推定結果 ····· 3-15
図 3.2-8 割れ目の密度，累積本数および方向分布 ····· 3-16
図 3.2-9 地質構造の概念図 ····· 3-16
図 3.2-10 リニアメント分布および抽出した不連続構造 ····· 3-16
図 3.2-11 地質構造モデル ····· 3-17
図 3.2-12 断層モデル ····· 3-17
図 3.2-13 地質構造要素ごとの透水係数分布 ····· 3-18
図 3.2-14 透水係数と水圧の深度分布（MIU-2 号孔） ····· 3-18
図 3.2-15 MIU-4 号孔における流体検層結果 ····· 3-19
図 3.2-16 水理試験の手順 ····· 3-19
図 3.2-17 地質構造モデル ····· 3-19
図 3.2-18 解析対象領域と想定断層 ····· 3-19
図 3.2-19 移行経路調査出発点（全 24 点） ····· 3-20
図 3.2-20 解析結果で得られた移行経路の概念図 ····· 3-20
図 3.2-21 異なるモデル化手法による地下水の移行経路の例 ····· 3-21
図 3.2-22 揚水試験中の物理化学パラメータ，主要化学成分濃度の測定結果 ····· 3-24
図 3.2-23 蛍光染料濃度と主要化学成分濃度の関係 ····· 3-24
図 3.2-24 各試錐孔における室内物性試験結果 ····· 3-25
図 3.2-25 各試錐孔における水圧破砕法による初期応力測定結果 ····· 3-25
図 3.2-26 BTV 観察から得られた試錐孔における割れ目数の深度変化 ····· 3-26
図 3.2-27 月吉断層上盤側岩体の岩盤力学的概念モデル ····· 3-26
図 3.2-28 東濃鉱山における水圧破砕法による初期応力測定結果 ····· 3-27
図 3.2-29 月吉断層下盤側岩体の岩盤力学的概念モデル ····· 3-27
図 3.2-30 正馬様用地を対象とした土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデル ····· 3-27
図 3.2-31 研究坑道のレイアウト案 ····· 3-30
図 3.3-1 東濃鉱山における調査試験研究の実施領域 ····· 3-31
図 3.3-2 月吉断層の分布とその連続性 ····· 3-33
図 3.3-3 地下深部に生息する硝酸還元菌 ····· 3-34
図 3.3-4 硝酸還元菌の硝酸還元活性 ····· 3-34
図 3.3-5 調査用試錐孔の位置図（平面図） ····· 3-36
図 3.3-6 各試錐孔の地質柱状図 ····· 3-36
図 3.3-7 水圧破砕法による初期応力測定結果 ····· 3-36
図 3.3-8 製作した空圧式クリープ試験装置 ····· 3-37
図 3.3-9 孔壁面の状態 ····· 3-37
図 3.3-10 二軸圧縮試験結果（等方応力作用） ····· 3-37

図 3.3-11 境界要素法による三次元弾性解析結果 …… 3-38
図 3.3-12 試錐孔位置図 …… 3-39
図 3.3-13 間隙水圧の経時変化 …… 3-39
図 3.3-14 製作したパッカー式プローブ …… 3-39
図 3.3-15 鉄含有量およびFe^{2+}/Fe^{3+}比 …… 3-40
図 3.3-16 ウラン系列核種の放射能比 …… 3-40
図 3.4-1 現在の地形の 5m-DEM（陰影図） …… 3-44
図 3.4-2 10 万年間の侵食量の分布 …… 3-44
図 3.4-3 10 万年後の地形の 5m-DEM …… 3-44
図 3.4-4 地すべり地形の全国分布図 …… 3-45
図 3.4-5 北海道北部剣淵盆地の解析例（積雪ありの場合） …… 3-47
図 3.4-6 北海道北部剣淵盆地の解析例（積雪なしの場合） …… 3-48
図 3.4-7 紀伊半島南部の比抵抗構造 …… 3-50
図 3.4-8 紀伊半島でのヘリウム同位体比分布 …… 3-51
図 3.4-9 中国地方の火山岩分布 …… 3-51
図 3.4-10 横田単成火山群の時空分布 …… 3-52
図 3.4-11 日本列島の第四紀火砕流堆積物分布 …… 3-52
図 3.4-12 一次元熱伝導数値解析の例 …… 3-53
図 3.4-13 日本列島の地下水 pH 分布 …… 3-53
図 3.4-14 pH データの火山からの距離との関係 …… 3-54
図 3.4-15 火山から 20km 以上離れた酸性地下水 …… 3-54
図 3.4-16 空中写真による地形リニアメント判読（事例対象：中国地方） …… 3-56
図 3.4-17 鳥取県西部地震震源域の地下水変化 …… 3-57
図 3.4-18 加速度振幅の増幅率（17 地震） …… 3-58
図 3.4-19 方解石の酸素・炭素同位体比 …… 3-59
図 3.4-20 東濃地域で観察される方解石の結晶形 …… 3-59
図 3.4-21 弾性体・塑性体層状モデルの例 …… 3-60
図 3.4-22 シミュレーション解析結果の例 …… 3-60
図 3.5-1 幌延町位置図 …… 3-61
図 3.5-2 幌延町の地質 …… 3-61
図 3.5-3 調査対象区域の選定 …… 3-62
図 3.5-4 空中電磁探査．見掛比抵抗分布図（20m 深度） …… 3-64
図 3.5-5 空中電磁探査．見掛比抵抗分布図（100m 深度） …… 3-64
図 3.5-6 天北地域の磁気図 …… 3-65
図 3.5-7 空中磁気探査：極磁気異常図 …… 3-65
図 3.5-8 空中磁気探査：傾向面解析図 …… 3-65
図 3.5-9 空中放射能探査：全γ線強度分布図 …… 3-65
図 3.5-10 比抵抗断面図（幌延町北進地区測線） …… 3-66
図 3.5-11 比抵抗断面図（幌延町開進地区測線） …… 3-66
図 3.5-12 比抵抗平面図（海抜 0m） …… 3-66
図 3.5-13 比抵抗平面図（海抜-500m） …… 3-66
図 3.5-14 岩石鉱物試験試料採取位置図 …… 3-67
図 3.5-15 モード分析結果（QRF ダイアグラム） …… 3-67

図 3.5-16 SAN ダイアグラム ····· 3-68
図 3.5-17 代表的な流域選定とその後の流れ ····· 3-71
図 3.5-18 調査対象地域と検討対象流域 ····· 3-72
図 3.5-19 起伏量分布計測の例（流域 No.2 付近） ····· 3-72
図 3.5-20 地形（水系）と地質 ····· 3-72
図 3.5-21 長期水理観測システムの概念 ····· 3-74
図 3.5-22 推定地質層序とケーシングプログラム ····· 3-75
図 3.5-23 HDB-1 孔 総合柱状図 ····· 3-76
図 3.5-24 HDB-2 孔 総合柱状図 ····· 3-77
図 3.5-25 HDB-1 孔 物理検層柱状図 ····· 3-78
図 3.5-26 HDB-1 孔 電磁フローメーター検層図 ····· 3-78
図 3.5-27 HDB-2 孔 物理検層柱状図 ····· 3-79
図 3.5-28 HDB-2 孔 電磁フローメーター検層図 ····· 3-79
図 3.5-29 HDB-1 孔における試験結果の一例 ····· 3-80
図 3.5-30 HDB-2 孔における試験結果の一例 ····· 3-80
図 3.5-31 室内試験結果（HDB-1, 2） ····· 3-81
図 3.5-32 載荷中の AE 発生状況 ····· 3-82
図 3.5-33 岩石等の比抵抗 ····· 3-83
図 3.5-34 いろいろな岩の透水係数 ····· 3-83
図 3.5-35 国内の堆積軟岩との比較 ····· 3-83
図 3.5-36 地表地質図 ····· 3-85
図 3.5-37 ①－①' 地質断面図 ····· 3-86
図 3.5-38 解析領域設定の検討範囲 ····· 3-88
図 3.5-39 解析領域設定概要 ····· 3-88
図 3.5-40 解析検討範囲 ····· 3-89
図 3.5-41 トリリニアダイアグラム ····· 3-90
図 3.5-42 掘削水に添加した蛍光染料（Sodium-naphthionate）の構造式 ····· 3-91
図 3.5-43 掘削水用井戸水の水質変化 ····· 3-91
図 3.5-44 岩芯を用いた電気伝導度測定 ····· 3-91
図 3.5-45 水理試験装置の概念図 ····· 3-93
図 3.5-46 試験結果の一例 ····· 3-93
図 3.5-47 遠隔監視システムの例 ····· 3-96
図 3.5-48 地下施設レイアウト比較検討 ····· 3-99
図 3.5-49 北海道北部の震源分布と応力異常コンター図 ····· 3-101
図 3.5-50 最近 1 年間の北海道地方の水平地盤歪み ····· 3-102
図 3.5-51 海成段丘の分布と隆起速度 ····· 3-102
図 3.5-52 調査位置図 ····· 3-104

図 4.1-1 乾燥密度 1.6g/cm³, ケイ砂混合率 30%の緩衝材中における炭素鋼の不動態化条件 ····· 4-2
図 4.1-2 緩衝材のケイ砂混合率と乾燥密度に対する炭素鋼の不動態化条件および緩衝材の特性 ····· 4-2
図 4.1-3 供試体断面写真 ····· 4-3
図 4.1-4 弾性係数の測定結果のグラフ ····· 4-3
図 4.1-5 炭酸水素イオン濃度をパラメータとした純銅のアノード分極測定結果の一例 ····· 4-6

図 4.1-6 純銅のアノード分極挙動に対する塩化物イオン濃度と炭酸水素イオン濃度の影響 ····· 4-7
図 4.1-7 隙間充填模式図 ····· 4-8
図 4.1-8 隙間充填後の膨潤応力と乾燥密度の関係 ····· 4-8
図 4.1-9 スケール効果による平衡膨潤応力及び供試体成型圧 ····· 4-9
図 4.1-10 スケール効果による平衡膨潤応力及び供試体成型圧（正規化） ····· 4-9
図 4.1-11 人工海水及び蒸留水を比較した透水係数 ····· 4-9
図 4.1-12 乾燥密度と熱伝導率の関係 ····· 4-10
図 4.1-13 熱伝導率の測定結果の比較 ····· 4-10
図 4.1-14 相互腐食試験セルのイメージ ····· 4-14
図 4.1-15 処分モデルの例（処分坑道横置き定置方式） ····· 4-14
図 4.2-1 緩衝材クリープ現有データ ····· 4-16
図 4.2-2 粘性土クリープ挙動把握のイメージ ····· 4-16
図 4.2-3 クリープ荷重 90%試験の試行 ····· 4-16
図 4.2-4 緩衝材三軸圧縮試験機の改良 ····· 4-16
図 4.2-5 試験 No.1（飽和，室温）応力-歪曲線 ····· 4-19
図 4.2-6 試験 No.2（飽和，80℃）応力-歪曲線 ····· 4-19
図 4.2-7 試験 No.3（乾湿，室温）応力-歪曲線 ····· 4-19
図 4.2-8 試験 No.4（乾湿，80℃）応力-歪曲線 ····· 4-19
図 4.2-9 寿命とクリープ応力度の関係 ····· 4-19
図 4.2-10 経過時間と侵入距離の関係 ····· 4-21
図 4.2-11 亀裂幅と比例係数の関係 ····· 4-21
図 4.2-12 平均流速と排水コロイド濃度の関係 ····· 4-22
図 4.2-13 流速による排水コロイドの粒径分布 ····· 4-22
図 4.2-14 X 線 CT を用いた亀裂内粘土の可視化例 ····· 4-23
図 4.2-15 接触面試料の相対湿度制御下での底面間隔の変化 ····· 4-24
図 4.2-16 ESEM 観察結果 ····· 4-24
図 4.2-17 熱-水-応力-化学連成場の概念 ····· 4-26
図 4.2-18 PRP 模式図 ····· 4-27
図 4.2-19 再冠水時間の比較 ····· 4-27
図 4.2-20 数値解析フロー ····· 4-28
図 4.2-21 解析モデル図 ····· 4-29
図 4.2-22 数値解析結果 ····· 4-29
図 4.2-23 温度勾配下における緩衝材浸潤試験装置 ····· 4-29
図 4.2-24 有効粘土密度と膨潤圧力の関係 ····· 4-31
図 4.2-25 膨潤応力と膨潤圧力の関係 ····· 4-31
図 4.2-26 三軸ガス移行試験装置（AFS） ····· 4-32
図 4.2-27 Fo-Ca Clay を用いた実験結果 ····· 4-32
図 4.2-28 MX-80 を用いた実験結果 ····· 4-32
図 4.2-29 予備試験結果の一例（径方向断面） ····· 4-33
図 4.2-30 予備試験結果の一例（軸方向断面） ····· 4-33
図 4.2-31 X 線 CT 装置の概観 ····· 4-33
図 4.2-32 断層模擬試験の概要 ····· 4-34
図 4.2-33 断層模擬試験結果 ····· 4-34

図 4.2-34 断層模擬試験シミュレーション解析 ····· 4-34
図 4.2-35 模擬オーバーパック応力パターン ····· 4-34
図 4.2-36 模擬オーバーパックの改良 ····· 4-35
図 4.2-37 考古遺物の外観写真とそのX線CT像 ····· 4-37
図 4.2-38 本研究にて取得した最大曲率深さと既往の文献値 ····· 4-37
図 4.3-1 閉鎖の概念 ····· 4-40
図 4.3-2 トンネルシーリング性能試験 ····· 4-40
図 4.3-3 湧水量の経時変化 ····· 4-41
図 4.3-4 トレーサー試験結果 ····· 4-41
図 4.3-5 浸漬の模式図 ····· 4-41
図 4.3-6 QUEの試験水槽A ····· 4-42
図 4.3-7 体積含水率の解析と計測の比較 ····· 4-42
図 4.3-8 低アルカリ性コンクリート施工性開発概念 ····· 4-43
図 4.3-9 HFSC強度発現結果 ····· 4-44
図 4.3-10 鉄筋腐食暴露試験状況（飛沫帯設置状況） ····· 4-44
図 4.3-11 HFSCのpH低下状況 ····· 4-45
図 4.3-12 試作セグメント ····· 4-45
図 4.3-13 プラウト候補材のpH低下状況 ····· 4-45

図 5.1-1 Np(IV)溶解度のpH_c依存性およびその解析結果 ····· 5-2
図 5.1-2 740nmおよび794nm付近におけるNd³⁺の光音響スペクトル ····· 5-2
図 5.1-3 PbのDaに関する試料の乾燥密度依存性 ····· 5-5
図 5.1-4 PbのDaに関するスメクタイト部分密度依存性 ····· 5-6
図 5.1-5 還元条件下でのSeのDaに関するケイ砂混合率依存性 ····· 5-6
図 5.2-1 境界面と断層モデル例 ····· 5-8
図 5.2-2 稜線と河川から設定された境界 ····· 5-8
図 5.2-3 複雑形状の物方境界モデル ····· 5-8
図 5.2-4 地表堆積岩の遅延体要素と断層モデル ····· 5-8
図 5.2-5 パラメータ世界区間概念図 ····· 5-10
図 5.2-6 逆解析結果（HTO，均質一次元モデル） ····· 5-11
図 5.2-7 収着性核種トレーサー試験逆解析結果 ····· 5-11
図 5.2-8 移行経路概念図 ····· 5-12
図 5.2-9 複数経路モデルによる解析結果 ····· 5-12
図 5.2-10 情報量基準AICの比較 ····· 5-13
図 5.2-11 天然亀裂岩体概念図 ····· 5-14
図 5.2-12 水理学的開口幅と物質移行開口幅の関係 ····· 5-15
図 5.2-13 定常時の試験岩体内濃度状態 ····· 5-15
図 5.2-14 試験岩体の分類と試験セル ····· 5-17
図 5.2-15 試験の流れ ····· 5-17
図 5.2-16 X線撮影対象 ····· 5-18
図 5.2-17 ガウジで充填されている亀裂(KG1-m-1)中空隙率分布と濃度分布の時間変化 ····· 5-19
図 5.2-18 亀裂中の再結晶化部(KG1c-FF)における空隙率分布と濃度分布の時間変化 ····· 5-19
図 5.2-19 亀裂に沿った変質部(KG1a-alt)における空隙率分布と濃度分布の時間変化 ····· 5-19

図 5.2-20 ガウジで充填されている亀裂(左側)に存在するトレーサー質量の時間変化 ····· 5-19
図 5.2-21 亀裂中の再結晶化部に存在するトレーサー質量の時間変化 ····· 5-19
図 5.2-22 亀裂性岩盤中各領域における間隙水中の拡散係数 ····· 5-20
図 5.2-23 グリムゼル原位置試験場の位置 ····· 5-21
図 5.2-24 二重空隙コンセプトに基づくモデル化 ····· 5-21
図 5.2-25 孔間トレーサー試験の手法 ····· 5-22
図 5.2-26 孔間トレーサー試験の予測結果と試験結果との比較（一例） ····· 5-22
図 5.2-27 単一透水性亀裂中のチャンネルおよび強収着性放射性核種の分布 ····· 5-23
図 5.2-28 グリムゼル花崗閃緑岩中の連結空隙の幾何学的形状（一例） ····· 5-23
図 5.2-29 三つの交差亀裂で構成される流れのチャンネリングの概念図 ····· 5-25
図 5.2-30 有限要素メッシュと境界条件 ····· 5-25
図 5.2-31 亀裂の透水係数を変化させた解析ケース ····· 5-26
図 5.2-32 粒子追跡法により求めた移行経路 ····· 5-26
図 5.2-33 流出境界での粒子割合の時間変化 ····· 5-27
図 5.2-34 解析に使用したモデル ····· 5-27
図 5.2-35 緩み域の深さを変化させた解析結果 ····· 5-27
図 5.2-36 緩み域の幅を変化させた解析結果 ····· 5-28
図 5.2-37 構築された地質構造モデル ····· 5-29
図 5.2-38 概念化された亀裂構造（一例） ····· 5-29
図 5.2-39 孔間試験の解析結果 ····· 5-30
図 5.2-40 移行経路モデル ····· 5-30
図 5.2-41 岩小構造モデル ····· 5-30
図 5.2-42 トレーサー試験結果と予測解析結果との比較（一例） ····· 5-30
図 5.2-43 エスポ地下研究施設（HRL）の位置とモデル化領域 ····· 5-31
図 5.2-44 モデル化した主要な断層 ····· 5-32
図 5.2-45 端成分と混合割合の計算 ····· 5-32
図 5.2-46 端成分の深度分布 ····· 5-33
図 5.2-47 KAS06 孔 NA81 区間の水頭変化 ····· 5-33
図 5.2-48 KA3005A 孔における端成分の実測と計算の比較 ····· 5-33
図 5.2-49 KAS07 孔における端成分の実測と計算の比較 ····· 5-33
図 5.2-50 KAS07 孔における端成分の実測と計算の比較 ····· 5-34
図 5.2-51 亀裂のトレース長累積頻度分布 ····· 5-35
図 5.2-52 モデル領域と境界条件 ····· 5-36
図 5.2-53 各モデルの平均的な透水係数 ····· 5-37
図 5.2-54 各モデルの平均的な地下水移行時間 ····· 5-37
図 5.2-55 多孔質媒体評価の流れ ····· 5-39
図 5.2-56 シル(s)を変化させた場合の評価断面における温度変化 ····· 5-41
図 5.2-57 水平方向のレンジ(LH)を変化させた場合の評価断面における濃度変化 ····· 5-41
図 5.2-58 垂直方向のレンジ(LV)を変化させた場合の評価断面における濃度変化 ····· 5-41
図 5.2-59 シルと縦方向分散長との関係 ····· 5-42
図 5.2-60 水平方向のレンジと縦方向分散長との関係 ····· 5-42
図 5.2-61 垂直方向のレンジと縦方向分散長との関係 ····· 5-42
図 5.2-62 スメクタイトに対する Np の分配係数の全炭酸濃度（C_T）依存性 ····· 5-47

図 5.2-63 マグネタイト－Cr(VI)系における Cr(VI)濃度の時間変化 ····· 5-48
図 5.2-64 I⁻, HDO の De の塩濃度依存性 ····· 5-49
図 5.2-65 圧縮ベントナイト中の HTO の拡散結果と ND-HA 結合解析結果の比較 ····· 5-49
図 5.2-66 採水地下水の pH, イオン濃度および浮遊成分濃度 ····· 5-51
図 5.2-67 岩石カラムからの破過曲線 ····· 5-52
図 5.2-68 ベントナイトコロイド共存下での放射性核種の移行・遅延挙動
（グリムゼル原位置試験結果の一例） ····· 5-53
図 5.2-69 Th 溶度のフミン酸濃度依存性 ····· 5-55
図 5.2-70 Th 溶度の炭酸イオン濃度依存性 ····· 5-55
図 5.2-71 全 Np 溶度のフミン酸濃度依存性 ····· 5-55
図 5.2-72 気候変動を考慮した生物圏モデルを用いて算出した線量への換算係数の規格値
（現作業従事者グループ） ····· 5-57
図 5.2-73 海域を GBI とした生物圏モデルを用いて算出した線量への換算係数
（漁業従事者グループ） ····· 5-58
図 5.2-74 コンパートメント間の移行パラメータの変動による線量への換算係数の変動範囲 ····· 5-59
図 5.3-1 ガラス固化体 1 本あたりの潜在的危険度（換算水量）の経時変化 ····· 5-63
図 5.3-2 「第 2 次取りまとめ」におけるシナリオ開発を含む安全評価の流れ ····· 5-68
図 5.3-3 総線量の経時変化 ····· 5-70
図 5.3-4 総線量の最大値の散布図 ····· 5-71
図 5.3-5 クラスタ分析の結果 ····· 5-71
図 5.3-6 統合解析システム概念図 ····· 5-73
図 5.3-7 ワークフロー構成（性能評価）の検討例 ····· 5-75
図 5.3-8 画像表示機能の検討例 ····· 5-75
図 5.3-9 亀裂密度を変化させた場合の解析ケースの一例 ····· 5-77
図 5.3-10 単一亀裂へのベントナイト侵入に関する概念モデル ····· 5-77

－ 表リスト －

表 2.2-1　地層科学研究の課題とプロジェクト …… 2-7

表 3.2-1　地下水流動解析に使用した物性値 …… 3-20
表 3.2-2　推定断層の水理特性の設定ケースの例 …… 3-20
表 3.2-3　五つの水理地質構造モデルと解析条件 …… 3-21
表 3.2-4　掘削長 82.50～88.65m 区間の化学成分 …… 3-24
表 3.5-1　全岩化学分析結果 …… 3-68
表 3.5-2　ロックエバル分析結果 …… 3-69
表 3.5-3　調査対象地域の地形・地質・植生 …… 3-71
表 3.5-4　流域別の起伏量および水系密度 …… 3-72
表 3.5-5　地質・水系ユニット …… 3-73
表 3.5-6　流域の地形・地質・植生条件 …… 3-73
表 3.5-7　試験条件 …… 3-81
表 3.5-8　水圧破砕法による初期応力測定結果 …… 3-82
表 3.5-9　感度解析における境界ケースと標準偏差 …… 3-89
表 3.5-10　採水時の物理化学パラメータ …… 3-91
表 3.5-11　水圧計測・採水手法のまとめ …… 3-95
表 3.5-12　地下施設レイアウトの比較条件 …… 3-98
表 3.5-13　調査概要 …… 3-104
表 3.5-14　レッドデータ絶滅危惧種カテゴリーの該当種 …… 3-105

表 4.1-1　弾性係数測定結果 …… 4-3
表 4.1-2　密封アンプル試験による水素発生量と水素吸収量の測定結果の一例（純チタン） …… 4-5
表 4.1-3　水素吸収量約 1000ppm の試料の微小シャルピー衝撃試験結果 …… 4-6
表 4.1-4　設計段階での緩衝材性能確証項目整理表（部分） …… 4-12
表 4.2-1　一軸圧縮強度および定数の平均値 …… 4-18
表 4.2-2　初期・境界条件 …… 4-29
表 4.2-3　実験に用いた試料の条件 …… 4-31
表 4.3-1　吹付けコンクリート圧縮強度基準 …… 4-44
表 4.3-2　透水試験結果 …… 4-45
表 4.3-3　グラウト模擬材料の配合 …… 4-45

表 5.1-1　Np(IV)ヒドロキソ炭酸錯体の見かけの平衡定数(K')およびイオン強度 0 における平衡定数(K^0) … 5-2
表 5.2-1　流路特性値の同定結果 …… 5-11
表 5.2-2　収着特性同定結果 …… 5-12
表 5.2-3　拡散経路モデルによる同定値の比較 …… 5-12
表 5.2-4　試験ケース（透水試験） …… 5-14
表 5.2-5　試験ケース（トレーサー試験 1） …… 5-15
表 5.2-6　試験ケース（トレーサー試験 2） …… 5-15
表 5.2-7　室内試験および原位置試験により求めた収着係数の比較（一例） …… 5-22
表 5.2-8　原位置試験試料および室内試験試料を用いて測定した空隙率の比較 …… 5-23

表 5.2-9　水理地質構造モデルのパラメータ ····· 5-32
表 5.2-10　鉱物成分の組成 ····· 5-32
表 5.2-11　亀裂ネットワークモデルのパラメータ一覧 ····· 5-36
表 5.2-12　解析ケース ····· 5-40
表 5.2-13　解析によって得られた，各溶存化学種のスメクタイトに対する分配係数(K_d) ····· 5-48
表 5.3-1　不確実性パラメータの一覧 ····· 5-70
表 5.3-2　重回帰分析の結果 ····· 5-71

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、平成11年11月に公表した「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」）を技術的な拠り所として、処分事業を推進するための枠組みを定めた「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」が平成12年5月に成立し、これに基づき、同年10月には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）が発足した。また、平成12年11月の「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」）等において、最終処分の実施に向けて必要な取り組みや関係機関の役割分担が示された。一方、原子力安全委員会からは、平成12年11月に「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）」が公表された。

以上のように、わが国の地層処分計画が事業化段階へと進展し、処分事業や安全規制の大枠が整備された状況を踏まえ、今後の研究開発には、適切な役割分担のもとに、処分事業や安全規制の今後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。「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、深地層の科学的研究、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の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。サイクル機構では、このような役割、ならびに今後の研究開発課題や役割分担等に関する関係機関との協議を踏まえ、研究開発の基本的進め方や研究開発課題を整理するとともに、「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。

この「全体計画」において、サイクル機構が進める高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る研究開発全体を「地層処分技術に関する研究開発」とした。これは「地層処分研究開発」とその基盤となる『深地層の科学的研究』からなり、さらに「地層処分研究開発」は『処分技術の信頼性向上』と『安全評価手法の高度化』から構成するものとしており、サイクル機構は今後これらの三つの分野について研究開発を進めていくこととした。

サイクル機構は、この「全体計画」に沿って研究開発を着実に進めているところであり、平成13年度は今後の研究開発において重要な役割を担う二つの深地層の研究施設計画について、その計画を大きく進展させることができた。北海道幌延町においては、堆積岩を対象とした深地層の研究施設計画を進める「幌延深地層研究センター」を発足し、地表からの調査研究を開始した。一方、東濃地科学センターで進めている結晶質岩を対象とした超深地層研究所計画については、瑞浪市より市有地に研究坑道や関連施設を設置することについての提案をいただき、研究所計画の推進に向け新たな一歩を踏み出すことができた。

高レベル放射性廃棄物の地層処分は、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り、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ご意見を取り入れつつ研究開発を展開していくことが重要と認識している。そのような観点から、本報告書では、特に、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、サイクル機構における「第２次取りまとめ」以降の研究開発の計画と成果の概要について、「全体計画」に沿って報告するものである。サイクル機構においては、処分事業と安全規制の双方に基盤的な技術や情報を提供できるよう、双方のニーズやスケジュールを勘案しつつ成果を取りまとめて公表していく計画であるが、現状において成果の集約は十分には進んでいない。そのため、本報告書は、成果を集約するというより、個々の研究開発成果の現状を示すものである。

本報告書は、2章の「概要」と3～5章の各分野の「個別報告」により構成した。2章の概要においては、「全体計画の概要(2.1)」を紹介した上で、3～5章に詳細に示す各分野の個別報告の要点を「各分野の計画と成果の概要(2.2)」としてまとめた。「個別報告」では、個々の研究開発項目の計画と成果の概要について、「深地層の科学的研究(3章)」、「処分技術の信頼性向上(4章)」、「安全評価手法の高度化(5章)」と三つの分野ごとに報告する。さらに、巻末に「業務実績(平成13年度)」と「公開文献リスト(平成12～13年度)」を添付した。なお、「1. はじめに」と「2.1 全体計画の概要」に記載した機関名や参考文献は、2.2以降、特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計画の概要

サイクル機構は，平成11年11月に「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，1999）」（以下，「第2次取りまとめ」）を公表し，原子力委員会に報告した。原子力委員会による「第2次取りまとめ」の評価結果は，平成12年10月に「我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価（原子力委員会，2000a）」（以下，「国による第2次取りまとめ評価報告書」）として公表され，「第2次取りまとめにおいて地層処分の技術的信頼性が示されているとともに，地層処分の事業化に向けて処分予定地の選定と安全基準の策定に資する技術的拠り所となる」との評価が示された。

「第2次取りまとめ」を技術的な拠り所として，処分事業を推進するための枠組みを定めた「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（官報，2000）」（以下，「最終処分法」）が平成12年5月に成立し（同年6月公布），これに基づき，平成12年10月には処分事業の実施主体である原環機構が発足した。また，平成12年11月の「原子力の研究，開発及び利用に関する長期計画（原子力委員会，2000b）」（以下，「原子力長期計画」）やそれを踏まえた平成13年6月の「原子力の技術基盤の確保について（総合資源エネルギー調査会原子力部会，2001）」（以下，「原子力部会報告」）において，最終処分の実施に向けて必要な取り組みや関係機関の役割分担が示された。一方，原子力安全委員会からは，平成12年11月に「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）（原子力安全委員会，2000）」（以下，「安全規制の基本的考え方」）が公表された。

以上のように，わが国の地層処分計画が事業化段階へと進展し，処分事業や安全規制の大枠が整備された状況を踏まえ，今後，研究開発が必要となる課題や役割分担等に関して関係機関との協議を進め，サイクル機構の研究開発の基本的進め方や研究開発課題を整理するとともに，「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計画の全体計画（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）」（以下，「全体計画」）を策定した。ここでは，「全体計画」の概要について紹介する。

1) 処分事業・安全規制の展開と関係機関の役割

処分事業については，「最終処分法」において，概要調査地区の選定，精密調査地区の選定，最終処分施設建設地の選定と三つの段階を経て進められることが示されている。一方，安全規制については，「安全規制の基本的考え方」によれば，安全審査基本指針，処分場の技術基準，安全審査指針といった指針・技術基準の策定が処分事業の進展に応じて進められることになっている。

国や関係機関の役割については，「原子力長期計画」や「原子力部会報告」において，以下のように示されている（図2.1-1）。

- 国及び関係機関：
  最終処分の安全規制，安全評価のために必要な研究開発や深地層の科学的研究等の基盤的な研究開発及び地層処分技術の信頼性の向上に関する技術開発等
- 特に，サイクル機構：
  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，深地層の科学的研究，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の信頼性向上と安全評価手法の高度化に向けた研究開発
- 実施主体（原環機構）：
  最終処分事業の安全な実施，経済性及び効率性の向上等を目的とする技術開発
- 発電用原子炉設置者：
  実施主体に対する人的及び技術的支援，放射性廃棄物に係る共通的研究開発
- （財）原子力環境整備促進・資金管理センター：
  国の政策立案のための適切な技術情報の整備・提供，周辺基盤技術の研究開発

図2.1-1 関係機関の役割と関係

今後，サイクル機構等の研究開発機関には，適切な役割分担のもとに，処分事業や安全規制の今後の展開とも整合をとりつつ，処分事業や安全規制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。

2) 今後の研究開発課題

「第２次取りまとめ」以降の研究開発課題については，「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」において，それぞれ以下のような具体的課題等が示されている。

①「国による第２次取りまとめ評価報告書」

「第２次取りまとめ」の成果を踏まえた技術開発課題への取り組みや基礎的な研究開発の継続などを通じて，地層処分の技術的信頼性をさらに向上させることに努めることが重要であるとしたうえで，以下のような研究開発課題を例示している。

- 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
- 深地層の研究施設等を活用した深部地質環境データの蓄積
- 人工バリアの長期的健全性に関する詳細な研究
- 深地層の研究施設等を活用した建設・操業・閉鎖技術の実証試験
- 安全評価に用いるデータの蓄積
- 実際の場所の特性を精度良く再現できるモデルの確立 等

②「安全規制の基本的考え方」

今後，安全規制のための基準や指針等の策定を行う上で，以下のような評価や検討が必要であるとしている。

- 実際の地質環境条件を適切に考慮した設計，シナリオに基づく評価
- 緩慢な天然現象による地質環境の長期にわたる変化を考慮した評価
- モデル，パラメータの不確実性に配慮した指標の検討
- 科学的合理性のある範囲での地下水シナリオの設定 等

上記の課題を踏まえると，今後の研究開発においては，実際の地質環境への適用を通じた地層処分技術の信頼性確認，データの蓄積とモデルや評価手法の高度化，それらを通じたシステム性能の長期的評価の信頼性向上などが重要となる。なお，これらの課題については，地層処分計画を進める諸外国においても重要な課題として扱われている共通性が高いテーマであり，共同研究や国際的な議論の場を活用して国際的に最新の知見を共有しつつ進めるべき研究対象となっている。

3) サイクル機構における研究開発

上記の役割分担や今後の研究開発課題を踏まえて，サイクル機構では，「第２次取りまとめ」までに蓄積した知見や総合的な評価能力，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）等の国内で最も充実した研究開発施設を活かし，基盤的な研究開発を国や関係機関等と十分に調整しながら進めていく。

① 研究開発目標

今後の研究開発においては，以下の二つを目標として研究開発を進めていく。

[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」までに幅広い地質環境を対象として整備してきた技術や手法の実際の地質環境への適用を通じた信頼性確認 －

段階的に進めていく深地層の研究施設計画において，これまでに整備してきた調査技術を適用し，実際の地質環境の不均質性を理解するとともに，調査・評価技術の信頼性を確認する。また，実際の地質環境に関する情報を参考にしつつ，地質環境の不均質性等を考慮して，設計や安全評価に関するモデルや手法の適用性を確認する。さらに，深地層の研究施設での技術の適用を通じて，地下施設の建設・施工技術や人工バリア等の工学要素技術の信頼性を確認する（図2.1-2参照）。

図2.1-2 目標「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」の概念

［地層処分システムの長期挙動の理解］

－ 現象理解に基づくより現実的なシステムの長期挙動の評価・理解と，「第２次取りまとめ」において簡略かつ保守的な考え方で評価したシステム性能の裕度確認 －

エントリーやクオリティを中心に設計や安全評価に関するデータの蓄積と現象理解によるモデルの高度化等を進めるとともに，地質環境の長期安定性に関する研究やナチュラルアナログ研究を通じて地質環境の長期的な変遷を把握する。これらを踏まえ，地層処分システムの挙動をより現実的に評価し，システムの長期挙動に対する理解を深めていく（図 2.1-3 参照）。

図 2.1-3　目標「地層処分システムの長期挙動の理解」の概念

② 研究開発課題

上記の二つの目標に向けて重要な研究開発課題を具体的に設定した上で，「深地層の科学的研究」，「処分技術の信頼性向上」，「安全評価手法の高度化」の三つの分野に整理し，分野毎に研究開発を進めていく（図 2.1-4 参照）。また，サイクル機構の研究開発全体を「地層処分技術に関する研究開発」とする。これは「地層処分研究開発」とその基盤となる「深地層の科学的研究」から構成し，さらに「地層処分研究開発」は「処分技術の信頼性向上」と「安全評価手法の高度化」から構成するものとする。なお，サイクル機構では，「深地層の科学的研究」を地層科学研究として進めている。各分野の研究開発の概要を以下に示す。

［深地層の科学的研究（地層科学研究）］

深地層の研究施設等を活用し，これまで整備してきた地質環境の調査・評価技術を実際の地質環境に適用（検証・改良）することにより，特に，地質環境の不均質性を理解する観点で，調査・評価技術の信頼性確認と体系化を図る。あわせて，深地層の研究施設建設を通じ，深地層の工学技術の基礎の開発を行い，工学技術の有効性を検証する。また，地質環境の長期安定性に関する研究やウラン鉱床におけるナチュラルアナログ研究を通じて，地質環境の長期的な変化や物質を保存する能力を評価する。

図 2.1-4　二つの研究開発目標に向けた研究開発課題の設定

［処分技術の信頼性向上］

エントリーや幌延の深地層の研究施設等を活用し，人工バリア等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を行うことで，処分技術の信頼性向上を図る。特に，人工バリア等の長期挙動に係る個別現象や連成現象の理解に基づき，ニアフィールド環境の時間的変遷を把握することにより，地層処分システムの長期挙動評価の信頼性向上を図る。

［安全評価手法の高度化］

エントリー，クオリティ等を活用し，深地層の科学的研究の成果も基盤として取り込みつつ，安全評価に関するデータの蓄積，モデルや手法の高度化を行うことにより，信頼性の高い安全評価手法を確立する。特に，より現実的な現象の理解と実際の地質環境に起因する不確実性を考慮したモデルや評価手法の改良を通じて，地層処分システムの長期挙動評価の信頼性向上を図る。

③ 研究開発施設

上記の研究開発は，深地層の研究施設，エントリーやクオリティ，東濃鉱山等を活用して進めていく（図 2.1-5 参照）。研究開発を効率的に実施する観点から，海外の地下研究施設の活用等の国際協力や国内関係機関との協力を積極的に進めるとともに，サイクル機構の研究施設は外部研究者へ積極的に開放していく。実際の地質環境を対象とした研究開発を進める上で重要な役割を果たす深

地層の研究施設については，地質環境の特徴が異なるという観点から瑞浪と幌延の二つの計画を進めており，施設は国民の皆様に地下深部の環境や地層処分の研究開発に対する理解を深めていただく場として，可能な限り早い段階に見学できるように整備を進めていく。

図 2.1-5　サイクル機構の研究開発施設

[東濃地科学センター]

深地層の科学的研究として，主に結晶質岩を対象とした超深地層研究所計画と広域地下水流動研究，ナチュラルアナログ研究等の東濃鉱山における調査試験研究，および地震や火山活動等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を進める。超深地層研究所計画については，平成 8 年度より岐阜県瑞浪市にあるサイクル機構の所有地において，地上からの調査研究を進めてきた。現在，瑞浪市より提案を受けた市有地において，地表からの調査を進めており，平成 14 年 7 月には研究坑道等の建設に着工する予定である。

[幌延深地層研究センター]

堆積岩を対象として，深地層の科学的研究，地層処分研究開発を進める。平成 12 年 11 月に北海道，幌延町と協定書を締結し，平成 13 年 3 月より調査研究を開始した。これまでに空中・地上物理探査，試錐調査等を進めてきており，平成 14 年度のできるだけ早い時期に研究所設置地区を選定する予定である。

[東海事業所(エントリー，クオリティ等)]

エントリーは，放射性核種を用いずに，工学試験を中心として，人工バリアの長期挙動等に関するデータ取得とモデル検証を行う試験設備，総合的な評価が可能な解析ツール等を備えている。一方，クオリティは，放射性核種を用い，実験室レベルでの地下深部を模擬した環境下で核種移行データ等を取得するための試験設備や分析機器を有する。これらの施設を活用し，データの取得やモデルの高度化などを進めるとともに，深地層の科学的研究の成果も取り込みつつ，成果の集約と総合的な評価を進めていく。

④ 分野間の連携と成果の集約・反映

今後の研究開発においては，二つの目標に向けて，各々の研究開発分野や項目間で連携を図りつつ進めることが重要となる。そのため，エントリーやクオリティを中心に進める地層処分研究開発においても，今後は深地層の研究施設等で取得される実際の地質環境に関する情報を活用するなど，以下のような観点で分野間の連携を図りつつ進めていく（図 2.1-6 参照）。

[地質環境の調査・評価の段階的進展に応じた設計・安全評価手法の適用性確認]

深地層の研究施設計画等において段階的に詳細化される実際の地質環境の情報を参考として，設計・安全評価手法の適用性を概略的に検討し，地質環境の調査における留意点等を整理する。

[建設・操業・閉鎖に係る工学技術の適用性の例示]

実際の地質環境を考慮しつつ要素技術の機能確認等を行うとともに，深地層の研究施設での建設，施工等を通じて深地層における工学技術の信頼性を確認していく。

[実際の地質環境を考慮した設計や安全評価に関するモデルや手法の高度化]

実際の地質環境の不均質性等の情報を参照しつつ，設計や安全評価に係るモデルの改良を進め，一部のモデルについては深地層の研究施設（幌延）等における原位置試験によって信頼性を確認する。また，地質環境の長期安定性に関する研究の成果等を踏まえ，地質環境の長期的変遷を考慮しつつモデルや評価手法の高度化を図る。

図 2.1-6　二つの目標に向けた分野間の連携と情報の流れ

研究開発成果は，その都度公表するとともに，処分事業や安全規制のニーズやスケジュールを勘案し，分野間にまたがる情報を集約しつつ，段階的に取りまとめて公表していく（図 2.1-7 参照）。なお，委員会や検討部会の開催，学会等の外部機関の活動への積極的参加を通じて，研究開発の信頼性や透明性の向上を図っていく。また，科学的・技術的な面での国民の皆様の地層処分に対する理解を深めていただけるよう，研究開発機関として成果の公表や施設の公開等を積極的に進めていく。

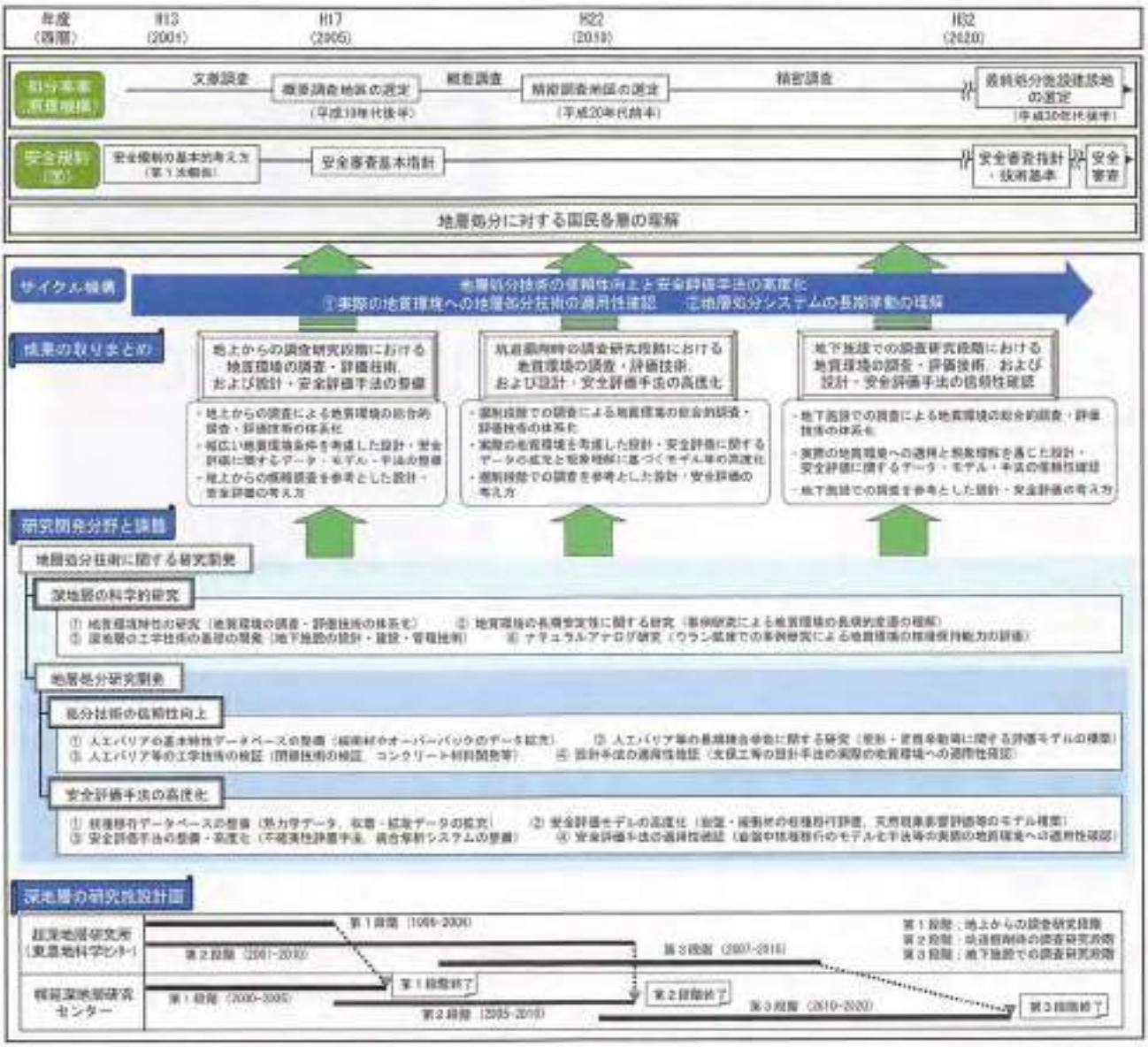


図 2.1-7　成果の取りまとめと反映先

参考文献

官報(2000)：特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律．

原子力安全委員会(2000)：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)．

原子力委員会（2000a)：我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価．

原子力委員会（2000b)：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．

総合資源エネルギー調査会原子力部会(2001)：原子力の技術基盤の確保について．

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，まず長期にわたって十分に安定であること，ついで岩盤や地下水の性質が人工バリアを設置する環境として，また天然バリアとして適切であることが求められる。このような観点から，地下深部に存在する岩盤や地下水はどうなっているのか？　時間とともに，どう変化していくのか？　とくに，地震や火山活動などが活発な日本で大丈夫なのか？　などの疑問に答えていくことが，わが国における地層処分の技術的信頼性を築くうえで重要である。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，地下水の動きや水質，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（図 2.2-1）。

サイクル機構では，このような研究（「深地層の科学的研究」）を地層科学研究として進めている。この地層科学研究は，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であり，後述するような東海事業所のエントリーやクオリティで実施してい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」までの研究成果

地層科学研究では，地球科学の最先端の技術や知識を活用して，また，必要に応じて新たな技術を開発しながら，日本列島における天然現象の特徴や地下深部にある岩盤や地下水の性質を調査研究している。これまでの研究により，地層処分の安全性を検討するうえで重要な様々な知見や情報が得られてきた。

例えば，岩石中に含まれる放射性同位体を分析することにより，その岩石ができた年代を推定することができる。この方法を用いて，過去の火山活動に伴って噴出した岩石の分布と年代を丹念に調べていくと，日本列島で火山活動が起こっている場所は，過去数百万年にわたってほとんど変わっていないことがわかる。隆起・侵食や断層活動についても，地形や地質に残された記録を手がかりにして，過去の活動履歴を知ることができる。過去から現在までの変化がわかれば，その延長上に将来の姿を類推することができる。そうすれば，どのようなところが地層処分する場所として適しているか，あるいは地層処分の安全性を評価するうえでどの程度の変化を見込んでおくべきか，などの見当がつく。

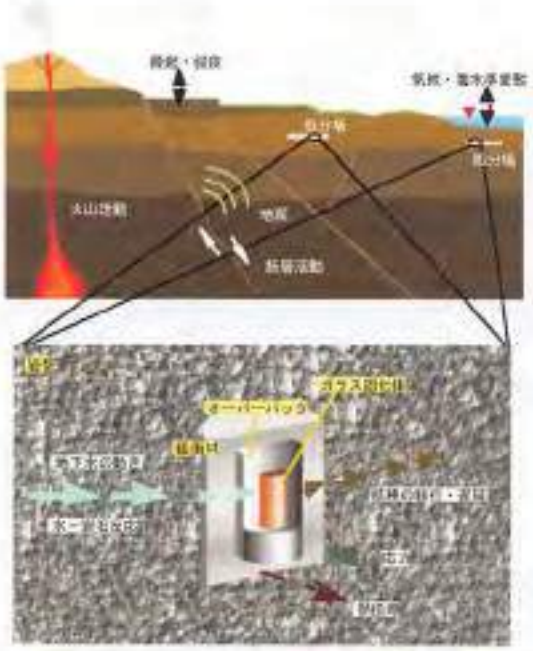


図 2.2-1　地層処分にとって重要な天然現象と地質環境の特性

また，内陸地域の地下水は，一般に降水が地下にしみ込んだものであるが，そのような地下水は，鉱物との反応や微生物の活動などにより，深度とともに水質が変わる。例えば，降水は酸性であるが，地下深部の地下水はむしろアルカリ性である。さらに，降水には酸素が大量に含まれているが，これが地下に浸透していく過程で，鉄や硫黄を含む鉱物あるいは炭質物などと反応して酸素が消費されるため，地下深部には酸素を含まない還元性の地下水が存在している。

これらのことは，サイクル機構が開発した地下水の採水装置を用いて実際に確認した。この装置は，深度 1,000m までのボーリング孔を利用して，特定の深度に滞留している地下水を，地下深部と同じ被圧状態のまま大気と接触させることなく採取できるものである。同じ深度 1,000m までのボーリング孔を利用して，岩盤中の水の通りやすさを高精度で測定できる水理試験装置も開発した。この装置を用いて，地下深部における地下水の動きが遅いことも，実測データにより確認できた。このように，地下深部に存在する地下水が還元性

で動きが遅いということは，物質を溶解したり吸着したりする能力が低いことを意味する。これは，地層処分の長期的な安全性にとって非常に重要な，地下深部の環境がもつ特徴である。

以上のような地層科学研究の成果は，地層処分研究開発の観点から統合化され，「第２次取りまとめ」に集大成された。この「第２次取りまとめ」については，すでに国によって「わが国における地層処分の技術的な信頼性が示されている」との評価がなされている（「国による第２次取りまとめ評価報告書」）。ただし，一部には「第２次取りまとめ」の内容について批判的な意見もあり，「国による第２次取りまとめ評価報告書」でも，「地層処分は，国民の理解と信頼を得つつ進められていくべきものであり，引き続き，第２次取りまとめの成果を踏まえた技術開発課題への取り組みや基盤的な研究開発の継続などを通じて地層処分の技術的信頼性をさらに向上することに努めることが重要である。」と述べられている。地層処分の技術的信頼性を向上していくうえで，その基盤となる地層科学研究の役割は今後も大きい。

2) 「第２次取りまとめ」以降の地層科学研究

「第２次取りまとめ」などを技術的な拠り所として，法令が整備され，また実施主体が設立されるなど，わが国の地層処分計画は事業化を目指した段階へと踏み出した。このような状況を受けて，「原子力長期計画」は，最終処分の実施に向けて必要な取り組みを示し，その中で，「国及び関係機関は，最終処分の安全規制，安全評価のために必要な研究開発や深地層の科学的研究等の基盤的な研究開発及び地層処分技術の信頼性の向上に関する技術開発等を積極的に進めていくことが必要である。特に，核燃料サイクル開発機構等は，これまでの研究開発成果を踏まえ，今後とも深地層の研究施設，地層処分放射化学研究施設等を活用し，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て研究開発を着実に推進することが必要である。」としている。

サイクル機構は，このような国の計画・方針にしたがい，深地層の科学的研究（地層科学研究）を着実に進めていく。なお，後述する「超深地層研究所計画」および「幌延深地層研究計画」は，それぞれ，結晶質岩（非堆積岩）および堆積岩を対象とした深地層の研究施設計画である。

表 2.2-1　地層科学研究の課題とプロジェクト

課題項目 ＼ プロジェクト		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	地層科学研究	地質環境の長期安定性に関する研究	幌延深地層研究計画
地質環境特性に関する研究	花崗岩	○（広域スケール）	○（超深スケール）			
	堆積岩			△		○
地質環境の長期安定性に関する研究					○（日本全国）	△（幌延地域）
地層における工学技術の基礎の開発	花崗岩		○			
	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

「第２次取りまとめ」以降における研究開発の課題については，「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」において，重要な項目が示されている。そのうち，地層科学研究に関連する課題としては，「地表から地下深部までの調査の体系化」，「深部地質環境データの蓄積」（「国による第２次取りまとめ評価報告書」）や，「実際の地質環境条件を適切に考慮した評価」，「地質環境の長期にわたる変化を考慮した評価」（「安全規制の基本的考え方」）などを挙げることができる。

これら国の報告書で示された課題を踏まえ，また，地層処分の信頼性向上を目指してサイクル機構の研究資源を最大限に活用していく観点から，以下の四つを「第２次取りまとめ」以降における地層科学研究の大きな課題項目として，各プロジェクトを進めている（表 2.2-1）。「全体計画」は，この課題構成で整理した。

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

上記①は，地質環境特性として重要な地下水の動きや性質，岩盤の特性，岩盤中での物質の移動，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であり，花崗岩を対象とした研究を東濃地科学センターにおける「超深地層研究所計画」および「広域地下水流動研究」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。

このうち，東濃地科学センターの「広域地下水流動研究」は，東濃鉱山周辺の 10km 四方程度の領域を対象としている。超深地層研究所計画の用地は，この広域地下水流動研究の対象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，広域スケールから施設スケールにまでの地質環境を体系的に調査・評価するための技術が整備される。一方，堆積岩を対象とした広域的な研究は，幌延深地層研究計画の中で，合わせて進めていく。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「東濃鉱山における調査試験研究」を実施している（既存の地下坑道を利用した研究のうち，花崗岩を対象とした瑞浪鉱山での試験研究（サイクル機構，1999a）は，地元との協定に基づき平成 9 年度に終了した）。

これら地質環境特性に関する研究では，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・機器を整備していく。研究の成果は，実施主体が概要調査や精密調査を進めるうえでの，また，国が各段階における安全確保の考え方を検討するうえでの技術基盤となるものである。

超深地層研究所計画および幌延深地層研究計画では，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盤の開発（上記③）を行う。

また，東濃鉱山における調査試験研究は，今後，ウラン鉱床を活用したナチュラルアナログ研究（上記④）に重点を置いて進めていく。

上記②は，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である。東濃地科学センター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 DB データベースの整備を進めている。また，幌延深地層研究センターでは，幌延深地層研究計画の一環として，地震・断層活動など地域の特徴に着目した研究を実施する。

これらの研究，とくに上記②や④は，自然界で実際に起こった現象や変化，その中での物質の挙動などを見極め，これを地層処分の安全性にとっての傍証や示唆，あるいは教訓とし，地層処分技術の信頼性向上に役立てていくものである。いわば，自然の営みに学ぶ研究といえる。地層処分に対する国民の理解を得ていくうえで不可欠なアプローチである。

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いただくとともに，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，これら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。

3) 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センターが進めている地層科学研究の各プロジェクトの現状を概括して以下に述べる。

(1) 東濃地科学センター

東濃地科学センターにおいては，超深地層研究所計画，広域地下水流動研究，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を実施している。このうち，東濃地域で進めている超深地層研究所計画，広域地下水流動研究，東濃鉱山における調査試験研究の三つのプロジェクトは，地質環境の性質やそこで起こっている現象を理解しながら，調査・評価のための技術を開発整備していくことを主な目的としている。また，これらのプロジェクトについては，得られた成果や研究資源などを相互に活用することにより，研究の効率化や成果の充実化を図っている。一方，地質環境の長期安定性に関する研究については，当面は全国を視野に入れつつも，サイクル機構が実施すべき課題に応じて注目すべき現象や地域を絞って研究を進めていく。

① 超深地層研究所計画

超深地層研究所計画は，「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」を全体目標とした約 20 年の計画である（サイクル機構，2002），全

体を三つの段階（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く。研究の対象は，東濃地域に広く分布する花崗岩（土岐花崗岩体）である。土岐花崗岩体は，場所により厚さ 0～300m 程度の堆積岩層に覆われているため，その影響などにも留意して研究を進める必要がある。

平成 8 年度より，岐阜県瑞浪市明世町の正馬様にサイクル機構が保有する用地（正馬様用地：約 14ha）において，地表からの調査を実施してきた。これまでに，地表からの物理探査（電気探査，弾性波探査など），表層での水理調査（河川流量計測，気象観測など）および深度 700～1,000m のボーリング調査（4 孔）を実施した。ボーリング調査では，掘削時に採取した岩石試料（岩芯）の観察やこれを用いた各種室内試験，および掘削したボーリング孔内での物理検層，水理試験，力学試験などを行った。また，複数のボーリング孔を用いて，孔間での水の動きなどを調べる揚水試験（一つのボーリング孔から地下水を汲み上げ他のボーリング孔で水圧の応答を観測する試験，ボーリング孔内の任意の深度を区切って行う）を実施した。現在は，これらのボーリング孔を利用して，地下水のモニタリング（水圧および水質の長期観測）を行っている。

これまでの調査結果をもとに，断層や割れ目の分布などに着目した地質構造モデルを構築した。このモデルでは，花崗岩体を岩相の違いにより区分したほか，花崗岩体における地下水の動きや水質などを規制する主要な地質構造要素として，堆積岩との境界（不整合面）直下の風化部，上部の割れ目帯，断層に伴う割れ目帯などが表現された。さらに，この地質構造モデルをもとに，ボーリング孔を用いた水理試験や表層水理調査の結果を加味して水理地質構造モデルを構築し，地下水の動きを解析した。これまでの解析の結果，割れ目などに起因する花崗岩体の不均質性を等価な連続体モデルによって表現することにより，断層の遮水性や立坑掘削による水位変化などを再現できることが確認された（サイクル機構，2001b）。また，断層のモデル化の違い（透水性やその異方性の与え方）が，流動経路などの解析結果に大きな影響を与えることがわかった。そのほか，岩盤の力学的な状態に関しても，初期応力（岩盤に作用する力）や物性値（強度など）の空間的な分布を調べ，その結果に基づき岩盤力学モデルを構築した。

今後は，これらの地質環境モデルの相互関係などについても検討し，地質環境に対する総合的な理解を深めていく。地質環境が有する不均質性やその評価に伴う不確実性などをいかに考慮して，情報の品質を確保し，また技術の合理性を高めていくかが鍵となる。これは，地層科学研究全般について言えることであるが，とくに本計画においては，研究坑道の建設やその活用を通じて，基盤となる調査技術や工学技術を確証していくことが重要である。

なお，東濃地科学センターでは，これまで正馬様用地に地下の研究坑道を掘削することとして本計画を進めてきたが，平成 14 年 1 月に，瑞浪市と市有地（約 7.5ha）にかかわる土地賃貸借契約を締結するに至り，現在，この市有地における地表からの調査を開始したところである。市有地での地表からの調査は，正馬様用地での研究成果や広域地下水流動研究などで得られる情報を活用しつつ，効率的に進めていく。また，正馬様用地は，断層周辺の地下水の動きを評価するための技術開発の場として活用していく（サイクル機構，2002）。

② 広域地下水流動研究

広域地下水流動研究は，広域（ここでは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）。

平成 4 年度から，東濃鉱山を含む約 10km 四方程度の領域において，空中や地表からの物理探査，地表地質調査，表層での水理調査，深度 500～1,500m のボーリング調査（13 孔）などを行ってきた。これまでの研究により，深度 1,000m までの岩盤や地下水を調査・観測するための機器や手法を開発するとともに，大局的な地下水の流動状態や深度による地下水の水質変化などを把握した（サイクル機構，2000）。すなわち，対象地域の地下水は，断層や割れ目帯などの地質構造に規制されながら，大局的には大地形に沿って流動している。一般に，地下深部ほど局所的な地形の影響

が小さくなるため，地下水の動きは遅くなると考えられるが，本研究では，このことを実測データに基づいて確認した。また，土岐花崗岩中の地下水は，過去の降水がしみ込んだものであり，一般に浅部では中性かつ酸化性の Na-Ca-HCO_3 型であるのに対し，深部では，弱アルカリ性かつ還元性の Na-HCO_3 型である。このような水質の深度変化は，岩石中に普通に含まれる鉱物と地下水との化学反応や微生物による分解反応などによって説明できる。

今後は，実施主体が行う概要調査や精密調査の技術基盤として，地質環境の調査・評価技術の整備を進め，その一般化に向けた検討を行っていく。そのため，本研究における重要かつ未達成の課題として，断層の分布および水理特性を調査する技術の開発，地下水の動きと水質変化をあわせて表現できるモデルの開発などを進める。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て地下水の水圧や水質をモニタリングし，経時的な変化を追跡する（サイクル機構，2001c）。

③ 東濃鉱山における調査試験研究

東濃鉱山での調査試験研究は，ウラン鉱床中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 150m までの堆積岩がおもな研究対象である。ウラン鉱床が存在し，さらにそれを断層が横切るという地層科学研究にとって絶好の特徴を活かして，ナチュラルアナログ研究などの物質の移行・遅延現象に着目した研究や，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（サイクル機構，1999b）。平成元年度～3 年度には，直径 6m，深さ 150m の立坑を新たに掘削し，坑道の掘削が周辺の地質環境にどの程度の影響を与えるかを評価した（動燃事業団，1992）。

東濃鉱山およびその周辺域に分布するウラン鉱床は，約 1 千万年前にできたとされており，その後，断層によって鉱体が切られ，地震の度に何度もズレ動いた（ズレの合計は約 30m）。そのほか，隆起・侵食などの影響を被ってきたにもかかわらず，現在まで鉱床として保存されており，ウランなどの物質が大きく動いた形跡は認められない。このような知見は，地質環境の隔離性能や地層処分の長期安全性を実証する重要な傍証である。その説得力をさらに高め，また，地層処分の安全性を評価するための手法の合理化，現実化に反映していくためには，天然のウラン鉱床で実際に生じた，あるいは生じている現象をより定量的に評価することが求められる。今後は，ウランなどが地質環境中に保持されている状況やそのメカニズムをさらに探究し，地質環境中における物質の移行・遅延現象の定量化，モデル化を進めていく。この研究は，安全評価手法の合理化だけでなく，地層処分の長期的な安全性についての国民の理解を得ていくうえでも重要である。

また，東濃鉱山の既存の研究資源を利用して，坑道周辺における岩盤（堆積岩）の力学的な特性や地下水の水圧，水質などの長期変化に関する知見をさらに蓄積する（サイクル機構，2001d）。得られた成果は，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していく。

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は，わが国における地震・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の活動の特徴（活動の傾向・規則性，地域性，変動の速度・規模など）や影響の程度・範囲などを理解することを目的とした研究である。

平成元年度より，全国を対象として，文献調査や事例研究による情報・知見の整備，ならびにそのデータベース化を進めている。これまでの研究により，過去数十万年にわたり，わが国における主要な地震・断層活動や火山活動が限られた場所や地域で繰り返し起こっていること，また，隆起・侵食および気候・海水準変動には，一定の傾向や周期性が認められることなどがわかった。このような状態は将来的にも継続すると考えられるため，現在の活断層（帯）や火山地域，あるいは隆起・侵食が著しい地域などを避けることにより，将来にわたって天然現象による重大な影響を被る可能性が低い地域を見出すことができる。

今後は，このような評価の信頼性をさらに高める観点から，天然現象が起こるメカニズムやその地域性などを規制する要因に着目して，また，特定の地質環境を評価するうえで必須となるような技術に焦点をあてて，各天然現象に関する事例研究および調査・解析技術の開発を行う。当面は，概要調査地区の選定から概要調査の段階における

地質環境の評価や安全審査基本指針などの策定に反映するため，地下構造との関係が比較的不明確な西南日本地域における地熱・火山活動のメカニズムの解明，隆起・侵食および海面変化の複合による地形変化プロセスのシミュレーション，鳥取県西部地震などで注目された地表付近の震源断層を検出するための調査手法の開発に重点を置いて研究を進める（サイクル機構，2001a）。また，地震・断層活動の発生メカニズムや地殻応力との関係などを理解するための研究を，外部専門家を導入した体制で進め，長期安定性に関する評価の信頼性向上を図る。

(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 月に研究に関する北海道および幌延町との協定を締結し，翌年 3 月に地表からの調査に着手した。本計画は，超深地層研究所計画と同様，全体を二つの段階（地表からの調査研究（第 1 段階），坑道を掘削しながら行う調査研究（第 2 段階），坑道を利用して行う調査研究（第 3 段階））に分けて進める（サイクル機構，2001c）。全体で約 20 年の計画である。

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，また，南北方向のしゅう曲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に留意して研究を進める。

地表からの調査は，広域的な地質環境データの取得を目的として実施する。ここで得られたデータについては，研究所設置地区（約 2km 四方）の選定に反映することとしている。この観点から，まず，文献調査によって，研究対象として好ましい地層が 500m 程度の深さに十分な厚さをもって分布すると推定される区域を選び，その区域を含む範囲を対象に空中からの物理探査（磁気探査，電磁探査，自然放射能探査），地表からの物理探査（電磁探査），地質調査，深度約 700m のボーリング調査（2 孔）などの地表からの広域的な調査を行う。研究所設置地区は，これらの調査結果と社会的な条件などをあわせて総合的に検討したうえで，平成 14 年度のできるだけ早い時期に選定することとしている。また，より広域の研究領域として，周辺地区を設定する。これらの調査のうち，平成 13 年度には，空中および地表からの物理探査と地質調査を終了した。さらに，その結果に基づき，ボーリング調査を開始し，現在，継続中である。

なお，幌延深地層研究計画では，地層科学研究の課題として，地質環境特性に関する研究（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技術の基盤の開発を進めていく。

参考文献

動力炉・核燃料開発事業団（1992）：立坑掘削影響試験ワークショップ－発表論文集－，動燃事業団技術資料，PNC TN7410 92-052.

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.

核燃料サイクル開発機構（1999a）：瑞浪市位置選定報告書，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 99-001.

核燃料サイクル開発機構（1999b）：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（2000）：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 2000-014.

核燃料サイクル開発機構（2001a）：超深地層研究所計画の現状－平成 6 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（2001b）：広域地下水流動研究年度計画書（平成 13 年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-012.

核燃料サイクル開発機構（2001c）：東濃鉱山における調査試験研究年度計画書（2001 年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-010.

核燃料サイクル開発機構（2001d）：地質環境の長期安定性に関する研究年度計画書（平成 13 年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-014.

核燃料サイクル開発機構（2001e）：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 TN7410 2001-001.

核燃料サイクル開発機構（2002）：超深地層研究所地質科学研究基本計画，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-018.

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」までに処分技術に関する基盤データ・モデルの整備や技術的検討を進め，人工バリアと処分施設の設計，処分場の建設・操業・閉鎖・管理が，現状あるいは近い将来に確立される技術により可能であることを示した。今後は，人工バリア等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等「地層処分技術の信頼性向上」に関する研究開発を進めていく。これらのうち，人工バリアの長期挙動評価は今後の重要な課題であり，これに関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も検討しつつ進め，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向上につなげていく。

1) 研究開発の全体像と進め方

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，あるいは数千年以降に想定されるもの等，時間の経過に応じて変化していく。ここで，時間の経過を考慮して想定される条件，および人工バリアの長期挙動として，評価上とくにその影響を考慮すべき現象には，次のようなものがある。

- 処分後 100 年程度まで（ガラス固化体と岩盤との間に顕著な温度勾配が存在し，緩衝材が地下水により飽和するまでの過渡的な状態），酸化条件下でのオーバーパック材（金属＝炭素鋼など）の腐食，緩衝材の変形など。
- 1,000 年程度まで（緩衝材が水分で飽和，膨潤して岩盤との隙間を埋めるとともに，還元状態となる）：還元条件下でのオーバーパック材の腐食，緩衝材の変形，緩衝材の流出，緩衝材の変質（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。
- 1,000 年以降（地下水がガラス固化体に接触し，核種の移行が始まる）：ガラス固化体の溶解・変質，緩衝材の変形，緩衝材の変質，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。

また，発生する時期が特定できない現象もある。例えば，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が，断層による人工バリアのせん断挙動が挙げられる。これらの個々の現象は，部分的あるいは全体的にたがいに影響を及ぼしあうものと考えられ，より現実的な評価のためには，これらのモデルを連成させた解析が必要となる。

これらの個別現象の研究や連成モデルの開発は，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て，基礎データの取得やモデルの開発を進めるとともに，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も確認しつつ進めていく。地層処分システムの長期挙動を予測するモデルの検証には，ナチュラルアナログ研究を活用し，室内や地下研究施設での試験ではカバーできないような長期のデータを取得していく。また，数値実験技術や可視化技術など，より現実的かつわかりやすく予測評価の結果を示す技術の開発を進めていく。

2) 処分技術の信頼性向上における研究課題

「処分技術の信頼性向上」では，研究課題を大きく次の四つの項目として整理している。

- 人工バリアの基本特性データベースの整備
- 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究
- 人工バリア等の工学技術の検証
- 設計手法の適用性確認

「人工バリアの基本特性データベースの整備」では，オーバーパック候補材料の腐食に関わるメカニズムや長期腐食速度等の基本データを拡充し，腐食寿命の信頼性の確認を行うとともに，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等を整備する。当面は幅広い地質環境を考慮したデータや長期データを整備し，将来的には処分事業の進展等を踏まえ，実際の地質環境条件を考慮したデータ取得を進める。

「人工バリア等の長期複合挙動に関する研究」では，人工バリア変形・変質等の長期挙動や人工バリア性能の維持限界条件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。また，長期的な熱・水理力・化学連成挙動等の予測技術（数値実験）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。当面は，工学試験によるデータ蓄積とモデル構築を図り，長期的には幌延の深地層の研究施設での原位置試験によって信頼性を確認していく。また，人工バリ

ア等の相互作用や変質に関するナチュラル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。

「人工バリア等の工学技術の検証」では，海外の地下研究施設を活用したシーリング性能試験等を実施するとともに，コンクリート材料（低アルカリ性コンクリート等）の改良等に関する検討を行い，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。当面は，室内試験等により要素技術開発を進め，一部の要素技術については幌延の深地層の研究施設での検証を行う。

「設計手法の適用性確認」では，個別の研究開発において深地層の研究施設等と関連付けて進められる検討を集約・整理するとともに，幌延の深地層の研究施設の各段階での地質環境に関する情報を参考として，地層処分において特徴的な設計手法を中心に実際の地質環境に対する適用性を概略的に検討し，設計の観点から地質環境の調査における留意点等を整理する。これまでに，幌延の深地層の研究施設における処分技術に関する試験について，試験の内容・方法や実施時期などの試験研究計画の策定を進めている。

以下に個別の研究項目毎に研究計画および成果に関する概要を示す。なお，「設計手法の適用性確認」については，今後検討あるいは計画を具体化していく項目であり，以下に示す概要と 4 章の個別報告では，「設計手法の適用性確認」を除く研究開発課題について紹介する。

3) 個別研究項目の研究計画および成果の概要

① 人工バリアの基本特性データベース

[オーバーパックの基本特性]

オーバーパックの基本特性として，炭素鋼オーバーパックおよび代替オーバーパック材料（チタン，銅）の腐食挙動に関する研究を実施している。

炭素鋼に関しては，「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に，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，支保工材料のセメントによる影響の検討や腐食生成物の力学特性評価を行っている。

腐食生成物の影響としては，腐食生成物としてのマグネタイト上での水素発生反応は起こりにくいことを確認した。セメントによる影響としては，図 2.2-2 に示すように，緩衝材が共存する環境では pH が約 13 以下の水が浸潤した場合には全面腐食となることがわかった（谷口ほか，2002）。また，腐食生成物の力学特性として弾性係数の測定手法について検討した。今後，より長期の試験による腐食メカニズムの検討，腐食データの取得，セメントによる影響の検討を継続して実施する。

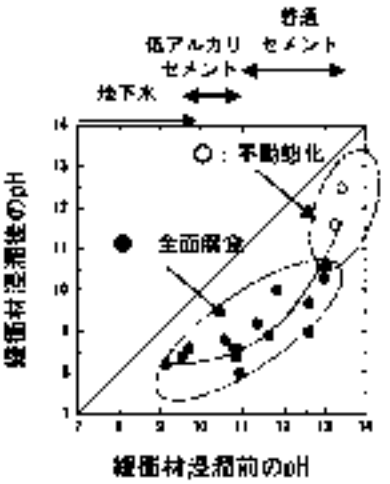


図 2.2-2　乾燥密度 1.6g/cm³，ケイ砂混合率 30% の緩衝材中における炭素鋼の不動態化条件

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。チタンでは，還元性環境における耐食性の把握として，不動態皮膜の安定性，水素吸収挙動等の検討を進めるとともに水素脆化の評価手法を検討している。銅では，日本における地下水条件を想定した研究が少なく，系統データの取得を進めるとともに銅オーバーパックの寿命評価手法の検討を行っている。

これまでに，チタンについては，還元性環境における腐食挙動に関する実験を中心として実施し，還元性環境における腐食速度，水素吸収率の測定データを取得した（新田ほか，2002；柴田ほか，2002）。また，水素脆化条件の検討として水素吸収材による機械特性試験を行い，吸収材における特性の劣化は認められなかった（新田ほか，2002）。銅については，処分環境における実験データが少ないことから，酸化性環境における純銅の腐食形態に及ぼす環境因子の影響を電気化学試験により実施し，炭酸水素イオン，塩化物イオン，硫酸イオンをパラメータとした実験データの拡充を進めた（川崎ほか，2002）。今後も，これらデータの拡充を図るとともに評価手法の確立を行っていく。

［緩衝材の基本特性］

「第２次取りまとめ」までは，降水系を中心とした基本特性データの整備を行ったが，実際の処分環境を考慮して熱（温度）および塩濃度の影響に関するデータの拡充を進めるとともに，緩衝材に関する関係式の一般化，並びにデータ取得方法の標準化に関する基盤情報の整備を進めている。

これまでに緩衝材の基本特性として，次に示す緩衝材特性に関する試験を実施し，データの取得や課題の抽出を行った。

・膨潤特性として，緩衝材ブロック定置方式を考慮した隙間膨潤試験およびスケール効果確認試験を実施し，隙間充填挙動や供試体形状が膨潤特性に与える影響に関する検討を行い，今後の試験に関する課題の抽出を実施した。
・飽和水理特性として，実際の処分地質環境を想定した場合の塩濃度の高い条件を考慮し，人工海水条件下における透水特性データの拡充を行った。「第２次取りまとめ」までに取得された降水系（蒸留水）データとともに海水系（人工海水）の測定結果を図 2.2-3 に示す。
・静的力学特性として，水分調整方法の違いによる力学的特性への影響を把握するために，蒸気圧法を用いた自然給水によるベントナイト供試体の水分調整を，強度試験の準備として行った。
・熱的特性として，低密度領域における熱伝導率の測定，ならびにデータの信頼性を確認するために線熱源法と面熱源法での異なった測定手法によるデータの比較検討を実施した。

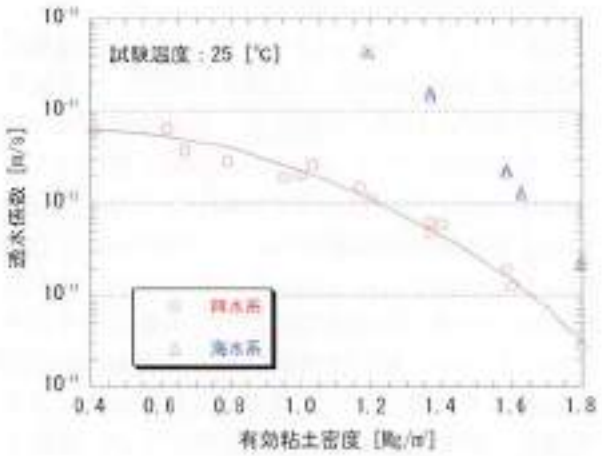


図 2.2-3　人工海水及び蒸留水に対する透水係数

今後は，各特性における取得手法の標準化に関する基盤情報の整備および温度，塩濃度等を考慮した試験データの拡充ならびに関係式の一般化を進める。

［人工バリアの性能保証に関する基盤情報整備］

安全規制に係る指針・基準に関しては国を中心として体系的な整備が今後進められていくものと考えられる。ここでは，人工バリアの性能保証に関する基盤的な情報の整備を進め，安全規制に係る指針・基準の策定に資するとともに実施主体が進める処分事業への反映も図る。

まず，緩衝材およびオーバーパックについて，処分場の長期的安全性の確保の観点から人工バリアが有すべき要求性能からの整理を行い，関係する研究項目の安全規制・基準の策定に対する位置付けを明確化するための検討を実施した。今後は，処分場を構成する他の要素（埋め戻し，プラグ，坑道，支保等）について同様の検討を行い，個々の研究成果を適宜取り込みつつ見直しを図る。

また，処分場の安全性確保の観点から人工バリア性能に係るモニタリングおよび再取り出しについての調査・検討を行った。人工バリア性能モニタリングについては，諸外国における最新の情報を調査・整理した。再取り出しについては，諸外国における考え方の調査および「第２次取りまとめ」で示された処分概念における再取り出しの技術的成立性について検討を行った。

さらに，安全規制等に資する検討材料を提供するものとして，人工バリアの定置精度等に係る技術的検討および操業シミュレーションシステムの開発を実施した。人工バリアの定置精度の検討としては，施工時のブロック型緩衝材とオーバーパックの間にすき間が発生すると仮定し，そのすき間がオーバーパックの腐食挙動に影響するかどうかを実験的に検討した。また，操業シミュレーションでは，システムの概念を構築し，「第２次取りまとめ」で示された処分施設を基とした操業シミュレーションのためのデータを作成した。

② 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究

［人工バリア等の変形・変質等の長期挙動に関する研究］

変形等の長期挙動に関する研究としては，緩衝材のクリープ現象および岩盤の力学的変形挙動，緩衝材の流出・侵入挙動について検討を実施して

いる。緩衝材クリープについては，「第２次取りまとめ」において他の粘性土と同様なクリープ挙動が起こるとの前提により力学挙動の評価を実施したが，この妥当性を確認する必要がある。そこで，緩衝材のクリープ挙動に関するデータを取得するための試験装置の改良を実施した。今後，データの取得とともに，構成式モデルおよび解析コードの確認を行い，その妥当性を検討する。岩盤の力学的変形挙動については，想定される処分環境条件下における岩盤の強度および変形特性において，坑道周辺の熱や乾湿繰り返しの影響が，取得データからも坑道周辺岩盤の寿命に影響を及ぼし得ることがわかった。今後も評価の信頼性を向上させるために，データ取得，モデルの検討等を行い，また緩衝材との相互作用の評価（高治ほか，1999）も念頭におき研究を進める。

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，現象把握のための試験の実施および侵入現象のモデル化を試みているが（杉野・菅野，1999），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，実現象の可視化や地質環境を考慮したデータの拡充を進め，侵入モデルの構築を進める必要がある。これまでに，時間と緩衝材の岩盤亀裂中への侵入距離の関係に関するデータの拡充を進めるとともに，亀裂内の

図 2.2-4　X 線 CT を用いた亀裂内粘土の可視化

侵入ベントナイトの形状変形とベントナイトコロイドの浸食との相互関係を把握するための試験を実施した。また，亀裂内侵入ベントナイトの密度分布を測定するため，X 線 CT を用いた予備試験を実施し，図 2.2-4 に示すような予備的な測定を行った。今後，地質環境を考慮したデータの拡充，侵入現象モデルの構築を進める。また，実験による浸食発生のしきい値の把握，浸食量に関する定量的評価を実施する。

人工バリアの変質等の長期挙動に関する研究として，緩衝材の変質に関する長期的挙動のうち，特にオーバーパックの腐食生成物による影響とセメント材料の利用による高アルカリ環境による影響について検討を実施している。腐食生成物の影響については，炭素鋼と接触していたベントナイトの分析，評価を行い（藤島ほか，2000），またスメクタイトおよびスメクタイト/イライト混合層と共生する緑泥石の化学組成および産状の調査を行った（大場，2002）。緩衝材のアルカリ性環境での変質評価としては，基本データであるスメクタイトの溶解速度データを取得した。また，緩衝材および周辺岩盤の総合的なアルカリ変質の予測に資するために，緩衝材を構成する鉱物等の溶解，沈殿速度に関するデータの調査・評価を行い，体系的な整理を実施している。今後も体系的なデータ取得を継続するとともに，二次鉱物の生成等を考慮した変質・劣化モデルを構築し，長期評価を実施する。

[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の挙動は，熱，水，応力，化学の個々の現象がたがいに影響を及ぼしあうことが予想される（図 2.2-5）。そこで，より現実的な評価を行うために，これらを連成挙動として表現可能なモデルの開発に着手した。また，「第２次取りまとめ」では，開発した熱-水-応力連成解析コードを用いて評価を実施したが，このコードに関して国際共同研究（DECOVALEX および Prototype Repository Project）を通じて更なる検証および高度化も図っている（千々松ほか，2001）。

熱-水-応力-化学連成解析コードに関しては，モデルの開発には長期的な取り組みが必要となるが（伊藤ほか，2002），これまでに熱-水-応力連成モデルに物質移行モデルを追加し，熱-水-応力-化学連成解析コードのプロトタイプを開発し，このコ

ードによる塩の蓄積に関する予備的な解析を行った。また，柔軟な連成解析体系の実現に向けた開発概念の検討を実施した。今後も柔軟な連成解析体系を実現する熱-水-応力-化学連成解析コードの開発を進め，地層処分システムの熱，水，応力，化学場の変遷に関する数値解析を実施する。

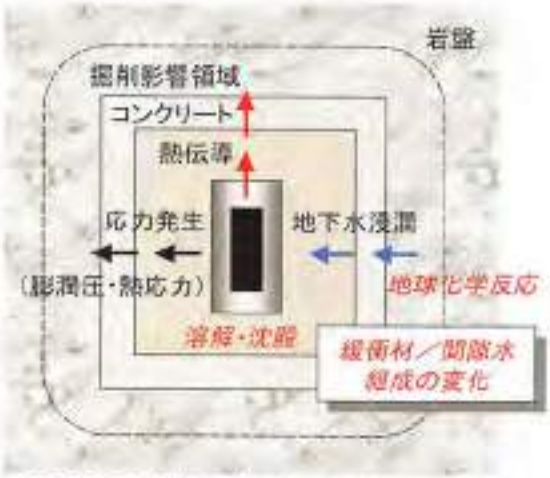


図 2.2-5　熱-水-応力-化学連成場の概念

［人工バリア性能の維持限界条件に関する研究］

人工バリア性能の維持限界条件に関する研究として，緩衝材中のガス移行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実施した。

緩衝材中のガス移行挙動の研究については，降水系・室温条件下における破過圧力と有効粘土密度ならびに膨潤応力との関係に関するデータの拡充を図っている。また，サイクル機構とフランス CEA との国際共同研究の一つとして，実際の処分環境を踏まえ地下水圧や温度条件を考慮した透気特性データの取得を目的に，Fo-Ca Clay，クニゲル V1 および MX-80 それぞれの粘土を用いた試験を進めている。メカニズムの詳細な把握に向けた可視化研究の可能性として X 線 CT 技術に関する予備検討を行い，ベントナイトとベントナイト中の空隙の区別やベントナイトの飽和度の変化の把握が可能であることがわかった。

今後，透気特性に関するデータを追加し詳細に検討していくとともに，新たな試験方法としての X 線 CT 技術の適用に必要なベントナイト密度や飽和度に関する基礎的なデータを取得していく。

人工バリアのせん断応答挙動に関する研究は，極端な条件を想定した試験を行うものであり，地震・活断層の影響等の天然事象の影響に対する人工バリアの頑健性や人工バリアの安全機能の裕度を示すことには意味があると考えられる。本研究では，断層が人工バリアを直撃した場合を模擬した断層模擬試験およびシミュレーション解析を行い，試験における問題点を抽出した。今後は，定量的な評価を目指した検討を実施する。

［人工バリア等のナチュラルアナログ研究］

「第２次取りまとめ」までに，海水類似環境でのベントナイトのイライト化，数十年埋設された土壌中の鉄管の調査，地層中に 100 万年埋没していたガラスの調査等の重要な成果が得られている。

これまでに，ガラスについては圧縮ベントナイト中のガラスの長期変質挙動に関するものとして，凝灰岩層中に含まれる火山ガラスを調査し，温度約 50℃以下では変質鉱物は認められないことを確認した。金属については長期腐食挙動に関する研究として，イヨマイ７遺跡と出雲大社境内遺跡より出土した鉄器の腐食量等を X 線 CT により調査し，腐食評価モデル式について検討を実施した（本田・山口，2002）。ベントナイトの変質については，セメント系材料による高 pH 溶液に対する長期安定性評価として，アルカリ性地下水湧出地点周辺の粘土鉱物の変質に関する調査に着手した。また，ウラン鉱床周辺の粘土層中での核種の存在状態や移行挙動に関する知見を得るために，カナダのシガーレイク鉱床においてサンプリングを行い，同位体分析を実施した。

今後も，実際の地質環境条件などに適用可能な人工バリアの長期挙動評価の妥当性を傍証する天然事例の蓄積を目指す。

③ 人工バリア等の工学技術の検証

［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の閉鎖性能を検証するために，AECL との共同研究「トンネルシーリング性能試験」を AECL の地下研究施設で実施している。これまでに，坑道の掘削，プラグの設計・施工を行い，注水・トレーサー試験等を実施し，プラグからの湧水量・浸潤等のデータを取得した。一例として粘土およびコンクリートプラグの湧水量の経時変化を図 2.2-6 に示す。

また，閉鎖要素に求められる要件の明確化のために諸外国における要件の事例調査を行い，その考え方を整理した。さらに，地下深部における還元環境条件への影響を与えるものとして，坑道の建設・操業時における周辺岩盤の不飽和領域の発

生に関して，実験的な検討および解析との比較評価を行った。今後，閉鎖要件を例示するとともに，要件を満足する検証データの蓄積を継続して実施していく。

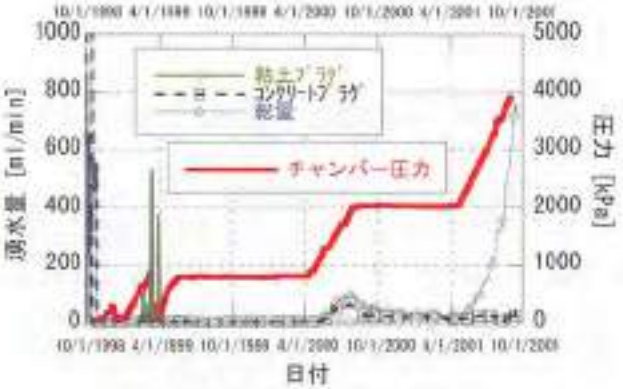


図 2.2-6　湧水量の経時変化

[人工材料の開発]

サイクル機構では，セメント系材料に起因する高 pH 溶液の影響を考慮し，坑道の支保工材料のオプションとして低アルカリ性コンクリート（HFSC）の開発を進めてきた。しかし，施工性に関する検討はまだ十分ではないため，低アルカリ性コンクリートの施工性開発に取り組んでいる。これまでに，地上の模擬トンネル等における吹付け実験やベースコンクリートの特性把握（強度発現）試験，流動性保持に関する試験としてのスランプ測定，pH の低下状況に関する試験（図 2.2-7），吹付けコンクリートのコア採取による透水試験等を実施しデータの取得を行い，鉄筋腐食評価としての室内および暴露試験を開始した。また，セグメントへの適用性を確認するために，実規模のセグメントの試作を行った。グラウトへの適用性については，

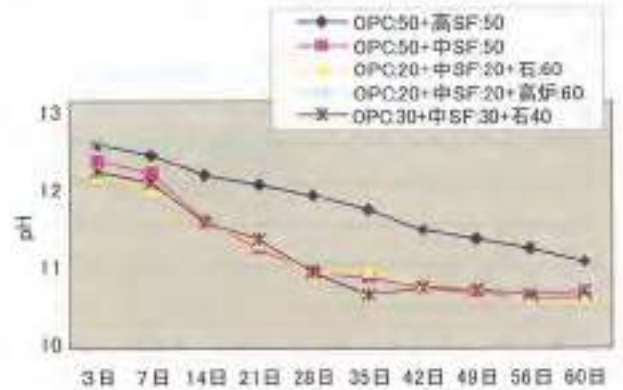


図 2.2-7　HFSC の pH 低下状況

（OPC：微粒子普通ポルトランドセメント，高/中 SF：高品位/中品位シリカフューム，石：石灰石微粒子，高炉：高炉スラグ微粉末）

グラウトでは材料粒径の小さいことが要求されることから，適用可能な材料の調査を行い，適用の可能性を持つものと判断された。

今後，幌延の深地層の研究施設への適用を目指し，基本的な施工性や施工における適用範囲を把握し，安全施工が確保できるレベルを達成するための実験や技術開発を進める。

参考文献

千々松正和，雨宮　清，山下　亮（2001）：人工バリアにおける緩衝材挙動評価研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書：株式会社間組），JNC TJ8400 2001-020.

藤島　敦，久保田満，金原永，狼本一昭，柴田雅博，佐藤　努（2000）：低酸素条件で鉄と接触していたベントナイトの特性評価，第 44 回粘土科学討論会講演要旨集，pp.68-69.

本田　卓，山口伸吾（2002）：土壌中の考古学的金属製品の腐食に関する調査(II)，サイクル機構技術資料（研究委託報告書：日立エンジニアリング株式会社），JNC TJ8400 2000-007.

伊藤　彰，川上　進，油井三和（2002）：熱-水-応力-化学連成挙動研究の現状と今後の計画，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-028.

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ノード分極挙動，サイクル機構技術資料，JNC TN8405 2001-034.

大場孝信（2002）：天然におけるスメクタイトの緑泥石化に関する調査，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 2001-054.

柴田俊夫，瀬尾眞浩，杉本克久，水流　徹，井上博之（2002）：オーバーパック候補材料の腐食挙動モデルの高度化研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；財団法人腐食防食協会），JNC TJ8400 2001-049.

杉野弘幸，菅野　毅（1999）：拡散モデルを用いた緩衝材の溶出挙動の解析的予測，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-040.

高治一彦，杉野弘幸，奥津一夫，三浦一彦，田部井和人，納多　勝，高橋真一，杉江茂彦（1999）：ニアフィールドの長期構造安定性評価，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-043.

谷口直樹，川上　進，森田光男（2002）：ベントナイト／ケイ砂混合体における炭素鋼の不動態化条件，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-025.

和田隆太郎，栗本宣孝，藤原和雄，安倍　暁，建石　剛，舛形　剛（2002）：チタンオーバーパックの水素脆化に関する研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；株式会社神戸製鋼所），JNC TJ8400 2002-002.

2.2.3 安全評価手法の高度化

1) 安全評価手法の高度化における今後の課題

「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評価を行った。「第２次取りまとめ」以降の研究開発課題については，2.1 項で述べたように「国による第２次取りまとめ評価報告書」において，

- 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
- 安全評価に用いるデータの蓄積
- 実際の場所の特性を精度良く再現できるモデルの確立 等

が課題として挙げられている。また，「安全規制の基本的考え方」においては，

- 実際の地質環境条件を適切に考慮した設計，シナリオに基づく評価
- 緩慢な天然現象による地質環境の長期にわたる変化を考慮した評価
- モデル，パラメータの不確実性に配慮した指標の検討
- 科学的合理性のある範囲での地下水シナリオの設定 等

が，安全規制に係わる指針・基準等の策定を行ううえで今後評価が必要な事項として示されている。わが国の地層処分計画が事業化段階へと進展したこと，および国が示した上記の課題を踏まえ，サイクル機構では，「実際の地質環境への適用性確認」，「地層処分システムの長期挙動の理解」を目標として研究を進めていくこととした。その中で安全評価に関しては，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，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確認を課題として設定した（図 2.2-8）。

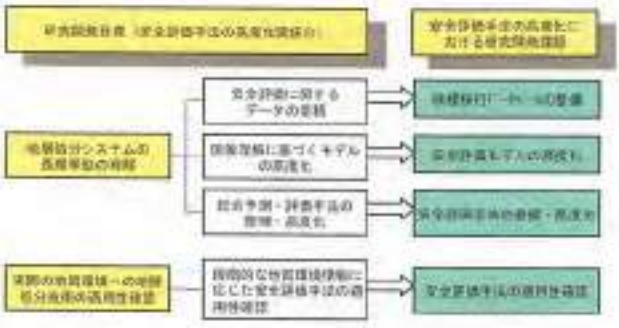


図 2.2-8 安全評価手法の高度化における研究開発課題

この課題を達成するため，エントリーやクオリティ等を活用するとともに，深地層の科学的研究の成果も基盤として取り込みつつ，安全評価に関するデータの蓄積，モデルや手法の高度化を進めていく。以下に各課題の計画と成果について概略を述べる。

2) 安全評価手法の高度化の各課題の計画と成果

① 核種移行データベースの整備

溶解度評価のための熱力学データ，収着・拡散データ等をクオリティや国際共同研究等を活用して蓄積していくとともに，国際的な最新情報の調査・抽出・評価を実施し，安全評価基盤としてのデータベース整備を進める。「第２次取りまとめ」においても，国内外の知見を踏まえてデータベースを整備してきているが，今後は，種々の観点（例えば，海水環境）でのデータの拡充，分析技術やモデル化技術の開発・適用などの現象理解を通じてデータの信頼性を高めていく。また，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。

「第２次取りまとめ」以降，還元環境におけるアクチニド（ウラン，ネプツニウム，プルトニウム）の溶解度の測定を行い，溶解度積や錯生成定数等の熱力学データを取得し，UO_2(am)，PuO_2(am)については「第２次取りまとめ」より 1～2 桁低い溶解度積が得られた（例えば，Kitamura and Kohara, 2001；森山，2001；森山，2002）（図 2.2-9）。

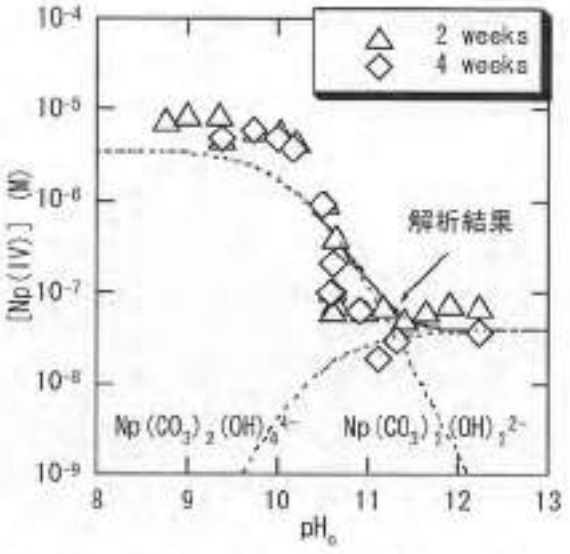


図 2.2-9 ネプツニウム(IV)溶解度の pH_c 依存性およびその解析結果（I=0.5M，C_T=0.1M）

緩衝材および岩石中での収着，拡散パラメータについては，「第２次取りまとめ」で選定したデータの信頼性確認や海水環境下でのデータ拡充を進めてきており，具体的には，圧縮ベントナイト中の鉛，セレンの拡散係数の取得を行なった（例えば，Sato and Miyamoto, 2001）。

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の影響および有機物・微生物の影響，生物圏評価モデル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と，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，モデルの信頼性の確認や高度化を図ることを課題としている。

[岩盤中での水理・物質移行モデル]

結晶質岩については，移行遅延において重要と考えられる処分場近傍（例えば数 10～100 メートルスケール）での亀裂ネットワークでの水理・物質移行評価の信頼性を向上させるため，単一亀裂，亀裂交差部における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。開発した亀裂ネットワークモデルをはじめとするモデル化手法については，超深地層研究所計画や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。

堆積岩については，幌延の深地層の研究施設を活用し，実際の堆積岩の不均質性を記述可能な不均質性モデルを検討するとともに，必要に応じてモデル開発を行う。また，化石海水や塩淡境界は動水勾配の評価上重要となるため，密度流モデルの適用性確認を行う。

「第２次取りまとめ」以降の主な成果としては，単一亀裂中の亀裂充填物質中および変質部の拡散係数を測定し，特に亀裂充填物質における拡散が非常に速く（図 2.2-10），亀裂全面からマトリクス拡散が起きる可能性があり，この場合「第２次取りまとめ」で考慮しているマトリクス拡散寄与面積率が保守的である可能性があることが示された（Altman et al., 2000）。また，グリムゼル原位置試験場においては，単一亀裂でのトレーサー試験に加え，亀裂内部構造の詳細な観察とそれに基づくモデル化を行い，二重空隙コンセプトに基づいて単純化した放射性核種の移行・遅延モデルが，原位置トレーサー試験の空間・時間スケールにおいて，考慮すべきプロセスと場の構造を適切に表現していることを確認した（Smith et al., 2001）。また，室内試験データの実際の地質環境条件への適用可能性を検討した（Ota et al., 2001）。より大きなスケールに関しては，亀裂ネットワークモデルの重要パラメータである亀裂の大きさに関し，亀裂トレース長のデータを追加整理し，わが国における亀裂のトレース長はフラクタル性を示し，その範囲は岩種・地域にかかわらず一定であることを示すとともに，その範囲が亀裂ネットワークモデルを用いた評価に与える影響を検討した（澤田ほか，2002）。その他，亀裂ネットワークモデルの機能を拡張し，水理と地下水水質を統合的にモデル化する方法を開発し，エスポ地下研究施設への適用を行った（内田ほか，2002）。

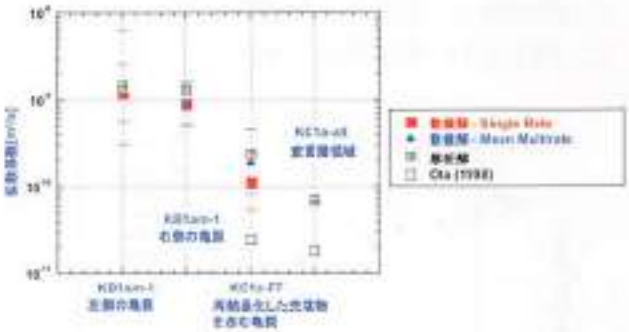


図 2.2-10　亀裂性岩盤中各領域における拡散係数

[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った。今後は，実際の地質環境における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の推定が重要な課題である。また，緩衝材中の間隙水の水質に関しては，「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反応に基づく推定を行ったが，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が残された課題と考えられる。

「第２次取りまとめ」以降の主な成果としては，新第三紀層中の海水系地下水の評価を実施し，鉱物－地下水反応のみならず，堆積時の有機物の分

解を考慮する必要があることがわかった（亀井，2001）。

［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，緩衝材への移行も考慮した複合現象の確認試験，鉱物化反応，共沈現象の解明を行う。また，核種の収着・拡散の現象モデルに関しては，国際的にも議論のある課題であり，OECD/NEA の国際共同プロジェクトに参加するとともに，クオリティ等において試験パラメータを適切に制御した試験を行い現象理解を進める必要がある。

「第２次取りまとめ」以降の主な成果としては，緩衝材の主要構成鉱物であるスメクタイトに対するネプツニウムの収着挙動の炭酸濃度依存性に関するデータを取得した(Kitamura et al., 2002)。拡散挙動に関しては，緩衝材中のヨウ素，重水等の拡散係数の塩濃度依存性を把握し拡散メカニズムに関する考察を行った(鈴木・佐藤，2002)。また，分子動力学-均質化（MD-HA）結合解析法により，緩衝材中の水の拡散挙動の解析を行い，実験値の傾向性と一致する解析結果を得ることができた（図2.2-11：鈴木ほか，2001）。

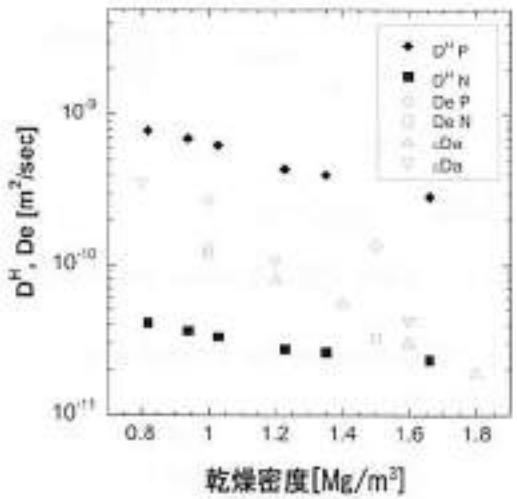


図 2.2-11　圧縮ベントナイト中の HTO の拡散結果と MD-HA 結合解析結果の比較

（◆がスメクタイトの配向方向と平行な方向への拡散，■が配向方向と垂直な方向への拡散の解析値であり，前者は実験値の◇に，後者はその他の実験値のプロットと対応）

［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は，母岩中での核種の移行挙動に影響を及ぼすことが懸念されている。「第２次取りまとめ」では，移行の遅延効果として期待されるコロイドと岩石との相互作用について考慮しないなど簡略かつ保守的なモデルでの影響評価を実施し，コロイドの影響が大きくないことを例示している。今後は，核種移行に及ぼすコロイドの影響に関する現象理解をさらに深め，より現実的，定量的な評価を行うためのモデル構築を進める。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や人工バリア中の透過性等に関するデータの取得を行う。

「第２次取りまとめ」以降の主な成果として，ベントナイト鉱山での事例調査より，イオン強度がおよそ 10^{-1} よりも大きい地下水中では，コロイドが安定に存在しにくいことが示された(Kuno et al., 2002)。また，ベントナイトコロイドが共存する系については，ストロンチウムのような可逆的収着元素では，岩石模擬亀裂中での室内移行試験において，コロイドが必ずしも溶質の移行を助長する媒体とはならないことを示唆する結果が得られた(久野・油井，2001)。一方，グリムゼル原位置試験場ではアメリシウム(Ⅲ)，トリウム(Ⅳ)，プルトニウム(Ⅳ)についてはヨウ素より若干速く破過する結果が得られ，核種によって挙動が異なることが示された(図 2.2-12)。

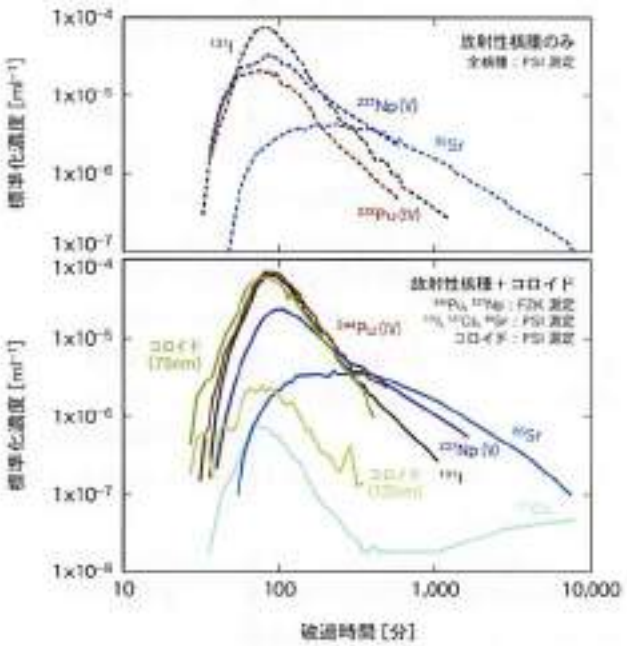


図 2.2-12　ベントナイトコロイド共存下での放射性核種の移行・遅延挙動（グリムゼル原位置試験結果の一例）

[生物圏評価モデル]

「第２次取りまとめ」においては，レファレンスバイオスフィアの構築手法に基づく生物圏評価モデルを構築した。今後は，実際の地質環境における評価を行うため，レファレンスバイオスフィアの構築手法を高度化する。また，実際の地表環境への既存の評価手法の適用性を検討するため，地質環境と生物圏とのインターフェイス（以下，GBI）の具体化に関する検討等を行い，評価手法の改良あるいは新しい評価手法の開発を行う。さらに，解析に必要なデータを選定するための方法論についても，国際的な研究動向を踏まえながら，わが国での評価に適用できるデータ選定手法を構築していく。

「第２次取りまとめ」以降の主な成果としては，現在の気候状態（温暖気候）を想定した「第２次取りまとめ」に対して，将来の気候変動を考慮し寒冷気候とツンドラ気候での生物圏評価を行った。その結果，ほとんどの核種で換算係数が低下した（加藤ほか，2001a）。また，「第２次取りまとめ」で検討した沿岸海域堆積層を GBI とした生物圏モデルの代替モデルとして，海域と陸域との境界部における領域（潮間帯）および沿岸の海域よりも沖合の領域（周辺海洋）をそれぞれ GBI として想定した代替生物圏モデルを作成し比較したところ，潮間帯モデルおよび周辺海洋モデルの線量への換算係数の方がほとんどの核種で同程度か小さい値となった（図 2.2-13：加藤ほか，2001b）。さらに，生物圏評価に用いるパラメータの不確実性について検討を行ない，河川流量，灌漑水量，侵食量，および表面土壌の分配係数，表面土壌コンパートメントの大きさ（深さ，面積，体積），土壌から農作物への移行係数について，線量への換算係数に与える影響が大きいことが明らかとなった（加藤ほか，2001c）。

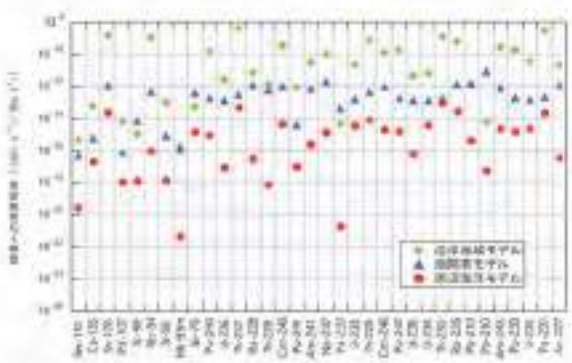


図 2.2-13　海域を GBI とした生物圏モデルを用いて算出した線量への換算係数
（海洋漁業従事者グループ）

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の整備を行うとともに，実際の地質環境やその長期的変遷などを考慮して総合的に安全評価を行うための手法等の整備を行う。

[シナリオ開発技術についての研究]

「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，FEP リストの作成，スクリーニングおよびシナリオの作成を透明性と追跡性に留意しながら行い，安全評価の枠組みを設定した。今後のシナリオ開発においては，実際の地質環境を対象として，不確実性を考慮しつつ適切なシナリオを開発する技術の整備が必要となり，あわせて透明性や追跡性の向上を図ることが重要となる。そのため，FEP の設定，FEP と作成されるシナリオの対応，さらに，そのシナリオに基づく解析評価との対応など，シナリオ開発の一連の作業経緯を整合的にわかりやすく提示する技術の開発に取り組んでいる。この技術開発では，深地層の科学的研究の成果も情報として活用し，実際の地質環境への事例としての適用を図っていく。

[不確実性評価技術]

「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解析ケースとして分類し，決定論的な解析手法で評価した。今後は，種々の不確実性が評価結果に与える影響を，現象理解の向上，データの拡充および実際の地質環境の情報等を踏まえてより詳細に検討し，重要な不確実性要因を適切に抽出することにより，研究開発項目の効果的な設定へと反映することが重要になる。

これまでに，「第２次取りまとめ」の核種移行評価モデルに準拠し，入力値の統計的サンプリングと多数回のシミュレーション機能により，データの不確実性による影響を効率的に解析に取り込むことができるコードを開発し，「第２次取りまとめ」におけるデータ不確実性の評価との比較を行い(図 2.2-14)，「第２次取りまとめ」では，影響

の大きいデータの不確実性が適切に取り込まれていることを確認した。また，各データの不確実性が結果に与える影響を，種々の多変量分析手法を用いて分析することを通じて，その不確実性要因の重要度を定量的に示していくための技術開発を進めている（若杉ほか，2002）。

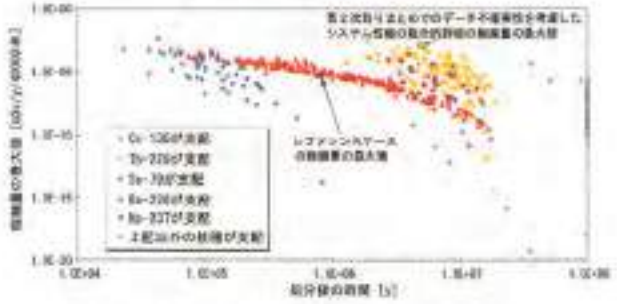


図 2.2-14　総線量の最大値の散布図
（ガラス固化体 4 万本あたり；各プロットのシンボルは総線量が最大となるときに最も支配的な核種を示す）

[統合解析システムの整備]

「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「深地層の科学的研究」における研究開発は，独立ではなく，研究開発項目内，研究開発項目間そして研究開発分野間での種々の連携を考慮することが重要である。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。このため，今後，サイクル機構が研究開発を着実かつ効果的に進めるにあたって，それら連携を明確にするとともに，情報とその流れを適切に運用・管理できる枠組みを準備し，さらに効率的に引用・参照できる機能を整備していくことが重要となる。

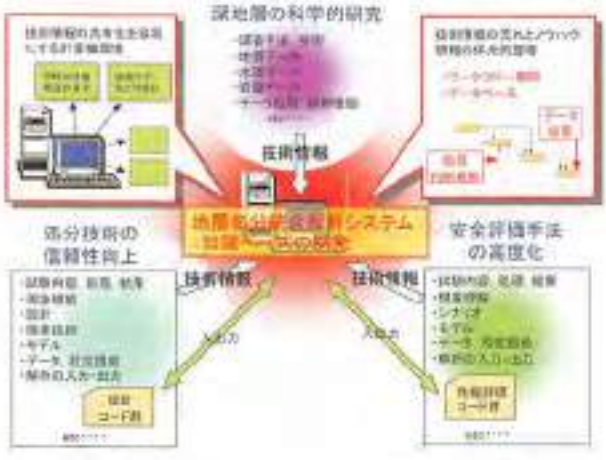


図 2.2-15　統合解析システム概念図

これまでに，研究開発項目内，研究開発項目間そして研究開発分野間での種々の連携の分析を進めてきており，今後は，情報とその流れを連携に即した形で運用・管理するための統合解析システムの開発に取り組む予定である（図 2.2-15）。

④ 安全評価手法の適用性確認

深地層の研究施設において段階的に得られる実際の地質環境に関する情報等を参考として，シナリオ開発，地球化学評価，岩盤中の水理・物質移行評価，生物圏評価などの安全評価に係る評価手法やモデルの実際の地質環境への適用についての検討を行う。これらを通じて，評価手法やモデルを実際の地質環境に適用する際の課題や留意事項等を抽出するとともに，安全評価の観点から地質環境の調査・評価や設計における課題や留意点等を設定する。当面は，深地層の研究施設計画での地表からの調査により得られる情報を主な対象として検討を進める。ただし，深地層の研究施設計画については，現時点で地表からの調査に基づく地質環境の情報が得られつつある段階である。そのため，本課題については，これまでに，シナリオ開発，岩盤中の水理・物質移行評価，生物圏評価，安全評価指標などを例として，今後実際の地質環境への適用を具体的に検討していく上での一般的な課題や留意事項について予備的な検討を進めてきた。

この予備的な検討を通じて，今後の検討において以下のことに配慮することの必要性を確認した；

- 原位置データの取得から，データの解釈や現象理解，モデル化を通じて評価に至るために，どのような情報が必要であり，それらがどのような道筋で連携し，どこでどのような処理や判断が必要かについての整理をまず行ったうえで，段階的に取得される原位置データを対象とした評価手法やモデルの適用についての検討を進めること
- 原位置データの取得，データの解釈や現象理解，モデル化および評価の各段階における不確実性を定量的に検討するとともに，評価全体にわたる不確実性の影響の伝播を分析し，それぞれの不確実性の影響度と重要な不確実性要因を洗い出すこと
- 不確実性等の検討においては，「第 2 次取りまとめ」で示した，『人工バリアとその周辺母岩の性

能に高い信頼性をおいたシステム性能評価の考え方」に特に重点をおいた検討とすること
・原位置データの取得が段階的に進むこと，また上記検討がワンスルーで完了するものではないことから，実際の地質環境から得られる情報の質・種類あるいは詳細度が段階的に変わることに応じて繰り返し行う必要のあること
・繰り返し行われる検討の内容や結果を適切に記録することにより，追跡性と透明性を確保すること。

以上のことを踏まえ，今後，実際の地質環境から得られる情報（当面は，深地層の研究施設計画での地表からの調査により段階的に得られる情報を主な対象とする）を十分に活用しつつ，前述した評価手法やモデルのそれぞれを対象としたより具体的な検討を進める。

なお，「安全評価手法の適用性確認」については，今後検討あるいは計画を具体化していく項目であり，5 章の個別報告では，「安全評価手法の適用性確認」を除く研究開発課題について成果の現状を示すこととする。適用性確認に係る上述の予備的な検討については，個別の評価手法やモデルに関する報告の中で必要に応じて言及することとする。

参考文献

Altman, S. J., Uchida, M., Tidwell, V.C., Boney, C.M. and Chambers, B.P. (2001) : Visualization and Quantification of Heterogeneous Diffusion Rate in Granodiorite Samples by X-Ray Absorption Imaging. SANDIA REPORT, SAND2001-1842.

亀井玄人 (2001) : 新原ガス田の地下水に含まれるヨウ素の起源と挙動，資源地質，51, pp. 145-151.

加藤智子，石原義尚，鈴木祐二，内藤守正，石黒勝彦，油井孝夫，Richard Little (2001a) : 気候変動による影響を取り入れた地層処分安全評価の生物圏モデルの検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-003.

加藤智子，鈴木祐二，石黒勝彦，油井孝夫，Richard Little，内藤守正 (2001b) : 沿岸海域を核種放出域とした地層処分生物圏評価の代替モデル，日本保健物理学会第 35 回研究発表会予稿集，C16

加藤智子，石原義尚，鈴木祐二，内藤守正，石黒勝彦 (2001c) : 感度解析による地層処分安全評価生物圏モデルのパラメータの不確実性に関する検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-014.

Kitamura, A. and Kohara, Y. (2001) : Solubility of Np (IV) under Carbonate Conditions, JNC Technical Report, JNC TN8400 2001-006.

Kitamura, A., Tomura, T. and Shibutani, T. (2002) : Sorption Behavior of Neptunium onto Smectite under Reducing Conditions in Carbonate Media. MRS EF 2001, JAERI Conf 2002-004, pp. 659-666.

久野義夫，油井三和 (2001) : ベントナイトコロイドに収着した Sr の岩石亀裂中での移行挙動，サイクル機構技報，No.13 (2001.12)，pp. 53-63.

Kuno, Y., Kanai, G. and Obtani, H. (2001) : Natural colloids in groundwater from a bentonite mine, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXV, Mat. Res. Soc. Symp., Nov. 26-29, 2001, Boston. (in press)

森山裕丈 (2001) : 超ウラン元素の溶解度に関する研究 III．サイクル機構技術資料 (研究委託報告書；京都大学)，JNC TJ8400 2001-015

森山裕丈 (2002) : 超ウラン元素の加水分解及び錯生成に関する研究．サイクル機構技術資料 (研究委託報告書；京都大学)，JNC TJ8400 2001-048.

Ota, K., Alexander, W.R., Smith, P.A., Mori, A., Frieg, B., Frick, U., Uchi, H., Amann, K., Cowper, M.M. and Berry, J.A. (2001) : Building confidence in radionuclide transport models for fractured rock: the Nagra/JNC Radionuclide Retardation Programme. Sci. Basis Nucl. Waste Manag. XXIV, pp. 1033-1041

Suzuki, H. and Miyamoto, S. (2001) : A Study on Diffusion and Migration of Iodide in Compacted Bentonite, JNC Technical Report, JNC TN8400 2001-018.

湧田 悌，井尻裕二，大西有三，大隅宏敏，西山 哲 (2002) : 亀裂トレース長のスケール依存性を考慮した検討，第 II 回岩の力学国内シンポジウム論文集，A04.

Smith, P.A., Alexander, W.R., Kickmaier, W., Ota, K., Frieg, B. and McKinley, I.G. (2001) : Development and testing of radionuclide transport models for fractured rock: examples from the Nagra/JNC Radionuclide Migration Programme in the Grimsel Test Site, Switzerland. Jour. Contam Hydrol 47, pp. 335-343.

鈴木 覚，佐藤治夫 (2002) : 圧縮ベントナイト中のストロンチウム，ヨウ化物イオン，水の実効拡散係数の乾燥密度依存性．サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2002-002.

鈴木 覚，藤島 敦，上野健一，市川康明，河村雅行，藤井直樹，柴山雅博，佐藤治夫，北山一美 (2001) : 圧縮ベントナイトの微細間隙のモデル化と MD 法結合解析法の処分問題への適用，粘土科学，41，pp. 43-53.

内田雅大，Bill Dershowitz，Richard Metcalfe，Dawn Shuttle，Mark Cave，竹内真司 (2002) : 地下水水質変化を考慮した水理解析の試み ―スウェーデン エスポ地下研究施設での例―，第 II 回岩の力学国内シンポジウム論文集，D05.

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，No.14 (2002.3)，pp. 149-160.

【個別報告】

3. 深地層の科学的研究

3. 深地層の科学的研究

3.1 広域地下水流動研究

3.1.1 研究の概要

① 背景と目標

広域地下水流動研究は，地層科学研究の一環として，平成 4 年度から東濃鉱山周辺地域を研究開発の場として実施している。本研究の目標は，広域（ここでは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（動燃事業団，1997）であり，この目標に向け，地下深部の地質環境に関わる現象やそのメカニズムに関する研究を進めている。

本研究では，開始から 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，試錐調査を中心に深度 1,000m 対応の地下水調査機器を実用化したとともに，試錐孔の清水掘削技術などのノウハウを蓄積した。また，これらの試錐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変化などを整理し，「第 2 次取りまとめ」に反映した。

「第 2 次取りまとめ」以降は，それまでの要素技術開発と並行して，地下深部の地下水流動系の全体像を把握するための地上からの調査技術やモデル化技術の整備を進めている。

本研究のように広範囲な領域の地質環境を対象とする段階では，密度の高い調査の実施は現実的に困難であり，調査手段も文献調査や空中および地上からの調査に限定される。したがって，このような段階における地質環境の評価項目と評価に必要な調査の質と量を検討するための事例を提示することが調査・評価技術の整備にあたり重要である。

このような観点から，本研究では，実際の地質環境を対象とした調査研究を通して，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とともに，用いられた各種調査・評価技術の適用性の確認，およびそれらの技術の組合せや手順などを示した調査・評価フローの構築を目標としている。

② 実施項目と進め方

広域地下水流動研究では，地下深部の地下水の流動特性および地球化学特性に関連した地質学，水理・水文学，地下水の地球化学の各分野での研究とともに，各分野間にまたがる「地質環境情報の統合化」を実施している。また，調査・評価技術の適用性評価にあたっては，測定データや解析結果に含まれる不確実性の評価も重要である。これらの不確実性は，対象となる地質環境の不均質性や異方性の程度とともに調査量と深く関係するものと考えられることから，本研究では既存情報に基づく地質環境の概念モデルの構築を出発点とし，「計画立案→調査・解析→モデルの構築（更新）」といった一連のプロセスを繰り返し，段階的に地質環境のモデル化を進めることにより，不確実性を考慮した地質環境の調査・評価技術に関する研究開発を実施している。

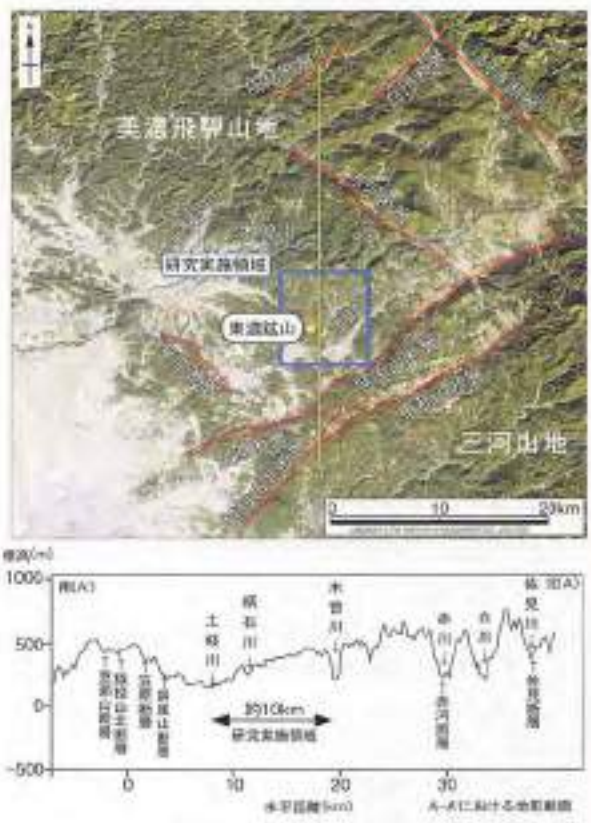


図 3.1-1　広域地下水流動研究の研究実施領域

研究実施領域の設定には，研究対象となる地下水流動系の涵養域から流出域までを包含する必要があるために，文献情報に基づく予察的な地下水

流動解析を実施し，解析から得られた深度 1,000m 付近までの地下水の流動方向に基づき，図 3.1-1 に示す約 10km 四方の研究実施領域を設定した（動燃事業団，1998）。

設定された研究実施領域は，本地域の主要河川である木曽川と土岐川に挟まれた丘陵地帯に位置しており，土岐川支流の日吉川流域（約 25km²）を包含している。領域内の標高差は約 360m，平均勾配は日吉川沿いで約 3.2%である。地質はおもに，基盤をなす中生代白亜紀の花崗岩類（土岐花崗岩），およびそれを覆う新第三紀堆積岩類（おもに中新統の瑞浪層群）からなる（図 3.1-2）。

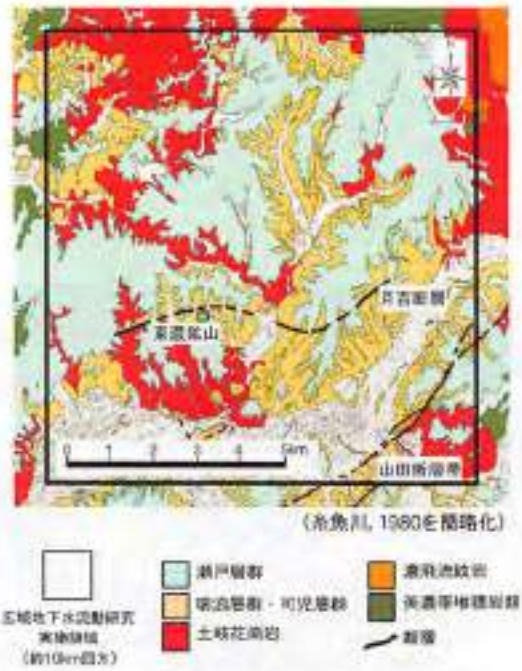


図 3.1-2　研究実施領域周辺の地質状況

本研究は，土岐花崗岩を主要な研究対象としているが，地下水の涵養や水質形成の観点から花崗岩上位の堆積岩類の存在を無視することができないため，瑞浪層群も調査研究の対象に含んでいる。これらの岩体・地層における研究項目として以下に示す地質環境特性が挙げられる。

a) 地質・地質構造
- 岩体／地層の規模（層厚）およびその物性
- 大規模な断層破砕帯の分布・性状

b) 地下水の流動特性
- 地下水涵養量
- 地下水の水理ポテンシャル分布
- 岩盤の透水性

c) 地下水の地球化学特性
- 地下水の pH／Eh，水質，同位体組成
- 地下水の起源／滞留時間
- 地下水中のコロイドの種類，量
- 地下水中の有機物／微生物の種類，量
- 雨水／河川水の水質，同位体組成
- 岩石の鉱物組成，化学組成

「第２次取りまとめ」以降は，上記の地質環境特性の把握に向け，対象とする地下水流動系の主要な流動方向に沿って配列した試錐孔（DH-9～13 号孔：図 3.1-3）による調査，大規模な地質構造の把握を目的とした物理探査などを展開した。さらに，地下水流動解析などの境界条件や初期条件となる地下水涵養量や間隙水圧などの長期観測を継続している。

これらの調査結果に基づき，研究実施領域内の地下水の流動や地球化学的状態のモデル化を実施している（サイクル機構，2001a，2001b）。

図 3.1-3　試錐孔位置図

③ 成果の反映先

広域地下水流動研究の成果は，ほかの地層科学研究や地層処分研究開発の成果と合わせて，処分事業や安全規制の基盤情報として反映される。とくに本研究では，対象となる地質環境を評価するための調査・評価技術を，より広い範囲から確認することに主眼を置いており，そのために必要な調査の質や量などを検討する際の技術基盤として活用される。

④ 今後の計画

広域地下水流動研究および後述する「超深地層研究所計画」（3.2 項参照）では，当面，対象とする空間スケールを，広域スケール（数十 km 四方），ローカルスケール（数 km 四方），ブロックスケール（数百 m 四方）に設定し，各々における技術的課題に取り組む。

これらの空間スケールのうち，広域地下水流動研究では，広域スケールとローカルスケールを取り扱うこととし，これらのスケールでの地質環境の調査・評価で必要とされる技術の整備を進める。具体的には，ローカルスケールのモデル化領域および境界条件の設定のための広域的な地下水流動解析やローカルスケールでのより詳細な地下水流動のモデル化とそれに必要な調査研究を展開する。

とくに，断層破砕帯の分布，およびその規模や特性に関する調査研究が地下水流動のモデル化にあたり重要であることから，これらの調査研究を重点的に実施するとともに，断層破砕帯の調査技術に関する要素技術の整備および体系化に向けた調査フローの構築を目指す。

また，評価技術に関しては，地下水流動モデルと地球化学モデルとの統合や地下水流動の長期挙動予測が地質環境のモデル化技術における主要な課題であることから，本地域を対象とした事例研究として取り組み，これらの解析に必要な要素技術の整備と一般化に向けた調査・解析フローの検討を実施していく。さらに，地下水の流動や地球化学的状態に対する人工的擾乱の影響に関する知見を蓄積するために，超深地層研究所計画における研究坑道掘削に伴う変化を捉え，その現象をモデル化するための調査研究を実施する。加えて、本調査研究の中心となる「エンジニアリング技術」についても，当該技術の整備を進めていく。

これらの研究成果は，平成 10 年代後半以降に予定されている処分事業での地質環境調査や関連する国の安全規制へ反映できるよう，取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（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.

動力炉・核燃料開発事業団（1998）：東濃地域を対象とした広域地下水流動解析，動燃事業団技術資料，PNC TN7410 98-004.

糸魚川淳二（1990）：瑞浪地域の地質，瑞浪市化石博物館研究報，No. 1，pp. 1-50.

核燃料サイクル開発機構（2001a）：広域地下水流動研究年度報告書（平成 11 年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-008.

核燃料サイクル開発機構（2001b）：広域地下水流動研究年度報告書（平成 12 年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-017.

3.1.2 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

地質・地質構造に関する調査研究では，地下水流動の場となる岩体・地層および広域的な地下水流動を規定する大規模な不連続構造（断層，割れ目帯など）の空間的分布と特性に関する情報の取得を中心に地表地質調査，地表割れ目調査，および試錐調査を実施した。また，関連する調査・評価技術の整備を進めてきた。

地表地質調査では，これまでに研究実施領域に分布する土岐花崗岩とこれを覆う堆積岩類（瑞浪層群，瀬戸層群）の分布，および花崗岩露頭での割れ目の形態や分布状態に関する情報が得られている。ただし，断層については，表土や堆積岩によって基盤の露出状態が良くないことから，地表地質調査ではほとんど把握されていない。一方，試錐調査では，土岐花崗岩の分布や物性値を把握し，一部で大規模な断層や割れ目帯の存在を確認している。しかし，少数の試錐孔による離散した情報からこれらの空間分布を推定することは困難であることから，リモートセンシングや空中・地上物理探査の実施により，断層などの大規模な不連続構造の分布を推定することが，本研究の当面の課題である。

このような状況を踏まえ，広域的な地質・地質構造，とくに断層などの大規模不連続構造の分布を把握する目的で，空中および地上物理探査を進めている。また，リニアメントの地質学的意味を検討するために，断層が確認されている試錐孔周辺におけるリニアメント判読，地表露頭および試錐孔での割れ目調査を実施した。一方，地下水流動系の涵養域から流出域までの地下水の流動特性および地球化学特性に関する情報の取得を主たる目的とした5孔の深層試錐調査を実施し，これらの特性とともに地質・地質構造に関する情報を取得した。

② 成果の概要

i) 岩相分布

研究実施領域の概略的な地質・地質構造を把握する目的で，ヘリコプターによる空中物理探査（磁気探査，電磁探査，自然放射能探査）を実施した。これらの調査項目のうち，自然放射線探査で得られたガンマ線強度分布図と地表地質調査による地質図とを比較した結果，1600cps 以上の地域は地表における花崗岩の分布域と一致していることが明らかになった（図 3.1-4）。このことから，空中自然放射能探査と地表地質調査を併用することにより，花崗岩の分布を広範囲に精度良く把握することが期待できる（サイクル機構，2001a）。

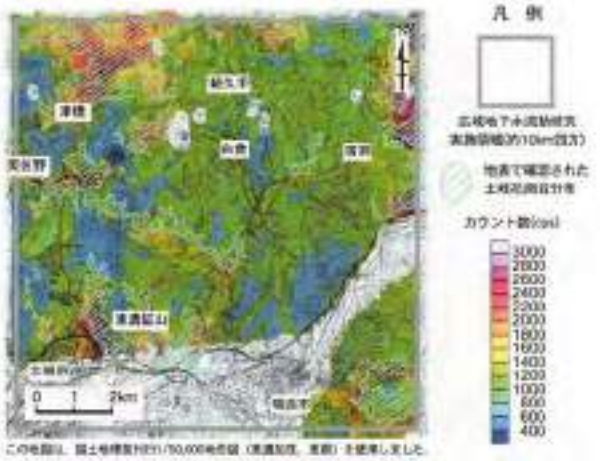


図 3.1-4　ガンマ線強度と地表での花崗岩の分布

また，地上電磁探査（MT 法・CSMT 法）により推定された比抵抗分布図（図 3.1-5）から，瑞浪堆積盆から西方の東濃鉱山，また，北方の白倉地区，細久手地区，さらに東方の宿洞地区へ低比抵抗域が伸びていることがわかる。また，研究実施領域の北西部に位置する津橋地区，美佐野地区にも低比抵抗域が分布する。これらの低比抵抗域は，試錐調査の結果から，花崗岩上面の古河川系を示すチャンネル構造に堆積した堆積岩類に対応するものと考えられる。

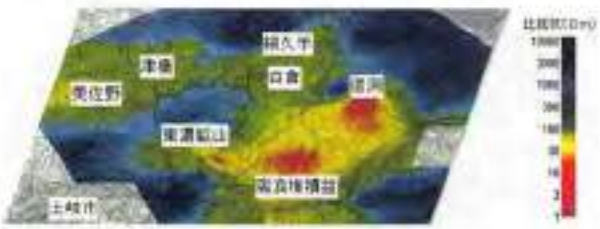


図 3.1-5　地上電磁探査による標高 200m での比抵抗分布平面図

本地域の堆積岩類と花崗岩の比抵抗値は大きく異なり，80～200Ω・m を境に区分できる。そのため，前述の地上電磁探査のデータに基づき，堆積岩類と花崗岩とを区分するしきい値を 100Ω・m に設定

し，基盤不整合面等高線図（図 3.1-6）を作成した。

本図で推定される不整合面の深度は，試錐調査の結果と整合していることから，地上電磁探査は，堆積岩類と花崗岩との不整合面の分布・形状を広範囲に把握するうえで有効な手法といえる（サイクル機構，2001a，2001b）。

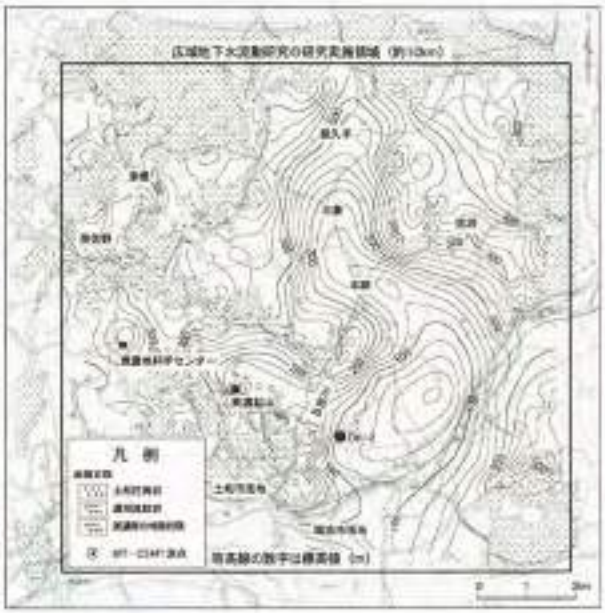


図 3.1-6　地上電磁探査結果から推定した基盤不整合面等高線図

ii）不連続構造

断層などの大規模な不連続構造を推定するための調査技術整備の一環として，リニアメントの地質学的意味を確認する目的で，断層が確認されている試錐孔の周辺を対象に，空中写真を用いたリニアメント判読，および地表露頭・試錐孔での割れ目調査を実施した。その結果，300m 以上のトレース長を有するリニアメントの主卓越方向（NS 系）は，リニアメント近傍の地表露頭での剪断割れ目の主卓越方向と調和的であり，また，そのようなリニアメントは，試錐孔で確認された断層の地表投影位置の近傍に位置していることが明らかになった（図 3.1-7 および 3.1-8）。

このことから，リニアメントのトレース長およびリニアメント周辺の露頭での剪断割れ目の分布状態が，地表から地下深部に連続する断層破砕帯の存在を推定するための指標となり得ることが示された（サイクル機構，2001a）。

300 m以上のリニアメントの卓越方向　　露頭観察における剪断割れ目の卓越方向

図 3.1-7　リニアメントと地表剪断割れ目の方向性

図 3.1-8　試錐孔中の断層の地上投影部近傍に判読されるリニアメント

前述の調査結果を受け，研究実施領域内における広域地下水流動を規定すると考えられる断層などの大規模な不連続構造の存在をリニアメント判読結果に基づき検討した。本検討では，井上ほか（1992）の報告に基づき，リニアメントのトレース長（3km 以上）およびリニアメント近傍での地表露頭調査や試錐調査などの結果から，五つの大規模な不連続構造を推定した（図 3.1-9；三枝ほか，2001）。

地下水流動解析による検討において，解析結果は，地下水の主流動方向に直交および平行する断層に大きく影響されることが示されたため，推定されたこれらの構造の分布や特性を把握することが当面の課題である。その最初の取組みとして，

平成13年度に図3.1-9に示す「NW系リニアメント(2)」を対象に高密度電気探査を実施した。現在，解析を進めているところである。

図3.1-9　推定された大規模不連続構造と高密度電気探査の測線位置

③ まとめ

地下水流動の場となる岩体・地層，および広域的な地下水流動を規定する大規模な不連続構造の空間的分布と特性を把握するために，地表地質調査，空中・地上物理探査，試錐調査を実施した。

その結果，研究実施領域内の岩相および基盤不整合面の分布や形状を把握するとともに，これらの調査に対する空中・地上物理探査の有効性を確認した。また，断層破砕帯の存在を推定するうえでリニアメントのトレース長および露頭での剪断割れ目の分布状態が有効な情報となり得ることを示した。さらに，この知見に基づき，研究実施領域内における大規模な断層破砕帯と考えられる構造を推定した。

今後は，推定された構造の性状の把握に重点を置き，地表地質調査，地上物理探査および試錐調査などを実施する予定である。また，これらの調査研究を通して，とくに断層破砕帯などの不連続構造を対象とした調査・評価技術の整備を進めていく。

参考文献

井上大栄，水落幸広，桜田裕之（1992）：リニアメントの断裂系としての特性とその評価，応用地質，33，pp. 147-156.

糸魚川淳二（1980）：糠喜地域の地質，瑞浪市化石博物館専報，No. 1，pp. 1-50.

核燃料サイクル開発機構（2001a）：広域地下水流動研究年度報告書（平成11年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-008.

核燃料サイクル開発機構（2001b）：広域地下水流動研究年度報告書（平成12年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-017.

三枝博光，前田勝彦，稲葉　薫（2001）：水理地質構造モデル化概念の違いによる深部地下水流動への影響評価（その6）－不連続構造の水理特性及び水理学的境界条件に着目した水理地質構造のモデル化及び地下水流動解析，地盤工学会「亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム」発表論文集，pp. 299-308.

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の目標である広範囲な領域を対象とした地質環境の調査・評価技術の整備の一環として，水収支観測を含む表層水理調査，試錐孔における透水試験，地下水位・間隙水圧の長期観測，および地下水流動解析を実施している。これらの調査研究で得られた成果のうち，おもに深度方向における地下水流動特性の変化などの知見は，「第２次取りまとめ」に反映されている。

本研究における「第２次取りまとめ」以降の主たる課題は，ある地下水流動系の涵養域から流出域までを包含する広範囲な領域（数 km 四方程度の領域＝ローカルスケール）での地下水流動特性を評価するためのモデル化領域や境界条件を，入力データなどに含まれる不確実性を考慮して適切に設定するための論理の構築である。

上記課題に対し，現場の調査においては，ローカルスケールの地下水流動解析に必要な表層水理，深層水理に関わるデータを取得し，取りまとめた。また，モデル化領域や境界条件の設定のために，より広範囲な領域を対象とした地下水流動解析を実施した。さらに，地下水流動解析の妥当性評価の一環として，地球化学的手法による地下水流動状態の解析を東濃鉱山周辺域において実施し，地下水流動解析結果と比較検討した。

② 成果の概要

i) 表層水理調査

表層水理調査では，水収支観測を実施している六つの流域（図 3.1-10）で水収支解析を実施し，各流域における年度ごとの岩盤浸透量を検討した。

図 3.1-10　水収支観測点位置図

水収支観測で得られた各流域の年度ごとの降水量と岩盤浸透量との相関図を図 3.1-11 に示す。

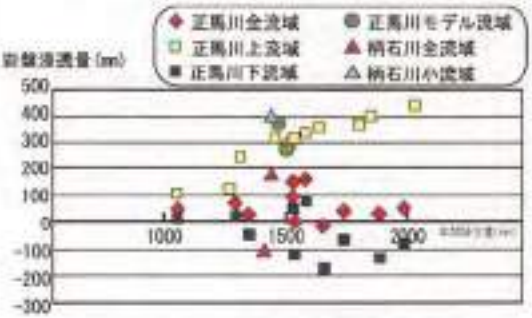


図 3.1-11　各年度の降水量と岩盤浸透量との相関

この図より，各流域での年度ごとの岩盤浸透量には，以下に示す特徴が認められる。

- 相対的に大きな流域である全流域（正馬川，柄石川）での年度ごとの降水量と岩盤浸透量との間に相関はほとんど認められない。
- 正馬川上流域，正馬川モデル流域，柄石川小流域では岩盤浸透量が大きく，とくに正馬川上流域では，年度ごとの降水量と岩盤浸透量の間に正の相関が認められる。
- 正馬川下流域では，岩盤浸透量が小さく，年度ごとの降水量と岩盤浸透量の間に弱い負の相関が認められる。

これらの結果から，正馬川の上流域・下流域などの狭い領域を観測対象とした場合は，局所的な地形に支配された浅部の地下水流動系における観測流域の位置を反映した値が得られると推測される。また，正馬川全体を対象としたような広い観測流域の場合は，より深部の地下水流動系における観測流域の位置を反映した岩盤浸透量が得られると考えられる。

したがって，広域地下水流動系のモデル化にあたっては，より広範囲な観測流域を対象とした水収支観測も必要と考えられる。

ii) 深層水理調査

深層水理調査では，地下水の間隙水圧分布と岩盤（おもに土岐花崗岩）の透水性を把握するために，本研究で掘削された試錐孔（13 孔）で透水試験を実施した。

その結果，研究実施領域における地下水は，図 3.1-12 に示すように，地下水流動解析で推定された涵養域と流出域で掘削された試錐孔でのデータを除くと概ね静水圧分布を示すことが明らかにな

った。また，岩盤の透水性については，これまでに 133 点の透水係数が計測された。用いた試験方法は，パルス試験，スラグ試験，ならびに揚水試験である。この試験結果を花崗岩上面からの深度別にプロットすると，上面から約 400m 付近までは高透水性，それより深部が低透水性を示す傾向がみられる（図 3.1-13）。花崗岩上面から 400m の深度で区切った場合の花崗岩の上部・下部の透水係数分布を図 3.1-14 に示す。

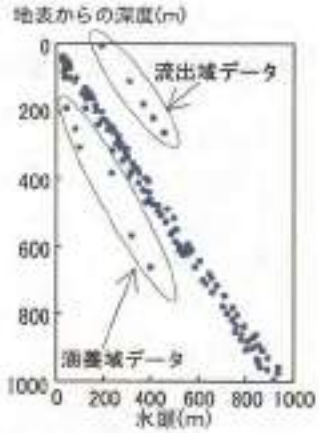
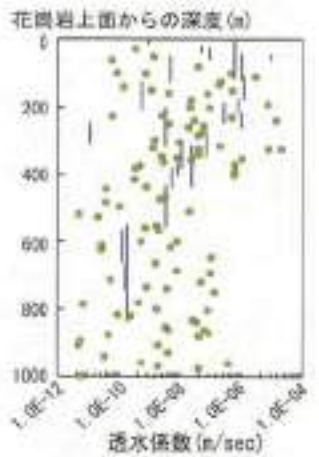


図 3.1-12　研究実施領域における水頭分布



（青線は揚水試験の区間長）

図 3.1-13　土岐花崗岩の透水係数と深度との関係

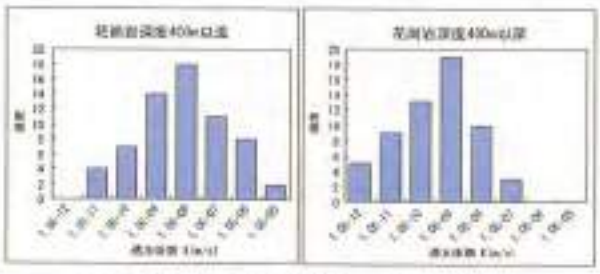


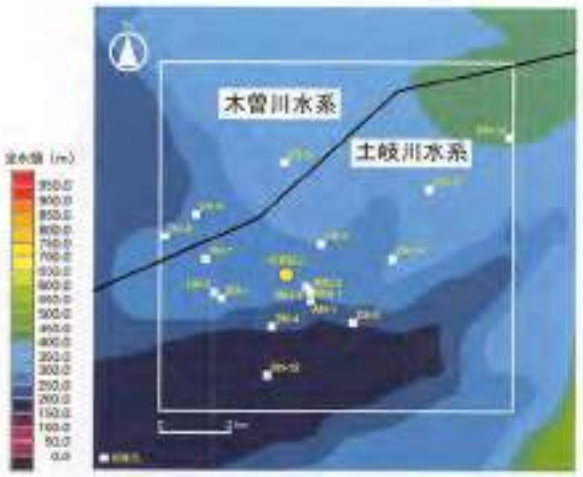
図 3.1-14　土岐花崗岩の透水係数分布

花崗岩上部と下部での透水係数の最頻値は，各々10^{-8}（m/sec）オーダー，10^{-9}（m/sec）オーダーであり，両者の透水性に 1 オーダーの違いが認められる。この透水係数の違いは，花崗岩浅部に発達する低角割れ目に起因すると考えられる。

iii）地下水流動解析

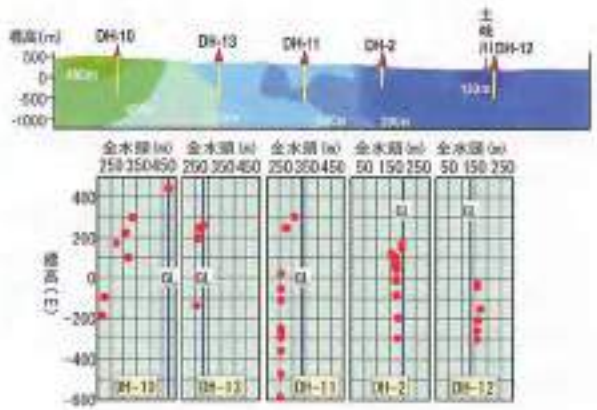
広域スケールを対象とした地下水流動解析については，これまでに研究実施領域において，水理学的な境界条件や地質区分の違いが地下水流動解析結果に与える影響を検討した（須山・三枝，2000）。ここでの課題として，後背地の地形が地下水流動に及ぼす影響を考慮したモデル化，解析領域の設定方法の検討が挙げられた。この結果を受け，約 10km 四方の研究実施領域の後背地を含む数十 km 四方程度の領域における地形の特徴を考慮した地下水流動解析の検討に着手した。

最初の試みとして，文献情報のみに基づく地下水流動解析の結果から，ローカルスケールの地下水流動に提供される情報を把握する目的で，約 25km 四方の領域を設定し解析を実施した。図 3.1-15 および 3.1-16 に地下水流動解析の結果（地下水の全水頭分布）を示す。この結果から，約 10km 四方の研究実施領域内の深部における地下水流動は，地形面から推測される土岐川水系と木曽川水系の境界付近を涵養域とし，流出域を研究実施領域南部の土岐川付近とすること，また，研究実施領域内を南西方向へ流動していることが推定された（サイクル機構，2001）。



（標高 −1,000m における水平断面図）

図 3.1-15　地下水流動解析結果（全水頭分布）



解析結果（上）／実測値（下）

図 3.1-16　地下水の全水頭分布

これらの解析結果は，試錐孔で実測された水頭分布および地下水の水質分布と整合していることから，少なくとも地下水流動系の涵養域や流出域の位置，および主流動方向については，文献情報のみの解析でも十分利用できるといえる。

次に，地下水流動のモデル化技術での課題である解析結果の妥当性評価の一環として，地球化学的手法による地下水流動状態の解析を東濃鉱山周辺域で試みた。具体的には，東濃鉱山周辺域での地下水の水素・酸素安定同位体比，トリチウム濃度，放射性炭素濃度によって，地下水の滞留時間を算出し，その分布を把握した。その結果，地下水の滞留時間は，数千年～1 万数千年前と算出され，深度とともに古くなることが示された。また，各深度の地下水の滞留時間から，堆積岩中の地下水の流動速度は，10^{0}～10^{2} mm／年オーダーと推定された。この流動速度は，地下水流動解析で求められた流動速度と良く一致している。このことから，地球化学的手法による地下水流動状態の解析は，地下水流動解析結果の検証方法として有効である事が示された（Iwatsuki et al., 2001）。

③ まとめ

今後は，土岐花崗岩や断層破砕帯の透水（量）係数分布などの調査データを入力データとして，ローカルスケールの地下水流動解析を実施する。

また，本スケールでの詳細なモデル化およびそれに必要な調査データ，とくに断層破砕帯の規模や特性に関する情報を取得する過程で，地下水流動のモデル化に必要な調査・評価技術の適用性を確認するとともに，一般化に向けた調査・評価フローを検討する予定である。

参考文献

Iwatsuki, T., Xu, S., Mizutani, Y., Hama, K., Saegusa, H. and Nakano, K. (2001): Carbon-14 study of groundwater in the sedimentary rocks at the Tono study site, central Japan, Appl. Geochem., 16, pp.849-859.

核燃料サイクル開発機構（2001）：広域地下水流動研究年度報告書（平成 12 年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-017.

須山泰宏，三枝博光（2000）：広域地下水流動研究における地質構造モデルの構築と地下水流動解析，サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2001-012.

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いて対象としている土岐花崗岩中の地下水の地球化学特性については，「第２次取りまとめ」までに以下の知見が得られている。

- 水素・酸素同位体比から，地下水の起源は天水である。
- ^{14}C 法により，深度 1,000m 付近の地下水の滞留時間が 1 万年のオーダーと推定される（徐ほか，1999）。
- 深度 300m 以浅の地下水は，$Na-Ca-HCO_3$ 型で，中性（pH＝7）かつ酸化性の地下水であるのに対して，深度 300m 以深の地下水は $Na-HCO_3$ 型で弱アルカリ性（pH＝9）かつ還元性の地下水である。
- 地下水の水質形成に寄与する主要な水－岩石反応としては，方解石の溶解反応，地下水－粘土鉱物間のイオン交換反応，長石類の溶解反応が考えられる（Iwatsuki and Yoshida, 1999）。
- 地下水の酸化還元状態を支配する主要な反応は，鉄，硫黄を含む鉱物（黄鉄鉱や黒雲母など）の溶解反応である可能性が高い。
- 鉄関連細菌など酸化還元関連微生物が，酸化還元状態と関連している可能性がある。

以上の知見から，土岐花崗岩中の地下水の地球化学特性について，図 3.1-17 に示す水質形成モデルが構築されている。

「第２次取りまとめ」以降は，広域地下水流動研究の目的である，地下水流動系の涵養域から流出域までを包含する領域における地下水流動や，それに伴う水質の変化などを効率的に把握するための技術の整備を継続して実施している。

ここでは，地下水の地球化学に関する調査研究について，ⅰ）地下水の地球化学特性への微生物の影響，およびⅱ）地下水流出域における塩水系地下水の存在について，現在までに得られている知見を報告する。

② 成果の概要

ⅰ）地下水の地球化学特性への微生物の影響

地下水中の微生物については，その存在はもちろん，その役割を調査することが，地下水の地球化学特性を把握する上で重要である。本調査では，まず存在が確認されている鉄関連細菌について以下の調査を行った。

研究実施領域内の試錐孔（DH-3 号孔：図 3.1-18）から採取した地下水について，地下水中に存在する鉄関連細菌数および地下水培養液中の鉄酸化コロイド（1μm 以上）の数を計数した。その結果，深度 130m および 330m の地下水培養液中において鉄酸化コロイドが最も多く観察され，この分布は地下水中の鉄関連細菌の分布と一致していた。このことは，鉄関連細菌が地下においても鉄(Ⅱ)→鉄(Ⅲ)酸化反応の触媒となり，鉄コロイド形成などにより地下水の地球化学特性へ影響を与える可能性があることを示している（岩月ほか，2001）。

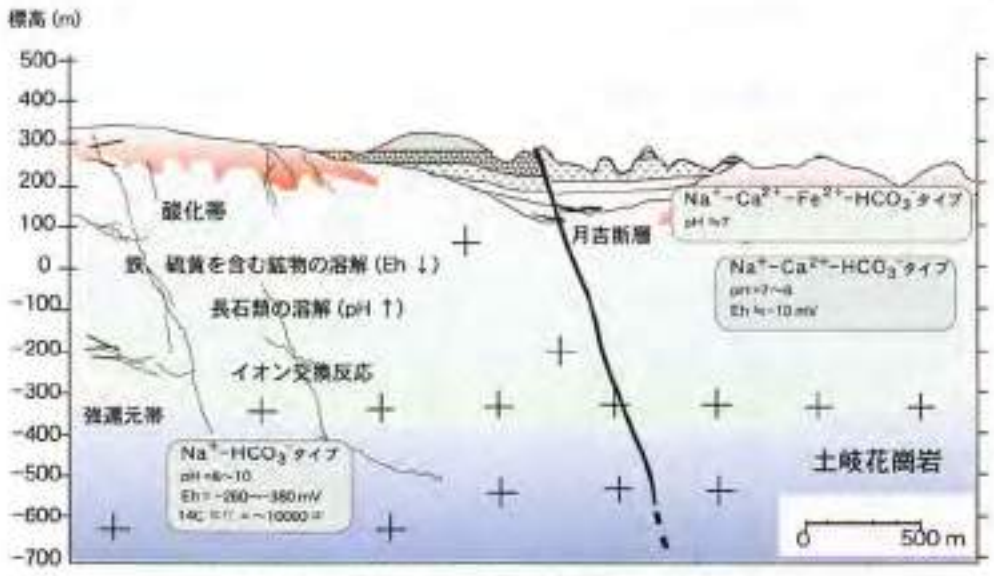


図 3.1-17　土岐花崗岩中の地下水水質形成モデル

図 3.1-18　広域地下水流動研究における試錐孔位置

ii）地下水流出域における塩水系地下水の存在

地下水の流出域においては，涵養域と比較して相対的に滞留時間が長く，溶存成分に富む地下水が存在すると考えられる。これまでは，おもに研究実施領域内の涵養域周辺に試錐孔を配置していたが，流出域において掘削された試錐孔（DH-12 号孔：図 3.1-18）で，これまでに認められていなかった Na および Cl 濃度の比較的高い地下水が試錐孔全体にわたって確認された。なお，DH-12 号孔においては，堆積岩（瑞浪層群）の厚さが 170m 程度と涵養域と比較して厚いものの，堆積岩と花崗岩の化学組成は，他の試錐調査で得られたデータと違いはなかった。

③ まとめ

「第２次取りまとめ」以降に実施した調査研究から，土岐花崗岩中に Na および Cl 濃度の比較的高い地下水の存在が確認された。この事実は，これまでの研究における作業仮説とは相反するものであり，地下水の水質形成機構の考察および地下水流動解析において非常に重要な結果である。そのため，今後の研究項目として，この地下水の起源や分布範囲を調査することが必要不可欠であると考えられるため，今後の深層試錐調査などを通じて調査を継続する予定である。

また，地下水中の微生物については，地下水の地球化学特性へ与える影響についてさらに詳細な調査研究を行う予定である。

参考文献

岩月輝希，村上由紀，長沼　毅（2001）：深部地下環境における微生物によるコロイド生成，地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会要旨集 CD-ROM，A6-P003.

Iwatsuki,T. and Yoshida,H. (1999) : Water chemistry and mineralogy of fracture systems in the basement granite in the Tono uranium mine area, Gifu Prefecture, central Japan, Geochem. Jour., 33, pp. 19-32.

徐　勝，岩月輝希，伊藤　茂，阿部雅人，渡辺雅人（1999）：花崗岩中の地下水の年代推定，1999 年度日本地球化学会講演要旨集，p.78.

3.2 超深地層研究所計画

3.2.1 計画の概要

① 背景と目標

「第２次取りまとめ」以降の地層科学研究に関連する課題として，「地表からの地下深部までの調査の体系化」，「深部地質環境データの蓄積」や「実際の地質環境条件を適切に考慮した評価」，「地質環境の長期にわたる変化を考慮した評価」などが挙げられている。このうち超深地層研究所計画では，とくに「地表から地下深部までの調査の体系化」に焦点を当て，結晶質岩をおもな対象に，「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，約 20 年間からなる調査・研究を進めている（サイクル機構，2002）。

本計画は，大きく三つの段階に分けて進める。

・第１段階：地表からの調査予測研究段階

地表からの調査により地下の地質環境を推定し，第２段階で掘削する研究坑道が遭遇する地質環境を推定する。また，本段階で得られた地質環境の情報に基づき，第２段階の研究計画および研究坑道の詳細設計・施工計画を策定する。

・第２段階：研究坑道の掘削を伴う研究段階

研究坑道などを掘削しながら遭遇する地質環境や研究坑道の掘削による地質環境の変化に関する情報を取得し，第１段階で行った地質環境の推定結果の妥当性や，推定のために用いた地表からの調査・解析技術の適用性を評価する。さらに，第３段階の研究計画を策定するとともに，研究坑道の設計・施工などに関する工学技術の有効性を確認する。

・第３段階：研究坑道を利用した研究段階

掘削した研究坑道を利用して，地質環境に関する情報を取得し，第２段階の推定結果の妥当性を確認する。また，研究坑道の施工・維持・管理などに関する様々な工学技術の有効性を確認する。

② 実施項目と進め方

本計画では，深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備を一つの目標としている。この目標を達成するためには，研究成果の反映先を明確にし，どのようなデータをどのような手法で取得し，分野間の横断的な解釈やモデル化をどのように考えて進めれば，地質環境をどこまで理解でき，最終的なアウトプットに到達できるのかを事例的に示すことが重要である（大澤ほか，2001）。図 3.2-1 に，海外の調査・解析・評価の統合化の事例（Nagra，1999）を参考に構築した，本計画第１段階の統合化データフローの例（地質・地質構造）を示す。地質・地質構造の統合化データフローのほかに，地下水の水理，地下水の化学，岩盤力学の統合化データフローも構築している。この

図 3.2-1　統合化データフローの例（地質・地質構造）

中で，地下水の移行経路長や地下水流量のような，地層処分システムの安全性を評価するうえで重要と考えられるパラメータを設定している。

また，地表からの調査は，前述の統合化データフローに沿ってデータ取得，解析・解釈，モデルの構築を行うことになるが，段階的に行われる調査により情報が増加する過程のなかで，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3.2-2）を繰り返し行うことにより，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させる。

図3.2-2　調査・研究の繰り返しアプローチ

本計画は，平成8年度より岐阜県瑞浪市明世町の正馬様にあるサイクル機構用地（約14ha，以下，正馬様用地）において，地表からの調査を実施してきた。この地域には，白亜紀の花崗岩（土岐花崗岩）が広く分布しており，これを基盤として，その上位を新第三紀中新世の堆積岩類（瑞浪層群）が不整合で覆い，さらにその上位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3.2-3）。また，東西方向に伸びる月吉断層が存在する。

正馬様用地でこれまでに実施したおもな調査内容を図3.2-4に示す。平成8～11年度には，地上物理探査，表層水理調査，および深度1,000mの試錐孔調査（MIU-1～3号孔）を実施した（中野・大澤，2001）。これらの試錐孔調査では，岩芯観察，物理検層，水理試験，力学試験および岩芯を用いた室内試験などを行った。また，これらの情報と既存の情報を用いて段階的に地質構造，水理地質構造，岩盤力学の各モデルの構築と地下水流動解析を行うとともに，調査・解析手法の適用性を確認してきた（サイクル機構，2001）。

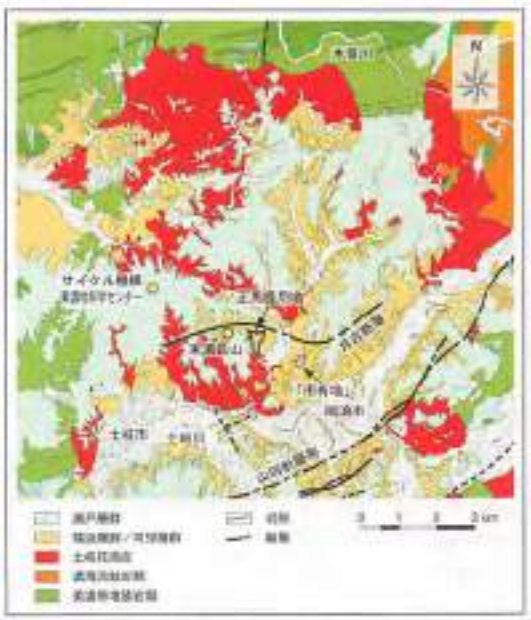


図3.2-3　地質概要

	これまでの調査項目	目的
表層水理調査	河川流量観測，気象観測，表層地下水位観測，土壌水分観測，など	表層の未固結堆積層から岩盤への地下水の涵養量を設定する。
地下水位観測	自記地下水位観測	領域の定常的な地下水位およびボーリング孔掘削による地下水位の変化の実測値を取得する。
	MPによる観測 （AN-1,2,MIU-1,3号孔）	ふみ石での定常的な間隙水圧とボーリング孔掘削による間隙水圧の変化の実測値を取得する。
物理探査	電気探査（1測線×約300m） 電磁探査（MT法） 反射法（1測線×約600m） VSP（受振7点，－GL－112m）	不整合，堆積構造，断層等，地質構造などの分布・連続性を推定する。
ボーリング調査 ○高角ボーリング孔 ・AN-1号孔（試錐孔） 約1,000m ・AN-3号孔（試錐孔） 約400m ○傾斜ボーリング孔 ・MIU-1,2,3号孔（試錐孔） 各約1,000m ・MIU-4号孔（傾斜孔） 約700m	【地質調査】 ・表面記載，物理検層，BTV観察など 【水理試験】 ・透水試験 ・揚水試験 【分析】 ・岩石分析 【力学試験など】 ・物性試験 ・初期応力試験	領域の地質とその分布を確認する。また，ふみもとおよびその地質構造要素（割れ目，断層，岩脈）を抽出し，その特徴を把握する。 領域での透水係数の深度変化，およびふみもの透水係数の実測値を取得する。 領域に分布する岩盤の地球化学的な特性とその深度方向の変化を把握する。 領域に分布する岩盤の力学特性とその深度方向の変化を把握する。

図3.2-4　正馬様用地におけるこれまでの調査・研究の概要

また，国内外の先行事例や「原子力長期計画」が示した深地層の研究施設に求める意義などを考慮し，第2段階および第3段階の調査・研究項目を抽出するとともに，研究坑道の展開手順や研究坑道掘削の仕様の決定方法などを検討した。

さらに，平成12年度からは，正馬様用地北東部の地質環境の情報を取得すること，地下水の地球化学特性に関する情報を取得することなどを目的として4本目（MIU-4号孔）の試錐孔調査（斜孔：JNC，1999）を実施するとともに，MIU-2号孔を揚水孔とする長期揚水試験などを行ってきている。

③ 成果の反映先

本計画第1段階の成果（地表からの調査・解析・評価技術など）は，ほかの地層科学研究や地層処分研究開発の成果と合わせて，処分事業や安全規制の基盤情報として反映される。とくに，地表から行われる概要調査や精密調査に必要な技術基盤を与えるものである。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寄与する。

④ 今後の計画

本計画は，これまでに正馬様用地において進めてきたが，超深地層研究所の研究坑道および関連施設を設置する場所として，瑞浪市と，瑞浪市明世町戸狩区および山野内区の「市有地」の賃貸借契約を締結した（平成14年1月17日）。これにあたり，当面，「市有地」およびその周辺において，「広域地下水流動研究」（3.1項参照）と合わせて設定した空間スケールのうち，おもにブロックスケール（数百m四方）を対象とした調査・研究を展開する。図3.2-5にブロックスケールを対象とした今後の地表からの調査・研究の進め方を示す。

なお，正馬様用地においては，これまで蓄積された月吉断層を含む地質環境の情報や試錐孔などの研究資源を活かし，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。

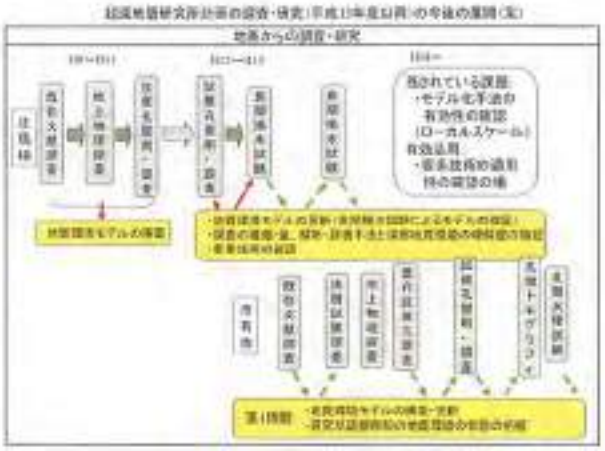


図3.2-5　今後の地表からの調査・研究の展開

参考文献

Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) (1999) : Working programme for MIU-4 borehole investigations, JNC Tech. Rep., JNC TN7410 99-007.

核燃料サイクル開発機構（2001）：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（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.

中野勝志，大澤英昭（2001）：超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階の現状，サイクル機構技報，No.12（2001.9），pp.91-106.

National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra) (1999) : Synthesis of geological investigations at Wellenberg, Nagra Bulletin No.32.

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.

3.2.2 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

地質・地質構造に関する調査研究で得られた知見は，地下水流動，地下水の地球化学および岩盤力学の各分野におけるモデル化の基礎となる。このことから，本調査・研究では，研究領域である正馬様用地の地質・地質構造を把握するとともに，地下水流動や地下水の水質形成などを規制すると考えられる地質構造要素を同定し，地質構造モデルを構築することを目標としている。

これまで正馬様用地で行ってきた調査やモデル化は，後述する岩盤の水理に関する研究において，現段階では連続体モデルにより場がモデル化されるため，基本的に以下のような考え方で行った。

- 地質環境がほぼ等しい堆積岩の層序は，その物性値もほぼ等しく均質との仮説に基づき，研究領域にわたり連続する堆積構造，不整合などの地質構造要素を区分する。
- 断層などの不連続面の位置，連続性，幅などを確認する。
- 花崗岩は，例えば割れ目の密度・方向・形態や充填物などの地質学的特徴を統計学的に解析し，有意な差が認められる岩盤を異なった割れ目系を有する地質構造要素として区分する。

上記のような考えで，これまでに正馬様用地において反射法弾性波探査，4 本の試錐孔調査（MIU-1～4 号孔）を実施した。また，地質・地質構造のモデル化は，地質環境特性にかかわる情報の蓄積に伴って，段階的に地質構造モデルを構築した（中野・大澤，2001）。ひとつは，本計画開始までに正馬様用地で行われていた試錐孔調査結果などの既存情報のみで作成したモデル，もうひとつは，本計画として正馬様用地で行った調査結果を加えて作成したモデルである。さらに，正馬様用地周辺で行われた試錐孔調査や地上物理探査（広域地下水流動研究で実施），リニアメント判読結果などを基に，正馬様用地周辺の推定断層を加味した地質構造モデルを構築した（三枝ほか，2001）。

以下に，上記の段階的な地質構造モデルの構築により，正馬様用地およびその周辺で行われた調査結果に基づき蓄積されてきた地質・地質構造の概念と，それに基づき構築された地質構造モデルについて述べる。

② 成果の概要

正馬様用地の堆積構造，不連続面の形状および不連続面に関する情報の取得を目的に，図 3.2-6 に示す南北と東西の 2 測線で反射法弾性波探査を行った。試錐孔調査結果を参考に南北測線における反射断面記録を解釈した結果，堆積構造，不連続面にかかわる情報のほか，花崗岩上部の水平割れ目が卓越していると考えられる不連続面を推定できた（図 3.2-7）。

図 3.2-6　反射法弾性波探査の測線配置

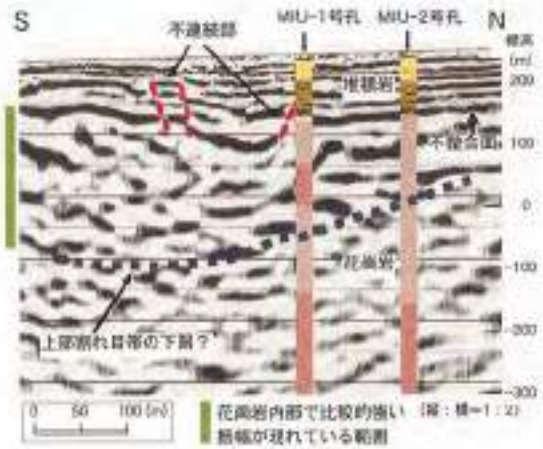


図 3.2-7　反射法弾性波探査の調査結果と不連続面推定結果

また，正馬様用地で掘削された 3 本の深度約 1,000m の鉛直試錐孔において，岩芯観察，物理検層，ボアホールテレビ（BTV）観察を行った。加えて，採取した岩芯を用いた岩石鉱物試験を行った。

岩芯観察の結果，各試錐孔とも，地表から地表下 90m 付近まで堆積岩が分布することや黒雲母花崗岩の最上部には厚さ 10～15m 程度の風化部が存在することが明らかとなった。また，MIU-2 号孔お

上び 3 号孔においては，それぞれ深度約 900m と 700m で月吉断層を捕らえている。いずれも，約 10～20m 幅のカタクレーサイト帯からなり，その周囲には幅 100m 程度の割れ目帯が分布する。BTV 調査の結果を基にした割れ目累積本数の深度分布より，風化部より下位の黒雲母花崗岩を低角度の割れ目が発達した上部割れ目帯（3～5 本／m），割れ目の少ない健岩部（1～3 本／m），および断層に伴う割れ目帯（3～6 本／m）の大きく三つの異なる割れ目系を有する地質構造要素に区分することができた（図 3.2-8）。これらの結果を踏まえ構築した，地質構造の概念を図 3.2-9 に示す。

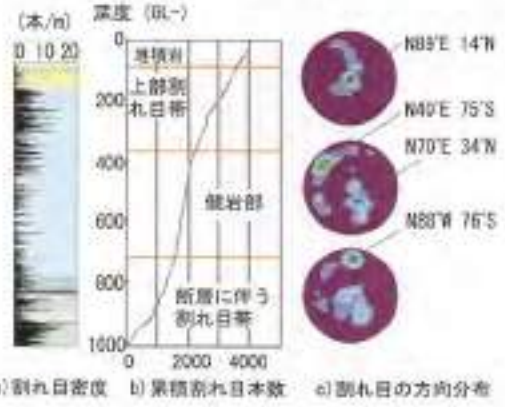


図 3.2-8 割れ目の密度，累積本数および方向分布

図 3.2-9 地質構造の概念図

さらに，正馬様用地周辺で行われた試錐孔調査，リニアメント判読，および地表調査の結果から，正馬様用地を対象とした地下水流動解析の解析領域（約 4×6km）およびその周辺において，以下のとおり，地下水の移行経路となる可能性のある断層およびリニアメントの分類を行った。

・分類 1：地表露頭でその存在が明瞭に観察される断層
・分類 2：地表露頭では認められないが，試錐孔で抽捉される断層
・分類 3：地質図に記載される断層のうち，地形に現れているもの
・分類 4：地質図に記載される断層であるが，地形には顕著に現れないもの
・分類 5：LANDSAT，SPOT，空中写真で判読され，かつ地形に明瞭に現れるリニアメント
・分類 6：LANDSAT，SPOT，空中写真で判読されるが，地形には明瞭に現れないリニアメント
・分類 7：LANDSAT，SPOT，空中写真のうち，2 種類の画像もしくは写真で判読されるリニアメント
・分類 8：LADSAT，SPOT，空中写真のうち，どれか 1 種類の画像もしくは写真で判読されるリニアメント

上記の分類のうち，「分類 1～7」の断層およびリニアメントで，トレース長が 3km 以上のものを地質構造モデルで考慮する断層として抽出した。また，複数のリニアメントが直線的に配列し，一つの連続するリニアメントとみなせる場合，リニアメントのトレース長は，連続するリニアメントのトレース長を用いた。また，トレース長の判断基準となる 3km は，「SPOT 画像で判読されるリニアメントのトレーサ長が 3km 以上の場合，そのリニアメントが断層である確率は 100%である」（井上ほか，1992）に基づいた。これらの判定の結果から，地質構造モデルに考慮する不連続構造として，図 3.2-10 に示す五つの断層を推定した。

図 3.2-10 リニアメント分布および抽出した不連続構造

これまで示した正馬様用地およびその周辺における調査結果に基づき構築された地質構造の概念に基づき構築した地質構造モデルを図 3.2-11 に，そのうち，断層だけを取り出して示したモデルを図 3.2-12 に示す。

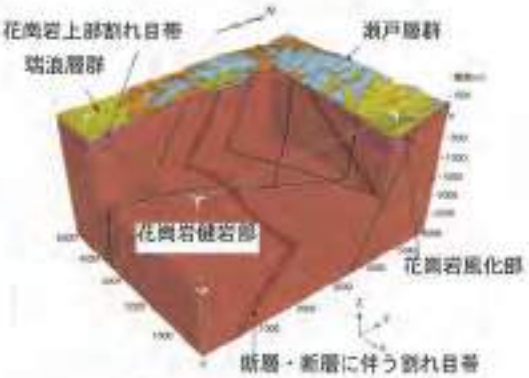


図 3.2-11　地質構造モデル

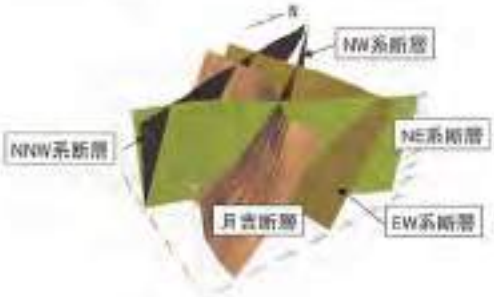


図 3.2-12　断層モデル

これらのモデル化においては，地形面や各地質構造要素の境界面や断層面の形状は，地質図や試錐孔で確認された各地質構造要素の境界位置を用いて，ミニマム・テンション理論（Briggs, 1974）を用いて推定した。とくに，上部割れ目帯の層厚については，花崗岩を被覆する堆積岩の層厚と良好な相関関係が認められたことから，その相関式を用いて上部割れ目帯の空間分布を推定した。

前述の調査およびモデル化では，①モデル化に用いられた試錐調査は鉛直孔であり，高角度傾斜の割れ目に関する情報が不十分である，②割れ目分布に着目したより詳細なモデル化を進めるうえで，水みちの分布に関する情報が不足している，などの課題があった。そのため，平成 12 年度から約 2 年間をかけ，斜孔による試錐調査(MIU-4 号孔)を行った。現在，MIU-4 号孔調査の結果を解析中であるが，現段階までに，高角度割れ目（帯）の分布密度がこれまでの鉛直孔の試錐調査結果から推定されたものと比較してはるかに大きいこと，また高透水性に関連した小規模な地質構造として十数ヶ所の断層岩が関連していることなど知見が得られている。さらに，水みちという観点での割れ目の分類が試みられている（天野ほか，2001）。今後，鉛直孔および斜孔における割れ目の遭遇率などを踏まえ，これまでに構築してきた地質構造の概念や地質構造モデルを評価していく。

③ まとめ

これまでの調査・研究により，段階的にモデル化を行うことにより，花崗岩における地質構造の概念を蓄積することができた。また，水みちを検出する方法に関する知見を蓄積することができた。今後，研究坑道および関連施設を設置する場所が「市有地」に移るにあたり，「市有地」においては，正馬様用地において蓄積されてきた地質構造の概念に関する知見や水みちの検出方法などの調査技術を反映しつつ，「市有地」における調査・研究計画を策定するとともに，地上物理探査や試錐孔調査などを行い，地質構造モデルを構築していく。さらに，これらの知見を踏まえ，地表からの調査・解析・評価技術の適用事例を示していく。また，正馬様用地においては，斜孔である MIU-4 号孔で取得された情報などの結果に基づき地質構造モデルを評価するとともに，これらのモデル化に用いた調査・解析手法を評価していく計画である。

参考文献

天野健治，前田勝彦，熊崎直樹，水野　崇，三枝博光，竹内真司，清　克宏，中野勝志，グレン・マックランク，リチャード・メトカーフ（2001）：透水性割れ目を同定・分類する地質学的調査手法の開発，日本地質学会第 108 年学術大会講演要旨，p. 172.

Briggs, I. C. (1974) : Machine contouring using minimum curvature, Geophys., 39, pp. 39-48.

井上大栄，水落幸広，桜田裕之（1992）：リニアメントの断裂系としての特性とその評価，応用地質，33，pp. 147-156.

糸魚川淳二（1980）：瑞浪地域の地質，瑞浪市化石博物館専報，No. 1，pp. 1-50.

中野勝志，大澤英昭（2001）：超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階の現状，サイクル機構技報，No. 12（2001. 9），pp. 91-106.

三枝博光，前田勝彦，稲葉　薫（2001）：水理地質構造モデル化概念の違いによる深部地下水流動への影響評価（その 6）－不連続構造の水理特性及び水理学的境界条件に着目した水理地質構造のモデル化及び地下水流動解析，地盤工学会「亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム」発表論文集，pp. 299-308.

2) 岩盤の水理に関する調査研究

① 課題と計画の概要

正馬様用地における岩盤の水理に関する調査研究は，研究領域における地表から地下深部までの地下水および物質の移行経路と成りうる地質構造要素，ならびに岩盤の水理学的な不均質性に関する情報を取得し，水理地質構造モデルを構築するとともに，研究坑道掘削前の地下水流動場を推定することを目標としている。

本調査研究を進めるにあたっては，取得すべき情報の理解度，データやモデルの不確実性，その不確実性を低減するための取得情報の優先順位を研究の進捗に合わせて明確にしていくことが重要となる。そのため，調査・試験により新たな情報の取得とともに，モデル化および地下水流動解析を繰り返し行うことにより，個々の要素および全体の不確実性を評価することを行っている。

これまでに，第 1 回目の解析として，広域地下水流動研究などで取得された既存情報のみを用いて水理地質構造モデルを構築し，地下水流動解析を行った。次に，このモデル化・解析と並行して正馬様用地で進められてきた 3 本の試錐調査結果を追加して第 2 回目の水理地質構造モデルと地下水流動解析を実施した（中野・大澤，2001）。

さらに，地下水流動解析結果の不確実性を評価するとともに，この不確実性に影響を及ぼしている要因を抽出することや，これをとおして不確実性の低減に向けた合理的な調査・解析の体系化の事例を示すことを目的とし，複数の解析者が取得されたデータと矛盾しない範囲で複数のモデル化を行い，地下水流動解析結果に影響を与える因子を検討している。

ここでは，繰り返しアプローチによりこれまで把握されてきた岩盤の水理特性と水理地質構造モデルについて述べるとともに，水理地質構造の概念のモデル化の違いが地下水流動解析結果に与える影響についての検討結果を述べる。

② 成果の概要

正馬様用地で行ってきた 3 本の試錐調査（MIU-1～3 号孔）において水理試験を行い，統計解析を行った（図 3.2-13）。その結果，割れ目頻度分布から推定された各地質構造要素（上部割れ目帯，健岩部，月吉断層に伴う割れ目帯）ごとに比較すると，健岩部の透水係数は，上部割れ目帯と断層に伴う割れ目帯と比較して 1 オーダー程度低い透水性を有していることがわかった（サイクル機構，2001a）。

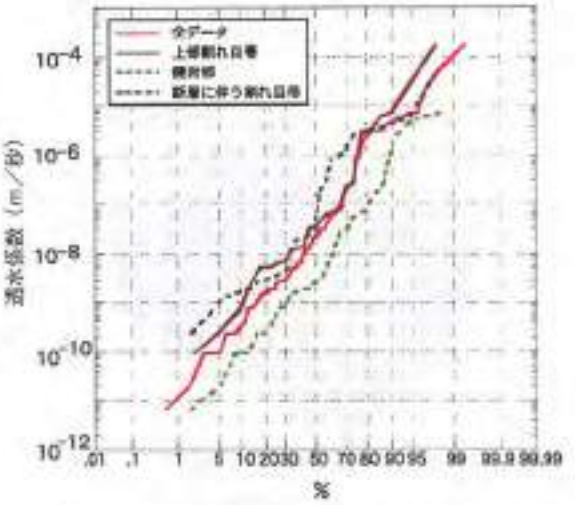


図 3.2-13 地質構造要素ごとの透水係数分布

また，透水係数の深度分布と水圧分布を検討した結果，以下の点が明らかとなっている（図 3.2-14）。

・上部割れ目帯と月吉断層に伴う割れ目帯で高い透水性を示し，健岩部で低い透水性を示す。
・月吉断層の下盤側は上盤側に比べ約 30m 水位が高いことから，同断層は遮水壁として機能している可能性が高い。

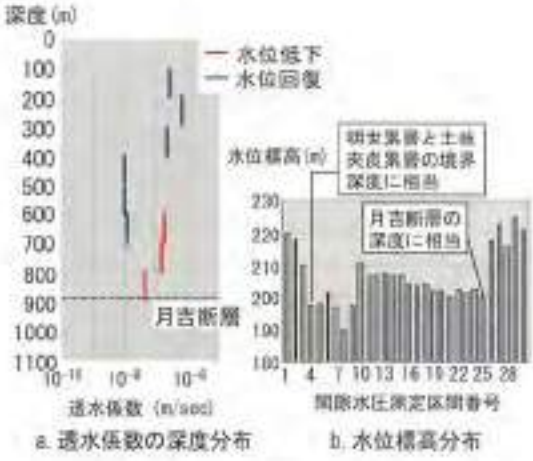


図 3.2-14 透水係数と水圧の深度分布（MIU-2 号孔）

また，正馬様用地中央部から北東方向に鉛直から 30 度傾けて掘削した 4 本目の試錐孔（MIU-4 号孔）における水理試験の結果，3 本目までの鉛直孔での試験結果に比較して高い透水性を有する傾向

があることが明らかとなった。同時に実施した流体検層（フローメータ検層・温度検層）において，流速の変化や温度の変化として識別される多くの透水性割れ目が検出された（図3.2-15）。その理由として，鉛直孔においては遭遇率の低い鉛直割れ目が多く存在し，これが透水性割れ目として機能しているためと推察される。

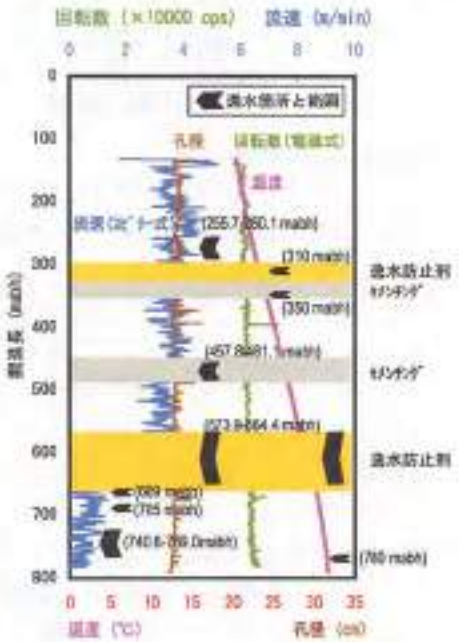


図3.2-15　MIU-4号孔における流体検層結果

なお，水理試験を行うにあたっては，現場におけるデータ品質の担保が重要である。このため，MIU-4号孔の水理試験に関して，図3.2-16に示す試験手順を適用し，透水性の評価を行った（小出ほか，2001）。

図3.2-16　水理試験の手順

これまで行ってきた調査結果のうち，現段階では，正馬様用地で行った3本の試錐調査（MIU-1～3号孔），正馬様用地周辺で行われた試錐調査，地表踏査，リニアメント判読結果に基づき構築された地質構造モデル（図3.2-17；詳細は，3.2.2 1）項「地質・地質構造に関する調査研究」を参照）に基づき水理地質構造モデルを構築し，地下水流動解析を行っている（三枝ほか，2001）。地下水流動解析を行った解析領域と地質構造モデルで考慮した推定断層の位置を図3.2-18に示す。

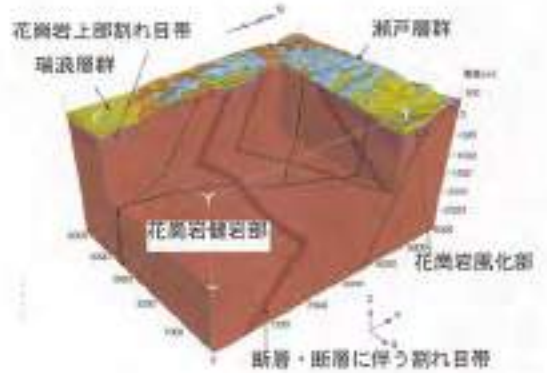


図3.2-17　地質構造モデル

図3.2-18　解析対象領域と想定断層

水理地質構造モデルを構築する際は，構築された地質構造モデルの各地質構造要素に，それらの平均的な透水係数を把握するため，比較的長い区間を対象として行った揚水試験結果（サイクル機構，2001a，2001b）の幾何平均値を設定した（表3.2-1）。

表 3.2-1　地下水流動解析に使用した物性値

地質ユニット	log K (m/s)	空隙率
瀬戸層群	− 6.0	0.3
瑞浪層群	− 7.1	0.2
花崗岩風化部＋上部割れ目帯	− 6.6	0.05
花崗岩健岩部	− 7.3	0.02
月吉断層に伴う割れ目帯	− 6.7	0.05

地質構造モデルで設定された五つの推定断層（図 3.2-18）のうち，月吉断層の断層面方向の透水性に関する情報はあるものの，月吉断層に直交する方向の透水性や，そのほかの推定断層の透水性に関する情報は取得されていない。そのため，以下に示すケースを設定し（表 3.2-2），断層の水理特性に着目した感度解析を行った。

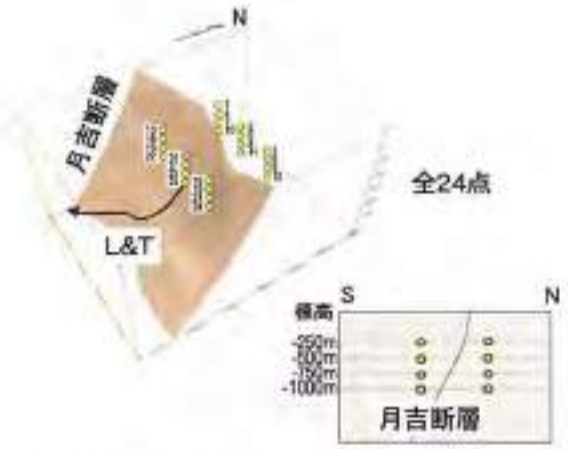
- 断層直交方向を低透水性に，断層面方向の透水性を直交方向と比較して高くすることによって，透水異方性を考慮したケース（基本ケース）
- 基本ケースの断層直交方向の透水性を低くし，透水異方性を大きくしたケース
- 基本ケースの断層面方向の透水性を直交方向と同一とし，透水異方性のないケース
- 断層直交方向および断層面方向の透水性が高いケース

表 3.2-2　推定断層の水理特性の設定ケースの例

（表中の値は透水係数 K（m/s）の対数値）

	解析ケース	Log K (m/s) 断層直交方向	Log K (m/s) 断層面方向
①	基本ケース（透水異方性 有）	-11	-9
②	断層直交方向の透水性小（透水異方性 大）	-13	-9
③	透水異方性 無	-11	-11
④	断層面方向の透水性大	-9.7	-9.7

月吉断層の断層面方向を低透水性として設定し，さらに，月吉断層の透水性が地下水流動場に与える影響を検討する目的で，1×10^{-10}，1×10^{-11}，1×10^{-12}m/sec の 3 ケースを設定した。地下水流動解析においては，その評価指標として，図 3.2-19 に示す任意の 24 点から下流側境界に至る最短移行経路をパーティクルトラッキング法で抽出し，上記の透水性の設定の違いが，移行経路長，移行時間に与える影響を検討した。



地下水の移行経路長(L)・移行時間(T)
パーティクルトラッキングの初期ポイント→モデル境界

図 3.2-19　移行経路調査出発点（全 24 点）

その結果，基本ケースと比較し，地下水のおもな流動方向（北→南）に直交する EW 系断層の低透水性のケースと，おもな流動方向に並行する NNW 系断層および NW 系断層の透水性が高いケースで大きな違いが認められた。基本ケースでは EW 系断層を通過し下流側境界にパーティクルが移行する傾向を示すが，EW 系断層の透水性が低いケースの場合は，パーティクルは断層を通過せず個方境界に移行する傾向を示す。また，NNW 系断層および NW 系断層の透水性が高いケースの場合は，基本ケースにおいて主流動方向に直交する断層部で地表方向へ上昇していたパーティクルが，高透水性の断層に沿って下流方向（南方向）へ移行する傾向を示している（図 3.2-20）。

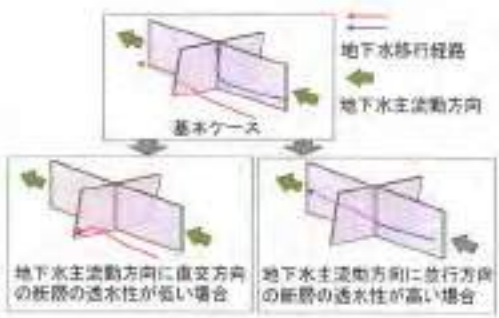


図 3.2-20　解析結果で得られた移行経路の概念図

さらに，水理地質構造の概念やモデル化の違いによる地下水流動への影響の評価を目的として，これまで示した水理地質構造モデルとそれによる地下水流動解析（表 3.2-3 のハイブリッドモデルを用いた解析）を含めて，五つの水理地質構造モデルによる地下水流動解析を行った（表 3.2-3）。

表 3.2-3　五つの水理地質構造モデルと解析条件

概念モデル	連続体モデル	連続体モデル	連続体モデル	ハイブリッドモデル	チャンネルネットワークモデル
コード名	TOUGH2	POR-SALSA	EQUIV_FLO	Frac-Affinity	Don-Chan
解析領域	尾根線と河川で囲まれた4km×6km領域	解析領域に対応した直方体	尾根線と河川で囲まれた4km×6km領域	尾根線と河川で囲まれた4km×6km領域	解析領域に対応した直方体
解法 格子間隔	体積平均法 ブロック数：35,400 水平方向：100m 鉛直方向：50m(>0m), 100m(-1000 <z<0m), >100m(-3000<z<-1000m)	有限差分法 40m×40m×40m 要素数：937,500 節点数：967,176	有限要素法 要素数：87,831 節点数：16,548	差分法 節点数：887,569	差分法 ブロック数：278,048 対象部： 3方向ブロック間隔100m
地表	考慮	考慮せず（上部は不飽和帯）	考慮	考慮	考慮せず（上部は不飽和帯）
地形効果	考慮	モデル対象外	考慮	考慮	モデル対象外
主要モデル構造	月吉断層，リニアメント，地質境界，不整合面	月吉断層，複数のリニアメント，不整合面 （地殻深部は対象外）	月吉断層，月吉断層周辺割れ目帯，帯構造，不整合面，花崗岩（健岩部，高密度割れ目帯，風化花崗岩層）	月吉断層，リニアメント，断層周辺割れ目帯，帯構造地層構造，不整合面，花崗岩（健岩部，高密度割れ目帯，風化花崗岩層）	月吉断層，月吉西生断層，リニアメント，不整合面（地殻深部は対象外），割れ目（EW方向，NW方向，鉛角度）
母岩の不均質性	・均質ケース ・不均質ケース	均質	不均質異方性（割れ目構成から透水テンソル算定）	均質	均質異方性（割れ目方向考慮：EW，NW，鉛角度）
解析ケースの着眼点	①母岩の不均質性 ②月吉断層の透水性	①断層および母岩の透水係数 ②月吉断層の透水性 ③地表からの涵養量	①鉱質鉱山の有無 ②亀裂大きさ分布 ③母岩部分の透水性	①断層および母岩の透水性 ②側方境界条件	1ケースのみ
境界条件	上方：固定水頭 下方：不透水 側方：固定水頭 東機鉱山：指定流量 (5.8×10^{-4} m³/s)	上方：涵養量（233mm/y） 下方：不透水 側方：不透水（河川境界のみ固定水頭）	上方：涵養量（50mm/y） 下方：不透水 側方：固定水頭 東鉱鉱山：圧力水頭0m	上方：固定水頭 下方：不透水 側方：固定水頭（地下水面からの静水圧） 東鉱鉱山：固定フラックス (4.16×10^{-9} m/s)	上方：不透水 下方：不透水 側方：固定水頭

その結果，とくに断層のモデル化や境界条件，有効空隙率の設定方法の違いが，移行経路および移行経路長に大きな影響を与えることが明らかとなった。例えば，移行経路長としては，約 2,000m から約 6,000m の範囲に分布する。解析結果の一例として出発点 11（図 3.2-19）からの移行経路の違いを示す（図 3.2-21）。

月吉断層の透水性のモデル化の違いによって，断層に沿って上方へ移行するグループと断層を横断するグループに分類される

図 3.2-21　異なるモデル化手法による地下水の移行経路の例

この結果は，月吉断層による遮水性を強調するために異方性を取り入れるとともに，断層周辺に高透水性の割れ目帯をモデル化した場合には移行経路長は短くなり，それらを考慮していないモデルの場合には移行経路長が長くなる傾向を示している（澤田ほか，2001）。また，それらを考慮していても上部境界条件を不透水境界とした場合には，断層に沿った上方向の流れが生じにくくなり，結果として移行経路長が長くなる傾向を示している。

移行時間については，数年～数千年の範囲に分布する。これは，モデルの有効空隙率の設定値が異なるためである。移行時間が数百年～数千年の移行時間を示すモデルは，既存文献の情報に基づき一律の値もしくはそれぞれの領域ごとに一定の値（0.01～0.3）を提供したモデルである。一方，数年～数十年の移行時間を示すモデルは，要素ごとに亀裂密度と亀裂開口幅もしくは透水係数から有効空隙率（10^{-6}～10^{-2}）を算出したモデルである。この結果は，これまでの調査・研究ではトレーサー試験など，地下水流速に関わるデータはなく，そのため前述のような様々な方法により値が算出されたことによる。

③ まとめ

これまでの調査・研究により，水理地質構造のモデル化および地下水流動解析を繰り返し行うことにより，地表からの岩盤の水理の調査・解析・評価手法に関する知見を蓄積してきた。

今後，研究坑道および関連施設を設置する場所が「市有地」に移るにあたり，「市有地」およびその周辺では，既存文献調査をはじめ，地上物理探査や浅層試錐調査，既存試錐孔調査などを実施し，広域地下水流動研究の知見と合わせて水理地質構造モデルを構築するとともに，研究坑道掘削前の地下水流動を推定する。また，地下水流動の推定においては，正馬様での研究と同様に地下水流動解析結果の不確実性評価に関する研究を継続する。さらに，これらを行うにあたり用いた調査・解析

手法の適用事例を整理する。

また，正馬様用地を中心とした領域では，不確実性評価に関する研究を取り入れた繰り返しアプローチの2回目として，MIU-1号孔での試錐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を行い，地下水流動解析結果における不確実性の低減過程の評価を行う。

参考文献

糸魚川淳二（1990）：瑞浪地域の地質．瑞浪市化石博物館専報，No. 1，pp. 1-50.

核燃料サイクル開発機構（2001a）：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（2001b）：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国産の課題と現状－直接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.

中野勝志，大澤英昭（2001）：超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階の現状，サイクル機構技報，No. 12（2001. 9），pp. 91-106.

三枝博光，前田勝彦，稲葉　薫（2001）：水理地質構造モデル化概念の違いによる深部地下水流動への影響評価（その6）－不連続構造の水理特性及び水理学的境界条件に着目した水理地質構造のモデル化及び地下水流動解析，地盤工学会「亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム」発表論文集，pp. 299-309.

澤田　淳，三枝博光，竹内真司，中野勝志，井尻裕二（2001）：水理地質構造モデル化概念の違いによる深部地下水流動への影響評価（その4）－複数の概念モデル化手法による不確実性の検討，地盤工学会「亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム」発表論文集，pp. 249-258.

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

正馬様用地における本調査研究では，地下水の地球化学特性の空間分布を把握し，理論解析などの結果と合わせて水質形成モデルを構築するとともに，研究坑道掘削前の地下水の地球化学特性を把握することを目標としている。

正馬様用地内で実施した試錐調査のうち，MIU-1～3号孔においては，採水調査を効率的に進められなかったために，4本目の試錐孔（MIU-4号孔）においては，試錐掘削中に水理試験と組み合わせて地下水採水を行うなど，調査手順の改善を行い，調査を実施した（JNC, 1999；サイクル機構, 2001a）。

方，正馬様用地を包含する領域において実施中の広域地下水流動研究（動燃事業団, 1997）では，「第2次取りまとめ」までに，上越花崗岩中の地下水の起源や水質形成機構などを把握し，水質形成モデルを構築した。

本調査研究においては，前述の正馬様用地内での調査研究に加えて，広域地下水流動研究における研究実施領域で独立に構築したモデルの妥当性を確認することも重要な課題となる。

ここでは，地下水化学特性に関するデータが取得されたMIU-4号孔について，調査手法，結果を中心に報告する。

② 成果の概要

i）調査手順の改善

試錐孔を利用して地下水採水を行う際に，データの品質は大きく下記の3点に支配されると考えられる。

・掘削水の選定，水質管理

調査対象地域において降水系地下水（溶存成分濃度が低い，緩衝能が小さい）の存在が想定される場合には，試錐掘削中の周辺地下水における汚染の程度を低減するために，想定する地下水水質と類似した水質の掘削水を使用することが必要である。すなわち，降水系地下水が存在する場を，海水を使用して掘削した場合，地層水の採取が不可能となることや，海水系地下水が存在しているといった誤った解釈を導く可能性が高い。

東濃地域では，既存の研究成果から，正馬様用地においても降水系地下水が優勢であることが想定されていることから，領域内の河川水（おもに地下水，雨水の混合水）を使用することとした。また，掘削水は循環使用が原則であるため，水質の管理も重要である。試錐掘削中には，掘削水とカッティングス（掘くず）が反応することにより，掘削水中の溶存成分濃度が著しく上昇する。その結果，溶存成分濃度の高い掘削水を使用することとなってしまい，データの品質を低下させることになる。それを防止するために，常時掘削水の水質をモニタリングし，定期的に掘削水を交換するなど，掘削水水質を一定に保つことが必要である。さらに，掘削水中に蛍光染料などのトレーサー物質を一定濃度で添加しておくことにより，地下水採水時には，染料濃度を指標として掘削水の残留割合を定量的に把握することが可能である。

・採水調査実施時期

上越花崗岩中には透水性の高い割れ目（帯）が存在している。試錐掘削中にこのような割れ目に遭遇すると，大量の掘削水が侵入されることになる。目的深度までの試錐孔掘削終了後に，地下水採水を実施する調査プログラムとした場合には，掘削水による汚染の程度が著しく，地層水を採取することが極めて困難になるケースがあった。これを避けるために，試錐掘削中に湧水帯に遭遇した場合，直ちに地下水採水を実施することが可能となる柔軟な調査プログラムが必要である。

・当該試錐孔における優先調査項目

試錐調査においては実施する各調査項目の優先順位を決める必要がある。全ての調査項目について品質の高いデータを取得することは，試錐調査中のトラブルを想定すると，現実的ではない。したがって，優先順位が高い調査項目を，当初計画どおり実施することにより，ほかのデータの品質を低下させることもあり得る。このようなトラブル発生時にも迅速な対処が可能で，かつ目的を果たせるような柔軟で合理的な調査プログラムが必要である。

以上述べたことを考慮した調査プログラムを構築した（JNC, 1999）。

ii）調査結果

ここでは，MIU-4号孔の掘削深度82.50～88.65m（堆積岩：地表からの深度72.00～77.44m）での採水結果とMIU-4号孔における調査で得た知見について述べる。

MIU-4 号孔では堆積岩と花崗岩を明確に分けて調査するために，堆積岩／花崗岩不整合直上で掘削を停止し，シングルパッカー式で地下水採水を実施した。地下水採水中には，前述の蛍光染料濃度に加えて，地上における物理化学パラメータ測定，主要化学成分濃度測定を実施した。本深度においては，掘削水による地層水の汚染が 0.6%まで減少し，当初設定した基準値 1.0%を満足することができた。この原因のひとつに，試錐掘削停止後直ちに採水を実施したことが考えられる。なお，地下水タイプは $Na\text{-}HCO_3$ 型，pH＝9.5 と弱アルカリ性であった（図 3.2-22 および 3.2-23，表 3.2-4：サイクル機構，2001b）。

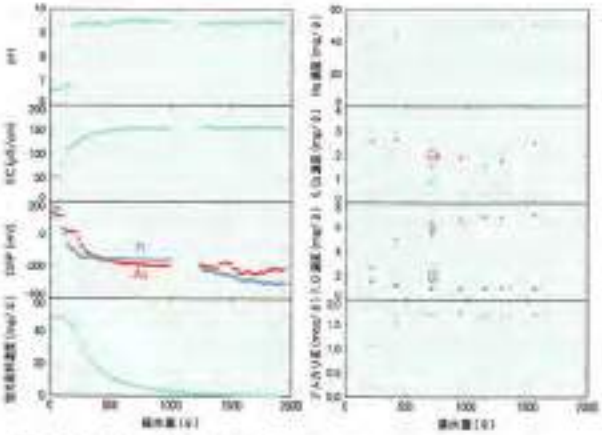


図 3.2-22　揚水試験中の物理化学パラメータ，主要化学成分濃度の測定結果

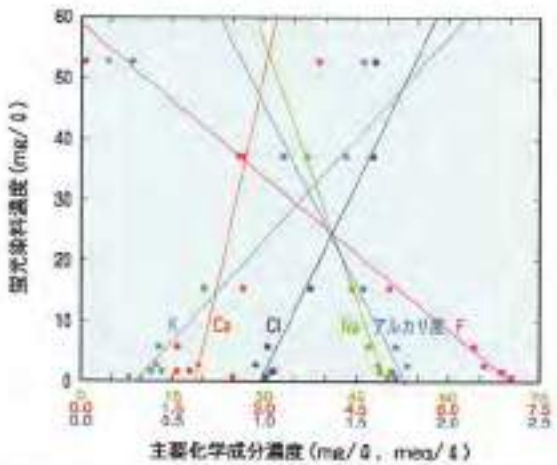


図 3.2-23　蛍光染料濃度と主要化学成分濃度の関係

MIU-4 号孔においては，合計 5 深度（堆積岩 1 深度，花崗岩 4 深度）において地下水採水を実施し，各種測定および分析を実施した。その結果，MIU-4 号孔においては，土岐花崗岩中の地下水は，弱アルカリ性（pH≒9～10）の $Na\text{-}HCO_3$ 型であり，これまでの土岐花崗岩中の地下水地球化学に関する研究結果と整合していた。

表 3.2-4　掘削長 82.50～88.65m 区間の化学成分

採水区間：掘削長82.50～88.65m 地質：土岐夾炭累層			
pH	9.5		
EC (μS/cm)	157		
Eh_{Pt} (mV)	-88		
Eh_{Au} (mV)	-7		
DO (ppb)	0.0		
Na^+ (mg/ℓ)	49.83	F^- (mg/ℓ)	6.67
K^+ (mg/ℓ)	0.20	Cl^- (mg/ℓ)	1.03
Mg^{2+} (mg/ℓ)	< 0.1	SO_4^{2-} (mg/ℓ)	4.94
Ca^{2+} (mg/ℓ)	1.44	H_2S (mg/ℓ)	0.27
T.Fe (mg/ℓ)	< 0.05	アルカリ度 (meq/ℓ)	1.76
Al (mg/ℓ)	<0.1	TIC (mg/ℓ)	17.6
Si (mg/ℓ)	5.6	TOC (mg/ℓ)	1.5
揚水量 (ℓ)		1891.6	
蛍光染料(アミノG酸) (mg/ℓ)		0.39	

③ まとめ

MIU-4 号孔においては，これまでの試錐調査から抽出された課題を解決するために，柔軟で合理的な調査プログラムを策定し，ほぼ計画どおりに調査を実施することができた。地下水の地球化学に関する調査では，品質管理されたデータを取得する手法を確立できたと考えている。今後，研究坑道および関連施設を設置する場所が「市有地」に移るにあたり，「市有地」およびその周辺で試錐孔調査を行うとともに，これまで広域地下水流動研究などで構築してきた地球化学モデルの妥当性を確認する。また，正馬様用地においても，適宜，地下水の採水・分析を行い，地球化学モデルの妥当性を確認していく。

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，動燃事業団技術資料，PNC TN7020 98-001.

Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) (1999) : Working programme for MIU-4 borehole investigations, JNC Tech. Rep., JNC TN7410 99-007.

核燃料サイクル開発機構（2001a）：超深地層研究所計画の現状－平成 8 年度～平成 11 年度－，サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2001-001.

核燃料サイクル開発機構（2001b）：超深地層研究所計画年度報告書（平成 12 年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2001-011.

4) 岩盤力学に関する調査研究

① 課題と計画の概要

地表からの調査予測段階における岩盤力学に関する課題は，研究坑道の力学的安定性評価，力学的現象の評価に必要となる岩盤力学データの取得および岩盤力学モデルの構築である。このため，平成13年度までにAN-1およびMIU-1～3孔（孔長1,000m，鉛直下向き孔）において，岩石コアあるいは試錐孔を利用した各種物性試験，応力測定を実施し，正馬様用地を対象とした土岐花崗岩体の力学特性（岩盤物性や応力など）を取得するとともに，その結果に基づき力学的概念モデルを構築した。

本調査の対象は，結晶質岩（土岐花崗岩）であり，一般に不連続面の性状やその分布特性が岩盤の力学的性質に大きな影響を及ぼす。また，正馬様用地には，月吉断層のような大規模不連続面が存在し，調査対象領域内の岩体の応力状態に大きな影響を与えている可能性があると想定される。これらの影響因子を考慮しつつ，限られた試錐孔の調査によって，調査対象領域の岩盤のモデル化を進めるため，AN-1，MIU-1～3号孔と情報が増加するごとに調査結果を分析・整理し，岩盤力学的概念モデルの構築・更新を繰り返し行うアプローチを採用した。本項では，これらの繰り返しアプローチによりこれまでに把握されてきた岩盤力学特性と力学的概念モデルについて述べる。

② 成果の概要

図3.2-24にAN-1号孔およびMIU-1～3号孔で実施した室内物性試験結果を示す（松井ほか，2001）。

調査対象となった土岐花崗岩の物性値は，一軸圧縮強度が100～200MPa，ヤング率が30～60GPaであり日本の花崗岩の平均的な値とほぼ同じである。しかし，各試錐孔とも岩石物性が深度方向に一様ではない。具体的には，深度300mおよび700m程度の地点から物性値およびその深度変化の傾向が不連続的に変化している。

図3.2-25にAN-1およびMIU-1～3号孔で実施した水圧破砕法によるに初期応力測定結果を示す。

全体的にみると，鉛直方向の応力は断層上盤側においては土被り圧とほぼ等しく，深さ方向の勾配は0.026～0.027MPa/m程度である。水平面内の最小主応力は概ね鉛直応力と等しく，水平面内の最大主応力は最小主応力の1.5～2倍程度である。しかし，応力測定結果においても先の物性値と同様不連続的な変化が認められる。例えば，AN-1号孔で実施した水圧破砕法による初期応力測定結果では，地表～地下1,000mまでの応力値の分布は，必ずしも深度ともに線形的に増加しておらず，深度300mおよび700m程度の地点で極端に小さな値を示し不連続的に変化している。水平面内の最大主応力方向については，深度300m程度まではほぼNS方向であるが，それ以深ではNW-SE方向に変化している。NW-SE方向は，正馬様用地を含む領域で三角測量により求められている広域的な最大圧縮

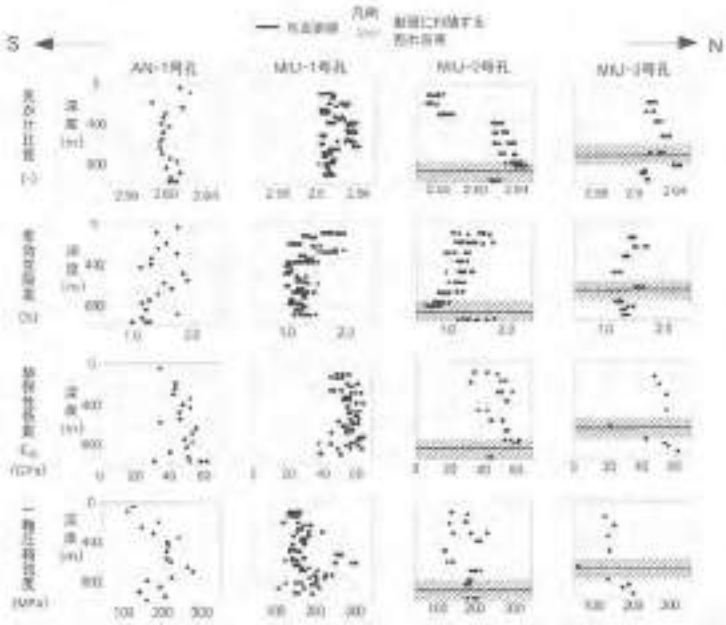


図3.2-24　各試錐孔における室内物性試験結果

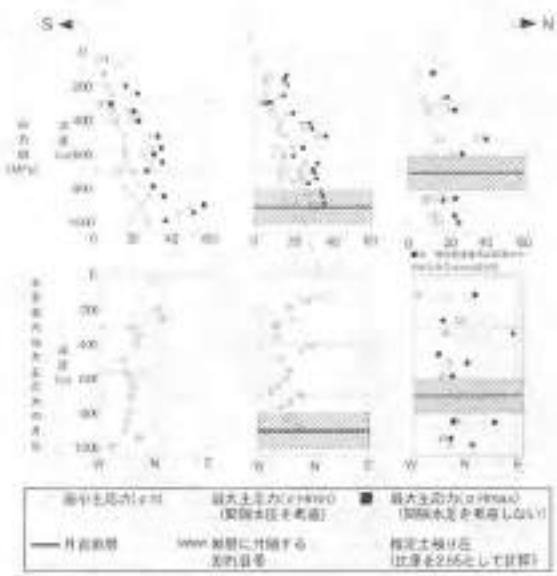


図3.2-25　各試錐孔における水圧破砕法による初期応力測定結果

ひずみの方向にほぼ一致する。MIU-2 号孔における応力値の深度分布は，AN-1 号孔と同様，深度方向に不連続的な変化を示している。とくに主応力方向の深度方向の変化については，AN-1 号孔と異なり，地表～深度 400m，深度 400～700m の領域では N-S→NW-SE 方向に回転するような傾向を示す。MIU-3 号孔における水圧破砕法による初期応力測定結果では，応力値については深度 500m 程度まではほぼ線形的に増加し 500m 以深では応力値が小さくなる。とくに，断層下盤側で測定された値は，上盤側のそれにくらべ著しく小さい。最大主応力方向については，深度 136m 地点は EW 方向に最大主応力方向があるが，それ以深はほぼ NNW-SSE 方向を中心として主応力方向が分布している。ただし，定方位コアを用いたコア周方向の弾性波速度測定から求めた最小の P 波速度の方位は，図 3.2-25 の最大主応力の方位変化と類似している。岩石コアを用いた応力測定手法（DSCA 法など）の仮定が成立し，岩石コア採取時に主応力値に比例してそれに直交する方向のマイクロクラックが発達するとすれば，MIU-3 号孔でも MIU-2 号孔と同様の主応力方向の回転が生じている可能性は考えられる。AE 法による鉛直応力測定では，断層上盤側では，測定した応力値がほぼ推定土被り圧に等しい結果を得ているが，下盤側では低くなるような傾向を示す。

図 3.2-26 にボアホールテレビ（BTV）観察で得られた AN-1 号孔および MIU-1～3 号孔における地表～地下 1,000m までの割れ目数の深度分布を 50m 間隔ごとに示す。この結果をみると，断層上盤側に関しては，深度 300m 程度および 700m 程度の地点から割れ目数の増減傾向の変化が認められる。また，それぞれの領域内における割れ目の卓越方向分布も異なっている。

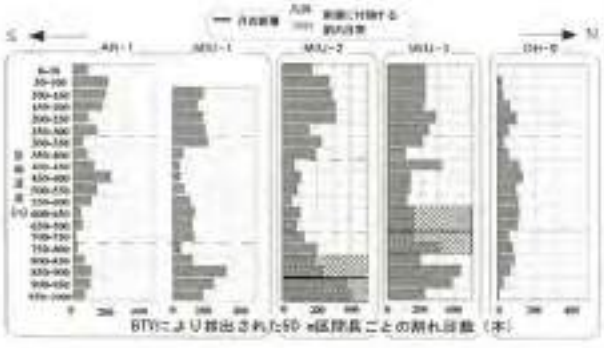


図 3.2-26　BTV 観察から得られた試錐孔における割れ目数の深度変化

上記の結果および前述の室内物性試験結果と対象岩盤が不連続性岩盤であることを考慮すると，原位置岩盤の力学物性もそれぞれの領域で異なる可能性が高いと判断した。また，初期応力測定結果においても割れ目数の変化が生じる地点付近で最大主応力方向の回転や応力値の不連続な変化が認められることから，調査対象領域の土岐花崗岩における岩盤力学的な概念モデルとして，地表～地下 1,000m の範囲で三つの異なる力学物性や応力状態を有するゾーンで構成されるモデルを考えた（図 3.2-27）。

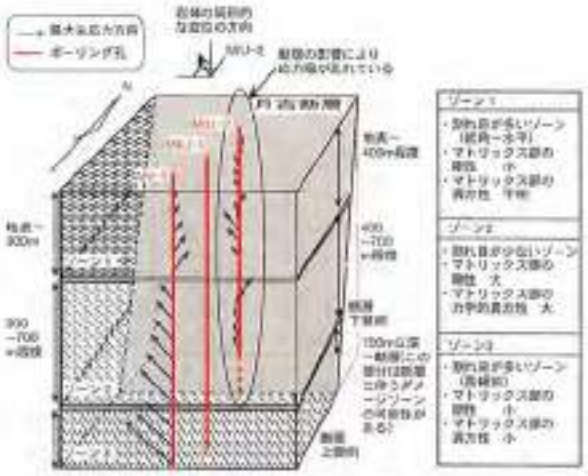


図 3.2-27　月吉断層上盤側岩体の岩盤力学的概念モデル

断層下盤側岩体に関する情報としては MIU-2 号孔の深度 900m 以深，MIU-3 号孔の深度 700m 以深で取得されているのみであるため，ここに東濃鉱山にて実施した初期応力測定および広域地下水流動研究で正馬様用地北側境界より北に約 700m の位置に掘削した DH-9 号孔における試錐調査結果（尾西ほか，1999）を加味することとした。図 3.2-26 に DH-9 孔におけるボアホールテレビ観察により得られた割れ目数の分布を示す。断層上盤側に比べると，同一の精度で計測しているにもかかわらず割れ目数は半分以下に減少している。

図 3.2-28 は東濃鉱山における応力測定結果（松井ほか，2001）を示したものであるが，土岐花崗岩部の測定結果をみると月吉断層の上盤側から下盤側に向かうにつれ，明らかに応力値が減少する傾向を示す。これは，MIU-3 号孔における初期応力測定結果で得られた断層上盤側と下盤側の応力状態の違いと同様の結果である。以上のことから，断層下盤側の岩体の応力値は，少なくとも調査対

象領域北側境界付近では上盤側と比べかなり小さくなっている可能性が高い。

岩石物性については，MIU-2，3 号孔および東濃鉱山の室内試験結果から，ほぼ上盤側と同程度であることが推定されるが，割れ目数が少ないため，原位置岩盤の力学物性は上盤側よりも高いことが想定される。これらの結果から現段階で想定される月吉断層下盤側岩体の力学的概念モデルを図 3.2-29 に示す。

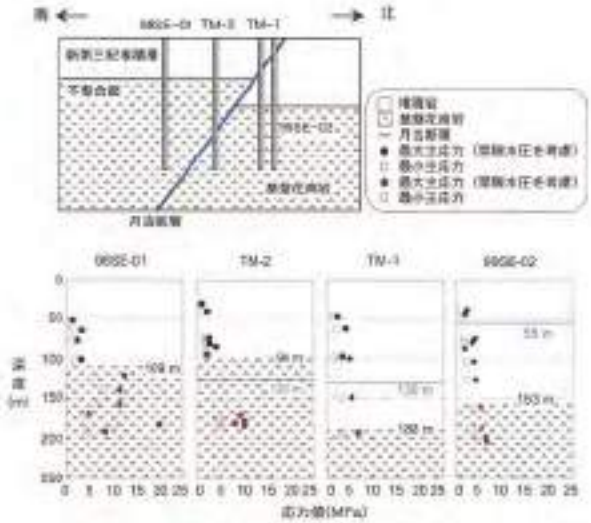


図 3.2-28　東濃鉱山における水圧破砕法による初期応力測定結果

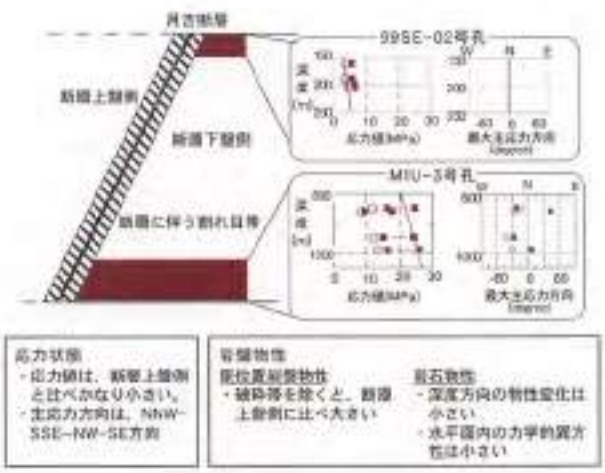
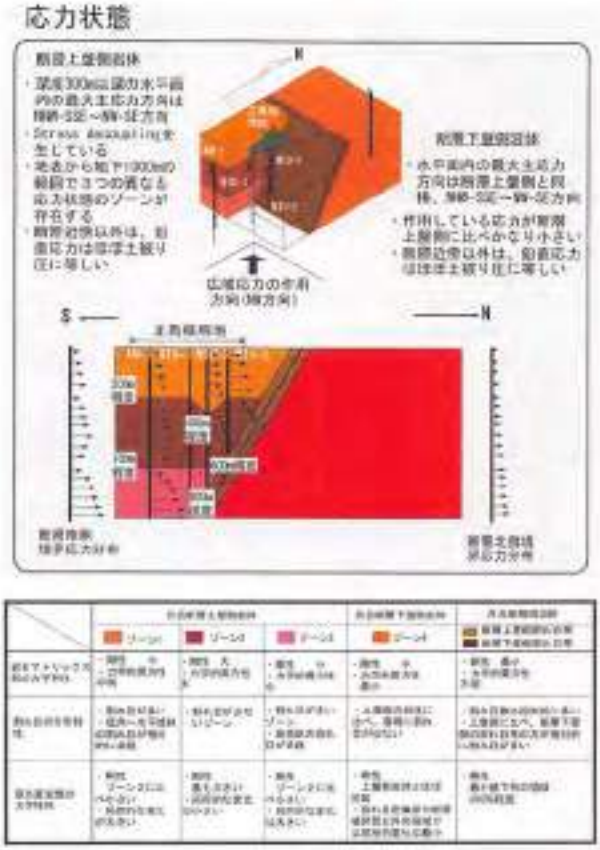


図 3.2-29　月吉断層下盤側岩体の岩盤力学的概念モデル

これらの断層上盤・下盤側のモデルをまとめて表現したものが図 3.2-30 に示す概念モデルである。このモデルは，調査対象とした正馬様用地内の土岐花崗岩体中の岩盤力学的特性（応力や物性）を定性的に表現したものである。



	ゾーン1	ゾーン2	ゾーン3	ゾーン4	
応力状態	・断層上盤側と比べかなり小さい ・主応力方向はNNW-SSE-NW-SE方向	・断層上盤側と同様，概ねSSE～NW-SE方向 ・主応力値は深さ方向に大きくなる傾向	・断層近傍以外は，鉛直応力は岩石土被り圧に等しい	・断層下盤側と同様，概ねSSE～NW-SE方向 ・作用している応力が断層上盤側に比べかなり小さい	・断層上盤側と同様，概ねSSE～NW-SE方向 ・主応力値は深さ方向に大きくなる傾向 ・断層下盤側と同様，作用している応力が断層上盤側に比べかなり小さい
岩盤物性	・割れ目が多い ・低角～中角傾斜の割れ目が卓越する傾向 ・破砕帯を含む	・割れ目が多いゾーン	・割れ目が少ないゾーン ・岩盤強度が高いゾーン	・土被り圧に比べ，割れ目が少ない ・割れ目の方向性は明瞭ではない	・割れ目が多い ・土被り圧に比べ，断層下盤側の割れ目の方向性は明瞭ではない ・割れ目が少ない
岩石物性	・物性値はゾーン2に比べ小さい ・物性のばらつきが大きい	・物性値は大きい ・深度方向の変化は小さい	・物性値はゾーン2に比べ小さい ・物性のばらつきは小さい	・物性値は上盤側と同程度 ・割れ目帯物性の深度方向の変化は小さい	・物性値は上盤側と同程度 ・深度方向の物性変化は小さい

図 3.2-30　正馬様用地を対象とした土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデル

③ まとめ

構築した月吉断層上盤側の岩盤力学的概念モデルは，調査対象領域である正馬様用地の土岐花崗岩体の概略的な岩盤力学的特性を表現しており，本調査で採用した繰り返しアプローチは，少ない試錐孔数の調査で断層のような大規模不連続面を含む結晶質岩体をモデル化するうえで有効であると考える。

今後，研究坑道および関連施設を設置する場所が「市有地」に移るにあたり，試錐孔および岩芯を用いた物性試験や初期応力測定などを行い，「市有地」の岩盤力学モデルを構築するとともに，地表からの調査・解析・調査技術の適用事例を整理する。

また，「市有地」で研究坑道を掘削することにより発生する事象を想定するため，構築した岩盤力学モデルを用いた数値解析を実施するとともに，とくに岩盤破壊に着目したモデル化手法の研究を進める。具体的には MIU-4 号孔における力学特性調査により，月吉断層およびそれに付随する割れ目帯の力学特性を把握するとともに，上記の概念

モデルをベースとした数値解析を実施し，同モデルの妥当性を検証する。さらに，不連続面の力学特性をジョイントせん断試験により評価し，割れ目の影響を考慮した岩盤物性の評価を行い，概念モデルの定量化を図る。

参考文献

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川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.

尾西明生，窟田　亮，川西　繁，細瀬充史，井ヶ田恭之（1999）：広域地下水流動研究における試錐調査（その2）（DH-9号孔），サイクル機構技術資料（契約業務報告書：住鉱コンサルタント株式会社），JNC TJ7440 98-002.

5) 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

超深地層研究所では，地表から深度約 1,000m まで立坑を掘削するとともに，その途中に複数の深度より水平坑道を展開する。現存の掘削などの工学技術をもってして，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・管理もできることを確認することが必要である。また，これらの工学技術が今後発展し，新たな技術ができた際にも，これらを取り入れることができるように柔軟なシステムとしておくことも肝要である。さらに，研究坑道の掘削が地質環境に与える長期的な影響を適切に計測し，解析・評価するための技術を整備することも必要となる。

深地層の工学技術の基礎に関する研究では，現存の工学技術をもって，超深地層研究所計画用地での研究坑道の掘削を行っていく。とくに初期段階において取得された地質環境に関する情報や，その評価の結果に基づき，地下深部に掘削した研究坑道周辺の岩盤の長期健全性，研究坑道の力学的安定性や周辺安定性などを解析・評価する。これにより，地質環境の変動幅を設定し，研究坑道で行う調査・研究に対応できるように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。

つぎに，研究坑道を実際に施工・維持・管理する際に適用した工学技術の有効性を検証していく。実際の地質環境が推定結果と大きく異なる場合や大規模出水や山はねなどの想定外の事象に遭遇した場合でも，設計変更や対策工の適用により柔軟に対応できることが重要であり，そのため，常に新たな施工対策技術，施工管理システムや工学材料などの改良・開発を行うことは大切である。研究坑道の掘削後には，坑道内の環境の維持・管理および安全維持の技術の適用性を確認し，これに関わる長期間の坑道維持の管理体系を構築する。

一方，結晶質岩を対象とした，研究坑道の掘削が地質環境に及ぼした影響の修復あるいは軽減，熱－水－応力－化学連成挙動の評価やセメントなどの工学材料が岩盤に与える長期的影響の評価に関する研究開発については，当面，国際共同研究や海外の地下研究施設における研究開発などにおいて進められる。したがって，超深地層研究所計画におけるこれらの工学技術の開発・整備については，今後，その必要性を含めて検討していく。

② 成果の概要

i) 調査・研究項目の選定

研究坑道において，「研究坑道の掘削を伴う研究段階」ならびに「研究坑道を利用した研究段階」で実施する研究の特徴としては，以下の項目が考えられる。

・掘削中も並行して種々の研究が行われるため，施工自体も研究の一部であること
・事前に推定できなかった地質環境に遭遇した場合にこれを回避あるいは新たな研究対象とすべく，当初の設計を柔軟に変更できる設計である必要があること

これらを踏まえて，これまで調査・研究項目について，国内外の先行事例などを参考に整理し（サイクル機構，1999），それに基づいて研究坑道の展開手順や仕様の決定方法などを検討してきた。また，「地表からの調査予測研究段階」で取得したデータや深部地質環境に関する情報を加味して，研究坑道のレイアウトや施工計画を検討した（見掛ほか，2000）。詳細な検討にあたっては，

・地表からの調査結果
・地質環境モデル

の二つの情報を考慮し，それらをもとに「国による第２次取りまとめ評価報告書」などで示された今後の研究開発課題などの必要性も踏まえて検討した。

工学技術の基礎に関する研究に関して実施すべき調査・研究項目を以下に示す。

a) 研究坑道の設計・施工計画技術の開発
　・設計手法，設計体系の整備
　・研究の品質を確保する技術の開発
b) 研究坑道の掘削技術の開発
　・掘削技術・支保工の適用，開発
　・施工管理システムの開発
　・前方予知技術の開発
c) 研究坑道の施工対策技術の開発
　・遭遇事象の予測技術（湧水や山はね）の開発
　・対策工の開発
　・地質環境への対策工の影響評価
d) 安全性を確保する技術の開発
　・長期の維持補修技術の適用性確認
　・管理体系の構築
　・坑内環境保全システムの適用性の確認
e) 掘削影響の修復・軽減技術の開発
　・掘削影響修復技術（グラウト後の岩盤挙動研究）の開発

・坑道修復技術（埋め戻し後の岩盤挙動研究）の開発
・熱－水－応力－化学連成挙動の評価

f）人工材料の岩盤への長期影響評価に関する研究開発
・セメント系材料の岩盤への影響評価
・ベントナイト系材料の岩盤への影響評価
・ベントナイト－地下水相互作用の評価

ii）研究坑道のレイアウト策定と設計概念

図3.2-31に「市有地」における研究坑道のレイアウト案（戸井田ほか，2002）を示す。このレイアウトは，健岩部での調査・研究について水平坑道を利用して行うために深度500m付近で中間ステージを掘削し，さらに断層の影響が顕著な割れ目帯での調査・研究を行うために最深部1,000m付近において最深ステージを掘削するという正馬様用地の案のひとつを踏襲して設定したものである。今後の「市有地」における「地表からの調査予測研究段階」において取得されるデータに基づき，研究坑道のレイアウトを見直していく予定である。

研究坑道の設計概念については，これまでに取得したデータに基づき，研究坑道の支保の設計に適用される解析パラメータを整理し，用地の地質環境条件に適した設計の考え方についてまとめた（窪田ほか，2001）。設計の考え方として，経験的な設計方法（既存の岩盤分類に基づく岩盤等級に対応した標準支保パターンを用いる方法や，設計条件が類似した施工実績を参考に支保工の仕様を定める方法など）と解析に基づく設計方法（理論解および数値解析に基づく方法）の二つの方法についてまとめた。

③ まとめ

「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，超深地層研究所で実施すべき研究項目を抽出し，これが実現できる具体的な研究坑道のレイアウト案を検討した。

現在，「市有地」における「地表からの調査予測研究段階」が進行中であり，今後，取得する深部地質環境の情報により，「研究坑道の掘削を伴う研究段階」ならびに「研究坑道を利用した研究段階」における調査・研究計画の内容について具体化を図る。研究坑道のレイアウトおよび設計については，調査・研究計画に基づき研究坑道のレイアウトを決定し，詳細な設計を行うことにより，実際に適用する施工技術や掘削に必要となる機器設備を選定し，具体的な施工計画を決定する。

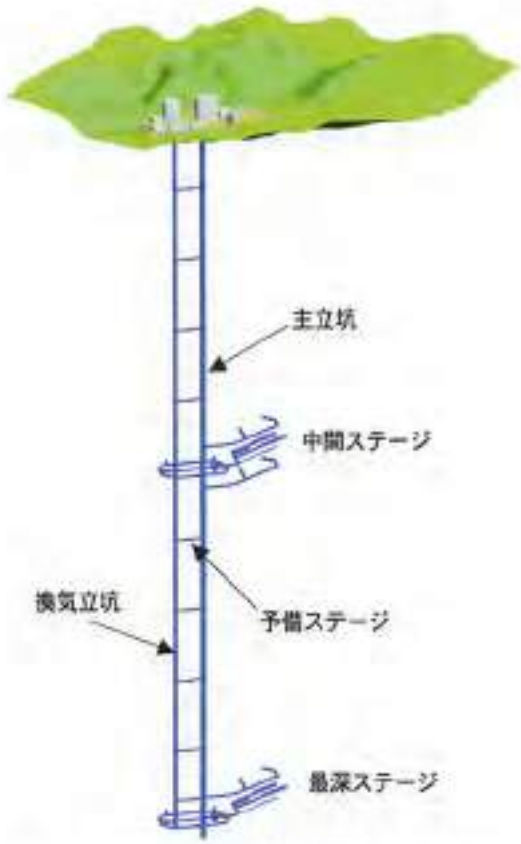


図3.2-31　研究坑道のレイアウト案

参考文献

核燃料サイクル開発機構（1999）：超深地層研究所地下施設の設計研究（平成10年度），サイクル機構技術資料，JNC TN1400 99-001.

窪田　茂，納多　勝，戸井田克，石塚峰夫（2001）：超深地層研究所研究坑道における研究および施工に関する検討，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；大成建設株式会社，株式会社大林組，鹿島建設株式会社，清水建設株式会社），JNC TJ7400 2001-005.

見掛信一郎，杉原弘造，永崎靖志（2000）：地下1000mに研究坑道を掘る－東濃地科学センター超深地層研究所計画－，トンネルと地下，31，pp.1163-1171.

戸井田克，納多　勝，石塚峰夫，窪田　茂（2002）：超大深度における研究坑道の施工に関する検討，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；鹿島建設株式会社，株式会社大林組，清水建設株式会社，大成建設株式会社），JNC TJ7400 2002-001.

3.3 東濃鉱山における調査試験研究

3.3.1 調査試験研究の概要

① 背景と目標

東濃鉱山とその周辺域においては，主として地表から深度約150mまでに分布する新第三紀堆積岩（瑞浪層群）を対象として，様々な調査・試験・研究に加え，調査・解析技術ならびに機器の開発を地層科学研究の一環として進めてきている。現在の調査試験研究は，平成10年10月にそれまでの調査試験研究の成果を踏まえて策定した「東濃鉱山における調査試験研究基本計画」（サイクル機構，1999）に基づいて展開している。

昭和61年4月の本調査試験研究の開始から平成10年9月までの間には，東濃鉱山の既存の地下坑道などを利用して，地質・地質構造，地下水の流動と地球化学的特性，物質（とくにウラン系列核種）の分布・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が行われてきた。このうち，平成元年度～3年度に実施した立坑掘削影響試験では，直径6m，深さ150mの立坑を新たに掘削し，立坑掘削が地質環境に与える力学的・水理学的影響の評価や地質環境の変化に関する解析・評価手法の開発・改良などを行った（動燃事業団，1992）。

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整備され，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」などの報告書に適宜取りまとめられ，地下深部の学術的研究のみならず，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。

現在の「東濃鉱山における調査試験研究基本計画」は，以上のような背景を踏まえ，その調査試験研究の主眼を従来の

- 「一般的な」から「特定の」地質環境へ
- 「個々の」から「複合的な」特性や現象へ
- 「現在の状態」から「長期的な変化」へ
- 技術の「開発」から「適用性の確認」へ
- 「要素技術の開発」から「総合的な技術の体系化」へ

と移し，東濃鉱山（図3.3-1）の既存の研究資源や東濃ウラン鉱床などを活用し，より具体的かつ信頼性のある知見や事例を示すことを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二つに集約される。

- 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

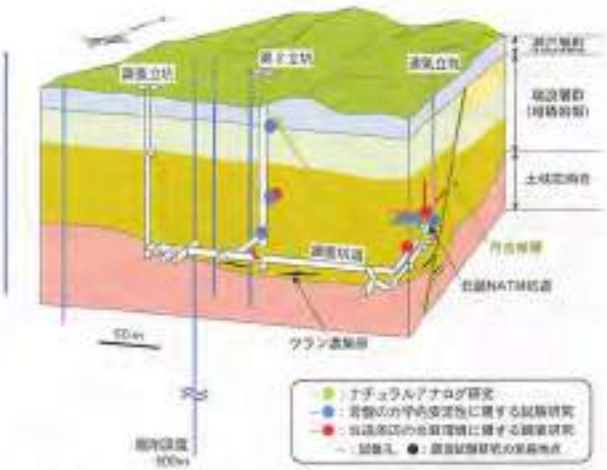


図3.3-1　東濃鉱山における調査試験研究の実施領域

② 実施項目と進め方

本試験研究では，二つの最終目標に向け，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，2000，2001a，2001b，2002a）。

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，地質環境の変遷（例えば，隆起・侵食や断層運動）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・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。とくに，地質環境の変遷に関する調査研究については「地質環境の長期予測に関する研究」（3.4.2 5）項参照）との連携を図る。

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」，「双設坑道安定性評価試験」および「長期挙動に関する研究」を進めている。

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・地球化学的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，安全評価手法の整備・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・評価手法や断層を対象とした年代測定技術などは，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。

さらに，ナチュラルアナログ研究の成果は，地層処分の長期的な安全性についての国民の理解を得ていくために重要な意義をもつ。また，深部地質環境の特性やそこで生じる現象に関する知見は，地下深部についての学術的研究などにも寄与するものである。

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の知見を蓄積しつつある。また，坑道からの調査・評価技術については，必要な技術開発を継続するとともに，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ている（サイクル機構，2001c，2001d，2002b）。したがって，今後も最終目標の達成に向け，3項目の調査試験研究を継続する計画である。

得られた成果については，安全評価手法の整備・高度化，地層処分技術の信頼性の確認および幌延深地層研究計画に反映させることができるよう，適宜取りまとめを行っていく予定である。

参考文献

動力炉・核燃料開発事業団（1992）：立坑掘削影響試験ワークショップ　発表論文集－，動燃事業団技術資料，PNC TN7410 92-052.

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（2000）：東濃鉱山における調査試験研究年度計画書（平成12年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2000-004.

核燃料サイクル開発機構（2001a）：東濃鉱山における調査試験研究年度計画書（平成11年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-005.

核燃料サイクル開発機構（2001b）：東濃鉱山における調査試験研究年度計画書（2001年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-010.

核燃料サイクル開発機構（2001c）：東濃鉱山における調査試験研究年度報告書（平成11年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-006.

核燃料サイクル開発機構（2001d）：東濃鉱山における調査試験研究年度報告書（2000年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2001-007

核燃料サイクル開発機構（2002a）：東濃鉱山における調査試験研究年度計画書（2002年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2002-001

核燃料サイクル開発機構（2002b）：東濃鉱山における調査試験研究年度報告書（2001年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2002-001.

3.3.2 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

東濃ウラン鉱床を事例研究の場として，地質環境下で実際に生じた現象とその場の特性を定量的に把握することにより，地質環境が本来有している，物質の移行を遅延させ長期的に保存する性能の評価が可能となる。本研究においては「第2次取りまとめ」までに，おもに東濃ウラン鉱床の現在の状態についての調査研究を実施し，

・堆積岩深部の地下水は，弱アルカリ性，Na-HCO_3型で強還元状態にあり，その水質は1万数千年の滞留時間の間に，おもに方解石，長石類，黄鉄鉱の溶解および地下水－粘土鉱物間のイオン交換反応により形成された，
・大部分のウラン系列核種は，過去数百万年間にわたって大きく移動することなく堆積岩中に保持されている，

という知見を得ている。

地層処分システムの長期的な安全評価の信頼性を向上させるためには，これらの知見に加えて，1～10万年といった長期的な時間スケールで生じる地質学的事象や地質環境の変化に伴う物質の移行・遅延挙動についての知見を得ることが必要である。また，物質の移行・遅延挙動に関して，影響を及ぼす要因を評価するとともに定量的情報を取得することも重要である。

以上のことから，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いる。

・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

具体的には，ウラン鉱床の長期保存に関わる地質環境とその変遷に関して，水理学的・地球化学的環境の変化や月吉断層の活動，および地質学的・地球化学的な影響を調査研究の対象としている。また，ウラン系列核種の移行・遅延に及ぼす影響要因について，化学的条件や有機物，微生物などに関する調査研究を実施している。

② 成果の概要

・東濃ウラン鉱床の長期保存に関わる水理学的・地球化学環境

東濃鉱山周辺では，基盤をなす花崗岩中の地下水は堆積岩に比べて酸化的な状態にあり，花崗岩から堆積岩へ向かう地下水流動が推定されている。この事実に基づき，堆積岩中における還元反応に関与する鉱物の存在量と地下水流動速度をもとに，花崗岩から堆積岩への酸化フロント移動速度を化学量論的に見積もった。その結果，現在の地下水中の溶存酸素濃度および地下水流動状態では，酸化フロントの移動は極めて遅く(約7×10^{-7}m／年)，堆積岩は十分な還元緩衝能力を有することが確認された（Arthur et al., 2002)。

・月吉断層の地質学的性状と水理学的・地球化学的環境への影響

東濃ウラン鉱床を横切る月吉断層を対象に，分布や地質学的特性，形成プロセス，水理学的・地球化学的な影響などに関する調査を行った。その結果，1条の連続面として考えられてきた月吉断層は2条の断層からなり（図3.3-2)，断層沿いに幅十数m～20m程度の破砕帯を両側に伴い，湾曲しながら連続していることが推定された。

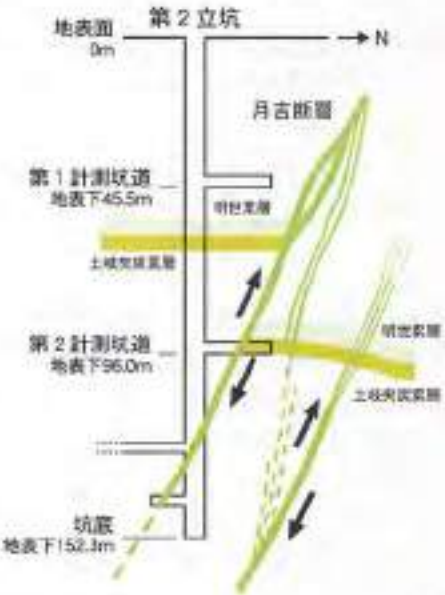


図3.3-2　月吉断層の分布とその連続性

月吉断層は逆断層系の変形作用とそれに引き続く局所的な正断層系の変形作用（再動）によって形成されたと考えられ，それらの断層運動時には断層面に沿って熱水が循環した可能性が示された

(Milodowski et al., 2001)。また，断層面が直交方向の地下水流動に対して遮水面となっていることや，破砕帯が過去に地下水流動経路として機能していたことなどが明らかになった。

・堆積岩中の天然ウランの化学種

堆積岩中における天然ウランの存在形態（化学種）について，実測および想定される化学的条件をインプットパラメータとした感度解析を行った。その結果，地下水中の溶存化学種としては，$U(OH)_4(aq)$が，固相としては，$UO_2(am)$およびアモルファスコフィナイト（$U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}(am)$）が熱力学的に安定にあることが明らかになった。また，堆積岩中の天然ウランの溶解度は，pH および酸化還元電位とともに二酸化炭素分圧に大きく影響をうけることが示された（JNC，2002）。

・有機物が微量元素の移行・遅延に及ぼす影響

堆積岩および花崗岩中の地下水からフミン酸ならびにフルボ酸を分離し，その中の含まれる微量元素を分析した。その結果，地下水中に含まれる有機物の濃度は 0.1～8mgC/l であり，これらの有機物は堆積岩中の有機物（亜炭など）の微生物分解により生成している可能性が示された。

また，鋼やマンガンなどの一部の微量元素は有機物に収着しているものの，その量は地下水中に溶存している有機物量の 1/100～1/10,000,000 と極めて少ないことから，弱アルカリ性で還元状態の地下水中では，有機物が微量元素の移行・遅延に与える影響は少ないと考えられる（サイクル機構，2001）。

・微生物が地球化学的環境に及ぼす影響

東濃ウラン鉱床における地下微生物に関する研究では，現在，品質の保証されたデータを取得するための技術開発と併行し，地下微生物生態系に関する基礎情報を取得している。

技術開発に関しては，掘削水による微生物汚染のない岩石試料を採取する手法の開発・整備として，微生物と同じサイズ（0.2μm）の蛍光ビーズを加えた掘削水を用いて岩芯を採取し，岩芯内部の蛍光ビーズの分布を調査した。その結果，岩相により異なるものの，岩芯中心部では掘削水による微生物汚染のない試料が採取できることが確認できた。また，無酸素かつ無菌環境で汚染のない試料を採取できるグローブボックスを開発した。

一方，地下微生物生態系に関しては，深度に関係なく地下水中には硝酸・亜硝酸還元菌，鉄関連菌，硫酸還元菌（図 3.3-3）などが存在することが確認された。とくに，ウランが濃集する堆積岩下部の地下水中には，古細菌型硫酸還元菌が生息している（Murakami et al., 1999）。

図 3.3-3　地下深部に生息する硫酸還元菌

また，地下水中の硫酸イオンの硫黄同位体比（$\delta^{34}S$）を測定した結果，硫酸イオン濃度と硫黄同位体比には逆相関（図 3.3-4）があり，観察された硫酸還元菌が実際に硫酸還元活性を持ち，硫酸イオンと栄養となる有機物の供給により硫酸還元が起きていることが示された。この反応は，無機化学的な水－鉱物反応に比べて極めて早く安定状態に達し，酸化還元平衡電位は弱アルカリ性の条件下で-300～-400mV になる。堆積岩層下部の地下水の酸化還元電位（実測値）は-300～-360mV であり，微生物による硫酸還元反応の平衡電位と一致する。したがって，微生物による硫酸還元反応は，堆積岩層下部の還元環境形成に関与する主要な反応の一つである可能性が考えられる。

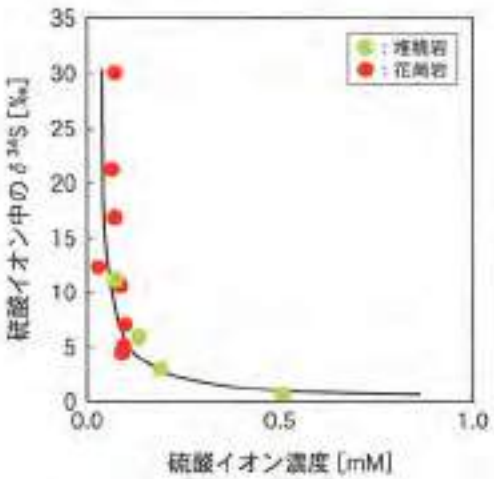


図 3.3-4　硫酸還元菌の硫酸還元活性

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により、ウラン鉱床の長期保存に関わる地質環境に関して、酸化還元フロントの移動速度と堆積岩の還元緩衝能力を評価したほか、月吉断層の活動履歴や水理学的な機能などに関する新たな知見を取得した。また、ウラン系列核種の移行・遅延に及ぼす影響要因に関して、堆積岩中における天然ウランの化学種と化学的条件の関係、地下水中の有機物の濃度・種類・起源や微量元素濃度への影響を把握するとともに、微生物の種類・存在量などの基礎的な情報を取得した。さらに、微生物研究のための岩石試料の採取・調製手法を開発した。

今後、これまでの調査研究をさらに進めるとともに、ウラン濃集部および断層近傍におけるウラン系列核種の移行・遅延挙動や地球化学的環境の変遷に関する調査研究も実施する。また、「地質環境の長期予測に関する研究」(3.4.2 6) 項参照) と連携し、東濃ウラン鉱床における隆起・侵食とその影響に関する研究もあわせて進めていく計画である。

参考文献

Arthur, R., Iwatsuki, T., Hama, K., Amano, K., Metcalfe, R. and Ota, K. (2002) : The redox environment of deep groundwaters associated with the Tono uranium deposit, Japan. Sci. Basis Nucl. Waste Manag. XXV. (in press)

Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) (2002) : TaP - Tono natural analogue project, annual report 2001. JNC Tech. Rep. (in prep)

核燃料サイクル開発機構 (2001) : 東濃鉱山における調査試験研究年度報告書 (平成11年度), サイクル機構技術資料. JNC TN7410 2001 006.

Milodowski, A.E., Gillespie, M.R., Hama, K., Amano, K., Kemp, S.J., McKervey, J., Metcalfe, R., Kunimaru, T. and Iwatsuki, T. (2001) : Characterisation of the Tsukiyoshi fault phase II [2000-2001]. The Tsukiyoshi fault intersection in the Toki granite in Borehole MIU-3 and the Akeyo Formation in Tono Mine Borehole 985[-08. BGS Tech. Rep. CR/01/17.

Murakami, Y., Naganuma, T. and Iwatsuki, T. (1999) : Deep subsurface microbial communities in the Tono area, central Japan. Jour. Nucl. Fuel Cycle Environ. 5, pp. 59-66.

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

一般に，岩盤内の応力状態は不均一性を有するが，その不均一性を定量化する調査・解析技術は確立されていない。また，坑道掘削により力学的な塑性領域が生じた場合の物性変化の程度や範囲に関する知見は得られていない。これらの技術や知見は，幌延深地層研究センターなどの地下構造物の設計施工および空洞安定性を確保する観点から必要である。さらに，長期間にわたる空洞の安全確保の観点からは，岩盤の長期的挙動を評価する手法が重要となる。

以上の背景を踏まえ，岩盤の力学的安定性に関する研究では，以下の三つの調査試験研究を実施している。

i）応力状態に関する調査研究

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初期応力分布を把握し，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する。

ii）双設坑道安定性評価試験

岩盤の塑性化に伴う物性変化とその範囲を評価する手法の開発を目的に，東濃鉱山北延NATM坑道に近接した新規坑道を掘削し，坑道間の再配分応力の干渉によって人為的に塑性域を発生させ，坑道周辺岩盤の力学的安定性を評価する。

iii）長期挙動に関する研究

岩盤の長期挙動を評価する手法の開発を目的に，室内試験装置の開発，解析手法の検討および高度化を図る。また，東濃鉱山第2立坑ならびに北延NATM坑道の周辺岩盤における変形挙動，および試錐孔内における岩盤の崩壊現象についての長期観測を行い，岩盤の長期挙動を評価する手法の検討を行う。

② 成果の概要

i）応力状態に関する調査研究

東濃鉱山用地内に深度200～500mの試錐孔を計5本掘削し，各孔においてボアホールテレビ観察，孔径検層，水圧破砕法による応力測定を実施した。調査を実施した各試錐孔の位置図を図 3.3-5 に，概略の地質柱状図を図 3.3-6 にそれぞれ示す。また，鉛直方向の応力成分を室内試験（AE 法）により計測した。初期応力の測定結果を図 3.3-7 に示す。最大主応力は，東濃鉱山に分布する堆積岩の有効空隙率が大きいことを考慮し，間隙水圧を差し引いた値を示している。

図 3.3-5　調査用試錐孔の位置図（平面図）

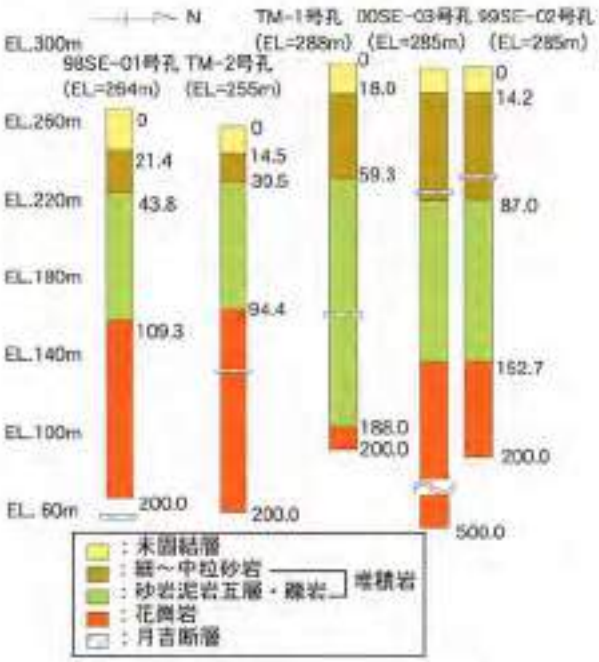


図 3.3-6　各試錐孔の地質柱状図

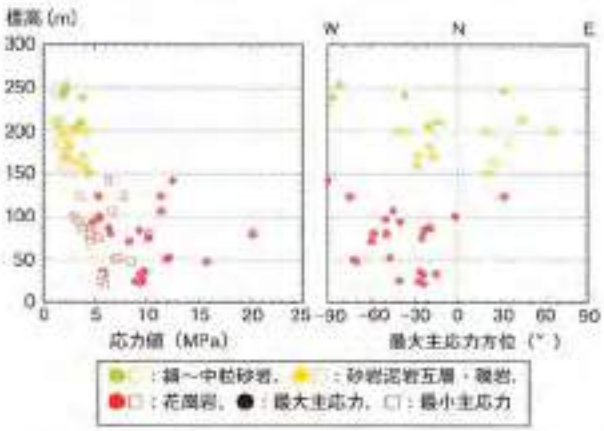


図3.3-7　水圧破砕法による初期応力測定結果

（TM-1, TM-2, 98SE-01, 99SE-02, 00SE-03号孔）

初期応力測定の結果，堆積岩と基盤をなす花崗岩とでは応力の値が大きく異なることが明らかとなった。このような応力の不連続的な変化は，岩盤剛性の不均質性に起因する可能性がある（石田・金川，1987）。

最大主応力の方向は，ばらつきは大きいものの，初期応力値と同様に花崗岩と堆積岩では違いが認められる。具体的には，花崗岩中では水平面内の最大主応力方向が北西－南東方向を中心として分布しているのに対し，堆積岩中では南北方向を中心として分布している。花崗岩の主応力方向は本地域の水平地殻ひずみの最大圧縮軸方向と一致し，東濃鉱山地表面の形状は東西方向に谷地形となっており，その方向の応力は解放されやすいことなどから，花崗岩中の初期応力分布は広域的な圧縮応力場に，一方，堆積岩中の初期応力分布は地形的な影響を受けている可能性が高いと考えられる。

なお，5本の試錐孔のうち4孔が月吉断層と交差しているが，断層の上下盤で計測された初期応力値および主応力方向に，断層に起因する変化は認められていない（Naeda et al., 1999）。

ii）双設坑道安定性評価試験

北延NATM坑道において本試験を実施する場合を想定し，新規坑道と既存坑道の離間距離を検討する目的で予察的な二次元FEM弾性解析を実施した。

その結果，坑道離間距離が0.5D（D=坑道径）の場合は既存坑道と新規坑道間に塑性化する領域が発生すること，1.0Dでは，塑性化する領域は発生しないが，岩盤が不安定になる領域が坑道間の広い範囲に発生することが示された（前田・松井，2001）。現時点では，新規坑道掘削における安全性を考慮し，解析上，塑性領域は発生しないものの，それに近い状態が想定される1.0Dを基本に試験計画の検討を行っている。

ii）長期挙動に関する研究

東濃鉱山において継続中の長期変位計測における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（図3.3-8）を東濃地科学センターに導入し，東濃鉱山から採取した堆積岩を用いた長期クリープ試験を実施している。また，解析手法（コンプライアンス可変型構成則，分子動力学－均質化法統合解析）の高度化に関する研究も継続して実施している。

図3.3-8　製作した空圧式クリープ試験装置

東濃鉱山坑道内においては，堆積岩（軟岩）に特有の現象（膨潤やスレーキング（乾湿の繰り返しによる細片化）など）が岩盤の力学的安定性に及ぼす影響を把握することを目的として，北延NATM坑道のほぼ同一地点に孔径の異なる5孔（φ200～76mm）を最大主応力と直交する方向に掘削し，各試錐孔における孔壁面の状態の経時変化を観察した。これまでに，ほぼ同様の地質学的条件にもかかわらず，掘削直後より大孔径の試錐孔において孔壁の破壊現象が観察された（図3.3-9）。

99SI-01(孔径200mm)崩壊あり　99SI-04(孔径86mm)崩壊なし

図3.3-9　孔壁面の状態

孔壁の破壊現象の原因を把握するため，堆積岩試料を用いた室内一軸圧縮試験および二軸圧縮試験を実施した結果，同領域の堆積岩の破壊強度にスケール効果が認められた（図3.3-10）。

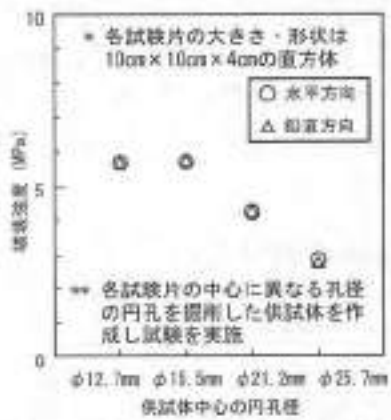


図3.3-10　二軸圧縮試験結果（等方応力作用）

さらに，同領域を対象とした三次元境界要素法解析の結果，孔径によらず各試錐孔周辺に作用している応力はほぼ同じであることが確認された（図3.3-11）。

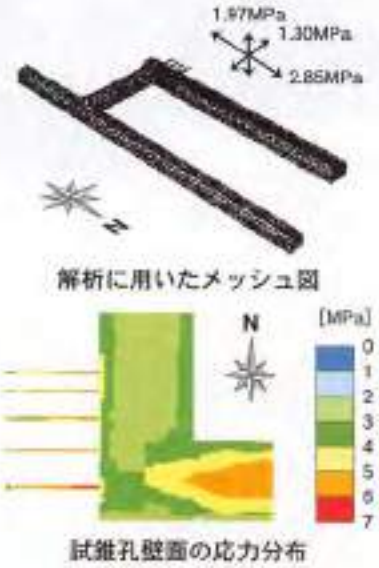


図 3.3-11　境界要素法による三次元弾性解析結果

以上の結果から，大孔径試錐孔における孔壁の破壊現象の主要因は，同地点の堆積岩が有する岩石強度のスケール効果である可能性が高いことが明らかとなった（吉川ほか，2000）。

③ まとめ

i）応力状態に関する調査研究

東濃鉱山に分布する堆積岩中の初期応力状態が，ほぼ三次元的に把握できたため，今後はその分布を解析的に評価する手法の開発を目的とした調査研究を実施する。

ii）双設坑道安定性評価試験

新規坑道掘削時の岩盤挙動予測解析で，坑道離間距離を1.0D以内に近づけることが可能であると評価され，その結果に基づき本試験のための詳細計画を策定した。平成15年度より原位置試験を開始する予定である。

iii）長期挙動に関する研究

これまでの研究により，長期間の室内クリープ試験手法がほぼ確立されるとともに，モデル化手法が整備されつつある。今後は，東濃鉱山から採取した堆積岩試料を用いたクリープ試験および過去10年間にわたり取得した長期変形挙動データの取りまとめを実施する。また，孔壁面の状態を継続的に観察するとともに，岩盤破壊のメカニズムに関する研究を進める。

参考文献

石田　毅，金川　忠（1987）：地殻応力測定結果に見られる岩盤の不均質性の影響，地震，40，pp. 329-339.

前田信行，松井裕哉（2001）：東濃鉱山における双設坑道の安定解析，サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2001-004.

Maeda, S., 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. '99 Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engineering, pp. 277-284.

吉川和夫，前田信行，松井裕哉（2000）：堆積軟岩のスケール効果と破壊現象との関係に関する一考察，平成12年度応用地質学会中部支部発表会講演会予稿集，pp. 43-46.

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

坑道周辺の地質環境に関しては，これまでに東濃鉱山において立坑および水平坑道掘削影響試験などを実施し，力学的・水理学的・地球化学的な特性や現象について，個別に評価を行ってきた。また，釜石原位置試験では結晶質岩を対象に，坑道周辺における地質環境の特性や状態変化に関する知見を取得するとともに，調査技術を開発した（サイクル機構，1999）。その結果，個々の特性や現象についての情報は蓄積されてきたものの，堆積岩については，坑道掘削により生じる地質環境の水理学的・地球化学的な状態変化と岩盤物性（弾性係数や透水係数など）の変化との関係や力学－水理－地球化学連成現象に関しては把握されていない。

本調査研究は，坑道周辺における地質環境の状態変化や連成現象を明らかにし，その概念モデルを構築することにより，坑道周辺における地質環境特性の総合的な調査・評価手法を構築することを目標とする。ここで得られた成果は，幌延深地層研究計画における坑道からの調査研究の具体化などに反映される。なお，具体的な調査の項目・内容は以下のとおりである。

i）坑道周辺水理特性調査

坑道周辺の堆積岩を対象に，三次元的な間隙水圧分布とその変化の程度の把握，および不飽和領域の現場計測手法の開発

ii）坑道周辺地球化学特性調査

坑道周辺の堆積岩を対象に，酸化還元状態の変化に関する定量的情報の取得，および概念モデルの構築

② 成果の概要

i）坑道周辺水理特性調査

長期間隙水圧観測では，東濃鉱山北延NATM坑道内に掘削した水平および鉛直上向き試錐孔（図3.3-12）において，間隙水圧測定システムを設置し観測を行った（松岡，2000，2001）。堆積岩中の間隙水圧は坑道壁面から離れるにしたがい高くなり，坑道壁面から約25m以上離れた堆積岩中ではほぼ一定である（図3.3-13）。この結果から，坑道壁面から少なくとも25mまでの領域では，坑道に向かう大きな地下水流動場が形成されていることが推定される。

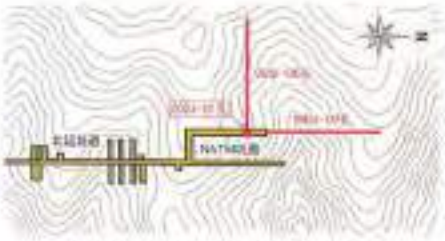


図3.3-12　試錐孔位置図

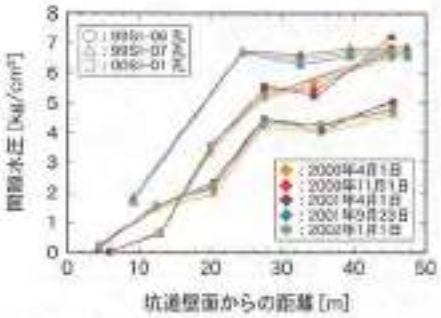


図3.3-13　間隙水圧の経時変化

また，各観測区間の間隙水圧には多少の経時変動が認められるものの，その変動は一定の範囲内に収まっていることから，坑道周辺の間隙水圧は定常状態に向かいつつあると判断される。

不飽和領域の計測手法に関する研究では，これまでに岩盤の含水量分布の計測におけるTDR（Time Domain Reflectometry）法の有効性（今井ほか，1999）や多孔質媒体内の水分移動などの解析における既存の飽和・不飽和浸透流解析コードの適用性を確認した。また，TDR法に基づき現場において不飽和領域の計測が可能なパッカー式プローブ（図3.3-14）を製作するとともに，得られた波形から誘電率を求める電磁波波形解析プログラムを開発した（西田・前村，2000；前村・得丸，2001）。このプローブの現場適用性については，東濃鉱山第2立坑第2計測坑道内における適用試験を行い確認した（細野・前村，2002）。

図3.3-14　製作したパッカー式プローブ

ii）坑道周辺地球化学特性調査

東濃鉱山調査坑道内においてウラン濃集部の坑

壁（露頭）から岩芯試料（約 10cm）を採取し，酸化・還元の指標となる化学種として鉄（全鉄含有量およびFe^{2+}/Fe^{3+}比），酸化・還元条件の変化を反映するウラン系列核種（^{238}U，^{234}U，^{230}Th）の放射能比を 1cm ごとに測定して深度プロファイルを取得した。その結果，坑道壁面から 10cm 程度までの堆積岩中の鉄含有量には大きな変化が認められないものの，坑道壁面では堆積岩内部に比べてFe^{2+}/Fe^{3+}が低いことが確認された（図 3.3-15）。一方，坑道壁面から 2cm までの堆積岩は放射非平衡（$^{234}U/^{238}U$ 放射能比＞1）の状態にあるのに対し，坑道壁面から 2cm 以深の堆積岩中では，放射平衡（$^{234}U/^{238}U$，$^{230}Th/^{238}U$ 放射能比≒1）の状態が保たれている（図 3.3-16）。

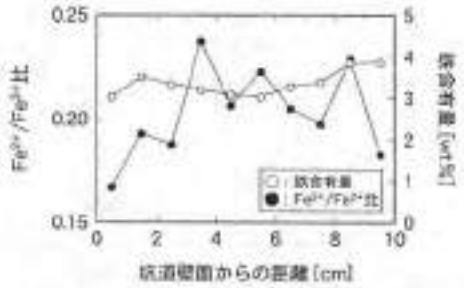


図 3.3-15　鉄含有量およびFe^{2+}/Fe^{3+}比

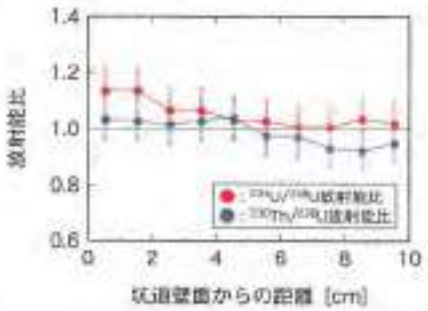


図 3.3-16　ウラン系列核種の放射能比

東濃鉱山調査坑道は開削後約 20 年経過しており，以上の結果と合わせて考えると，坑壁近傍の堆積岩中では，酸化・還元状態の変化は約 20 年間で坑道壁面から少なくとも数 cm の範囲まで及んでいる可能性が示された。

③ まとめ

ⅰ）坑道周辺水理特性調査

長期間隙水圧観測では，坑道周辺の堆積岩を対象に，三次元的な間隙水圧分布を概ね把握することができた。今後も間隙水圧観測を継続し，さらに長期的な水圧変動を観察することにより，坑道掘削により生じる水理学的状態変化についての詳細な検討を行う計画である。

不飽和領域の計測手法に関する研究では，TDR 法を用いて不飽和領域の計測を行うためのパッカー式プローブを製作し，その現場適用性を確認するとともに，得られた波形から誘電率を求める電磁波波形解析プログラムを開発した。しかしながら，現場で測定した比誘電率と岩盤の含水量との相関は不明確であるため，今後は，室内試験をとおしてその相関を把握すること，および異なる岩種への適用性を確認し，計測技術としての有効性を高めていくことが必要である。

ⅱ）坑道周辺地球化学特性調査

坑道周辺の地球化学特性のうち，酸化・還元状態の変化領域に関する予察的な知見を得た。今後は，岩石中の酸化・還元状態の指標となる化学種を非破壊で測定する手法の検討，および生物化学的調査による酸化・還元フロントの評価を行う計画である。

参考文献

細野義康，前村庸之（2002）：不飽和領域の原位置計測手法の研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；株式会社ダイヤコンサルタント），JNC TJ7400 2001-014.

今井　久，雨宮　清，加藤貴司，西田　薫，荒川博一，前村庸之（1999）：不飽和領域の原位置計測手法および解析モデルの研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；株式会社間組，株式会社ダイヤコンサルタント），JNC TJ7400 99-009.

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.

前村庸之，舟丸昌則（2001）：不飽和領域の原位置計測手法の研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；株式会社ダイヤコンサルタント），JNC TJ7400 2001-001.

松岡永憲（2000）：北延 NATM 坑道における間隙水圧計測システムの設置，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；大成基礎設計株式会社），JNC TJ7440 2000-002.

松岡永憲（2001）：北延 NATM 坑道における間隙水圧計測システムの設置，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；大成基礎設計株式会社），JNC TJ7440 2001-002.

西田　薫，前村庸之（2000）：不飽和領域の原位置計測手法研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；株式会社ダイヤコンサルタント），JNC TJ7400 2000-004.

3.4 地質環境の長期安定性に関する研究

3.4.1 研究の概要

地質環境の長期安定性に関する研究は，日本列島で生起する天然事象のうち，地層処分の観点から重要と考えられる地震・断層活動，火山活動，隆起・沈降・侵食，気候・海水準変動について，平成元年度より全国的な視点から，その時間的・地理的規則性の把握と地質環境への影響の範囲と程度に関する事例の収集を進めてきている。

① 背景と目標

本研究は，隆起・侵食，気候・海水準変動，地震・断層活動，火山活動について，過去の活動の特徴（活動の傾向・規則性，地域性，変動の速度・規模など）や影響の程度・範囲などを理解し，将来10万年程度を念頭に，それらの発生可能性の予測と地質環境への影響を評価することを目的とする（サイクル機構，2001）。

今後は，「第２次取りまとめ」までの全国的な視野での調査・研究を踏まえ，処分事業や安全規制への具体的な反映を念頭において，その基盤となる情報・技術を整備する必要がある。そのためには，各天然事象の活動規模などの予測手法，ならびに天然事象が地質環境へ与える影響の評価手法（評価モデル）の構築，それらのための調査・解析技術の体系化，予測や影響評価を裏付ける天然事象の活動様式やその影響に関するデータベースの充実，が必要である（武田，2002）。

② 実施項目と進め方

本研究では，隆起・侵食，気候・海水準変動，地震・断層活動，火山活動について，これらが複合した結果として地質環境に与える影響の評価手法を構築し，それを地下水流動研究などと連携し，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することを最終的な目的とする。現状では，個々の事象についての将来予測と影響評価の手法を検討している段階である。本研究は地球科学分野の広範かつ専門的な知識を必要とするため，引き続き多くの大学など専門家の協力を得つつ進める。

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ついて，地層処分技術の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のか（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（武田，2002）。そのための科学的基盤として，天然事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。

また，処分事業の各段階に応じた適切かつ具体的な成果の反映，ならびに安全評価の指針を策定していくうえで，天然事象の影響を把握するために必要な調査研究項目，調査仕様，手順，調査結果の評価方法などの体系化を進めることが重要である。

④ 今後の計画

「第２次取りまとめ」までは，「地層処分システムの成立に適した地質環境が我が国にも存在すること」を科学的な根拠に基づき立証するため，日本全体を視野に入れた調査・研究を進めてきた。

今後は，地層処分技術の信頼性をさらに高め，本研究の成果を処分事業や安全規制の基盤情報として反映できるよう，具体的な地質環境を念頭に置いた研究開発を推進していくことが重要である。そのため，将来の自然現象を予測するための技術の開発，実際のサイトにおいて長期安定性を評価するために必要なデータを取得するための体系化された調査技術の開発など，当面は以下の研究に重点を置いて進めていく。

- 二次元地形変化モデルの高度化
- 火山活動の長期予測モデルの開発
- 活断層の解析手法の開発
- 堆積・侵食速の算定手法の開発
- 断層周辺の破砕帯や応力などの評価手法の開発
- 伏在活断層やマグマ溜りの探査技術の開発

など

また，中・長期的には，総合的な地質環境の長期安定性評価を念頭に，地質環境長期予測手法（広域テクトニクス，古水理地質，各天然事象の複合した影響などを統合して評価する技術）の開発を目指していく（武田，2002）。

参考文献

核燃料サイクル開発機構（2001）：地質環境の長期安定

性に関する研究年度計画書（平成13年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-014.
武田精悦（2002）：地質環境の長期安定性に関する将来予測研究の課題，我が国の地質環境の長期安定性について－天然事象研究シンポジウム－委員集，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2001-016，pp. 31-35.

3.4.2 各研究の成果

1) 隆起・侵食に関する研究

① 課題と計画の概要

長期的な侵食と隆起による地形変化は，土被りの減少や地下水流動にも影響するので，地層処分の長期的な安全性を評価するうえで重要な情報である。「第2次取りまとめ」までに，侵食速度（藤原ほか，1999）と隆起速度の全国的な分布（小池・町田，2001）のデータベースが構築され，隆起速度は多くの海岸地域で 50m／10 万年未満であることや，同じ傾向の隆起が過去 10 万年から数十万年間継続していることが判明した。侵食については，ダム堆砂量から求めた侵食速度と流域の地形起伏との関係を明らかにし，その関係式を用いて，数値地図をベースに全国の侵食速度の分布図を作成した（藤原ほか，1999）。また，河岸段丘の高度分布に基づいて，氷期・間氷期を通じた 10 万年オーダーでの河川侵食のプロセスをモデル化した（高木ほか，2000）。

今後は，将来 10 万年間程度を対象とした具体的な地形変化シミュレーション技術の開発と地形変化の影響評価手法の構築を進め，その成果を地下水流動モデルの最適化に反映させる。

具体的には以下の 3 項目を進めている。

i）隆起と侵食を同時に組み込んだ三次元地形変化シミュレーション（解析メッシュ間隔 5m）技術の構築

ii）大規模な地すべり地形の全国的な分布図の作成（長さ 200m 以上のものを地理情報システム（GIS）上に登録・管理）

iii）氷期の海面低下に伴う河川の下刻量の推定法の整備（侵食の最大値を想定するうえで重要）

② 成果の概要

i）地形変化シミュレーションに関する研究

全国の流域の地形がどのような特徴を持つか（斜面の形態など），それらが地質や隆起速度とどう関係しているか，について国土地理院発行の数値地図などを用いて解析中である。また，高精度のデジタル標高モデル（DEM）の構築，斜面の侵食速度に関する事例研究などを通じて，隆起と侵食を同時に組み込んだ三次元地形変化シミュレーション（解析メッシュ間隔 5m）技術の構築を開始した。

シミュレーションの事例には，計算結果の検証を考慮して，過去 30 万年以上にわたる地形発達に関する情報が比較的豊富な，東北地方の 1 流域（約 6km×7km）を選択した。解析メッシュのサイズは解析結果に含まれる誤差，DEM 作成の労力，侵食速度に関係する地形要素の規模などを考慮して，現状で最適解像度の値を試行錯誤的に決定した。DEM は地形図（1/2500 国土基本図など）に 5m の格子をかけて，交点の標高，緯度，経度をデジタル化した。これまでにシミュレーションに必要なパラメータの決定と，それらが計算結果に与える効果などを検討し，試行的な侵食量の計算を行った。

解析期間の長さ，解析領域の広さ，および流域単位で解析するという必要性のため，プログラムを新たに作成した。地形変化は物質の移動によって起こるため，このシミュレーションでは，DEM 上の格子点に流入する物質の量と流出する物質の量の差を計算し，それを標高の変化としている。物質の移動量を決める方程式は，斜面については半野（1966a，1966b）の基本方程式を，河川については野上（1981，2000）によって考案された基本方程式を用いた。これは，物質の移動量（侵食量）は斜面や河床の勾配に比例する（比例定数 K）と経験的に仮定して，物質の収支を計算して格子点の標高変化を求める。海面変化や地殻変動は外部の境界条件として与えられる（例えば，気候変化の効果は K の値の時間的変化として組み込まれる）。

K の値は気候や地質によって異なり，斜面の形態と形成年代から計算される。この値をシミュレーションの対象地域で直接計測することは容易でないので，色々な気候条件や地質について K の値を求めておき，感度解析的に用いることにする。K の値の計測は自然斜面での実測と全国の 50m-DEM を使った数値解析で実施中である。隆起速度は段丘アトラス（小池・町田，2001）などのデータベースから与える。

シミュレーション結果の一例を図 3.4-1，3.4-2 および 3.4-3 に示す。計算の簡単化などのため以下の条件でシミュレーションした。

- 比例定数 K は時間的にも空間的にも一定
- 気候変動に伴う海面の変化および地殻変動はなし
- 谷・斜面境界位置は移動しない
- 洪水（流路が変わる可能性あり）は 500 年に 1 回
- 経過時間は 10 万年

図 3.4-1　現在の地形の 5m－DEM（陰影図）

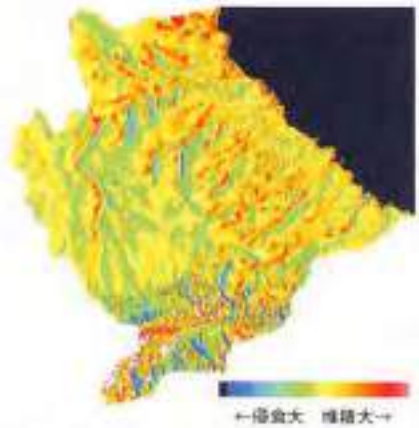


図 3.4-2　10 万年間の侵食量の分布

図 3.4-3　10 万年後の地形の 5m－DEM

今回は比例定数 K の値を試行的に与えているので，図 3.4-2 に示した侵食量の数値には相対的な意味しかない。寒色系が侵食傾向（緑→水→青の順に値が大きくなる），暖色系が堆積傾向（黄→赤→白の順に値が大きくなる）を示す。標高の変化量は最大で±50m 程度である。侵食量が大きいのは，起伏の大きい山地，傾斜の急な河川の崖などである。図 3.4-1 と図 3.4-3 を比べると，最初は階段状であった段丘崖が 10 万年後には丸みを帯びる（図の中央右よりの範囲）など，地域全体としてなだらかな地形になっている。この結果は現実の地形と比べると，谷と尾根の比高が低くなだらか過ぎる印象がある。これは，隆起を与えていないことが主因である。実際には，10 万年間の隆起量として海岸では 30～40m，内陸ではそれ以上の値が考えられ，それに相当する侵食量を加味する必要がある。海と陸の境界で，土砂を海へ流すなどの境界条件を与えていないので，海岸近くで大きな堆積が生じている点も現実と異なる。

また，図 3.4-1 の DEM に目立った人工地形や DEM 作成に関わるエラーである微小地形は，10 万年後の図では完全に消えており，このような人工ノイズは，長期的なシミュレーションでは深刻な影響には至らないことがわかった。

これまでの研究により，非常に単純化したモデルではあるが，侵食量を解析する手順とシミュレーションプログラムが整備された。また，解析上必要なパラメータと，それらが解析結果に及ぼす効果がわかった。

侵食量の分布のより現実的な見積もりのために，DEM の格子点に地質や隆起速度の情報を与える必要がある。さらに，氷期の海面低下（100m 程度かそれ以上）の効果を組み込む必要がある。また，モデルの検証を事例研究地域の地形や全国の流域の斜面形態などとの比較などによって行う。このシミュレーションモデルの改良と検証が次の課題である。

ii）日本列島の地滑り地形分布図の作成

この地滑り地形分布図は，全国をカバーする，対象としている地すべりの数が多い，縮尺が大きい（1/20 万）という点で，日本で初めての地すべり地形分布図である。また，地滑り地形の分布と地質や地形との関係を予察的に検討した。

1/20 万地すべり地形分布図（106 枚）は，既存の地すべり地形分布図を編集するとともに，資料のない範囲については独自に 1/2.5 万地形図の読図を行うことで作成した。使用した文献は，山岸（1993），地すべり学会東北支部（1992），国立防災科学技術センター（1982～2000），新潟県土木部砂防課（1982），鈴木ほか（1984），岡田・東郷（2000），九州活構造研究会（1989），大森・須貝（1994），千葉県（1997），である。これらのデータから編集

した地すべり地形の全国分布図を図3.4-4に示す。

地すべり地形の分布と地形・地質との関係の解析は，地質や地すべりの分布サイズなどを考慮して2kmのメッシュで行った(全国90,661メッシュ)。地質は，地質調査所（1995）の1/100万数値地質図から，黒田（1982）の地質区分を参考に15区分に編集した。比高，平均傾斜，平均標高を国土地理院（1997，1999）の数値地図50mメッシュから，高度分散量を藤原ほか(1999)をもとに算出した。

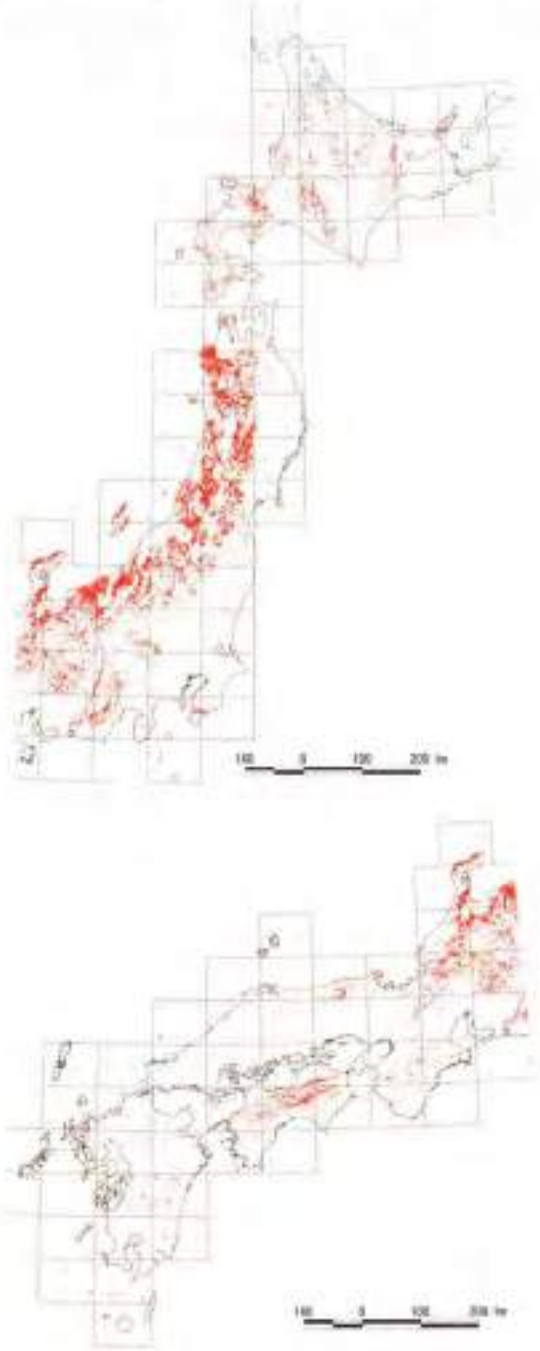


図3.4-4　地すべり地形の全国分布図

地すべり地形を含むメッシュを「地すべりメッシュ」，面積の40%以上を地すべり地形が占めるメッシュを「多地すべりメッシュ」と名づけた。地すべり地形が卓越する地質（地すべりメッシュの割合が50%以上）は，新第三紀海成堆積岩，中新世火山岩類（グリーンタフ），古第三紀～新第三紀火砕層，白亜紀堆積岩である。これらの地質区分では，多地すべりメッシュの割合は平均7.3%で，全国平均値（2.8%）の約3倍である。鮮新世火山岩，結晶片岩，超塩基性岩でも地すべりメッシュの割合が40%を越え，後2者は破砕帯や変成帯に地すべり地形が多いことを示す。

比高との関係では，地すべりメッシュは比高200～1,000mの区間で多く，比高がそれ以下でもそれ以上でも顕著に少ない。また，多地すべりメッシュは比高300～700mの区間に集中する。

平均傾斜との関係では，地すべりメッシュは平均傾斜15°と40°の間に集中する。多地すべりメッシュは，その約4割が平均傾斜20°～25°の区間に集中し，平均傾斜10°以下と40°以上には存在しない。

高度分散量（地形起伏の強弱の指標であり，地形物質の位置エネルギーの分布状態を示す）との関係では，地すべり地形は高度分散量40～100mに集中し，正規分布に近い形を取る。高度分散量が大きい場所（とくに110m以上）では，地形変化プロセスとして地すべりではなく，崩壊や河川・沢による侵食が卓越していると考えられる。

傾斜や比高は高度分散量と相関が高いので，これらの値がある程度以上大きいところでは，地すべり地形は少なくなると考えられる。

データの品質保証の観点から，判読方法や判読者の違いなどによって，地すべり地形の抽出にどの程度の差異が生じるかを調査・確認中である。

iii）河川の下刻プロセスに関する研究

既存のボーリングコア（深度200～600m）を用いて，^{14}C年代測定，粒度分析などを行い，完新世を通じて木曽川などからの土砂のフラックスがどのように変化したかを検討した。これは，上流側における侵食の量と，下流側における堆積量を見積もるためのデータである。また，現地調査により，濃尾平野（西半分）における現在（江戸時代の治水事業以前）の堆積物の分布（粒度，電気伝導度など）を調査した。これは，現在の河川でどのような土砂の運搬・堆積が起こっているかを明らか

にするためである。

コアから復元される過去の土砂のフラックス変化を，現在の土砂運搬・堆積プロセスに関するデータと比較することにより，最終氷期以降の沖積平野における侵食・堆積の営力の変化を復元し，それを参考に下刻などの河川プロセスを推定することが課題である。最終的には，コアのある第四紀後半全体について，海水準変動と下刻などとの関係を明らかにする予定である。

③ まとめ

地形変化予測のために必要なモデルやパラメータが明らかになったので，今後は，東北地方を事例とした地形変化シミュレーションの研究を軸に，地質，気候の違いや地殻変動をも取り込んだより現実的な地形変化モデルを構築する。さらに，海水変動に伴う下刻や海岸地形の変化を取り込んでモデルを高度化する。

この技術をもとに，東濃地域について作成した5m解像度のDEMを使った地形変化シミュレーションを行う。東濃での事例研究を広域地下水流動などの研究とリンクさせて，長期的な地下水流動の変化の解析に資することが研究全体の課題である。

参考文献

千葉県（1997）：千葉県の自然誌 本編2 千葉県の大地 県史41，第1章 地形 第5節 地すべり地形，pp. 55-70

地質調査所（1995）：100万分の1日本地質図第3版CD-ROM版，数値地質図 G-1.

鈴木 浩，三箇智 二，大森博雄（1999）：日本列島における侵食速度の分布，サイクル機構技報，No. 5（1999. 12），pp. 85-93.

平野昌繁（1966a）．斜面発達とくに斜層定発達の数学モデル，地理学評論，39，pp. 324-336.

平野昌繁（1966b）．斜面発達の数学モデルに関する若干の補足，地理学評論，39，pp. 606-617.

地すべり学会東北支部（1992）．東北の地すべり・地すべり地形一分布図と技術者のための活用マニュアル，20万分の1地すべり地形分布図27葉，マニュアル142p.

小池 一之，町田 洋 編（2001）：日本の海成段丘アトラス，東京大学出版会，105p.，3CD-ROMs.

国土地理院（1997，1999）：数値地図50mメッシュ（標高）．CD-ROM版，日本I（北海道），日本II（東日本），日本III（西日本）．

国立防災科学技術センター（1982～2000）：地震科学技術研究資料，5万分の1地すべり地形分布図.

黒田和男（1982）：日本の地すべりと地質構造，アーバンクボタ，20，pp. 37-42.

九州活構造研究会（1989）：九州の活構造，東京大学出版会，553p.

新潟県土木部砂防課（1982）：空中写真による地すべり地形判読，16sheets.

野上道男（1981）：河川縦断面形発達過程に関する非定数係数拡散モデル，地理学評論，54，pp. 354-358.

野上道男（2000）：日本の地形と隆起速度．日本地形学連合2000年大会要旨集，p. 371.

大森博雄，新井房夫（1994）：地すべり土塊の形態的特長とその地形学上の意義，地形，15，pp. 1-16.

河田清正，東郷正美 編（2000）：近畿の活断層，東京大学出版会，395p.

鈴木哲和子，長井二郎，関時男・・（1984）：能登半島，20万分の1地すべり地形分布図，国土地理院.

高木俊男，相田 潔，藤原 治，小澤昭男（2000）河岸段丘から推定した河床変動の歴史，地学雑誌，109，pp. 366-382.

山岸宏光 編（1993）：北海道の地すべり地形，北海道大学図書刊行会，392p.

2) 気候・海水準変動に関する研究

① 課題と計画の概要

「第２次取りまとめ」までに，氷期・間氷期を通じた気温，降水量，海水準の変動幅を文献調査により整理した。氷期には年平均気温が数℃～10℃程度低下し，100m 程度の海面低下が起きたことや，地域によっては降水量が現在の半分程度であったことなどが判明した（松末ほか，2000）。また，氷期の北海道を例に永久凍土の形成深度をシミュレーションし，想定される最大深度が 130m 程度であることを見積もった（松末ほか，2000）。

今後は，降水量・気温などの変動規模や，とくに氷期に北海道で形成が想定される永久凍土について，その規模と影響をより現実的に見積もる知見と技術を蓄積し，その成果を地下水流動モデルの最適化に反映させる。

② 成果の概要

i）永久凍土が地質環境に与える影響調査

気候条件が異なる北海道の 5 地域を事例に，永久凍土の層厚とその時間変化について，コンピュータシミュレーションを行った。古気候と地質断面（地下 300m 程度まで）のデータがともに揃うことを条件に，剣淵盆地（北海道北部），富良野盆地（北海道中央部），石狩平野（北海道西部），黒松内低地（北海道南部），十勝平野（北海道東部）を対象とした。シミュレーションの対象期間は，最終氷期の最寒冷期（約 20,000 年前）を挟む過去 3 万年間で，気温低下に伴う永久凍土の成長と，その後の気温上昇に伴う永久凍土の融解過程を解析した。

永久凍土は水の凍結温度（＝0℃）以下の温度を保つ地層であるから，ある気候条件下での永久凍土の厚さは，地中の温度分布から計算できる。この問題は地表面温度を境界条件として与え，その結果生じる地層中の熱の流れを解くという，熱伝導の計算である。計算プログラムは複数存在するが，ここでは我々の研究で永久凍土の形成・融解過程を正確に再現できることが検証されているプログラム「Paleo-Permafrost」を用いた。

解析作業は，①過去 3 万年間の気温変遷の整理（花粉分析結果の取りまとめによる），②地質断面図の作成（文献調査による），③シミュレーションの実施，④シミュレーション結果の評価，の手順で行った。

本研究では，気温，積雪条件，地質条件などを考慮した感度解析を行った。古気温は，花粉分析から想定される最高値と最低値の両方をシミュレーションに用いた。熱伝導率の低い積雪は，断熱効果によって永久凍土の形成を妨げる。積雪深は，現在の北海道における値を最大値とし，その 50%の場合と，極端な例として積雪ゼロの場合を想定した。氷期には降水量が現在より少なかったことが知られているので，これは妥当な仮定である。熱伝導率は地質によっても異なるので，地下の地質分布は永久凍土の厚さに大きく寄与する。文献調査で求めた各地質の代表的な熱伝導率を地質断面に当てはめ，地下の熱伝導率の分布図を作成して，シミュレーションに用いた。このほかに，凍結と融解に伴う潜熱の効果や，地殻熱流量なども考慮した。

北海道北部剣淵盆地を例とした解析結果の一例を図 3.4-5 および 3.4-6 に示す。これらの結果は，気温は想定される最低値で，現在と同程度の積雪がある場合と全くない場合を示している。積雪ゼロで寒気にさらされた場合は，最大で厚さ 250m 程度，積雪 1.5m の場合は 200m 程度の永久凍土の発達が想定されるが，3m 程度の積雪があると数 m の季節凍土（冬は凍結しているが夏は融解する）しか形成されない。

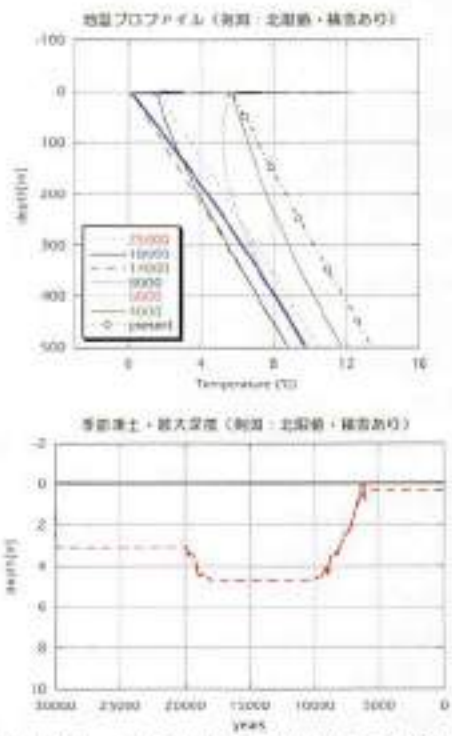


図 3.4-5　北海道北部剣淵盆地の解析例
（積雪ありの場合）

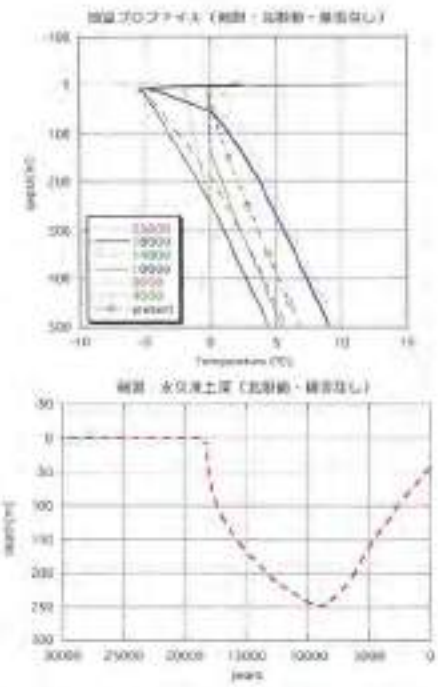


図 3.4-6　北海道北部剣淵盆地の解析例
（積雪なしの場合）

復元された古気温データからは，最終氷期でも道央から道南にかけては年平均気温が 0℃を下回ることがほとんどなく，これらの地域では永久凍土が発達する可能性は低い。一方，長期間，年平均気温が0℃を下回っていた剣淵・富良野・士勝では，厚さ 100m 近い永久凍土が形成されていたと想定される。また，気温がほぼ同じ剣淵に比べ，厚い泥炭層の分布する富良野では凍土の発達が悪い。これらの事例から，永久凍土の発達に関して積雪と地質が非常に重要であることがわかる。

また，いずれの場合も想定される古気温の最高値を与えた場合には永久凍土は発達していない。このことから，北海道の気候環境は，常に永久凍土帯に含まれるか否かの境界付近にあったと言える。過去に永久凍土が地下深くまで形成されたか否かは，境界条件の微妙な違いによって結論が異なるが，現在，高山の一部を除き永久凍土が見られないことを考慮すると，あまり深い永久凍土が存在したとは考え難い。この結果は，化石凍結割れ目のサイズや分布から復元された北海道における最終氷期の永久凍土の分布状況（三浦・平川，1995）と整合的である。

次の氷期に形成される永久凍土の厚さを本研究の結果から予測することの妥当性は，第四紀後半については氷期・間氷期の周期と気温の変動幅が比較的一定しており，次の氷期の気温を復元された最終氷期の気温で近似できることから支持される。

今回の研究により，永久凍土の厚さを解析する手順とシミュレーションプログラムが整備された。また，解析上必要なパラメータと，それらが解析結果に及ぼす効果がわかった。

凍土の厚さの最大値（最小値）が見積もられたので，これらを境界条件として，地下水流動などへの影響を感度解析的に見積もることはある程度可能と考えられる。凍土の厚さの分布のより現実的な見積もりを得るために，積雪条件などをもう少し細かく設定して調査する。

ii）年縞堆積物を利用した気候変動に関する研究

将来，どのようなタイミングで気候変動が起きるか，また，気温や降水量の変動がどの程度の規模になるかを予測することは，地下水の涵養量や侵食量を推定するうえで重要な情報である。気候変動の正確な予測のためには，時間分解の高い過去の履歴が必要であり，1年ごとに形成された縞模様を持つ堆積物（年縞堆積物）が重要な手がかりとなる。

年縞堆積物が年単位での気候変動を記録しており，その組成変化が寒・暖や乾・湿の指標となることは広く知られている（福沢，1995）。しかし，年縞堆積物がどのようなプロセスで形成されるかについては議論がある。そのプロセスを解明し，縞模様が確実に1年に1セットできることを検証することが，年縞堆積物を使った研究の信頼性を確保する前提として必要である。

福井県水月湖などで採取した年縞堆積物（ピストンコア）から薄片を作り，顕微鏡観察や化学組成分析などを行って，年縞とされる縞状堆積構造が化学組成の異なる鉱物や種類の異なる珪藻の集積した薄層が規則的に重なっていることを確認した。それぞれの鉱物の析出や珪藻の生息に適した湖水の化学条件から，各薄層の形成環境を復元した。各薄層の重なり方から，春・夏・秋・冬の季節の移り変わりが縞模様を作る主要因と確認された。そのほかにも，湖への海水の侵入による水質の変化なども縞模様を作る原因となることがわかった（Fukusawa et al., 2002）。

③ まとめ

凍土の厚さのシミュレーション手法が整った。

また，年縞堆積物の有効性が確認された。永久凍土の形成によって地質環境に生じる影響を把握することが次の課題である。このために，不透水層である永久凍土の形成下での地下水流動などの特徴について，現在永久凍土が分布する地域の事例を収集する。また，凍結が地層の物性に与える変化を文献などから整理し，地層中に割れ目の形成などが生じる可能性を検討する。

また，年縞堆積物を用いて，最終間氷期以降の日本列島周辺の気候変動に関するデータを取得することが課題である。

参考文献

福沢仁之（1995）天然の「時計」・「環境変動検出計」としての湖沼の年縞堆積物，第四紀研究，34，pp.135-149.

Fukusawa, H., Kato, K. and Fujiwara, O. (2002). Changes of eco-systems in the last 500 years caused by human impacts in Lake Suigetsu, central Japan. (in prep)

松本英二，藤原　治，末吉哲雄（2000）：日本列島における最終氷期最寒冷期の気候，サイクル機構技報，No.6（2000.3），pp.93-103.

・前勇樹，宇川　彰（1995）：北海道北・東部における化石炭結割れ目構造の起源，地学雑，104，pp.189-224

3) 火山活動に関する研究

① 課題と計画の概要

「第２次取りまとめ」までに，第四紀火山の分布と噴火年代などに関するデータベースを作成し，（第四紀火山カタログ委員会編，1999），これをもとに火山活動の場所と時間的変遷を明らかにし，火山活動が第四紀を通じて限られた地域で繰り返していることなどを確認した。

地熱に関しては，ボーリングデータから編纂した地温勾配図（矢野ほか，1999）をもとに，火山からの距離と地温勾配との関係を解析し，火山活動の影響による高温異常域の範囲は，火山の噴出中心から10～20kmであることを明らかにした（梅田ほか，1999a）。また，火山活動による地質環境への影響について文献調査や数値解析を行い，熱的・水理学的・地球化学的影響の範囲が，火山の噴出中心から数km～20km程度であることなどの事例を整理した（梅田ほか，1999b；小松・梅田，1999）。

今後は，火山活動が生じる可能性のある地域の予測手法や，火山活動が周辺の地質環境に及ぼす影響を把握する手法を整備する。このため，物理探査などを利用した地殻温度構造の解明，地球化学的手法による地下の熱源の解明，年代測定などによる単成火山の時空分布の把握などの事例研究を進める。また，マグマの貫入，大規模火砕流，地熱・熱水などが周辺岩盤や地下水流動へ及ぼす影響の程度とその範囲に関しても調査・研究を進める。

② 成果の概要

ｉ）非火山地域における地熱異常に関する調査研究

紀伊半島南部地域は，第四紀の火山活動地域でないにもかかわらず，湯の峰温泉（泉温92.5℃）をはじめとする高温の自噴温泉が分布している。このような非火山地域における地温異常の原因やメカニズムを明らかにするため，紀伊半島南部地域の地下20～30kmにおける地殻の温度構造を推定することを目的として，MT法電磁探査（ファーリモートリファレンス方式）による比抵抗構造調査を行った。なお，この調査は概査であり，広域的な深部比抵抗構造とともに，調査地域のノイズ環境やリモートリファレンスの効果を把握することを主眼に置いた。

調査は，紀伊半島南部の和歌山県東牟婁郡本宮町を含む東西約50km，南北約40kmの範囲（図3.4-7）を対象に，平成13年11月中旬～12月上旬に実施した。観測は16点（測点間隔10～20km）において，磁場３成分，電場２成分を測定した。鹿児島県大口市（調査地域からの距離約500km）に設置した固定点とのリモートリファレンス処理の結果，地磁気活動が活発な日には，ほとんどの測点においてS/Nの高いデータが取得でき，周期1,000秒程度までのインピーダンスを求めることができた。

取得データをOgawa and Uchida（1996）のアルゴリズムを用いて二次元解析を行うことにより，深度30kmまでの比抵抗構造を精度良く求めることができた。得られた比抵抗構造より，半島中部～東部の地表付近から深度20kmにわたって西に傾斜する高比抵抗部（約100～1000Ω・m）が南北に連続して存在することがわかった。また，高比抵抗部の西側の深度10km付近には西に緩く傾斜する極めて比抵抗が低い層（約1～10Ω・m）の存在が明らかとなった（図3.4-7）。

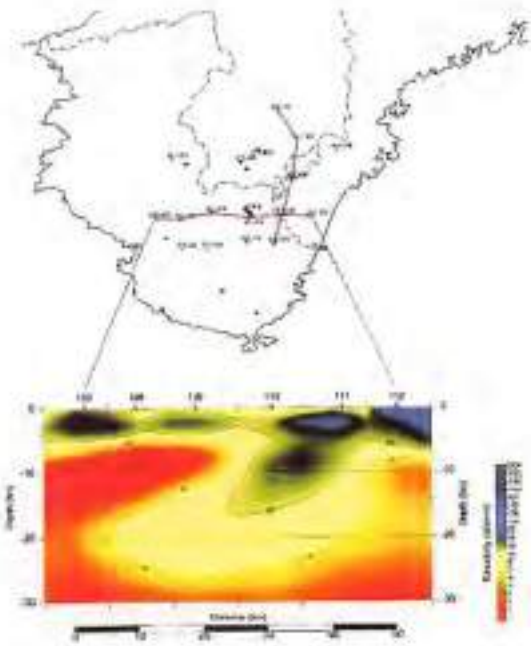


図3.4-7　紀伊半島南部の比抵抗構造

また，Wakita et al.（1987）が指摘したヘリウム同位体比（$^3He/^4He$）の高異常域（近畿スポット）の範囲を検証するため，温泉ガスを７地点で採取し，$^3He/^4He$と$^4He/^{20}Ne$を測定した。試料採取地点は，岩屋（兵庫県），白浜，串本（和歌山県），湯泉地，平城宮（奈良県），奥香肌峡（三重県），海

津（岐阜県）である。Wakita et al.（1987）は，$^3He/^4He$ が大気の値（1.4×10^{-6}）の2倍である 2.8×10^{-6} 以上の範囲を「近畿スポット」としており，今回測定した $^3He/^4He$ を同様に区分した（図 3.4-8）。

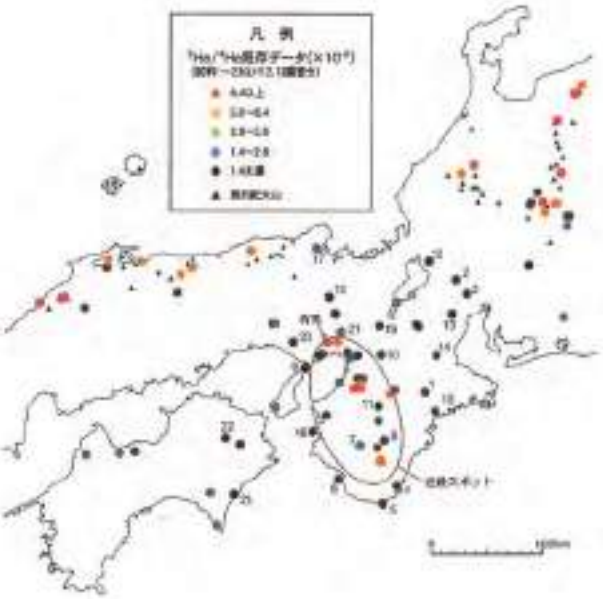


図 3.4-8　紀伊半島でのヘリウム同位体比分布

その結果，「近畿スポット」の外側の東方から南方にかけて $^3He/^4He$ が高く，「近畿スポット」は実際にはより広い範囲を示すといえる。また，淡路島の岩屋と濃尾平野の海津で $^3He/^4He$ が低く，高異常域の範囲を限定するデータが得られた。

今後，紀伊半島南部地域の高温泉のメカニズムについて，深部比抵抗構造を基に，低周波微動，震源分布，地震波速度構造，重力異常などの地殻構造などに関するデータに基づき総合的な調査・検討を進めるとともに，近畿・四国地方において温泉ガスの $^3He/^4He$ の追加測定を行い，前弧側における $^3He/^4He$ 高異常の成因についての検討を行う。

ii）西南日本の単成火山群の時空分布に関する調査研究

中国地方の日本海側に分布する新第三紀以降のアルカリ玄武岩からなる単成火山群を対象として（図 3.4-9），その活動の時空分布を事例的に把握するとともに，マグマの上昇プロセスや火山活動の規制要因などについての検討を開始した。

平成 12～13 年度には，中国地方日本海側の単成火山群のひとつである島根県と鳥取県の県境部に分布する横田単成火山群を調査対象に，時空分布などの検討を事例的に行うため，火山岩の K-Ar 年代測定および化学組成分析を実施した。横田単成火山群は約 20×25km の範囲に分布する 18 岩体とこれに付随するいくつかの小岩体からなっている。

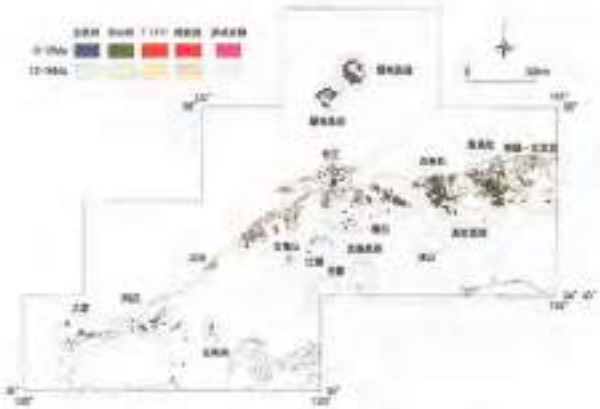


図 3.4-9　中国地方の火山岩分布

調査の結果，以下のような特徴が明らかとなった。

- 横田単成火山群は，古期ステージ（2.2～1.6Ma）と新期ステージ（1.3～1.0Ma）の大きく二つの活動ステージに区分でき，両者の活動の間には約 0.3Ma の活動のない期間が認められる。
- 古期ステージ（2.2～1.6Ma）は，中津谷北岩体とその南西の比較的狭い範囲（約 10km）に活動域が限られる。
- 新期ステージ（1.3～1.0Ma）は，活動域の拡大が認められ，中津谷北岩体を中心として，南西側 20km，北東側 20km の範囲に拡張している。活動は中心部でも認められ，同心円状の拡大と活発化で特徴づけられる（図 3.4-10）。
- 若い活動ほど周辺部への拡大が認められ，活動範囲の最大は直径約 40km である。また，マグマ噴出量からみると後期の活動の方が大きい（例えば，越敷原岩体など）。

今後，単成火山のマグマ上昇プロセスを明らかにするため，中国地方における単成火山群の研究事例を充実させ，火山岩の岩石学的性質について，希土類元素，同位体などの挙動や鉱物分析などから詳細に検討する。また，火山活動の発生はマントルの熱構造とスラブとの相互作用が重要な鍵となっている可能性が高いことから，単成火山下の地下温度構造（マグマ溜まりや部分溶融状態など）に関する地球物理学的データと火山分布との総合的な検討を進める。

図 3.4-10　横田単成火山群の時空分布

iii）日本列島における大規模火砕流の特徴と基盤岩への熱的影響解析

過去に生じた大規模火砕流では，その堆積物が覆う範囲は現在の火山活動域より広範囲に及んでおり，給源から数十 km，場合によっては 100km 以上に及ぶことがある（図 3.4-11）。したがって，大規模火砕流の発生によって遠く離れた地下深部の地質環境が大きく乱されるとは考えにくいものの，高温の火砕流が堆積することによって基盤岩が被る熱的影響の程度を検討しておくことは必要である。

図 3.4-11　日本列島の第四紀火砕流堆積物分布

このため，日本列島において第四紀に発生した大規模火砕流の特徴について，文献調査によりとくに規模や年代の観点から整理するとともに，それらの情報に基づいて，火砕流の堆積による基盤岩への熱的影響について数値解析による検討を試みた。

火砕流堆積物に関するデータ収集にあたっては，「第四紀火山カタログ」（第四紀火山カタログ委員会編，1999）および「火山灰アトラス」（町田・新井，1992）に基づいて，大規模火砕流として 55 給源・108 岩体を抽出し，特徴を整理した。また，火砕流が基盤岩に堆積した際に，深度方向にどの程度の熱的影響が及ぶのかを推定するために，Kamata et al.（1993）の計算式を用いて一次元熱伝導数値解析を行った。

おもな結果は，以下のようにまとめられる。

- 噴出量が 100km³ 以上と見積もられる第四紀の大規模火砕流は非常に限られており，このうち最大規模のものは阿蘇 4 火砕流（600km³ 以上と推定）である。
- 火砕流の噴出量や噴出年代，周期には地域ごとに異なった特徴や傾向が認められる。これは各地域のテクトニクスの変化やマグマ供給・上昇メカニズムの違いを反映していると考えられる。
- 火砕流堆積による基盤岩への熱的影響に関する一次元熱伝導数値解析の結果，火砕流堆積物の層厚が大きいほど，ある温度に上昇する基盤中の最大深度はより大きく，ある温度の継続時間はより長くなり，基盤中の熱が数百年以上の長期間にわたって保存されることが推定された（図 3.4-12）。
- 解析結果では，例えば火砕流の堆積（定置温度 900℃）が 100m を超えた場合には，基盤深度 100m の場所で堆積時より約 200 年後に 100℃に達し，その後，100℃以上の温度が継続する時間は 600 年間程度と推定された。

なお，第四紀の大規模火砕流として例外的に規模の大きな阿蘇 4 火砕流の場合においても，給源より 40km 以上離れた場所においては，火砕流堆積物の層厚が数十 m を超すような箇所は極めて限られている。

また，数値解析では降雨などによる冷却効果を考慮に入れていないため，長期安定性の観点からは「保守的推定値」ということができる。したがって，現実的には，大規模火砕流に覆われた基盤の温度上昇は，火砕流堆積物と基盤岩の境界から

300m 以深については，無視できる程度に小さいという結果が得られている。

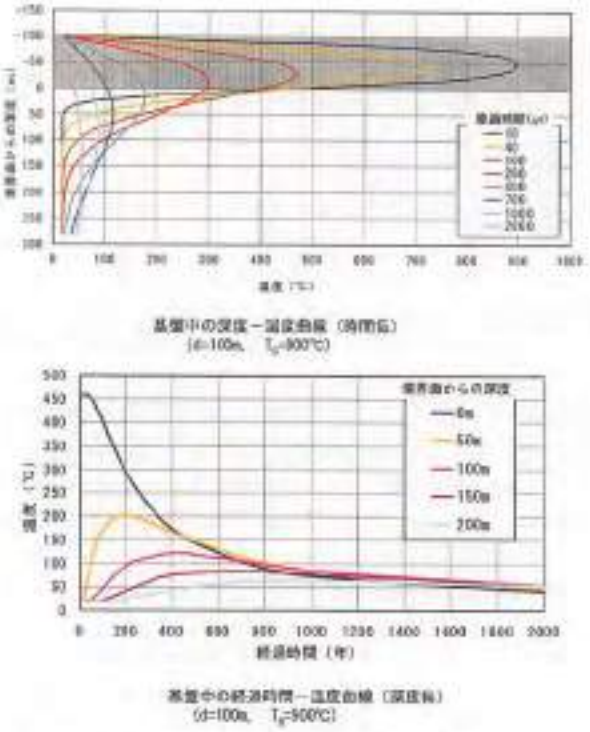


図 3.4-12　一次元熱伝導数値解析の例

今後は，大規模火砕流による基盤への熱的影響の熱伝導数値解析結果の妥当性を確認するために，火砕流堆積物と基盤岩の境界が直接観察できる場所において試料採取を行い，熱年代学的手法（鉱物のフィッション・トラック長解析）により基盤岩の温度上昇の程度を見積もる予定である。

iv）日本列島における火山周辺の酸性地下水分布

火山活動が周囲の地質環境に及ぼす影響として，マグマに含まれる揮発性物質が熱水や火山ガスとして混入し，地下水の地球化学的特性が変化する可能性がある。このような地球化学的変化の範囲については，「第２次取りまとめ」などにおいて，仙岩地域など幾つかの火山周辺地域において，火山からの距離と温泉水の pH との関係の検討を行い，酸性地下水は火山から数 km～10km 程度までの領域に分布することを示した。これらの知見を補足するため，全国規模で温泉水や地下水の地球化学的特性について取りまとめた「温泉・地下水化学データベース」を活用し，日本列島全域を対象として，火山活動に起因すると考えられる酸性地下水の分布に関する検討を行った。

「温泉・地下水化学データベース」は，日本列島各地に存在する温泉などでの地下水の採水位置・水源種別・湧出量・化学分析値・pH・利用目的などについて，公表文献や各県の衛生研究所発行の報告書などでの記載値約 20,800 件を取りまとめたものであり，全体の約半数は温泉または鉱泉に関連する測定データにより構成されている。また，本データベースに含まれる約 10,400 件のデータには，文献中の採水位置図を基に求めた緯度・経度を記載しているため，日本列島全域における広域的な地下水水質の空間的特徴を解析することが可能である（図 3.4-13）。

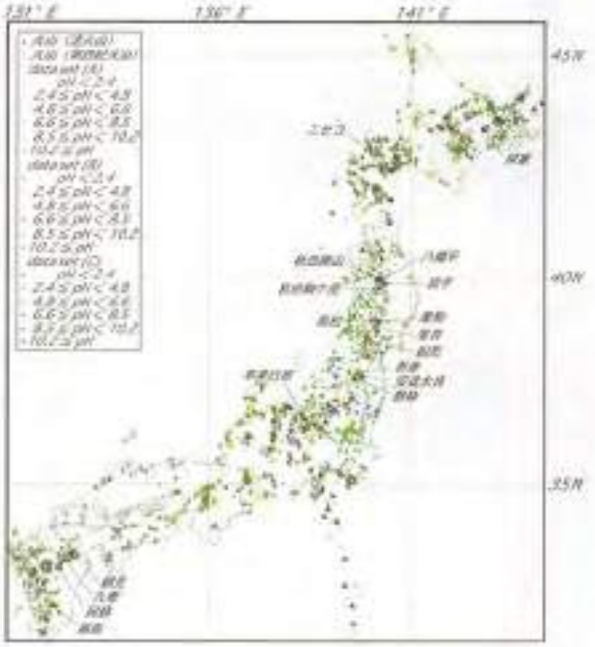


図 3.4-13　日本列島の地下水 pH 分布

日本列島における地下水の pH と火山からの距離との相関を検討した結果を以下にまとめる。

- 個々の火山から遠ざかるにつれて pH が高くなる傾向が見られ，pH＜4.8 の酸性地下水データは火山からの距離が数 km～20km 程度まで継続してみられた。
- pH＜4.8 の酸性を示すデータが存在する空間的範囲は各々の火山によって異なることから，火山周辺の地下水水質は火山の活動度や活動形態，地下水・熱水流動系などに依存すると推定される。
- 日本列島全域を対象とした解析結果でも個々の火山を対象とした解析結果と同様の傾向がみられ，火山活動に起因すると考えられる pH＜4.8

の酸性地下水データの分布範囲は，火山を中心として 20km 程度まで広がっている（図 3.4-14 および 3.4-15）。

・今回の解析結果は，データの偏在性や火山の活動度や活動形態などにも依存していると考えられるため，個々の火山や火山地域に対して個別に検討を行う際には，火山の活動特性に留意し，空間密度の高いデータを収集したうえで解析を行う必要があると考えられる。

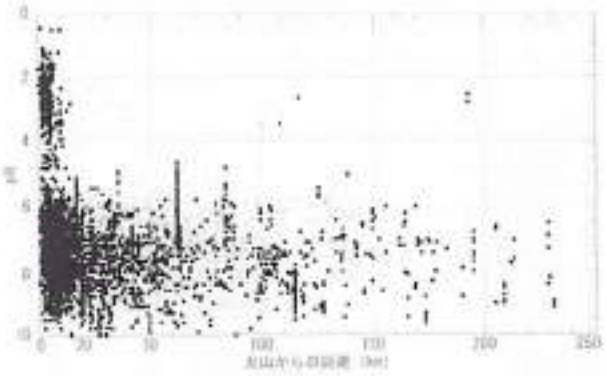


図 3.4-14　pH データの火山からの距離との関係

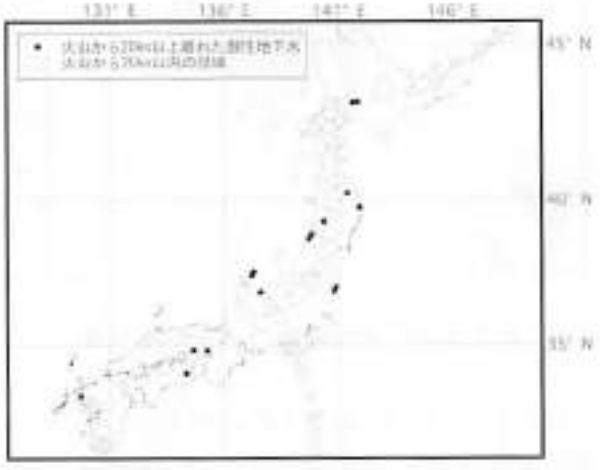


図 3.4-15　火山から 20km 以上離れた酸性地下水

③ まとめ

火山の活動範囲や地質環境への影響の調査法が整いつつあり，今後は予測や影響評価の確実性をさらに高めるために，上記の研究で判明した火山以外の地温異常や酸性地下水の原因や，単成火山の成因・メカニズムについて検討を進める。

参考文献

第四紀火山カタログ委員会編（1999）：日本の第四紀火山カタログ（CD-ROM 版），日本火山学会。

Kamata, H., Suzuki-Kamata, K. and Bacon Charles R. (1993) : Deformation of the Wineglass Welded Tuff and the timing of caldera collapse at Crater Lake, Oregon, Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 56, pp. 253-266.

小松　亮，梅田浩司（1999）：日本列島における温泉・熱水変質帯について，サイクル機構技報，No. 4（1999. 9），pp. 121-128.

町田　洋，新井房夫（1992）：火山灰アトラス，東京大学出版会，276p.

Ogawa, Y. and Uchida, T. (1996) : A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, Geophys. Jour. Inter., 126, pp. 69-76.

梅田浩司，小松　亮，中司　昇（1999a）：坑井データによる地下温度構造の推定，サイクル機構技報，No. 2（1999. 3），pp. 29-36.

梅田浩司，小松　亮，江原幸雄（1999b）：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と熱流量，地熱，36，pp. 219-237.

Wakita, H., Sano, Y. and Mizoue, M. (1987) : High ^{3}He emanation and seismic swarms observed in a nonvolcanic, forearc region, Jour. Geophys. Res., 92, pp. 12539-12546.

矢野雄策，田中明子，高橋正明，大久保泰邦，笹田政克，梅田浩司，中司　昇（1999）：日本列島地温勾配図（1:3,000,000），地質調査所。

4) 地震・断層活動に関する研究

① 課題と計画の概要

「第２次取りまとめ」までに，空中写真判読などにより地形的に明瞭な活断層のみを抽出した「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）を作成し，地域による活断層の分布密度や活動のタイプの違いなどを解析した。また，テクトニクスと断層活動との関係を分析し，大半の活断層が過去数十万年間，同じ傾向で活動を続けてきたことを明らかにした。さらに，活断層の地下深部構造や活動場の移動範囲について事例研究を行い，とくに低角逆断層において活動場の拡大範囲が数十万年で数 km 程度であるなどの事例を整理した。

断層活動による力学的影響範囲については，断層の分布性状（規模）と断層破砕帯の幅との関係などの情報を整理した。地震による地下水への影響については，地震前後での地下水位の変化の観測結果から，その変動幅は通常認められる季節変動よりも小さく，数ヶ月程度で元のトレンドに戻ることなどを明らかにした（Shimizu et al., 1996；Ishimaru and Shimizu, 1997）。

地震発生に関する研究（アクロス研究）の目的は，地下 20km 程度の深さにある地震発生場の連続監視観測を実現する技術（アクロス）を開発実用化することである。アクロスとは，精密制御定常信号システムの英語訳（Accurately Controlled Routinely Operated Signal System）の頭文字を繋いだもので，わが国の独創的新技術である。なお，アクロスは汎用性が高く，地震発生場である地下 20km 程度の深部観測に実用化される以前においても，処分事業の様々な段階で必要とされる地下 2km 程度までの高精度・高分解能の地下調査技術への応用が可能である。

活断層帯での地殻活動研究では，活断層帯における構造と変動特性を把握するために，跡津川断層帯において，活断層を貫く坑道を利用し，地震波の伝播，断層岩の観察，物性の変化および地下水流動や化学的特性などの総合的な調査，さらに広域地震や GPS 観測を行った。その結果，跡津川断層帯でのクリープ領域の性質を明らかにするとともに，活断層の顕著な影響が活断層破砕帯の外側数百 m～数 km までに及び，その影響が距離とともに減ることを示した。平成 13 年度からは，平成 12 年度までに開発・蓄積した観測機器と観測技術を活用して観測網を展開し，跡津川断層帯を事例とした活断層の形成・発達史ならびに運動様式の解明や地下深部の常時監視手法の開発を進めている。なお，坑道を利用した調査は，平成 13 年７月に中止した。

② 成果の概要

ⅰ）日本周辺の海域地質構造発達に関する調査研究

将来の長期的な断層の活動性を推定するためには，陸域のみならず海域における第四紀の断層の活動性，活動履歴を把握する必要がある。このため，旧地質調査所や石油公団および DSDP（Deep Sea Drilling Program），ODP（Ocean Drilling Program）などで取得された音波探査記録データおよび試錐データなどのコンパイル作業を実施し，日本列島周辺海域の地質構造とその発達史に関する情報の取りまとめを行った（徳山ほか，2001）。

データのコンパイル作業においては，音響地殻断面記録をコアデータとし，海底地形図およびそのほかのデータセットを統合した断層判定の基準を作成した。この基準に基づき，日本周辺海域中新世最末期以降の断層を総計 776 個認定した。776 個の断層の内，第四紀以降において活動的な断層は 753 個である。断層データ解析により，日本周辺海域で現在進行中のテクトニクス，つまり，南海トラフでの斜め沈み込み，沖縄トラフでのリフティング，日本海東縁から山陰沖における東西圧縮，オホーツク海－千島弧西端－日本海溝での東西圧縮，伊豆・小笠原弧のリフティングの大枠は 300 万年前，古くとも 600 万年前には確立した事が明瞭となった。

断層解析に際しては現時点で最も高解像度のデータセットを使用したが，いくつかの点で依然として問題が残されている。第一は断層活動の年代である。第二は断層の空間的広がりである。

年代については，使用可能なデータが少ないこと，およびその精度に難点があることである。また，空間的広がりについては，音響地殻断面の測線間隔が広いために，断層地形が海底表層堆積物によって覆われている場合，測線間隔の密度は断層の空間的広がりを精度よく求めるには，通常不十分である。さらに，海底面で識別される断層であっても，陸域断層との連続性を吟味する際には，沿岸域のデータが極めて少ないことから，精度の良い解析は困難である。

今後，断層活動の時代軸決定のための簡便手法の開発，また陸域と海域の接合部に代表される調査密度の薄い海域における音響地殻断面探査を精力的に実施することにより，海域断層の研究はその精度の面で新しい段階に進むものと期待される。

ii）震源断層調査に関するリニアメント判読・解析

地下の震源断層の存在と地震発生の可能性を示す特徴を抽出するため，事例的に中国地方を対象として，以下の判読基準に基づいて空中写真による地形リニアメント判読を行うとともに，過去の地震活動や地質構造などとの関連性を検討した（図 3.4-16）。

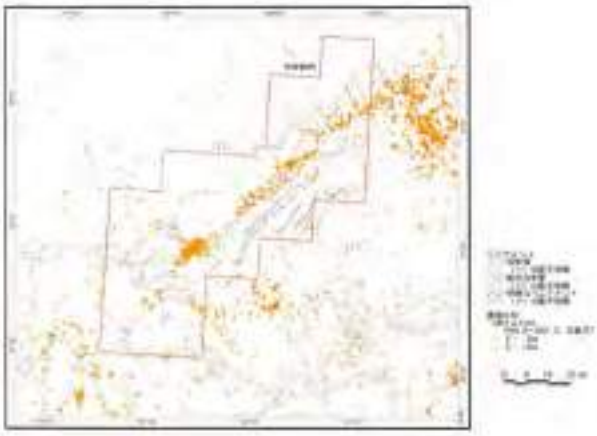


図 3.4-16　空中写真による地形リニアメント判読（事例対象：中国地方）

・活断層：判読基準 1（赤実線）
　　判読基準 2（赤破線）
　都市圏活断層・詳細活断層マップの活断層と同じ基準により活断層であることが確実であるもの（両者の区別は，位置の精度による）
・推定活断層：判読基準 3（青実線）
　　判読基準 4（青破線）
　都市圏活断層および詳細活断層マップの推定活断層と同じ基準により，活断層と推定されるが活断層であることが確実でないもの（両者の区別は，位置の精度による）
・活断層である可能性のあるリニアメント：
　　判読基準 5（黒実線）
　a）明瞭なリニアメントで，複数の断層地形らしい証拠を持つが，変位地形が不明瞭で形成時期が古いと推定されるもの
　b）活断層と近接する同じ走向の明確なリニアメントで，明瞭な断層変位地形を伴わないもの
　c）長大なリニアメントで，断層変位地形の発達が系統的に認められないもの
　d）短いリニアメントに沿って，時代未詳の複数の断層地形が認められるもの
・明瞭なリニアメント：判読基準 6（黒破線）
　短い単独の顕著なリニアメントで，活断層である証拠を伴わないもの（判読者によって活断層であるとの判断が異なるもの）

地震活動については，おもに気象庁の震源データを活用して，地震の時間的な連続性，空間的な分布密度・分布形態などを整理し，判読したリニアメントの属性との比較を通じて地震活動とリニアメントの特徴との関連性を検討した。また，地質構造については，土木地質図などの既存の地質図幅に基づいて，中国地方における地質構造および断層の分布をデータベース化し，リニアメントの特徴との関連性を検討した。

また，客観的なリニアメント地形抽出手法の検討を目的として，デジタル標高データ（DEM）を用いたリニアメント地形の抽出プログラムを予備的に作成した。

今後，震源断層として注意すべき地形リニアメントの抽出基準の整備を目標に，テクトニクスの場が異なる地域で地形リニアメントに関する情報を収集・整理するとともに，測地・地質に関するデータや地震波速度構造，重力異常などの地下構造に関するデータに基づき総合的な検討を進める。

iii）鳥取県西部地震震源域の水理状況変化に関する調査

鳥取県西部地震（M7.3；平成 12 年 10 月 6 日）の震源域である鳥取県西伯郡西伯町周辺を対象に，地震発生前後の水理・水質の変化を現地で聞き取り調査した（調査期間：平成 13 年 1 月 21 日～2 月 5 日）。調査対象地域は，鳥取県西部の西伯郡西伯町を中心に西伯郡から能義郡の 20×20km 程度の範囲とし，地震発生前後における井戸および試錐孔などの水位・水量の変化，河川流量の変化，新たな湧水の発生の有無などについての情報を収集・整理した。

調査対象地域において 164 ヶ所の水源について聞き取り調査を行った結果，鳥取県西部地震の発生直後の沢や井戸の水量に増減の変化がみられた

ことから，震源分布と地下水異常箇所との関係について検討を行った（図3.4-17）。

図 3.4-17　鳥取県西部地震震源域の地下水変化

調査時に，自噴が止まらない，もしくは湧水がみられた地域の水源は震央の北東，南東および南南東に分布する。そのうち，南東にみられるA地点付近の湧水は，地震発生後2週間経過した後に湧水したものであり，本震との関係は明らかではない。また，B，C地点における湧水は地すべり地塊の端部であり，地すべりの凹地形とみられる鶴ノ池との関係が考えられる。これらの地点以外でみられる湧水の分布は，鳥取西部地震の左横ずれを示す断層モデルから推定される圧縮の応力分布に一致する可能性がある。また，現在も回復していない水量の減少した，あるいは渇水した水源は震央の北西側および南東側に多く分布しており，この分布は断層モデルから推定される伸張の応力分布に一致する可能性がある。

さらに，湧水水源と後背山地の比高差および隣接する渇水水源と湧水水源の比高差を考えた場合，湧水地下水は地下深部の地下水が上昇してきたものではなく，地表付近の地下水理の変化によるものである可能性が考えられる。

iv）断層運動時の水理環境変化に関する数値解析

1995年の兵庫県南部地震に伴い，野島断層周辺では，井戸水の枯渇や湧水量の増加など，地下水の水理環境の変化が報告された。その原因として，断層周辺の帯水層の透水性が高くなったことなどが考えられている。一方，野島断層では大学や研究機関などによってボーリング調査が行われ，岩石の地質学的な観察などの結果が多数報告されている。地下における断層部の水理変化の原因としては，断層部の透水係数の増加や，断層に沿った地表から地下深部への酸化的な地表水の流入などが推定されている。

数値解析では，まずボーリング調査（岩石の地質学的調査，透水試験など）や現地での地下水調査などにより得られた様々な情報を踏まえて，断層およびその周辺岩盤の水理地質構造の概念モデルを作成した。この概念モデルを用いて，断層ガウジおよびその周辺岩盤の水理地質構造と，断層運動に伴うそれらの変化に着目した解析を実施し，断層運動に伴う地下水流動の変化の原因などを推定した。なお，数値解析においては，地下水流動場を多孔質媒体とし，ダルシー則を用いた有限要素法による二次元応力・浸透連成解析プログラム（UNICOUP）を用いた。

解析の結果，断層運動に伴い断層および周辺岩盤の透水係数が増加する条件では，断層ガウジ近傍の水位が地下深部まで下がる現象が再現された。このことは，断層運動に伴う地盤応力の減少や断層のズレは，断層近傍の地下深部の水理環境を変化させることを示している。地震に伴い断層ガウジおよびその近傍で透水性が増加する場合，地下深部に酸化的な水が流入して一時的に酸化的な状態が生じる可能性が考えられる。

また，地震に伴い風化花崗岩などの地表部の岩盤に緩みが発生し透水係数が増加する条件を与えた解析結果では，兵庫県南部地震後に淡路島北部の山地部の地下水位が低下し，低地部の湧水量の増加が再現された。このことは，地震後に現地で観測された結果と整合的である。

v）地震動特性に関するデータ解析

地震動の影響に関する研究の一環として，（株）熊谷組が宮城県・福島県太平洋沿岸地域に設置し

ている強震アレー観測システムのうち，宮城県柴田町に位置するセンターアレーで観測された地震記録（17 地震）を用い，地下深部から地表までの加速度振幅の増幅特性について解析・検討を行った。観測地震から得られた加速度波形を用い，最深観測点を基準とした場合の最大加速度振幅の増幅率および実効値の増幅率を算定し，釜石鉱山での地震動解析データと比較することにより地震動の増幅特性を検討した。

おもな結果は以下のとおりである。

・最大加速度振幅および加速度波形の実効値から算定した増幅率は，いずれも軟岩層ではほぼ一定であるが，地表面付近の洪積・沖積層では軟岩層中の増幅率に比べ 3～4 倍程度の値を示す。また，実効値の増幅率は，最大加速度振幅から求めた増幅率よりもばらつきは小さい（図 3.4-18）。

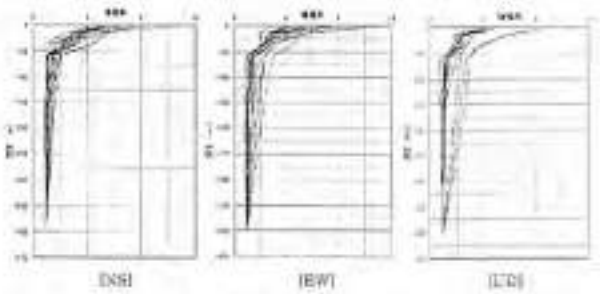


図 3.4-18　加速度振幅の増幅率（17 地震）

・今回の解析結果と釜石鉱山の解析結果と比較すると，観測地点の岩種および地質構造などが違うが，両地点とも岩盤中での増幅率は比較的小さく，地表面に近づくにしたがい，その値は大きくなる傾向を確認することができた。

vi）陸域地下構造フロンティア研究

地震発生に関する研究（アクロス研究）では，理論体系の整備がほぼ完了し，試作した弾性波と電磁波の送信装置と受信装置の試験運転を東濃鉱山で行い，必要な精度・性能の達成を確認した。これによって，実用装置の整備とその運用体制の確立を課題にできる段階に達した。また観測データの解析理論の大枠はほぼでき上がり，ソフトウェアのカスタマイズをする段階に至っている。また，すでに得たいくつかの実証データの確認や精度向上に着手している。

活断層帯での地殻活動研究では，地震活動が地質環境に与える影響の把握と，その原因と考えられ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，活断層の破砕帯の構造（厚さや周辺岩石とのコントラストなど），跡津川断層帯の発達史（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，研究を実施した。研究の実施にあたっては，広域に展開した地震観測・GPS 観測・構造地質学的調査の結果と，広域の変動やスリップ面との関連を解明するために，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，GPS 観測網を強化した。

③ まとめ

今後は，断層活動の履歴や様式の地域性などを整理し，将来予測のロジックを検討していく。

断層活動の予測や，地質環境への影響調査の手法が整いつつあり，今後は予測や影響評価の確実性をさらに高めるための調査・研究を進める。地形的には明瞭に現れていないが，地下に潜在していて将来 10 万年程度の間に活動する可能性のある断層（震源断層）の抽出基準を，地形学的特徴，地震分布，地下構造，測地データ，重力異常などの情報を総合的に解析することで整備し，震源断層を検出する手法を構築していく。

断層活動が周辺の地質環境に及ぼす影響に関しては，断層周辺の割れ目系の生成・発達，断層運動に伴う地殻変動や岩盤応力，透水性の変化，地震に伴う震源地域の地下水や岩盤歪の変化などに関するデータを整備する。

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，19，1sheet.

Ishimaru, K. and Shimizu, I. (1997) : Groundwater pressure changes associated with earthquakes at the Kamaishi Mine, Japan – a study for stability of geological environment in Japan, Proc. 30th International Geological Congress, 24, pp.31-41.

Shimizu, I., Ozawa, H., Seo, Y., Yasuike, S. and Sasaki, S. (1996) : Earthquake-related ground motion and groundwater pressure change at Kamaishi mine, Eng. Geol., 43, pp.107-118.

徳山英一，本座栄一，木村政昭，倉本真一，芦寿一郎，岡村行信，荒戸裕之，伊藤康人，徐　垣，日野亮太，野原　壮，阿部寛信，坂井眞一，向山建二郎（2001）：日本周辺海域中新世最末期以降の構造発達史，海洋調査技術，13，pp.27-53.

5) 地質環境の長期予測に関する研究

① 課題と計画の概要

地下深部の水理・地球化学環境の長期的変遷に関する予測手法を確立するために，「東濃ウラン鉱床を対象としたナチュラルアナログ研究」（3.3.2 1）項参照）と連携し，東濃地域の地質環境をモデルケースとして，古水理地質学的手法により過去の地球化学環境の長期的変遷について推察する。

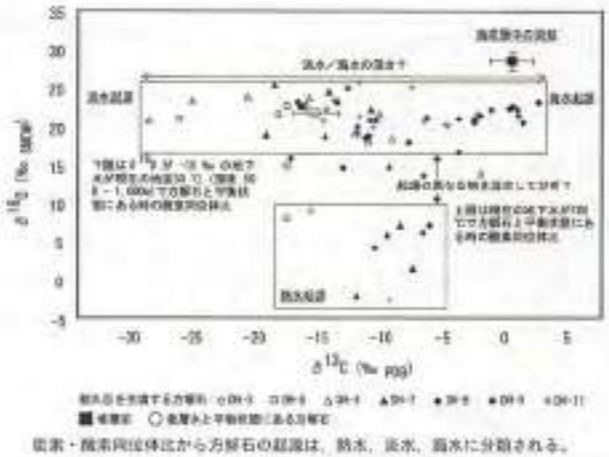
また，天然事象の予測手法の信頼性をより高めるため，過去を踏まえた外挿をサポートするのもとして，天然事象のメカニズムを地球物理学的にモデル化して変動のプロセスを解析するシミュレーション技術を構築する。

② 成果の概要

i）東濃地域における地球化学環境の長期的変遷の解析

現在の地下深部の地球化学環境は，現在の地下水を調査することにより理解できる。しかしながら，地下水の滞留時間より長い時間スケールでは，地下水の調査のみでは，地球化学環境がどのように変化してきたか明らかにすることができない。本研究では地下水の滞留時間（数千年～1 万数千年）以前の地球化学環境について，地下水の化学的性質を反映しやすい方解石に注目して調査・解析を行っている。方解石の溶解や沈殿・保持は，地下水の pH 条件に支配され，方解石の炭素・酸素同位体組成および結晶形はその起源となった水の水質を反映している。したがって，方解石の起源となった水の種類を推定し，地史に関する情報と合わせてその沈殿年代を特定することにより，地球化学環境の長期的変遷についての知見を得ることができる。

東濃地域の基盤をなす土岐花崗岩中の方解石の炭素・酸素同位体組成とその結晶形に基づいて，方解石を沈殿させた水の種類，沈殿年代を推測した結果，花崗岩中の方解石は，新第三紀中新世（約 15～16Ma）の海水，淡水，および海水と淡水の混合した水から沈殿したことが明らかになった（図 3.4-19 および 3.4-20）。また，一部の割れ目では，淡水起源の方解石を海水起源の方解石が覆っており，淡水から海水へと環境が変化したことが推察された。以上の結果から，方解石の同位体比と結晶形に基づく調査は，地下深部の水理・地球化学環境の長期的変遷を解析するうえで有効な手法であると考えられる（Iwatsuki et al., 2002）。



炭素・酸素同位体比から方解石の起源は，熱水，淡水，海水に分類される。

図 3.4-19　方解石の酸素・炭素同位体比

DH-9号孔：標高-295m地点では，淡水から沈殿した方解石（下段右写真）を海水から沈殿した方解石（下段左写真）が覆っている。

図 3.4-20　東濃地域で観察される方解石の結晶形

ii）地殻変動シミュレーションに関する研究

プレート沈み込み境界における島弧規模の地殻変動の特徴や，そのシミュレーション手法（必要なパラメータ，アルゴリズムなど）について文献調査を行った。これらの情報と，既存の有限要素法プログラムを参考に，二次元地殻変動シミュレーションプログラムの構築を開始した。

地殻変動特有の現象をシミュレーションする際には，工学的解析を目的とした既存の汎用有限要素法プログラムでは幾つかの限界が生じる。それを克服するために，本研究で作成するプログラムでは以下の諸点を改良している。a）地殻とマントルのような物性の異なる物質（塑性レイヤー，弾性レイヤー，粘弾性レイヤー）が層状に配置している構造を対象に解析する。b）重力の効果（隆起を抑制する）とアイソスタシーの効果を考慮して，プレート沈み込みに伴う地殻変動をより現実に近

い条件で解析する。c）地層処分のサイト選定ならびに安全性評価の過程で必要となる地域サイズ（10km オーダー）と時間分解能（10 万年オーダー）の変動を予測解析する。時間・空間の分解能は，従来の研究よりも一桁以上高いレベルを目指す。

平成 13 年度の研究で，プログラムの基本機能である微小変形解析機能が完成した。この機能の検証の一例として，図 3.4-21 に示すような弾性体と塑性体が層状に重なったモデルに，右側から 1.0MPa の圧縮荷重をかけた解析結果を示す（図 3.4-22）。

図 3.4-21　弾性体・塑性体層状モデルの例

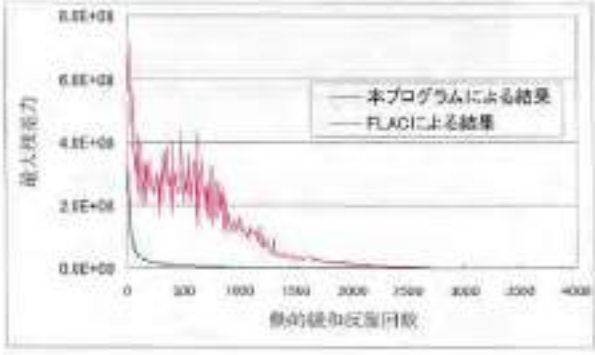


図 3.4-22　シミュレーション解析結果の例

地殻変動や地盤挙動の解析に広く用いられるソフト（FLAC）との比較計算により，地殻の応力状態の計算などが 2 倍以上速い（反復計算で収束解を求めていくが，収束するまでの計算回数が 1,000 回程度と FLAC の半分程度で，かつ計算結果が一致する）ことなどが確かめられた。

③ まとめ

地球化学環境の変遷の予測や，地殻変動予測の手法が整いつつある。

今後は，地球化学環境の研究について，「東濃ウラン鉱床を対象としたナチュラルアナログ研究」（3.3.2 1）項参照）と連携し，東濃ウラン鉱床における水理・地球化学環境の長期的変遷を解析し，ウラン鉱床の長期保存に関わる地質環境の評価を行う。

一方，地殻変動シミュレーションに関しては，地殻変動のより現実的なシミュレーションのために，地殻の変形がより大きくなった状態の応力などの解析機能（大変形解析機能）や断層の滑りを考慮した地殻変動の解析機能を開発していく。プログラムの検証を，東北日本の地殻断面を対象とした地殻変動解析の結果と，実際の地質構造や地形（海岸段丘など）が示す変動との比較によって行う。

参考文献

Iwatsuki, T., Satake, H., Metcalfe, R., Yoshida, H. and Hama, K. (2002): Isotopic and morphological features of fracture calcite from granitic rocks of the Tono area, Japan: a promising palaeohydrogeological tool. Appl. Geochem. (in press).

3.5 幌延深地層研究計画

3.5.1 計画の概要

サイクル機構は，平成 11 年 11 月，地層処分研究開発の成果を取りまとめ，「第２次取りまとめ」として国に報告した。

その後，平成 12 年に見直された「原子力長期計画」において，処分の事業と並行して進められるべき今後の地層処分に関する研究開発の方向が示され，特にサイクル機構の役割としては，「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，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て研究開発を着実に推進すること」の必要性が述べられている。

この深地層研究計画の一つとして，サイクル機構が北海道及び，幌延町（図 3.5-1）に申し入れていた幌延町における深地層研究所（仮称）計画について，平成 12 年 10 月，北海道より受け入れが表明されたことを受け，同年 11 月，研究に関する地元との協定を締結した。この協定に従い，平成 13 年 3 月，4 月に地表から行う調査研究（第１段階）計画等(サイクル機構，2001a，2001b，2001c)を北海道及び，幌延町に説明し，具体的な調査研究に着手した(山崎，2001)。

図 3.5-1　幌延町位置図

幌延深地層研究計画では，堆積岩を対象に，地層処分の技術的な信頼性を実際の深地層での試験研究を通じて確認する。その成果は処分事業の推進や安全基準等の具体化に必要な技術や知見として反映される。また，一般の人々に深地層やそこで行われる研究を実際に見て体験して頂くことにより，深地層や地層処分に関する研究開発について理解を深める場として整備する。

本計画は，以下の３段階に分け，全体で 20 年程度行う。なお，各段階は一部重複する。

・第１段階：地表からの調査研究段階（6 年間）
・第２段階：坑道を掘削しながら行う調査研究段階（6 年間）
・第３段階：坑道を利用して行う調査研究段階（9～11 年間）

1)　幌延町の地質環境の特徴

幌延町は天塩堆積盆の東端部に位置し，幌延町の東縁部（問寒別川東部）には白亜系の基盤層群や中生代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・構造性メランジェ（蛇紋岩などからなる）が南北方向に分布する。それに対し問寒別川以西には，先新第三紀の地層を基盤岩とし，それらを中期中新世以降に天塩堆積盆に堆積した新第三紀の地層（宗谷炭層，増幌層，稚内層，声問層）が不整合で覆う（図 3.5-2;保柳ほか，1986）。幌延町中央部には，ほぼ南北方向に軸をもつ褶曲構造や大曲断層，ヌカナン断層群が発達するが，活断層，とう曲，傾動などの第四紀以降の新しい時代の活構造も認められる（地質調査所，1987）。また，幌延町周辺は，1975 年の豊富町周辺の群発地震，1986 年の幌延町周辺の群発地震などの特徴的な地震活動の場にあり，規模は小さいが地域内に震源のある地震が観測されている（例えば，森谷，1999）。

図 3.5-2　幌延町の地質

研究対象とする新第三紀の堆積岩中の地下水として「塩水系の地下水」と「淡水系の地下水」が

存在することが確認されており，地下水には溶存ガスが存在することが確認されている（動燃事業団，1987）。

これらの地質環境の特徴に着目した研究としては，以下のような研究が考えられている。

- 断層及びその周辺の構造や断層運動の影響に関する研究
- 地震・活断層，隆起・沈降等の第四紀の地殻変動に関する研究
- 塩水系の地下水の研究や塩水/淡水の境界の性質についての研究
- 地下水/ガスの地層中での動きに関する研究

2) 研究所設置地区の選定の進め方

文献などの既存資料（柳田，1998；秋葉，1999）に基づき，対象となる地層として声問層，稚内層，増幌層（上部泥岩相）を選定し，これらの地層が500m程度の深さに十分な厚さをもって分布すると推定される区域を抽出し（図 3.5-3），その区域を対象に空中物理探査（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，試錐調査（2孔）等の地表からの調査を行い，これらの調査により得られた地層や断層，地層の透水性，地下水の水質，溶存ガス量，地層の力学的強度に関するデータの確認を行うとともに，文献データや環境調査の結果の他，社会的条件も合わせて総合的に検討し，平成14年度の早期に研究所設置地区を選定することとしている。

図 3.5-3　調査対象区域の選定

3) 研究開発内容

幌延深地層研究計画では，地層処分技術に関する研究開発として地層科学研究と地層処分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。

3-1) 地層科学研究

① 地質環境調査技術開発

地表からの調査や坑道からの調査により信頼性の高いデータを取得し，地質環境をモデル化する。これを逐次更新することにより，地表から地下深部までの地質環境が調査・把握できることを具体的に示す（山崎，2001）。

② 地質環境モニタリング技術の開発

試錐孔等を用いたモニタリングと遠隔モニタリング技術を開発し，第1段階よりモニタリングを開始し，第2段階以降の地下施設掘削の影響や地下での活動の影響，その回復過程をモニタリングすることにより，その適用性の検証を行う。

③ 地質環境の長期安定性に関する研究

地震・断層活動，隆起・沈降運動，海水準・気候変動，火山活動等の活動履歴や活動様式，その影響範囲等について事例研究を行う。

④ 深地層における工学的技術の基礎の開発

堆積岩中の地下深部に大規模な施設を設計・施工する技術や地下施設の建設が地質環境に与える影響を明らかにするための試験研究。坑道掘削による岩盤領域への影響を修復する技術の検証，施設の長期的な安全確保，坑内の環境維持のための技術開発を行う。

3-2) 地層処分研究開発

人工バリアの搬送・定置技術等や人工バリアとその周辺の岩盤領域との熱-水-応力-化学連成現象等を実際の深地層での試験研究を通じて，その適用性の確認・検証，設計要領・基準の整備を行う（油井ほか，2001）。なお，幌延深地層研究計

両における地層処分研究開発の平成 13 年度成果に関しては，4 章の処分技術の信頼性向上と 5 章の安全評価手法の高度化で記述する。

① 処分技術の信頼性向上

ⅰ）人工バリア等の工学技術の検証

人工バリアの搬送定置技術，坑道閉鎖技術，支保工として予想されるセメント系材料の地質環境及び人工バリアに与える影響に関する工学技術を，実際の地質環境に適用し，その適用性を確認するとともに処分場の建設操業閉鎖における品質管理技術の開発を行う。

ⅱ）設計手法の適用性確認

熱-水-応力-化学連成現象等の人工バリアとその近傍の長期挙動に関する試験を原位置において実施する。

② 安全評価手法の高度化

ⅰ）安全評価手法の適用性確認

安全評価手法を幌延を例として適用し，安全評価に用いるデータの取り扱い，安全評価モデルの適用性を確認する。第 1 段階は，調査により取得されるデータを用いた安全評価モデル，およびシナリオ開発手法の適用，また不確実性の影響評価等を実施することにより，安全評価上重要であり，調査により取得されるべきデータ項目と，精度等について検討を行う（内田，2001）。

4） 環境調査・施設計画

地下施設は，地下 500m以深を目途にスパイラル/斜坑，あるいは立坑でアクセスし，試験坑道を展開する。地上施設としては研究管理棟，コア倉庫等の他，展示館や国際交流会館等を建設する。また，研究活動の環境への影響を未然に防止するという観点から，希少動植物の生息の確認や地下水等の利用状況等の環境調査を行う。

参考文献

秋葉文雄（1999）：北海道天北地域の珪藻殻から算出した *Neodenticula seminae* と *Proboscia curvirostris*（群集化石）およびその生層序学的意義，地質学雑誌，105，pp. 733-736.

地質調査所（1987）：50万分の1活構造図「旭川」.

動力炉・核燃料開発事業団（1987）：貯蔵工学センターの地盤環境調査-深層ボーリング報告書-，動燃事業団技術資料（契約業務報告書），JNC TJ1027 98-012.

保柳康一，宮脇律郎，渡辺 寧，木村 学，岩井 孝（1996）：前弧海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.

核燃料サイクル開発機構（2001a）：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（2001b）：深地層研究所（仮称）計画平成12年度調査研究計画，サイクル機構技術資料，JNC TN1410 2001-002.

核燃料サイクル開発機構（2001c）：幌延深地層研究計画平成13年度調査研究計画，サイクル機構技術資料，JNC TN1410 2001-003.

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，月刊地球，21，pp. 657-664.

内田雅大（2001）：幌延における安全評価技術開発の課題，日本原子力学会「2001年 秋の大会」要旨集，p. 6.

三崎浩一（2001）：放射性廃棄物の地層処分と幌延深地層研究計画（仮称）計画，エネルギーレビュー，No. 213，pp. 17-21.

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（研究委託報告書；(株)アイ・エヌ・エー），JNC TJ1400 98-001.

油井三和，棗田雄二，宮野由俊（2001）：幌延における処分技術開発上の課題，日本原子力学会「2001年秋の大会」要旨集，p. 7.

3.5.2 地質環境調査技術開発

幌延深地層研究計画では，空中・地上物理探査，地質調査，試錐調査等の地表からの調査，及び地下水流動解析に必要となる降水の地下水涵養量を把握する表層水理調査により，地質構造や地下水の水理特性，地下水の地球化学特性，岩盤の力学特性に関する地表から地下深部までの体系的な実測データを取得するとともに，これを用いて地質環境をモデル化し，地下施設建設による地質環境の変化の予測解析を行う。この解析結果を第2段階で得られる実測データを用いて検証することにより，地表から地下深部までの調査技術やモデル化手法を確立する。

1) 地表から地下深部までの地質環境データの取得

1-1) 物理探査

① 調査内容

既存地質情報等（地質調査所，1979；柳田，1998）から研究の対象となる堆積岩が深度500m程度に十分な広がり・厚さで分布すると推定される地域を包含する範囲について，ヘリコプターを用いた空中物理探査（電磁，磁気，自然放射能探査），地上物理探査（電磁探査）を実施し，地表から地下深部までの地層の分布や断層（割れ目帯），褶曲などの地質構造を推定する。ここで得られた探査結果は，幌延町内における研究所設置地区の選定に資すると共に，地質構造モデルの構築に用いることを目的としている。

調査範囲は当初計画していた北海道大学天塩研究林内及び上空の調査に対する理解が得られなかったため，調査を実施せず，空中物理探査は約150 km²，地上物理探査は約150 km²内の60点で行った。

② これまでの成果

i）空中物理探査

飛行間隔は主測線250m，交差測線2km間隔，飛行高度は60～90m（一部120m強）で調査飛行を行った。

・空中電磁探査結果（図3.5-4, 5）

空中電磁探査の結果は，砂岩，礫岩を主体とする更別層，勇知層の分布域は30～500Ω・m程度の高比抵抗を示す。泥質岩を主体とする声問層，稚内層，増幌層（上部泥岩層）分布域は，地表から地下数十m程度まで50～200Ω・m程度の高比抵抗を示す所もあるものの，地下数十m以深では1～10Ω・m程度の低比抵抗を示している。

図3.5-4　空中電磁探査：見掛比抵抗分布図（20m深度）

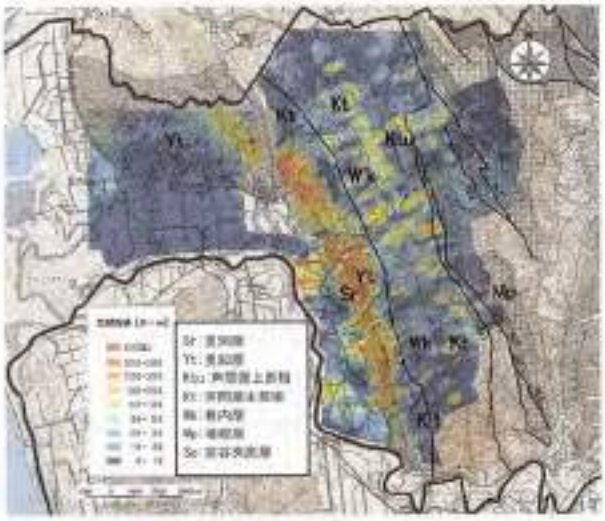


図3.5-5　空中電磁探査：見掛比抵抗分布図（100m深度）

・磁気探査結果（図3.5-7, 8）

磁気異常は全体的に南西から北東へ磁気が低下する傾向があり（図3.5-7），地質調査所（1992）に示された広域磁気図（図3.5-6；極磁気変換はしていない）の傾向と調和的である。地表から深度500mまでの傾向面解析図（図3.5-8）では，更別層と勇知層との境界部に北北西－南南東方向の高磁気異常が分布していて，ヌカナン断層の東に分布する増幌層の分布域にも高磁気異常が分布している。

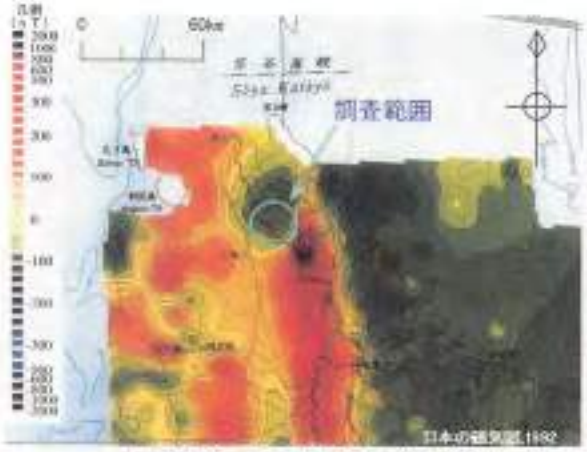


図 3.5-6　天北地域の磁気図
（地質調査所(1992)に加筆）

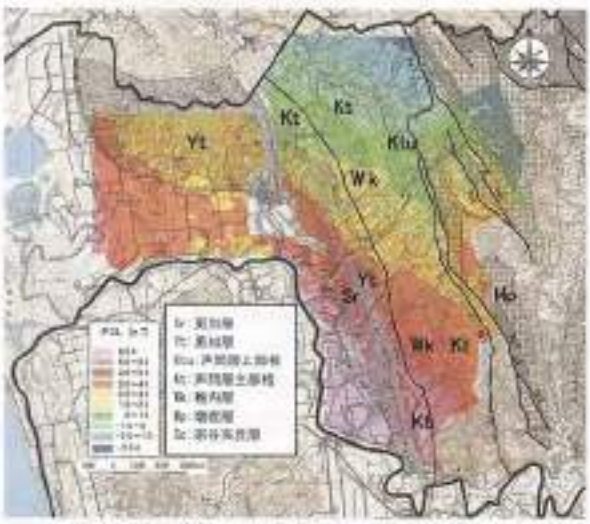


図 3.5-7　空中磁気探査：極磁気異常図

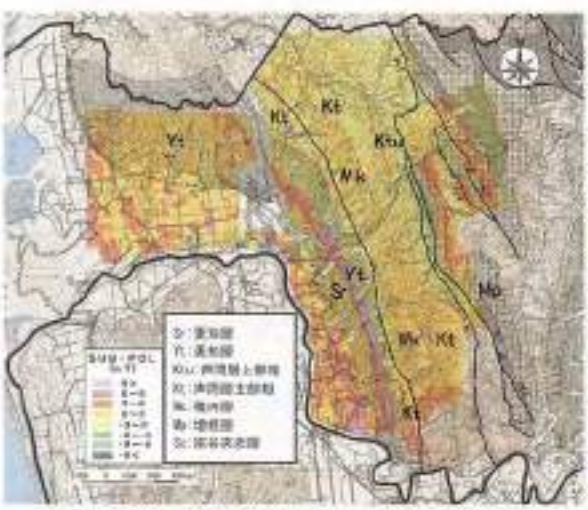


図 3.5-8　空中磁気探査：傾向面解析図

・放射能探査結果（図 3.5-9）

天塩川沿いの沖積低地や丘陵地の沢部で自然放射線強度が高く，新第三紀層分布域では低い傾向が認められる。大曲断層，ヌカナン断層群については，特に高い値を示すような傾向は見られない。

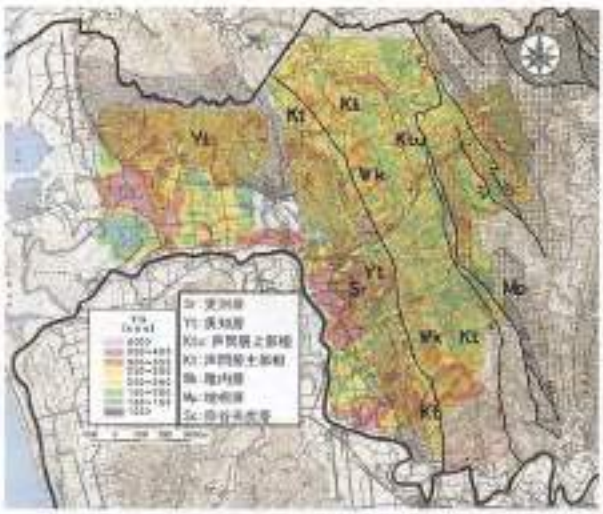


図 3.5-9　空中放射能探査：全γ線強度分布図

ii）地上物理探査（電磁探査）

調査は，リモートリファレンス法による MT 法及び AMT 法測定を 60 点実施し，二次元比抵抗解析を行った。

解析の結果，比抵抗の平面分布は，本地域の地質構造と調和的に北北西－南南東方向の傾向にある。比抵抗構造は地表～海抜-500m 程度までは大曲断層西側の砂岩，礫岩を主体とする更別層，勇知層と東側の泥質岩を主体とする声問層，稚内層，増幌層（上部泥岩層）と明瞭な比抵抗コントラストがあるが，海抜-1,000m 以深は声問層，稚内層，増幌層が分布するため比抵抗コントラストが小さい。

海抜-500m 以深は既存資料により大曲断層と推定されている所の西側は 1～3Ω・m 程度，東側は 3～7Ω・m 程度の比抵抗分布を示している。なお，ヌカナン断層群については，測線の端であることもあり比抵抗境界は明確ではない（図 3.5-10，11，12，13）。

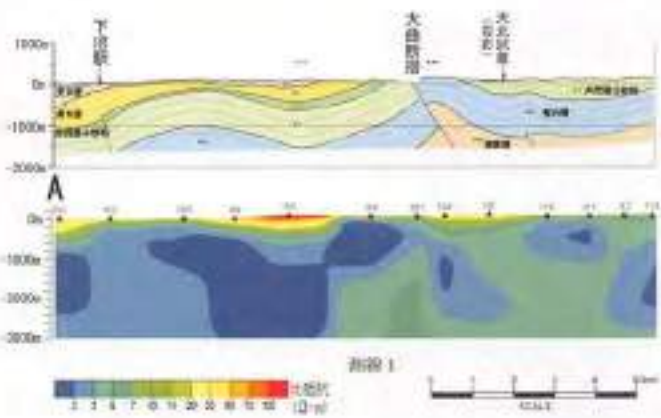


図 3.5-10　比抵抗断面図（幌延町北進地区測線）
（上段：既存文献に基づく推定地質断面図）

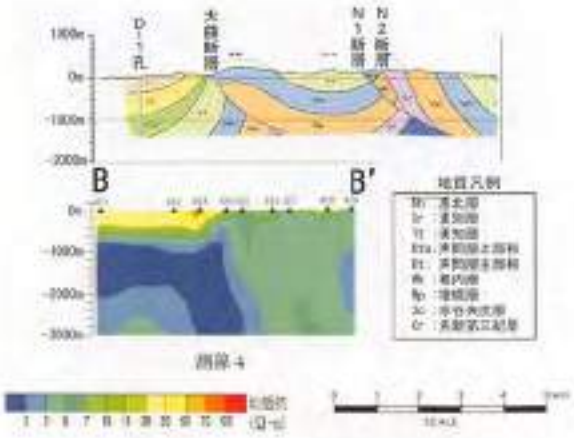


図 3.5-11　比抵抗断面図（幌延町開進地区測線）
（上段：既存文献に基づく推定地質断面図）

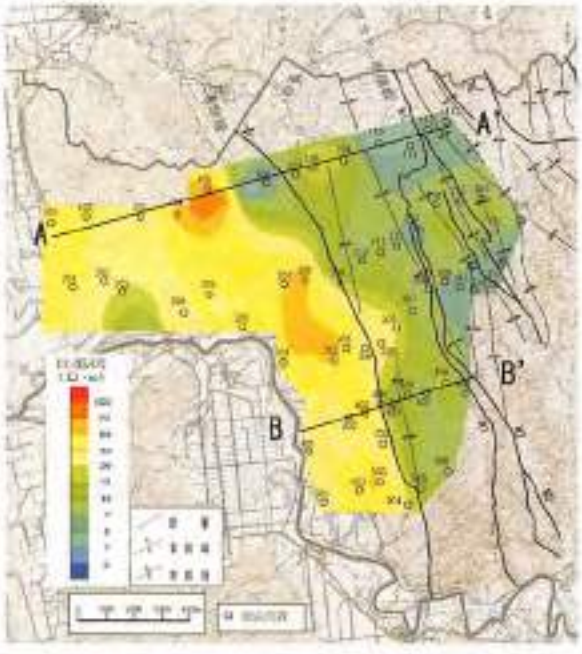


図 3.5-12　比抵抗平面図（海抜 0m）

③ まとめ

得られた比抵抗構造（分布）は，砂岩・礫岩を主体とする更別層，勇知層で高比抵抗，泥質岩を主体とする声問層，稚内層，増幌層（上部泥岩層）で低比抵抗であった。

空中物理探査，地上物理探査（電磁探査）の結果は，研究所設置候補区域の選定の際に前提とした地質分布，地質構造等と整合的であった。また，既存試錐調査（動燃事業団，1987；石油公団，1995）及び現在実施中の試錐調査の比抵抗検層データとの比較においても概ね調和的な結果が得られた。

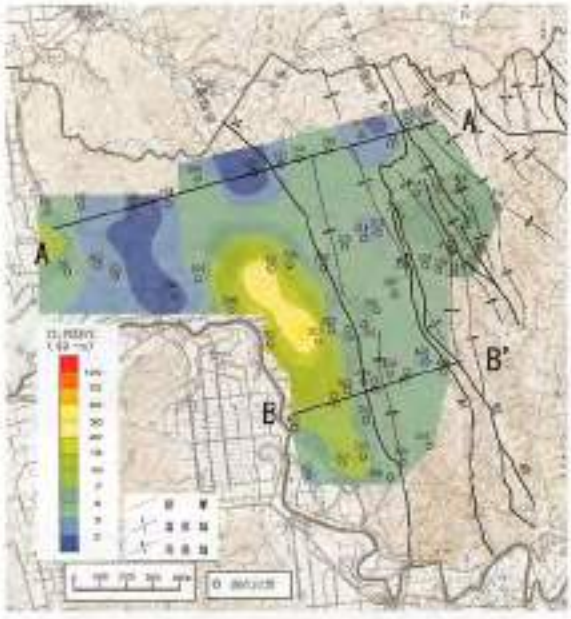


図 3.5-13　比抵抗平面図（海抜-500m）

泥質岩の分布域では，比抵抗コントラストは小さく，物性的にほぼ均一な構造をしていることが分かり，地下施設予定深度である地下 500m 程度に均質な泥質岩が分布していることが推定できた。

平成 14 年度は地層の中を伝わる地震波の速度の違いに着目して，反射法地震探査を研究所設置地区周辺で実施し，地表から地下 2,000m 程度までの地層の分布や大曲断層の地下での位置や形状などの断層（割れ目帯），褶曲などの地質構造に関するデータを取得する。また，平成 13 年度に掘削された試錐孔を用いて VSP 探査を実施し，試錐孔近傍の速度構造や反射面の詳細な連続性に関するデータを取得する。得られた速度情報により地表からの反射法地震探査時間断面図の深度への精密な変換等に用いることができる。

参考文献

地質調査所(1992)：1:2,000,000 地質編集図(23)日本の磁気図.

地質調査所(1979)：天北炭田地質図説明書，日本炭田図 13.

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-深層ボーリング報告書-，動燃事業団技術資料（契約業務報告書）． JNC TJ1027 98-012.

石油公団(1995)：国内石油・天然ガス基礎調査基礎試錐「天北」調査報告書.

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（研究委託報告書；(株)アイ・エヌ・エー），JNC TJ1400 98-001.

1-2) 地質調査

① 調査内容

幌延町の新第三紀の地質については，岩相変化が少ない塊状の泥質岩から構成されているため，詳細な層序が確立しておらず，大曲断層やヌカナン断層群を挟んで同層準とされている地層の岩相や堆積年代が異なることや岩相と堆積時間面が斜行することなどが指摘されている。また，幌延町のほぼ中央部を縦断する大曲断層は，鉛直方向の変位数百～千数百mと推定される東傾斜の逆断層で，第四紀まで活動が継続したと推定されている（柳田，1998）が，幌延町内において断層露頭は確認されておらず，断層の位置や傾斜，破砕帯の有無などの活動性に関する直接的なデータが取得されていないなど，今後の研究課題がある。

平成13年度の調査では，既存の地質情報の確認を行うこと及び岩石鉱物学的基礎データの取得，分析手法の適用性の確認を目的とし，地表調査及び採取した岩石試料を用いて岩石鉱物学試験（顕微鏡観察・モード分析，粉末X線回折，全岩化学分析，微化石分析，ロックエバル分析，古地磁気分析，年代測定）を実施した。なお，平成13年度は北海道大学天塩研究林内を含む地域については調査を実施していない。

② これまでの成果

i）地表調査

幌延町内において地表調査を行い，既存地質情報の確認を行った。主な観察結果を下記に示す。

- 声問層主部相の珪藻質泥岩中には直径数cm未満のバイオターベーション（貝などの巣穴の痕）が発達している。
- 開進地区に見られる声問層主部相と比較して北進地区に見られる声問層主部相の方が粗粒相を示している。
- 大曲断層よりも東側の地域で声問層主部相の下部には稚内層と同様の硬質な泥岩が分布しており，柳田（1998）の地質図の一部では稚内層とされているものの一部がこれに相当する可能性がある。
- 幌延町内の大部分において，大曲断層の西側には声問層主部相が，東側には稚内層が分布しているが，大曲断層東側の沢部では，柳田（1998）の地質図で稚内層が分布するとされている地点で声問層主部相に類似した岩石が分布している

ことや，傾斜についても従来では東傾斜とされていたが西傾斜であることを確認したため，今後は大曲断層の位置やそれに沿って発達する背斜軸の位置等についての検討が必要である。

図 3.5-14 岩石鉱物試験試料採取位置図

ii）岩石鉱物学的試験

・顕微鏡観察・モード分析

更別層，勇知層，声問層上部相の10試料について顕微鏡観察及びモード分析を実施した。顕微鏡観察の結果，大部分の試料において石英，長石，クロムスピネル，海緑石，アルカリ角閃石等の鉱物片，蛇紋岩，結晶片岩，安山岩質～流紋岩質岩片等の岩片が確認された。モード分析の結果，声問層上部相は勇知層や更別層と比較すると，石英含有率はほぼ同じであるが，岩片量が少なく，長石類が多い傾向を示す（図3.5-15）。また，更別層，勇知層には花崗岩類やホルンフェルスの岩片，カリ長石が確認されるため，声問層上部相とは堆積環境（後背地）が異なる可能性が示唆される。

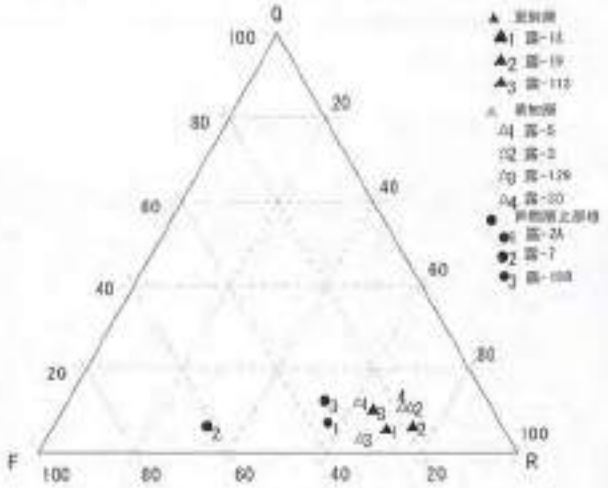


図 3.5-15 モード分析結果（QRFﾀﾞｲｱｸﾞﾗﾑ）

・微化石（珪藻）分析

更別層，勇知層，声問層（上部相，主部相），稚内層，増幌層から採取した泥岩17試料について微化石（珪藻）分析を行い，稚内層及び増幌層からの3試料を除く14試料より珪藻化石を検出した。

更別層，勇知層，声問層上部相については，Neodenticula seminaeが見られることから，鮮新統上部のNeodenticula koizumii帯（2.6/2.7～2.0Ma: Akiba, 1986 ; Yanagisawa and Akiba, 1998）またはそれよりも新しい化石帯に相当すると考えられる。また，淡水種の珪藻の混入が比較的多く認められることから，比較的陸域に近い浅海域で堆積したと推定される。

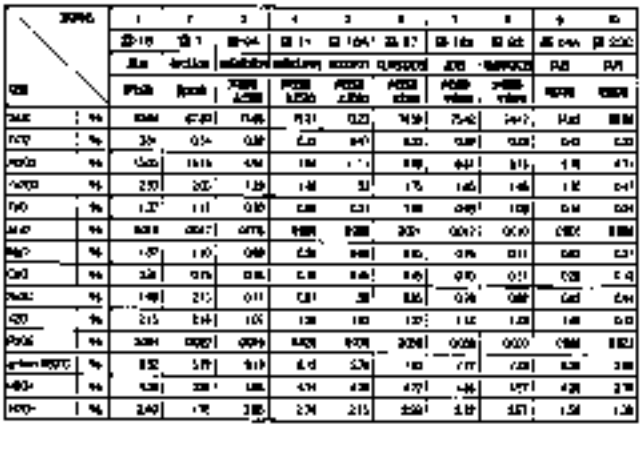
声問層主部相については，上部中新統最上部鮮新統下部のNeodenticula kamtschatica帯（6.4～3.5/3.9Ma: Akiba, 1986 ; Yanagisawa and Akiba, 1998）に相当するNeodenticula kamtschaticaなどの海生浮遊性種を主体とすることから，遠洋域で堆積したと推定される。

声問層主部相の下部については，非常に硬い殻を持つ海生浮遊性種のCoscinodiscus marginatus及びMelosira sulを多産することから，Nouxia californica帯（7.6～6.4Ma : Akiba, 1986 ; Yanagisawa and Akiba, 1998）に相当すると推定される。海生浮遊性種を多く含んでいることから，遠洋域で堆積したと推定される。

・全岩化学分析結果

更別層，勇知層，声問層（上部相，主部相），稚内層，増幌層の10試料について全岩化学分析を行った。全体的な傾向として，新しい地層ではSiO_2が少なく，Al_2O_3，CaO，Na_2O，K_2Oが多い傾向が認められる。声問層主部相及び稚内層については，ほぼ同様な化学組成を示す（表3.5-1，図3.5-16）。

表 3.5-1　全岩化学分析結果



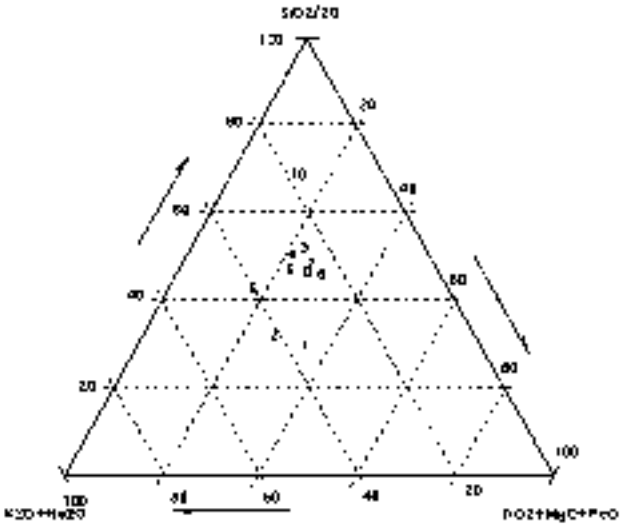


図3.5-16　SAMダイアグラム

これらの結果は，辻・横井（1984）において分析された豊富3-2，大曲K-1の稚内層及び増幌層の泥岩の分析結果と概和的な値である。

・ロックエバル分析

ロックエバル分析は岩石中の有機物の量，質を測定するもので，一般的には石油根源岩の評価を目的として，岩石試料の昇温加熱により，揮発あるいは熱分解して生じる有機物量，タイプを検出する方法である（天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会，1992）。幌延町には声問層，稚内層，増幌層の厚さ千数百 m にわたって泥質岩が分布すると推定されており，各地層境界や岩相については詳細に把握されていない。したがって，声問層，稚内層，増幌層の泥岩中に含まれる有機物の特徴や不均質性の有無等を確認し，地層境界や岩相の不均質性などを判断する際の手法としての適用性を検討するため，幌延町内の声問層（上部相），稚内層，増幌層の10試料の泥岩についてロックエバル分析を行った。声問層上部相では，稚内層や増幌層に比べて，既存の炭化水素量(S1)，ケロジェンの熱分解により生じた炭化水素量(S2)，全有機炭素量(TOC)が高い結果が得られた（表3.5-2）。これらの結果から，声問層の泥岩は，稚内層，増幌層の泥岩と比較して有機物量が高いと考えられ，生物指標化合物分析やビジュアルケロジェン分析などと併せて分析を行うことにより，地層境界等を判断する際の手法として有効であると考えられる。

表 3.5-2　ロックエバル分析結果

S1：既存の炭化水素

S2　ケロジェンの熱分解により生じた炭化水素

S3　ケロジェンの熱分解により生じた二酸化炭素

TOC：全有機炭素量

HI：Hydrogen Index

OI：Oxygen Index

PI：Production Index (S1/(S1+S2))

・年代測定

幌延町内において大曲断層の西側の幌延地区、及び大曲断層の東側の上幌延地区2地点において，声問層の泥岩中に挟在する凝灰岩2試料について，フィッショントラック（FT）年代測定を実施した。これにより，それぞれ 2.9±0.1Ma（幌延地区），<3.3±0.3Ma（上幌延地区）の年代が得られた．サイクル機構が過去に行った調査（柳田，1995）により，この2地点と同一地点の露頭から得られた試料を用いたFT年代測定で得られた4-6Ma値は，3.6±0.3Ma（幌延地区），3.5±0.5Ma（上幌延地区）であり，上幌延地区の凝灰岩の年代については概ね同様の年代値を得たが，幌延地区では0.7Maの相違があった。また，上幌延地区の凝灰岩の年代については，地質層序，珪藻化石層序から推定される年代（鮮新世末期～更新世初期）よりも古い値を示している。この凝灰岩は再堆積のジルコンを含んでいる可能性もあり，今後，地層境界や各地層内などの年代決定を行うためにFT法を適用する際には，信頼性の向上のため，測定時にジルコンを分別する，あるいは粒子数を増やすことなどの検討が必要と考えられる。

・粉末X線回析

更別層，勇知層，声問層（上部相，主部相），稚内層の10試料について粉末X線回析を実施した。この結果，声問層主部相の珪藻質泥岩からオパール-A（非晶質シリカ），稚内層あるいは稚内層に類似した硬質の頁岩からオパール-CTを確認した。しかし，声問層，稚内層については鉱物片，岩片，重鉱物等の含有率が小さいことから，シリカ以外には岩石鉱物学的に有意な差異を把握するまでにはいたらなかった。

・古地磁気分析

声問層（上部相，主部相），稚内層等の珪藻や海綿骨針等の生物起源の珪質堆積岩については，一般的に強磁性の鉱物に乏しく，古地磁気分析の適用が困難な場合が多い。今回，幌延地域での適用性を検討するために，更別層，勇知層，声問層（主部相），稚内層の11試料について古地磁気分析を実施した。その結果，11試料中，9試料について帯磁方位および安定磁化ベクトル（初生磁化方位）を得ることができた。そのため，試錐調査や地表調査において微化石等と併せて連続的にサンプリング・分析を行うことにより，塊状で岩相変化に乏しい泥岩の層序や時代を決定する補助手法として適用できる可能性が示唆された。

③ まとめ

平成13年度の地質調査では，声問層の分布域とされている地域においても，その下部に稚内層と類似の岩相を持つ泥岩が見られるなど，各地層境界が明確ではなく，それらが一括で混同されるなど，地質層序や地質分布に関する課題の一部が具体的となった。また，岩石鉱物学試験結果より，本地域に広く分布している泥岩の岩相変化等を把握する手法のひとつとして，有機物に着目した分析や古地磁気分析が有効と考えられる。平成14年度以降は，平成14年度の早期に決定される研究所設置地区及びその周辺地域を中心に，平成13年度実施した地質調査，試錐調査等から推定される地質層序，地質構造，年代等を明らかにするための地表踏査，岩石鉱物試験等を実施する。

現在，試錐調査から得られた試料についての岩石鉱物学的試験を実施中であり，今後，地表から採取された試料の分析結果との比較を行い，層序，時代の対比等の検討が必要である。

参考文献

Akiba, F. (1986) : Middle Miocene to Quaternary diatom biostratigraphy for Deep Sea Drilling Project Leg 87 in the Nankai Trough and Japan Trench, and modified lower Miocene through Quaternary diatom zones for middle-to-high latitudes of the North Pacific. In: Kagami, H., Karig, D.E., Coulbourn, W.T. et al. Init. Repts. DSDP, 87, pp. 393-481.

天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会(1992)：改訂版日本の石油・天然ガス資源.

辻　隆司，横井　悟（1994）：北海陸天北地域における新第三系珪質岩中の炭化水素トラップ，石油技術協会誌，59，pp. 283-295

柳田　誠（1996）：北海道北部地域の断層に関する研究（IV）、サイクル機構技術資料（契約業務報告書；(株)アイ・エヌ・エー），JNC TJ1420 98-029.

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（研究委託報告書；(株)アイ・エヌ・エー），JNC TJ1400 98 001.

Yanagisawa, Y. and Akiba, F.(1998) : Refined Neogene diatom biostratigraphy for the northwest Pacific around Japan, with an introduction of code numbers for selected diatom biohorizons, The Journal of the Geological Society of Japan, 104, pp.395-414.

1-3) 表層水理調査

① 実施内容

地下深部での地下水流動を予測するためには，地下水流動の上部境界条件となる「地表から岩盤への浸透量」を明らかにすることが必要である。

これまでに岩盤への浸透量を推定するために表層水理観測を実施した例として，中部地方での観測（尾方・小出，1996；寺崎ほか，1993）等があるが，寒冷地において同じ手法が適用可能かどうかは検討する必要がある。また，複数の種類の岩盤からなる地域では，岩盤の種類や場所により岩盤浸透量が異なると考えられ，深部地下水流動に影響を与える要因として岩盤浸透量の分布を把握することが重要となる。このように岩盤浸透量の観測方法を考える上では，

・岩盤浸透量をどこで測るか

・岩盤浸透量をどのように測るか

という２つの課題があるといえる。

寒冷地で時代の異なる堆積岩の分布する地域を対象とした表層水理観測流域の選定の考え方，観測流域の抽出，及び観測手法・システムの検討結果を示す。

② これまでの成果

ｉ）表層水理観測に向けての考え方

幌延町全域（約 30×40km）の地形・地質・被覆（植生等）の概要を把握した上で，地形・地質等の各条件が多岐・多様となるように代表的な流域を選定し，これらの流域の各々について，地形（起伏量，水系）・地質（構成地質の種類）・被覆（土地利用・植生）といった特性を数値化あるいはパターン化して表した。次に，表層水理観測システムの概念を検討し，厳冬期における河川流量観測，積雪面蒸発量の測定等の表層水理観測手法の適用性を評価中である。厳冬期における測定の実施場所の選定にあたっては，代表的な流域の中から，研究所設置候補区域（B1，B2 区域）に含まれる流域を選定した。

ｕ）幌延町の表層水理条件の把握

図 3.5-17 のフローに従い，幌延町内において地形・地質・被覆の特徴（表 3.5-3）を整理し，その各条件が多岐にわたるように，かつ地域的なバランス，水系密度等の水文特性，これまでの地下水流動解析結果において示される地下数百ｍに及ぶ広域地下水流動系における上流部（涵養域）から下流部（流出域）までを含む代表的な 18 の流域を選定（図 3.5-18）し，これらの表層水理条件について検討，整理した。

表3.5-3　調査対象地域の地形・地質・被覆

要　素	特　　徴
地　形	中央部と東部に南北方向の山地，その間に低地。 西部は天塩川および低地（サロベツ原野）。
地　質	南北方向の地質配列。中央部の山地とその周辺には新第三紀の泥岩を主とする地層（Mu，Ktなど）および第三紀－第四紀の堆積物（Sn，Yu）が，断層・褶曲で繰り返し分布。東部山地に蛇紋岩（Sp）。
被覆 （土地利用植生）	大きな開発地なし。主に中央部山地の稜線より東側は自然林，西側は二次林。河川沿いに一部牧草地。

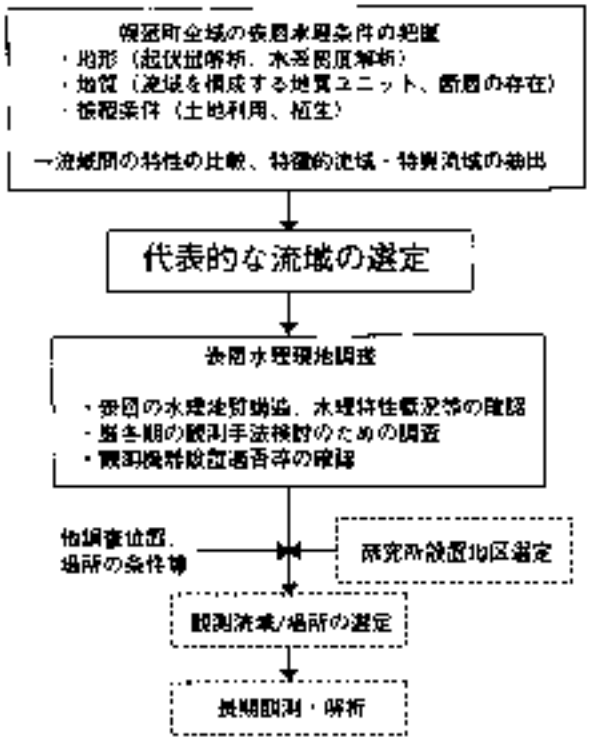


図3.5-17　代表的な流域選定とその後の流れ

図3.5-18　調査対象地域と検討対象流域

・地形特性

地形特性を起伏量と水系密度で表現した。起伏量は流域内の谷の深さを，水系密度は谷の水平方向の頻度を表すことから，いずれも表層部の地下水流動の影響因子と考えられるためである。

起伏量は10m間隔のDEMを用いてメッシュ内の最高点と最低点の標高差として求めた。1/25,000の地形図で見られる谷密度の高い区域と低い区域の違いが明瞭に現れ，かつ一次谷も表現できることから，計算メッシュのサイズは50mとした（図3.5-19）。18流域の起伏量の平均・標準偏差（表3.5-4）を見ると，各流域内でのばらつきが大きいが，起伏量の大きな流域(No.10,13等)と小さな流域(No.4,15等)との平均値の差は見られる。

水系密度は，1/25,000地形図より読み取った水系図に250mメッシュをかけ，メッシュの辺に交差する水系の本数で表した。表3.5-4によると18流域間で水系密度に有意な差は見られない。

50mメッシュでの起伏量
（白い部分が起伏量大，
地形図も重ねて示す）

図3.5-19　起伏量分布計測の例（流域No.2付近）

・地質特性

本地域の地質は，時代・層相から大きく5つに区分できる（A：沖積層，Q：段丘堆積物等の第四紀層，Sa：鮮新-更新世の半固結堆積物，T：新第三紀堆積岩，P：先新第三紀堆積岩および蛇紋岩）（柳田，1998）。Tをさらに Tk（稚内層：硬質頁岩）と Tt（その他の新第三紀層）とに区分すると，これらの地質の分布と地形図に示される水系との間には明瞭な関係が認められる（図3.5-20）。水系の発達は地層の浸透性や強度（耐侵食性）を反映していることから，この区分を表層付近の水（岩盤へ浸透するまでの水）の動きを考える上での水理地質的なユニットとして扱うことができる（表3.5-5）。各流域におけるユニットの割合を表3.5-6に示す。流域No.1～14はSa，Tt，Tkを主とし，流域No.15～18はPを主とする。流域No.1～3は，沖積層を除くと単一の地質からなる。当地区には南北方向の断層（大曲断層，ヌカナン断層群）があり，岩盤への浸透に影響を与えている可能性があるが，流域No.4～18では大半が断層を含んでいる。

表3.5-4　流域別の起伏量および水系密度

流域No.	起伏量（m）		水系密度（本）	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
1	14.3	7.0	4.7	2.3
2	13.5	5.3	4.2	2.0
3	12.9	6.1	5.1	2.2
4	12.1	6.4	2.6	1.7
5	16.6	8.5	2.6	1.7
6	15.5	8.0	2.7	1.8
7	14.9	7.7	2.5	1.6
8	17.6	8.5	2.0	1.3
9	18.1	10.4	2.8	1.6
10	19.8	9.3	2.9	1.7
11	16.4	8.2	3.1	1.6
12	16.0	8.0	3.2	1.8
13	20.4	9.5	2.3	1.5
14	15.7	8.2	3.5	2.0
15	11.9	5.9	2.8	1.8
16	15.6	9.6	2.3	1.5
17	12.2	6.8	2.1	1.7
18	12.5	7.0	1.9	1.7

図3.5-20　地形（水系）と地質

表 3.5-5　地質・水系ユニット

ユニット	地　質	水系密度
A	沖積層	極低
Q	段丘堆積物等の第四紀層	低
Sa	更別層，勇知層（半固結砂岩）	高
Tt	声問層ほか（新第三紀泥質岩）	中
Wk	稚内層（新第三紀硬質頁岩）	低
P	蛇紋岩，先新第三紀堆積岩）	低

・被覆条件

地表の被覆条件として，土地利用と植生について地形図と既存の植生図（環境庁，1986）をもとに流域ごとに構成をとりまとめ，主要6群落で表した（表3.5-6）。いずれの流域も樹林とササを主とし，草地や裸地・市街地などはほとんどないことから，被覆条件による流域間の差は認め難い。

iii）積層水理観測手法・システムの検討

岩盤浸透量を観測する方法として，流域の水文要素（降水量，蒸発散量，流出量）の差から求める「水収支法」がある。その式は，地下水貯留量を無視できるサイクル（1水文年）を対象期間とすれば，G（岩盤浸透量）－P（降水量）－E（蒸発散量）－R（流出量）であらわされる（星方・小出，1996）。寒冷地においては，冬期の降水が積雪の形で地表に一時貯留されることや，土壌凍結により不浸透域が発生するなどの特有の現象はあるものの，基本的に上式により岩盤浸透量を算出することができるが，降水量，蒸発散量，河川流量の測定結果が水収支において大きな誤差を与えうる因子であるため，観測システムで考慮が必要となる。

・降水量

冬期の降水は主に積雪が融解して地表に供給されるので，積雪・融雪量の把握は夏期の降雨量同様に（あるいは最低にはそれ以上に）重要となる。

よって積雪深と積雪密度を，冬期の複数の時期・場所において測定する。山地部での降雪量が過小評価されないように，流域内の標高の高い地点を含めた複数の調査地点を設定する。

・蒸発散量

冬期に積雪表面からの蒸発があると降雪量が有効降水量ではなくなるため，その大きさを把握し，積雪面蒸発量が無視しうるかどうかの確認が必要である（積雪面蒸発量は冬期降水量の数%という観測例がある：小島ほか，1985）。

・流量測定における凍結防止

年間の流出総量を測定するには，冬期の凍結による欠測を防止しなければならない。流量計上流側のプールを小型化して流速を保ち，雪で覆って凍結防止した事例（例えば，藤原ほか，1994；佐藤

表 3.5-6　流域の地形・地質・被覆条件

流域No.	種別地区の割合（%）						起伏量（m）						水系密度（本）					前処理	被覆	代表性
	A	Q	Sa	Tt	Wk	P	A	Q	Sa	Tt	Wk	P	Q	Sa	Tt	Wk	P			
1	11	－	81	－	－	－	5.5	－	16.2	－	－	－	－	4.3	－	－	－	－	エ	－
2	10	－	90	－	－	－	5.2	－	14.6	・	－	－		4.2	－	－	－	－	エ	－
3	14	－	86	－	－	－	8.8	－	13.4	－	－	－	－	5.1	－	－	－	－	エ	－
4	8	－	－	85	7	－	6.7	－	－	12.2	17.7	－	－	－	2.6	2.3	－	○	ｵｶ	○
5	15	－	21	24	40	－	6.8	・	15.4	14.6	22.1	－	－	3.5	2.5	1.7	－	○	ｵｶｷｶ	○
6	16	－	2	42	20		7.1	－	15.0	15.1	19.8	－	－	2.8	3.0	2.1	－	○	ｵｶｷ	○
7	18	－	13	46	23	－	5.9	－	14.1	15.8	18.5	－	－	2.8	2.5	2.1	－	○	ｵｶ	○
8	13	－	11	41	35	－	7.2	－	13.9	16.8	21.4	－	－	3.6	2.2	1.6	－	○	ｵｶ	○
9	8	－	39	14	39	－	4.2	－	14.6	12.8	26.3	－	－	3.5	3.8	3.5	－	○	ｵｶｷｶ	○
10	8	－	12	41	39	－	6.2	－	16.3	17.5	25.9	－	－	4.6	1.8	2.3	－	○	ｵｶｷｶ	○
11	12	－	16	62	10	－	10.6	－	17.3	16.4	22.2	－	－	3.4	3.1	2.4	－	○	ｵｶ	○
12	10	－	34	34	22	－	5.4	－	16.3	16.2	19.5	－	－	3.9	2.9	1.8		－	ｵｶｷ	○
13	10	－	9	47	34	－	6.4	－	19.6	20.9	24.0	－	－	3.9	2.3	1.5	－	○	ｵｶ	○
14	10	－	65	13	1	－	6.0	－	13.6	18.6	22.9	－	－	3.4	4.9	2.3	－	－	ｵｶ	○
15	－	－		3	・	97	－	－	－	16.4	－	11.7	－	－	3.6	－	2.8	○	ｲﾜﾔ	－
16	－	18	－	－	－	82	－	3.9	－	－	－	15.1	1.7	－	－	－	2.4	○	ｲﾜﾔ	－
17	－	10	6	－	－	84	－	4.1	13.5	－	－	13.1	2.4	3.4	－	－	2.0	○	ｲﾜﾔ	－
18	－	9	15	－	－	76	－	4.9	8.6	－	－	14.1	2.2	2.8	－	－	1.7	○	ｲﾜﾔ	－

被覆条件　ア：コンブマード・ササ群落，イ：アカエゾマツ群落　ウ：ダケカンバ群落，エ：耕作農地等，
オ：ダケカンバ・ササ群落　カ：ササ群落　キ：針葉樹植林，ク：落葉樹植林，ケ：住宅地

ほか, 1992) もある。

以上の点を考慮し，寒冷地において表層水理観測を行うための観測システムを，図3.5-21のように考えた。なお，当地域に分布する岩盤(第三紀堆積岩)は透水性が低いために岩盤浸透量が小さく，前述した水収支法を補完する意味で，観測システムには地下水位計による浅層地下水位観測を加える。水収支法が流域という面的広がりの中での水の動きを表すのに対し，下向きの地下水流れを直接測定する。同一地点において飽和帯上部の異なる深度で地下水位を測定することにより鉛直方向の動水勾配を求め，これに透水係数を乗じて浸透量（下向き流速）を算出する。表層水理観測システムに，地下水位計測から岩盤浸透量を測定する方法を組み込むことにより（図3.5-21），水収支法の結果を，それとは独立した方法で評価できると考える。

この検討結果を基に，平成13年度の厳冬期に河川の流量測定，積雪面蒸発量測定，河川流量観測の凍結防止方法の調査を実施し，現在，データを取りまとめている。

③ まとめ

広域的な表層水理特性の把握の観点から，幌延町内の代表的な流域を抽出し，その地形・地質・被覆（植生）等の条件を整理した。また，寒冷地特有の条件を検討し厳冬期における現地調査において確認し，表層水理観測手法・システムを検討した。今後，研究所設置地区及び周辺地区の選定後に，表層水理観測システムを設置し観測を行う。その際，岩盤浸透量を算出するための表層水理観測（水収支観測）結果は降水量の年変動等の影響を受けるため，長期間の観測を継続していく計画である。

参考文献

藤原寛一郎，佐藤冬樹，笹　賀一郎(1994)：積雪寒冷地における冬期流出の特性，水文・水資源学会誌 7-6, pp. 503-511.

環境庁(1986)：第3回自然環境保全基礎調査（植生調査）現存植生図「豊富」.

小島賢治，石川信敬，本山秀明，山田芳則（1985）：積雪の蒸発量，低温科学(物理編)，44，pp. 49-62.

尾方伸久，小出　馨（1996）：東濃鉱山周辺地域における表層水理研究，地層処分研究開発の現状(平成8年度)，PNC TN1410 96-071，pp. 239-241.

佐藤冬樹，笹 賀一郎，藤原一郎（1992）：小河川の流出および水質に対する森林の影響-北海道北部蛇紋岩地帯の例-，日林北支論，40，pp. 196-198.

寺島哲巳，森 綾子，石井治男（1993）：花崗岩山地の二小流域における深部地下水浸透量の比較研究，ハイドロロジー，23，pp. 105-118.

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（研究委託報告書；(株)アイ・エヌ・エー），JNC TJ1400 98-001.

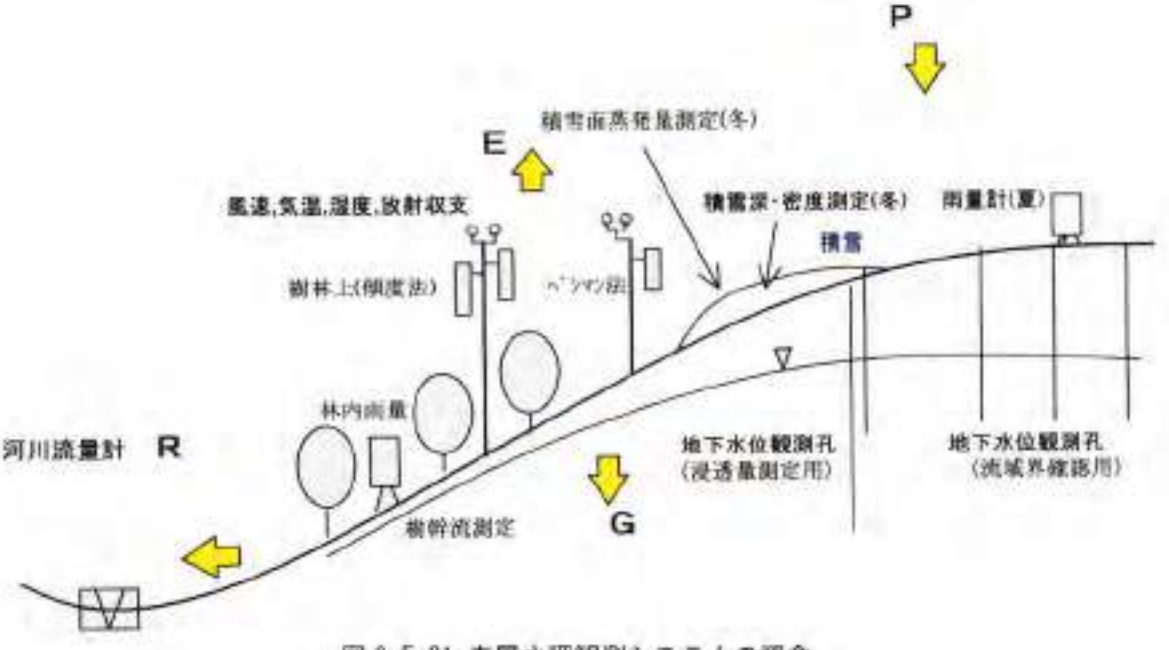


図 3.5-21 表層水理観測システムの概念

1-4) 試錐調査

① 概要

地表からの調査結果や文献データ，土地利用状況等を参考に，研究所設置候補区域（A, B1, B2, C区域）の中，B1区域，B2区域を試錐調査の対象区域とした。それぞれの区域内における具体的な試錐調査実施場所は，調査実施の容易性（用地確保，アクセス，許認可）を配慮して選定した（図3.5-22）。

HDB-1孔（B1区域）は，平成13年10月31日より掘削を開始し，平成14年3月31日現在，深度641.3mで稚内層の泥岩を掘削中である。また，HDB-2孔（B2区域）は，平成13年11月21日から掘削を開始し，平成14年3月31日現在，深度581.4mで稚内層の泥岩を掘削中である。掘削に並行して，以下に示す各種サンプリング・試験，採水，物理検層を実施中であり，平成14年3月31日現在で得られている結果について報告する。

- 試錐孔掘削約700m×2孔
- 岩芯採取・観察（岩相，堆積構造）
- 物理検層，水理試験（透水・揚水），地下水採水（揚水試験時），分析，孔内水圧破砕試験
- 掘削時のガス成分等連続モニタリング
- 岩芯室内試験
  基本物性，力学特性（一軸・三軸圧縮等），熱特性/帯磁率/比抵抗，室内透水試験，岩芯からの地下水・ガスの抽出/分析，微少空隙構造同定，鉱物試験，微化石分析，同位対比測定
- 岩芯からの地下水抽出・分析

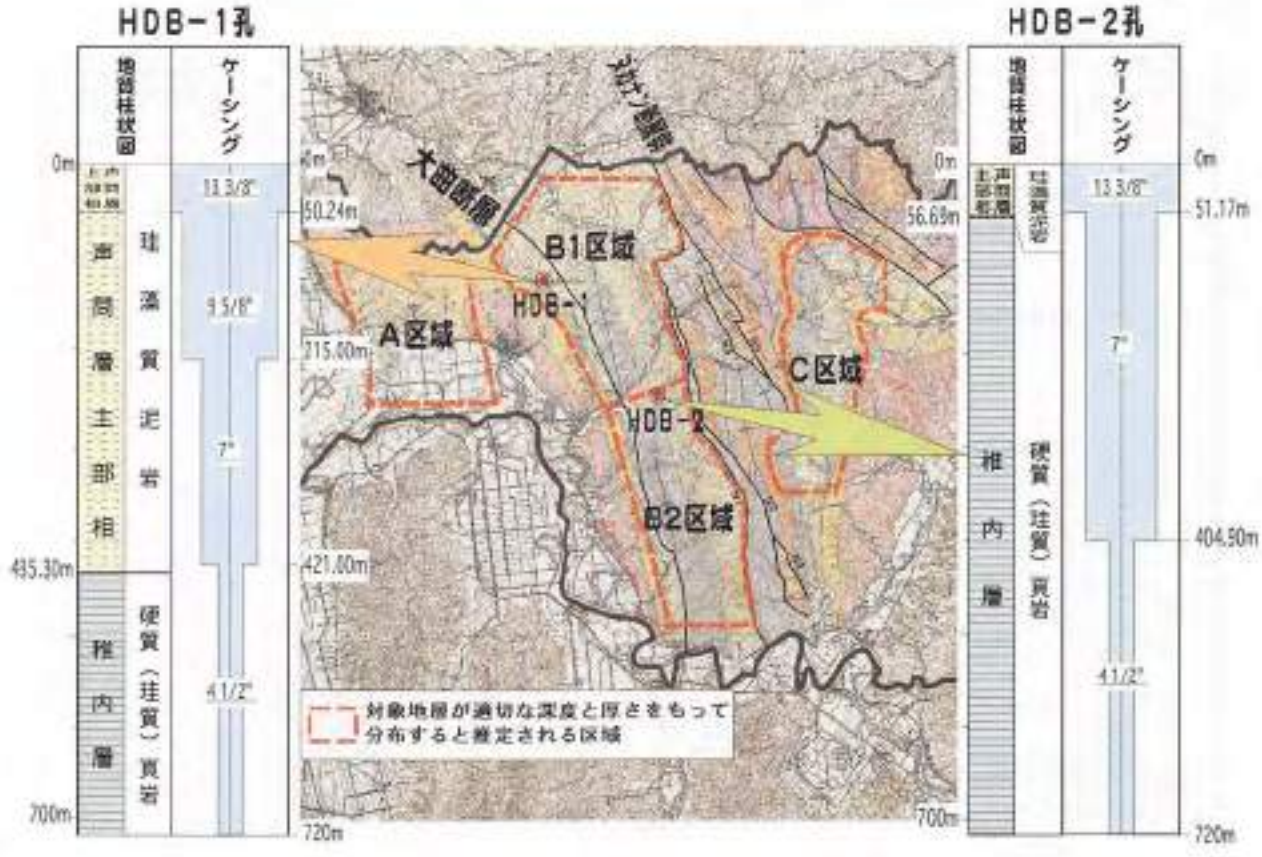


図 3.5-22　推定地質層序とケーシングプログラム

② これまでの成果

ｉ）地質構造・層序

・HDB-1孔(図 3.5-23)

深度7.30～421mまで声間層が分布する。深度48mまでは帯黄緑灰色を呈する軟質な珪藻質泥岩を主体とし，稀にチャート礫を含有する。深度48m～350mまでは軟質の帯緑灰色を呈する珪藻質泥岩が分布し，深度350m以深には硬質の帯緑暗灰色を呈する珪質泥岩が分布する。全体的に直径1～3cmの生痕が発達しており，炭質物や微細化石，石灰質ノジュールを包含する。地層の傾斜については，堆積構造（ラミナ）から本孔周辺の地質構造と調和的な20～40°の傾斜と推定される。

深度350m以浅は軟質な泥岩を主体としており，全体的に割れ目が多く，R.Q.D.（コア1mに対して10cm以上のコアが占める割合）が低く，コア流出区間が多数存在する。深度350m以深については硬質な泥岩を主体としており，全体的に割れ目が少なく，R.Q.D.が高い。

・HDB-2孔(図 3.5-24)

深度0m～9.40mには崖錐堆積物，深度9.40m～11.70mには河床堆積物，深度11.70m～56.69mには声間層*，深度56.69m～404mには稚内層*が分布する（*声間層と稚内層の境界については，コアを用いた微化石分析結果を考慮した上で決定する）。

深度11.70m～53.50mには軟質な帯緑灰色を呈する塊状の珪質泥岩を主体とし，深度53.50m～56.69mには声間層の基底に対比されると推定される凝灰質砂岩が分布する。全体的に直径1～3cmの生痕が発達しており，炭質物や微細化石を包含する。

深度56.69m以深は硬質な暗灰色を呈する珪質泥岩を主体とし，全体的にラミナ，直径1cm以下の生痕，微細化石，殻の薄い二枚貝化石，石灰質ノジュール等を包含する。地層の傾斜については，堆積構造（ラミナ）から，本孔周辺の地質構造と調和的なほぼ水平な傾斜と推定される。

声間層との境界から稚内層の上部に相当する深度52～125m付近は，R.Q.D.が低く，コア流出が多く存在する。また，深度325m以深については，粘土を挟在する割れ目が多く存在し，R.Q.D.が低く，コア流出区間が多数存在する。

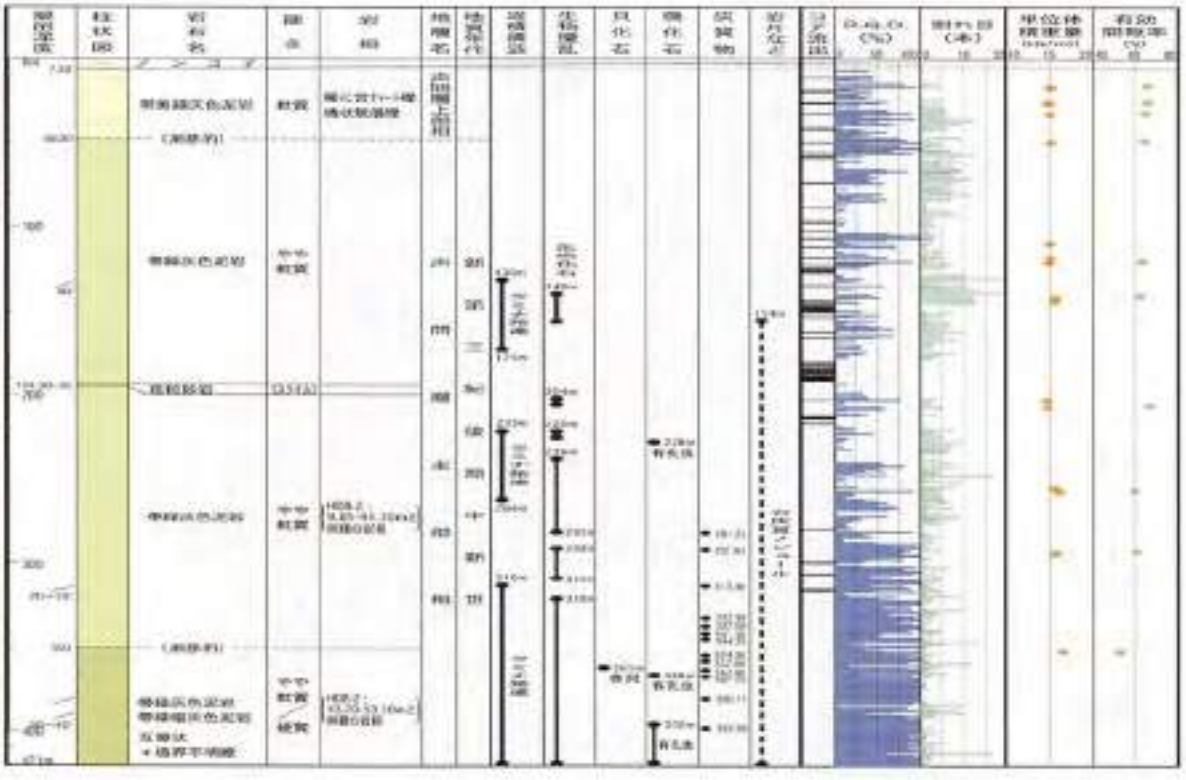


図 3.5-23　HDB-1 孔　地質柱状図

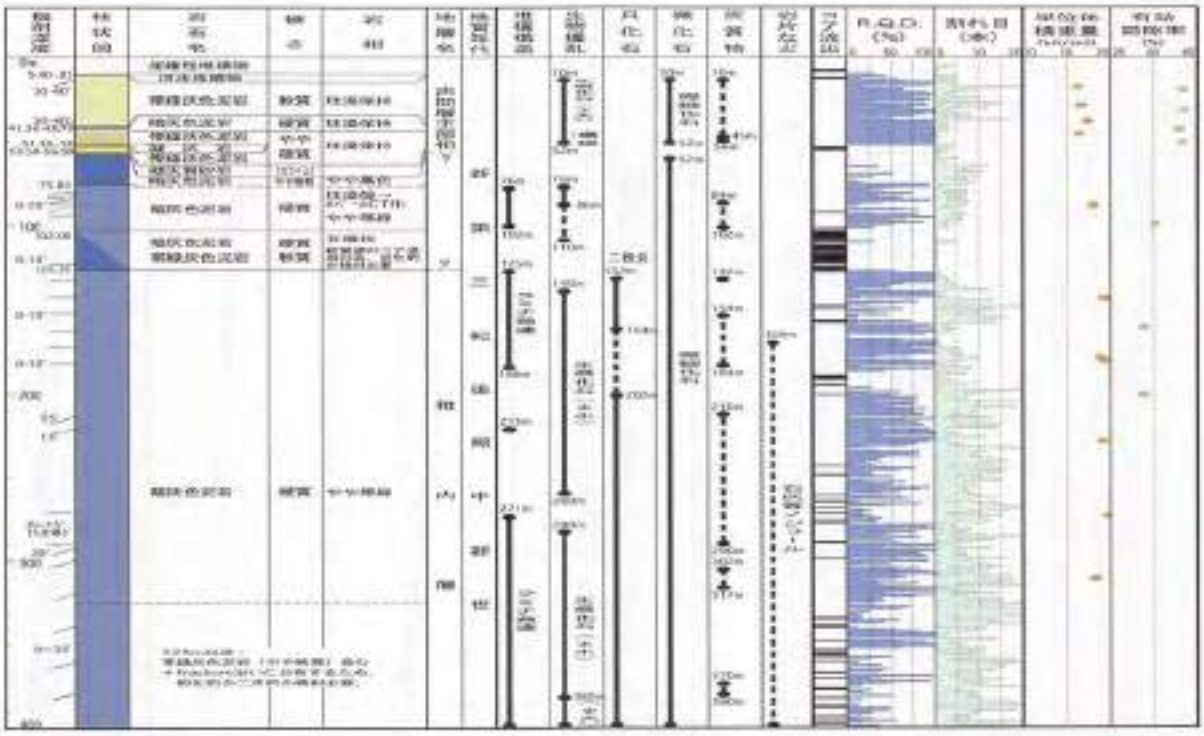


図 3.5-24　HDB-2 孔　地質柱状図

ii）物理検層

物理検層は各ケーシング設置の前に実施した。なお，深度 50m 以浅については地盤が軟弱で崩壊の危険があり，削孔終了後すぐにケーシングを建て込む必要があったため，物理検層は実施していない。物理検層種目は，孔径，電気（自然電位，比抵抗），自然放射能，密度，中性子，温度，電磁フローメーター，孔壁画像（FMI），音波であり，掘削やケーシング設置の関係から，HDB-1 孔では，深度 50～148m，130～215m，210～419m の 3 回に分けて実施，HDB-2 孔では、深度 50～400m について実施している。

深度約 700m までの掘削が終了後，これまでに実施済み以深の深度の物理検層を行う予定である。

・HDB-1 孔(図 3.5-25, 26)

孔径検層では，深度 280m 以深，孔径拡大は見られない。比抵抗検層では，深度 130m 以深で 10Ω・m 以下と低比抵抗である。自然放射能検層では，近傍の検層データ（動燃事業団，1987；石油公団，1995）と比較すると高めの値を示している。深度 350m 以深から上昇傾向が見られる。密度検層では，深度 320m 以浅は 1.7g/cc 程度，それ以深は上昇傾向が見られ，岩質と対応している。温度検層では，深度 400m で約 20℃を示す。電磁フローメーター検層では，顕著な水みちは確認されていない。深度 175m 付近で孔内水比抵抗の低い位置で地下水の流入出を示す結果が得られている。P 波検層では，深度が増すに従い P 波速度が上昇傾向にある。

・HDB-2 孔(図 3.5-27, 28)

孔径検層では，HDB-1 孔と比べると孔径拡大は少ない。所々，局所的な孔径拡大が見られ，岩質が悪い所と対応している。比抵抗検層では，全体に 10Ω・m 以下と低比抵抗である。自然放射能検層では，近傍の検層データ（動燃事業団，1987；石油公団，1995）と比較すると高めの値を示している。深度 300m 以深から下降傾向が見られる。密度検層では，深度 330m 以浅は 2.0g/cc 程度で HDB-1 孔と比較すると高めである。それ以深は下降傾向が見られ，岩質と対応している。温度検層では，深度 400m で約 23℃を示す。電磁フローメーター検層では，顕著な水みちは確認されていない。音波検層のうち P 波検層では深度 100m まで上昇傾向にあり，深度 330m までほぼ一定し，それ以深でわずかに下降傾向になる。

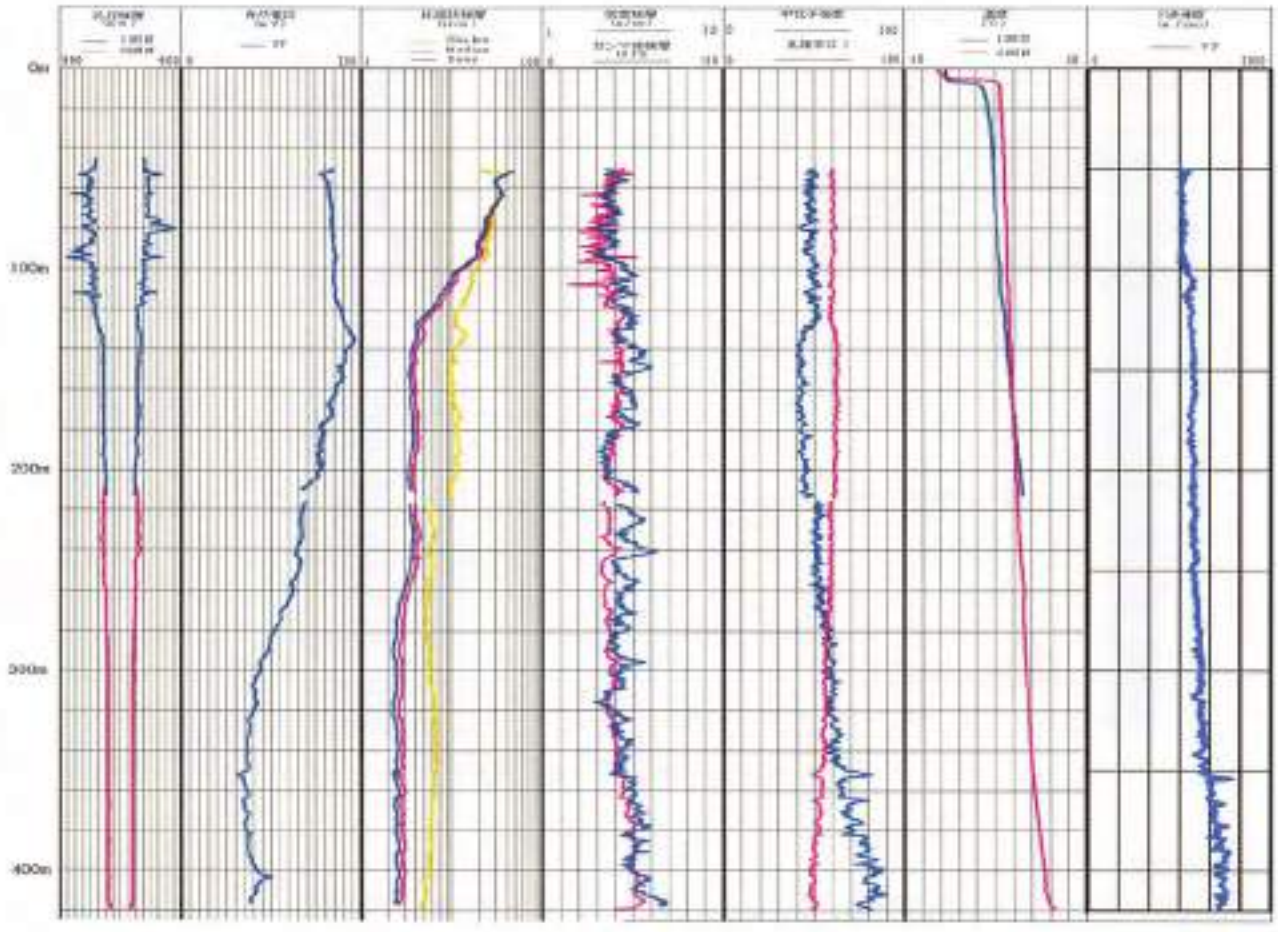


図 3.5-25　HDB-1 孔　物理検層柱状図

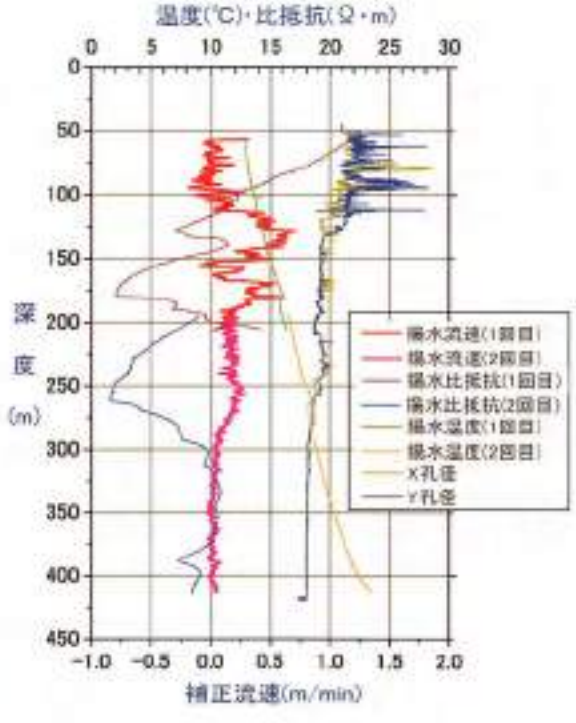


図 3.5-26　HDB-1 孔　電磁フローメーター検層図

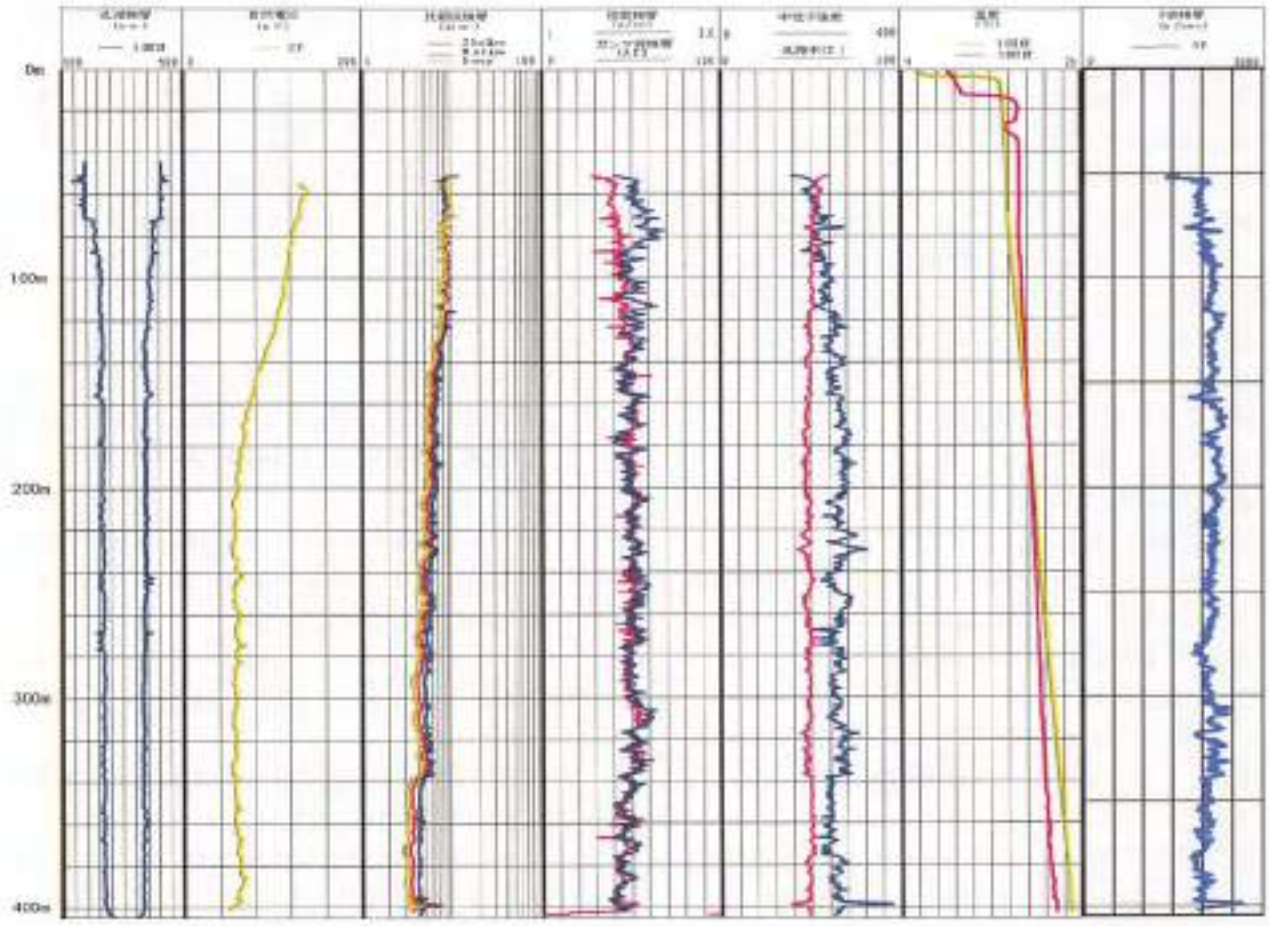


図 3.5-27　HDB-2 孔　物理検層柱状図

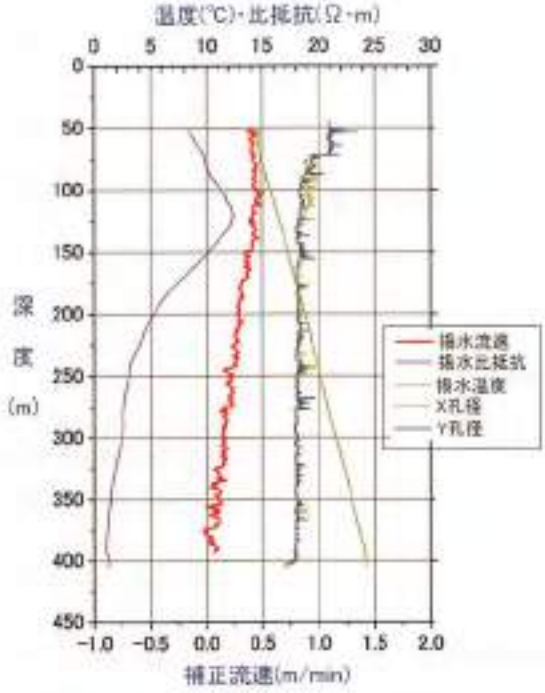


図 3.5-28　HDB-2 孔　電磁フローメーター検層図

iii) 水理試験

平成13年度の水理試験は，声問層および稚内層の代表的な透水性の把握に加えて，地下水の地球化学的観点から必要となる地下水の採水を目的とする。

試験区間選定にあたっては，掘削中のモニタリング，コア観察結果，物理検層結果を基に同一区間において，地下水の水理および地球化学的特性に関するデータが取得可能と考えられる箇所を選定することとした。

・HDB-1 孔における水理試験

- 試験区間：深度 370m～395m
- 試験区間掘削時の掘削水：ベントナイト泥水
- 試験区間の特徴：

  健岩部および割れ目部を包含する区間で掘削中のモニタリング，電磁フローメーター検層結果からは顕著な水みちは確認されていない。
- 実施した試験：

  パルス試験，スラグ試験（孔内洗浄効果の確認），岩芯を用いた室内透水試験（深度 376m 付近）。
- 試験結果：試験データの一例を図 3.5-29 に示す。

a) 試験区間の水圧はほぼ静水圧で分布する。
b) パルス試験および，スラグ試験結果から概算された透水係数は 10^{-10} (m/s) オーダーである。
c) 試験区間内のコアを用いた室内透水試験結果から算定された透水係数は，10^{-11} (m/s) オーダーである。
d) スラグ試験における孔内洗浄の効果については，今後検討が必要。
e) 試験区間からのガスの湧出はなかった。
f) 試験区間の透水性が低く，地下水の採水は実施しなかった。

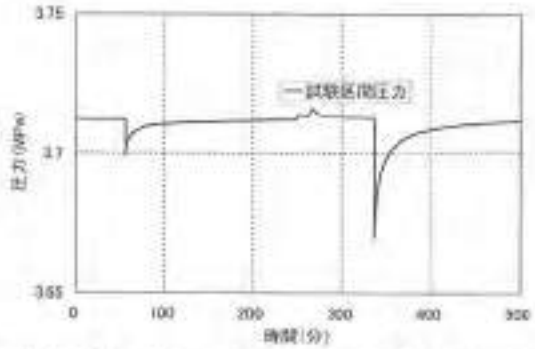


図 3.5-29　HDB-1 孔における試験結果の一例

・HDB-2 孔における水理試験

- 試験区間：深度 344.9m～404.9m
- 試験区間掘削時の掘削水：清水（泥水未使用）
- 試験区間の特徴：

  健岩部および割れ目部を包含する区間で掘削中のモニタリング，電磁フローメーター検層結果からは顕著な水みちは確認されていない。

  電磁フローメーター検層時に実施した孔内水の比抵抗計測により，試験区間には低比抵抗の水が存在する。
- 実施した試験：

  パルス試験，スラグ試験，岩芯を用いた室内透水試験（深度 200m 付近，深度 346m 付近および，深度 389m 付近）。水理試験終了後，地下水の採水を実施。
- 試験結果：試験データの一例を図 3.5-30 に示す。

a) 試験区間内の圧力を全水頭に換算すると地上約 40m に被圧されている。
b) ガスの影響が小さいと判断できるパルス試験結果から概算された透水係数は 10^{-11} (m/s) オーダーである。
c) 深度 200m 付近の岩芯を用いた室内透水試験結果から算定された透水係数は，10^{-9} (m/s) オーダーである。また，試験区間内のコアを用いた室内透水試験結果から算定された透水係数は，10^{-10} (m/s) オーダーであった。
d) スラグ試験においてガスの湧出が確認された。

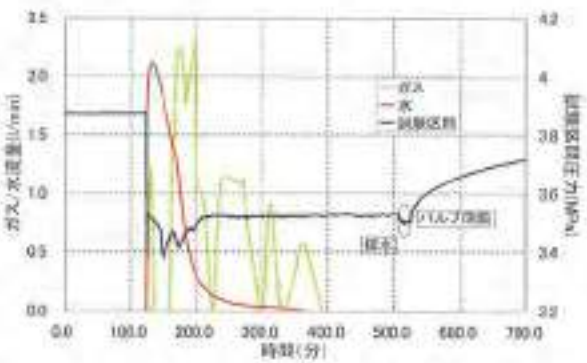


図 3.5-30　HDB-2 孔における試験結果の一例

現在，それぞれの試錐孔における取得データの技術的評価（泥水の影響やガスの影響），試験結果の詳細な解析，場の現象の解釈を実施中である。

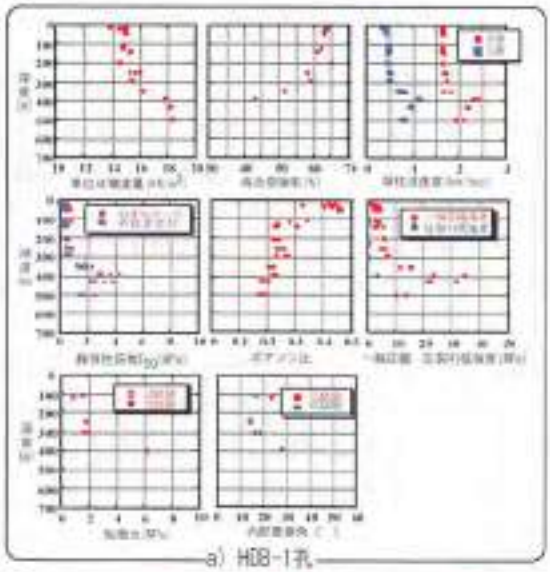
HDB-1 孔，HDB-2 孔での水理試験結果については，泥水による影響やガスの影響に関しての考察・評価を行うとともに，試験結果を最も適切に表現できる透水係数や比貯留係数の同定を試みる。また，岩芯を用いた室内試験結果と原位置試験結果との比較により，割れ目部の透水性に関する考察を行う。さらに，今後も試錐調査を通して，幌延深地

層研究計画での対象地層の水理に係わるデータを取得するとともに，ガスが発生する条件下での原位置水理試験・採水技術の構築を図る。

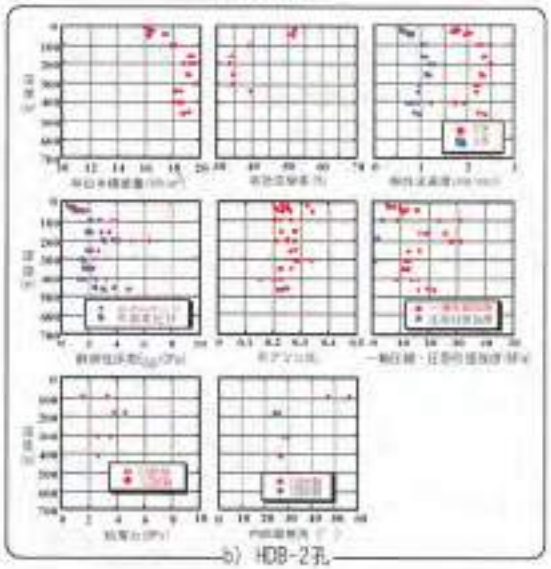
iv) 岩盤力学

・室内試験

岩芯室内試験によって現在までに得られた主な物性値を図3.5-31に示す。HDB-1孔の深度48m以深は，声問層主部層であると想定される。室内試験では，地表から深度350m程度までは，単位体積重量が15kN/m³程度，P波速度は1.65km/sec程度，一軸圧縮強度5MPa程度である。しかし，RQDが良好な値を示す深度350m以深からは，力学物性値（静弾性係数，一軸圧縮強度等）はそれぞれ増加傾向を示す。



a) HDB-1孔



b) HDB-2孔

図3.5-31　室内試験結果（HDB-1，2）

HDB-2孔の深度57m以深は，稚内層であると想定される。室内試験結果では，単位体積重量16～20kN/m³，P波速度は2.0～2.5km/sec，一軸圧縮強度は20～30MPaとHDB-1孔の結果に比べ大きめの値を示すが，物性値の深度変化の傾向はHDB-1孔に比べ複雑である。

このような両孔における室内試験結果の差異は，声問層と稚内層の岩石の物理的・力学的特性の違いを表すものと考えられる。

・室内試験（初期地圧測定（AE測定））

本試験は，岩芯を用いた初期応力測定手法の適用性評価を目的に実施したものである。岩芯の採取深度は，HDB-1孔は深度309.70m－310.62m，HDB-2孔は深度297.20～298.00mである。

試料採取から試験までの時間はカイザー効果の時間依存性を考慮し，24～36時間程度までとした。試験は，採取した岩芯より鉛直1方向，水平3方向の供試体を作成し実施した。本試験では，東濃鉱山での実績（畑ほか，1999）同様イベント計数法を用い，しきい値はノイズレベルを基準として決定した。試験条件を表3.5-7に示す。

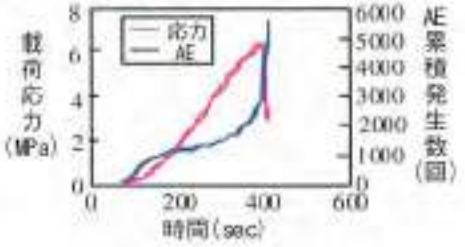
表3.5-7　試験条件

試験孔		HDB-1	HDB-2
プリアンプ		40dB	
メインアンプ		50dB	
載荷速度(mm/min)		0.18	
採取深度(m)		309.70～310.62	297.20～298.0
供試体のサイズ（直径×高さ：mm）		30×60	
しきい値	VL(mV)	330	300
	VH(mV)	360	336

結果の一部を図3.5-32に示す。今回の試験では，載荷初期からAEが頻発するパターン（図中a））と，ある応力レベルに達した時点からAE発生数が急増するパターン（図中b））という2つの傾向が表れた。AE法によって応力値を算定できるパターンは後者であるが，前者の原因については現在検討中である。なお，本試験では供試体が破壊するまで試験を実施し，試錐孔に対して鉛直方向と水平方向の一軸圧縮強度を求めた。HDB-1孔においては鉛直方向の強度より水平方向の強度が小さく，HDB-2孔においてはその逆の傾向を示すといった強度異

方性が認められている。このような堆積構造に起因すると思われる岩石の力学的異方性に関するデータ取得は今後の課題である。

a) HDB-1, 鉛直方向



b) HDB-2, 鉛直方向

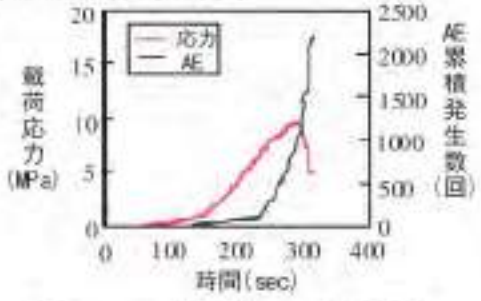


図 3.5-32　載荷中の AE 発生状況

・初期地圧測定（水圧破砕試験）

本調査では，HDB-1，HDB-2 孔とも 3 深度で水圧破砕法による初期地圧の測定を実施する計画である。平成 13 年度には，各孔 1 深度（HDB-1：深度 381.0m，HDB-2：深度 281.9m）で試験を実施した。その結果を表 3.5-8 に示す。試験位置は，RQD の深度分布やキャリパー検層の結果などから亀裂が少なく孔壁が安定した位置を選定した。用いた試験システムは最大主応力値を正しく評価するため改良を加えられた最新の測定システムである（伊藤ほか，2001）。

表 3.5-8　水圧破砕法による初期応力測定結果

	HDB-1 孔 (深度 381.0m)	HDB-2 孔 (深度 281.9m)
水平面内最大主応力	11.80(MPa)	8.25(MPa)
水平面内最小主応力	7.23(MPa)	5.91(MPa)
水平面内最大主応力の方向	N86.9W	N29.6W

地震のメカニズム解から推定される本調査地域の最大圧縮軸はほぼ東西である（森谷，1999）。HDB-1 孔の測定結果は，このような広域応力場の方向とほぼ一致するが，HDB-2 孔の結果はそれと異なる。まだ，両孔とも 1 深度のデータしか得られていないことから，残りの測定結果を合わせ，地質構造と初期応力場との関連性について今後の検討する予定である。

③ まとめ

平成 13 年度中の試錐調査は現在掘削中であるため，最終的な結論は調査の終了を待たなくてはならないが，現在深度（HDB-1：深度 641.3m，HDB-2：深度 581.4m）までは，声問層・稚内層の岩相変化のほとんどない泥岩が分布していることを確認した。また，地層の傾斜は堆積構造（ラミナ）から HDB-1 では 20～40° の傾斜，HDB-2 孔ではほぼ水平な傾斜であり，既存資料から推定した地質構造とほぼ調和的なことが推定できた。

パルス試験結果および，スラグ試験結果より算定された概算の透水係数は HDB-1 孔（深度 370～395m）で 10^{-9} (m/s)，HDB-2 孔（深度 344.9～404.9m）で 10^{-11} (m/s) オーダーであった。

室内試験結果によって得られた物性値の力学的特性は，HDB-1 孔よりも HDB-2 孔の方が大きめの値を示している。

平成 14 年度は，研究所設置地区及びその周辺地区において，深度 500m 程度の試錐孔を 3 孔掘削し，地質環境のモデル化や施設検討・設計に必要なデータを取得する予定である。

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-深層ボーリング報告書-，動燃事業団技術資料（契約業務報告書），JNC TJ1027 98-012.

畑　浩二，大内　一（1999）：98SE-01孔のコアを用いたAE法による初期応力測定，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；(株)大林組），JNC TJ7400 99-001.

伊藤高敏，加藤春實，林一夫(2001)：水圧破砕試験における真のき裂開口圧測定による最大初期応力評価法とその実用化システムの開発，2001 年西日本岩盤工学シンポジウム.

加藤春實(1999)：98SE-01 孔における水圧破砕法による初期応力測定，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；同和工営(株)），JNC TJ7400 99-004.

石油公団(1995)：国内石油・天然ガス基礎調査　基礎試錐「天北」調査報告書.

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，月刊地球 21，pp.557-564.

1-5) 地表からの調査のまとめ

空中・地上物理探査，地質調査，試錐調査等の地表からの調査で得られたデータは，研究所設置候補区域の選定の際に検討した地質分布，地質構造等を支持するものであり，各調査で現在までに得られた物性値等は一般的な性質を有していることが確認された。以下に各調査データについて示す。

・物理探査

泥質岩を主体とする声問層，稚内層，増幌層（上部泥岩層）分布域の比抵抗値は，空中物理探査の電磁探査の結果では，浅部を除き地下 150m 程度まで 1～10Ω·m 程度，地上物理探査（電磁法探査）の結果でも 1～7Ω·m程度を示し低比抵抗で比抵抗コントラストは小さいことが分かった。図 3.5-33 に示す一般的な岩石等の比抵抗（物理探査学会, 1999）と比較すると標準的な分布域に属する。

また，既存試錐調査（動燃事業団, 1987；石油公団, 1995）及び現在実施中の試錐調査の比抵抗検層データとの比較においても概ね調和的な結果が得られている。

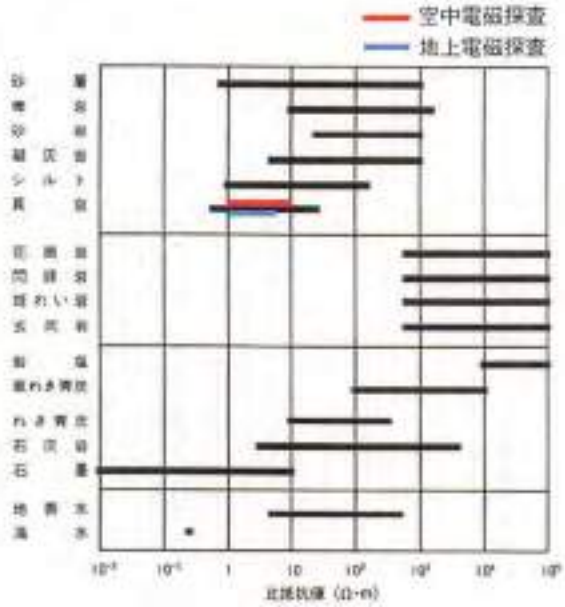


図 3.5-33 岩石等の比抵抗
（物理探査学会, 1999 に加筆）

・水理試験

図 3.5-34 は岩種ごとの透水係数が取りまとめられたものである（地下水ハンドブック編集委員会, 1980）。HDB-1, HDB-2 孔のコアを用いた室内透水試験結果と図 3.5-34 の頁岩の透水係数と比較すると，今回の室内透水試験結果は頁岩の透水係数のばらつきの範囲内にあることから，岩の透水性としては一般的な性質を有していると考えられる。

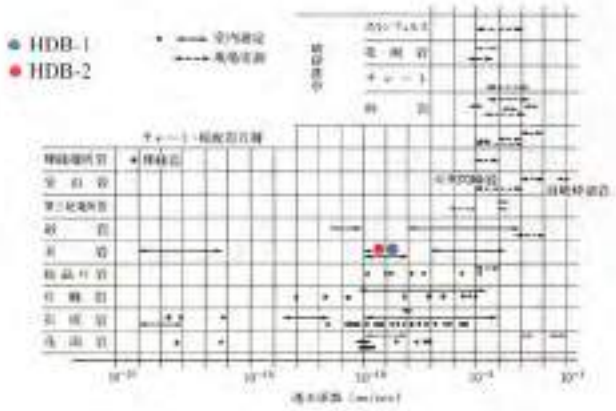


図 3.5-34 いろいろな岩の透水係数
（地下水ハンドブック編集委員会, 1980 に加筆）

・力学試験

図 3.5-35 は，サイクル機構が実施した文献調査等に基づく新第三紀堆積軟岩（泥質岩・凝灰岩）の物理・力学特性と HDB-1, HDB-2 孔の室内試験結果を比較したものである。例えば，有効空隙率，吸水率等の物理特性は，国内の同種の岩石特性と比較した場合大きいものの，力学特性（静弾性係数，一軸圧縮強度等）は，最頻値やその分布範囲，分布特性とも「第 2 次取りまとめ」で示される物性値分布と変わらないことがわかる。従って，HDB-1, HDB-2 孔の岩石の力学物性は，国内に分布する新第三紀堆積軟岩と比べ特殊なものではないと考えられる。

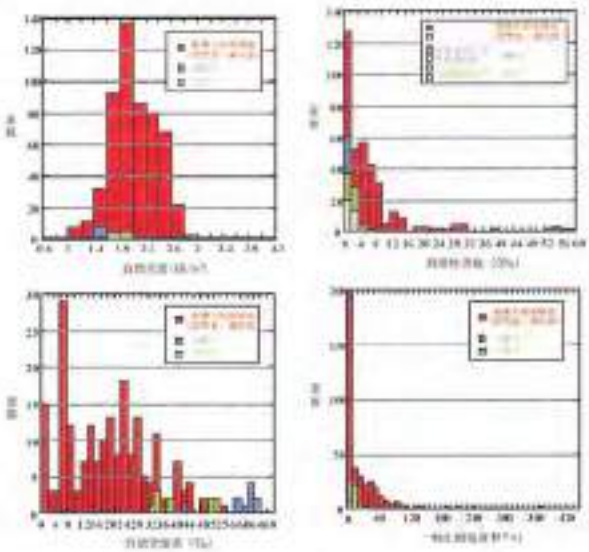


図 3.5-35 国内の堆積軟岩との比較

また，岩石の物理的・力学物性は国内に分布する堆積軟岩のそれと大きく変わらないことが確認された。

参考文献

物理探査学会(1999)：物理探査ハンドブック.

地下水ハンドブック編集委員会(1980)：地下水ハンドブック.

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-深層ボーリング報告書-，動燃事業団技術資料（契約業務報告書），JNC TJ1027 98-012.

石油公団(1995)：国内石油・天然ガス基礎調査基礎試錐「天北」調査報告書.

2) 地質環境のモデル化と地下施設建設に伴う地質環境の変化の予測

地表からの調査で得られたデータに基づき，地層や地下水の状況を表す地質環境モデル（地質構造モデル，岩盤の水理モデル，地下水の地球化学モデル，岩盤力学モデル）を構築する。調査の進展によるデータ数の増加に併せて，それぞれのモデルの更新・改良を逐次行う。これにより，地質環境のモデル化に必要な地質環境データの項目，量，精度等について明らかにし，地表からの体系的な調査手法，モデル化手法を構築する。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う。平成13年度は，地質構造モデル，岩盤の水理モデルを構築し，地下水の地球化学モデル，岩盤力学モデルについては，物性値の整理等を行った。

2-1) 地質構造モデル

① 実施内容

岩盤の水理モデル及び地下水の地球化学モデル，岩盤の力学モデルのベースとなる地質構造モデルを構築し，地質構造・地質環境の可視化ソフトウェアであるEarthVisionを用いた三次元可視化を行う。

平成13年度は幌延町の広域について，既存データを用いた地質構造モデル（以下，第0次地質構造モデル）及び平成13年度に実施した空中物理探査，地上物理探査，試錐調査結果を反映した地質構造モデル（以下，第1次地質構造モデル）を作成し，第0次地質構造モデルまでの三次元可視化を行う。

平成14年度以降は，地表からの調査により得られたデータに基づき，平成13年度の広域の地質構造モデルの確認・更新を行うとともに，平成14年度の早期に選定される研究所設置地区及びその周辺地区を包含するサイトスケールのモデル化を行う。

② これまでの成果

これまでに，既存の地質・地質構造に関するデータに基づき，地質図及び地質断面図を作成した。

i) 地表地質図（図3.5-36）

既存の地質・地質構造に関する情報に基づき，幌延町内全域の地表地質図について，1:50,000のスケールで取りまとめを行った。

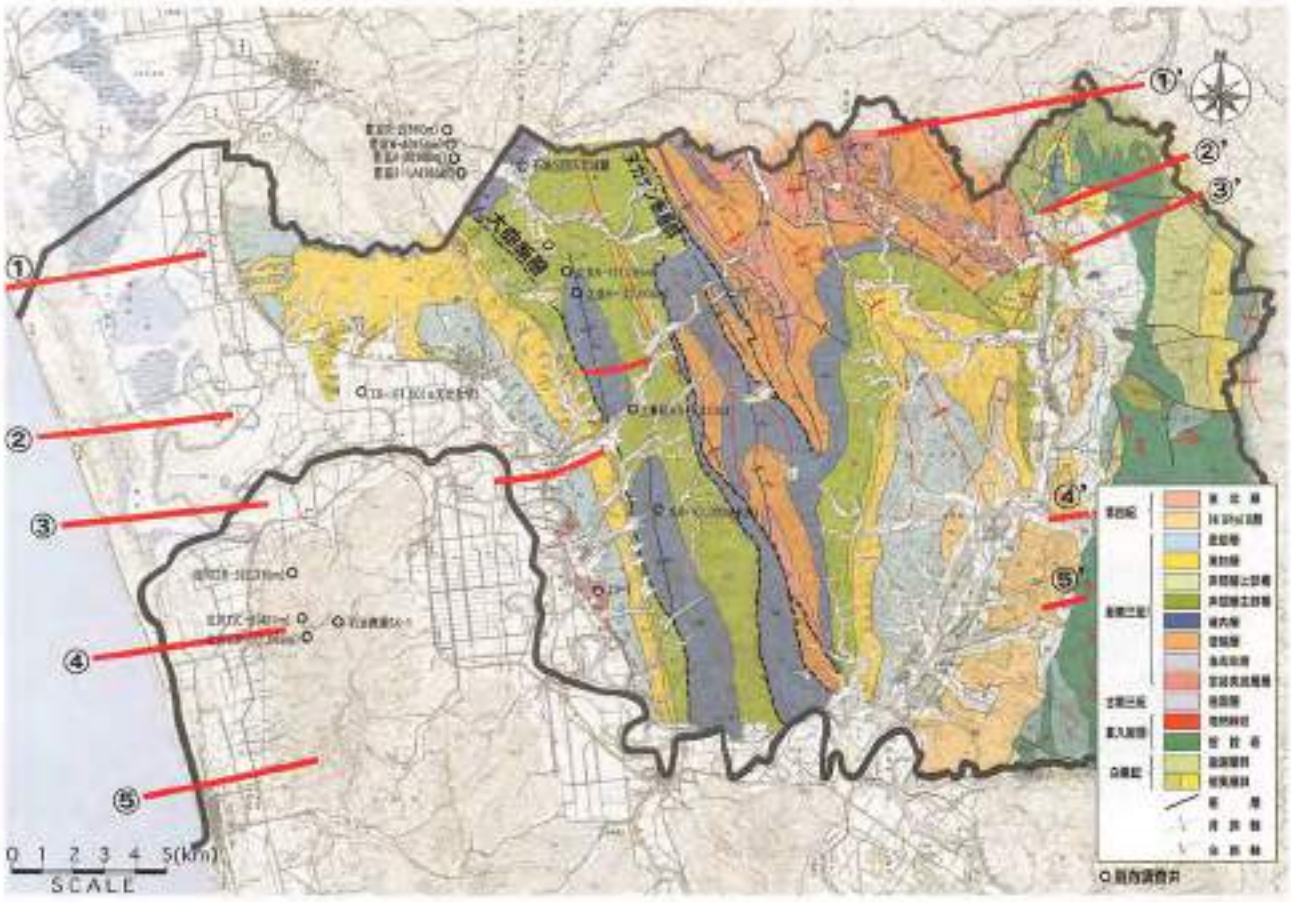


図 3.5-36　地表地質図

断層分布及び問寒別川よりも西側地域の地質分布については，サイクル機構が過去に幌延町内で行っているリニアメント解析や地質調査，岩石試料の分析等の結果から取りまとめた地表地質図（柳田，1998）に従った。

ヌカナン断層群よりも東側の地質分布については，道立地下資源調査所(1960)，松井寛(1961)，松井愈(1963)，松井・山屋(1966)，加藤ほか(1979)，地質調査所(1979, 1981)，福澤(1985)を参考に，サイクル機構が取りまとめている地表地質図（柳田，1998)の断層分布と整合が取れるよう，露頭位置等をルートマップ等で確認して修正した。

ii）**地質断面図**（図3.5-37）

地質構造に関する情報（松井寛，1961；松井愈，1963；松井・山屋，1966；地質調査所，1979；福澤，1985 など）や既存の石油・天然ガス調査井に関する情報（北海道開発庁，1959；長尾，1969；柳田・田中，1992；石油公団，1995；兼清，1999など），既存の弾性波（地震）探査に関する情報（柳田・田中，1992；石油公団，1973, 1991, 1998など），既存の電磁探査に関する情報（石油公団，1993）を参考に，サイクル機構がこれまでに取りまとめている海抜約-1,500mまでの地質断面図（柳田，1998)の確認・修正を行うとともに，基盤岩である白亜系が分布する海抜-5,000mまでの地質断面図を作成した。

③ まとめ

既存の地質・地質構造に関する情報を整理し，幌延町の地表地質図及び深度5,000mまでの地質断面図5断面を作成した。今後，これらの地表地質図及び地質断面図について，大曲断層及びメカナン断層群など断層の形態や変位量，神居古潭帯との境界付近の地質構造などについて地質学的な検討・修正を行い，第0次地質構造モデルの三次元可視化を行う。また，平成13年度の地表からの調査結果に基づき，第0次地質構造モデルの確認・修正を行い，第1次地質構造モデルを作成する。

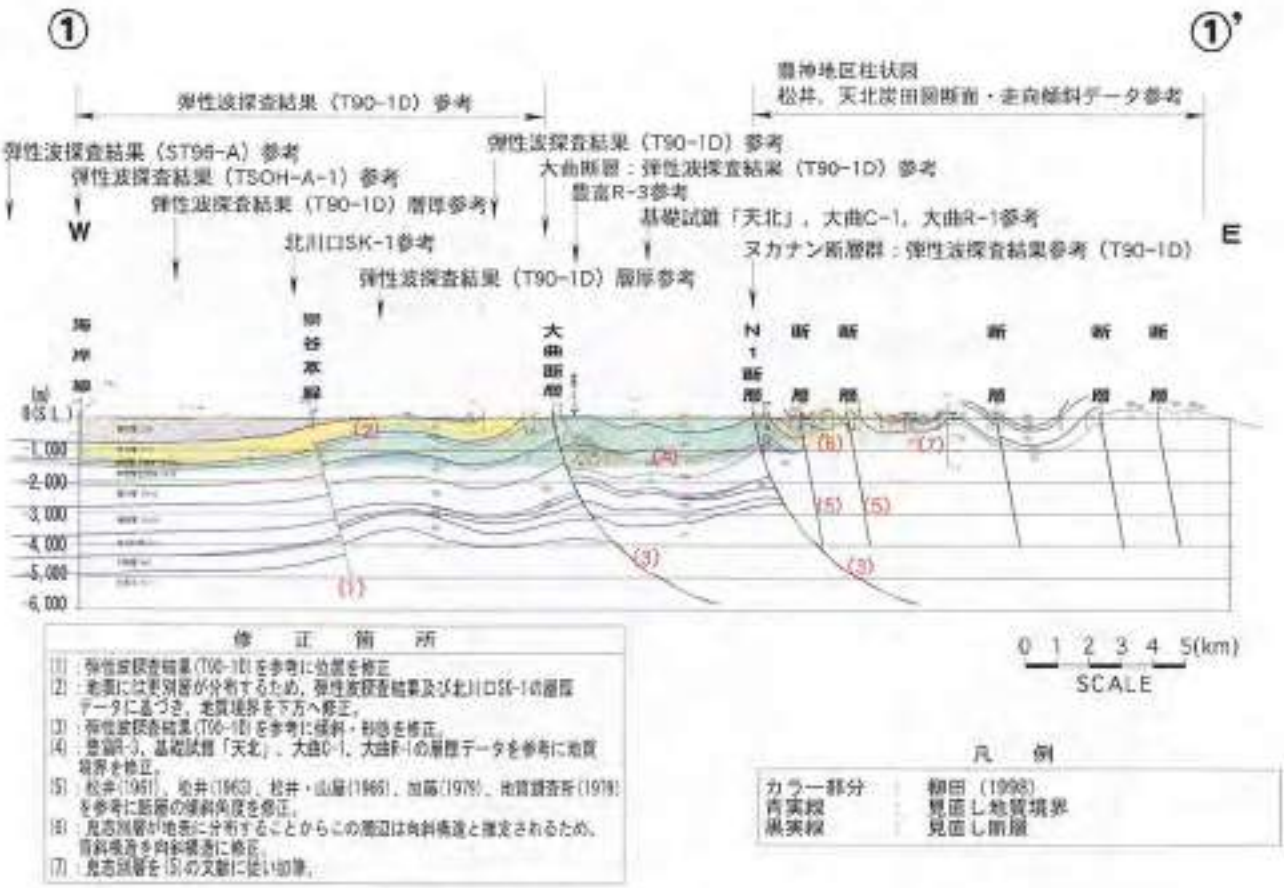


図 3.5-37 ①—①' 地質断面図

参考文献

地質調査所(1979)：大北炭田地質図説明書，日本炭田図13.

地質調査所(1981)：20万分の1地質図幅「稚内」

福澤仁之(1985)：北海道天北 深堤地域の上部新第三系層序の再検討-特に"稚内層"，"声問層"について-，地質学雑誌，91，pp. 833-849.

北海道開発庁(1959)：北海道地下資源調査資料 天塩国天塩油田調査報告書，昭和34年3月，pp1-22.

北海豊比古(1999)：北海道北部地域における地質構造データ収集・整理，サイクル機構技術資料，(契約業務報告書；(株)地球科学総合研究所)，JNC TJ1400 99-006.

加藤幸幸，新井田清信，渡辺興亜(1979)：神居古潭構造帯，知駒岳周辺の蛇紋岩メランジュ，地質学雑誌，85，pp. 279-285.

松井　愈(1961)：天塩国幌延町幸問寒別北西部付近地質調査報告，地質調査所北海道支所調査研究報告会前刷録，No. 13，pp. 47-50.

松井　愈，山崎俊夫(1966)：北海道天塩郡幌延町問寒別北西部と旧幌延炭鉱付近の地質，地質調査所月報，17，pp. 319-343.

松井　愈(1963)：問寒別川流域の森林経営と保全に関する基礎的研究　天塩国幌延町問寒別地域北海道大学天塩第二演習林の地質・土壌調査報告，演習林業務資料第六号，pp. 1-60.

長尾捨一(1969)：北海道の構造性天然ガスについて，北海道立地下資源調査所報告，No. 40，pp. 1-50

石油公団(1973)：天然ガス基礎調査　基礎物理探査「天塩平野」調査報告書.

石油公団(1991)：国内石油・天然ガス基礎調査　陸上基礎物理探査「天北地域」調査報告書.

石油公団(1993)：北海道天北地域におけるMT法電磁探査実施調査報告書.

石油公団(1996)：国内石油・天然ガス基礎調査当初試掘「天北」調査報告書.

石油公団(1998)：国内石油・天然ガス基礎調査　海上基礎物理探査「天北沖海域」調査報告書.

道立地下資源調査所(1960)：5万分の1地質図幅「豊富」.

柳田　誠，田中竹延(1992)：北海道北部地域の第四紀層序に関する検討，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；(株)アイ・エヌ・ユー)，JNC TJ1420 98-025.

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(研究委託報告書；(株)アイ・エヌ・ユー)，JNC TJ1400 98-001

2-2) 岩盤の水理モデル

① 実施内容

岩盤水理モデルに関しては，地質構造モデル及び表層水理調査や試錐調査などの結果を基にした水理地質構造モデルの構築，地下施設建設に伴う地下水流動場の変化の予測解析を行うとともに，新たな調査結果の追加に伴い，モデルの更新と予測解析を繰り返す。これらの過程において水理地質構造モデルの構築および解析技術の確立を目指す。

平成13年度は，地下水流動解析における検討課題のうち，解析領域の設定，涵養量の設定に関する検討を実施した。また，入力データの不確実性が解析結果に及ぼす影響に関する基礎的検討として地下水流動感度解析を実施した。

② これまでの成果

ⅰ）解析領域の設定に関する検討

図3.5-38に示す解析領域を横切る東西断面に現れる2本の尾根筋を組み込むモデル（深度標高境界-2,500mと-5,000m）と海側の1本のみを解析領域に組み込むモデル（深度標高境界-2,500m）の3種類のモデルを用いて解析を行った(海側境界は海岸で固定)。

解析は，境界位置による地下水流動の違いが顕著に現れるように地表面に水頭を固定した飽和解析を行った。

側方境界位置の異なるモデルにおける解析結果では，概略的な地下水流動状況に顕著な違いは現れていないことから，水平方向の領域設定についてはあまり大きな影響は無いと考えられる。

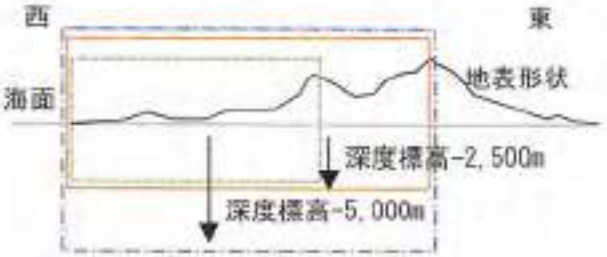
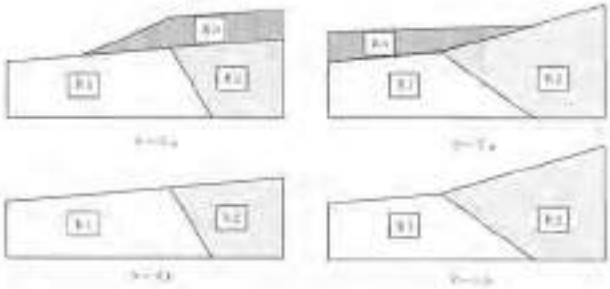


図3.5-38 解析領域設定の検討範囲

深度方向への境界位置の設定については，山間部での高い水頭が回りこみ平野部の全水頭分布に影響を与える結果となったことから，今後も検討が必要である。

ⅱ）涵養領域の設定に関する検討

涵養領域の設定に関する検討概要をイメージモデルで図3.5-39に示す。K1，K2と異なる透水係数から成る2種類の基本タイプで，透水係数K3からなる表土層をモデルに反映させる場合とさせない場合の計4ケースについて同一涵養量を与えた際の地下水面形状の比較を行い，透水係数が大きい表土層の影響，透水係数の違いと涵養量の関係について検討した。



(a)タイプ1　　(b)タイプ2

図3.5-39 解析領域設定概要

解析の結果から，表土層は基盤上面に水位を保持し表層部に水みちを維持する役割，地表から供給された水を下方に伝達するとともに斜面に沿った下流部への水みちとしての役割，および基盤部からの流出を受け入れ下流部に運び再涵養する役割を果たすことが示された。このことから，特に不均質性に富んだ水理地質構造モデルに対しては，表土層をモデルに組み込むことにより涵養量の設定が容易になることが示唆された。

実際の地下水流動においては，透水係数の大きな表層部は重要な位置を占めると想定されることから，広域の地下水流動を把握する際，表層部の地下水流動特性を把握することの必要性・重要性が示された。

ⅲ）地下水流動感度解析

地下水流動解析を実施する上での入力パラメータの不確実性が解析結果に及ぼす影響を評価するための基礎的検討として，透水係数，涵養量等の入力パラメータが解析結果（ポテンシャル，動水勾配，流動時間）にどの程度の違いを与えるのかを確認するための地下水流動感度解析を実施した。

解析対象範囲を図3.5-40に示す。感度解析における標準ケースは表3.5-9のように設定し，感度解析のケースについては各層の透水係数が標準ケ

ースより大きい場合，小さい場合を設定した。透水係数の設定に際しては，既存の文献（梅田ほか，1995）を参考にそのばらつきを設定した（表 3.5-9）。なお，感度の比較を行った深度は 500m および 1,000m である。

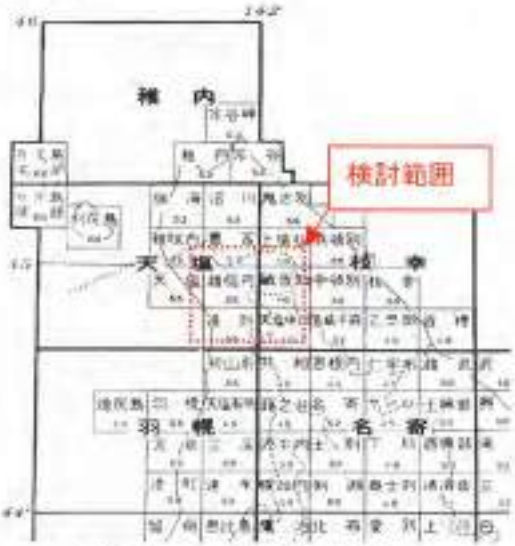


図 3.5-40　解析検討範囲

表 3.5-9　感度解析における標準ケースと標準偏差

地層	標準ケース (m/sec)	感度解析の標準偏差 (透水係数の対数)
表層	6.32×10^{-7}	1.5
沖積層 恵北層 更別層 勇知層	6.32×10^{-7} (平均値)	1.5
声問層	3.12×10^{-9}	1.0
稚内層	1.00×10^{-9}	1.0
先第三紀層	1.00×10^{-10}	0.8
断層 (大曲断層、 対ケン断層)	1.00×10^{-9}	1.0

感度解析により以下のような結果が得られた。

・透水係数について

勇知層～第四紀層は比較的地表近くに分布している地層であり，これらの地層の透水係数のばらつきはポテンシャル，動水勾配，流動時間のいずれに対しても影響が比較的大きい結果となった。

声問層については，勇知層～第四紀層に比較して感度はかなり小さいと言えるが，声問層が地表近くに分布する地区に関しては，第四紀層と同様にポテンシャル，動水勾配，流動時間に対して大きな影響を与えていることが確認された。これは，声問層の分布深度が浅い地区では，同層が浅層での流動経路の一部になっているためと考えられる。

稚内層，先第三紀層については，感度が小さく，特に，先第三紀層についてはゼロに近いと言える。これは，先第三紀層の地層が，感度をチェックしている地点（500m～1,000m）に比べて地下深部に分布していること，および涵養された地下水は先第三紀層よりも上部での流動がほとんどであることが理由として考えられる。

・表層の透水係数

表層の透水係数の感度は非常に大きいと言える。今回の感度解析結果からは表層の透水係数は，地下水面分布の深さを左右し，さらにこの地下水分布は地下深部のポテンシャルにも大きな影響を与えていると推定される。

・断層の透水係数

大曲断層の透水係数が与える影響は，断層近傍を除きかなり小さいと言える。

・涵養量

涵養量が大きいほどポテンシャル値も比例して大きくなっており，ほぼ線形であることが分かった。ただし，山地部の中にある地区に比べて，河川の流出境界に近い地区では，感度はかなり小さいと言える。涵養量と動水勾配の関係についても，ほぼ比例関係にあることが分かった。また，その感度も全体的にかなり大きいと言える。

③ 今後の計画

物理探査や試錐調査から得られたデータを基に，水理地質構造モデルの更新を行うとともに，密度の異なる地下水が存在する条件での広域的な地下水流動解析手法や水溶性ガスの存在を考慮した地下水解析手法の開発・改良を進める。また，研究所設置地区選定後は，立坑掘削が研究所設置地区周辺の地下水流動に与える影響等の予測解析を進める。

参考文献

梅田浩司，柳澤孝一，米田茂夫(1995)：日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成，地下水学会誌，37，pp. 69-77.

2-3) 地下水の地球化学モデル

① 実施内容

幌延地域の地下水中には，石油，ガスが胚胎する可能性と塩水系と淡水系の地下水の存在が報告されている。塩水系地下水の存在については，本地域で実施された試錐孔の深度1,000m付近から採水された地下水の化学分析結果は海水に近い（図3.5-41；青山ほか，1990，1991）。

このような地下水の地球化学的な特徴を考慮し，幌延地域での地下水の地球化学的研究の目的を，a)地下水中の石油，ガスの存在量を定量的に把握すること，b)塩水系地下水と淡水系地下水の境界を把握すること，c)岩石－水反応のプロセスを解明すること，d)地下水年代を決定し地下水流動解析結果との比較を行うこととした。

平成13年度の地下水の地球化学に関する調査研究では，平成14年度の早い時期に行われる，研究所設置地区選定に資するデータ（地下水中のガスの含有量，岩石，地下水の化学組成，酸化還元電位など）を取得するとともに，各調査において取得される地球化学データの品質管理方法や技術の検討を行う。

図3.5-41　トリリニアダイアグラム

② これまでの成果

本調査においては，できる限り掘削水（掘削泥水）による汚染（影響）の少ない原位置の地下水を採取し，化学分析を実施する必要がある。そのため，掘削水の地下水への汚染の程度を把握するために，掘削水中へ一定濃度の蛍光染料（Sodium-naphthionate，図3.5-42：Werner ,1998）を添加した。また，掘削中は，掘削水の温度，pH，電気伝導度の連続モニタリング，およびJNC(1999)を参考に，定期的な化学分析等を実施した。

図3.5-43に掘削水として使用した井戸水の温度，pH，電気伝導度についての変化を一例として示す。電気伝導度の変化は，地下水の塩水・淡水境界の分布形状を把握することができると考えられる（木山・丸井,1999）ことから，試錐調査により取得された岩芯を10m毎に蒸留水中に浸し，その溶液の電気伝導度を測定した。図3.5-44に岩芯を用いた電気伝導度の掘削深度方向への変化を示す。その結果，HDB-1，HDB-2孔の両試錐孔とも深度400m付近までにおいて，淡水系地下水と塩水系地下水を区別できるような電気伝導度の系統的な変化は認められない。さらに，物理検層で取得された比抵抗の結果（図3.5-28）は，比抵抗の値が小さいほど電気伝導度が高くなる相関を示すと考えられる。地下水を採水した深度344.9～404.9m付近の比抵抗は，約2Ω・mと表層部の約7～10Ω・mと比較すると明らかに低く，電気伝導度が高いことから塩濃度の高い地下水の存在が予想される。

地下水の採水については，水理試験と組み合わせた地下水の採水を実施した。HDB-1孔については，透水性が悪く，深度約400m付近まで地下水の採水は実施できなかった。HDB-2孔では，水理試験終了後，深度344.9～404.9mの区間において地下水の採水を実施した。地下水の汲み上げは，水中ポンプでの連続的な揚水が困難であったことから，エアーリフトによる揚水，孔内水位の回復を繰り返し実施し，地下水を汲み上げた。

揚水中は，蛍光染料濃度，pH，電気伝導度，溶存酸素，酸化還元電位について連続的なモニタリングを実施した。一般に地下深部の地下水中の溶存酸素は少なく，酸化還元電位は低いと考えられるが，本調査の場合はエアーリフトにより地下水を汲み上げたこと，さらに，地上部における連続モニタリング装置へ揚水された地下水を導入する間に大気中の酸素の混入を考慮する必要がある。従って，現状では溶存酸素や酸化還元電位の測定値は参考値として取り扱い，今後，原位置でのモニタリング手法の開発，もしくは揚水方法の改良などを実施し，これらのモニタリング手法を確立する必要がある。以上のことから，本調査では，主として蛍光染料濃度の変化から掘削水の影響を推

定した。採水された地下水試料中の蛍光染料濃度は，掘削水へ添加した濃度の約 10%であったことから，採水された地下水の約 10%程度は掘削水によって汚染された地下水であると考えることができる。地下水の採水時の物理化学パラメータを表 3.5-10 に示す。

さらに，採水された地下水の電気伝導度は，掘削水として用いた井戸水の電気伝導度に比べ 2 桁高い値を示していることから，採水された地下水は表層部の地下水に比べ塩濃度が高いと推定される。

図 3.5-42　掘削水に添加した蛍光染料 (Sodium-naphthionate) の構造式

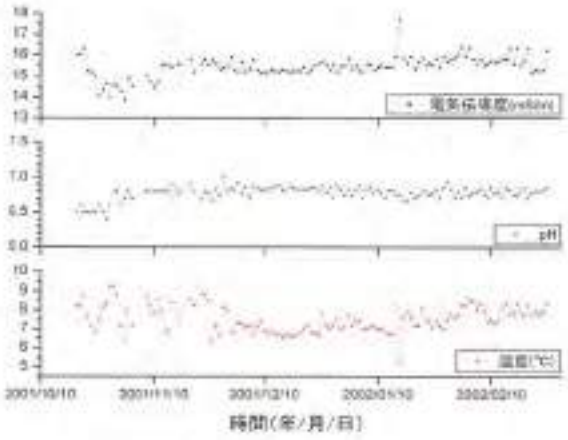


図 3.5-43　掘削水用井戸水の水質変化

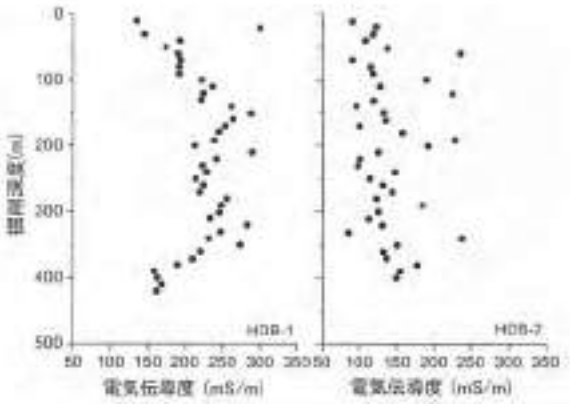


図 3.5-44　岩芯を用いた電気伝導度測定

表 3.5-10 採水時の物理化学パラメータ

採水区間	344.9m～404.9m
pH	7.1～7.3
EC	1366～1508 (mS/m)
温度	12.6～13.5 (℃)
酸化還元電位（白金電極）*	-78 (mV)
酸化還元電位（金電極）*	-98 (mV)
溶存酸素*	0.42 (μg/l)
蛍光染料濃度 (初期濃度 10ppm)	0.7～0.9 (ppm)

*；連続モニタリング中の大気の混入が考えられるため参考値

③ まとめ

岩芯を用いた電気伝導度の変化から淡水系地下水と塩水系地下水の境界について明確な結果は得られていないが，HDB-2 孔から採取された地下水（深度 344.9m～404.9m 区間）は，掘削水に用いている地下水の電気伝導度に比べ，明らかに電気伝導度が高いことから塩濃度の高い地下水（塩水系）であると推定される。

掘削水の汚染の程度を推定する指標として，揚水時の連続的なモニタリングと蛍光染料濃度が有効であることが分かった。しかしながら，泥水を用いた掘削時に泥水中での蛍光染料の濃度を一定に保つ手法が確立できていないことから，今後検討する必要がある。

今後の幌延地域での地球化学の調査として，以下の内容が挙げられる。

・本地域には塩水系の地下水の存在が示唆されたことから，塩水系と淡水系地下水の境界を把握するための調査実施方法について検討を行う。

・採取された地下水は，掘削水の汚染を完全に排除できていないことから，試錐孔を用いた長期モニタリング，長期的な採水を行い，原位置における地下水を採取するために試錐孔へ地下水を採取可能なモニタリング装置を設置する。
・地下水の年代を推定し，地下水流動解析の結果との比較を行うとともに，地下水流動解析と組み合わせた地下水形成モデルの諸元および，それに必要なデータセットについての検討を行う。

さらに，試錐調査において取得される地下水，岩石の地球化学的データの信頼性を向上させるために必要な調査技術開発（例えば，連続モニタリング装置の改良，掘削時に使用する泥剤，濃度コントロールの容易なトレーサーの開発など）を実施する。

参考文献

青山成夫，石井　卓，安達雄男，井伊博行，財江芳博，穂刈利之（1998）：地球化学特性値の取得を目的とした原位置採水・地下水計測技術の適用試験，サイクル機構技術資料（契約業務報告書：清水建設），JNC TJ1410 99-004。

青山成夫，石井　卓，財江芳博，安達雄男，井伊博行（1999）：深部地下水の地球化学特性調査，サイクル機構技術資料（契約業務報告書：清水建設），JNC TJ1410 99-005

Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) (1999) : Working programme for MIU-4 borehole investigations, JNC Tech Rep., JNC TN7410 99-007.

木山　保，丸井敦尚（1999）：下総層群印旛沼周辺における地下水流動と塩水・淡水境界に関する研究，地質ニュース，539号，pp.55-59。

Werner, K. (1998) : Tracing Technique in Geohydrology, A.A. Balkema, p.46.

3) 調査技術・調査機器開発

3-1) 試錐孔を用いた調査試験のための技術

① 実施内容

既存の調査結果から，幌延地域の地下水の特徴として，塩水系地下水やガスの存在が示唆されている（例えば，動燃事業団，1987）。従って，幌延深地層研究計画において，岩盤の水理に関する地表から地下深部までのデータを取得する調査研究では，塩水系地下水やガスが存在する条件下での水理データ取得技術を確立するとともに，上記条件下における地下水の流れに関する予測・評価技術を確立することが課題となる。

上記の課題を解決するため，平成13年度は以下の課題を設定し，調査機器の改良を行った。

・ガス湧出条件での試験の実施
・データの品質保証
・試験時の安全確保
・試験の効率化

② これまでの成果

i) 幌延の地質条件を考慮した試験装置の改良

幌延の地質条件を考慮し改良した試験装置の概念図を図3.5-45に示す。

主な改良点は以下の通り。

・配管径の拡大
・上部区間の圧力計測およびリアルタイムモニタリング機能の追加
・下部区間の圧力計測機能の追加
・ガス／水分離槽の追加とガス流量計測機能の追加
・揚水試験中の水／ガス採取機能の追加

改良した試験装置については，平成13年度の試錐調査を通してその適用性の確認を行っている。図3.5-46に示すとおり，新たに改良を加えた孔内圧力計測ユニットにより，水理試験時の試験区間の水圧変動を精度良く取得できることが確認された。

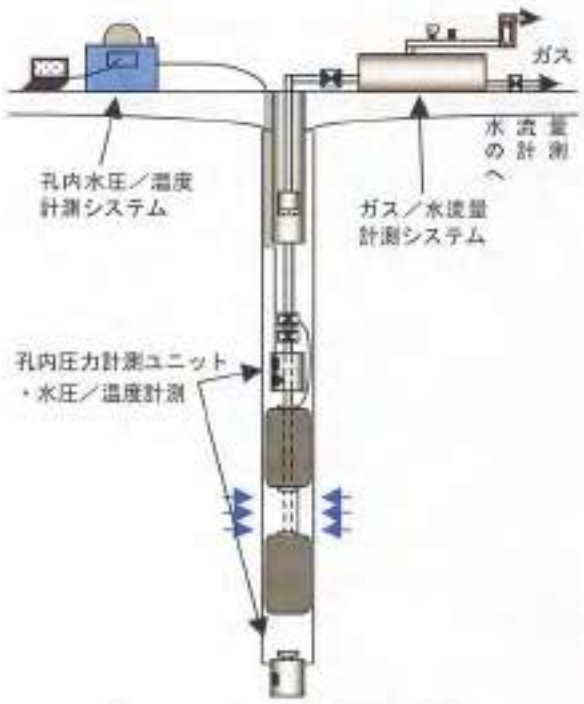


図3.5-45 水理試験装置の概念図

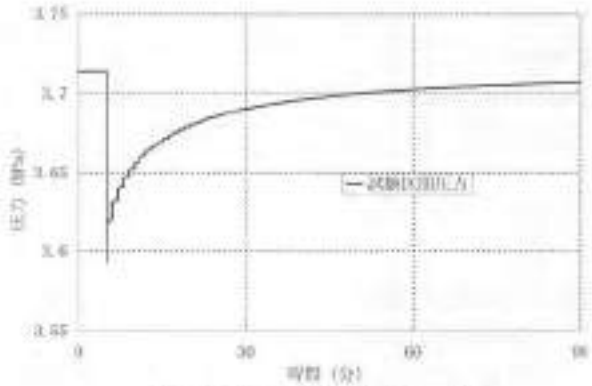


図3.5-46 試験結果の一例

③ 今後の計画

試験装置の改良については，今後も試錐孔での試験に用いて適用性を確認するとともに課題を抽出し，ガスが発生する条件下での水理試験，および水理試験時あるいは原位置被圧条件での地下水の採水に必要な機能の追加等の改良点について検討を行う。

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-深層ボーリング報告書-，動燃事業団技術資料（契約業務報告書），JNC TJ1027 98-012.

3.5.3 地質環境モニタリング技術の開発

1) 試錐孔を用いたモニタリング技術開発

① 課題と計画の概要

掘削された試錐孔へ長期モニタリング装置を設置し，間隙水圧，地下水の温度の長期的な連続モニタリング，および地下水の継続的な採水を実施することは，地下施設建設前後での地下水流動場の変化の把握，および定期的な地下水の採水により掘削水の影響を排除した原位置の地下水が採水できると考えられることから，その手法や機器についての検討を行った。

国内での長期モニタリングの事例としては，地下石油備蓄（長谷川ほか，1999）やサイクル機構東濃地科学センター（尾方ほか，1990）がある。

しかしながら，幌延地域のような寒冷地域，堆積軟岩，石油やガスを胚胎するような地層での長期モニタリングを実施した国内での公開事例は少ないのが現状である。そこで，幌延地域で長期的なモニタリングを実施するために，堆積岩を対象に地表から地下深部までの長期モニタリングを行っている海外の事例についての調査を実施し，その結果を参考に，幌延地域に適用可能な長期モニタリングシステムの選定や，モニタリングシステムの適用性等を検討した。

② これまでの成果

i) 海外事例の調査

間隙水圧の長期モニタリングによる立坑掘削影響の把握を目的に実施された，海外での間隙水圧の長期モニタリングに関する調査事例の調査を行った。また，長期モニタリングシステムとしては，マルチパッカー式の水圧計測・採水手法が一般的であることから，同様のシステムを使用している事例を，石油・天然ガス資源開発の分野を含めて調査した。

調査は，文献調査，海外の研究機関での聞き取り調査からなる。具体的な調査としては，堆積岩を研究対象としている ANDRA(フランス)，SCK・CEN(ベルギー)，Nagra(スイス)，NIREX(英国)を対象に資料収集を行い，長期モニタリングシステム(モニタリング項目，モニタリング期間，装置，実施方法，設置方法など)，調査時の問題点，水圧，岩盤力学特性，石油やガスの胚胎等による問題点などの項目について取りまとめた。

ii) 水圧観測・採水手法の検討

幌延地域のような寒冷地域，堆積軟岩における水圧観測・採水を実施するためには，寒冷期の凍結対策，掘削時の孔径拡大へ対応できることが必要である。また，長期観測に対応できる耐久性や観測中の計測機器のメンテナンスや検定，故障等に迅速に対応できることも必要とされる。

以上の点を考慮し，いくつかの既存の計測システムについて検討した結果，多点式の水圧観測，地下水の採水，測定精度，メンテナンスの実施方法，寒冷地の計測実績等の点から，SPMP システム(SolExperts, 2002)，Piezo システム(細谷・高橋，2000)と MP システム(Postbay, 1994)の 3 方式が，幌延地域での長期モニタリングの有力なシステムであると考えられた。

SPMP システムと Piezo システムの水圧観測精度は，深度に依存することなく水頭 10～15mm であることは，他のシステムと比較して最も精度が高い。また，SPMP システムと MP システムについては，システム設置後の透水試験が可能であるという特徴がある。その他の観測システムとの比較を表 3.5.11 に示した。

検討の結果，幌延地域へのマルチパッカー式の計測装置（SPMP システム，Piezo システム，MP システム）の適用性の問題点として以下のものがあげられる。

- 幌延地域の堆積軟岩における試錐孔壁条件は硬岩に比べ劣っている。このような試錐孔においてマルチパッカー式計測システムを適用する方法としては，ケーシング内に設置する方法と，直接岩着させる手法が考えられる。ケーシング内に設置する場合は，孔壁とケーシングの隙間部のシールを完全にできない可能性がある。直接岩着させる場合は，孔壁保護用のケーシングを抜管しながらパッカー設置をする必要があり，抜管時のトラブル（抜管不能や孔壁崩壊等）が問題となる。孔壁崩壊に対しては，複数のパッカーによるシールやベントナイト等による補助シール工法の検討が必要である。
- 幌延地域の地下水はガス成分やガス胚胎の可能性があり，長期計測システムを構成している材料が長期間安定であるかを検討する必要がある。石油関連現場での実績や耐石油成分や耐ガス対応材質の機器が望ましい。

表 3.5-11　水圧計測・採水手法のまとめ

水圧観測手法名	メーカー名	水圧観測	水圧観測点数	区水	上下水区間の	適用深度(m)	精度*	シール方式	メンテナンス
Casagrande型間隙水圧計	—	○	1点	×	×	150m	1mm水頭	充填	頻繁に
BATシステム	基礎地盤コンサルタンツ	○	1点	パッカー区水	○	600m	0.5%F.S.	孔底充填	検定交換可能
MGLシステム	MGL評価会 東京計器他	○	5点	○	×	150m	0.5%F.S.	水膨	困難
Piezoclusterシステム	Solexperts Schlumberger	○	10点 1ゾーン 区画型	○	○	50m	―	マルチパッカー	パッカー 部交換可能
SPMPシステム	基礎地盤コンサルタンツ Solexperts	○	4ペア	パッチ採水 連続採水	可能	1600m	10mm水頭	パッカー	検定交換可能
Piezoシステム	イギリスベンソン(株)	○	5区分	連続採水	×	500m	15mm水頭	パッカー	検定交換可能
MPシステム	Westbay社	○	9区分	パッチ採水 連続採水	採水中	1400m	0.1%F.S.	パッカー	検定交換可能

*1 精度は計測範囲（F.S.）の何分の1かで示されるか，水圧の水頭換算精度で示されている。

・観測システムは長期間にわたり，メンテナンスの必要があり，故障対策，簡易メンテナンス，定期的メンテナンスの計画を見通した機器選定を行う必要がある。データの品質を保証するためには，定期的な計測機器の精度検定が必要不可欠である。原位置で実施可能な簡易検定と定期的な精密検定を組み合わせることにより，データの信頼性の向上を図ることができる。

③ まとめ

予例調査を実施した全ての施設で，地下水観測および採水分析は重要な項目であり，広域の地下水調査および施設周辺の詳細調査においてマルチパッカー式の水圧観測を採用している。マルチパッカー式の中でもMPシステムはフランス，スイス，イギリスの3施設で実績があった。また，SPMPシステムはスイスにおいて実績があった。

幌延の堆積軟岩における長期モニタリングシステムとしての水圧観測手法および採水手法としては，深度700mまでの計測が可能で，地質状況に合わせて実施される試錐孔仕上げの状況や泥水の使用に対処でき，孔壁崩壊にともなう不意の孔径拡大等に対応できるものを選択する必要がある。また，計測データの品質保証やメンテナンスが実施できることも重要な条件である。

以上のことから，幌延深地層研究計画における長期モニタリングシステムによる長期観測を実施するにあたっては，SPMPシステム，Piezoシステム，MPシステムの3方式が，幌延地域の気候，地質環境，モニタリングシステムの設置，計測精度ならびに長期メンテナンスの可能性の点から適切と考えられる。

今後は，これらのモニタリングシステム設置およびメンテナンスコストの試算比較を行うとともに，実際に試錐孔へ設置，長期モニタリングを開始し，幌延地域のような寒冷地での気候，地質環境に応じたモニタリングシステムを構築する必要がある。

参考文献

和祥信一，市橋一憲，中山充彦，二口克人(2000)：多連式連続間隙水圧モニタリングシステム(PIEZO)の開発と測定例，土木学会第25回年次学術講演会。

長谷川 誠，吉下匡一郎，前本昭夫(1999)：地下石油備蓄串木野基地における長期的な岩盤水理挙動について，第29回岩盤力学シンポジウム講演論文集，pp.75-80.

尼方伸久，山根正樹，小田 馨(1996)：間隙水圧の長期観測による立坑掘削影響の把握について，日本地下水学会1996年度秋季講演会要旨集，pp.34-39.

SolExperts Technical Paper(2002)：Swiss Precision Stand-pipe Multi-Packer System, SolExperts AG.

Westbay Technical Paper(1994)：Multi Level Groundwater Monitoring with the MP System. Westbay Instruments Inc.

2) 遠隔監視システムの開発

① 課題と計画の概要

陸域地下構造フロンティア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：蕪澤ほか, 2000;中島ほか, 2000;横山ほか, 2000)を応用した遠隔監視システムを，地下施設の建設前から建設中，建設後まで稼動させ，地下施設の建設に伴う地下施設周辺の構造や物性の変化などを遠隔で監視するための技術開発を行う。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周波数変調連続波信号と独自の解析手法を用いることにより，従来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 3.5-47)。

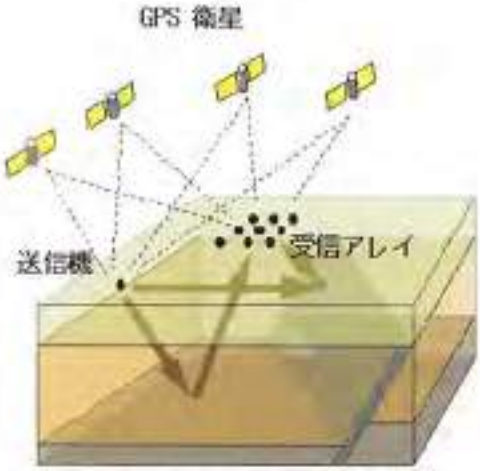


図 3.5-47 遠隔監視システムの例

その開発の第 1 段階（地上からの調査研究段階）では，送信機から精度の高い信号を送信する技術の改良と，信号を精度良く受信できるように受信機のサンプリング間隔，送信機との同期方法などの改良を行う。また，地下の情報を 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こととしている。その後，モニタリングシステム全体の調整・設置を行い，データの取得を開始し，観測データの調査活動や地下施設建設活動に対する感度の確認などの観測試験結果によるシステムの有効性の確認と改良を行う予定である。

② これまでの成果

平成 13 年度は以下に示す受信システムを整備した。

i）アクロス用データロガー

・多チャンネル時間区間蓄積型記録計　1 台
　入力：64 チャンネル
　サンプリング周波数:最高 100Hz
　A/D 分解能：24 ビット
　サンプリング時刻同期精度：
　　UTC に対し 1 μsec 以内
・孔内受振器用記録計　10 台
　時間区間蓄積型記録計
　入力:6 チャンネル
　サンプリング周波数:最高 200Hz
　A/D 分解能:24 ビット
　サンプリング時刻同期精度：
　　UTC に対し 1 μsec 以内

ii）弾性波アクロス用地震計

・坑内受振器（サイスミックコーン）
　　1 ユニット 12 個, 2 ユニット 9 個
　測定成分：水平 2 成分，上下 1 成分
　固有周期：10Hz
　設置可能深度：30m

iii）電磁アクロス用磁力計

・高周波磁気センサー　20 個
　形式：インダクションコイル型
　測定成分：1 成分
　周波数特性：100Hz～5KHz
　感度：30mV/nT
・低周波用磁気センサー　7 個
　形式：フラックスゲート型
　測定成分：直交 3 成分
　周波数特性：DC～300Hz
　感度：150mV/μT

③ 今後の計画

平成 14 年度は弾性波アクロス用の送信システムの設計を行う。また，研究所設置地区および，その周辺地区において，弾性波アクロス及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に，高圧線などによるノイズ，自動車などによる地盤の振動などの環境ノイズ測定を行う。

なお，平成 15 年度の以降の研究計画は以下の通りである。

・平成 15 年度：観測システムの整備を行う。
　　弾性波アクロス送信装置の設置

及び受信装置の製作，電磁アクロス送信装置の製作等。

・平成 16 年度：システム全体の調整・設置を行い，観測試験（データ収得・解析）の開始。

・平成 17 年度：観測試験結果をフィードバックし，システムの改良。

参考文献

熊澤峰夫，岡友幸洋，横山由紀子，中島崇裕，前我伸代子(2000)：アクロス：理論と技術開発，及び将来展望，サイクル機構技報，No. 9(2000-12)，pp. 115-129.

中島崇裕，岡友幸洋，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.

横山由紀子，熊澤峰夫，岡友幸洋，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ィジタル信号波形の設計，地震研究所彙報，75，pp. 265-282.

3.5.4 深地層における工学的技術の基礎の開発

① 実施概要

地下深部へのアクセス方式や坑道本数をパラメータに地下研究施設の基本レイアウトの検討を実施し，平成13年度の試錐調査で得られたデータ等に基づいて，各坑道の空洞安定性の評価を行うとともに，地下施設の安全確保，坑内の環境維持のために必要な対策に関する検討を実施している。以下に各評価，検討の考え方やこれまでの検討内容を示す。

② これまでの成果

ⅰ）地下施設レイアウト

地下施設は500m以深を用途に試験坑道を設置することとしている。地下施設レイアウトの検討に当たり，以下の事項を設定条件として考慮した。

- 試験坑道の展開深度は，深度 250m，深度 500mとする。
- アクセス用立坑（2 本）の内径は，「第2次取りまとめ」を参照し，6.5m の円形断面とする。
- 換気立坑の内径は，施工性を考慮し，5.0m の円形断面とする。
- 試験坑道及びアクセス用スパイラル坑道の内径は，「第２次取りまとめ」における堆積岩の竪置き方式の処分坑道や連絡坑道を参照し，5.0m の三心円馬蹄形断面とする。
- 立坑の中心間離間距離は坑道間の影響がないとされている掘削径の５倍（土木学会，1996）を確保した上で，地上の工事用設備の配置等施工性を考慮し設定する。
- アクセス用スパイラル坑道の縦断勾配は，ダイヤ方式での走行安全性および経済性を考慮して，10%を基本とする。

今後，検討する調査研究内容および詳細な施工計画の検討により，各坑道および立坑の内径を最終的に決定することとする。

ⅱ）地下施設レイアウトの比較検討

地下施設へのアクセス方式として，立坑案およびスパイラル坑道案を選定した。

立坑案は立坑２本案および３本案，スパイラル坑道案はスパイラル坑道＋立坑１本案およびスパイラル坑道＋２本案のレイアウトについて，地下施設の諸元，所要用地面積，施工性，建設時/供用後の防災対策，埋戻し作業，試験研究性，工期，工事費等を比較検討中で，地下施設の基本レイアウトを平成14年度に選定する。各レイアウトの比較条件を表3.5-12に，検討中の各レイアウトの概要を図3.5-48に示す。

表3.5-12　地下施設レイアウトの比較条件

検討条件	主な検討概要
地下施設諸元	立坑・坑道延長計，掘削ズリ量
所要用地面積	坑口設備設備，ズリ仮置場
施工性	掘削，換気，湧水，ガス，通行
防災対策	通気，避難経路，手段
埋戻し作業	施工性，工事費
試験研究性	対象領域，情報量
工　期	建設期間
工事費	建設費，設備工事費

ⅲ）空洞の安定性評価

平成13年度の試錐調査で得られたデータ等に基づいて，空洞の安定性評価を実施している。

a）岩盤物性値の設定

平成13年度の試錐調査で得られるデータ等に基づいて，解析に用いる岩盤物性値（単位体積重量，粘着力，内部摩擦角，変形係数，ポアソン比，一軸圧縮強度）を設定した。

なお，粘着力については，モール・クーロンの破壊基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。

また，引張強度については，岩石のもろい性質（一軸圧縮強度と引張強度の比）から一般的に使用されている1/10の値として設定した。初期地圧については，鉛直応力を土被り相当として，水平応力を求めるうえでの側圧係数を1.0に仮定した。

b）空洞周辺岩盤の安定性評価

a）で設定した岩盤物性に基づき，素掘り状態における壁面変位を理論解析により求め，この壁面変位と許容限界ひずみに相当する壁面変位を比較することにより，空洞周辺岩盤の安定性を確認した。

なお，理論解析手法としては，「第２次取りまとめ」同様，岡の理論解を用いる。

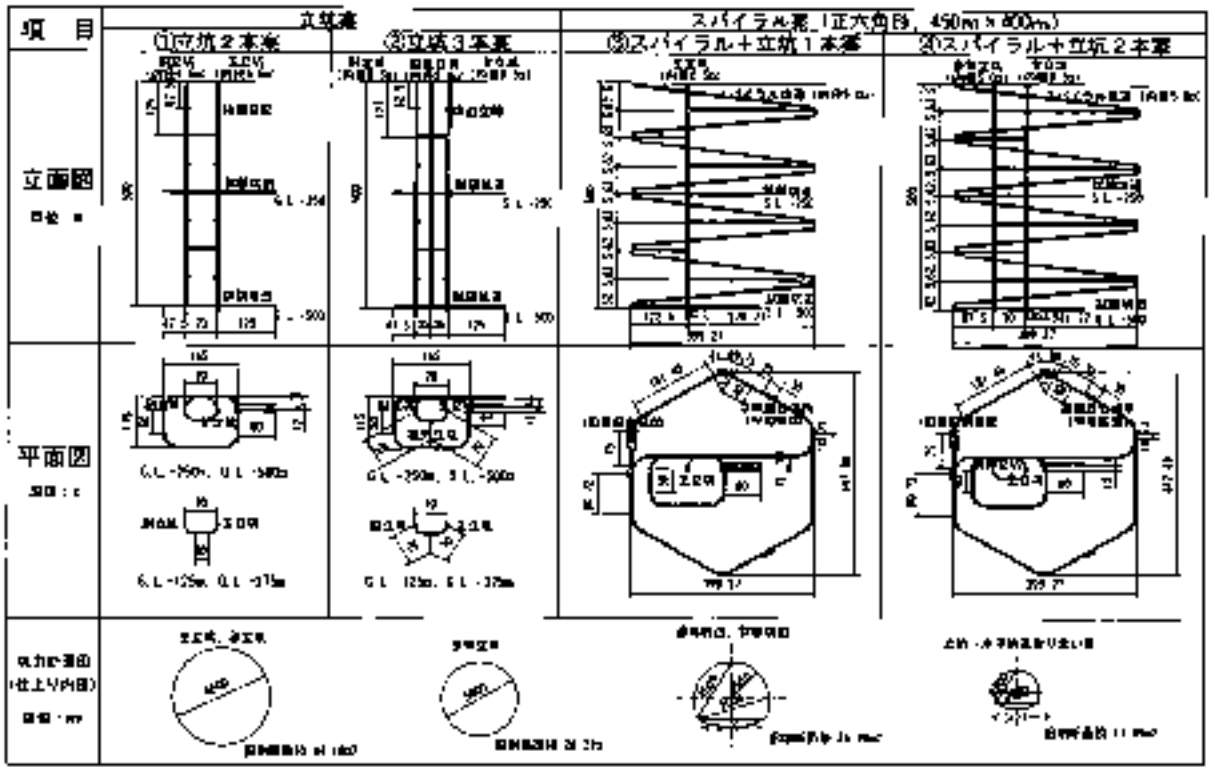


図 3.5-48　地下施設レイアウト比較検討

c) 支保部材応力の確認

支保パターンの設定に関しては，試験坑道およびアクセス用スパイラル坑道については，a)で設定した岩盤物性値から地山強度比を算定し，その値に対応した地山等級，ならびに標準的な支保パターンを日本道路公団の基準に準拠して設定した。

また，立坑については，標準的な支保パターンが確立していないことから，施工性を考慮したうえで，必要最低限な支保パターンを設定することにし，一掘進長 2.0m，一次覆工コンクリートの吹付厚を 40 cmとした。

設定した支保パターンに基づき，掘削に伴う支保部材の発生応力を前述の理論解析手法より求め，発生応力を超過した場合には，支保部材の設計基準強度を変更したうえで，再度計算を実行し，発生応力が許容応力以下となることを確認した。なお，支保部材応力の評価は，「第２次取りまとめ」同様，許容応力度法を採用した。

d) 数値解析手法

理論解析手法による検討結果を数値解析手法（有限要素法：FEM）により確認した。数値解析手法の解析条件として，空洞形状，支保構造および初期地圧等をモデル化し，安全性に関する評価指標としては，限界ひずみ，支保部材応力，局所安全係数の分布状況について着目した。

iv) ガス発生量の予測評価

幌延地域の堆積岩では，可燃性の溶存ガスが湧出する可能性があるため，平成 13 年度の試錐調査で得られるデータ等に基づいて地下施設のガス発生量を予測し，防災対策を検討した。

a) 地下施設のガス発生量予測

・湧水量の設定による推定方法

ガスが水溶性ガスであると仮定した場合，ある圧力下にある地下水に溶解しているメタンは，トンネルの掘削による水圧の低下により遊離，ガス化するとみえる方法で，トンネル内に発生するガス量を計算により求める方法である。

・影響範囲の設定による推定方法

掘削に伴う影響範囲を設定し，地盤の間隙が全て気相のメタンで満たされており，掘削に伴ってこの範囲内のメタンが全て発生すると考える方法である。本計算は，地山強度およびトンネル掘削径・高により緩み厚を求め，地盤の空隙・掘削深度の水圧・掘削の日進量をパラメータとして，一日当たりのガス発生量を求める方法である。

・数値解析手法

地層条件等をモデル化し，掘削に伴って発生す

る地山の応力変化，破壊領域の拡大を計算して，試錐のガス湧出データを用いて坑道内に湧出するガス量を数値解析（有限要素解析：FEM）により求める方法である。使用する解析プログラムは，（財）石炭エネルギーセンターが開発した「簡易２相流ガス量予測数値解析プログラム MGF-3D」を用いる。

ガス発生量については，３つの推定方法の前提条件および算定値を比較・検討した結果，最も現実に近く，やや保守的な数値解析手法の値を採用することとした。

b) 換気方法の検討

a)で算定したガス湧出量の予測結果に基づき，地下施設の防災に対する考え方を整理し，地下施設のレイアウトは，防災を考慮した合理的な設計とする。

ガス対策は，ガスの湧出防止対策と湧出したガスの希釈，排除対策に分けられる。

地下施設の建設においては，ガス湧出防止を考慮した工法を採用することはもちろんであるが，完全にガスの湧出を抑えることは不可能と考えられる。従って地下施設内の空気は，ガス（主にメタンガス）が混入することを前提とすることが必要である。

メタンガス（比重 0.56）は，対空気比重が軽いため天井部に停滞する傾向がある。これを希釈，排除するためには，一定程度以上の気流速度をもった空気流が必要である。一方，地下施設においては，設備面，施設環境面および研究の性格から気流速度が小さいことが望ましいと考えられる。従って，地下施設のどの部分からガスが気流中に混入してくるかを，事前に詳細に調査することも必要である。

必要風量を算出するにあたり，考慮すべき項目は以下のとおりである。

・風速限界からの必要風量

ガス湧出が予想されるトンネルについては，「ずい道工事等における換気技術指針」に示されている坑内風速 0.5m/sec を確保できる風量を検討する。

・ガス湧出量からの必要風量

坑内ガス管理濃度 0.25%以下（ずい道工事等における換気指針で推奨する基準より安全側に設定）を満足する風量を検討する。

・粉塵濃度からの必要風量

「ずい道等建設工事における粉塵対策に関するガイドライン」（平成 13 年 3 月，厚生労働省）に示されている粉塵濃度 3mg/m³ 以下を満足する風量を検討する。

必要風量については，３つの方法の算定値を比較・検討した結果，最大風量を示す風速限界からの必要風量を採用する。これに対応できる換気設備を備えることによりガスの発生および粉塵の発生に対応できる十分な換気量が確保される。

③ 今後の計画

平成 14 年度に研究所設置地区を対象とした地下施設の基本レイアウトを見直し，基本的な施工計画を策定する。

計画の策定においては，地下施設における調査研究の他，施設の安全性を確保するために建設地点の岩盤特性に応じた地下空洞の安定性を評価すると共に，通気等の防災面，一般の人々が深地層を体験する場であることを十分考慮して進める。また，堆積軟岩の力学特性として特徴的なその長期的挙動に関する検討を進める。

参考文献

土木学会（1996）：トンネル標準示方書［山岳工法編］・同解説.

3.5.5 地質環境の長期安定性に関する研究

1) 地震研究

① 課題と計画の概要

北海道の日本海東縁部にはユーラシアプレートと北米プレート（オホーツクプレート）の境界があり，北海道は北米プレート上に位置していると考えられている。しかし，北海道北部地域ではプレート境界と考えられる海域にはほとんど地震活動が認められていない。最近の GPS による地殻変動観測結果と微小地震活動から，プレート境界が陸域にある可能性も示唆されている（笠原，1998）。

本研究では北海道北部地域の地震活動の特徴を捉え，地震活動の地質学的な位置づけを明らかにするため，地震計を設置して地震の連続観測を実施する。また，幌延深地層研究計画の第2段階（坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階）以降においては，地震が地下水に与える影響（地震発生と水圧・水質変化との関係，地震波と水圧・水質変化との関係）を把握するために，地下施設において地震-地下水観測を実施する。

② これまでの成果

平成13年度は北海道北部地域でこれまでに発生した地震活動の特長についてとりまとめるとともに，平成14年度に設置予定の地震観測機器についての仕様の検討および観測機器の整備を行った。図3.5-49は1996年10月～2001年5月の北海道大学での観測データから決定された地震の震源分布と重力異常のコンター図である（青木，2001）。幌延町を含む北海道北部地域では，東経約142°に沿って，深度20km以深での微小地震の発生が確認されており，20km以深での地震の震源分布域は負の重力異常域にほぼ一致している。この地域は新第三紀の天塩堆積盆の東縁部に位置する。また，この地域において表層付近で発生する地震のほとんどは東西圧縮に伴うストライクスリップ型あるいは逆断層型であることが指摘されている（森谷，1986）。

③ 今後の計画

平成14年度は幌延町を含む北海道北部地域の地震活動の特徴を捉えるために深度 100～200m 程度の観測孔を掘削し，孔内及び地表に地震観測機器を設置し，観測を開始するとともに，他の研究機

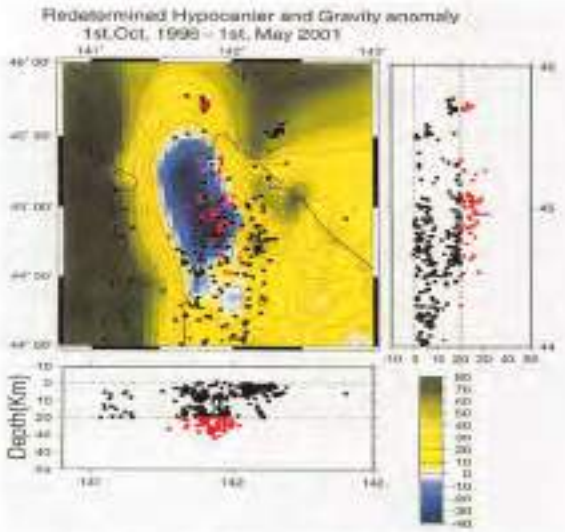


図3.5-49　北海道北部の震源分布と重力異常コンター図

関との観測データの共有化や解析方法等についての検討を行う。

地震が地下水に与える影響（地震発生と水圧・水質変化との関係，地震波と水圧・水質変化との関係）を把握するために，第1段階においては地質環境調査技術開発において実施する地表からの地下水モニタリングデータを活用して地震発生による地下水変化についての予備的検討を実施する。第2段階以降，坑道内に地震観測機器設置孔を掘削し，地震及び地下水圧，水質等の地震-地下水観測を実施する。

参考文献

青木治三（2001）：地質環境の長期安定性に関する調査報告書，サイクル機構技術資料（契約業務報告書：財団法人地震予知総合研究振興会），JNC TJ1420 2001-34（印刷中）．

笠原　稔(1998)：3つのプレートの相互作用する地域(北海道周辺)の地震予知研究，月刊地球，号外 No. 20，総特集　新地震予知研究，pp. 16-21.

森谷武男（1986）：浅い地震活動と起震応力から見た北海道のテクトニクス，地団研専報，31，pp. 475-485.

2) 天然現象に関する研究

① 課題と計画の概要

天塩堆積盆は，新第三紀以降，南北方向の走向を持つ撓曲や逆断層が発達しており，大局的には東西圧縮のテクトニクス場にあったと考えられている。それらに伴う隆起・沈降などの地殻活動が活発な地域である。また，ウブシ原野やサロベツ原野では第四紀層の可能性が示唆されている勇知層が深度1,500m程度まで分布することが推定されていることから，第四紀全体の沈降量は大きいと推定される。

天然現象に関する研究においては，この天塩堆積盆のネオテクトニクスを明らかにし，断層活動などの地殻変動やその結果生じた地形変化などが地質環境に与える影響を評価することを目的とし，現在及び過去の地殻変動，大曲断層の活動に関するデータ等を取得するための調査を行う。

② これまでの成果

平成13年度は既存情報に基づいて北海道北部の最近の地殻変動や海成段丘の隆起速度について取りまとめるとともに，平成14年度以降に観測を実施するGPS観測機器，電磁探査機器の仕様についての検討を行い，機器の整備を実施した。

・北海道北部の地殻変動

既存のGPS地殻変動観測網のデータを用いて北海道北部地域の地殻変動量について取りまとめた。2000年6月から2001年6月までの1年間の国土地理院のGPS連続観測データからSEIS-GPS（中村,1999）を用いて北海道の水平地殻歪を計算した。北海道全体は大まかには北西-南東方向の圧縮場にある。北海道北部の幌延町周辺地域は地殻歪み速度が年間10^{-7}程度と北海道の中では小さい地域である（図3.5-50：青木，2001）。

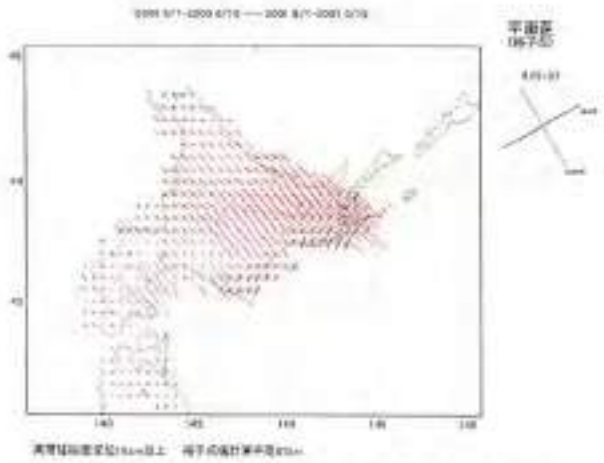


図3.5-50　最近1年間の北海道地方の水平地殻歪み

・北海道北部における海成段丘の隆起速度

北海道北部地域の沿岸部にはStage 5e（約12万年前に形成）～Stage 7（約21万年前に形成）の海成段丘が分布しており（小池・町田編，2001），抜海，沼川，豊富，雄信内，遠別，初山別の6地域の海成段丘について，これらの現在の標高と段丘が形成された当時の海水準から隆起速度を推定した。その結果，0.3～0.5mm/年程度の隆起速度であったことが推定された（図3.5-51：青木,2001）。

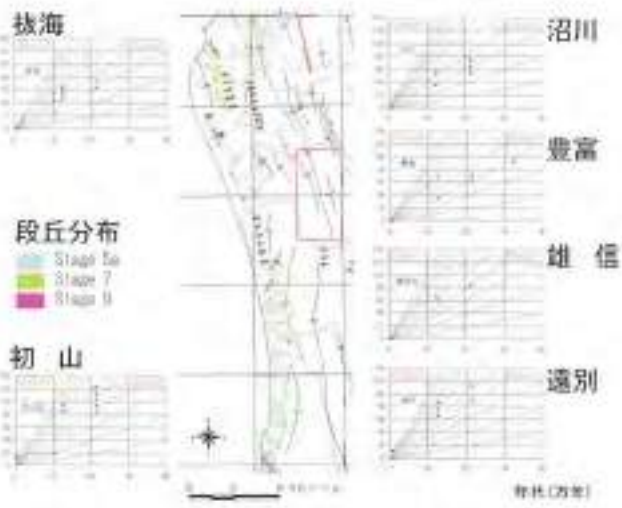


図3.5-51　海成段丘の分布と隆起速度

（段丘分布は小池・町田編（2001）に基づく．活構造図は50万分の1活構造図「旭川」（杉山ほか，1987）に基づく）

③ 今後の計画

平成 14 年度は，天塩堆積盆の現在の地殻活動状況を把握することを目的として，GPS による連続観測を実施するとともに天塩地積盆の構造及び地下数 km～20km 程度までの比抵抗変化を捉えるための MT 法による連続観測機器を設置し，観測を開始する。また，平成 15 年度以降の調査計画として，幌延町周辺の地質構造や地形変化，地下水や岩盤力学特性などの地質環境に影響をもえたと考えられる大曲断層の活動性や第四紀以降の隆起・沈降量などを捉えるため，トレンチ調査や試錐調査等の調査研究を実施する。

参考文献

吉木伯二（2001）：地質環境の長期安定性に関する調査報告書，サイクル機構技術資料（契約業務報告書：財団法人地震予知総合研究振興会），TN7410 2001-34（印刷中）

小池　之，町田　洋　編(2001)：日本の海成段丘アトラス，東京大学出版会．

中村浩二（1999）：GPS データ簡易表示プログラム（SEIS-GPS）の開発，「情報地質」，10，pp.257-266．

杉山隆二，栗田泰夫，森　光男，永笠善博(1987)：50 万分の 1 活構造図「旭川」，地質調査所

3.5.6 環境調査

① 実施内容

幌延町内を対象とした希少動植物調査，及び水利用状況調査を行った。研究所設置の対象地層が適切な深度と厚さをもって分布すると推定される区域（A，B1，B2，C区域）を中心に調査を行った。調査概要を表3.5-13に，調査位置を図3.5-52に示す。なお，C区域を含めて北大研究林については現地調査を実施しなかった。

これらの調査結果は，研究所設置地区選定の際，参考情報とする。

表3.5-13 調査概要

調査項目		調査時期	調査方法
植物	植物相	<夏季>H13/ 7/16～19 <秋季>H13/ 9/ 3～ 6	・直接観察法
動物	哺乳類	<夏季>H13/ 7/16～19 <秋季>H13/10/ 1～ 3 H13/10/24～25	・ﾌｨｰﾙﾄﾞｻｲﾝ法 ・痕跡調査法
	鳥類	<夏季>H13/ 7/16～19 <秋季>H13/10/ 1～ 4 H13/10/24～25 <冬季>H13/ 2/ 4～ 7	・直接観察法 ・巣果・大径木調査 ・採餌木・営巣木調査 ・定点観察法 ・夜間定点法
	両生・は虫類	<夏季>H13/ 7/16～18	・直接観察法
	魚類	<夏季>H13/ 7/16～18 <秋季>H13/10/ 1～ 3	・直接観察・採取法
	昆虫類	<夏季>H13/ 7/16～18	・直接観察・採取法
	底生動物	<夏季>H13/ 7/16～18 <秋季>H13/10/ 1～ 3	・直接観察・採取法
水利用	河川水，井戸	<夏季>H13/ 7/23～27 <秋季>H13/10/22～24	・聞き取り調査 ・河川流量・水位測定 ・井戸水位・流量測定

② これまでの成果

ｉ）動植物

動植物調査結果から抽出した重要な動植物は36種（哺乳類4種，鳥類13種，両生は虫類1種，魚類6種，昆虫類5種，底生動物5種，植物2種）であり，重要種のうち絶滅危惧種カテゴリーに該当する種を抽出したものを表3.5-14に示す。なお，文献調査に重要種として記載されているものがあるが，生息地または生育地の特定ができないものについては記述していない。

図3.5-52 調査位置図

重要種の確認状況は，A区域17種，B1区域16種，B2区域17種とほぼ同じ出現種数であった。動物の調査項目あるいは種生態に着目すると，A区域は，止水域に生息する底生動物の割合が高く，ため池の魚類等を餌とする猛禽類や旅鳥であるマガン，ヒシクイ等が主体となっているのに対して，B1，B2区域は，ヤマメ，ハナカジカ等の小河川に生息する魚類の他，エゾライチョウ，オオアカゲラ等の留鳥，エゾサンショウウオ，ムクゲネズミ等の山地に結びついた重要種によって特徴づけられる。

ⅱ）水利用

幌延町を大きく海側と山側の地区に区分すると，水利用に関わる特徴は以下の通りである。

a）海側の地区（下沼，浜里，字幌延，市街地）

公共水源，個人，事業所ともに地下水を利用している。

・下沼：深度45～88mの自噴井戸（下沼専用水道，個人農家とも）
・浜里：浅井戸（10m以浅），深井戸（80m）（主に事業用，一部飲用あり）
・字幌延：事業用の深井戸
・市街地：公共水源（幌延簡易水道，畜類専用水道），事業用ともに70～80mの深井戸

なお，10m以深の深井戸は主に更別層の地下水を対象としている。

表 3.5-14　レッドデータ絶滅危惧種カテゴリーの該当種
（選定基準のうち下線のもの）

確認件数

選定基準

区分	種名	渡り区分	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	確認件数合計
鳥類	オオタカ	留鳥ー部夏鳥		内		VU	Vu			1
鳥類	オオワシ	冬鳥	天	内		VU	En			1
鳥類	オジロワシ	冬鳥ー部繁殖	天	内		EN	En			3
鳥類	チュウヒ	夏鳥				VU	En			2
鳥類	ハイタカ	留鳥				NT	Vu			2
鳥類	ヒシクイ	冬鳥	天			VU	R			2
鳥類	ミサゴ	夏鳥				NT	Vu			1
魚類	エゾホトケドジョウ					VU	R			2
魚類	ｽﾅﾔﾂﾒ					VU				1
底生動物	ｵｸﾞﾗﾏﾝｼｮｳｲ					VU				1
底生動物	ﾓﾉｱﾗｶﾞｲ					VU				2
植物	ｵｵﾊﾞﾔﾏﾘﾝﾄｳ								VU	5
						確認件数計→				23
						確認種数　→				12

確認個体数

選定基準

区分	種名	渡り区分	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	合計 個体数
鳥類	オオタカ	留鳥ー部夏鳥		内		VU	Vu			1
鳥類	オオワシ	冬鳥	天	内		VU	En			1
鳥類	オジロワシ	冬鳥ー部繁殖	天	内		EN	En			4
鳥類	チュウヒ	夏鳥				VU	Vu			2
鳥類	ハイタカ	留鳥				NT	Vu			2
鳥類	ヒシクイ	冬鳥	天			VU	R			2
鳥類	ミサゴ	夏鳥				NT	Vu			1
魚類	ｴｿﾞﾎﾄｹﾄﾞｼﾞｮｳ					VU	R			3
魚類	ｽﾅﾔﾂﾒ					VU				10
底生動物	ｵｸﾞﾗﾏﾝｼｮｳｲ					VU				1
底生動物	ﾓﾉｱﾗｶﾞｲ					VU				63
植物	ｵｵﾊﾞﾔﾏﾘﾝﾄｳ								VU	－
										90

【選定基準】
選定基準は、①～⑦（④・⑤・⑦については、選定基準のうち下線のもの）
植物の選定基準は、②・⑤・⑦
①：「文化財保護法」（昭和 25 年　法令第 214 号）に基づく天然記念物
特：特別天然記念物　　天：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）に基づく希少野生動植物種
内：国内希少野生動植物種　国：国際希少野生動植物種　緊：緊急指定種
③：「改訂・日本の絶滅のおそれのある野生生物　現生脊椎動物編」（環境庁　2000）
Ex：絶滅　EW：野生絶滅　CR：絶滅危惧ⅠA類　EN：絶滅危惧ⅠB類
VU：絶滅危惧Ⅱ類　NT：準絶滅危惧　DD：情報不足　Lp：絶滅のおそれのある地域個体群
④：「動物に関するレッドリスト」（環境庁）（哺乳類、鳥類：1998、汽水・淡水魚類、淡水産貝類、昆虫類：2000）による選定種
Ex：絶滅　EW：野生絶滅　CR：絶滅危惧ⅠA類　EN：絶滅危惧ⅠB類　VU：絶滅危惧Ⅱ類
NT：準絶滅危惧　DD：情報不足　Lp：絶滅のおそれのある地域個体群
⑤：「北海道レッドデータブック」（北海道環境生活部　2001）による選定種
Ex：絶滅種　Cr：絶滅危惧種　En：絶滅危惧種　Vu：絶滅危急種　R：希少種　N：留意種
⑥：「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）」（平成 10 年　社団法人　日本水産資源保護協会）による選定種
絶滅危惧種、危急種、希少種、減少種
⑦：「改訂・日本の絶滅のおそれのある野生植物」（環境庁　2000）
Ex：絶滅　EW：野生絶滅　CR：絶滅危惧ⅠA類　EN：絶滅危惧ⅠB類　VU：絶滅危惧Ⅱ類
NT：準絶滅危惧　DD：情報不足

b) 山側の地区（北進，上幌延，開進，雄興，問寒別，中問寒，上問寒）

井戸ではなく，公共水源に表流水を利用。雄興～上問寒地区は現地調査を実施していないが，幌延町の聞き取りによると地下水(井戸)の利用はない。

・北進：北進営農用水
・上幌延：上幌延営農用水，個人水源
・開進：開進営農用水
・雄興：雄興飲料水道
・問寒別：問寒別簡易水道
・中問寒：問寒別西雑用水道，問寒別東農業用水
・上問寒：上問寒営農用水

③ まとめ

研究所設置候補区域のうち，A1，B1，B2 区域の環境調査を行った結果，動植物調査では十数種の重要種が確認された。また，水利用状況調査では地下水および表流水の利用状況が明らかになった。今後は平成 13 年度に実施した文献調査，現地における動植物および水利用状況の調査結果に基づき検討した調査項目や方法を用いて，研究所設置地区および必要に応じその周辺地区を含めて調査を実施する。

【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

「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。その結果，1,000 年間の炭素鋼オーバーパックの腐食量は約 2mm と評価され，腐食しろを 10mm と設定した。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，支保工材料としてのセメントによる影響と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。腐食生成物の力学特性評価についても検討を行っている。

②これまでの成果

ⅰ）炭素鋼の長期試験

「第２次取りまとめ」では最長 4 年間の実験データに基づいて寿命評価を行った。より長期的なデータを取得し，寿命評価の信頼性を向上させるため，20 年間の長期試験を検討した。試験環境条件を長期間維持するため，密封容器を用いて溶液の蒸発を防ぐ浸漬試験方法を検討し，試験容器の試作を行った。また，緩衝材中の環境条件や，炭素鋼の腐食速度を長期にわたってモニタリングする試験概念の検討を行った（和田ほか，2002）。

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（見島・辻川，1996）。加速の原因がマグネタイト中の 3 価鉄による酸化作用であるならば例え加速が生じても 3 価鉄が枯渇すれば加速は停止するため，オーバーパック寿命への影響は小さいと言える。一方，水素発生反応の促進によって腐食が加速される場合にはオーバーパックの寿命だけでなく，水素ガスによる緩衝材への影響も懸念される．そこで加速のメカニズムおよび腐食加速抑制の検討を行った．模擬ベントナイト接触水中においてマグネタイト皮膜の形成された炭素鋼とマグネタイト皮膜のない炭素鋼のカソード分極測定を行った結果，マグネタイト皮膜を形成した場合のほうが水素過電圧は大きくなり，水素発生反応は抑制されることがわかった（柴田ほか，2002）。また，単結晶マグネタイト電極と純鉄のカソード分極試験を行い，カソード電流の大きさを比較した結果，マグネタイト上での水素発生速度は鉄上での水素発生速度よりも数桁小さいことがわかった（柴田ほか，2002）。更に，マグネタイト電極上に水素過電圧の小さい Pd を添加してカソード分極試験を行っても水素発生反応速度，水素発生反応機構にはほとんど影響がなかった。このことから，ある程度の水素発生反応の加速因子が存在してもマグネタイト上での水素発生反応は容易に加速されないことがわかった（柴田ほか，2002）。以上の結果より，マグネタイト上では水素発生反応は起こりにくいことが確認された。また，純鉄に種々の合金元素を微量添加した低合金鋼のカソード分極測定および浸漬試験を行った。その結果，Cr，Si，Al の添加によってマグネタイトの還元反応が抑制され，腐食加速も抑制されることがわかった（柴田ほか，2002）。

ⅲ）セメントによる炭素鋼の腐食形態への影響

「第２次取りまとめ」に基づけば，軟岩系岩盤における処分では緩衝材の周りにコンクリート製の支保工が施工されると考えられる。これにより，緩衝材に浸潤する地下水の pH が上昇する可能性がある。高い pH の地下水がオーバーパックに接触すると炭素鋼が不動態化し，孔食，すきま腐食などの局部腐食を生じる可能性がある。そこでセメントによる炭素鋼の腐食形態への影響を把握するため，セメントと接触させた水溶液を用いて電気化学測定により炭素鋼の不動態化挙動を調査した（谷口ほか，2002）．セメント材料として普通ポルトランドセメントおよび低アルカリ性セメント（HFSC；4.3 2)項「人工材料の開発」参照）を用い，粉砕したセメントペーストと蒸留水，$NaHCO_3$ 水溶液，Na_2CO_3 水溶液をそれぞれ液固比 100 ml/g にて 10 日間混合した。この上澄みを炭素鋼試験片の埋め込まれた緩衝材（乾燥密度 1.6g/cm³）に浸潤

させ，炭素鋼のアノード分極測定を行った。得られたアノード分極曲線より活性溶解型（全面腐食型）か不動態型かを判定し，各条件での腐食形態を評価した。その結果を図 4.1-1 に示す。図中には「第２次取りまとめ」において用いたデータも示した。その結果，pHが約 13 以下の水が浸潤した場合には，全面腐食となることがわかった（谷口ほか，2002）。ただし，実際の処分場を想定した場合，炭素鋼オーバーパックに到達する水の pH などの化学特性は，支保工の厚さ，緩衝材の厚さ等の影響を受ける可能性があり，このような影響を考慮した評価も必要である。

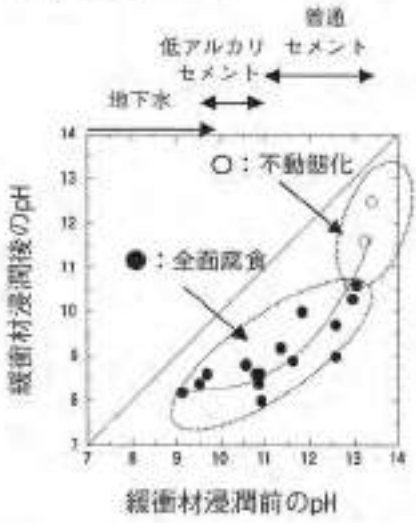


図 4.1-1　乾燥密度 1.6g/cm³，ケイ砂混合率 30%の緩衝材中における炭素鋼の不動態化条件

ⅳ）緩衝材仕様による炭素鋼の不動態化への影響

「第２次取りまとめ」では主にケイ砂混合率 30%，乾燥密度 1.6g/cm³ の緩衝材に対する炭素鋼の不動態化挙動を調査した。しかし，緩衝材個の仕様が変化した場合の不動態化挙動についてはほとんど検討を行っていない。そこで，乾燥密度のほか，ケイ砂混合率をパラメータとしてアノード分極測定を行い，乾燥密度とケイ砂混合率に対する炭素鋼の不動態化条件を検討した。試験溶液として，0.1M 炭酸塩水溶液を用いた(pH10)。実験結果から，緩衝材の乾燥密度が大きいほど，ケイ砂混合率が小さいほど，炭素鋼は不動態化しにくいことがわかった。ケイ砂混合率および乾燥密度に対し，炭素鋼が不動態化せず全面腐食を受ける領域を図 4.1-2 に示す。図中には「第２次取りまとめ」において検討された緩衝材の特性（Kurosawa et al., 1997；志村ほか，1995；千々松ほか，1999）も示した。現時点における緩衝材仕様は十分に裕度をもって炭素鋼が全面腐食を受ける領域にあることがわかった（谷口ほか，2002）。

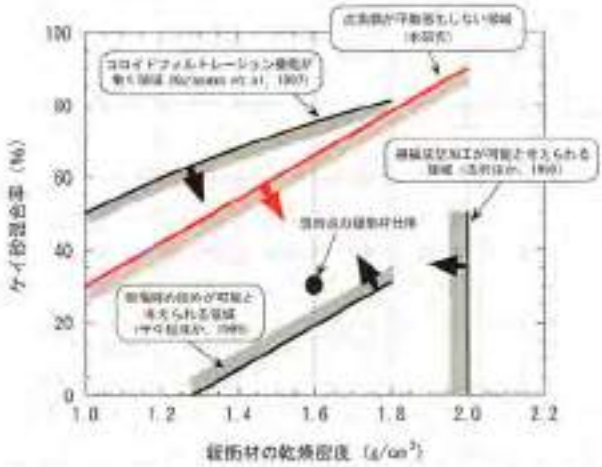


図 4.1-2　緩衝材のケイ砂混合率と乾燥密度に対する炭素鋼の不動態化条件および緩衝材の特性

ⅴ）オーバーパック腐食生成物の力学特性の測定

「第２次取りまとめ」では，炭素鋼オーバーパックの腐食膨張による緩衝材のクリープ破壊挙動の解析を行っているが，解析条件として，腐食膨張量については 3 倍，また，腐食生成物の弾性係数については安全側の評価となるようオーバーパックと同等の値を設定している。今後現実的な評価を行うためには，炭素鋼オーバーパックの腐食膨張率および腐食生成物の弾性係数を正確に把握する必要があるが，研究例はほとんど存在しない。

そこで，圧縮ベントナイト存在下での炭素鋼腐食加速試験によって得られた供試体を用いて，炭素鋼腐食生成物の弾性係数を，一般に材料表面の局所的な力学特性や薄膜の力学特性の測定を対象としたナノインデント法と呼ばれる測定法による測定を試みた。

材料の弾性係数の測定は，機械力を載荷して供試体の変形を測定し弾性係数を求める静的測定法と，供試体を振動させて振動と弾性率との関係から弾性係数を求める動的測定法とに分類されるが，ナノインデント法は静的測定法に分類される。ナノインデント法は，mN オーダー以下の微小荷重で圧子を材料に押し込み，除荷する際の微小変形を測定することによって，材料の微小領域の力学特性を評価する測定法である。

図 4.1-3 に加速試験で得られた供試体の断面写真を示す。健全部（腐食していない部分）と腐食生成物の部分それぞれについてナノインデント法により弾性係数を測定した。

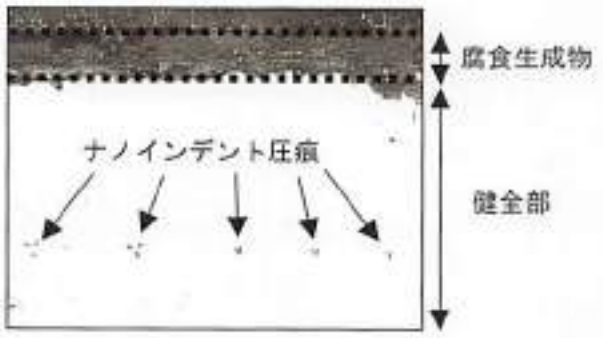
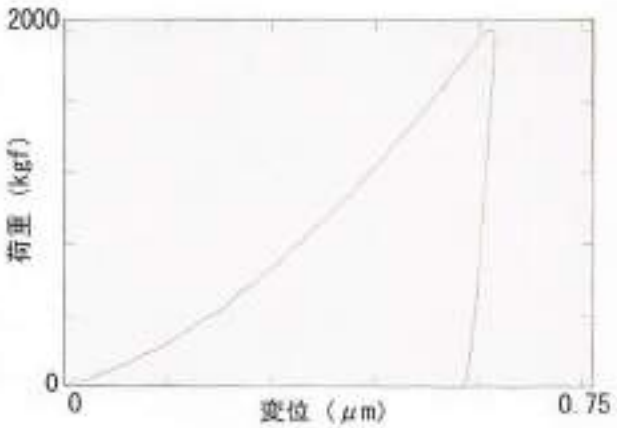
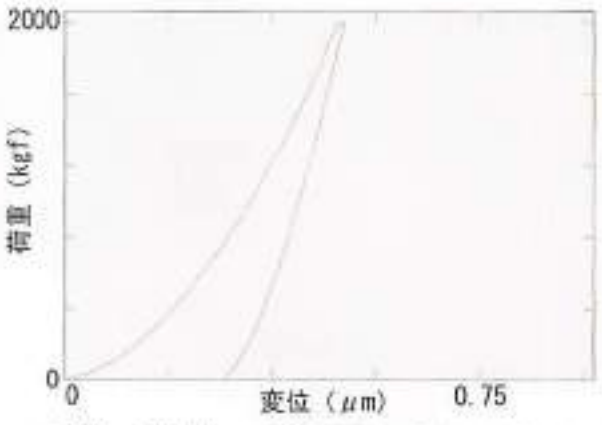


図 4.1-3　供試体断面写真



健全部(3)　(弾性係数 19820 kgf/mm²)



腐食生成物(3)　(弾性係数 10680 kgf/mm²)

図 4.1-4　弾性係数の測定結果のグラフ

表 4.1-1　弾性係数測定結果

部　位	弾性係数（kg/mm²）
腐食生成物(1)	14050
腐食生成物(2)	9325
腐食生成物(3)	10680
健全部(1)	19390
健全部(2)	20510
健全部(3)	19820

ナノインデント法を用いた腐食生成物の弾性係数測定を実施した結果，測定が可能であることが分かった。腐食生成物は場所によるばらつきが大きかったが，同時に測定した健全部の弾性係数は，炭素鋼の一般的な値（約20000kg/mm²）と同等の値が得られた（表 4.1-1，図 4.1-4）。これは腐食生成物の弾性係数測定にナノインデント法を用いることの妥当性を示す一つの結果と言える。今後は加速試験方法の検討を行うとともに弾性係数の測定数を増やし，また生成物による違いなども明らかにする方針である。

③ まとめ

これまでの研究成果は以下のようにまとめられる。

- マグネタイト上では水素発生反応の加速は起こりにくい。
- 合金元素として Cr，Si，Al を添加することによりマグネタイトの還元反応が抑制される。
- 低アルカリ性セメントを使用すれば，現時点の仕様の緩衝材（乾燥密度 1.6g/cm³，ケイ砂混合率 30%）の環境条件では炭素鋼はほとんど不動態化しえない。
- 緩衝材の乾燥密度が大きいほど，ケイ砂混合率が小さいほど，炭素鋼は不動態化しにくい。
- 腐食生成物の弾性係数を直接測定できる方法としてナノインデント法の適用の見通しを得た。

今後は以下の事項を実施する予定である。

- 長期試験を継続するとともに，腐食生成物による腐食抑制機構などの腐食機構について検討する。
- 主に普通セメントの使用を想定し，高 pH 環境での炭素鋼の局部腐食進展挙動，応力腐食割れ生起挙動を実験的に検討する。

- 溶接による影響，材料中の微量元素による影響など材料因子による耐食性への影響をより詳細に検討する。
- 腐食生成物の物性データ取得のための腐食試験方法について検討する。

参考文献

千々松正和，杉田　裕，田窪　清（1999）：緩衝材の製作・施工技術に関する検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-015.

[illegible]，辻川茂男（1996）：ベントナイト環境中における腐食生成物共存下の炭素鋼の腐食挙動，腐食防食'96講演集，p.129.

Kurosawa, S., Yui, M. and Yashikawa, H. (1997) : Experimental study of colloid filtration by compacted bentonite, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., vol.465, pp.963-970.

柴田俊夫，瀬尾眞浩，杉本克久，水流　徹，井上博之（2002）：オーバーパック候補材料の腐食挙動モデルの高度化研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書：社団法人腐食防食協会），JNC TJ8400 2001-049.

志村　晃，赤坂秀成，山中裕美子，朝野英一，川上　進，二宮伸雄，加藤　行（1995）：冷間等方圧プレスによる一体型緩衝材の試作研究（その3）まとめと実規模緩衝材成形の可能性，日本原子力学会 1995 秋の大会要旨集，p.651.

谷口直樹，川上　進，森田光男（2002）：ベントナイト／ケイ砂混合体における炭素鋼の不動態化条件，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-025.

和田陽一郎，山下晴信，西村　睦，東本汎孝，中向智明，竹内知典，藤原通雄，塚右　眞（2002）：地層処分環境下におけるオーバーパック材料の腐食挙動試験研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書：株式会社神戸製鋼所），JNC TJ8400 2002-001.

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

チタンオーバーパックに関し，「第２次取りまとめ」では，酸化性環境で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くと 6mm 厚さのチタンオーバーパックに対して 1,000 年間は水素脆化が生じないことを示した。すきま腐食の発生条件のデータは種々のチタン合金について実験データが蓄積されつつあり，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乏しいため，不動態皮膜の安定性，水素吸収挙動等の検討を進めるとともに水素脆化の評価手法を検討している。

銅オーバーパックについては，「第２次取りまとめ」では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。その結果，約 90mm 以上の腐食しろを設定することにより 1,000 年間の寿命を期待できることを示した。しかし，現時点では日本における地下水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を進めている。また，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している。

② これまでの成果

i) 還元性環境におけるチタンの腐食速度と水素吸収挙動

酸素濃度の低い還元性環境では水の還元をカソード反応とする水素発生型の腐食が進展すると考えられる。そこで密封アンプルを用いて 90 日間のチタンの浸漬試験を行い，発生した水素ガス量をガスクロマトグラフィーにより分析するとともに，チタン試料中に吸収された水素を不活性ガス融解ガスクロマトグラフ法により分析した。試験溶液として人工海水系および 0.1M $NaHCO_3$ 水溶液を用いた。表 4.1-2 に一例として純チタンを用いた試験結果を示す。発生した水素ガス量および吸収された水素量の分析結果から，90 日間の極低酸素濃度条件におけるチタンの平均腐食速度は 10^{-2} μm/y のオーダーであった。また，発生した水素ガス量よりもチタン中に吸収された水素量が２桁大きく，腐食により発生した水素のほとんどはチタン中に吸収されていることがわかった（和田ほか，2002）。更に，超音波をチタン試料に照射し，酸化皮膜を破壊することにより腐食を促進させる加速実験を行った。照射強度をパラメータとしてチタンの腐食速度を測定し，照射のない状態での腐食速度を推定した。その結果，模擬ベントナイト接触水中での腐食速度は浸漬初期において 10^{-1} μm/y 程度と見積もられた（柴田ほか，2002）。

チタンオーバーパックの破損後を想定した腐食挙動の検討も行った。チタンオーバーパックは炭素鋼（強度部）との二重構造になっており，チタン層が腐食や外圧によって破損した場合には炭素鋼との接触部分に地下水が浸潤し，異種金属接触腐食を生じることが予想される。この進展速度によっては腐食に伴って発生する水素ガスや局部的な pH の低下によるニアフィールド環境への影響が懸念される。そこでチタン／炭素鋼クラッド材を用いて電気化学特性を検討した。その結果，炭素鋼が不動態化しない硫酸塩溶液条件では炭素鋼の腐食が促進されることが確認された。また，チタン表面酸化物の還元が生じ，チタンの不動態皮膜も不安定な状態になりうることが示唆された。

表 4.1-2　密封アンプル試験による水素発生量と水素吸収量の測定結果の一例
（純チタン）

試験溶液	腐食速度（μm/y）		水素吸収率
	水素ガス発生量を換算	水素吸収量を換算	
人工海水	3.4×10^{-1}	4.4×10^{-2}	>99%
0.1M $NaHCO_3$	2.7×10^{-1}	2.8×10^{-2}	>99%

ii) チタンの水素脆化条件の検討

チタンは水素を吸収すると，吸収量によっては脆化することが知られており，脆化に至る平均水素濃度は 500ppm 程度と報告されている（Johnson et al., 1994）。しかし，このデータは均一に水素が分布した試料を用いた実験に基づくものであり，実際の処分環境においてチタン中の水素濃度分布は均一であるとは限らない。そこで，酸性溶液中

でのカソード分極によってチタン試料に吸収させたのち，熱処理を行うことにより均一に水素を分布させた試料および表面（高濃度）から内部（低濃度）まで緩やかな濃度勾配のある試料を作成した。熱処理を行わず，表面のみに水素が存在する試料も作成した。3種類の水素分布形態の試料についてそれぞれ引っ張り試験，曲げ試験を行った。水素吸収量は約500ppmおよび約1000ppmの2条件とした。ブランク試験として水素を吸収させない試料についても同様の機械特性試験を行った。また，水素吸収量約1000ppmの試料については微小シャルピー試験を行った。これらの試験の結果，水素を吸収させた試料のいずれにも引っ張り強さ，伸びなどの機械的性質の劣化は認められなかった。しかし，水素を吸収させた試料のいずれにおいても引っ張り試験後の破面および曲げ試験後の曲げ頂点部分に水素化物形成に起因すると考えられる微細な割れが観察された。また，微小シャルピー衝撃試験では水素の分布状態によって衝撃エネルギーに違いが認められ，表 4.1-3 に示すように表面のみに水素が分布している試料よりも内部に均一に分布している試料のほうが小さな値を示した。よって，水素がチタン内部まで吸収された場合のほうが脆化の程度は大きいことが示唆された（和田ほか，2002）。

表 4.1-3　水素吸収量約1000ppmの試料の微小シャルピー衝撃試験結果

試験片	衝撃エネルギー（J）
ブランク （水素吸収処理なし）	0.227
表面のみ分布	0.185
表面～内部 濃度勾配あり	0.150
均一分布	0.024

また，チタン合金は酸性環境において電位条件によっては脆化を生じる可能性がある。処分環境においても金属表面の欠陥や傷，緩衝材の不均一な接触部分などにおいて局部的にpHが低下すると短期間で脆化を引き起こすことが懸念される。そこで，pH1からpH7の範囲の0.05M硫酸塩環境において，チタン合金の脆化条件を低歪み速度試験により検討した。その結果，中性環境では脆化は認められなかったが，pH3以下の場合にチタン酸化皮膜が不安定な電位領域で脆化が認められた（柴田ほか，2002）。

iii）炭酸塩水溶液環境における純銅のアノード分極特性

純銅は酸素と硫化物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純銅の腐食形態に及ぼす環境因子の影響を把握することを目的として炭酸水素イオン濃度，塩化物イオン濃度，硫酸イオン濃度をパラメータとした水溶液中および緩衝材中でのアノード分極測定を実施した。その結果，図 4.1-5 に示すように炭酸水素イオンはアノード反応を抑制し，濃度が高くなると不動態型の分極挙動を示すようになった。また，塩化物イオンはアノード反応を促進し，濃度が高くなると活性溶解型の分極挙動を示すことが確認された。硫酸イオンによる影響は明確ではないが，不動態皮膜を破壊する方向に作用する傾向が認められた。アノード分極測定結果を不動態型，活性溶解型に分類し，図 4.1-6 のように整理した。また，緩衝材共存環境でのアノード分極測定も実施した。その結果，溶液条件によらず活性溶解型に近い分極挙動を示すことがわかった（川崎ほか，2002）。

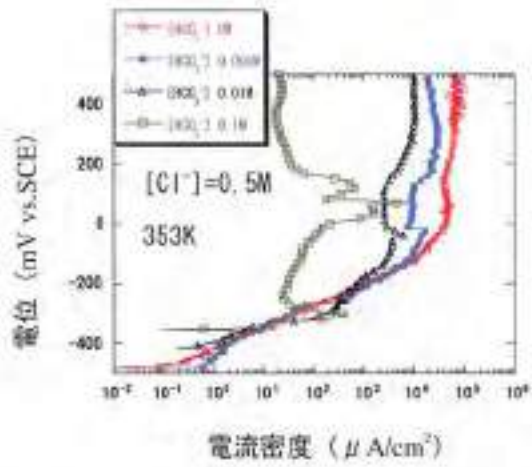


図 4.1-5　炭酸水素イオン濃度をパラメータとした純銅のアノード分極測定結果の一例

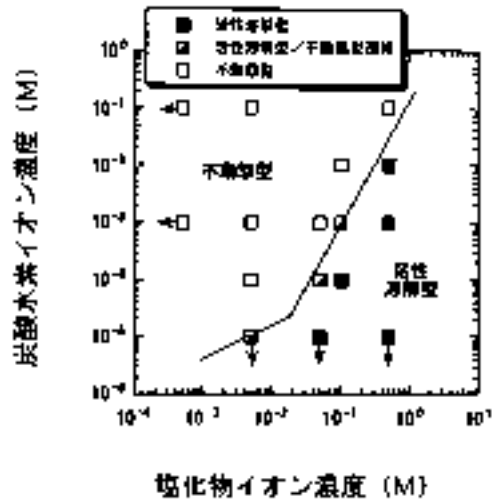


図 4.1-6　純銅のアノード分極挙動に対する塩化物イオン濃度と炭酸水素イオン濃度の影響

③ まとめ

これまでの研究成果は以下のようにまとめられる。

・90 日までの短期試験の結果，還元性環境におけるチタンの腐食速度は 10^{-4}～10^{-1} μm/y のオーダーであり，腐食に伴って発生した水素のほとんどはチタン中に吸収された。

・約 500ppm および 1000ppm の水素を吸収させたチタン試料の引っ張り試験，曲げ試験を行った結果，水素吸収による機械特性の明確な劣化は認められなかったが，表面に微小な亀裂が発生していた。

・酸性から中性環境の範囲においてチタン合金の低歪み速度試験を行った結果，酸性溶液中では，チタンの不動態皮膜が不安定な電位領域において脆化が認められた。

・純銅のアノード分極測定の結果，炭酸水素イオン濃度の増加により不動態型の分極挙動に近づき，塩化物イオン濃度の増加により活性溶解型の分極挙動に近づくことが確認された。また，硫酸イオンは不動態を破壊する方向に作用する傾向が認められた。緩衝材共存系では溶液希釈による影響は小さく，活性溶解型に近い分極曲線となった。

今後は以下の事項を実施する予定である。

・より長期の試験により還元性環境でのチタンの腐食速度，水素吸収量，水素吸収率の経時変化を調査する。また，チタンオーバーパックにおける長期的な水素濃度分布の予測手法を検討する。

・チタンの水素脆化生起条件をより詳細に検討する。

・処分環境における純銅の局部腐食生起条件，進展挙動を検討する。

・酸化物共存下での還元性環境における純銅の腐食挙動を検討する。

参考文献

Johnson, L.H., LeNeveu, D.M., Shoesmith, D.W., Oscarson, D.W., Gray, M.N., Lemire, R.J. and Garisto, N.C. (1984). The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste. The Vault Model for Postclosure Assessment, AECL-10714, COG-83-4.

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ノード分極挙動，材料と環境2002講演集，pp. 339-342.

柴田俊夫，瓶尻昌浩，杉本克久，水流　徹，井上博之（2002）：オーバーパック候補材料の腐食挙動モデルの高度化研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；社団法人腐食防食協会），JNC TJ5400 2001-049.

和田陸太郎，栗本宜孝，藤原和雄，安倍　睦，堤谷　剛，河野　剛（2002）：チタンオーバーパックの水素脆化に関する研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；株式会社神戸製鋼所），JNC TJ6400 2002-002

4.1.2 緩衝材の基本特性

① 課題と計画の概要

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。これらの基本特性においては，「第２次取りまとめ」までに，降水系を中心とした緩衝材設計のための基本特性データの整備を行い，安全評価を目的とした検討を行った。

今後，これまでに取得された成果を踏まえ，実際の処分環境下を考慮した条件に対して，熱（温度）および塩濃度の影響に関するデータの拡充を行うとともに，緩衝材に関する既存データおよび新規取得データを基に関係式の一般化並びに，データ取得手法の標準化に関わる基盤情報の整備を行い，国の安全基準及び指針類の策定等に資する。

② これまでの成果

ｉ）膨潤特性

・隙間による緩衝材膨潤応力への影響

緩衝材ブロック定置方式においては，緩衝材と廃棄体，緩衝材と岩盤との間に隙間が生じる。この隙間を充填する方式として，ベントナイトペレット充填方式，粉末ベントナイト噴射方式，ベントナイトスラリー投入方式などの処理方法が考えられているが，これらの方法に関しては，その施工性や充填後の品質などについて十分に検討されていない（「第２次取りまとめ」）。

「第２次取りまとめ」では，このような隙間は緩衝材の膨潤特性により充填されるものとして，隙間の体積を考慮した乾燥密度から緩衝材の仕様を設定した。

緩衝材の膨潤特性による隙間充填の現象としては，地下水の浸潤面から膨潤した緩衝材が隙間を充填する現象（図 4.1-7 (a)），浸潤面側からの膨潤により緩衝材が反対側の隙間を充填する現象（図 4.1-7 (b)）が考えられる。これまでに図 4.1-7(b)に関する試験を実施した（鈴木・藤田，1999)が，図 4.1-7(a)に関する試験は実施していない。そこで，図 4.1-7(a)の現象を表現する室内試験を実施し，隙間による膨潤挙動への影響把握を行った。試験結果を図 4.1-8 に示す。図から同じ仕様（膨潤後の充填密度が同じ）であれば，(a)，(b)は，ほぼ同様な挙動を示し，さらに隙間がない条件での膨潤応力とも同様であった。

図 4.1-7　隙間充填模式図

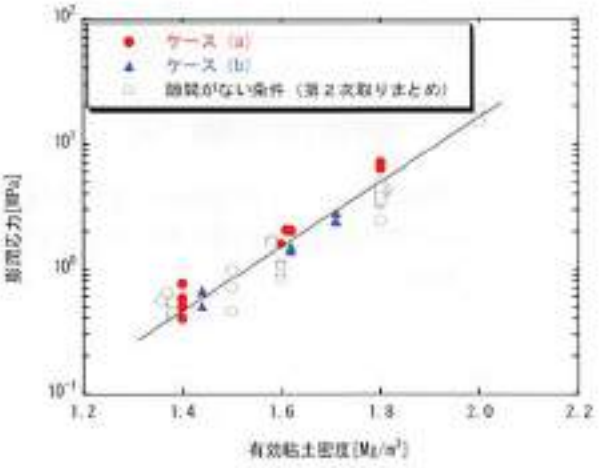


図 4.1-8　隙間充填後の膨潤応力と乾燥密度の関係

・スケール効果による膨潤応力への影響

圧縮ベントナイトは，その形状に係わらず全て，膨潤応力は変わらないものと考えられてきた。しかし，「第２次取りまとめ」以降に取得された結果において，ベントナイト供試体の形状（縦横比の関係）を変えることによって，膨潤応力の値が変化することが図 4.1-9 に示す測定結果からわかった。

これは，図 4.1-10 に示す結果から供試体を作製する際に，ベントナイトと試験カラムとの間に起きる圧縮成型圧が原因であると考えられる。よって，この成型圧依存性を考慮し，かつ，実現象を考慮するため成型後，拘束状態から一端開放したベントナイト供試体を用いて測定が行える試験装置を用い，今後，膨潤応力データの拡充を行うこととする。

また，その後の取得条件として，温度履歴を受けたベントナイトの膨潤応力について，温度と履歴時間の影響を把握し，再度検討を行う予定である。

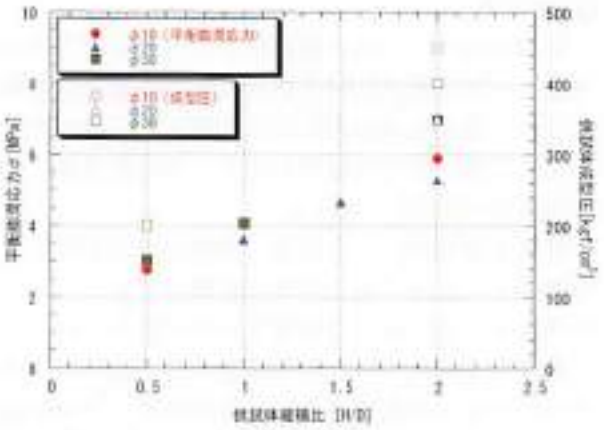


図 4.1-9　スケール効果による平衡膨潤応力及び供試体成型圧

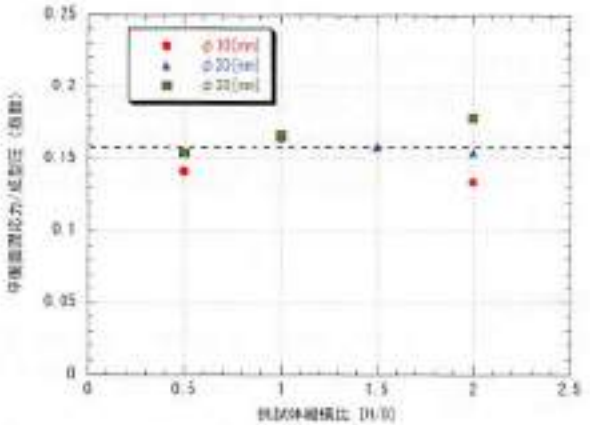


図 4.1-10　スケール効果による平衡膨潤応力及び供試体成型圧（正規化）

ii）飽和水理特性

・人工海水を用いた透水試験の成果

「第２次とりまとめ」までに，ベントナイトの飽和水理特性については，飽和透水試験による降水系データの拡充を行い，かつ，海水系（人工海水）データの一部取得を行っている。

実際の処分地質環境を想定した場合，海水系等（塩濃度など）の影響が考えられるため，今後，海水系を用いたデータの拡充を行う必要性がある。

以下に，「第２次取りまとめ」までに取得された降水系（蒸留水）データとともに海水系（人工海水）の結果を図 4.1-11 に示す。海水系を流体として用いた場合，降水系の値より，ベントナイトの透水性は１桁程度大きくなる結果となった。

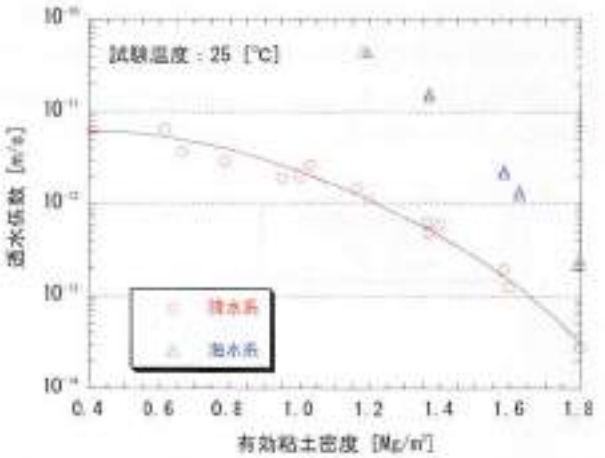


図 4.1-11 人工海水及び蒸留水を比較した透水係数

iii）静的力学特性

・試料調整法による静的力学特性への影響

静的力学特性の取得に関しては，試験準備段階において水分調整（超音波加湿法）を行った試料（ベントナイト）を用いて供試体を圧縮成型し，力学的強度試験（一軸圧縮試験・圧裂試験）を実施している。しかし，試験準備段階において，水分調整を行った供試体と圧縮成型後，自然給水によって水分調整を行った供試体とでは，ベントナイト強度に何らかの影響があることが懸念されている。

現在，蒸気圧法によって自然給水による水分調整を行い，力学的強度試験を行うための試料準備を実施しているところである。

iv）熱特性

・低密度ベントナイトの熱伝導率測定

緩衝材ブロック定置方式においては，i）項の「膨潤特性」で述べたように隙間処理の施工性や充填後の品質などについて十分に検討されていない（千々松ほか，1999）。この隙間は，充填時及び飽和後，早期において比較的小さい密度であると考えられる。「第２次取りまとめ」の緩衝材の温度制限の検討では均一モデルで隙間を考慮した解析が行われているが，隙間に粉末ベントナイトを充填した特性では，緩衝材の許容温度を最高で４℃上回る結果となる。

実際には，地下水浸潤を考慮すれば，熱伝導性が向上することにより，その影響は小さいと考えられる。しかし，今後の熱解析データの信頼性を向上させる上で，低密度領域における熱伝導率に関して把握しておく必要性がある。

図 4.1-12 に，低密度に関する測定結果を示す。図から飽和状態の熱伝導率に関しては，ある有効粘土密度以上になると，ほぼ一定値に向かう傾向があることがわかった。

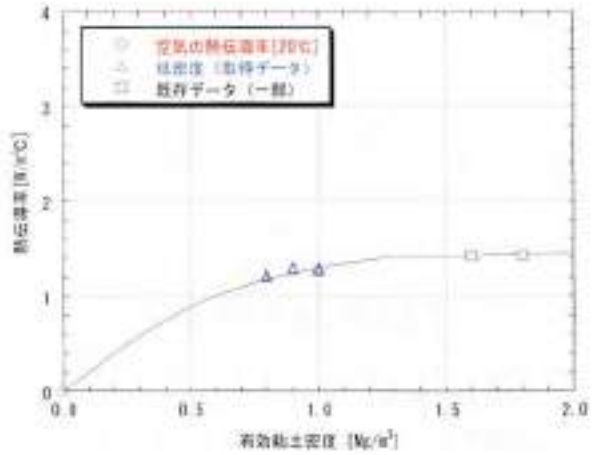


図 4.1-12　乾燥密度と熱伝導率の関係

・面熱源法による試験の成果

ベントナイトの熱物性に関しては，線熱源法を用いて熱伝導率の測定及び点熱源法を用いて熱拡散率の測定を実施し，解析パラメータとなる比熱を求めている。しかし，熱拡散率を取得する際，点熱源法では測定誤差が生じるため，「第２次取りまとめ」で使用したデータの信頼性を確認するうえでも，異なる測定手法によるデータの比較を行う必要性がある。

面熱源法（ホットディスク試験装置）を用いて予備的に測定した熱伝導率の結果を図 4.1-13 に示す。図から熱伝導率の測定に関しては，測定手法が変わっても同等の値が測定された。

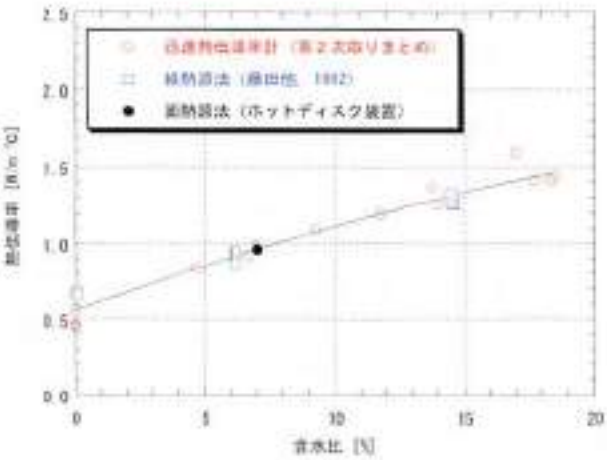


図 4.1-13　熱伝導率の測定結果の比較

③ まとめ

膨潤特性としては，緩衝材ブロック定置方式を考慮した隙間膨潤試験及びスケール効果確認試験を行い，隙間充填挙動や供試体形状が膨潤特性に与える影響に関する検討を行い，今後の試験に関する課題の抽出を実施した。

飽和水理特性については，実際の処分地質環境を想定した場合の海水系等の影響を考え，人工海水条件下における透水特性データの拡充を行った。

静的力学特性では，水分調整方法の違いによる力学的特性への影響を把握するために，蒸気圧法を用いた自然給水によるベントナイト供試体の水分調整を，力学的強度試験の準備として行った。

熱特性に関しては，低密度領域における熱伝導率の測定，ならびに異なった測定手法によるデータの比較検討を実施した。

今後は，各特性における取得手法の標準化に関わる基盤情報の整備および温度，塩濃度等を考慮した試験データの拡充並びに関係式の一般化の検討を進める。

参考文献

千々松正和，杉田　裕，由宮　清（1999）：緩衝材の製作・施工に関する検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-035.

藤田朝雄，杉田　裕，納多　勝，幾世橋広（1992）：緩衝材の熱物性試験，動燃事業団技術資料，PNC TN1410 92-052.

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.

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

「第2次取りまとめ」を技術的な拠り所として，「最終処分法」の制定，実施主体である原環機構の設立など処分事業を進めるための制度的環境が整いつつある。安全規制に関しては，原子力安全委員会より「安全規制の基本的考え方」が取りまとめられ，安全基準・指針等に関する策定スケジュールが示されている。また，「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」（官報，2000）にあるように，国及び関係機関は，最終処分の安全規制・安全評価のために必要な研究開発を積極的に進めていく必要があるとされている。これらに基づき，サイクル機構においては，人工バリアの性能保証に関する基盤情報の整備を進め，安全規制・基準の策定に資するとともに，実施主体が進める処分事業への反映も図ることが重要である。

ここでは，処分場の長期的安全性の確保に対して人工バリアが有すべき要求性能の整理を行い，安全規制・基準の策定や処分事業に資する基盤情報として個々の研究項目の位置付けを明確にするための検討を行う。

また，「安全規制の基本的考え方」では，処分場の閉鎖に際して安全評価の結果が妥当であることの確認を建設・操業段階に得られたデータを追加して行うとある。このデータを取得する1つの方法がモニタリングであり，その中に人工バリア性能モニタリングがあると考える。同様に，安全評価の妥当性を確認するまでの期間は回収の可能性を維持することが重要であるとしている。これらの人工バリア性能モニタリングと再取り出しに関して我が国では明確な考え方は示されていない。ここでは，考え方を整理するための基礎的な情報として諸外国の調査および調査結果の整理を行う。

「第2次取りまとめ」では，処分施設が現状の技術や将来において予想される技術によって成立することが提示されている。人工バリアの搬送・定置技術に関しては，オーバーパックや緩衝材を設計通りに施工する技術はもちろんのこと，安全規制としての設計への許容値や緊急時の対策等，施工の性能を保証するための情報整理が必要となると考えられる。ここでは，オーバーパックおよび緩衝材の定置に係る検討を実施し，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礎情報として整理する。さらに，人工バリアの搬送・定置技術についての基本的な情報を提供するものとして，操業シミュレーション技術に関する検討も実施する。ここでは，高レベル放射性廃棄物の地層処分における操業システムの実現性や問題点を把握し，操業シミュレーションシステムの開発を実施する。

モニタリングや定置技術に関する検討に関しては，幌延の深地層の研究施設で予定されている原位置試験に資するものとして，原位置試験計画との整合や関連する研究での成果を取り入れつつ実施する。

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

処分場の長期的安全性を確保するためには，人工バリア等の処分場を構成する各要素について長期的安全性の観点から性能保証すべき項目を抽出し，その項目が保証されることを示す必要がある。

項目の抽出においては，処分事業開始からの時間の経過に伴い性能保証すべき項目が変化することを十分考慮し，またそれぞれの項目をどのように保証するのかを具体的に示した。具体的に示される内容は，例えば設計段階における評価の方法や用いるデータベース，製作，建設・施工における品質管理内容等である。さらに，この具体的な内容と現状を比較して，性能保証すべき項目に対する課題の抽出とサイクル機構が実施する研究項目との整合性の検討も行った。

これまでに，設計段階における緩衝材，オーバーパックの性能保証に関する整理を行った。表4.1-1に例として緩衝材に対する結果（部分）を示す。

以上述べたように，安全規制・基準の策定や処分事業の推進に資するために，必要となる基盤情報の整備の方法について考え方を示し，人工バリアの一部について整理を行った。

表 4.1-4　設計段階での緩衝材性能保証項目整理表（部分）

時期	何を性能保証するか		どう保証するのかの方法，根拠		現状(H)	今後の課題(G→A→B)
	緩衝材の役割	基準のポイント（評価対）	設計の要件	評価内容(a)（評価対象，データベース）	第2次取りまとめでの取り扱い	
閉鎖後安全評価一連の流れ	自然バリアを支える	周辺岩からの影響に対して可塑な応答を示さないこと	膨潤圧の作用に対してせん断破壊しないこと	・乾燥状態から飽和状態までの過程において，地圧作用の有無によらず人為的な力による急激の変形等の現象を，弾性（線形）解析により把握する。	・不飽和状態における緩衝材の力学挙動	・不飽和状態での緩衝材の力学特性の把握のために，力学特性等取得データの拡充。 ・安全性確保のための弾性解析，必要に応じて弾塑性解析の実施。
造り込み	施工時からの品質確保を達成する	処理技術からの施工性に配慮されていること	遮蔽を確保した埋め戻し材料を設定すること	・施工時の「埋め戻し材処分孔の仕様」に基づき，処分孔の狭い部分コードによりプラグ設計を行い，埋め戻し工法において設計時の施工の難しさを評価する。	・埋め戻し材と岩盤間における遮蔽性能を，実施設計コードMMRを用いて計算し，処分孔近傍岩盤の透水係数を基準とする遮蔽性能を満足するかどうかを確認。	・計画に沿ったものの確認や，埋め戻し材料の品質管理基準の決定。 ・実際の施工に基づいた再検討の実施。
緩衝材品質の一貫保証	設計は品質の維持を前提する	ホウ化物が溶出されず，設定時間までが一日以上進行しないこと	十分な膨潤圧をもたらすケイ化物を有すること	緩衝材性能設定において設定した品質特性に関連した品質特性値，指標，値などを	・各種条件下における膨潤特性を，標準化された試験手法について定量化する。	・各種変，定量，品質，ケイ化鉱物等スクール物理などを用いたデータの取得とともに，ホウ素等との相関関係の一般化。 ・品質特性試験手法の標準化における品質情報の整理。

ii）人工バリア性能モニタリング

処分場の管理に関しては，処分場を閉鎖するための判断材料としての情報を得る方法の1つとしてモニタリングが考えられるが，その概念，具体的な測定技術，測定項目を含めたシステムがこれまで構築されていない。処分場の管理を目的としたモニタリングを実施するためには，安全規制としてどれだけの情報を取得することが出来るのか見極めることが重要となる，これらに関する情報は，これまでのところ整理されておらず，情報の収集とともに，それらに基づく処分場管理/モニタリングの基本的な考え方を整理する必要がある。

情報収集として国際機関 IAEA，OECD/NEA のほか米国，フランス，ベルギー，スイス，ドイツ，スウェーデン，フィンランドの諸外国の調査を行い，各々の処分概念におけるモニタリングに対する対応，見解や指針，それらの中の人工バリア性能確認モニタリングの動向などに留意して最新の情報を整理した。

整理した結果の概要は次のようになる。

- IAEA は，モニタリング全体を「処分場システムの構成要素の挙動または処分場とその操業による影響の評価を助けるための，工学，環境または放射線学的なパラメータの連続的または定期的な観測および測図」と定義し，人工バリア性能のモニタリングに関しては，「処分場の一部または処分場近傍の同じ母岩を有する実証施設にてモニタリングを実施する」という考えを示している（IAEA，2001）。
- 米国は，モニタリングを性能確認試験の1つの手段として位置付けており，人工バリアとそれに関連するモニタリングも含まれている。
- フランスは，再取り出しを原則として導入しているが，人工バリア性能に関するモニタリングに関して規制・基準からの情報はない。
- ベルギー，スイス，ドイツ，スウェーデン，フィンランドに関しては，人工バリア性能確認に関するモニタリングの規制・基準は明確ではない。

iii）地層処分における廃棄体再取り出しについての検討

「第2次取りまとめ」では，地層処分の基本的概念は制度的管理を必要とせず，受動的・永続的であり，処分場閉鎖後に廃棄体再取り出しを想定する必要がないという考え方を示した上で，閉鎖後に廃棄体を取り出すことは鉱山技術などの応用により不可能ではないという各国共通の認識が得られている，とした。近年諸外国においては地層処分への理解を得るため，処分事業の進捗において段階的に得られる情報をその都度評価し次のステップに進む考え方（Stepwise Implementation）が主流となってきている。ここでは，諸外国における可逆性の考え方，処分場における再取り出し性の考え方の調査・分析を行い，「第2次取りまとめ」で示した概念を基とした再取り出しの技術的成立性の検討を実施した。

・諸外国における可逆性，再取り出し性の考え方

OECD/NEA は，可逆性（Reversibility）と再取り出し性（Recrievability）という用語はさまざまな機関で使い方が異なっているとした上で，「可逆性」とは，地層処分プログラムのありゆる段階において，処分場の計画あるいは開発における1つあるいは一連のステップを後戻りする（reversing）可能性であるとし，「再取り出し性」とは，廃棄物定置の行為を逆に行う可逆性の1つの特殊なケースで，再取り出しは廃棄物あるいは廃棄体を取り戻

す行為である，としている(OECD/NEA，2001)。また欧では，いくつかの国で再取り出し性は可逆性と同義語として解釈されているとした上で，「再取り出し」を廃棄体を取り出すことの技術的な実現可能性である，とした(Grupa et al.，2000)。以上を踏まえ，本検討では，可逆性は，「意思決定を含めて，地層処分計画の1つあるいは一連のステップを後戻りする可能性」を意味することと定義し，再取り出し性は，「定置された廃棄体を取り戻すという可逆性の一部を表し，廃棄体定置作業の逆動線に限定されない廃棄体の回収，を意味すると定義した。

一方，米国，フランス，ベルギー，スイス，ドイツ，スウェーデンなどの処分概念における可逆性，再取り出し性に対する最新の情報を整理したところ，各国は，あくまでも再取出しを意図しないという地層処分の原則を理解した上で，段階的なアプローチを取るための再取出しのオプションをある程度視野に入れ始めていることが分かった。

・「第２次取りまとめ」で示した処分概念における再取り出しの技術的成立性

今回定義した通り，再取り出しは定置された廃棄体の回収作業であるとし，廃棄体の定置前の段階および工程は再取り出しの検討の対象とならない。処分場の建設段階では，廃棄体は処分場に存在せず，ガラス固化体の形態で貯蔵施設において冷却のために安全に貯蔵されている。処分場の操業段階における廃棄体の定置前の段階および工程では，廃棄体を何らかの理由で回収する必要が生じた場合は，それまでの作業を逆に行うことで，廃棄体を回収することが可能である。廃棄体定置直後までの段階では，廃棄体の回収に影響を及ぼす側部の緩衝材は膨潤していないと想定され，廃棄体が緩衝材の膨潤圧により拘束されていないため，廃棄体が健全でありあらかじめ想定された姿勢で定置されている場合には，廃棄体定置装置の逆動により廃棄体を回収することが可能である。それ以降の段階では，緩衝材の除去，埋戻材の除去が完了した段階で，廃棄体が健全でありあらかじめ想定された姿勢で定置されている場合には，廃棄体定置装置の逆動により廃棄体を回収することが可能である。ただし，緩衝材の除去が必要な場合には，具体的な除去方法（例えばバックホウによる掘削），除去した緩衝材の処理方法等の検討が必要となる。

ⅳ）オーバーパックおよび緩衝材の定置に係る検討

「第２次取りまとめ」では，地質環境を特定しない一般論として，処分施設が現状の技術や近い将来に確立される技術によって成立することが提示された。しかしながら，実際の処分場のように地下深部に掘削される岩盤の中では，机上や地上での検討では考えられない事象が起こることも予想される。特に，人工バリアの搬送・定置技術に関しては，オーバーパックや緩衝材を設計通りに施工する技術はもちろんのこと，安全規制としての設計への許容値や緊急時の対策等，施工の性能を確保するための情報整理が必要と考える。これらの情報は，人工バリアの搬送・定置装置の安全規制策定の基盤情報を提供するものと考えられ，幌延の深地層の研究施設において検証が必要である。

これまでに，オーバーパックの表面における定置初期の環境を再現する要素試験セルを設計・製作し，これまで取得されていなかった緩衝材中における湿度勾配下での炭素鋼の腐食試験を実施した。

着目したのは，緩衝材の施工方式の一つであるブロックでの施工方式で起こると考えられる人工バリアでの挙動を取り上げ，それを室内に再現した。ブロックでの定置初期はオーバーパックと緩衝材は必ずしも全体が密着しているわけではなく，部分的に密着部と隙間部が生じると考えられる。そのような隙間には選択的に地下水が浸潤すると考えられる。処分場の想定事象では，このような隙間は緩衝材の膨潤により閉塞すると同時に，オーバーパック表面にも一様に緩衝材が密着した状態になると考える。しかしながら，何らかの不可抗力や施工不良等により隙間部が存続する場合が考えられる。そこで，図4.1-14に示すようなオーバーパック表面部における隙間の影響を模擬するための試験セルを設計・製作し，腐食挙動に与える影響を把握した。

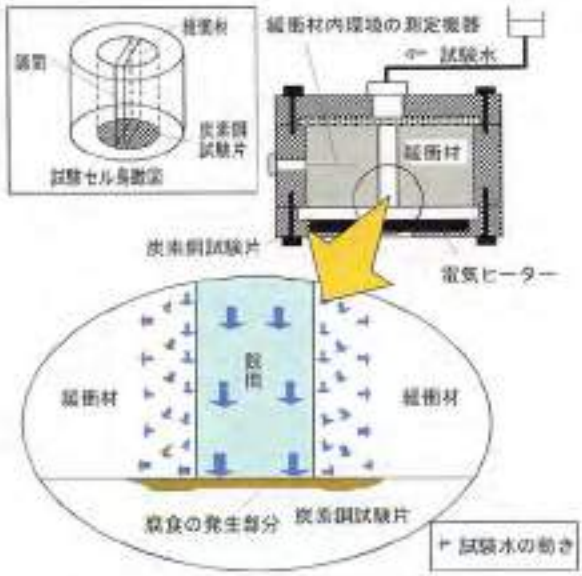


図 4.1-14　相互腐食試験セルのイメージ

緩衝材は「第２次取りまとめ」のブロック仕様とし，試験水（人工海水，炭酸水素ナトリウム溶液），隙間幅（5mm，10mm），隙間の存続状態（膨潤でふさがる，隙間は存続，隙間なし）をパラメータとした。短期の試験結果では，これらの隙間付与による顕著な腐食の局在化は認められなかった。

v）操業シミュレーションシステムの開発

本検討は，高レベル放射性廃棄物の地層処分における操業システムの実現性や問題点を把握し，操業システムの安全規制や設計基準に資するシミュレーションシステムを開発することを目的とした。

本検討では，操業シミュレーションシステムに求められるソフトウエア，ハードウエアの構成及び拡張性に関する検討を実施しシステムの概念を構築するとともに，シミュレータに投入するモデルデータとして，「第２次取りまとめ」で示された地上施設，アクセス施設，地下施設の一連の設備機器のデータを作成した。投入したモデルの例を図 4.1-15 に示す。作成したデータは，システム内であらゆる視点から動作の確認を行うことが可能である。

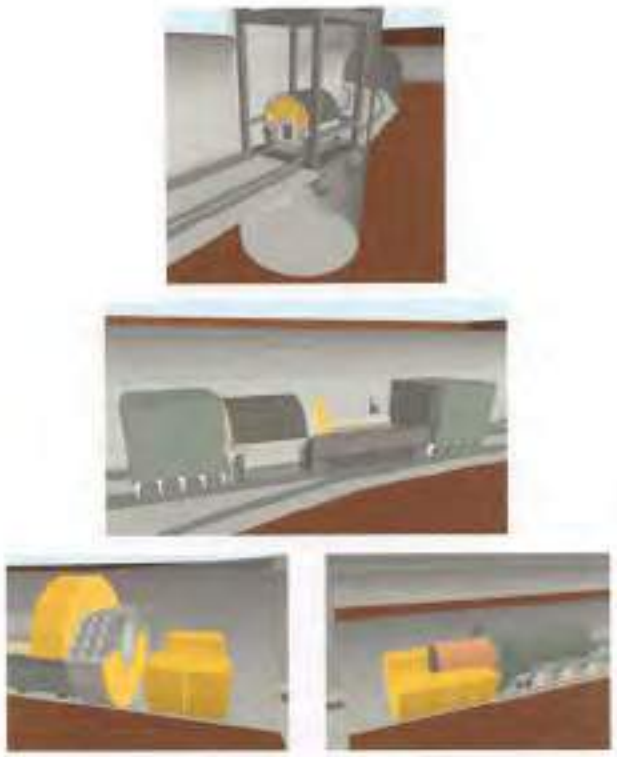


図 4.1-15　投入モデルの例（処分坑道横置き定置方式）

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，緩衝材およびオーバーパックに関して性能保証項目の整理を実施した。今後は，埋め戻し材，プラグ，グラウト，坑道・支保等についても同様の検討を実施し，個々の研究からの成果を適宜取り込みつつ見直しを図る。

人工バリア性能モニタリングでは，国際機関，諸外国における考え方をとりまとめた。今後は，これらの概念を参考に，幌延の深地層の研究施設における原位置試験への適用を念頭に，わが国における人工バリアモニタリングの考え方の整理を実施する。

地層処分における廃棄体再取り出しについての検討では，各国の再取り出しに対する考え方を整理し，その結果として再取り出しを意図しないという原則を念頭に置きつつ，形式や程度に違いはあるものの再取り出しのオプションを視野に入れていることが分かった。また，「第２次取りまとめ」で示した処分概念における廃棄体再取り出しの技術的成立性については，廃棄体定置装置の逆動による回収が可能である場合（定置直後まで）は十分成立性があると考えられる。

オーバーパックおよび緩衝材の定置に係る検討では，緩衝材における温度勾配下の炭素鋼腐食試験を実施した。その結果，短期の試験では，酸化付与による顕著な腐食の局在化は認められなかった。今後は，人工バリアの定置に関わる技術的課題を明らかにするため，考えられる人工バリア定置後の挙動を再現した試験を継続して実施し，それらが人工バリア性能に与える影響を把握する。これらの成果は，幌延の深地層の研究施設における原位置試験計画へ反映する予定である。

操業シミュレーションシステムの開発では，システムの概念構築およびシステムへ投入するための地上・アクセス・地下施設の一部の設備機器のデータを作成した。本システム導入により，人工バリア定置等の基準の検討，また今後の幌延の深地層の研究施設の設計における坑道レイアウト，各種人工バリア試験レイアウト等の検討に応用できるものと考える。

参考文献

Grupa, J.B., Dodd, B.H., Hooteelbeke, J.M., Mouroux, B., Petier, J.N., Ziegenhagen, J., Santiago, M.L., Alonso, J., Fernandez, J.J., Zuidema, P., Crossland, I.G., McKinley, B., Verijen, J., Vira, J., Volkaert, G., Papp, T. and Svemar, C. (2000): Concerted Action on the Retrievability of Long-Lived Radioactive Waste in Deep Underground Repositories, Final Report, Nuclear Science and Technology, EUR 19145 EN, ISBN 92-828-9468-5

IAEA (2001): Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste, IAEA- TECDOC 1208

吉報 (2000)：特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針，通商産業省告示第591号，平成12年10月2日.

OECD/NEA (2001): Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste: Reflections at the International Level, ISBN 92 64-18471-6.

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

緩衝材のクリープ挙動については，「第２次取りまとめ」において，緩衝材のオーバーパック自重による「オーバーパック沈下解析」において，せん断クリープを表現可能な構成式である関口・太田モデルを用い評価した。

図 4.2-1 は「第２次取りまとめ」時に用いた緩衝材であるベントナイトにおける非排水せん断クリープ挙動に関する現有データである（高治・鈴木, 1999）。図 4.2-2 は既存の他の粘性土におけるクリープ挙動把握のイメージである。緩衝材においてはクリープ破壊に至るまでのデータが収集されていない。

図 4.2-1　緩衝材クリープ現有データ

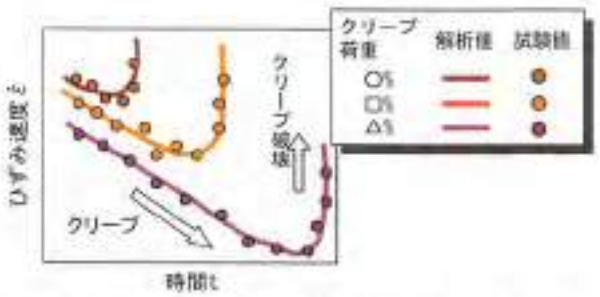


図 4.2-2　粘性土クリープ挙動把握のイメージ

「第２次取りまとめ」においては，緩衝材にも図 4.2-2 のような他の粘性土と同様なクリープ挙動が起こるとの前提の下，利用可能なデータと構成式，解析コードから緩衝材の力学挙動の評価を行った。今後の課題として，それらの妥当性を確認していく必要がある。

② これまでの成果

図 4.2-2 のようなクリープ破壊を含むデータを収集するべく緩衝材三軸圧縮試験機を用いてクリープ荷重 90%(破壊荷重の 90%)の試験を行ったが（図 4.2-3），クリープ破壊には至らなかった。クリープ破壊間際の挙動を観測しようとすると，図 4.2-2 のようにひずみ速度が極小値となる点を通過することになる。したがって，載荷ピストンの摩擦係数は動～静～動と大きく変化する。クリープ荷重を制御するための三軸セル外の荷重計（ロードセル）がこの軸摩擦の影響を受けたことがクリープ破壊を的確に把握できない原因と判断された。そこで，図 4.2-4 のように緩衝材三軸圧縮試験機の荷重制御用ロードセルを新たに載荷ピストンの軸摩擦の影響のない三軸室に内蔵する改造を行った。

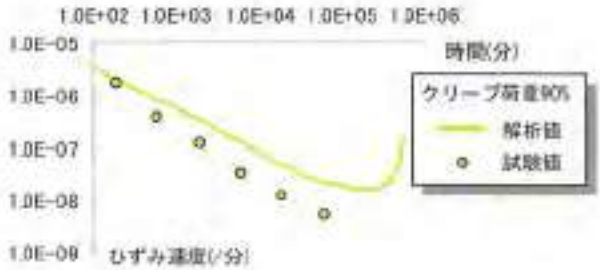


図 4.2-3　クリープ荷重 90%試験の試行

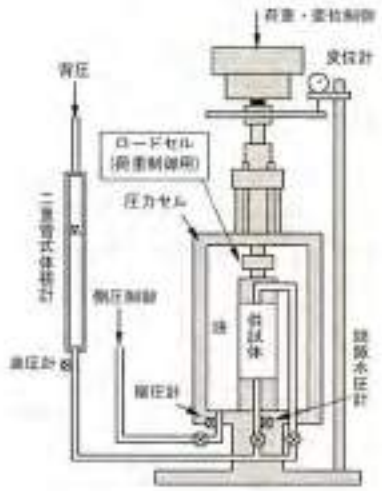


図 4.2-4　緩衝材三軸圧縮試験機の改良

③ まとめ

緩衝材においても図 4.2-2 のようなグラフのプロットを得るために，試験と解析を継続し，構成式とパラメータの妥当性を確認する。また，実現象をある程度再現でき，境界条件の明確な模型試験を行い，構成式と解析コードが実現象を再現できるかどうかの検討も行う予定である。

最終的には，妥当性の確認されたパラメータ，構成式，解析コードを用いて，緩衝材長期力学挙動把握をより精度良く行えるようにする。

参考文献

名合一彦，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.

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

ニアフィールド岩盤の長期力学的変形挙動について，「第2次取りまとめ」では，大久保ら(1997)により提案されたモデルを用いて評価を行い，設定された物性値においては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といえる。

・軟岩系岩盤については，クリープ変形は年々増加し，影響領域が広がる。

それぞれの岩盤の物性値については，大久保・福井（1997）より推定した。

今後，評価の信頼性を向上するため，各種提案されている岩盤の長期力学的変形挙動を表現し得るモデル(例えば，Nunson, 1997)の比較検討を行う。そのうち大久保らにより提案されたモデルについては，室内力学試験より得られるデータとモデルの比較検討を実施し，実際の系への適用を図る。

また，岩盤の長期力学的変形挙動に影響を及ぼし得る因子として岩盤の乾湿繰り返しの影響(例えば，関，1998)や，廃棄体からの熱の影響(例えば，小川ほか，1999)が考えられる。今後，これらが及ぼす影響についても検討を実施する。

対象とする岩盤は，主に軟岩系岩盤とする。

② これまでの成果

大久保らにより提案されたコンプライアンス可変型構成方程式を用いた検討結果を例により述べる。　一般式は複雑であるが，たとえばコンプライアンス可変型構成方程式の基礎方程式は次式のように表すことができる。

$$\frac{d\lambda}{dt} = a \cdot \sigma^{n} \cdot \lambda^{m} \qquad (4.2\text{-}1)$$

この基礎方程式より，クリープ試験，定応力速度試験，定歪速度試験，応力緩和試験の解析解を求めることができる(大久保，1992)。ここでλはコンプライアンスで，歪εを応力σで除した値，tは時間，mは時間依存性の程度を決める定数，nはピーク強度以降の応力-歪曲線の傾きを決める定数，aはピーク強度を決める定数である(大久保・福井，1997)。2本の泥岩試料(50mm×100mm)を，完全飽和状態，室温条件下にて定歪速度試験（一軸圧縮下）に供した(試験 No. 1)。試験結果より各定数を求め，コンプライアンス可変型方程式により描ける応力-歪曲線を，試験結果とあわせて図4.2-5に示す。

次に試料を 80℃にて定歪速度試験に供した。2本の試料を完全飽和状態とした後，供試体箱に水浸させ，供試体箱まわりに設置したバンドヒータにより 80℃まで加熱し，加熱確認後，定歪速度載荷を行った(試験 No. 2)。試験結果より各定数を求め，コンプライアンス可変型方程式により描ける応力-歪曲線を，試験結果とあわせて図4.2-6に示す。また，比較の意味で，完全飽和状態，室温条件下での試験結果(試験 No. 1)を破線であわせて示す。

次に試料を定歪速度試験に供する前に，人為的に乾湿繰り返し作用を与えた。まず2本の試料を完全飽和状態とし，その後真空ポンプにて強制脱水した。強制脱水が終了した後，再び完全飽和状態とし，供試体箱に水浸させ，室温条件下にて試験に供した(試験 No. 3)。試験結果より各定数を求め，コンプライアンス可変型方程式により描ける応力-歪曲線を，試験結果とあわせて図4.2-7に示す。

最後に乾湿繰り返し，80℃条件にて 2 本の試料を定歪速度試験に供した(試験 No. 4)。試験結果より各定数を求め，コンプライアンス可変型方程式により描ける応力-歪曲線を，試験結果とあわせて図4.2-8に示す。

試験No. 1—No. 4より得られたそれぞれの2本の試料の一軸圧縮強度の平均値および定数の平均値をまとめて表4.2-1に示す。

試験数が少なく，ばらつく結果となったため，一概にはいえないが，熱の作用は主に強度に，乾湿繰り返し作用は，強度，変形特性に影響を及ぼすことが推測できる。強度は，熱の作用による影響(No. 1 と 2 の比較, No. 3 と 4 の比較)よりも，乾湿繰り返し作用による影響(No. 1 と 3 の比較, No. 2 と 4 の比較)のほうが顕著であると推測できる。

表4.2-1　一軸圧縮強度および定数の平均値

試験 No	試験条件		σc (MPa)	λ (1/MPa)	n, m
	含水	温度			
1	飽和	室温	2.4	2.0×10^{-1}	27
2	飽和	80℃	2.2	2.4×10^{-1}	26
3	乾湿	室温	1.0	5.3×10^{-2}	24
4	乾湿	80℃	0.8	7.3×10^{-2}	17

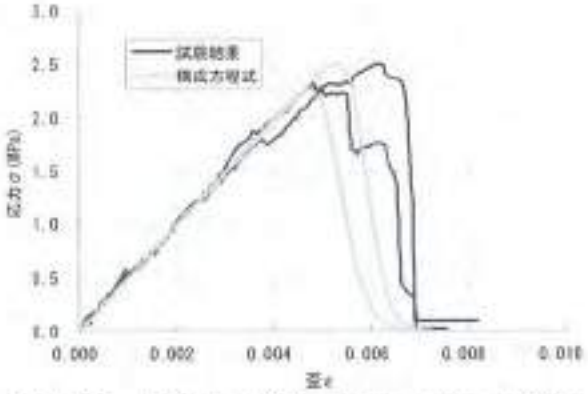


図 4.2-5　試験 No.1(飽和, 室温)　応力-歪曲線

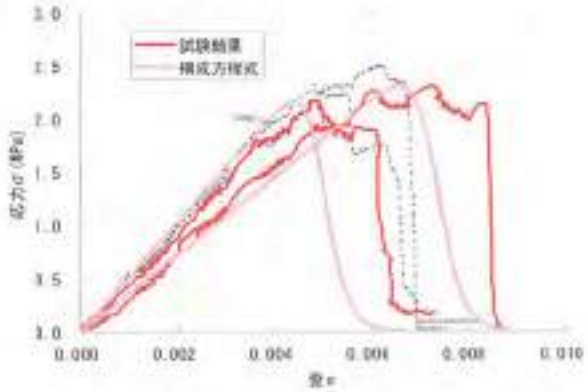


図 4.2-6　試験 No.2(飽和, 80℃)　応力-歪曲線

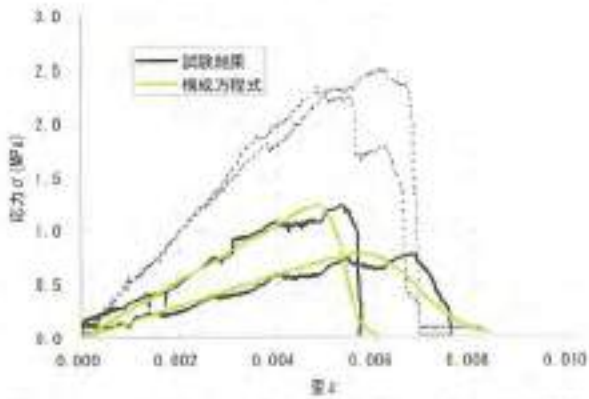


図 4.2-7　試験 No.3(乾湿, 室温)　応力-歪曲線

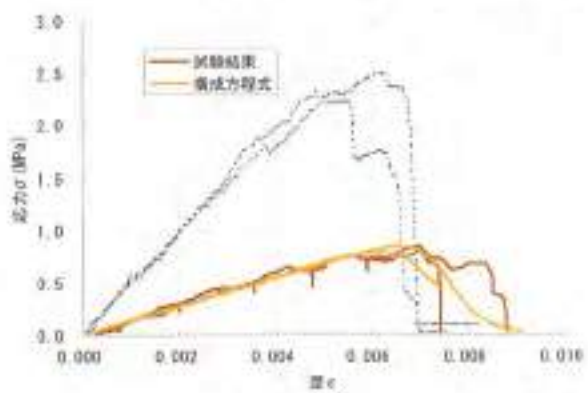


図 4.2-8　試験 No.4(乾湿, 80℃)　応力-歪曲線

岩盤の長期力学的変形挙動を考える上で，想定される環境条件下における岩盤の強度および変形特性を知ることは重要であると考える。

熱や乾湿繰り返し影響は，坑道周辺にて最も顕著であると想定される。試験 No.1～4 の結果より得られた岩盤特性より，コンプライアンス可変型構成方程式を用いて，一軸圧縮クリープ状態にある岩盤の寿命について考察する。

一軸圧縮クリープ状態にある岩盤の寿命は，次式であらわすことができる(大久保，1992)。

$$t_r = \frac{1}{m-1} \times \frac{1}{a \cdot \lambda^{m-1} \cdot \sigma_1^{\,n}} \qquad (4.2\text{-}2)$$

ここで t_r は寿命，σ_1 はクリープ応力をあらわす。

試験 No.1～4 の結果より得られた岩盤特性(表 4.2-1)を用いて，上式より得られた結果を図 4.2-9 に示す。図の縦軸はクリープ応力度(クリープ応力 σ_1 を一軸圧縮強度 σ_c で除したもの)，横軸は寿命(破壊時間)である。

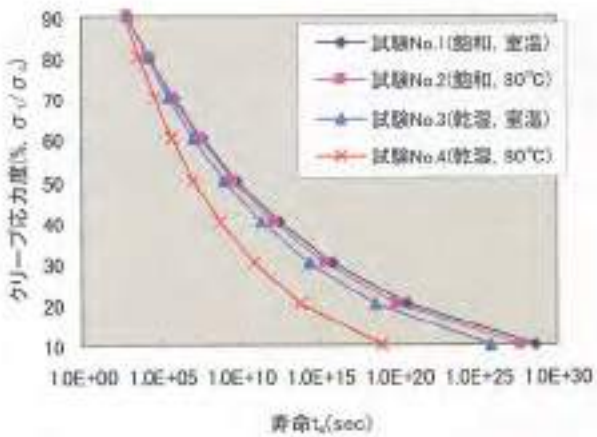


図 4.2-9 寿命とクリープ応力度の関係

結果より，乾湿繰り返しや熱の作用は，坑道周辺岩盤の寿命に影響を及ぼし得ることがわかる。

今後，継続してデータを取得し，これらが岩盤の長期力学変形挙動に及ぼす影響について更に検討する必要があると考える。

③　まとめ

これまでの成果より，乾湿繰り返しや熱を作用させた過酷な条件下において，岩盤の強度，変形特性に変化が見られた。これらの作用が，岩盤の長期力学的変形挙動に影響を及ぼすことが推測される。

今後，最新の知見を踏まえながら，評価の信頼性を向上するために，想定される環境条件が再現できるよう，データ取得，モデルの検討，原位置試験計画の立案を行う．また，岩盤単体のみでなく，緩衝材との相互作用の評価（高治ほか，1999）も念頭におき，研究を進める．

参考文献

Munson, D. E. (1997) : Constitutive Model of Creep in Rock Salt Applied to Underground Room Closure. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 34, pp. 233-247.

小川智弘，伊藤文雄，山辺　正，猪田雄史(1999)：軟岩の時間依存性挙動に関する実験的研究，土木学会第54回年次学術講演概要集，第3部(A)，pp. 624-625.

大久保誠介，西松裕一，笹方雅弘(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，資源と素材，Vol. 103，pp. 293-296.

大久保誠介(1992)：コンプライアンス可変型構成方程式の解析的検討，資源と素材，Vol. 108，pp. 601-606

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

関　陽児(1999)：土壌・風化体の形状と水質変化，地質調査所月報，Vol. 49，pp. 639-667.

岡部一彦，杉野弘幸，奥津一夫，三浦一彦，田部井和人，納多　勝，高橋良　，杉江茂彦(1999)：ニアフィールド下の長期構造安定性評価，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-043.

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

膨潤性の粘土鉱物であるベントナイトの岩盤亀裂中への侵入挙動については，単一平板亀裂への基本的な評価により，「第2次取りまとめ」までに次のような知見が得られている。

侵入現象に関しては，亀裂への侵入距離が時間の平方根に比例し，ベントナイト含有量および亀裂幅が大きいほど侵入距離も大きくなる傾向になる。

浸食現象に関しては，水流速を与えた緩衝材の侵入形状を観察し，形状変形の有無をもとに，浸食が発生する流速を実験的に 2×10^{-5}m/s 程度と推定した。

また，緩衝材の岩盤亀裂中への侵入現象のモデルについては，侵入メカニズムをベントナイトの膨潤に伴う粒子の移動とし，中野（1991）による膨潤性粘土の移動論にもとづき，緩衝材の膨潤応力と粘性抵抗を用いて，侵入現象のモデル化を試みた（杉野・菅野，1999）。その結果，初期乾燥密度 1.6g/cm^3 に設定した緩衝材の密度低下は，亀裂開口幅 0.1～50mm の範囲において人工バリア長さ 3.13m に対して亀裂が 2 本/m あると算定し，平均的な緩衝材密度の低下を，10 万年で約 96%程度（緩衝材密度 1.54 g/cm^3 程度），100 万年で 89%程度（緩衝材密度 1.43g/cm^3 程度）と推定した。しかしながらこの評価結果は，限られた条件で取得されたデータに対してモデル化，外挿しているものであり，本来複雑である岩盤亀裂内への緩衝材の挙動を非常に単純化して得られた結果であることに留意しておく必要がある。今後，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，実現象の可視化や地質環境を考慮したデータ（例えば，温度，地圧，地下水組成など）の拡充を進め，侵入現象モデルの構築を進める。また，浸食現象に関しては，Pusch（1983）の理論的な検討による粘土の粒子結合力と掃流力との関係を参考にし，実験によって浸食が発生するしきい値を把握するとともに，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。

② これまでの成果

ⅰ）侵入現象試験

アクリル製の試験容器を用い，岩盤亀裂を模擬した単一平板亀裂への基本的な侵入挙動を観察し，時間と侵入距離の関係を，亀裂幅（1.0mm），緩衝材密度（1.6，1.8g/cm^3），緩衝材へのケイ砂混合率（0，30%）をパラメータに，データの拡充を行った。図 4.2-10 に経過時間と侵入距離の関係を示す。これより，ベントナイト含有量と亀裂幅に依存する比例係数をまとめると図 4.2-11 の関係が得られ，緩衝材の亀裂への侵入は，亀裂幅が大きいほど，またベントナイト含有量が多いほど，亀裂への侵入が促進されることが実験的に明らかとなった。

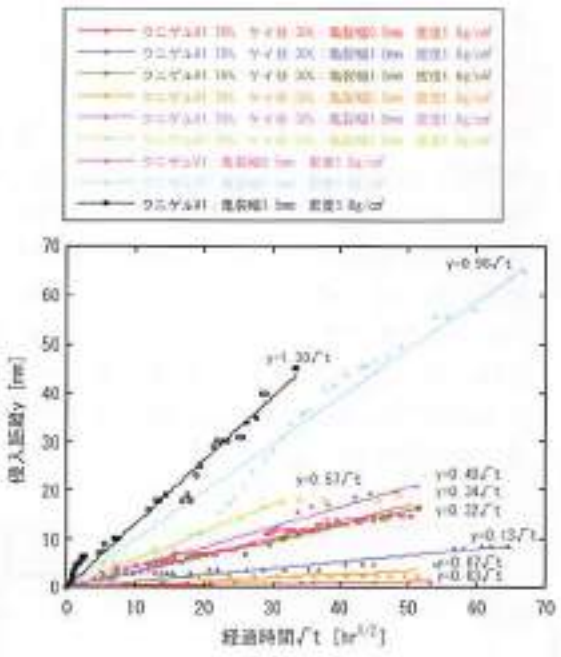


図 4.2-10　経過時間と侵入距離の関係

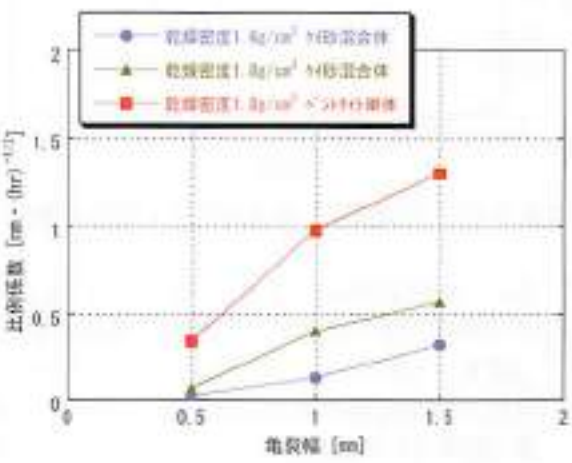


図 4.2-11　亀裂幅と比例係数の関係

ⅱ）浸食現象試験

一方，浸食現象に関しては，水流れによる侵入ベントナイトの形状変形を浸食現象として取扱っ

た概略評価の後，より定量的な現象把握に向けた実験的な手法を模索している段階である。

「第２次取りまとめ」後，亀裂内の侵入ベントナイトの形状変形とベントナイトコロイドの浸食との相互の関係を把握するための試験を実施した結果より，浸食現象に関しては，以下の点を考慮して評価していく必要がある。

- 侵入ベントナイトの形状変形が発生する前の段階で，ベントナイトコロイドの浸食が発生していることが確認された。そのため，浸食が発生するしきい値となる流速は，「第２次取りまとめ」での評価値（2×10^{-5}m/s）よりも小さいことが考えられる。
- サンプリングによって経時的にコロイド濃度を測定した結果，流速を段階的に増加させても排水に含まれるコロイド濃度の増加は認められず，むしろ全体的にコロイド濃度が減少する傾向があった（図 4.2-12）。したがって，侵入ベントナイトのゲルフロントにおける状態（例えば，粒子の水分量など）が浸食の発生メカニズムに関係し，これによって浸食が発生するしきい値が変わりうることが考えられる。

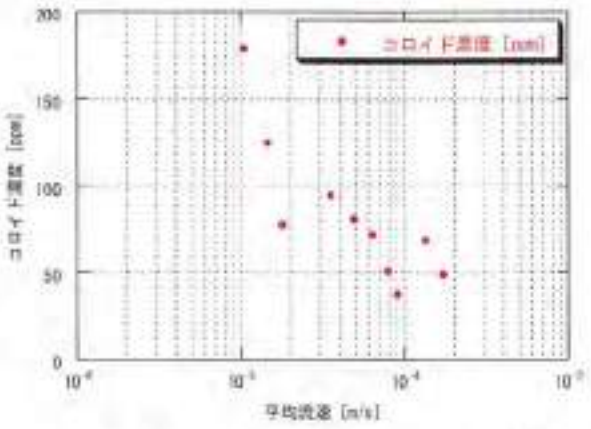


図 4.2-12　平均流速と排水コロイド濃度の関係

- また，流速の増加に伴い浸食されたコロイド粒子の粒径が若干大きくなる傾向が確認された（図 4.2-13）。このことから，ゲルフロントのコロイド生成の時間的な依存性に関係なく流速（掃流力）が大きくなることで，大きい粒子も剥離されることが実験的に確認された。したがって，今後は，流速と浸食されるコロイド粒子の粒径の関係を定量的に把握していく必要がある。

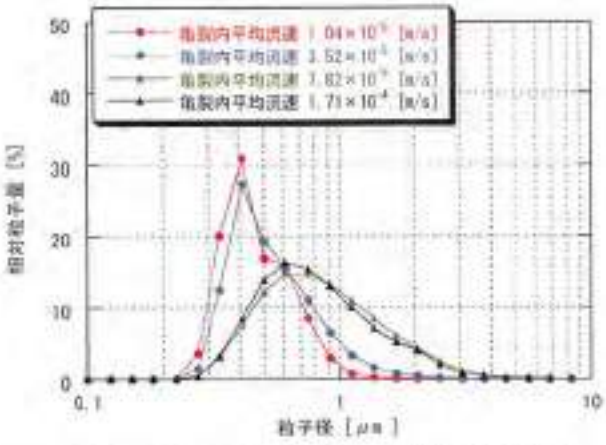


図 4.2-13　流速による排水コロイドの粒径分布

iii）浸食現象試験における予測的解析

浸食現象試験では，亀裂内の侵入ベントナイトへ流速を与え，その浸食過程を観察している。しかしながら，亀裂内の水流速に関しては，流路断面積と流量から算出した流路全体の平均流速で評価している。また，この他に，トレーサーを用いた可視化による実流速を求めているが，トレーサー液では，緩衝材の膨潤性への影響が確認されたため，試験終了の直前における測定のみに適用した。トレーサーによる可視化からも確認されたが，亀裂内における水流速は一様ではなく，ゲル近傍における流速は，平均流速の３倍程度と評価した。

浸食現象においては，流速と緩衝材の浸食量の関係を定量化するために，亀裂内流速を把握することは必要不可欠であり，現在，亀裂内流速を把握するための方法として，三次元亀裂ネットワーク解析コード FracMan / MAFIC を用いて亀裂内流速の予測的解析を実施している。

iv）侵入現象のモデル化に関する検討

侵入現象のモデル化を行なうためには，侵入メカニズムの解明はもとより，亀裂内への侵入に伴う緩衝材の状態を実験的に把握しておく必要がある。しかしながら，侵入現象のように経時的に変化する緩衝材の状態をサンプリング等で把握することは，形状状態の破壊等により非常に困難である。そのため，非破壊で緩衝材の侵入状態を測定する手法として，X 線 CT の技術を利用した測定が望まれる。現在，この X 線 CT を用い，緩衝材の局所的な密度低下の把握，および亀裂内侵入域における密度分布の測定を今後実施することを計画している。図 4.2-14 に X 線 CT を用いた予備的な測定例を示す。

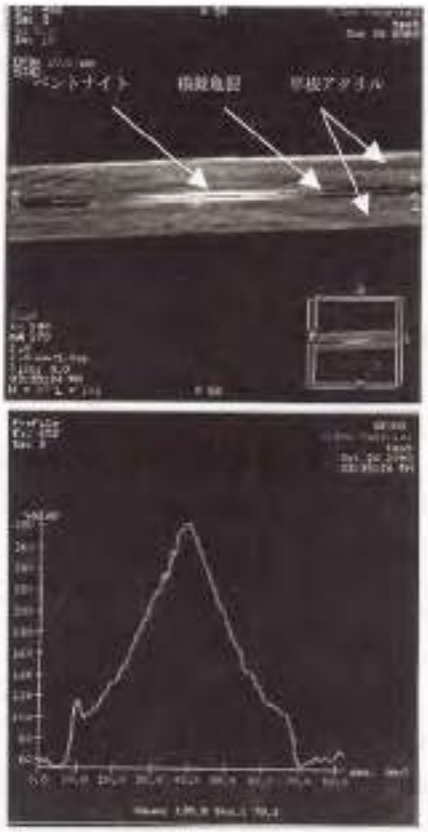


図 4.2-14　X 線 CT を用いた亀裂内粘土の可視化例

図は，緩衝材の亀裂への侵入現象に関する X 線 CT の適用性を確認するために，予備的に実施したスキャン画像である。上図は，隙間（模擬亀裂）を設けた平板アクリルの中心部にベントナイトを置き，水を浸潤させてベントナイトの亀裂内への侵入状態を形成した断面画像を示している。下図は，亀裂内へ侵入しているベントナイトをスキャンした結果であり，横軸が距離，縦軸が CT 値を示したヒストグラムである。CT 値とは，X 線吸収係数を 4.2-3 式によって定義した値であり，密度との相関関係がある。

$$CT\text{値} = (\mu_s - \mu_w) / \mu_w * K \quad \cdots\cdots (4.2\text{-}3)$$

μ_s：求める位置の吸収係数
μ_w：水の吸収係数
K：比例定数

ヒストグラムからも分かるように，アクリル容器の中心部にある供試体部において CT 値が大きく，左右の侵入領域においては中心部より侵入先端部にかけて CT 値が小さくなる傾向が顕著に表現されている。つまり，供試体から侵入領域の先端部にかけては，このような密度勾配が形成されていることを示していることになる。この予備試験により，X 線 CT を利用した非破壊での密度分布測定が可能になることを確認した。

③ まとめ

緩衝材の流出挙動について，「第２次取りまとめ」以降，次のような知見が得られた。

- 侵入現象；亀裂幅 1.0mm の条件で時間と侵入距離の関係を取得し，亀裂幅と比例係数の関係により，緩衝材の亀裂への侵入は，亀裂幅が大きいほど，またベントナイト含有量が多いほど，亀裂への侵入が促進されることが明らかとなった。
- 浸食現象；浸食現象では，亀裂内の侵入ベントナイトの形状変形とベントナイトコロイド発生による浸食との相互関係を把握するための試験を実施し，①「第２次取りまとめ」での浸食現象の評価値 2×10^{-5}m/s よりも小さい流速で浸食が発生する可能性がある，②侵入ベントナイトのゲルフロントにおける状態が浸食の発生メカニズムに関係がある，③流速が大きくなることで，大きい粒子も剥離される，などの知見を得た。

今後，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の拡充を進め，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しきい値を把握するとともに，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，侵入現象モデルの信頼性向上を念頭におき，ベントナイトゲルの粘性係数の取得や X 線 CT を利用した非破壊による緩衝材の状態的な把握を行う。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の関係を定量的に把握する。

参考文献

中野政詩(1991)：土の物質移動学，東京大学出版会。
Pusch, R.(1983)：Stability of Bentonite Gels in Crystalline Rock-Physical Aspects, KBS TR83-04.
杉野弘幸，菅野　毅(1999)：拡散モデルを用いた緩衝材の流出挙動の解析的予測，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-040.

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，長期にわたりその性能が変化しないことが期待されている。「第２次取りまとめ」では，既存文献の調査等をもとに，考えられる変質現象を整理し，イオン型の変化は起る可能性があるが，イライト化変質やセメンテーションについては，緩衝材温度が100℃を超えない条件にすることにより，その発生を避けることができ，緩衝材性能は確保されると推定している。その一方，腐食生成物との相互作用については長期を推定するデータが十分ではないこと，セメント材料の利用による高 pH 環境に対しては，低アルカリ性セメントを利用することで顕著な変質は避けられると考えられるもののアルカリ性環境でのデータを充実する必要があると述べている。

このような状況を考慮し，今後は，腐食生成物との相互作用およびセメント影響に関する長期挙動評価，アルカリ性環境での変質について重点的に研究を実施する。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等から，発生するプロセスの同定を行う。また，処分場でのセメント利用によりもたらされるアルカリ性環境での変質については，pH 等の溶液条件をパラメータとして精緻なスメクタイトの溶解速度定数について体系的なデータ取得を行うとともに，二次鉱物の生成等を考慮した緩衝材変質・劣化モデルを構築し，変質・劣化の長期評価を行い，セメント材料の選定（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。

② これまでの成果

ｉ）腐食生成物と緩衝材の相互作用

「第２次取りまとめ」では，鋼製支保と接触していたベントナイト鉱床の研究（三ッ井ほか，1996；Kamei et al., 1999）において，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ていないことを例示した。一方，実験的に腐食生成物を拡散させたベントナイトの変色部分は固く変質し膨潤性を失うとの報告（出光，1994）もあり，鉄との相互作用に関する緩衝材の変化について腐食生成物拡散部分の緩衝材としての性能に関するデータの蓄積が求められていた。この目的のために，炭素鋼試験片を圧縮ベントナイト（クニゲル V1，乾燥密度 1.8 Mg/m³）に挟み込み，人工海水を含水飽和させ 4 年間静置した。その後，炭素鋼と接触していたベントナイトの分析，評価を行った（藤島ほか，2000）。接触面近傍は約 0.1mm の厚さで緑色に変色していた。この部分の試料に対し，XRD（定方位湿度制御，不定方位），SEM, TEM による観察等を行い，鉱物学的な変化を同定した。その結果，接触面にわずかな菱鉄鉱が観察された他は，スメクタイトの鉄型化が認められたのみであり，スメクタイト構造の変化は観察されず，前述のベントナイト鉱床での研究と同様な結果であった。図 4.2-15 に湿度制御下での XRD 結果を示す。湿度の変化にともなう底面間隔の変化は，初期の Na 型と異なり，Ca 型と類似した傾向を示し，層間陽イオンの変化を示唆している。

さらに，炭素鋼接触部分の微小ブロック試料に対し人工亀裂を作り，環境制御型 SEM（ESEM）において加水を行い，ベントナイトの亀裂修復機能の確認を行った。その結果，炭素鋼近傍の鉄型化が認められる緑色部分においても，十分な膨張性能を有し（図 4.2-16），亀裂を修復する自己シール性を有していることが明らかとなった。

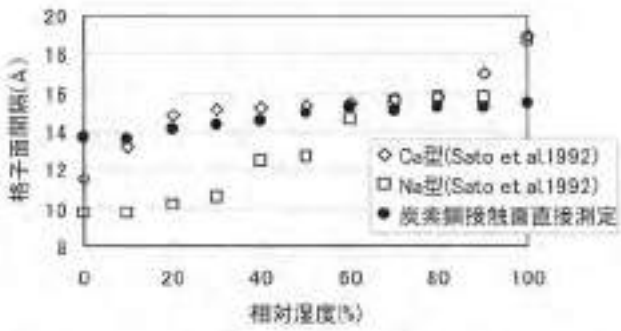


図 4.2-15　接触面試料の相対湿度制御下での底面間隔の変化

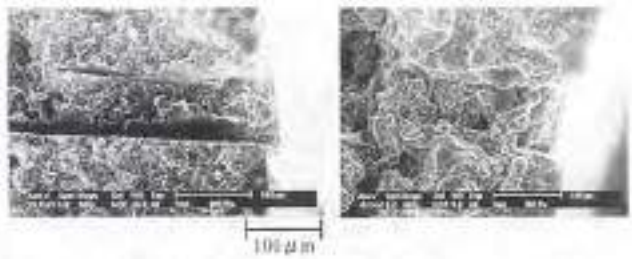


図 4.2-16　ESEM 観察結果（左：加水前，右：加水後）

また，堆積岩（新潟県内に分布する第三系）で認められる続成作用の過程において，スメクタイトおよびスメクタイト/イライト混合層と共生する緑泥石の化学組成および産状の調査を行った（大場，2002）。さらに，スメクタイトと磁鉄鉱粉末を用いた水熱変質試験を開始し（大場，2002），今後，天然事例の観察と実験結果から，処分環境での緑泥石化の可能性について検討を進める予定である。

ii）高アルカリ条件でのスメクタイトの溶解挙動

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．したがって，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，精緻なスメクタイト溶解速度定数の把握が必須である．この目的のために，不純物を除去したNa型スメクタイトを調製し，これを試料に温度（25, 50, 75℃）と溶液のpH（7, 10, 13）をパラメータとして，バッチ式溶解試験を行い，溶出成分のAlとSiの分析値により初期溶解速度を導出した。この際，Tiも合せて分析し，その値を用いてスメクタイトからの溶出成分のみの値になるよう補正した．その結果，初期溶解速度はpHの上昇および温度の上昇とともに増加する傾向が認められた。さらに，初期溶解速度は，pHの関数として表すことが可能であることの見通しを得た。今後，溶液中のSi濃度等をパラメータとして試験の継続を行う予定である。

また，緩衝材および周辺岩盤の統合的なアルカリ変質の予測に資するために，スメクタイトのほか，緩衝材を構成する鉱物等の溶解，沈殿速度に関するデータの調査，評価を行い，体系的な整理を実施中である。

なお，本研究項目については，長期現象を確認するためにナチュラルアナログ研究は不可欠であり，4.2.4項「人工バリア等のナチュラルアナログ研究」と連携して進めていく。

③ まとめ

・腐食生成物と緩衝材の相互作用に関する知見が蓄積できた。炭素鋼と海水条件で4年間接触していた圧縮ベントナイトの分析評価から，接触面での磁鉄鉱の生成，スメクタイトの鉄型化が認められたが，他の変質は認められなかった．また，接触面近傍の緑色変色部分も，十分な膨張能力を有していることが示された。

・堆積岩の続成作用で認められる緑泥石の化学組成および産状を調査するとともに，スメクタイトと磁鉄鉱粉末を用いた水熱変質試験を開始し，緑泥石化に関する検討を行っている。

・緩衝材のアルカリ性環境での変質評価のための基本データであるスメクタイトの溶解速度データの取得を行った。この結果から，新たな速度式，速度定数の検討を行っている。

・今後，鉄腐食生成物およびセメント系材料との相互作用に関する実験的研究を継続するとともに，長期安定性に関連する情報の体系的な整理を実施して行く。

参考文献

藤原敦，久保田満，金井永，根本一昭，柴田雅博，佐藤努（2000）：低酸素条件で鉄と接触していたベントナイトの特性評価，第44回粘土科学討論会講演要旨集，pp. 68-69.

出光一哉（1994）：鉄共存系緩衝材中でのウランの拡散挙動，放射性廃棄物研究，Vol. 1，pp. 43-52.

Knnei, O., Ida, 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.

スッ非敬一郎，柴田雅博，佐々木康博，久保田満，伊藤雅和（1996）：鉄と長期間接触していたベントナイトの変質 ―ロ形集月曲遺山における事例―，第40回粘土科学討論会講演要旨集，pp. 118-119.

大場恭仁(2002) 天然におけるスメクタイトの緑泥石化に関する調査，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 2001-054.

Sato, T., Watanabe, T. and Otsuka, R (1992): Effect of Layer Charge, Charge Location, and Energy Change on Expansion Properties of Dioctahedral Smectites, Clays and Clay Minerals, 40, pp. 103-113.

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処分場閉鎖後のニアフィールドの挙動は，廃棄体からの放熱，周辺岩盤から人工バリアへの地下水浸潤，地下水浸潤による緩衝材の膨潤圧の発生，緩衝材／間隙水組成の変化など，熱的，水理学的，力学的，化学的なプロセスが相互に影響することが予想される（図 4.2-17）。

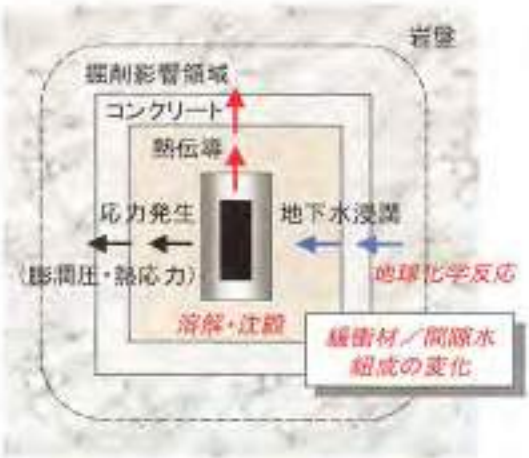


図 4.2-17　熱-水-応力-化学連成場の概念

「第２次取りまとめ」では，各種要素試験，大型緩衝材試験，釜石粘土充填・熱負荷試験などを通じて開発された熱-水-応力連成解析コードを用いて緩衝材の再冠水挙動評価を行った。現在，熱-水-応力連成モデルに関しては，国際共同研究 DECOVALEX，Prototype Repository Project (PRP) に参画し，更なる検証および高度化を図っている（千々松ほか，2001）。

一方，「第２次取りまとめ」での緩衝材間隙水化学の評価は，炭素鋼オーバーパックが核種閉じ込め機能を喪失すると想定する処分後 1,000 年以降を対象とし，熱的，水理学的，力学的なプロセスとの相互影響は考慮していない。現実の地層処分システムにおける緩衝材間隙水化学の時空間分布を把握し，オーバーパック腐食や核種移行をより現実的に評価することは，ニアフィールド性能の信頼性を向上する上で重要であり，このためには処分後 1,000 年程度の過渡的なニアフィールドの変遷を，熱-水-応力-化学の連成挙動と捉える必要がある。

「第２次取りまとめ」以降，地層処分システムの将来挙動（熱的，水理学的，力学的，化学的な条件の時空間分布）の予測が，人工バリア設計や性能評価の信頼性向上に向けて重要であることから，熱-水-応力-化学連成解析コードの開発に着手した（伊藤ほか，2002）。熱-水-応力-化学連成解析コードの開発は，モデルの検証を含めて長期的な取り組みが必要となるが，実用段階に至れば，様々な地質環境条件，人工バリア仕様に対して，オーバーパック腐食や核種移行の環境条件を数値解析により予測することが可能になると考えられる。

② これまでの成果

ｉ）人工バリアにおける熱-水-応力連成挙動評価（国際共同研究 DECOVALEX）

人工バリアにおける熱-水-応力連成挙動を精度よく表現するモデルの検証を行うため，国際共同研究 DECOVALEX においてサイクル機構の所有する熱-水-応力連成解析コード「THAMES」を用いた解析を行い，参加各機関の所有する解析コードとの比較を行っている。DECOVALEX は，フェーズ 1（91 年 9 月～95 年 10 月），フェーズ 2（95 年 11 月～99 年 6 月）と実施し，現在フェーズ 3（99 年 7 月～）である。現在 9 カ国 14 機関（平成 13 年度，ANDRA（仏）と BGR（独）が追加）が参加している。

フェーズ 1 では独自に開発を行ってきた熱-水-応力連成挙動の解析コードを，一同に持ち寄って室内試験結果を解析，比較評価することから始まり，フェーズ 2 では原位置試験（釜石の原位置試験や英国のセラフィールドの試験）での計測データとの比較評価までを行った。

現在実施しているフェーズ 3 では，解析コードの高度化を目指して 4 つのタスクが盛り込まれている。各タスクで問題を設定し，それに対して与えられた情報に基づいて各参加機関が独自に解析モデル，解析メッシュ，解析ステップ，境界条件等を設定し，また，各解析コードに合わせた物性値の設定を行う。その結果を持ち寄り解析手法の高度化を図る。

タスク 1 は，スイスの Grimsel 地下研究施設でスペインの ENRESA が中心となって実施している横置き方式の人工バリア試験「FEBEX」を題材とする。試験坑道掘削による影響，人工バリア設置後の挙動等の問題について，設定した解析条件に基づいた解析結果の比較検討を行う。

これまでのところ，岩盤掘削による周辺岩盤の

挙動に関する解析結果の比較が行われている。

タスク 2 は，アメリカのユッカマウンテンプロジェクトを題材として，連成させる現象により 4 つの課題（熱-水連成，熱-水-応力連成（2 パターン），熱-水-化学連成）を設定している。

これまでのところ，熱-水連成の解析結果の比較が行われている。

タスク 3 はさらに 3 つのベンチマークに分割され，「第 2 次取りまとめ」の竪置き方式の人工バリア仕様を題材として，坑道掘削から人工バリアの設置，その後の再冠水挙動までを解析評価するベンチマーク 1，広域問題と岩盤物性のスケール効果について検討するベンチマーク 2，氷河による水位，応力の変化を考慮するベンチマーク 3 である。

これまでのところ，ベンチマーク 1 では坑道の掘削による周辺岩盤の影響，二次元モデルでの人工バリア定置後の再冠水解析を行い，解析結果の比較を行っている。ベンチマーク 2 では，亀裂情報を用いて岩盤物性のスケール効果に関する検討を行った。

タスク 4 は，安全評価と熱-水-応力連成解析の関連について議論する場で，各機関が安全評価に対する位置づけをどう考えているかをレポートとしてまとめるものである。

ii）実規模原位置試験の連成挙動評価（国際共同研究 Prototype Repository Project）

国際共同研究 Prototype Repository Project (PRP)は，図 4.2-18 に示すように原位置に実規模の竪置きの人工バリアを複数本設置し（区画エリア 1 は 4 本，区画エリア 2 は 2 本），坑道閉鎖までを模擬し詳細に処分環境を調査するものである（Svemar and Pusch, 2000）。人工バリアの仕様はスウェーデンの処分概念に基づくものであり，銅のオーバーパックに封入した使用済み燃料を竪置き方式に処分するものである。これまでに区画エリア 1 において 4 本の人工バリアの設置が完了し坑道の埋め戻しが行われている。

サイクル機構は，これまでの東海事業所における緩衝材大型試験設備，釜石原位置試験における粘土充填・熱負荷試験の経験に基づき，熱-水-応力連成挙動の計測装置の適用性，計測位置の選定について技術協力を行ってきた。また，これまでの試験により検証してきた熱-水-応力連成解析コード「THAMES」を用いて本試験の予測解析を行っている。予測解析は二次元のモデルと三次元のモデルを用いた解析を実施することとしており，これまでに二次元のモデルを用いた解析を行った。

解析では，岩盤の透水係数，緩衝材ブロックと岩盤の隙間の考慮，温度勾配水分拡散係数等をパラメータとした。緩衝材の物性値は SKB で取得されたものを参考にし，入力データとしての加工が必要なものは SKB の試験結果から設定した。

図 4.2-18　PRP 模式図

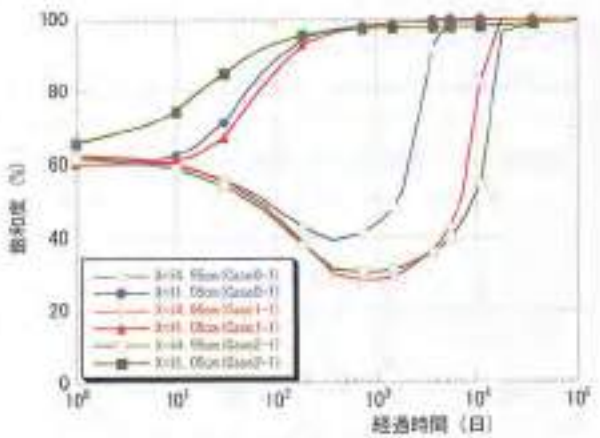


図 4.2-19　再冠水時間の比較

図 4.2-19 は緩衝材ブロックと岩盤との隙間に関するモデル化の違いによる再冠水時間の比較計算結果である。Case0-1 は隙間が緩衝材の膨潤により無くなった状態を初期条件とした場合（実際には飽和に伴い徐々に膨潤するが），Case1-1 は膨潤前の緩衝材ブロックが隙間を充填した状態を初期条件とした場合，Case2-1 は隙間を考慮し，緩衝材ブロックが膨潤して隙間を充填することを表現する計算である。解析は，隙間が充填されており変形を考慮しない Case0-1 および Case1-1 は熱-水連成解析，膨潤により隙間を充填する変形を考慮する Case2-1 は熱-水-応力連成解析とした。

解析の結果，ヒーター表面（図中，白抜き）の飽和度の経時変化では，施工後の密度を初期条件で与えるCase0-1の再冠水時間は他の条件の結果よりも短くなった。初期のブロックの密度で計算したCase1-1，Case2-1では隙間の有無の影響はほとんど見られず，ほぼ同じ再冠水時間となった。

iii）熱-水-応力-化学連成解析コードの開発［プロトタイプの開発］

処分場閉鎖後のニアフィールドの挙動は，熱的，水理学的，力学的，化学的なプロセスが相互に影響することが予想される。「第2次取りまとめ」では，種々の試験を通じて開発された熱-水-応力連成解析コードを用いて，緩衝材の再冠水挙動評価を行っているが，緩衝材／岩盤水組成の変化といった挙動を捉えるためには，熱-水-応力連成モデルに加えて，物質移行モデルおよび地球化学モデルが必要となる。これら全てを考慮した熱-水-応力-化学連成解析コードの開発は，モデルの検証を含めて長期的な取り組みが必要となる。平成13年度はこの取り組みのスタートにあたり，熱-水-応力連成モデルに物質移行モデルを追加し，熱-水-応力-化学連成解析コードのプロトタイプを開発した（千々松ほか，2002）。また，このプロトタイプを用いて，温度勾配下における緩衝材浸潤時の塩の蓄積に関する数値解析を実施した。

・概念モデルと数値解析手法

不飽和緩衝材中の水分は，液状水と水蒸気の2つの移動形態をとることが知られており，緩衝材再冠水時には廃棄体からの放熱によって生じる温度勾配により，水蒸気移動が卓越する。温度勾配下における緩衝材浸潤時の物質移行を表現する概念モデルとしては，水蒸気移動および液状水量の減少が卓越し溶質濃度が上昇することを考慮に入れた。この概念モデルを数値解析に反映するためには，液状水のみを物質移行媒体とした物質移行解析が必要となる。溶質濃度の計算に水蒸気相を関与させない方法をとるために，熱-水-応力連成解析結果の後処理で水に関して気液分離計算を行い，液状水の流速および体積含水率を物質移行解析に引き渡すこととした。溶質濃度の計算は，物質移行に関して移流分散を計算し，溶解／沈殿は溶解度を判定基準として計算する内容となっている（図4.2-20）。

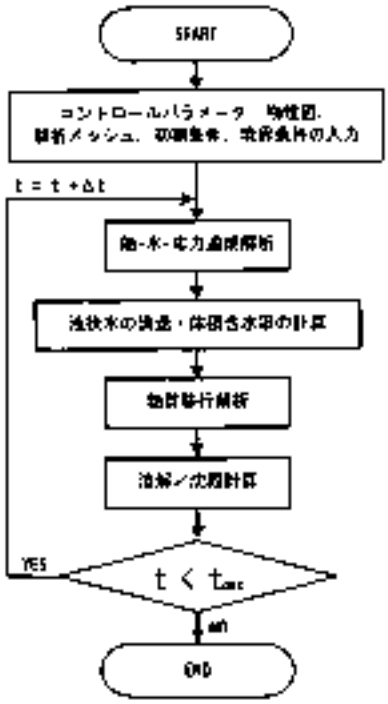
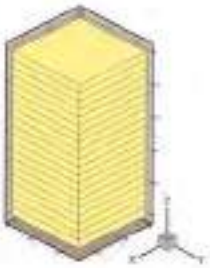


図4.2-20　数値解析フロー

・温度勾配下における緩衝材浸潤時の塩の蓄積に関する数値解析

解析モデルは一次元カラム試験を想定し，ベントナイト／ケイ砂混合体乾燥密度1,600kg/m³，L=0.1mを対象とした（図4.2-21）。解析モデルに上下で20℃の温度差を与え，低温側である上面から海水を浸潤させた場合の挙動を解析した。解析に使用した初期・境界条件は，表4.2-2に示す通りであるが，初期・境界濃度は，緩衝材および人工海水に含まれるNaCl濃度である。

x軸方向のNaCl濃度分布，液状水の体積含水率分布，液状水の実流速分布の数値解析結果を図4.2-22に示す。モデル上面からの浸潤により，体積含水率は徐々に上面から下面に向けて上昇している。NaCl濃度も体積含水率と同様にモデル下面に向かって時間とともに上昇しており，x軸に対して凹的な濃度分布が得られた。これは，緩衝材浸潤時の物質移行が，移流的な挙動よりも拡散的な挙動が卓越しているためと考えられる。また，モデル下面からの熱により，下面から上面へ向けて水分移動（水蒸気による移動）が発生しモデル下部の体積含水率が減少している，これに伴ってモデル下部のNaCl濃度は，初期値よりも上昇（濃縮）する結果が得られているが，浸潤水濃度に比べればその絶対値は小さいものであった。今回行った計算では，浸潤水濃度を越えるような局所的な濃度上昇などは認められなかった。



解析モデル
・ベントナイトケイ砂混合体
乾燥密度 1.600kg/m³
・L=0.1m (z=0.0～z=0.1m)
・z 方向分割数：20

図 4.2-21 解析モデル図

表 4.2-2 初期・境界条件

初期条件		
温度		80℃
体積含水率		8.4%
NaCl 濃度		0.07wt%
境界条件		
温度	上面（z=0.1m）：80℃固定	
	下面（z=0.0m）：100℃固定	
	側面：断熱	
流れ場	上面：圧力水頭 0.0m 固定	
	下面，側面：流入出なし	
NaCl 濃度	上面：3.3wt%固定	
	下面，側面：流入出なし	

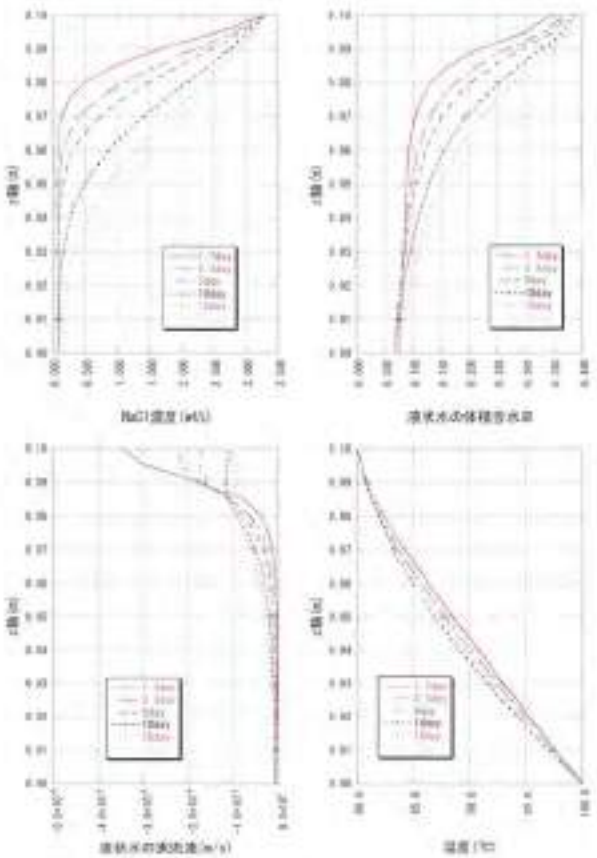


図 4.2-22 数値解析結果

今後は，平成 13 年度に製作した温度勾配下における緩衝材浸潤試験装置（図 4.2-23）を用いた同内容の室内試験と対比を行い，本解析の妥当性を確認する。

(a) 試験装置概観

(b) 供試体セル

図 4.2-23 温度勾配下における緩衝材浸潤試験装置

[柔軟な連成解析体系の実現に向けた検討]

平成 13 年度に開発した熱-水-応力-化学連成解析コードのプロトタイプは，熱-水-応力連成モデルから物質移行モデルへの一方向連成である。今後，緩衝材／周辺水組成の変化といった挙動を捉えるためには，熱-水-応力連成モデル，物質移行モデル，地球化学モデルの連成が必要となり，連成解析体系も複雑になる。個別現象間の相互作用は地質環境条件や人工バリア仕様に強く依存することから，熱-水-応力-化学連成解析コードの汎用性を確保するためは，柔軟な連成解析体系を実現することが肝要である。

これらを受けて平成 13 年度には，柔軟な連成解析体系を実現する熱-水-応力-化学連成解析コードの開発概念を検討した。この結果，データ定義言語 DDL を活用した手法で，柔軟な連成解析体系を短期的に実現可能とする見込みが得られた。今後は本手法を用いて，柔軟な連成解析体系を実現する熱-水-応力-化学連成解析コードの開発を進めていく。

③ まとめ

国際共同研究 DECOVALEX では，人工バリアにおける熱-水-応力連成挙動評価に関して，参加各機関の所有する解析コードとの比較を行い，「第２次取りまとめ」で使用した熱-水-応力連成モデルの更なる検証および高度化を図った。

国際共同研究 Prototype Repository Project では，これまでの経験に基づき，熱-水-応力連成挙動の計測装置の適用性，計測位置の選定について技術協力を行った。また，実規模原位置試験の連成挙動評価として人工バリア試験の予測解析を行い，結果の提供を行った。

熱-水-応力-化学連成解析コードに関して，プロトタイプの開発，塩の析出に関する数値解析および柔軟な連成解析体系の実現に向けた検討を実施した。今後は，柔軟な連成解析体系を実現する熱-水-応力-化学連成解析コードの開発を進め，地層処分システムの熱，水，応力，化学場の変遷に関する数値解析を実施していく。

参考文献

千々松正和，向井　浩，山下　亘 (2001)：人工バリアにおける連成挙動評価研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；株式会社間組），JNC TJ8400 2001-020.

千々松正和，堀山敦史，石原義尚，向井　浩，馬崎　功，岩田　浩，佐川　覚，中川尚一 (2002)：熱-水-応力-化学連成挙動に関する研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；三菱重工業株式会社，株式会社間組），JNC TJ8400 2002-003.

伊藤　弱，川上　進，油井三和 (2002)：熱-水-応力-化学連成挙動研究の現状と今後の計画，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-026.

Svemar, C. and Pusch, R. (2000)：Aspo Hard Rock Laboratory - Prototype Repository Project description, SKB IPR-00-30.

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

緩衝材中のガス移行挙動については，「第２次取りまとめ」までに室温・降水系条件下において，透気流量と破過圧力，破過圧力と膨潤応力，乾燥密度と破過圧力ならびにガス有効浸透率などの関係を実験的に明らかにし，緩衝材の基本的な透気特性の把握を進めてきた。また，これらの実験データと諸外国の結果などをもとに既存の二相流解析コード（TOUGH2）を用いた解析的検討を行い，炭素鋼オーバーパックの腐食で発生するガスの影響を概略的に評価した。

今後は，これら評価の信頼性を確認するとともに，実際の地質環境への適用に配慮し，熱や塩濃度の影響に関するデータの拡充，ならびに岩石を対象とした透気特性データの取得を進める。また，これらの成果はもとより，新たに実現象の可視化研究などを通じて，ガス移行挙動メカニズムの把握に基づくモデルの信頼性向上を進める。

② これまでの成果

ⅰ）緩衝材の基本的透気特性の把握

緩衝材の基本的な透気特性については，「第２次取りまとめ」におけるデータの信頼性を確認するため，スケール効果，乾燥密度をパラメータとして，室温，降水系条件下でのデータの取得を進めてきた。実験に用いた試料は，表 4.2-3 に示す通りである。

表 4.2-3 実験に用いた試料の条件

	乾燥密度 (g/cm³)	ケイ砂混合率 (%)	試料寸法 (mm)
1	1.6	30	φ50×L100
2	1.3	0	φ50×L30
3	1.6	30	φ50×L30
4	1.7	0	φ50×L30

「第２次取りまとめ」および上記の試料を用いた実験結果を合わせて，有効粘土密度と破過圧力，膨潤応力と破過圧力との関係をそれぞれ図 4.2-24 および図 4.2-25 に示す。

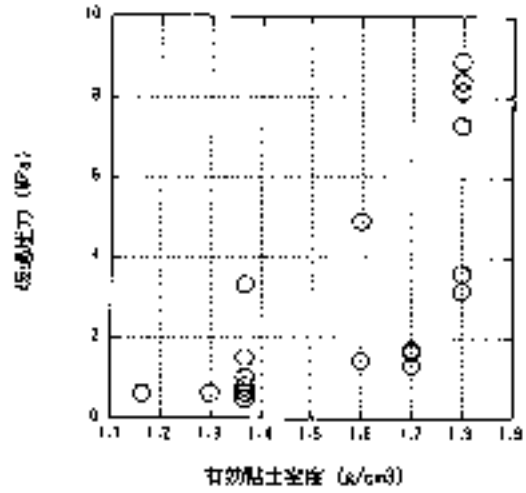


図 4.2-24 有効粘土密度と破過圧力の関係

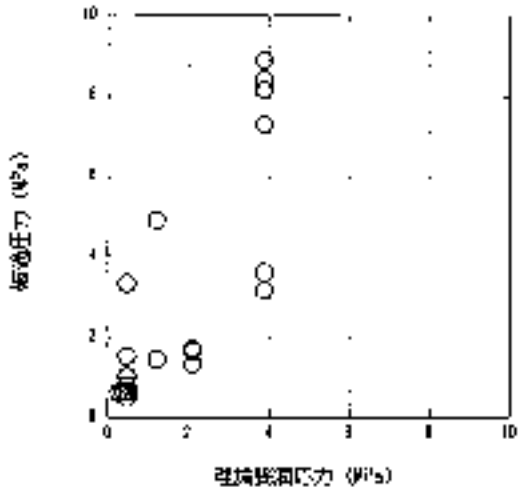


図 4.2-25 膨潤応力と破過圧力の関係

これらの結果から，破過圧力は，有効粘土密度や膨潤応力の増加に伴って大きくなる傾向を示しているが，これらの関係を実験的に整理できるまでには至っていない。その理由の一つとして，例えば，同一密度の試料においても，破過圧力が倍以上異なるケースも見られるように，データのばらつきが大きいことが挙げられる。この点については，試験環境条件をより詳細に制御するとともに，試料の力学的変形挙動を考慮したデータの取得などを検討していくことが必要と考えられる。特に後者については，緩衝材の膨潤挙動だけでなく，ガス圧などによる圧密挙動なども考慮した整理が必要である。

ⅱ）三軸ガス移行試験

サイクル機構とフランス CEA の国際共同研究および「ガス移行モデルの開発に関する国際共同研究（GAMBIT Club）」の一つとして，Fo-Ca Clay，クニ

ゲル V1 および MX-80 それぞれの粘土を用いた透気特性データの取得等を進めている。本実験は，実際の処分環境を踏まえ，地下水圧や温度条件を考慮して透気特性データを取得するものである。このため，試験に使用する装置は，地下水圧を模擬した背圧を負荷可能な三軸ガス移行試験装置（以下，AFS という。）を用いて行っている。図 4.2-26 に当該装置の概要を示す。

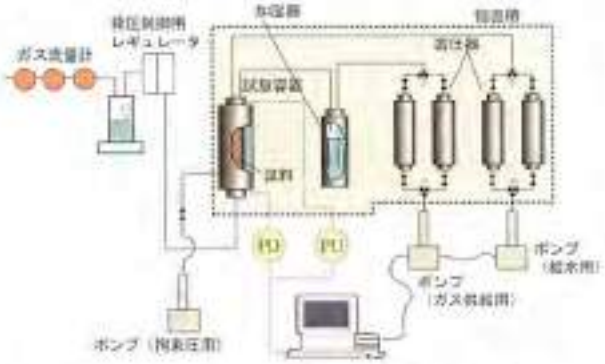


図 4.2-26 三軸ガス移行試験装置（AFS）

これまでに，Fo-Ca Clay および MX-80 を用いた試験を行った。両試料とも乾燥密度 1.7g/cm³，背圧約 5MPa の条件下で実験が行われた。図 4.2-27 および図 4.2-28 にこの結果を示す。

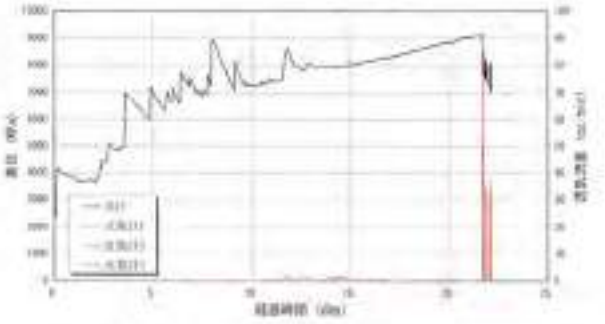


図 4.2-27 Fo-Ca Clay を用いた実験結果

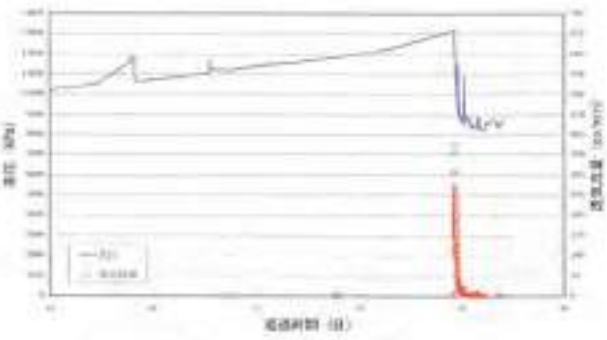


図 4.2-28 MX-80 を用いた実験結果

図 4.2-27 および図 4.2-28 の結果から，両試験とも膨潤応力の 1.5 倍以上の圧力で破過し，膨潤応力程度でガスの流動が停止した。膨潤応力程度でガスの流動が停止することについては，Horseman et al.（1999）の試験結果に類似しているものの，破過圧力については高めにでている。これらに関しては，今後データを追加し詳細に検討する必要がある。

iii）可視化研究

現在までに行われてきている国内外でのガス移行試験の方法は，国によって若干の違いはあるにせよ容器内に粘土試料をセットし，容器上下端あるいは容器内にセンサーを設置し行っているのが実情である。したがって，ガス移行メカニズムの把握もこれらのセンサーにて取得されたデータをもとに行ってきた。諸外国ともガス移行モデルの開発を進めている現状で，実験データ自体が少ないという問題の他に，閉じられた系における実験手法が，ある意味ではメカニズム解明の限界の要因となり，ひいてはモデル化を難しくしている一因でもあると考えられる。今後，ガス移行モデルの開発ならびに高度化を進めていく上では，実験データの整備は勿論，メカニズムの詳細な把握が必要不可欠であることから，本問題を踏まえた新たな実験手法として，X 線 CT 技術の利用に関する検討ならびに装置の導入を行った。X 線 CT 法は，コンピュータ断層映像法と呼ばれる逆解析手法の一つであり，被検体の任意断層内における各種物理量を映像化する数値処理のことである。ここで得られる CT 値は被検体内部の密度と比例することから，結果としてその密度分布を求めることとなる。ガス移行試験への適用としては，ベントナイト試料内の水相飽和度或いは気相飽和度の変化を CT 値の変化として捉え，それを画像処理することにより，流体の挙動を詳細に把握するというものである。X 線 CT 技術の適用性については，アルミニウム合金でつくられた容器内のベントナイト試料を適切に撮影でき，かつ密度・飽和度分布の把握が可能かについて検討を行った。試験は，容器の内径より若干小さい径で，かつ異なった飽和度となるよう水分調整した 4 試料をアルミ容器内にセットしスキャンするというものである。予備試験結果を図 4.2-29 および図 4.2-30 に示す。図 4.2-29 では，ベントナイト試料自体とベントナイト試料／容器間隙間の空気層との区別が CT 値の変

化として明確に測定されている。一方，図 4.2-30 は，軸方向の試料の飽和度変化を見たものであり，画像左から右側に向かって 0%，25%，60%および 90%の 4 段階に変化させたものである。測定は軸方向について 4 断面（①～④位置）で行った。測定結果より，それぞれ飽和度の変化と同様に，CT 値も右側に向かって若干上昇傾向を示していることが分かる。今後は，導入された装置（図 4.2-31）を用い，飽和度や密度と CT 値の関係に関する基礎データを取得した後，本格的な可視化試験を進めていく予定である。

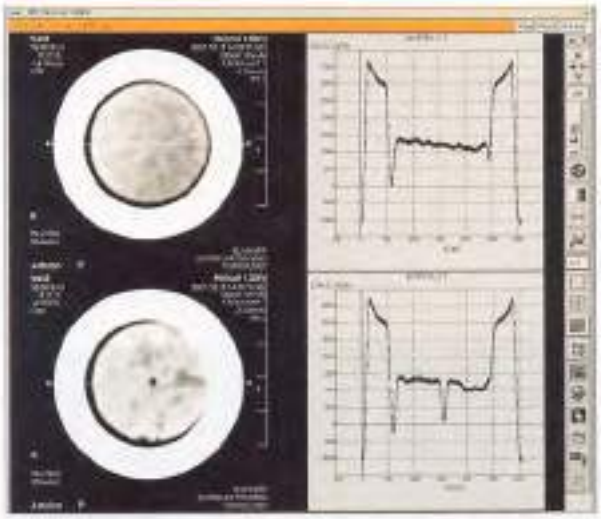


図 4.2-29 予備試験結果の一例（周方向断面）

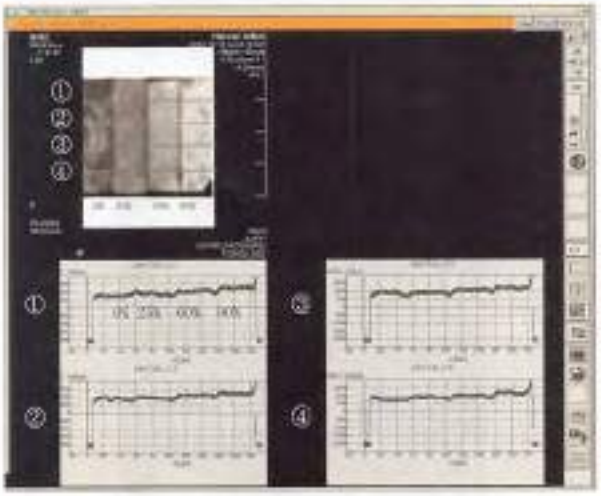


図 4.2-30 予備試験結果の一例（軸方向断面）

図 4.2-31 X 線 CT 装置の概観

③ まとめ

降水系・室温条件下において乾燥密度，スケール効果およびケイ砂混合率をパラメータとした試験を継続し，有効粘土密度と破過圧力，膨潤応力と破過圧力の関係に関するデータの拡充を進めるとともに，今後の試験に関する課題の抽出を行った。また，三軸ガス移行試験については，膨潤応力の 1.5 倍程度で破過し，膨潤応力程度でガスの流動が停止する結果となったが，今後データを追加し詳細に検討する必要がある。一方，新たな試験方法として，X 線 CT 技術の適用可能性に関する予備的検討を行うとともに，2002 年 2 月に装置を導入した。

参考文献

Horseman, S.T., Harrington, J.F. and Sellin, P. (1999) :Gas migration in clay barriers, Engineering Geology 54, pp.139-149.

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，地震・活断層の影響等，地層処分システムに著しい影響を及ぼす可能性のある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おり，基本的には人工バリアは壊れないものと考えられている。しかしながら，極端な条件を想定した試験を行うことにより，これらの天然事象の影響に対する人工バリアの頑健性を明らかにすることにより，安全機能の裕度を示すことには意味があると考えられる。

具体的には断層を模擬する試験と，シミュレーション解析を行い，試験と解析を相互に比較検討することにより解析システムの高度化を図る。最終的にはその解析システムにより，断層が地層処分システムを直撃した場合の影響を定量的に把握することが可能となる。

② これまでの成果

図 4.2-32 のような断層模擬試験を実施し，図 4.2-33 のような結果を得た。

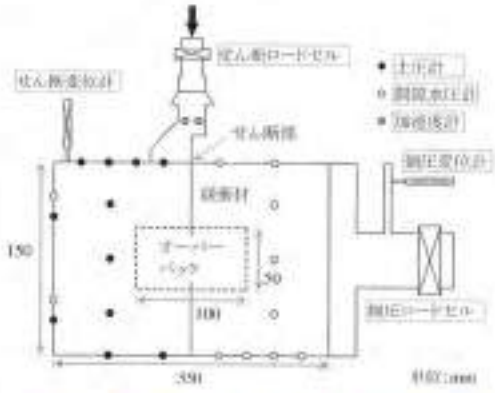


図 4.2-32 断層模擬試験の概要

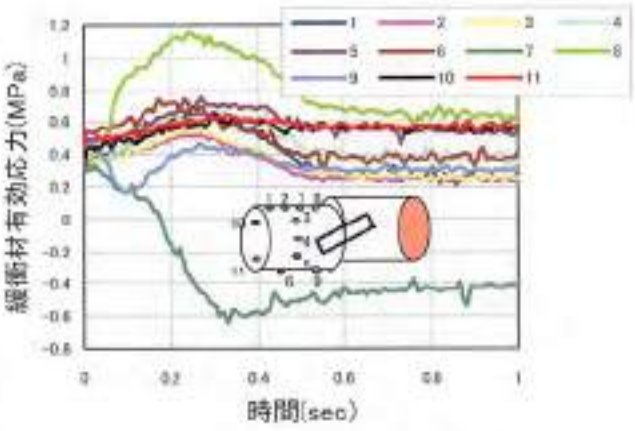


図 4.2-33 断層模擬試験結果

また，この試験のシミュレーション(図 4.2-34)を行ったが，境界条件などのわずかな変化で模擬オーバーパックにかかる応力パターンが大きく変化し(図 4.2-35)，正しい解析条件を確認する必要が生じた。このため，模擬オーバーパックにセンサーを取り付ける改良を実施し，解析の検証ができるようにした(図 4.2-36)。

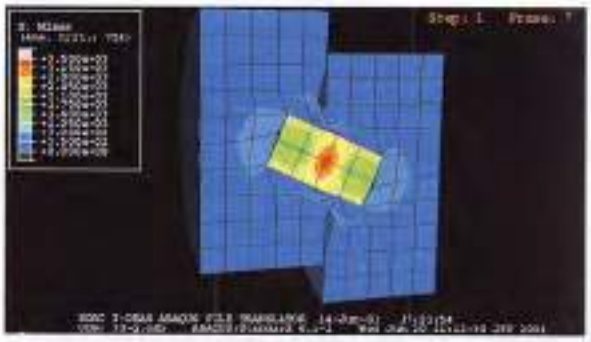


図 4.2-34 断層模擬試験シミュレーション解析

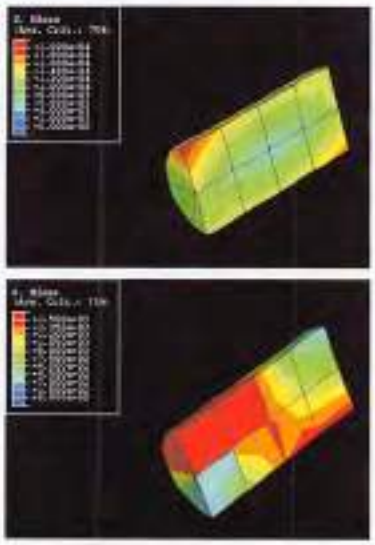


図 4.2-35 模擬オーバーパック応力パターン

図 4.2-36　模擬オーバーパックの改良

③ 今後の計画

断層模擬試験と解析を，今後も随時改良しながら引き続き行い，現在の定性的な評価から，定量的な評価を可能にすることを目指す。

また，定量的な評価を行うに当たって必要となる，頻度，変位量，変位速度といった断層情報の収集と整理・検討も行う予定である。

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，人工バリア材の長期耐久性評価のためのナチュラルアナログ研究として従来から，ベントナイトのイライト化，粘土質土壌中の金属の腐食さらに天然ガラスの溶解・変質についての調査などを行っている。

「第２次取りまとめ」までの主要な成果として，ベントナイトのイライト化については，レファレンスケースのような条件で 100℃以内であればベントナイトの健全性は十分に保持される見通しであることを示した。金属では土壌中に数十年埋設された鉄管の調査により，また，ガラスでは地層中に 100 万年埋没していたガラスの調査により，それぞれの長期健全性についても見通しが得られてきた（「第２次取りまとめ」の他，例えば，亀井，1999；Kamei et al., 2000；湯佐，2000）。

「第２次取りまとめ」以降は，以上の知見に加えて，実際の地質環境条件などにおいても適用できるような人工バリアの長期挙動評価の妥当性を裏付ける天然事例の蓄積を目指している。

② これまでの成果

ⅰ）ガラスの溶解変質に関するナチュラルアナログ研究

圧縮ベントナイト中の廃棄物ガラスの長期変質挙動に関するナチュラルアナログ研究として，これまでに南房総鴨川地域に分布する泥質岩中の火山ガラスの変質状態ならびに変質環境条件の調査を実施してきた（例えば，Kamei et al., 2000；Arai et al., 1989；湯佐ほか，1991）。

その結果，房総半島茂原地域のガス井から採取した地下水の SiO_2(am)濃度は 60～80ppm であり，SiO_2 飽和濃度に対して平衡とみなせる。本条件においては，表面変質層が，泥質岩中の火山ガラスの表面に観察されず，表面付近のわずかな Na の減少を除けば成分の変化も認められないことが明らかになった（Kamei et al., 2000）。

このように，泥質岩中に取り込まれた火山ガラスは堆積後約 100 万年間変質しなかった事例として重要と評価されたが，履歴温度が低いことと，調査に用いた試料が地表露頭試料であることから，試料が現在まで置かれてきた温度および地下水環境（地下深部環境から浅部環境への変化）については更なる検討が必要である。

上記のような地下水環境や温度条件を詳細に調べるため，より条件の明確な試料として，南関東における深度 2,000m 程度のボーリングコア中の凝灰岩層中に含まれる火山ガラス（凝灰岩質）を調査対象試料とすることとした。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である（鈴木・小村，1999）。15 孔のボーリングコアのうち，目視により凝灰岩層が認められた横浜市と市原市において得られたコアを調査対象として火山ガラス変質について調査を実施した。

調査の結果，最高温度約 70℃の条件に埋没していたガラスは，変質鉱物としてモンモリロナイトおよび斜プチロル沸石が認められたが，温度約 50℃以下では変質鉱物が認められなかった。また，いずれの環境も海水類似の比較的塩分濃度の高い地下水環境と考えられた。

ⅱ）金属の腐食に関するナチュラルアナログ研究

本研究では，オーバーパックのベントナイト中での長期腐食挙動に関するナチュラルアナログとして，粘土質土壌環境に長期間埋まっていた考古学的鉄製品の腐食度調査を行う。これにより数百年以上のデータ取得が可能であり，既存の室内試験データ（数年以内），数十年の土壌埋設鉄管のデータを合わせて，より信頼性の高い長期腐食モデルを確立し，設計や安全評価の基本的な根拠とする。

これまで実施されてきた研究として，例えば炭山ほか（1999）は粘土質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 程度と報告した。また，調査データを基に確率統計解析を行い，1,000 年後のオーバーパックの最大腐食深さは 11mm 程度と推定した。また，Johnson and Francis (1980) は種々の環境に置かれていた考古学遺物を調査し，たとえば，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，1,000 年間で 1mm 程度と評価している。これらの結果は上述した室内試験の結果から推定される腐食量を超えるものではなく，評価の妥当性を示している。しかし，妥当性を保証するには，なお多くのデータの蓄積が必要と思われる。

1999 年度に実施した土壌中の考古学的金属製品の腐食に関する調査（本田・山口，2000）では，X 線 CT の利用により，鉄器の鉄質，錆層および表面付

着土層を非破壊で定量分析でき，錆層の厚さを基に腐食量を推定できることが明らかとなった。図4.2-37にX線CT像の一例を示す。CT像の白色部が鉄，灰色部が錆層である。しかし，腐食量は埋蔵環境，年代，鋼種の影響を受ける。したがって，これらの観点からデータの蓄積を図ることが評価の信頼性を高めることに繋がると考えられる。

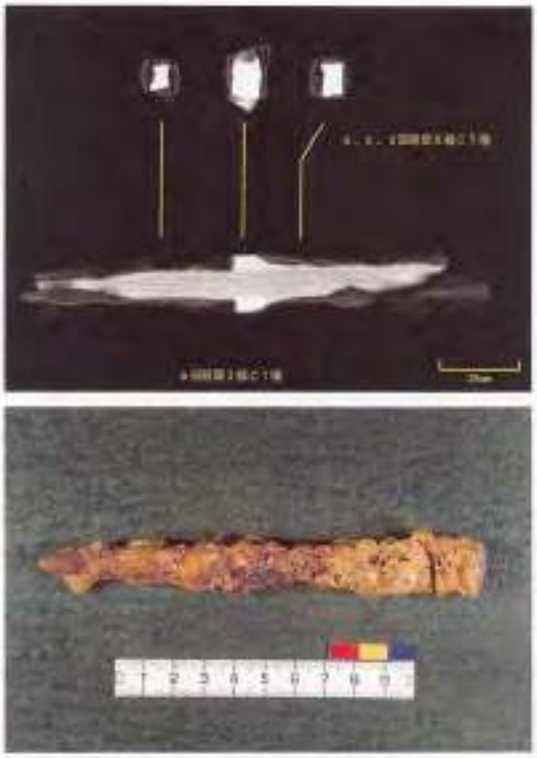


図4.2-37　考古遺物の外観写真とそのX線CT像

これまでの腐食調査より，埋設されている環境を限定すれば腐食深さを重回帰式で表せることが示されている。これらの推定式を一般的な土壌腐食計測に利用するには，これまで調査した以外の埋設環境においても成立することを確認しなければならない。炭山ほか（1999）は淡水性粘土質土壌に数10年以上埋設された鋳鉄管の最大孔食深さH（mm）と埋設期間Y（年）との間には次の関係があるとしている。

一般には，$H=a\ Y^n$で表されるとして，a=0.298，n=0.502を得た。

$$H=0.298Y^{0.502} \qquad (4.2\text{-}4)$$

この関係は腐食速度が腐食に伴って成長する酸化皮膜厚さに反比例することを示している。すなわち，酸素の皮膜内拡散速度が腐食反応の律速になっていると考えられている。

2001年度に北海道千歳市（イヨマイ7遺跡）と島根県大社町（出雲大社境内遺跡）で出土した鉄器を対象にX線CTによる調査を行うとともに，腐食環境因子，腐食評価モデル式について検討を実施した（本田・山口，2002）。イヨマイ7遺跡は，約500年前の遺跡と考えられ，太刀，刀子および鉄ぞく（やじり）が出土した。このうち太刀には鉄が残っており，この期間の腐食量は2~6mmであった。出雲大社境内遺跡からは古代神殿の柱に使用された約700年前の鉄帯や釘などが多数出土したが，このうち7点を調査した。鉄帯と釘の各1点に鉄残存が認められ，腐食量は2mmと推定された。埋蔵環境はいずれも酸化性で，錆の外層はゲーサイトと土壌の混成物であり，完全に錆化した試料は中空構造を呈していた。

図4.2-38は炭山ほか（1999）が作図した最大孔食深さと期間との関係に，1999年度に実施した調査結果（本田・山口，2000）と2001年度調査した2つの遺跡の腐食量をプロットしたものである。両者とも，調査対象鉄器はいずれも赤褐色の錆（ゲーサイト：α-FeOOH）で厚く覆われていたことから，埋蔵雰囲気は酸化性であったと考えられるが，いずれの結果も100年間以下のデータを外挿した値を超えていない。

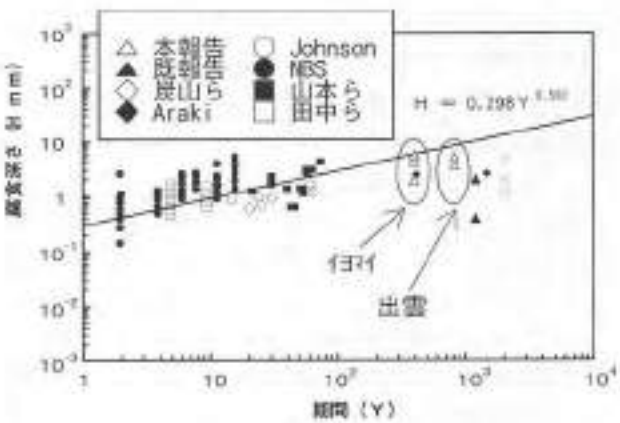


図4.2-38　本研究にて取得した最大腐食深さと既往の文献値

土壌中における腐食は影響因子が多岐にわたることから，モデル式として確立したものはない。また，重回帰式の提案もあるが，適用条件が限定されており，広く使えるものではない。したがって，データの蓄積により，腐食量と時間との関係を表す式の信頼性を高める必要がある。

ii）ベントナイトの変質に関するナチュラルアナログ研究

ベントナイトの変質に関して，現在は堆積岩系の支保に用いるセメント系物質と地下水の反応により発生する高pH溶液に対するベントナイトの長期安定性評価が重要な課題となっている。

天然におけるアルカリ性地下水湧出地点周辺の粘土鉱物の変質に関する調査に着手し，調査対象として，北海道権内地区の地熱地域（90℃以上）を選定したが，pHが9前後の地下水（温泉水）が湧出することから，高pH溶液に対するベントナイトの長期安定性評価の研究としては適切でないものと判断された（二口ほか，2002）。

このほか，イライト化の研究対象として新潟県西頸城地域の貫入岩体周辺を調査し，モンモリロナイトからイライトの割合が75%のイライト／モンモリロナイト混合層鉱物への変化が確認され，熱的条件として270℃から15℃まで冷却するのに約75万年を要したこと，反応の活性化エネルギーとして約103kJ/molの値をもつことが明らかとなった（二口ほか，2001）。

iv）粘土中での核種移行に関するナチュラルアナログ研究

オクロ（ガボン共和国）とシガーレイク（カナダ）を調査対象に，ウラン鉱床をとりまく粘土質岩石中の核種の存在状況を把握し，希土類元素，放射性元素の移行挙動に関する知見，粘土の有する長期的な核種閉じ込め性能および収着メカニズムに関する知見を蓄積する。これらの知見は安全評価においてシステムの有する核種収着性能の保守性や信頼性を支持する根拠として活用する。オクロ（ガボン共和国）に関しては，同地区で発見されていた天然原子炉跡（20億年前）およびその反応部周辺にある核分裂生成物とアクチニド核種は，放射性廃棄物の地層処分において，それらの移動度を評価するうえで非常によい研究対象である。また，シガーレイク（カナダ）は，ウラン鉱床周囲を粘土（イライト）層が覆っている鉱床である。この構造は処分システムに類似しているために地層処分システム性能評価を検証するうえで適切な研究対象である。

オクロの研究では，天然原子炉周辺のウラン鉱床部（粘土，頁岩，砂岩など）についての光学顕微鏡および電子顕微鏡を用いての観察を実施した。また，高分解能SIMS（SHRIMP）によるin situ領域の同位体分析をウランおよび希土類元素について行い，収着および二次鉱物化に関するデータを得た。収着は主に粘土（クロライトやイライト），Ti酸化物周辺で観察された（Bros et al., 2001）。シガーレイクの研究では，カナダAECLにて行われたウラン鉱床に対するボーリング調査時のコアより一部分（ウランの高濃度部分と低濃度部分）のサンプリングを行った。これらのサンプルに対して連続抽出を含む同位体分析をフランスのストラスブーグ大学にて実施した。

③ まとめ

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）を調査対象試料として選定しガラスの変質について調査を実施した。最高温度約70℃の条件に埋没していたガラスは，変質鉱物としてモンモリロナイトおよび斜プチロル沸石が認められたが，温度約50℃以下では変質鉱物が認められなかった。今後，地下水水質や年代等の地質情報を精査し，より詳細に変質の発生する温度，時間条件を明確にするとともに，化学的環境条件の検討も進めていく。

出土した鉄器を対象にX線CTによる埋中に埋没していた鉄器の腐食について調査を実施した。今後は，更なるデータの蓄積を図り，腐食量と時間の関係を表す式のより正確な定量化を図ることが，埋設地下環境中でのオーバーパックの長期腐食量予測の検証に有効であると考えられる。そのためには，腐食環境因子の把握が重要であり，総合的に判断できるよう，できるだけ多項目について分析・評価する必要がある。

天然におけるアルカリ性地下水湧出地点周辺の粘土鉱物の変質に関する調査として調査を実施したが，pHが9前後の地下水が湧出することから，高pH溶液に対するベントナイトの長期安定性評価の研究では適切でないものと判断された。今後は，スイス放射性廃棄物処分協同組合(Nagra)などが進めている国際共同プロジェクトに参画し，pH>12の溶液が湧出するコルダンのサイトを対象に，モンモリロナイトの長期安定性に関する情報やデータを蓄積していく。

オクロ，シガーレイクにおける粘土中の核種移行に関するナチュラルアナログ研究により性能評価を行うにあたり二次鉱物化の重要性が示された。今後，両サイトにおいて二次鉱物の調査を継続するとともに，粘土鉱物中でのウラン系列元素の移

行挙動について知見を得るべく収着データなどの取得を行っていく。これらのデータを用いて核種移行挙動の理解に役立てる。

参考文献

Arai, T., Yusa, Y., Sasaki, N., Tsuruda, N. and Takano, H. (1989) : Natural analogue study of volcanic glass - A Case Study of Basaltic Glasses in Pyroclastic Fall Deposits of Fuji volcano, Japan-, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 127, pp.73-80.

Bros, R., Kamei, G and Ohnuki, T. (2001): Radioelement transport in the Bangombe nuclear reactor zone (Gabon) - Evidence fr om U and Sm isotopes, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. (in press)

二口克人，橋本秀樹，桜本明吉，三ツ井誠一郎，亀井玄人（2001）：ベントナイトのイライト化のナチュラルアナログ　新潟県西頸城半深成岩による接触変成事例，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-007.

二口克人，桜本明吉，鹿木峰也（2002）：アルカリ性環境でのガラスおよびベントナイトの変質に関するナチュラルアナログ研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；株式会社ダイヤコンサルタント），JNC TJ8400 2001-016.

本田　卓，山口伸芳（2000）：土壌中の考古学的金属製品の腐食に関する調査，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；日立エンジニアリング株式会社），JNC TJ8400 2000-007.

本田　卓，山口伸芳（2002）：土壌中の考古学的金属製品の腐食に関する調査(II)，サイクル機構技術資料（研究委託報告書，日立エンジニアリング株式会社），JNC TJ8400 2001-045

Johnson, A. B. and Francis, B. (1980) ; PNL-3198/ UC-70, Battelle.

Kamei, G., Yusa, Y. and Arai, T. (2000) ; A natural analogue of radioactive waste glass in a compacted bentonite, Applied geochemistry, 15, pp.141-155.

亀井玄人(1999)：人工バリア材の耐久性を示す天然類似現象，粘土科学 9，pp.34-39.

栗山幸男，正田明宏，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，小村健太朗(1999)：関東地域の化石データ資料集，　防災科学技術研究所資料集，第191号.

湯佐泰久(2000)：自然から学ぶ高レベル放射性廃棄物処分の知恵-ナチュラルアナログ研究のすすめ-　地学雑誌，109(5)，pp.805-808.

湯佐泰久，新井　隆，亀井玄人，島野　仁（1991）：廃棄物ガラスの長期浸出挙動に関するナチュラルアナログ研究-富士および伊豆大島の火山ガラスの風化変質-，　日本原子力学会誌，33(9)，pp.890-905.

4.3 人工バリア等の工学技術の検証

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」，として概念を示しているにとどまっている。

そこで，「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），グラウト等）（図 4.3-1 参照）のうち，プラグに着目した検証試験を行い，シーリング性能に関するデータを取得する。

また，閉鎖要素に求められる要件を明確にするため，海外における閉鎖要件の事例調査を行い，日本の処分概念に適用する閉鎖要素の要件を例示する。

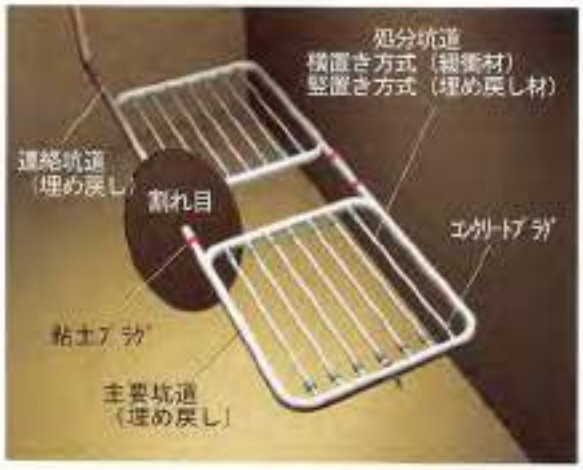


図 4.3-1　閉鎖の概念

一方，地下深部における還元環境条件に影響を与えるものとして，何十年という操業期間において地上から供給される空気の影響がある。空気の侵入により処分場の坑道周辺に発生すると考えられる不飽和領域は，地下水中の酸化還元電位の変化，岩盤の収着性の変化といった安全評価で考慮している地下環境条件とは異なる条件を作りだす。このような掘削影響領域における不飽和の影響を解明することが閉鎖技術においても重要な問題である。このため，空洞周辺の地下水の挙動を実験的に再現し，そのメカニズムの解明に資する。

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」をカナダ　マニトバ州都ウィニペグの北東約 100km に位置する AECL の地下研究施設（URL）で行っている（Chandler et al., 2001）。

トンネルシーリング性能試験は，図 4.3-2 に示すように実規模の試験坑道（長軸長 4.375m，短軸長 3.5m の楕円形状）の両端にコンクリートプラグと粘土プラグを設置し（杉田・井元，2002），両プラグ間の圧力チャンバーから水圧を作用させ，プラグのシール性能に関するデータを取得するものである。

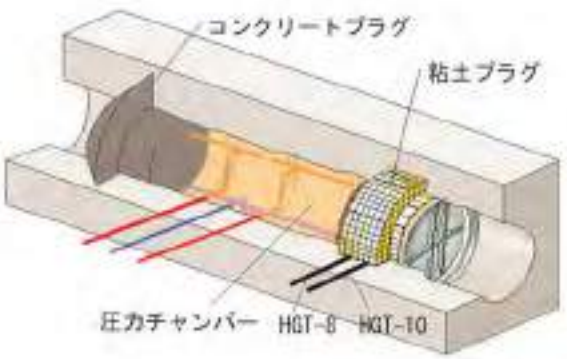


図 4.3-2　トンネルシーリング性能試験

コンクリートプラグは坑道から三角形の深さ 1.75m の切り欠きをもつ形状で，材料は緩衝材や岩盤への化学的影響が小さいと考えられる低アルカリコンクリートを用いている。これは，AECL において開発された LHHPC (Low Heat High Performance Concrete)で，この特長のほか，打設時の発熱量が小さく，流動性に優れている（Gray and Shenton, 1998）。

粘土プラグは坑道から矩形の深さ 1.0m の切り欠きをもつ形状で，国産のクニゲル V1 を主材料とし，ケイ砂を 30%混合した。粘土プラグは，この粘土材料を平均乾燥密度 1933kg/m³，大きさ 0.1m×0.36m ×0.17m となるブロック状に圧縮成型し，このブロックを約 9500 個組み上げて製作した。岩盤とブロックの間には同じ配合の粉砕した材料を吹付けた。吹付け層の密度は 1300kg/m³ である。膨潤後に平均乾燥間密度 1800kg/m³ の粘土プラグとなる設計である。

プラグ内や周囲の岩盤にはシーリング性能に関するデータを取得するためのさまざまな計測機器を埋設した。

これまでに，坑道の掘削，プラグの設計・施工，予備試験，プラグの施工，注水試験（注水圧 800kPa，2000kPa，4000kPa（継続中）），トレーサー試験を実施してきた。

図 4.3-3 は，これまでの圧力チャンバーの圧力の上昇状況およびその変化に伴う両プラグからの湧水量の変化を示している。チャンバー圧力を初めて上昇させた時点では，急激な圧力上昇を負荷したため，粘土ブロックと岩盤との境界部の吹付け層が弱部となり，1999 年 4 月まで断続的にそこから湧水が発生した。その後，圧力上昇を制御し，800kPa を達成した。800kPa での湧水量が安定した時点で，トレーサーを圧力チャンバーから供給した。トレーサーは NaI である。トレーサーの試験結果を図 4.3-4 に示す。トレーサー試験では図 4.3-2 に示すように粘土プラグの側面部に位置するボーリング孔 HGT-8，10 を用いてサンプルを採取した。また，粘土プラグの下流部からもサンプルを採取した。

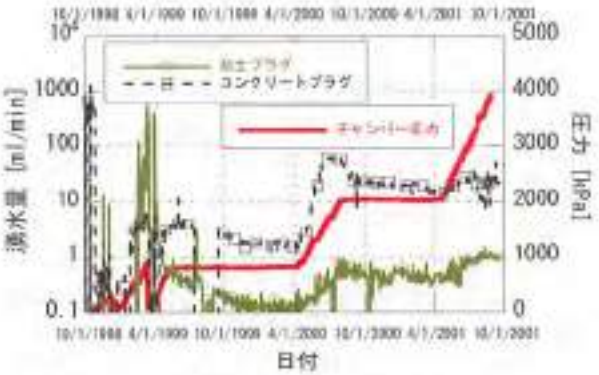


図 4.3-3　湧水量の経時変化

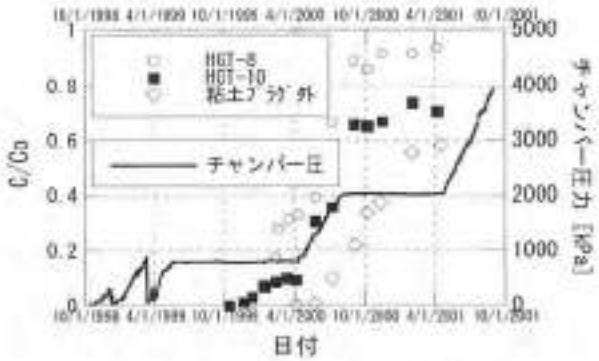


図 4.3-4　トレーサー試験結果

トレーサー試験開始直後は，圧力チャンバーに近い HGT-8 よりも HGT-10 から濃度の上昇が計測されたが，途中からは HGT-8 で計測された濃度が大きくなった。その後は，圧力チャンバーからの距離にしたがってトレーサーの濃度の上昇が時間の経過とともに計測された。これは，粘土プラグの浸潤当初は吹付け層等が浸潤経路となっていたが浸潤が進むに連れて均一な粘土プラグとなり，岩盤とも密着したため，プラグの上流側から順番に浸潤していることを示していると考えられる（図 4.3-5 参照）。

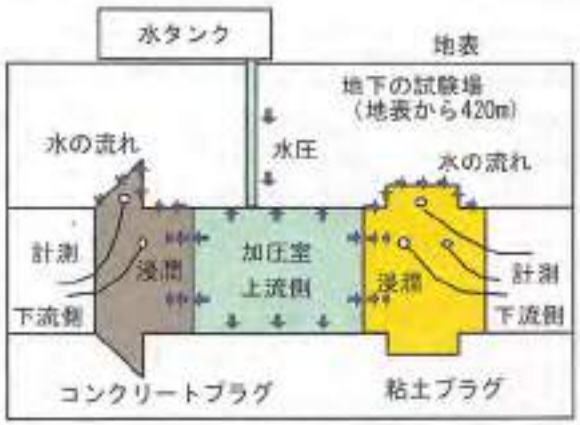


図 4.3-5　浸潤の模式図

ii）閉鎖要件の明確化

日本における閉鎖要件のあり方の詳細検討の取組みを開始した。初めの段階として，海外における閉鎖に求められる要件を明確にするため，海外の閉鎖要件の考え方を調査した。調査対象は，カナダ，アメリカ，スウェーデン，フィンランド，スイス，フランスである。

アメリカは埋め戻しという概念がないが，他の国は膨潤性の材料で埋め戻すとのことであった。また，要素としては埋め戻し材，プラグ，グラウトという考え方が主要であった。要求性能に関しては，岩盤と同等程度という考え方が多いが，安全評価に基づいた具体的な仕様は決められてはいない。

iii）不飽和領域発生現象の解明

坑道周辺の水理場の観点から不飽和領域の発生を再現する試験設備（多孔質媒体不飽和水理試験設備：CLUE）を設計製作し，試験を行った。CLUE は，ガラスビーズを媒体とする試験水槽 A（図 4.3-6 参照）と，岩石を媒体とする試験水槽 B がある。試験水槽 A は内寸で高さ 1200mm×幅 1000mm×奥行

200mmのステンレス製で，試験中に不飽和領域の形成が目視観察できるように前面のみが 200mm 厚のアクリル製板となっている（菊池ほか，2002）。

体積含水率を計測する FDR (Frequency Domain Reflectometry)法プローブと間隙水圧を計測する間隙水圧計を水槽に設置した。水槽の中心部に位置する模擬坑道からの排水（バルブの開放）により水槽内の水圧および体積含水率の変化を計測し，両者の関係から坑道周辺に不飽和状態を再現出来ることが確認できた。図 4.3-7 に体積含水率の変化を示す。模擬坑道周辺に設定したゆるみ域の上部側に位置する S12 では時間の経過に伴い体積含水率が低下するが，ゆるみ域直上の岩盤部となる S05 やゆるみ域内部でも坑道の側面部に当たる S16 では体積含水率は変化していない。これは，ゆるみ域の上部側に不飽和領域が発生したことを示している。また，不飽和浸透流解析の結果は，計測値とよく一致した。

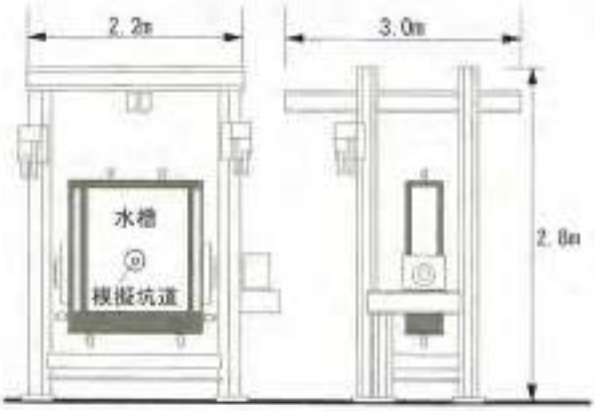


図 4.3-6 CLUE の試験水槽 A

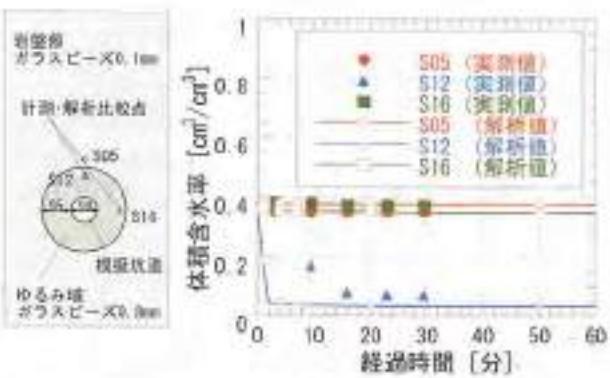


図 4.3-7 体積含水率の解析と計測の比較

③ まとめ

現在のところ明確になっていない閉鎖要素の要件を提示するため，閉鎖要件の検討および原位置における実規模の検証試験を並行して実施している。検証試験では，実規模でのプラグの設計，製作が可能であることが確認でき，現在シーリング性能に関するデータを取得している。一方，閉鎖要素の要件に関しては，海外における閉鎖の考え方に関する情報を収集し，分析評価を行った。

処分場の坑道周辺に発生すると考えられる不飽和領域に関しては，モデル試験により不飽和の発生を再現することができ，その結果を不飽和浸透流解析で表現することができた。

今後は，閉鎖要件を例示するとともに，要件を満足する検証データの蓄積を継続して実施していく。

参考文献

Chandler, N., Cournut, A., Dixon, D., Fairhurst, C., Hansen, F., Gray, M., Hara, K., Ishijima, Y., Kozak, E., Martino, J., Masumoto, K., McCrank, G., Sugita, Y., Thompson, P., Tillerson, J. and Vignal, B. (2001): "The five years report of the Tunnel Sealing Experiment: an international project of AECL, JNC, ANDRA and WIPP", Atomic Energy of Canada Limited Report AECL-12727.

Gray, M. and Shenton, B. (1998): "For better concrete, take out some of the cement", 6th ACI/CANMET Symposium on the durability of concrete, Bangkok, Thailand.

菊池広人，杉田 裕，鈴木英明，千々松正和，小松 満，西垣誠 (2002)：多孔質媒体不飽和水理試験設備(CLUE)試験結果および解析評価，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2002-004.

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.

2) 人工材料の開発

① 課題と計画の概要

サイクル機構では，セメント系材料に起因する高pH溶液の影響を考慮し，坑道の支保工材料のオプションとして低アルカリ性コンクリートに関する研究を実施している。普通コンクリート浸出液のpHは12.5～13程度であり，pH11を超える環境ではベントナイトの変質が室内試験により認められており，またpH11以下では顕著な変質は避け得るとの見解が得られている。ベントナイトの高pHによる変質についてはなお長期の評価が必要であるが，低アルカリ性コンクリートの開発ではpH11以下を目標とした。この目標を達成するため普通ポルトランドセメント（OPC）にシリカヒューム（SF）と多量のフライアッシュ（FA）を混合させた低アルカリ性コンクリートHFSC（Highly Fly-ash contained Silicafume Concrete）を開発している。このコンクリートは，高アルカリ性の主要因であるOPCの水和反応で生成する水酸化カルシウムをシリカヒュームとのポゾラン反応で消費することにより低アルカリ性を確保しようとするものである。現在OPC40%，SF20%，FA40%の配合と，より早くpHを低下させるための配合OPC20%，SF20%，FA60%を開発対象としており，これらの配合によりpH11以下となる見通しが得られている。HFSCの品質特性についてはある程度把握されているが，土木構造物としての施工実績はなく，その施工性についてはまだ十分に確認されていない。これまでの施工実績としては，50cm程度の供試体作製にとどまっており，この時の配合では材齢28日の圧縮強度が約70N/mm²と構造物としては十分な強度を有しているものの，混練り後の凝結に24時間以上を要している（入矢ほか，1998）。また，pHの低下速度に関する情報も十分ではない。

このような状況において，サイクル機構では人工材料の開発として，低アルカリ性コンクリートの施工性開発に取り組むこととした。現時点までの知見により，開発対象とする要求品質として以下の5項目を取り上げた。

- 強度発現：28日強度と共に，吹付け施工等で要求される初期強度を確保する。
- 流動性保持：コンクリート混練り後，施工終了までの間，施工に必要な流動性を保持する。
- 鉄筋腐食評価：コンクリート構造物としてアルカリ性の低いことは鉄筋腐食にとって好ましい環境ではないため，構造物の耐久性の観点から評価が必要である。
- pH低下速度：施工上の要件ではないが，低アルカリ性コンクリートの基本的特性として把握しておく必要がある。
- 透水性：これも施工上の要件ではないが，処分場の支保工材料としてその透水性を把握しておく必要がある（特に吹付けコンクリートについて）。

また，低アルカリ性コンクリートでは工業副産物であるフライアッシュを多量に含有することから，品質特性のばらつきが問題となる可能性がある。よって，フライアッシュの品質に起因するコンクリート品質特性のばらつきの把握が必要である。

また，コンクリートに要求される圧縮強度や流動性保持などの要求品質はその使用形態によって異なる。ここでは処分場における主な使用形態として，吹付けコンクリート，場所打ちコンクリート，セグメント，グラウトを想定した開発を行う。この要求品質によってセメントの配合（OPC，SF，FAの混合割合）や混和剤の品質の調整・選定が必要となる。

さらに，施工性確保のためには，工事規模での材料供給が必要であり，このための検討も必要となる。以上の低アルカリ性コンクリートの施工性開発を模式的に図4.3-8に示す。

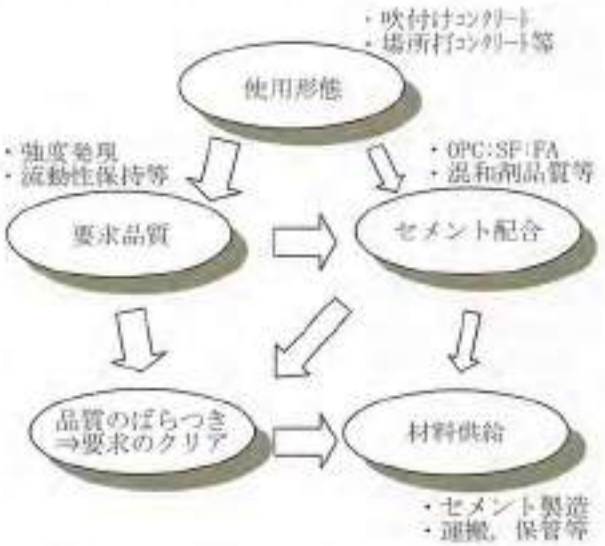


図4.3-8　低アルカリ性コンクリート施工性開発概念

また，施工性開発の展開としては，室内試験による品質特性の把握⇒屋外試験による施工性や品

質特性の把握⇒幌延の深地層の研究施設での適用による施工性の確認を実施する計画としている。

具体的に吹付け施工性開発では，試験練りによる流動性保持時間やベースコンクリートの強度把握を行うとともに，地上の模擬トンネルや必要に応じて実岩盤での吹付け実験を行い，吹付け施工性や強度発現，透水性の把握を行う。セグメントへの適用性では，高流動コンクリート配合で実規模セグメントの試作を行い，製作性の把握や強度特性の把握を行う。また，グラウトについては室内配合試験を行い，そのpH低下状況からグラウト材としての配合選定を行い，注入実験を行うこととする。

鉄筋腐食評価については，室内における乾湿繰り返しによる加速試験と屋外海水環境における暴露試験を実施する。また，強度発現や流動性保持など HFSC の品質特性のばらつき把握については，ばらつき要因として FA の品質変動に着目し，FA の定期的サンプリングによる特性把握試験を実施する。施工性開発の最終段階である幌延の深地層の研究施設における適用では，立坑と水平坑道の一部に支保工材料として適用するとともに，プラグやグラウトなど閉鎖技術に関する原位置試験に適用する計画である。また，この幌延での適用に向けて FA の調達，セメントの混合，運搬・保管方法など材料供給の実現可能性を確保する。

② これまでの成果

吹付け施工性開発では，ベースコンクリートの特性把握を行うと共に，地上の模擬トンネルでの吹きつけ実験を行った。図 4.3-9 に強度発現結果を示す。また，表 4.3-1 は目標強度の目安となる道路と鉄道トンネルにおける基準である。この結果から，OPC:SF:FA=4:2:4 のセメント配合では必要な強度は得られるが，2:2:6 の配合ではやや強度不足となり，2:2:6 配合については水セメント比の変更等品質改善が必要であることがわかった。

硬化前の流動性保持では一般の工事でのスランプの許容範囲は 2.5cm であり，また 2 時間以内の打設が標準であることから，目標として 2 時間で 2.5cm 以内のスランプロスがあげられる。これに対して吹付け実験での試験練りでは混練後 18cm であったスランプは 30 分後に 12cm，60 分後には 6.5cm と大きく低下しており，流動性保持に大きく影響する高性能減水剤の品質調整が今後必要であることがわかった。

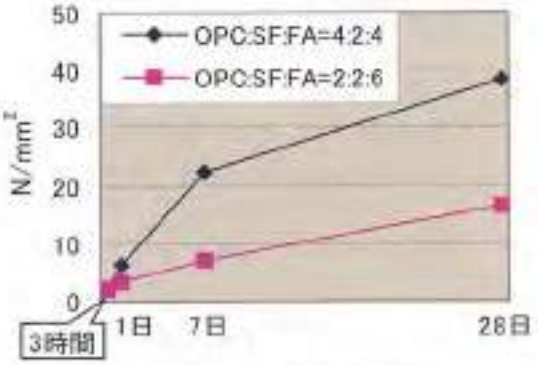


図 4.3-9　HFSC 強度発現結果

表 4.3-1　吹付けｺﾝｸﾘｰﾄ圧縮強度基準(N/mm²)

対象	種類	3時間	1日	28日
鉄道トンネル（鉄建公団）	標準	—	8	18
	高品質	1.5	8	18
道路トンネル（道路公団）	標準	—	5	18
	高強度	2	10	36

鉄筋腐食評価については，現在室内試験と暴露試験を開始した段階であり，今後の実験結果を待って評価を行う予定である。図 4.3-10 に暴露状況を示す。

図 4.3-10　鉄筋腐食暴露試験状況（飛沫帯設置状況）

pH の低下状況については，図 4.3-11 に実験結果を示す。試験条件としては，W/C40%のセメントペーストを使用し，混練後 3 日間 20℃で養生し，1 日真空乾燥した後，微粉砕し固液比 2g/ml のイオン交換水に浸漬させた。また，pH の測定は 20℃で行っている。その結果から，セメント配合と共に温度条件が大きく影響することがわかる。ただし，実験期間の制約から，pH が 11 以下になるまでの期間の把握はできていない。

透水性について，通常の場所打ちコンクリートやセグメントの場合，HFSC は自己充填性の高い高流動コンクリートであり，SF の混入による緻密化と相まって低い透水性は確保できると考えられる。吹付けコンクリートの透水性については今後の調査検討が必要である。表 4.3-2 に吹付け後のコア採取による透水試験結果を示す。HFSC は OPC に比べて 3 桁大きな値となっており，現在データ確認を行うと共に原因の調査を行っている。

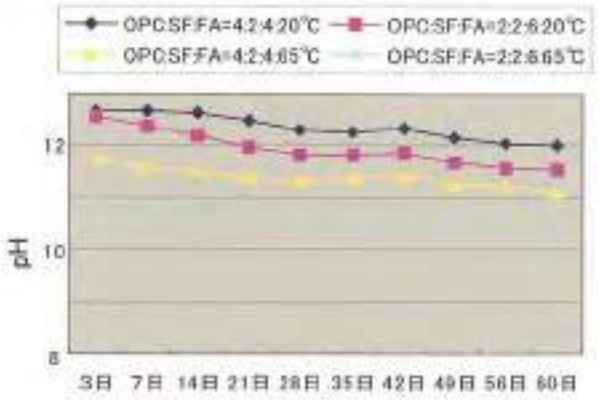


図 4.3-11 HFSC の pH 低下状況

表 4.3-2 透水試験結果

セメント	水圧	n	透水係数(m/s)
HFSC (2:2:6)	0.49MPa	1	2.5×10^{-7}
		2	1.8×10^{-7}
		3	5.8×10^{-8}
		平均	1.4×10^{-7}
OPC	0.98MPa	1	2.4×10^{-10}
		2	2.4×10^{-10}
		3	3.2×10^{-10}
		平均	2.7×10^{-10}

セグメントへの適用性では実規模セグメントの試作を行った。図 4.3-12 に試作セグメントを示す。製作性自体には大きな問題はなかった。

図 4.3-12 試作セグメント

セメント配合は OPC:SF:FA=2:2:6 の高流動タイプとし，目標強度はセグメントの標準的な設計強度 42N/mm² としたが，結果は約 20 N/mm² と半分程度にとどまった。ただし，高流動タイプの強度について別途の実験では OPC:SF:FA=4:2:4 の配合で約 70 N/mm² と十分な値が得られている。

グラウトへの適用性では材料粒径の小さいことが要求されることから，OPC や FA は適当ではないと判断した。ここでは可能性のある候補材料として微粒子 OPC，高品位 SF，中品位 SF，石灰石微粉末，高炉スラグ微粉末を取り上げ表 4.3-3 に示す配合で pH の低下状況を調べた。実験方法は先の HFSC における調査と同様である。この結果を図 4.3-13 に示す。高炉スラグ以外のケースでは pH の低下において問題はなく，いずれも低アルカリのセメント系グラウト材として適用可能性を持つものと言える。今後は流動性，硬化後の特性，経済性などを考慮して材料選定を行い，注入への適用性確認を行っていく予定である。

表 4.3-3 グラウト候補材料の配合(wt%)

	微 OPC	高 SF	中 SF	石灰石	高炉 ｽﾗｸﾞ
1	50	50	—	—	—
2	50	—	50	—	—
3	20	—	20	60	—
4	20	—	20	—	60
5	30	—	30	40	—

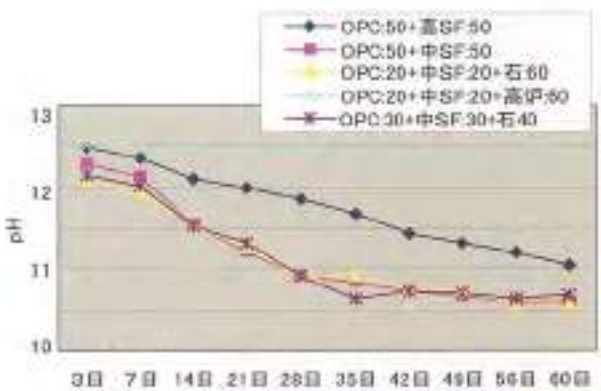


図 4.3-13 グラウト候補材の pH 低下状況

③ まとめ

コンクリートにとって最も基本的な要求品質である圧縮強度について HFSC は OPC:SF:FA=4:2:4 の配合では必要な値が得られるものの，2:2:6 の配合では改良が必要である。この他，流動性保持については改良が必要であり，鉄筋腐食についてはより詳細な評価が必要である。また，低アルカリ性の目標である pH が 11 以下になるまでの期間も把握されていない。

このように HFSC の施工性はデータが蓄積されつつあるものの，全体として確認されたとは言いがたい状況である。一方，現在に計画されている地下研究施設は平成 17 年度に地下施設着工の予定であり，それまでには基本的な施工性や施工における適用範囲を把握し，安全施工が確保できるレベルに達していなければならない。このため，今後数年間で集中的な実験や技術開発を実施してゆく予定である。

参考文献

入矢桂史郎，久保　博，深谷泰文，芳賀和子(1998)．人工バリアの変質に関する研究（II），動燃事業団技術資料（研究委託報告書：株式会社大林組，株式会社オーテック），PNC TJ1201 98-003

【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

熱力学データベースは評価対象元素の溶解度，間隙水および地下水中での溶存化学種の推定に必要な基本情報であり，溶解度や収着/拡散といった核種移行評価上のパラメータの設定に用いられる。「第２次取りまとめ」に向けて，重要元素の熱力学データベース(JNC-TDB)(Yui et al., 1999)を開発してきたが，その熱力学データの信頼性は必ずしも十分であるとは言えず，信頼性を向上させることが重要な課題となっている。信頼性向上のポイントとしては以下の点が挙げられる。

- 熱力学データ（溶解度積および錯生成定数等）取得のための溶解度データが十分ではないものがあること，特に，複雑な錯体種の熱力学データ取得の研究例が少なく信頼性の確認が難しいこと
- 溶存化学種および溶解度制限固相の化学形が明らかになっていないものが多いこと
- 25℃における平衡定数値しか与えられておらず温度依存性が評価できないこと
- 高イオン強度に対する活量係数補正法の妥当性評価が十分に行われていないこと

したがって，信頼性向上のためにクオリティなどを利用した実験的研究を通して，溶存化学種の同定（スペシエーション）および溶解度制限固相の同定，溶解度に与える温度の影響，地層処分環境における酸化還元反応の解明などを実施していくとともに，OECD/NEA 等の国際機関におけるデータベース整備状況を踏まえて，適宜データベースの充実及び見直しを行っていく予定である。

一方，整備した熱力学データベースを有効に活用していくために，データの追跡性を保証するとともに，多くの地球化学計算コードで利用可能な形態にデータを変換し，情報を提供するような利用環境の整備を行っていく。

② これまでの成果

「第２次取りまとめ」以降，還元環境におけるウラン，ネプツニウムおよびプルトニウムの溶解度を測定し，溶解度積もしくは錯体種の安定度定数の決定やスペシエーションのための予備試験を行ってきている。また，還元条件下におけるウランおよびプルトニウムの溶解度測定および熱力学データ決定に関わる基礎的な研究を実施してきている。以下に，その成果をまとめる。

ⅰ）炭酸共存下における Np(IV)の溶解度測定

「第２次取りまとめ」のレファレンスケースにおいては，ネプツニウムは４価のヒドロキソ炭酸錯体($Np(CO_3)_2(OH)_2^{2-}$)で支配的に存在していることが予想され，その熱力学データ(Rai et al., 1999)から溶解度評価を行っている。しかし，この錯体種の熱力学データの報告例は少ないため，熱力学データの信頼性の確認を行う必要があると考え，炭酸共存下における Np(IV)の溶解度測定を実施し，熱力学データの決定を行うこととした。

実験は過飽和法で実施した。Np-237 の５価の溶液から出発し，初期ネプツニウム濃度を 10^{-5}～10^{-3} M (M ≡ mol/dm³)に調整して溶解度測定を行った。還元剤として $Na_2S_2O_4$ を添加し，イオン強度(I)は $NaClO_4$ を用いて，pH_c (= -log [H⁺])は $HClO_4$ もしくは NaOH を用いて，全炭酸濃度(C_t)は $NaHCO_3$ を用いてそれぞれ調整した。一定期間振とう後に水溶液の pH_c，C_t および溶存ネプツニウム濃度を測定した。溶存 Np(IV)濃度は，水溶液を分画分子量 5×10^3 もしくは 1×10^5 の限外ろ過フィルターに通したのち，テノイルトリフルオロアセトン(TTA)による溶媒抽出法(Choppin and Freiling, 1964)により有機相に抽出されたものと定義した。ネプツニウム濃度の定量は，Np-237 の α 線を半導体検出器で測定することにより行った。放射能測定以外の操作は，すべてアルゴン雰囲気のグローブボックス中（酸素濃度 1 ppm 未満）で実施した。

結果の一例を図 5.1-1 に示す。図より，固液の平衡反応は 2 週間でほぼ到達することがわかる。ここで，溶解度制限固相を $Np(OH)_4(am)$ と仮定すると，$Np(CO_3)_2(OH)_2^{2-}$ および $Np(CO_3)_2(OH)_3^-$ の２種のヒドロキソ炭酸錯体が支配的に存在することが予想される(Kitamura and Kohara, 2001a)。このときの反応式は，以下のとおりである。

$$Np(OH)_4(am) + 2HCO_3^- = Np(CO_3)_2(OH)_2^{2-} + 2H_2O \quad (5.1\text{-}1)$$

$$Np(OH)_4(am) + 2CO_3^{2-} = Np(CO_3)_2(OH)_4^{4-} \quad (5.1\text{-}2)$$

表 5.1-1　Np(IV)ヒドロキソ炭酸錯体の見かけの平衡定数(K')およびイオン強度 0 における平衡定数(K^0)

化学種	log K'			log K^0
	I = 0.5 M	I = 1.0 M	I = 2.0 M	
$Np(CO_3)_3(OH)_2^{3-}$	−3.30±0.19	−3.31±0.13	−2.46±0.18	−4.10±0.20
$Np(CO_3)_2(OH)_4^{4-}$	−5.41±0.53	−5.43±0.37	−4.63±0.36	−7.09±0.49

これらの反応式の平衡定数をパラメータとして，実験値に対する適合を行うことにより，各イオン強度の見かけの平衡定数が得られる。さらに，見かけの平衡定数のイオン強度依存性を外挿することにより，イオン強度 0 M における熱力学的な平衡定数を求めることができる。このようにして得られた平衡定数(Kitamura and Kohara, 2001b)を表 5.1-1 に示す。得られた $Np(CO_3)_2(OH)_2^{2-}$ の log K^0 は，JNC-TDB で用いている値(−4.44)(Rai et al., 1999)とほぼ一致し，この錯体種の存在および熱力学データの信頼性を確認することができた。

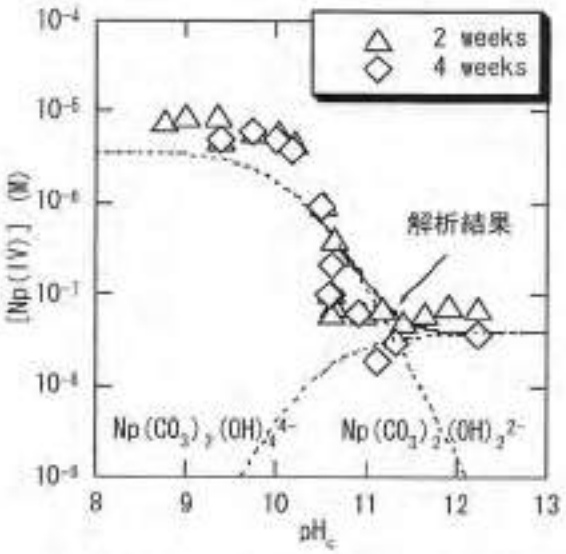


図 5.1-1　Np(IV)溶解度の pH_c 依存性およびその解析結果(I = 0.5 M, C_t = 0.1 M)

ii) レーザー誘起光音響分光法によるネオジムおよびサマリウムの測定

前項の Np(IV)溶解度測定におけるヒドロキソ炭酸錯体の熱力学データの信頼性をより高いものにするためには，溶存化学種のスペシエーションを行うことが重要となる。近年のアクチニドイオンのスペシエーションにおいては，EXAFS に代表される構造解析と吸光および発光等の分光測定の二つの方法が多く行われているが，測定感度の点において分光法が有利であることが知られている。一般に，吸光測定よりは発光測定のほうが高感度であることが多いが，Np(IV)は発光現象を伴わないため必然的に吸光測定を行うこととなる。この際，一般的な吸光測定に比べ，レーザー光を試料に照射して発生する熱を音波に変換して測定する，いわゆるレーザー誘起光音響分光法がより高感度であることが知られている。本研究では，Np(IV)ヒドロキソ炭酸錯体の分光測定の予備的な検討を目的として，ネオジムおよびサマリウムを用いた光音響測定を行っている（北村・岡崎，2001）。

実験では，2×10^{-5} ～2×10^{-2} M に設定した Nd^{3+} 水溶液（溶媒は 0.1 M 硝酸）について光音響信号を測定し，照射するレーザーの波長を変化させることで光音響スペクトルを得た。Nd^{3+} は紫外から近赤外にかけて多くの吸収極大をもつが，本研究では特に 521，576，740，794 nm 付近の吸収極大に着目して測定を行った。用いたレーザーは，Nd:YAG レーザーに光パラメトリック発振器(OPO)を接続したものである。

得られた光音響スペクトルの一例を図 5.1-2 に示す。

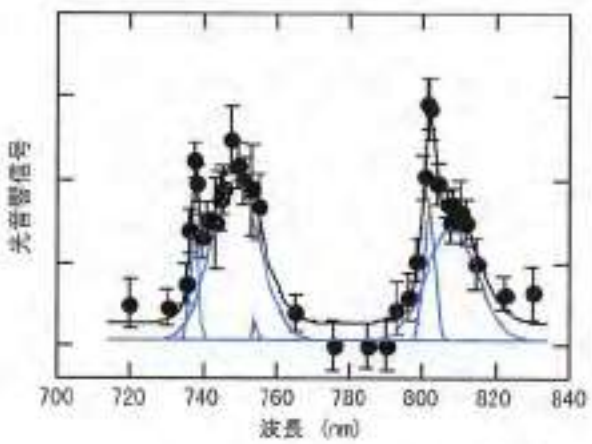


図 5.1-2　740nm および 794nm 付近における Nd^{3+} の光音響スペクトル
($[Nd^{3+}] = 2\times10^{-4}$ M)

521～794 nm のいずれの吸収極大においても，一般的に行われる吸収スペクトル測定（光路長 1 cm）に比べ，約 1/10 の低濃度においてスペクトルが測定可能であることがわかった。Np(IV)は 723 nm に吸収極大をもつので，そのモル吸光係数と Nd^{3+} の 740 nm 付近におけるモル吸光係数を比較すると，約 10^{-4} M の Np(IV)の光音響スペクトルが可能であることが予想される。このことは，図 5.1-1 に示した pH 8～10 において支配的に存在すると思われる，$Np(CO_3)_2(OH)_2^{2-}$ のスペシエーションの可能性を示唆している。現在，さらなる検出感度向上に向け，装置の調整を継続中である。

iii) 還元条件下におけるウランおよびプルトニウムの溶解度研究

プルトニウムについては，PuO_2(am)の溶解度積および $Pu(OH)_4$(aq)の加水分解定数の決定（森山，2000，森山，2001）を行った。また，ウランについては，UO_2(am)の溶解度積および UOH^{3+}，$U(OH)_5^-$ の加水分解定数の決定（森山，2002）を行った。得られた溶解度積は，いずれも「第２次取りまとめ」で用いている値よりも 1～2 桁程度低いものとなっている。また，アクチニドイオンの加水分解定数および錯生成定数について，それらの系統性をモデルで解析することにより，未知の溶存化学種の熱力学データの推定を試みている（Moriyama et al., 1999，森山，2001）。

iv) 熱力学データベース利用環境の整備

従来，JNC-TDB は地球化学計算コード PHREEQE(Parkhurst et al., 1980)での読み込みが可能なフォーマットで整備されてきた。しかしながら，一般的に利用されている地球化学計算コードには，PHREEQC (Parkhurst, 1995)，EQ3/6 (Thomas, 1992)，The Geochemist's Workbench (GWB) (Craig, 1996)等があり，これらのコードは，速度論モデル，表面錯体反応，安定相図の作成等 PHREEQE には無い機能を有し，それぞれの特徴的な機能を持っている。したがって，作業の目的に応じて計算コードを使い分けることが有効であるが，同じ熱力学データベースを用いた議論を行うためには，同一の熱力学データベースがそれぞれの計算コードで読み込み可能なフォーマットで準備されている必要がある。そこで，PHREEQE から PHREEQC および GWB にデータベースフォーマット変換するためのプログラムを作成するとともに，現在までに整備してきた熱力学データベースを，これらの地球化学計算コードでも読み込み可能なフォーマットに変換し整備する多コード間データベース共有システムの構築を行った（吉田・柴田，2001）。変換プログラムおよび変換後の各データベースについては，現在，公開・提供のための準備を行っている。

③ まとめ

- 還元条件下におけるアクチニド元素（ウラン，ネプツニウム，プルトニウム）の溶解度測定を行い，溶解度積や錯生成定数等の熱力学データを取得してきた。得られた熱力学データは，JNC-TDB の値とよい一致を示したものがあった一方で，溶解度積などは JNC-TDB より低い値が報告された。今後，データの拡充を継続するとともに，固相の同定やスペシエーションとあわせた評価を実施する。
- スペシエーション実施の予備的検討としてネオジム等のレーザー誘起光音響測定を実施した。今後，Np(IV)ヒドロキソ炭酸錯体の測定に向けて準備を継続する。
- 熱力学データベースをいくつかの地球化学計算コードで利用可能なように，変換プログラムと，各コードで読み込み可能なデータベースファイルを準備した。今後，活量補正に関するパラメータの整備および最新データの調査，評価に基づくデータベースの更新を実施する。

参考文献

Craig, M.B.(1996): The Geochemist's Workbench Release 3.0. Hydrogeology Program, University of Illinois.

Foti, S.C. and Fried, S.C. (1964): The Determination of the Oxidation States of Trace Uranium, Neptunium and Plutonium in Aqueous Media, Talanta, 11, pp.385-392.

Kitamura, A. and Kohara, Y.(2001a): Solubility of Np(IV) under Carbonate Conditions, JNC Technical Report, JNC TN8400 2001-006.

Kitamura, A. and Kohara, Y.(2001b): Solubility of Np(IV) in Carbonate Media, J. Nucl. Sci. Technol. (in press)

北村 暁，岡崎友宏(2001)：分光光度計および光音響分光装置を用いたネオジム(III)およびサマリウム(III)の測定：Np(IV)スペシエーションのための予備的検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-009.

森山裕丈(2000)：超ウラン元素の溶解度に関する研究

II，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；京都大学），JNC TJ8400 2000-050.

森山裕丈(2001)：超ウラン元素の溶解度に関する研究 III．サイクル機構技術資料（研究委託報告書，京都大学），JNC TJ8400 2001-015.

森山裕丈(2002)．超ウラン元素の加水分解及び錯生成に関する研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書，京都大学），JNC TJ8400 2001-049.

Moriyama, H., Kitamura, A., Fujiwara, K. and Yamana, H (1999): Analysis of Mononuclear Hydrolysis Constants of Actinide Ions by Hard Sphere Model, Radiochim. Acta, 87, pp 97-104

Parkhurst, D.L., Thorstenson, D.C. and Plummer, L.N. (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.

Rai, D., Hess, N.J., Felmy, A.R., Moore, D.A. and Yui, M. (1998) A Thermodynamic Model for the Solubility of $NpO_2(am)$ in the Aqueous K^+-$HClO_4$-Cl^--CO_3^{2-}-OH^--H_2O System, Radiochim Acta. 81, pp.159-169.

Thomas, J.W. (1992): EQ3/6, A Software Package for Geochemical Modeling of Aqueous Systems. Lawrence Livermore National Laboratory.

吉田 誠，笠田竜雄（2001）：熱力学データベース利用環境の整備，日本原子力学会2001年秋の大会要旨集，p.838.

Yui, M., Azuma, J. and Shibata, M. (1999) : JNC Thermodynamic Database for Performance Assessment of High-level Radioactive Waste Disposal System, JNC Technical Report, JNC TN8400 99 070.

5.1.2 収着・拡散データベースの整備

① 課題と計画の概要

「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，拡散パラメータは，いずれもバッチ収着試験や拡散試験から得られる実験値に基づいた設定を行った。この目的のために，ベントナイト，岩石およびそれらの構成鉱物などに対するバッチ収着データ，国内の岩石中の拡散データについて，網羅的なデータ調査を行い，データベースとして整備した（油谷ほか，1999；Sato，1999a）。ベントナイト中の拡散データについては，緩衝材への拡散係数および分配係数の設定の過程で，関連データの整理を行ったものの，データベース化には到っていないのが現状である。収着，拡散の既存データを整理，評価することは，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妥当性評価のために必須の作業であることから，これらのデータベースの更新，整備を継続していく。一方，データベース整備の結果として，性能評価の観点からデータが不足している，あるいは信頼性の向上が求められるデータの試験条件を把握することができた。したがって，データベース整備の一環として，グローブボックス等の施設を利用し，海水系条件でのデータ等の拡充を行っていく。さらに，データベース整備や，データ取得を通じて得られた，各種の実験方法の特徴や，実験上留意するべき点等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。

② これまでの成果

データ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着実に進めてきており，以下に，その成果をまとめる。「現象論的核種移行モデルの開発」（5.2.3 項参照）においても着実な基本データの取得を進めている。なお，「第２次取りまとめ」以降，収着・拡散データの継続的な調査を行っているが，系統的なデータベースの更新作業については今後実施していく計画である。

i）圧縮ベントナイト中の鉛の拡散挙動に関する研究

鉛（Pb）は安全評価上重要な核種であるが，実測データの信頼性が乏しく，「第２次取りまとめ」ではNiを化学的類似元素として，見かけの拡散係数（Da）から分配係数（Kd）を設定した。そのため，ベントナイト中でのPbの拡散挙動，特にDaに及ぼすベントナイトの乾燥密度，ケイ砂混合率，温度の影響について，重要元素に対するデータ整備，「第２次取りまとめ」において設定したKdの妥当性の確認，およびベントナイト中の拡散挙動に関する現象解明を目的として実験を行った（Sato and Miyamoto，2001）。

実験は，ベントナイト（クニゲルV1）（クニミネ工業製）を用い，乾燥密度0.8，1.4，1.6，1.8Mg/m^3，温度 22.5℃（室温）および 60℃に対して In-diffusion 法により行った。また，乾燥密度 1.6 Mg/m^{3}に対しては，30および50wt%のケイ砂を混合させた系についても行った。ベントナイトには，もともと有意な量の Pb が含まれていることから，測定においては放射性の^{210}Pbをトレーサーとして使用した。全ての実験はN_2雰囲気のグローブボックス中（酸素濃度<1ppm）で行った。

実験の結果，^{210}Pb の拡散は非常に遅く，拡散期間内（～210 日）に拡散した距離は最大でも数 mm 程度であった。得られたDaは，室温に対しては10^{-11}～10^{-15}m^2/s オーダーであり，ベントナイト乾燥密度の増加に伴って減少し，ケイ砂混合率の増加および温度の上昇に伴って増加する傾向を示した（図 5.1-3）。また，Daはベントナイト中のスメクタイト成分のみの密度によって定義された，スメクタイト部分密度とよく相関した（図 5.1-4）。このことは，Pb の拡散がスメクタイト部分の特性に支配されることを示している。さらに，Daから求めたKdと「第２次取りまとめ」におけるレファレンスケースのKdの値とを比較し，設定値の保守性が確認された。

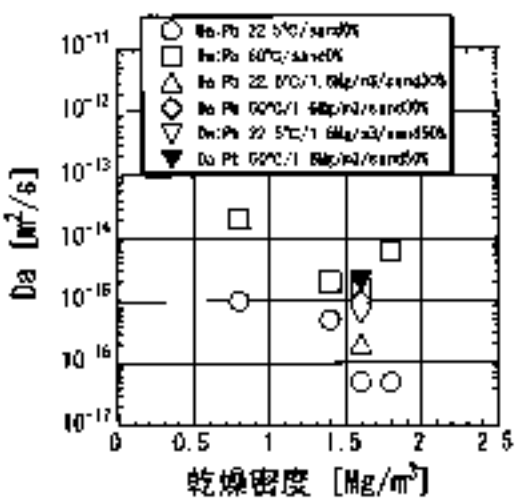


図5.1-3　PbのDaに関する試料の乾燥密度依存性

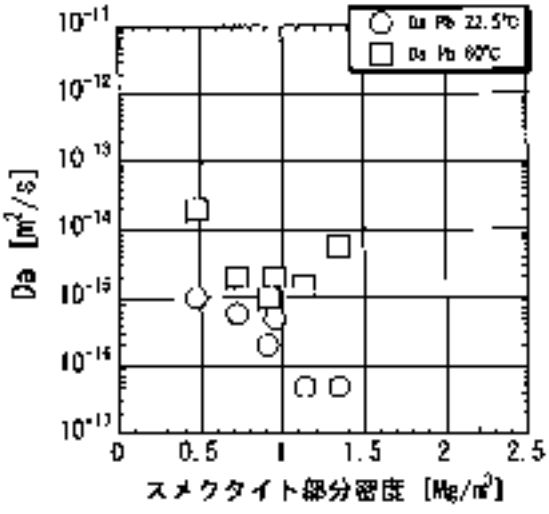


図5.1-4 PbのDaに関するスメクタイト部分密度依存性

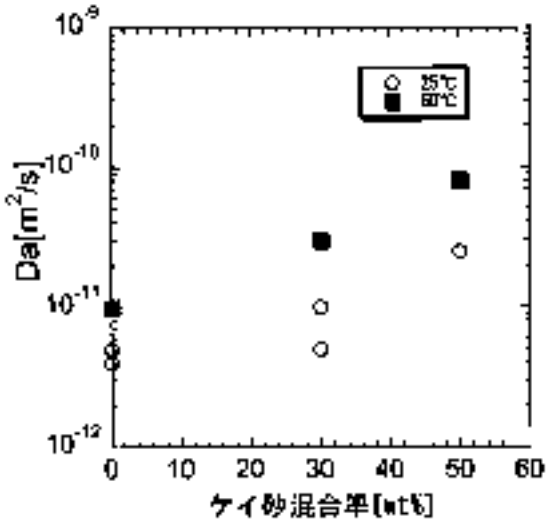


図5.1-5 還元条件下でのSeのDaに関するケイ砂混合率依存性

ii）圧縮ベントナイト中のセレンの拡散挙動に関する研究

セレン(Se)も安全評価上重要な元素の一つであると同時に，酸化還元条件に鋭敏な元素である。しかし，処分場環境で想定される還元条件下での拡散に関する実測データは十分とは言えない。そのため，還元条件下におけるSeの見かけの拡散係数をケイ砂混合率，温度をパラメータとして取得した（Sato and Miyamoto, 2002）。

実験は，ベントナイト（クニゲルV1（クニミネ工業製））を用い，乾燥密度1.6 Mg/m³に対し，ケイ砂混合率0，30，50 wt%，温度は22.5℃（室温）および60℃の条件で，還元条件下でin-diffusion法により行った。拡散期間中は，カラムを$Na_2S_2O_4$溶液に浸漬し，トレーサー塗布面と逆側の試料面をフィルターを介して還元性の溶液と接触することで，還元条件を維持した。なお，全ての実験は，N_2雰囲気のグローブボックス中(酸素濃度＜1 ppm)で実施した。

得られたDaは4×10^{-12}~8×10^{-11} m²/sであり，ケイ砂混合率の増加および温度の上昇に伴い増加する傾向が見られる（図5.1-5）。低酸素雰囲気（$Se(IV)^{2+}$）の既存データ（Sato, 1999b）と比較すると，本研究で得られた見かけの拡散係数は1桁程度小さな値であることが明らかとなった。

③ まとめ

圧縮ベントナイト中の鉛の見かけの拡散係数を，乾燥密度，温度，ケイ砂混合率をパラメータとして，また，還元条件下でのセレンの見かけの拡散係数を温度およびケイ砂混合率をパラメータとして取得した。これらのデータにより，重要核種の核種移行データの充実が図られた。今後も継続的に，データの取得を着実に進めていくとともに，データベースの更新作業等を実施していく。

参考文献

Sato, H. (1999a) : Diffusivity Database (DDB) for Major Rocks : Database for the Second Progress Report, JNC Technical Report, JNC TN8400 99-065.

Sato, H. (1999b) : Measurement of Apparent Diffusion Coefficient (Da) for Cs(I), Ni(II) and Se(IV) in Bentonite with Silica Sand, JNC Technical Report, JNC TN8400 99-060.

Sato, H. and Miyamoto, S. (2001) : A Study on Diffusion and Migration of Lead in Compacted Bentonite, JNC Technical Report, JNC TN8400 2001-018.

Sato, H. and Miyamoto, S. (2002). The Effects of Silica Sand Content and Temperature on Diffusion of Selenium in Compacted Bentonite under Reducing Condition. WMRE 2001, JNC Conf 2002-004, pp.675-682.

油井明紀，岡山忠宏，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.

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

本研究においては，「第２次取りまとめ」以降，実際の地質環境で行われる段階的調査への適用とモデルの信頼性向上が課題となるため，結晶質岩および堆積岩それぞれについて以下の項目番号の研究を行っている。

結晶質岩に関しては，1)段階を追って実施される調査に基づくモデル化を行うため，地表調査段階での対象スケールとなる数キロメートルオーダーのモデル化に必要な機能の追加等を亀裂ネットワークモデルに対して行っているほか，2)原位置から得られるデータの不確実性を評価するために逆解析手法の開発を行っている。

また，3)結晶質岩の水理・物質移行モデルの信頼性向上を図るため，対象とするスケールに応じて室内試験，原位置試験，モデル化を適切に組み合わせて研究を実施している。物質移行の基本単位である単一亀裂および亀裂交差部については，3-1)単一亀裂内部の不均質性と移流・分散現象の関係を把握するための室内試験と亀裂交差部の透水性を把握するための室内試験，3-2)亀裂内充填物質の拡散の影響を把握するための室内試験，を通じて移行プロセスの把握・確認を行うとともに，3-3)単一亀裂を対象とする原位置トレーサー試験とそのモデル化，3-5)10～100メートルスケールの亀裂ネットワークスケールでの原位置トレーサー試験とそのモデル化を通じてモデルの信頼性の確認を行っている。これらの結果を踏まえて，3-1)亀裂中の不均質性の影響を考慮したモデル開発を実施している。さらに，より大きなキロメートルスケールについては，3-6)水理データに加えて地下水化学データを考慮したモデル化手法の開発を行うとともに，3-7)亀裂ネットワークモデルに使用するパラメータの信頼性を確認するため，感度パラメータの一つである亀裂の大きさのフラクタル性とその不確実性が水理・物質移行モデルに与える影響の評価を行っている。

堆積岩については，実施法に影響を与える可能性がある要因として，4)不均質性モデル化を行っている。今後は，さらに，割れ目を含む堆積岩のモデル化を行うほか，動水勾配の評価上重要となる化石海水や塩淡境界のモデル化を行うため，密度流のモデル化を課題として進める予定である。

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

岩盤中の水理・物質移行現象という観点から，亀裂ネットワークモデルは亀裂性岩盤を対象としたモデルの候補の一つとして考えられており，「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ベースとして用いられてきた（「第２次取りまとめ」分冊３付録Ｃ参照）。これまではサイトを限定しない，ならびに坑道周辺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，数十メートルから数百メートルスケールを対象としたモデル化手法・解析手法の開発と適用事例の検討がなされてきたが，「第２次取りまとめ」以降はサイトを特定した場合や段階的な調査（地表からの調査のように大きなスケールから坑道周辺へのスケールへ展開される）に応じたモデルの改良・適用事例の検討が必要となる。例えば，東濃地域を対象とした「超深地層研究所計画（3.1項参照）」の調査結果から水理地質構造のモデル化を検討することで，各調査段階に応じて必要なモデル化機能を抽出するとともに，その機能の開発を行う。このような検討を通じて，各段階でモデル化に必要なデータについて調査技術開発と密接にリンクすることで，モデル化・評価に必要な調査の体系化に資することができると考えられる。

また，「第２次取りまとめ」では亀裂ネットワークモデルを一次元チャンネルのネットワークモデルに近似したため，澤田・坂本（2001）はその近似の妥当性を様々な観点から検討している。このような近似手続きを介することなく亀裂ネットワークモデルを用いた核種移行解析を実現するために，核種移行ソルバーの拡張を実施している。

さらに，移流，分散，マトリクス拡散といったプロセスに加えて，信頼性の向上のための研究（5.2.1　3）項参照）の進展に応じて亀裂ネットワークモデルへの統合化を検討する必要がある。

② これまでの成果

これまでに，地表からの調査段階を対象として数キロメートル四方を対象としたモデル化機能を開発してきた。特定の場所で数キロメートル四方を対象とする場合，

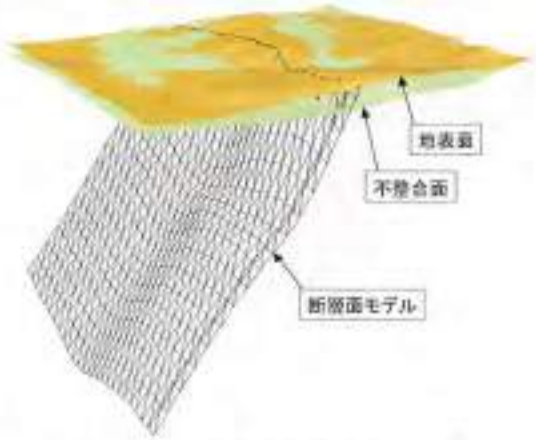


図 5.2-1　境界面と断層モデル例

図 5.2-2　稜線と河川から設定された境界
（地形図に投影，黒線はモデル境界）

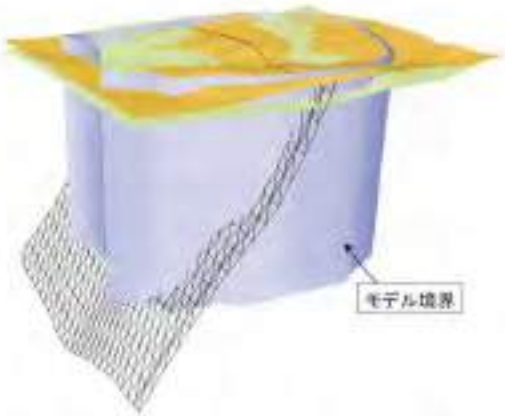


図 5.2-3　複雑形状の側方境界モデル

・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が必要となる。断層面や不整合面等の地質・地質構造については一般的に地質図，地表踏査，物理探査，試錐調査等のデータから三次元的な構造モデルを推定する。たとえば，三枝・須山（2000）は超深地層研究所計画用地（正馬様用地）を対象に，三次元地質構造モデルの構築ならびに可視化を試みている。このようにして構築された三次元地質・地質構造モデルの三次元データを亀裂ネットワークモデルで活用するために，

・モデル化領域区分
・地表面
・主要な断層モデル

について，三次元的な曲面で扱えるように機能を追加した。

図 5.2-1 に地表面，地表堆積岩と基盤岩の不整合面ならびに断層面モデルの例を示す。地表面と不整合面はモデル化領域境界となる。また，断層面は亀裂モデルとして三角形要素により曲面が表現されている。

側方境界は河川，稜線等の分水嶺と考えられる箇所に沿って設定されるのが一般的で，図 5.2-2 にその一例を示す。同図では西，北，東方向を稜線で，南方向を河川でモデル境界を設定している。このように複雑な形状を呈する境界線の鉛直延長面を図 5.2-1 のモデルに重ね合わせたものを図 5.2-3 に示す。

図 5.2-1 のように堆積岩が地表を覆っている場合には，堆積岩を多孔質連続体でモデル化する必要が生じる。図 5.2-4 に地表面と不連続面間を多孔質連続体要素でモデル化した例を示す。この場合，断層や地表地形等の複雑な形状を考慮した要素分割が必要で，今後さらに検討が必要となる。

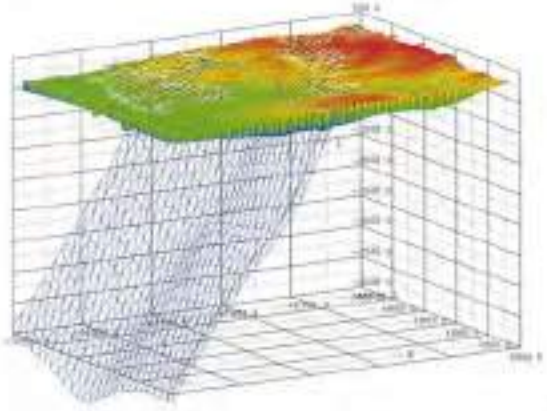


図 5.2-4　地表堆積岩の連続体要素と断層モデル
（図 5.2-1 の地表と不整合面間に連続体要素を作成，色は標高差を表す）

③ まとめ

亀裂ネットワークモデルの改良・高度化における当面の課題として，地表からの調査段階における数キロメートル四方を対象としたモデル化を行うために必要な基本機能として，曲面による地質・地質構造の表現，複雑な形状を呈する境界面の表現，地表堆積岩の多孔質連続体によるモデル化等の機能を開発した。今後は，超深地層研究所計画等の実際の問題に適用して問題点等を抽出しつつ，モデル化機能の改良・高度化を進める。また，LTG コードの二次元化や，信頼性の向上のための研究の進展に応じて機能の統合化を検討する予定である。

参考文献

_庚博光，須山泰宏（2000）：超深地層研究所計画における地質構造モデルの構築及び地下水解析，サイクル機構技報，No.9(2000.12)，pp.89-101.

陳田　洋，坂本和彦（2001）：ヴァンネルネットワークモデル近似に伴う不確実性の検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-010.

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

「第２次取りまとめ」においては，地質環境や処分場のレイアウトを幅広く考慮し，簡略かつ保守的な視点から天然バリア中の核種移行モデル体系を構築するとともに，バリア性能の検討として個々のデータの不確実性に対する感度解析を実施している。例えば，亀裂開口幅の不確実性については，釜石鉱山で単一亀裂を対象とした複数のトレーサー試験を評価した結果（Sawada et al., 2000）を参考にその最大値・最小値を設定している。「第２次取りまとめ」以後の地層処分に関わる研究開発においては，実際のデータに基づいた地質環境モデルを構築して地下水流動特性や地下水移行経路を評価するとともに，その結果に基づく性能評価体系を例示することが重要な課題となる。この場合，原位置で実施される種々の試験（例えば，トレーサー試験）で核種移行評価に用いるモデルやパラメータ値の妥当性もしくは保守性を確認していくこととなる。しかしながら，原位置試験結果を評価する際には種々の仮定に基づいた解析やパラメータフィッティングがなされる場合が多く，フィッティングの誤差や設定された仮定により生ずる誤差等に対する議論や定量的評価がなされていない場合が多い。このような観点から，本研究では，亀裂性媒体を対象とした核種移行モデルに逆解析を適用することによりパラメータ値を同定し，同定したパラメータの信頼区間を評価する手法を開発（井尻ほか，2001）するとともに，原位置トレーサー試験結果や室内試験結果に適用することでパラメータ同定値の不確実性を評価した（細野ほか，2002；畑ほか，2002；吉野・澤田，2002）。

② これまでの成果

亀裂中の核種の移行モデルとしては亀裂中の移流，分散，マトリクス拡散，核種崩壊遅延等を考慮する必要がある。本研究では，「第２次取りまとめ」でチャンネルネットワークモデルに適用された核種移行解析コード LTG（「第２次取りまとめ」分冊３付録Ｃ参照）に対して，逆解析手法を適用した。

逆解析手法としては，Carrera and Neuman (1986a, 1986b, 1986c) の手法を採用し，尤度関数の最大値問題から目的関数，S として次式を使用した。

$$S = \frac{\{c^* - c\}^T V_c^{-1} \{c^* - c\}}{\sigma_c^2} \qquad (5.2\text{-}1)$$

ここで，c^*：濃度の観測値，c：濃度の計算値，$(c^* - c)$：濃度観測値と濃度計算値の残差のベクトル，V_c：観測値間の誤差の相対的割合を示す正値の対角行列，σ_c^2：事前の誤差の分散値である。この目的関数を最小にするときのパラメータ最尤推定量を同定値としており，最小化の方法として非線形最小二乗法の一つであるマルカート法を採用している。

パラメータ最尤推定量の共分散行列からパラメータの信頼区間を評価する。この，パラメータ信頼空間はパラメータ数が M の場合 M 次元空間での超楕円体として表される。図 5.2-5 にパラメータ数 M が２の場合のパラメータ信頼空間模式図を示す。横軸と縦軸はそれぞれパラメータを表している。同定値を中心とした楕円はαを有意水準とすると，$(1-\alpha)$%信頼区間の限界線を表している。楕円が小さいほど同定値の信頼性は大きくなる。

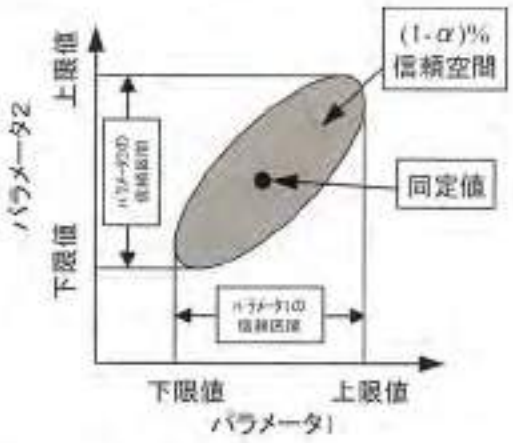


図 5.2-5　パラメータ信頼区間模式図

本解析手法を用いたパラメータ同定とその不確実性評価例として，スウェーデンのエスポ地下研究施設（HRL）において実施されたトレーサー試験のうち STT-2（Winberg et al., 2000）を対象とした。STT-2 は Feature A と呼ばれる単一亀裂内で 4.68m の離間距離のボーリング孔間でトレーサー試験が行われている。このトレーサー試験では，非収着性の HTO ならびに遅延特性の異なる複数の核種が用いられており，試験結果を逆解析することで流速，分散長，マトリクス拡散に影響を与えるパラメータとして湿潤辺長（亀裂幅の２倍：単

位流路長あたりのマトリクス拡散できる亀裂面積を表す），亀裂表面収着およびマトリクス部における収着遅延特性としてそれぞれの分配係数を同定パラメータとした。なお，拡散係数，有効間隙率，乾燥密度は室内試験から求められた値（MIDS；Winberg et al., 2000）を，マトリクス拡散深さはFeature Aの特徴から0.05mとした。移行経路として一次元の移行経路モデルを仮定した。同定手順としては，非収着性のHTOについて流速，分散長，湿潤辺長を同定した後，それら同定値を用いて収着性核種について亀裂表面収着とマトリクス部の分配係数を同定した。HTOに対して逆解析した結果，図5.2-6に示すように試験結果とほぼ同様の破過曲線が得られた。同定されたパラメータ値とその95%信頼区間を表5.2-1に示す。均質一次元モデルを仮定しているため，実験結果のようなダブルピークを明確に表現できない一方で，ブロードな破過曲線を表現するために分散長の同定値が移行距離の約1.2倍という比較的大きな値となっている。これらの値を用いて，収着性核種（Na, Ba, Csの3核種）について収着遅延特性に関わるパラメータを逆解析した結果を図5.2-7に示す。また，同定された遅延係数（亀裂表面収着ならびにマトリクス部の収着）を表5.2-2に示す。これらの結果から，収着遅延特性が異なる場合においても，試験結果をほぼ再現することが可能で，収着遅延特性の大小に影響されずにほぼ同様の誤差（同定値に対する95%信頼区間の幅の比）でパラメータ同定ができた。

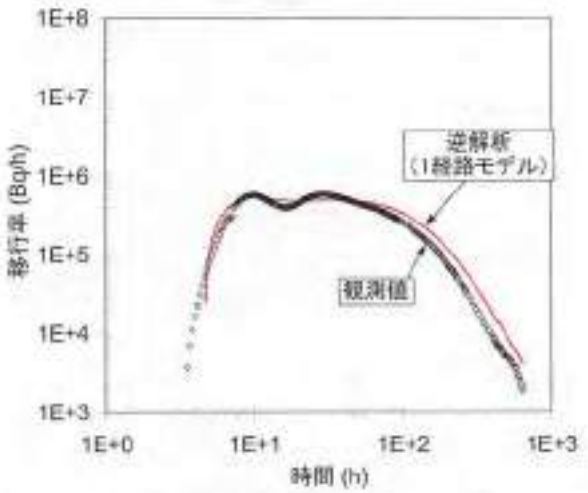


図5.2-6　逆解析結果（HTO，均質一次元モデル）

表5.2-1　流路特性値の同定結果

パラメータ	同定値	95%信頼区間	
		上限	下限
流速（m/h）	0.121	0.124	0.118
分散長（m）	6.20	6.64	5.75
湿潤辺長（m）	3.45	3.82	3.03

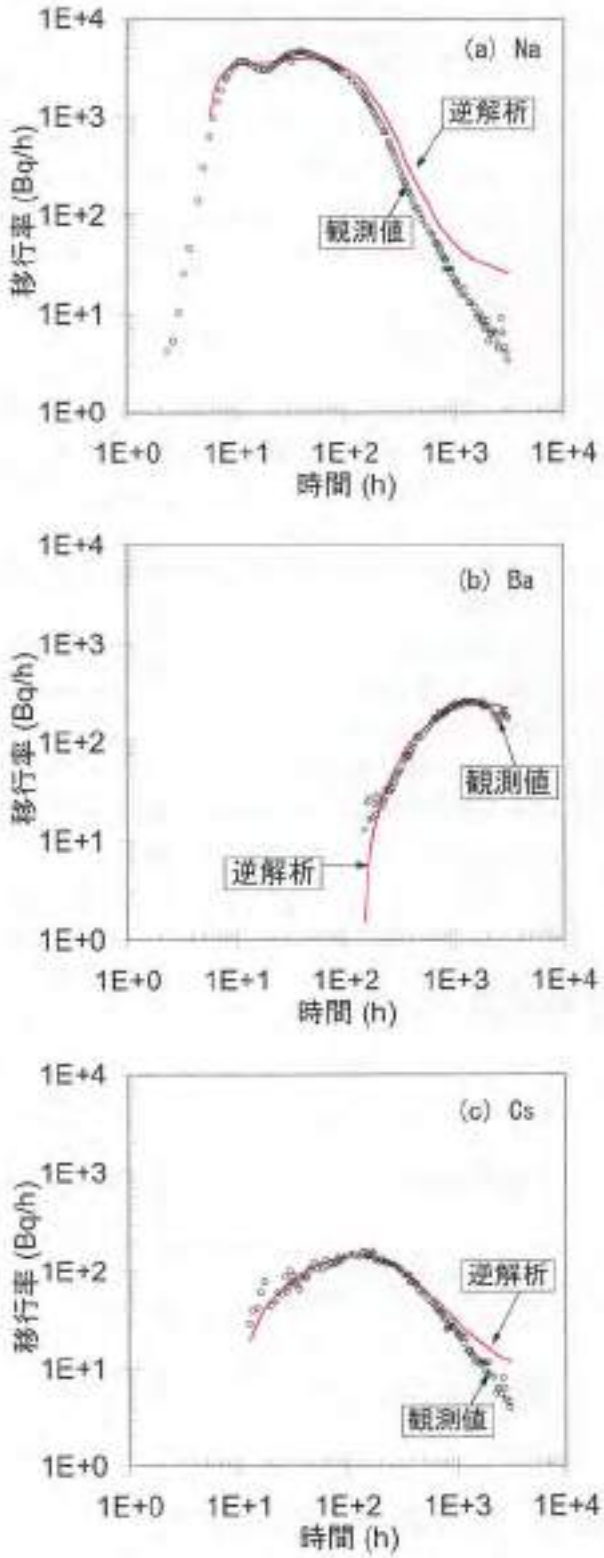


図5.2-7　収着性核種トレーサー試験逆解析結果

表 5.2-2　収着特性同定結果（$\times 10^{-5}$）

核種	マトリクス分配係数(m³/kg)			亀裂表面分配係数(m)		
	同定値	95%信頼区間		同定値	95%信頼区間	
		上限	下限		上限	下限
Na	1.56	1.58	1.54	6.67	7.51	5.62
Ba	161	161	161	75.1	75.8	74.2
Cs	4410	4530	4280	1390	1500	1280

このように，本手法を用いることにより，移流，分散，マトリクス拡散，収着遅延等の数多くの未知パラメータを対象とする問題に対して，一次元均質場を仮定するとともに，同定パラメータとして，

・マトリクス拡散の効果として湿潤辺長，
・収着遅延の効果として分配係数，

と移行プロセスに応じてパラメータを絞り込むことによって，試験結果を比較的精度良く再現できることとともに，同定値に対する信頼幅を定量的に示すことができた。その一方で，比較的ブロードな破過曲線を再現するために分散長が移行距離の約 1.2 倍という比較的大きな値となった。

この分散効果が移行経路の不均質性より生ずると仮定して，複数の移行経路モデル（1 経路モデル～3 経路モデル，図 5.2-8 参照）を用いて HT0 のケースについて検討を行った。なお，複数モデルの場合には流量をそれぞれの経路に分配する必要があるが，これも各経路の断面積を変化させて同定パラメータとした。それぞれのモデルを用いて HT0 のトレーサー試験結果を逆解析した結果を図 5.2-9 に，同定したパラメータ値とその 95%信頼区間を表 5.2-3 に示す。

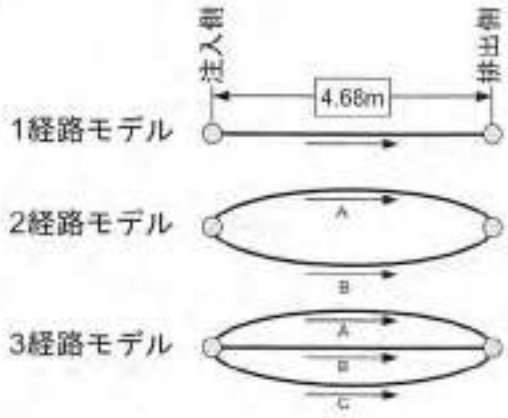


図 5.2-8　移行経路概念図

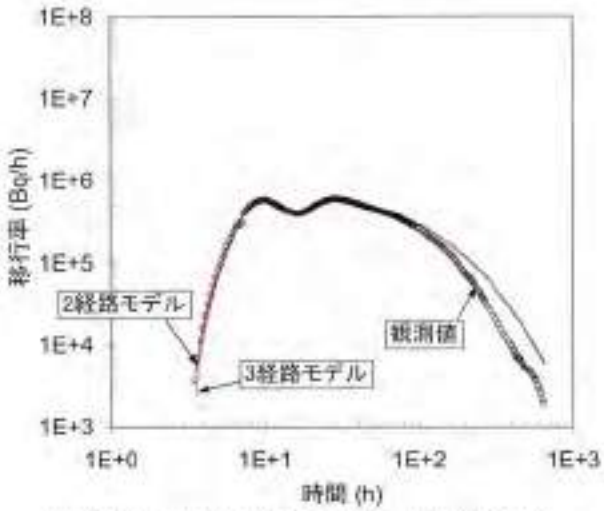


図 5.2-9　複数経路モデルによる解析結果

表 5.2-3　複数経路モデルによる同定値の比較

(a) 流速（m/h）

モデル		同定値	95%信頼区間	
			上限	下限
1 経路モデル		0.125	0.118	0.121
2 経路モデル	A	0.962	0.950	0.956
	B	0.206	0.206	0.208
3 経路モデル	A	0.969	0.959	0.964
	B	0.199	0.196	0.197
	C	0.672	0.642	0.657

(b) 分散長（m）

モデル		同定値	95%信頼区間	
			上限	下限
1 経路モデル		6.643	5.745	6.201
2 経路モデル	A	0.178	0.156	0.167
	B	0.136	0.136	0.134
3 経路モデル	A	0.129	0.114	0.121
	B	0.119	0.106	0.112
	C	0.038	0.002	0.020

2 経路モデルと 3 経路モデルは 1 経路モデルの流速に比べて，約 8 倍早い流速の経路と数倍の流速の経路と，移行距離の 1/50 程度の分散長の組み合わせによりダブルピークを表現できていることがわかる。このように，移行経路数を増減させることは，すなわちモデルのパラメータ数を増減させることであるが，一般にパラメータ数 M を増加させると同定値の信頼性は減少する。こうしたパラメータの増減による信頼性の損失を客観的に示せる量として，

$$AIC = S + 2M \qquad (5.2\text{-}2)$$

で表す赤池の情報量基準（Akaike's Information Criteria：Akaike, 1974）がある。これが小さな値の方がより合理的なモデルであるとされる。それぞれの移行経路モデルの *AIC* を図 5.2-10 に示す。この図より 1 経路モデルより 2 経路モデルの *AIC* は小さいが，2 経路モデルと 3 経路モデルはほぼ同じ値となっている。1 経路モデルから 2 経路モデルになるとパラメータ数が増加するもののそれ以上に目的関数が減少し *AIC* が減少したが，3 経路モデルになるとパラメータ数の増加量と目的関数の減少量が相殺されていると理解できる。したがって，本検討においては 2 経路モデルが HTO トレーサー試験結果を説明するのに最も合理的と考えられる。

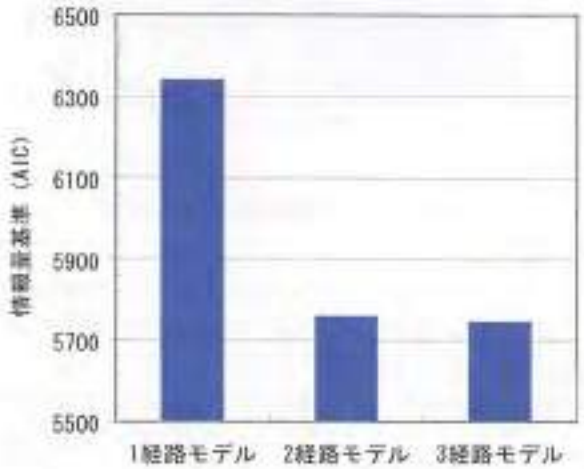


図 5.2-10　情報量基準 AIC の比較

③ まとめ

逆解析手法を用いたパラメータ同定ならびに同定パラメータの信頼性評価手法を核種移行解析コードへ適用することで，原位置で実施されたトレーサー試験から各移行パラメータを同定するとともに，その信頼性を評価した。また情報量基準を導入することで，より合理的なモデルが選定できる見通しを得た。このような手法により定量的に示された不確実性が安全評価に与える影響評価を組み合わせて実施していくことで，原位置で実施される種々のトレーサー試験で核種移行評価に用いるモデルやパラメータ値の妥当性もしくは保守性を確認するために必要な試験項目や精度等の明確化に資すると考えられる。

参考文献

Akaike, H. (1974): A new look at the statistical model identification, IEEE Trans. on Automatic Control, vol. AC-19, No. 6, pp. 716-723.

Carrera, J. and Neuman, S.P. (1986a): Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions:1. Maximum likelihood method incorporating prior information, Water Resour. Res., Vol22, No.2, pp.199-210.

Carrera, J. and Neuman, S.P. (1986b): Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions:2. Uniqueness, stability, and solution algolithms, Water Resour. Res., Vol22, No.2, pp.211-227.

Carrera, J. and Neuman, S.P. (1986c): Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions:3. Application to synthetic and field data, Water Resour. Res., Vol22, No.2, pp.228-242.

畑　明仁，細野賢一，井尻裕二，澤田　淳（2002）：原位置トレーサー試験の逆解析による不確実性評価（その 1　データの不確実性の評価），平成 14 年度全国大会第 57 回年次学術講演会論文集（印刷中）。

細野賢一，畑　明仁，井尻裕二，澤田　淳（2002）：原位置トレーサー試験の逆解析による不確実性評価（その 2　モデルの不確実性の評価），平成 14 年度全国大会第 57 回年次学術講演会論文集（印刷中）。

井尻裕二，安達哲也，鈴木俊一，大石雅也，杉原　豊（2001）：核種移行逆解析プログラムの作成，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 TJ8440 2001-002.

Sawada, A., Uchida, M., Shimo, M., Yamamoto, H., Takahara, H. and Doe, T.W. (2000) : Non-sorbing tracer migration experiments in fractured rock at the kamaishi mine, Northeast Japan, Engineering Geology, 56, p75-96.

Winberg, A., Andersson, P., Hermanson, J., Byegård, J., Cvetkovic, V. and Birgersson, L. (2000): Final report of first stage of the tracer retention understanding experiments, SKB Technical Report, TR-00-07.

吉野尚人，澤田　淳（2002）：逆解析による核種移行パラメータ同定値の信頼性評価，平成 14 年度全国大会第 57 回年次学術講演会論文集（印刷中）

3) 結晶質岩の水理・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）

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おいては，個々の亀裂を均質な平行平板（例えば，「第1次取りまとめ」）や一次元チャンネル（例えば，Negra, 1994）で近似したモデルが一般的に用いられる。「第2次取りまとめ」の母岩に対するレファレンスケースにおいては，岩盤の不均質性として透水量係数の不均質性に着目した均質一次元モデルを重ね合わせた手法を採用している。この場合，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)微視的には亀裂表面形状，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，地下水の流れや物質移行現象に与える影響を検討することは，上記モデルの信頼性向上に資すると考えられる。上記2)の観点から，亀裂内空隙構造の不均質性が地下水の流れや物質移行現象に与える影響については，50cmスケールの岩盤を対象とした室内試験装置，亀裂状媒体水理試験設備(LABROCK)による透水・トレーサー試験を実施し，試験結果から50cm岩体の平均的な水理学的開口幅と物質移行開口幅の関係について検討しており（吉野・内田，2001），チャンネル構造(Neretnieks, 1983）の有無についても検討中である。亀裂内の空隙構造は亀裂に作用する応力（垂直応力とせん断応力）にも影響を受ける（例えば，Witherspoon et al., 1980；多田ほか，1994）ため，LABROCKで垂直応力の影響についても検討するとともに，九州大学と共同でせん断応力の影響について検討してきた（江崎ほか，2000；江崎ほか，2001）。

亀裂交差部については，坑道や地表露頭における湧水状況の観察等から高透水性であることが指摘されている（例えば，渡辺・三枝，2000）。その場合，亀裂交差部が核種の選択的な移行経路になる可能性がある。そこで，亀裂交差部の透水特性の関係を把握することを目的として，亀裂交差部を含む50cmスケールの岩体（山田ほか，2001）を対象に透水試験を実施している。

なお，巨視的な亀裂のネットワーク構造の不均質性については5.2.1 3-7)項を参照されたい。

② これまでの成果

ここでは，前述した複数の室内試験のうち，最近の主要な成果として，LABROCKを用いた単一亀裂中の透水・トレーサー試験結果について述べる。

LABROCKで使用した天然亀裂岩体は図5.2-11に示すように，高さ方向のほぼ中央に天然亀裂を有しており，岩体内部のトレーサー濃度を測定するために直径3cmの濃度測定孔を六つ削孔した。濃度測定孔は試験岩体の表面の微細亀裂観察から，なるべく垂直方向の微細亀裂と交差しないように配置した。

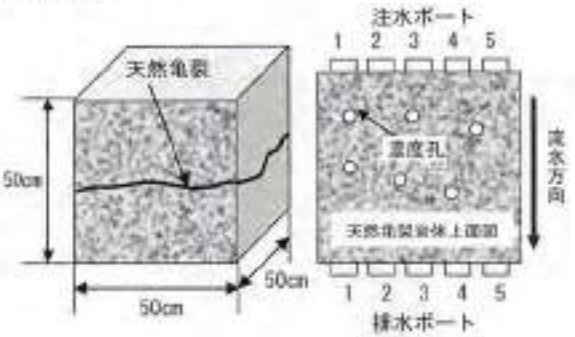


図5.2-11 天然亀裂岩体模式図

試験は表5.2-4～5.2-6に示すように透水試験，トレーサー試験1，トレーサー試験2の3種類を実施した。

透水試験では，注水ポートと排水ポート間の水頭差を任意の値に設定し，亀裂内の流れの定常性を確認した後に水頭，圧力等を計測した。水頭差は表5.2-4に示す6段階に変化させた。トレーサー試験1では，透水試験の試験ケースと同じ水頭差で注水した後，五つの注水ポートから同時にトレーサーを注入した。トレーサー試験2では，水頭差を31cmに固定して注水した後，一つの注水ポートのみからトレーサーを注入した。つまりトレーサー注入時は一つのポートはトレーサーが注入されているが，その他のポートからは水が流れている状態である。

表5.2-4 試験ケース（透水試験）

試験ケース	設定水頭差（cm）
W-11	11
W-15	15
W-19	19
W-23	23
W-27	27
W-31	31

表 5.2-5　試験ケース（トレーサー試験 1）

試験ケース	設定水頭差（cm）	使用注水ポート
T-11	11	1, 2, 3, 4, 5
T-15	15	1, 2, 3, 4, 5
T-19	19	1, 2, 3, 4, 5
T-23	23	1, 2, 3, 4, 5
T-27	27	1, 2, 3, 4, 5
T-31	31	1, 2, 3, 4, 5

表 5.2-6　試験ケース（トレーサー試験 2）

試験ケース	設定水頭差（cm）	使用注水ポート
T-31-1	31	1
T-31-2		2
T-31-3		3
T-31-4		4
T-31-5		5

透水試験とトレーサー試験 1 より水理学的開口幅(bh)と物質移行開口幅(bt)を算出し，両者の関係について考察した。図 5.2-12 に示すように，両者は相関関係を有することがわかる。また，水理学的開口幅は物質移行開口幅よりも 0.1mm 程度大きくなっている。水理学的開口幅(bh)と物質移行開口幅(bt)の大小関係は亀裂内の構造に起因し，bt>bh の場合には流れ方向の開口幅変化よりも流れに垂直な方向の開口幅変化の方が大きくなり，bh>bt の場合には流れ方向に垂直な開口幅変化よりも流れ方向の開口幅変化の方が大きくなるとされている(Silliman, 1989)。この大小関係は亀裂表面の特性因子の応力依存性にも影響を受けるため，今回の結果から断定的なことは言えないが，試験に用いた天然亀裂岩体は流れ方向に垂直な開口幅変化の方が大きくなっている可能性がある。これについては，今後実施されるレジン注入法による開口幅測定結果により検証する予定である。

トレーサー試験 2 の試験結果をもとに試験岩体内移行経路の不均質性の評価を試みた。図 5.2-13 に定常時の試験岩体内濃度状態を示す。図は試験岩体の上面から亀裂を見ている。各円の直径は濃度を表しており，最も大きい円が 1%濃度を示している。トレーサー注入ポート以外のポートは水が流れており試験岩体内の流れは仮に平行平板とすると一様流となっているはずである。しかし，実際には図 5.2-13 のように流れには偏りがあることがわかる。同図より，各ポートから注入されたトレーサーの分布形状は以下の 3 種類に分けることができる。

・注水ポート 1 からのトレーサー注入
・注水ポート 2～4 からのトレーサー注入
・注水ポート 5 からのトレーサー注入

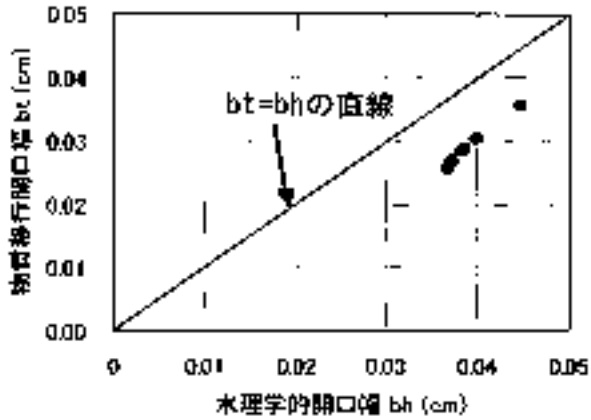


図 5.2-12　水理学的開口幅と物質移行開口幅の関係

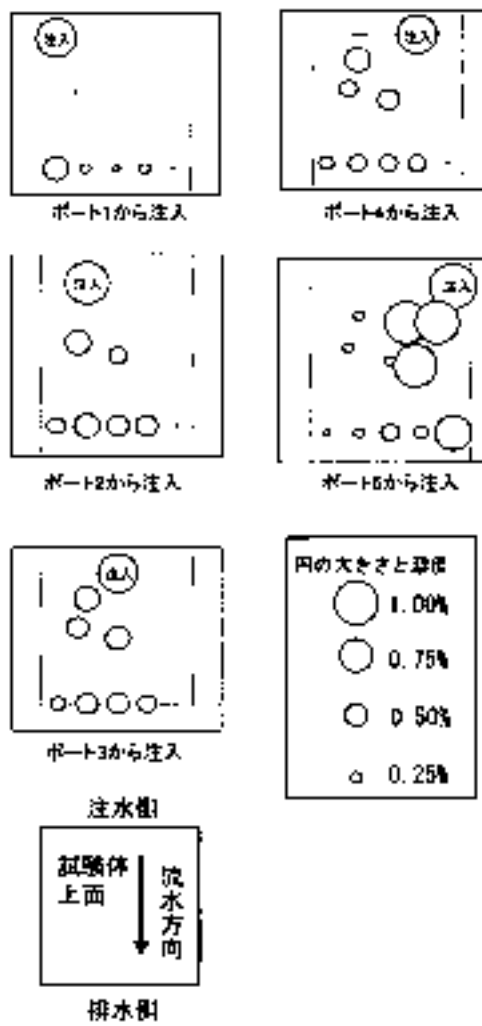


図 5.2-13　定常時の試験岩体内濃度状態

③ まとめ

単一亀裂を対象とした透水・トレーサー試験においては，水理学的開口幅と物質移行開口幅の関係を示すとともに，その関係から透水方向に平行な方向の空隙構造の変化（開口幅の違い）より透水方向に垂直な方向の変化の方が大きい可能性を指摘した。また，同じ岩体を用いた応力依存性試験により，水理・物質移行特性の応力依存性を例示的にみることができた。今後は，レジン注入法による詳細な亀裂開口幅を測定するとともに，格子ボルツマン法（例えば，Zhang et al., 2002；松岡ほか, 2002）や格子ガス法(Lee, 1995；Ishiguro et al., 2002）等を用いた流体解析により水理・物質移行特性と空隙構造との因果関係について検討する予定である。

亀裂交差部の透水特性については，透水試験を継続して実施するとともに，上記岩体と同様にレジン注入法を用いた詳細な亀裂開口幅測定により，水理・物質移行特性と空隙構造との関係について検討する予定である。

参考文献

江崎哲郎，伸野健二，三谷泰浩，蒋　宇静，内田雅大，水垣祐児(2000)：岩盤不連続面の力学・透水メカニズムの実験的解析的研究-先行基礎工学分野に関する平成11年度報告書-，サイクル機構技術資料（共同研究報告書，九州大学），JNC TY8400 2000-004.

江崎哲郎，伸野健二，三谷泰浩，蒋　宇静，内田雅大，吉野尚人(2001)：岩盤不連続面の力学・透水メカニズムの実験的解析的研究-先行基礎工学分野に関する平成12年度報告書-，サイクル機構技術資料（共同研究報告書：九州大学），JNC TY8400 2001-005.

Ishiguro, M. (2002)：Lattice gas automaton scheme with stochastic particle movement for a related fluid flow, Jor. of NUCLEAR SCI. and TECH., vol.39, no.1, pp.59-70.

Lee, C. (1995)：Low period outlow of mixing behavior at fracture junctions, Doctoral Dissertation. New Mexico Institute of Mining and Technology, New Mexico.

松岡俊文，三谷泰浩，村田浩彦，吉田　誠 (2002)：格子ボルツマン法による単一フラクチャ内の流体解析，第11回岩の力学国内シンポジウム，G03.

Nagra (1994)：Kristallin-I, Safety Assessment Report. Nagra Technical Report NTB 93-22.

Neretnieks, I. (1983)：A Note on Fracture Flow Mechanisms in the Ground, Water Resources Res., 19, pp.364-370.

Silliman, S.E. (1989)：An Interpretation of the differences between aperture estimates derived from hydraulic and tracer in single fracture, Water Resources Research, vol.25, No.10, pp.2275-2283.

多田浩幸，木下尚人，岩森暁朗(1994)：岩石割れ目の透水係数と応力の関係を用いた空洞周辺岩盤の透水特性変化の予測手法，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.139-144.

藤辺拓哉，（技術先）(2000)：地下水流動調査研究　地下水流動の総合測定・解析システムの開発，サイクル機構技術資料（共同研究報告書：筑波大学），JNC TY7400 2000-004.

Witherspoon, P.A., Wang, J.S.Y., Iwai, K. and Gale, J.E. (1980)：Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, Water Resour. Res., Vol.16, No.6, pp.1016-1024.

山田直之，雑　喜一，福田　淳（2001）：実岩体を用いた透水試験・NETBLOCK試験報告ー，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，第56回土木学会年次学術講演概要集，北海セッション，pp.42-43.

Zhang, X., Bengough, A. G., Crawford, J. W. and Young, I. M. (2002)：A lattice BGK model for advection and anisotropic dispersion equation, Advances in Water Resource., 25, pp.1-8.

3-2) 単一亀裂・室内試験（充填物質中拡散試験）

① 課題と概要

「第２次取りまとめ」における天然バリア母岩中核種移行解析においては，一次元平行平板モデルを使用している。この一次元平行平板モデルでは，岩石基質内の流れを無視し，亀裂内での移流・分散による核種移行と亀裂から岩石基質中への拡散（マトリクス拡散）および岩石基質内での鉱物粒子表面への収着を考慮してモデル化している。マトリクス拡散については，保守性を考慮して，亀裂内を流れる核種が直接健全な岩石基質中へ移行することが仮定されている。しかしながら，「第２次取りまとめ」の天然バリア母岩中核種移行解析におけるデータ設定で検討がなされており，Osawa et al.(1995)や Ota et al.(1998)が釜石鉱山に存在する亀裂を三つのタイプにパターン化しているように，わが国で観察される大部分の亀裂中では，鉱物等の物質の充填が確認されている。また，亀裂周辺には変質帯が形成されている例が多いことから，開口部を流れる地下水が直接健岩部に接する割合は比較的小さいものと考えられる。亀裂性媒体中の核種移行評価においては，亀裂中の充填物質，亀裂周辺の変質帯を介して健岩部へ至る核種移行経路を想定することにより，より現実的に岩盤性能を評価することができる。また，岩盤内に核種をより多く取り込めるようになることから，その分移行を遅延させることになり，岩盤性能の向上が期待できる。したがって，亀裂中の充填物質，亀裂周辺の変質帯等を考慮に入れた核種移行評価を行うためには，これらの領域における物質移行現象をより正確に把握し，そこでの物質移行特性を評価する必要がある。

本研究では，釜石鉱山において採取した岩体（花崗閃緑岩）を使用して，亀裂内の充填物質や変質帯を介した岩盤基質部への拡散現象およびそれに起因する亀裂性岩盤中での移行遅延効果を理解するために室内試験を実施し，それらの領域を代表する拡散係数を取得した。なお，本報告はサイクル機構と米国サンディア国立研究所とで実施している共同研究のこれまでの成果である(Altman et al., 2001)。

② これまでの成果

ｉ）拡散現象の評価方法

釜石鉱山で採取した亀裂を有する花崗閃緑岩を切断・整形することにより，四つの試験サンプルを作成した。四つの試験サンプルでは，それぞれ，

・ガウジで充填されている亀裂（KB1am-1）
・亀裂中の再結晶化部（KC1c-FF）
・亀裂に沿った変質部（KC1a-alt）
・未変質部（KC1a-unalt）

における拡散現象が観察できる。ここで括弧内はサンプル名を示している。図 5.2-14 の上段の４枚の写真は四つの試験サンプルを撮影したものである。図 5.2-14 の下段の図は四つの試験サンプルを用いた試験の概念図を示している。それぞれのサンプル上部に取り付けられている青色の部分はトレーサーおよび水を貯留するリザーバーである。

図 5.2-14 試験岩体の分類と試験セル

図 5.2-15 に本研究で実施した拡散試験の流れを示す。試験では，まず，各サンプルをトレーサー溶液（ヨウ化カリウム）で飽和させ，飽和後に浄水を循環させたリザーバーへの戻り拡散の時間変化を X 線吸収法により撮影した。

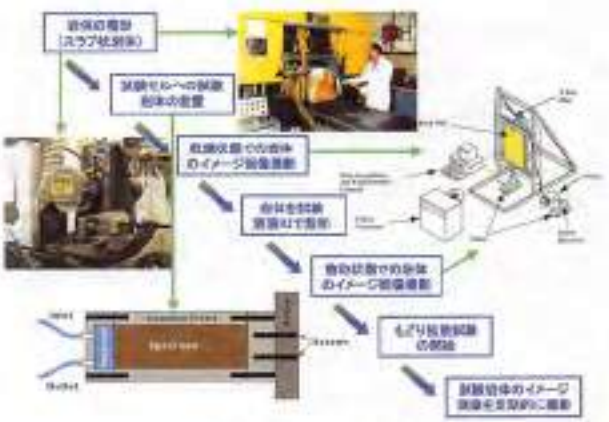


図 5.2-15　試験の流れ

従来，拡散係数を求めるための試験は，亀裂等が入っていない健岩部から採取したサンプルを用いて，サンプル全体を通過する溶質量の時間変化を測定することにより行われる（例えば，Trough-Diffusion 法）。しかしながら，亀裂中の充填物質や亀裂周辺にある変質帯での拡散係数を調べるために従来の方法を用いると十分な試料の厚さが確保できない上に，試験サンプルの切断・整形の過程で大きな擾乱を受ける。本研究では，亀裂性岩盤の脆弱な部分を対象として拡散試験を行うことから，擾乱ができるだけ小さくなるように細心の注意を払い，健岩部も含めて不均質な拡散構造をもつよう小さいサンプルでも長さ 5cm，幅 7cm，厚さ 2.5cm 程度に切断・整形した。X 線吸収法による戻り拡散の時間変化の撮影では，図 5.2-16 のように試験用の岩体サンプルを並べ，既知の間隙幅のくさびをトレーサーで満たしたものを同時に正面より撮影した。

図 5.2-16　X 線撮影対象

各試験サンプル毎に撮影した戻り拡散の時間変化については，撮影した X 線フィルムをさらに CCD カメラで撮影し，得られた画像イメージでの光強度レベルを基準となる光強度レベルで補正することにより，各撮影時間の濃度分布に対応する光強度イメージを得た。Tidwell and Glass (1994) により光強度と空隙率，濃度，質量の関係は次式により与えられている。

$$\phi = \frac{\ln(I_s)-\ln(I_d)}{E(\ln(I_s)-\ln(I_d))}\phi_{sat} \qquad (5.2\text{-}3)$$

$$\frac{C(t)}{C_0} = \frac{ln(I(t))-ln(I_d)}{ln(I_s)-ln(I_d)} \qquad (5.2\text{-}4)$$

$$\frac{M(t)}{M_0} = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{C(t)}{C_0}\right)\phi_i}{\sum_{i=1}^{N}\phi_i} \qquad (5.2\text{-}5)$$

ここで，ϕ：空隙率(-)，ϕ_{sat}：サンプル全体の空隙率(-)，C/C_0：トレーサー濃度 C とトレーサー初期濃度 C_0 との比(-)，M/M_0：サンプル内のトレーサー質量とトレーサー初期質量の比。I_s：トレーサー溶液飽和岩体中の光強度，I_d：乾燥岩体中の光強度，I：光強度，t：試験開始後の時間である。

なお，光強度は CCD カメラで得られたイメージの 1 ピクセル（サイズ：0.3mm×0.3mm）単位で与えられる。

ii）試験結果

画像処理した光強度分布を式(5.2-3)～(5.2-5)で示される変換式に代入することにより，サンプル内の空隙率分布，濃度分布の時間変化，サンプル内質量の時間変化を求めた。図 5.2-17～5.2-19 はそれぞれ，ガウジで充填されている亀裂，亀裂中の再結晶化部および亀裂に沿った変質部についての空隙率分布と各試験対象領域における濃度分布の時間変化を示している。

ガウジで充填されている亀裂の場合，左右の亀裂とも 10～20%と空隙率の大きい亀裂中のガウジ部を中心にトレーサーが入り込んでいる。また，左右の亀裂に充填されたガウジ中のトレーサー移行は亀裂に沿って一次元的に生じていることがわかる。

亀裂中の再結晶化部の場合，10～20%の間で空隙率が偏りを持って分布し，領域全体で均一に分布していないことがわかる。また，トレーサーがリザーバー方向へ戻り拡散している間，亀裂面の近くで濃度が減少している領域が散在している。これは，再結晶化部おけるトレーサーの移行はリザーバーに向かった一次元方向にのみ生じているのではなく，三次元的な移行速度が速い経路が存在することを意味している。

亀裂に沿った変質部の場合，空隙率は数%～20%程度のところまでに分布している。また，大まかな傾向としてリザーバー側に近くなるにつれて，空隙率が少しずつ大きくなっており，空隙率が非常に大きい領域も局所的に存在している。トレー

サーが戻り拡散する様子を観察すると，岩体の基質部側からリザーバーに向かってほぼ一次元的な移行挙動を示しており，局所的に大きくなっている空隙率の影響はみられない。

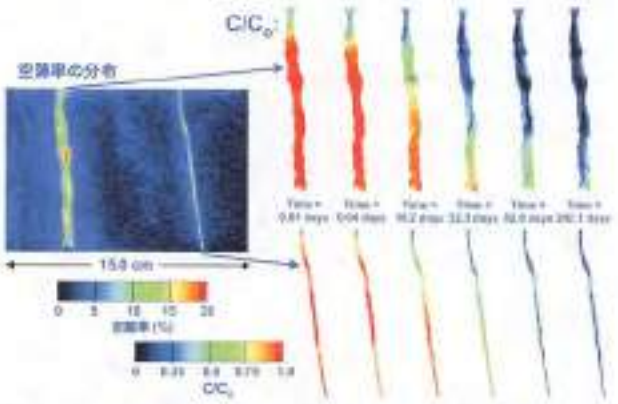


図5.2-17　ガウジで充填されている亀裂(KB1am-1)中空隙率分布と濃度分布の時間変化

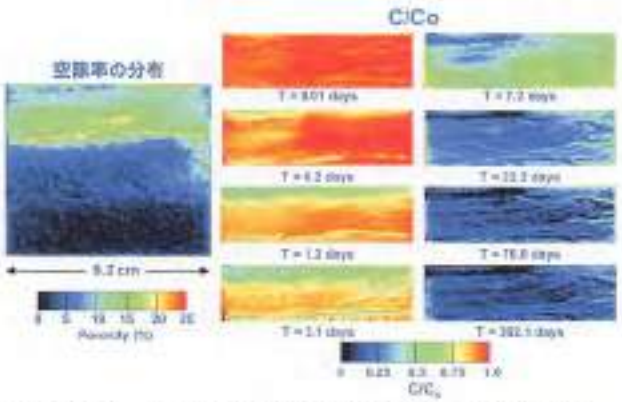


図5.2-18　亀裂中の再結晶化部(KC1c-FF)における空隙率分布と濃度分布の時間変化

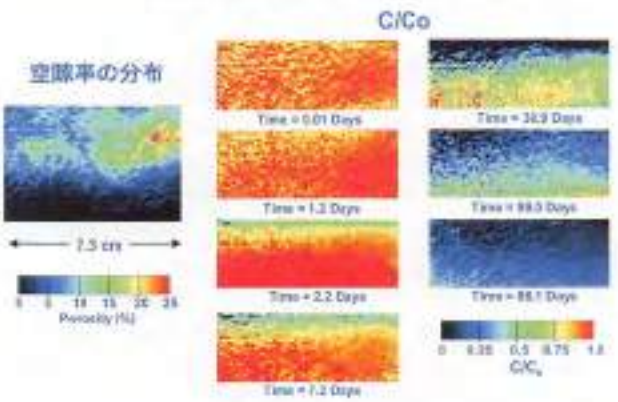


図5.2-19　亀裂に沿った変質部（KC1a-alt）における空隙率分布と濃度分布の時間変化

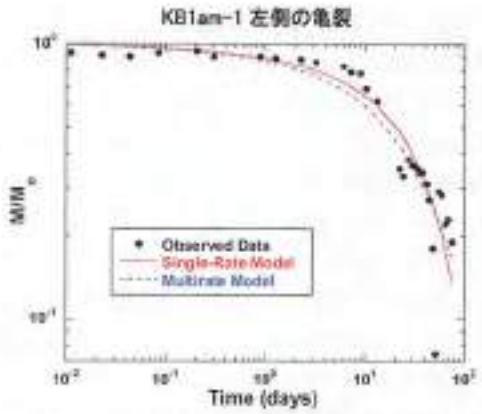


図5.2-20　ガウジで充填されている亀裂(左側)に存在するトレーサー質量の時間変化

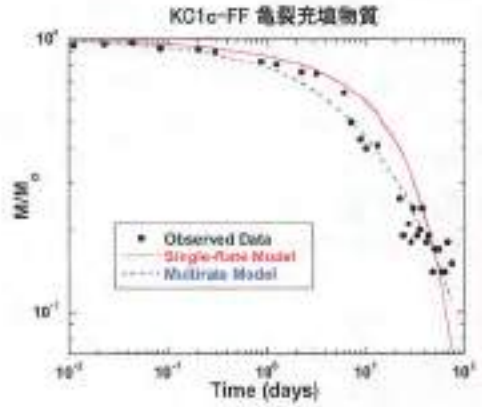


図5.2-21　亀裂中の再結晶化部に存在するトレーサー質量の時間変化

図5.2-20と図5.2-21はそれぞれ，ガウジで充填されている亀裂（左側）と亀裂中の再結晶化部に存在するトレーサー質量の時間変化を示している。これらの図からわかるように，試験開始時にトレーサーで飽和されたそれぞれのサンプルからは，時間の経過にしたがって，トレーサーが戻り拡散により徐々にリザーバー側に移行し，試験が終了する時間（試験開始後202日）においては，岩体にはわずかな質量のトレーサーしか残っていない。

iii）拡散係数の算出

図5.2-20と図5.2-21で示されるようなサンプル中に残存しているトレーサー質量の時間変化を拡散モデルとフィッティングさせることにより，ガウジで充填されている亀裂，亀裂中の再結晶化部および亀裂に沿った変質部における間隙水中の拡散係数を算出した。間隙水中の拡散係数を算出するにあたっては，Crank（1975）によって導出さ

れた一次元の解析解及び Haggerty and Gorelick (1998)や Fleming (1999)によって提唱され，米国 WIPP サイトでのトレーサー試験に応用されている multi-rate 拡散モデルを用いた数値解による方法の 2 種類の方法を用いた。未変質部については，今回のトレーサー試験期間中では有意なトレーサー量が内部に移行した形跡は認められなかった。これは，非常に空隙率が小さい領域を対象とした拡散トレーサー試験において，今回の X 線撮影条件での限界を示しているものと考えられる。

図 5.2-22 に亀裂性岩盤中各領域において算出された間隙水中の拡散係数を示す。この図からわかるように算出された間隙水中の拡散係数は，ガウジで充填された亀裂，再結晶化部，変質部の順で小さくなることがわかる。図 5.2-22 には，また，釜石鉱山において Ota et al. (1998)によりタイプの分類が行われた岩盤のサンプルを用いて Sato et al. (1997)が拡散試験により取得した岩盤の間隙水中の拡散係数も併せて示している。これらの値は，本研究で算出された間隙水中の拡散係数値に比べ大きめであることがわかる。

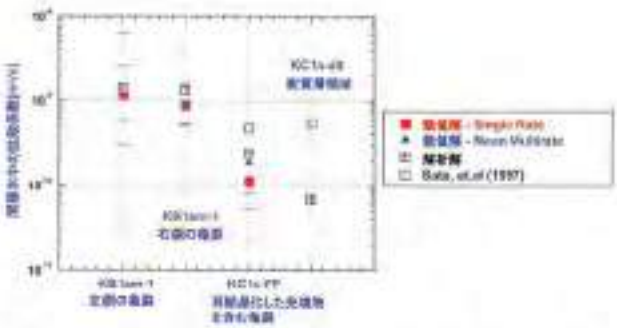


図 5.2-22 亀裂性岩盤中各領域における間隙水中の拡散係数

（変質層領域（KCIa-alt）における間隙水中の拡散係数はほぼ数値解，解析解ともに同じ値で算出されたため，図中では重なっている。）

③ まとめ

本研究で実施した亀裂性岩盤中に存在する特性の異なる領域を対象とした拡散試験からわかるように，ガウジで充填された亀裂中の拡散係数が最も大きく，変質部から未変質部への経路となる。このことは，亀裂中の水みちと接している基質部のみがマトリクス拡散に寄与するというこれまでの性能評価モデルの保守的仮定を改善し，バリア性能の向上が期待できる。また，間隙水中の拡散係数は，ガウジで充填された亀裂，再結晶化部，未変質部の順で小さくなることがわかった。未変質部については今回の撮影条件の限界のため拡散係数を算出できなかった。

スウェーデンのエスポ地下研究施設（HRL）で実施されたトレーサー試験では，5m スケールの試験に較べ，100m スケールでの試験は，遅延効果が 20～60%大きいことが確認されている。これは透水性の低い交差亀裂への拡散に起因する可能性がある。このような原位置現象を解明するために，今後，交差亀裂を含むサンプルを用いた拡散試験を実施する予定である。

参考文献

Altman, S.J. Uchida, M., Tidwell, V.C., Boney, C.M. and Chambers, B.P. (2001) : Visualization and Quantification of Heterageneous Diffusion Rate in Granodiorite Samples by X-Ray Absorption Imaging, SANDIA REPORT, SAND2001-1842.

Crank, J. (1975) : The Mathematics of Diffusion, Clarendon Press, Oxford.

Fleming, S.W. (1999) : Single and Multiple Rate of Nonequilibrium Diffusive Mass Transfer at the Laboratory, Field and Regional Scales in the Culebra Member of Ruster Formation, New Mexico, Master Thesis from Oregon State University, June.

Haggerty R.S. and Gorelick, S.M. (1998) : Modeling Mass Transfer Processes in Soil Column with Pore Scale Heterogeneity, Soil Sci. Soc. Am. J., 62, pp.62-74.

Osawa,H., Sasamoto, H., Nohara, T., Ota, K., and Yoshida, H. (1995) : Development of a Conceptual Flow-Path Model of Nuclide Migration in Crystalline Rock - A Case study at the Kamaishi In-Situ Test Site, Japan -, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 353, pp.1267-1273.

Ota, K., Amano, K. and Ando, T. (1998) : In situ Nuclide Retardation in a Fractured Crystalline Rock, the Kamaishi In situ Test Site, Proc. International Workshop for the Kamaishi In Situ Experiments, Kamaishi, Japan, pp.24-25, Augusut, 1998, JNC Tech. Rep. JNC TN7400 99-007.

Sato, H., Shibutani, T., Tachi, Y. Ota, K., Amano, K. and Yui, M. (1997) : Diffusion behaviour of Nuclides Considering Pathways in Fractured Crystalline Rocks, JNC Technical Report, JNC TN8410 97-127.

Tidwell, V.C., and Glass, R.J. (1994) : X ray and Visible Light Transmission for Laboratory Measurement of Two-Dimensional Saturation Fields in Thin-Slab Systems, Water Resour. Res., 30(11), pp.2873-2882.

3-3) 単一亀裂・原位置トレーサー試験／室内試験（グリムゼル原位置試験研究）

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，地質環境中での放射性核種の移行・遅延を評価するためには，考慮すべき放射性核種の移行・遅延プロセスとそのプロセスが生じる場の構造を抽出し単純化（モデル化）することが必要である。実際の地質環境は極めて複雑であり，その特性や生じる現象などを完全に評価することは不可能であるためである。例えば，「第１次取りまとめ」や「第２次取りまとめ」では，亀裂性岩盤中の放射性核種の移行・遅延を評価するために，二重空隙コンセプトに基づく平行平板モデル（地下水流動に伴う放射性核種の移流・分散が生じる開口チャンネルと濃度勾配による放射性核種の拡散の場となるマトリクスを表現したモデル）を適用した。

このようなモデルを適用した放射性核種の移行・遅延評価では，モデル化における単純化がその評価結果に有為な影響を与えないこと，あるいは，モデル化における条件や仮定が妥当であるならば，モデル化における単純化により保守的な評価結果が導かれることを確認することが必要である（Smith et al., 2001a）。さらに，設定したパラメータの妥当性（現実性や保守性）についても確認することが不可欠である。しかしながら，地層処分システムの性能評価における空間・時間スケールは極めて大きいため，単純化したモデルによる評価結果の妥当性をそのスケールで確かめることは不可能である。したがって，対象とする空間・時間スケールが小さくとも，地下研究施設などにおいて実際の地質環境を対象に，単純化したモデルとそのモデル化における条件や仮定の妥当性を確認することにより，そのモデルが地層処分システムの性能評価に反映できることの信頼性を示すことが重要である。

スイス放射性廃棄物処分協同組合（Nagra）とサイクル機構では，スイスアルプス中央部に位置するグリムゼル原位置試験場（図 5.2-23）において，放射性核種の移行・遅延モデルの妥当性をできるだけ現実的かつ直接的に評価することを目的とした原位置試験研究を実施してきた（例えば，太田・Alexander, 2001；Ota et al., 2001）。具体的には，グリムゼル原位置試験場に分布する結晶質岩（グリムゼル花崗閃緑岩）中の単一透水性亀裂を対象に，孔間トレーサー試験および放射性核種の移行・遅延プロセスと場を直接的に評価する試験研究に加え，それらを補完する室内調査・試験やナチュラルアナログ研究などを行った。

図 5.2-23　グリムゼル原位置試験場の位置

② これまでの成果

i）原位置トレーサー試験

グリムゼル原位置試験場の研究用トンネルを横切る単一透水性亀裂を対象に，地質学的・水理学的・地球化学的特性の調査結果に基づき，想定されるプロセスと場の構造を単純化したモデルを構築した（図 5.2-24）。

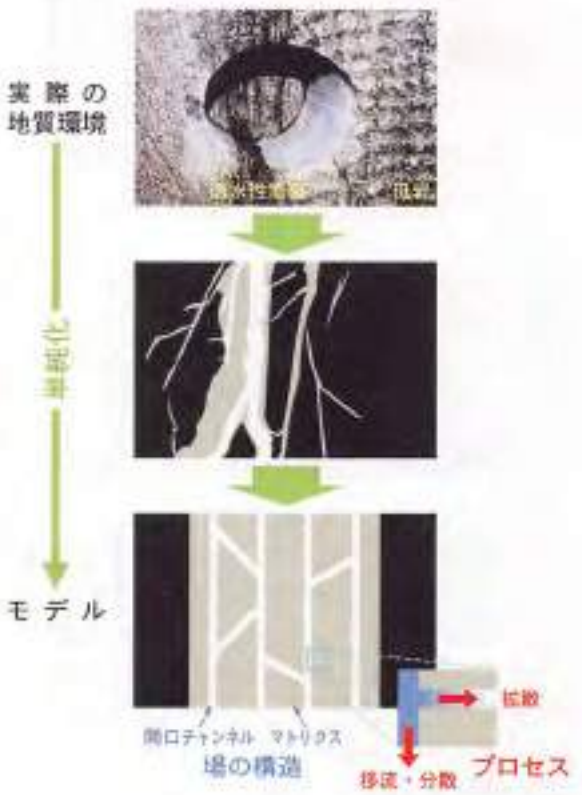


図 5.2-24　二重空隙コンセプトに基づくモデル化

このモデルの妥当性は，異なる条件下における孔間トレーサー試験の予測結果と実際の試験結果との比較をとおして評価した（例えば，Heer and Smith, 1998）。原位置でのトレーサー試験は，単一透水性亀裂に直交し孔間距離の異なる 2 本の試錐孔において，一方の試錐孔からトレーサーを注入し，他方の試錐孔で破過するトレーサーを回収する手法で行った（図 5.2-25）。トレーサーは最初に非収着性のウラニン（蛍光染料），^{3}He，^{3}H，^{82}Br，^{125}I を使用し，次に弱収着性の ^{22,24}Na，^{86}Rb，^{85}Sr，最終的に比較的強い収着性を示す ^{137}Cs を用いた（Frick et al., 1992；Smith et al., 2001b）。

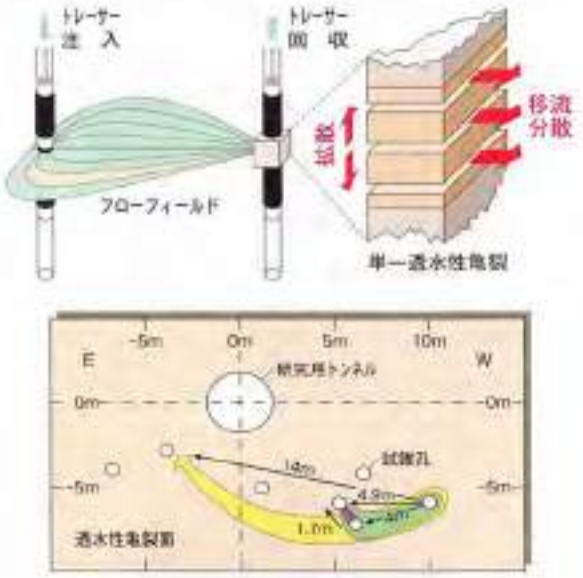


図 5.2-25　孔間トレーサー試験の手法

孔間トレーサー試験の結果について，それと同じフローフィールドで非収着性トレーサーを用いた試験，あるいは孔間距離の異なるフローフィールドで同じトレーサーを用いた試験の結果に基づき較正したモデルと室内試験データを用いて予測した結果（破過曲線）との比較を行った結果，両者は良く一致した（図 5.2-26）。また，試験結果から導出された地下水流動に寄与する空隙率，分散長，拡散係数などのパラメータは，試験対象亀裂の地質学的・水理学的特性を矛盾なく説明できた。これらの結果から，二重空隙コンセプトに基づいて単純化した放射性核種の移行・遅延モデルは，対象とする空間-時間スケールにおいて，考慮すべきプロセスと場の構造を適切に表現していることが確認できた（Smith et al., 2001a）。

さらに，試験結果から導出された放射性核種の収着係数と室内試験による値は良く一致する（表 5.2-7）ことから，条件の違いを適切に考慮することにより，室内試験で求めた収着係数を実際の地質環境条件にも適用できる可能性が示された。

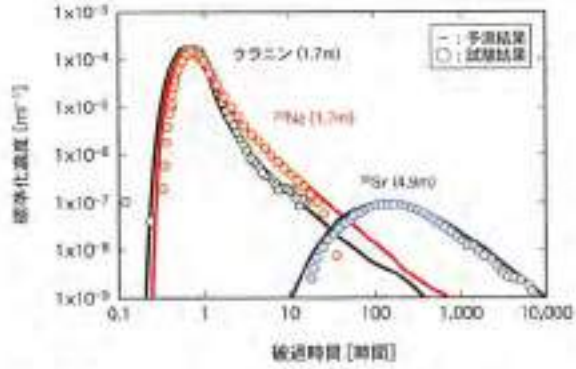


図 5.2-26　孔間トレーサー試験の予測結果と試験結果との比較（一例）

表 5.2-7　室内試験および原位置試験により求めた収着係数の比較（一例）

収着係数の測定手法	収着係数 [x10⁻³ m³/kg]	
	Na	Sr
室内試験		
・水－岩石反応試験	0.13	7.6
・バッチ式収着試験	0.45－1.3	13－41
・溶液浸透試験	0.1－0.3	未測定
原位置試験		
・孔間トレーサー試験	0.13	21

ii）放射性核種の移行・遅延プロセスと場の直接的評価

a）単一透水性亀裂中の放射性核種の移行・遅延

孔間トレーサー試験において実施した放射性核種の移行・遅延モデルの妥当性評価をさらに進展させることを目的に，単一透水性亀裂中の放射性核種の移行・遅延プロセスと場の構造を直接的に評価した。具体的には，孔間トレーサー試験で対象としたフローフィールド（孔間 1.7 m）において，強収着性の放射性核種（^{152}Eu，^{234,238}U，^{237}Np，^{99}Tc，^{60}Co，^{113}Sn，^{75}Se）および非放射性 Mo を注入した後，フローフィールドと収着した放射性核種を化学的・物理的な擾乱を与えないようにエポキシ系レジンにより固定し，直径 368 mm の三重管オーバーコアリングによりフローフィールドを含む単一透水性亀裂を開削した（Frieg et al., 1998）。また，採取した岩石試料を用い，放射性核種の移行経路の構造や収着サイトの三次元的分布などを同定した（Möri et al., 2002a）。

その結果，試験対象亀裂中には複雑なチャンネルが認められ，放射性核種はチャンネル中の断層粘土に選択的に収着し分布していること（図5.2-27），および全てのチャンネルが放射性核種の移行・遅延に寄与するとは限らず，チャンネル構造が放射性核種の移行・遅延を規制する一要因となっていることが明らかになった。また，試験対象亀裂中の放射性核種は，二重空隙コンセプトに基づく放射性核種の移行・遅延モデルにより予測したほど移行せず，実際には注入した試錐孔の近傍に留まることから，そのモデルの保守性を確認することができた（Mori et al., 2002a）。

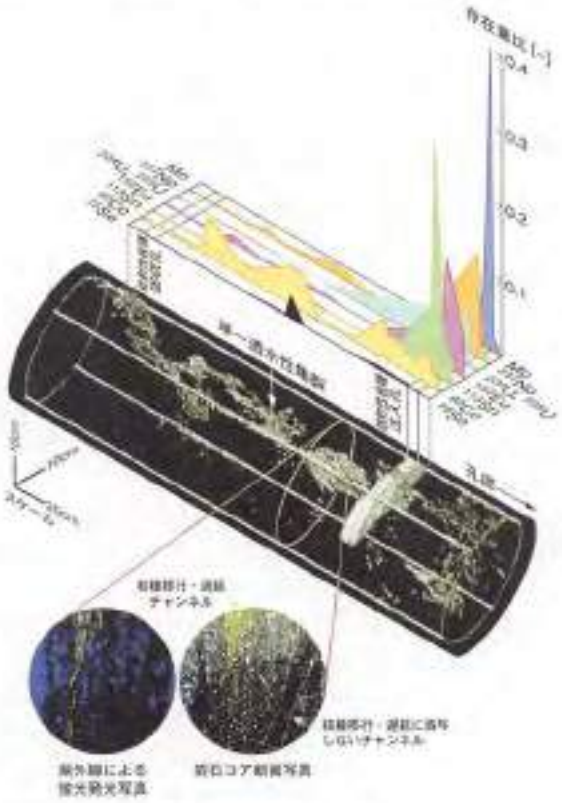


図5.2-27　単一透水性亀裂中のチャンネルおよび強収着性放射性核種の分布

b）マトリクス中の連結空隙の構造特性

亀裂性岩盤中での重要な放射性核種の移行・遅延プロセスの一つであるマトリクス拡散について，そのプロセスを規制する連結空隙の構造特性を原位置で評価した。具体的には，単一透水性亀裂およびグリムゼル花崗閃緑岩マトリクスを対象に，亀裂に直交する複数の試錐孔からアクリル系レジンをわずかな加圧条件下で注入し，レジンにより染色した岩石試料を直径200 mmのオーバーコアリングにより採取した。この試料を用い，マトリクス中の連結空隙の広がりや幾何学的形状などを定量的に把握するとともに，レジンにより染色していない岩石試料を用いた室内調査・試験の結果との比較を行った（Mori et al., 2002b）。

その結果，グリムゼル花崗閃緑岩マトリクスには連結空隙ネットワークが連続的に分布し，その幾何学的形状（図5.2-28），とくに屈曲構造は放射性核種の拡散を強く規制していることが確認された。実際にグリムゼル花崗閃緑岩中の透水性亀裂の近傍では天然ウラン系列核種のマトリクス拡散が生じており（例えば，Alexander et al., 1990），連結空隙ネットワークは明らかに放射性核種のマトリクス拡散の場として寄与している。

図5.2-28　グリムゼル花崗閃緑岩中の連結空隙の幾何学的形状（一例）

原位置で観察される連結空隙ネットワークの構造特性や空隙サイズなどは，物理的な擾乱を被った（通常，室内調査・試験に用いられる）岩石試料中のそれとは明らかに異なる。例えば，室内調査・試験で求めた空隙率は原位置での値よりも2～3倍も大きく（表5.2-8），室内調査・試験試料にはサイズの大きな空隙が卓越する。室内調査・試験の岩石試料中に観察される空隙の半分以上は，明かに岩石試料の採取時の応力解放や既存の空隙の伸張などにより生じたものと考えられる（Ota et al., 2002）。

表5.2-8　原位置試験試料および室内試験試料を用いて測定した空隙率の比較

空隙率の測定手法	マトリクスの空隙率 [%]
室内調査・試験試料	
・水中飽和法	0.66 - 0.77
・水銀圧入法	0.53 - 0.69
・レジン染色－化学分析法	0.68 - 0.80
原位置試験試料	
・化学分析法	0.21 - 0.33

この場合，拡散係数は大きく，イオン排斥効果は低く見積もられ，結果的に亀裂性岩盤の放射性核種の遅延能力は過大評価されることとなる。したがって，地層処分システムの性能評価においては非保守的な評価結果を導くこととなる。

③ まとめ

これまでの原位置試験研究をとおして，「第2次取りまとめ」などに適用した，二重空隙コンセプトに基づいて単純化した放射性核種の移行・遅延モデルとそのモデル化の手法の妥当性を確認することができた。また，亀裂性岩盤中の透水性亀裂中のチャンネル構造，断層粘土への放射性核種の収着ならびにマトリクス拡散は，空間・時間スケールが小さい場合でも，亀裂性岩盤中の放射性核種の移行・遅延を規制する主要因となっていることが確認された。さらに，室内試験・試験データの実際の地質環境条件への適用については，収着係数は可能であるものの，空隙率などの空隙構造特性に関わるパラメータは困難であることが明らかとなった。以上の成果とあわせ，安全評価モデルの信頼性を向上させるためには，地下研究施設における原位置試験研究は極めて有効であり，その重要性が確認できた。

現在，グリムゼル原位置試験場では，コロイドと放射性核種を用いた原位置試験研究を実施しており，今後はこの試験研究をとおして，亀裂性岩盤中の放射性核種の移行・遅延モデルの高度化を図っていく計画である。

参考文献

Alexander, W.R., McKinley, I.G., MacKenzie, A.B. and Scott, R.D. (1990) : Verification of matrix diffusion in granite by means of natural decay series disequilibria. Sci. Basis Nucl. Waste Manag. XIII, pp. 567-576.

Frick, U., Alexander, W.R., Baeyens, B., Bossart, P., Bradbury, M.H., Bühler, Ch., Eikenberg, J., Fierz, Th., Heer, W., Hoehn, E., McKinley, I.G. and Smith, P.A. (1992) : Grimsel Test Site: The radionuclide migration experiment - overview of investigations 1985-1990. Nagra Tech. Rep. NTB 91-04, Nagra, Wettingen, Switzerland.

Frieg, B., Alexander, W.R., Dollinger, H., Bühler, C., Haag, P., Wüst, A. and Ota, K. (1998) : In situ impregnation for investigating radionuclide retardation in fractured repository host rocks. Jour. Contam. Hydrol., 35, pp. 115-130.

Heer, W. and Smith, P.A. (1999) : Modelling the radionuclide migration experiments at Grimsel. What have we learned? Sci. Basis Nucl. Waste Manag. XXI, pp. 663-670.

Möri, A., Frieg, B., Ota, K. and Alexander, W.R. (eds) (2002a) : Grimsel Test Site - Investigation Phase IV (1994-1996) : The Nagra-JNC in situ study of safety relevant radionuclide retardation in fractured crystalline rock III: the BRP project final report. Nagra Tech. Rep. NTB 00-07, Nagra, Wettingen, Switzerland (in press)

Möri, A., Schild, M., Siegesmund, S., Vollbrecht, A., Adler, M., Mazurek, M., Ota, K., Haag, P., Ando, T. and Alexander, W.R. (2002b) : 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 Tech. Rep. NTB 00-09, Nagra, Wettingen, Switzerland. (in press)

太田久仁雄，Alexander, W.R. (2001) : 結晶質岩を対象とした放射性核種の移行・遅延モデルの構築と妥当性評価 -Nagra/JNC 原位置試験研究の概要-. サイクル機構技報 No.11 (2001.6), pp.119-128.

Ota, K., Alexander, W.R., Smith, P.A., Möri, A., Frieg, B., Frick, U., Ueki, N., Amano, K., Cowper, M.M. and Berry, J.A. (2001) : Building confidence in radionuclide transport models for fractured rock - the Nagra/JNC Radionuclide Retardation Programme. Sci. Basis Nucl. Waste Manag. XXIV, pp. 1033-1041.

Ota, K., Möri, A., Alexander, W.R., Frieg, B. and Schild, M. (2002) : Influence of the mode of matrix porosity determination on matrix calculations - laboratory data relevant to in situ conditions? Jour. Contam. Hydrol. (in press)

Smith, P.A., Alexander, W.R., Kickmaier, A., Ota, K., Frieg, B. and McKinley, I.G. (2001a) : Development and testing of radionuclide transport models for fractured rock: examples from the Nagra/JNC Radionuclide Migration Programme in the Grimsel Test Site, Switzerland. Jour. Contam. Hydrol., 47, pp. 335-348.

Smith, P.A., Alexander, W.R., Heer, W., Fierz, T., Meier, P.M., Baeyens, B., Bradbury, M.H., Mazurek, M. and McKinley, I.G. (2001b) : Grimsel Test Site - Investigation Phase IV (1994-1996): The Nagra-JNC in situ study of safety relevant radionuclide retardation in fractured crystalline rock I: Radionuclide Migration Experiment - overview 1990-1996. Nagra Tech. Rep. NTB 00-09, Nagra, Wettingen, Switzerland.

3-4) 単一亀裂・モデル開発（LBNL 共同研究）

① 課題と概要

「第２次取りまとめ」においては，亀裂性岩盤中の核種移行モデルとして，亀裂の透水量係数の不均質性に着目し，透水量係数の異なる複数の一次元平行平板モデルを重ね合わせたモデルを適用している。また，この一次元平行平板モデルの重ね合わせについては，花崗岩を対象として，三次元ネットワークモデルを用いた核種移行との比較解析が行われ，一次元平行平板モデルの重ね合わせが近似的な評価結果を与えることが述べられている。

一次元平行平板モデルで考慮している核種移行プロセスは，亀裂中では，移流，分散，岩石基質部への拡散，亀裂表面への収着及び放射性崩壊であり，岩石基質中では，拡散，基質部に存在する岩石鉱物への収着および放射性崩壊である。これらの核種移行プロセスのほかに，一次元平行平板モデルでは，亀裂開口幅，マトリクス拡散に寄与する面積の全亀裂面積に対する割合，およびマトリクス拡散深さからなる平行平板亀裂の幾何学的パラメータが考慮されている。

この一次元平行平板モデルは，亀裂を含む岩盤内で本来三次元的に生じる核種移行に係る諸プロセスを保守的仮定に基づき選別し，単純化して導出したモデルであるので，実際の亀裂性岩盤中で生じると考えられる核種移行に係る諸プロセスをできるだけ考慮した詳細なモデルと比較することにより，その信頼性を確認しておくことは重要な課題である。

上述のように，「第２次取りまとめ」においては，一次元平行平板モデルの重ね合わせは亀裂ネットワーク構造を考慮した核種移行解析に対して近似的な結果を与えることが確認されている。しかしながら，亀裂開口幅の不均質性，それによって生じる流れのチャンネリング，流れに寄与しない部分の拡散現象，亀裂内充填物への収着，亀裂交差部における流れおよび物質移動現象等の亀裂内部で生じる諸プロセスが核種移行に与える影響については「第２次取りまとめ」では核種移行パラメータ設定の際に考慮されているものの具体的なモデル評価はなされていない。したがって，本研究では，「第２次取りまとめ」の評価モデルで保守的に無視されているこれらの亀裂内のおける諸プロセスのうち，特に，亀裂開口幅の不均質性，流れに寄与しない部分の拡散現象について，その影響を確認するための解析を実施した（Tsang, 1999；Tsang and Karasaki, 2000；Tsang and Karasaki, 2001）。本報告は，亀裂性媒体中の物質移行プロセスの信頼性を評価するために米国ローレンスバークレー国立研究所（以下，「LBNL」という）との間で実施している共同研究の成果の一部である。

② これまでの成果

Tsang et al.（1991）はスウェーデンのストリパ鉱山で実施された原位置試験Stripa3Dの解析において，流れのチャンネリングに関する詳細な理論的研究に基づき，図5.2-29に示す３枚の交差亀裂からなる比較的単純な亀裂ネットワーク中の流れのチャンネリングモデルを開発し，トレーサー試験に適用し，複数のピークを有する試験結果との良好な一致を得ている。したがって，本研究においても，原位置試験によって妥当性が確認されている図5.2-29に示す比較的単純な流れのチャンネリングモデルをベースに亀裂性媒体中の物質移行プロセスの信頼性を評価するための解析を実施した。

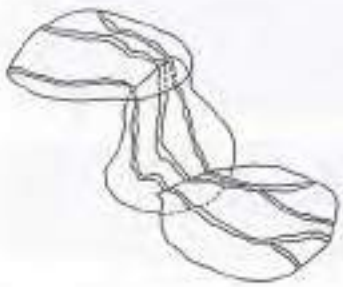


図5.2-29　三つの交差亀裂で構成される流れのチャンネリングの概念図（Tsang et al., 1991）

i）亀裂開口幅の不均質性の影響

図5.2-29に示す三つの亀裂内における亀裂開口幅すなわち亀裂の透水係数の不均質性がそこでの物質移行に与える影響を評価するために図5.2-30に示す有限要素法による数値モデルを考えた。

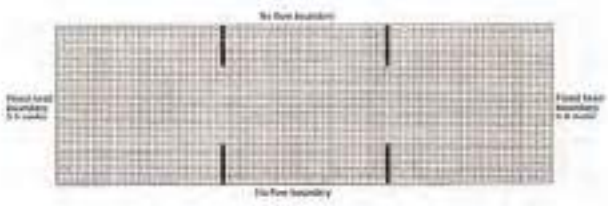


図5.2-30　有限要素メッシュと境界条件

このモデルでは，実際の亀裂交差部の状態を考え，それぞれの亀裂間の境界部両端に黒いバーで示される低透水性の領域を設定した。モデルの全体長さは 15.25m，幅は 5.00m である。境界条件は左側境界において 5m，右側境界において 0m の水頭値を与え，上下の境界は不透水とした。

解析ケースとしては以下に示す a)～c)の 3 ケースを設定した（図 5.2-31 参照）。

a) 三つの亀裂の透水係数がそれぞれ均質（左側の亀裂から，2.0×10^{-11}，1.0×10^{-12}，0.5×10^{-11} m^2）で低透水性バーは考慮しない。

b) 三つの亀裂の透水係数は a)に同じで低透水性バーを考慮する。

c) a)の三つの亀裂の透水係数をそれぞれの平均値の回りにランダムに不均質場を考え，低透水性バーを考慮する。また，3 枚すべての亀裂内の不均質性に対して標準偏差を 0.8748，相関長を 0.5m とした。

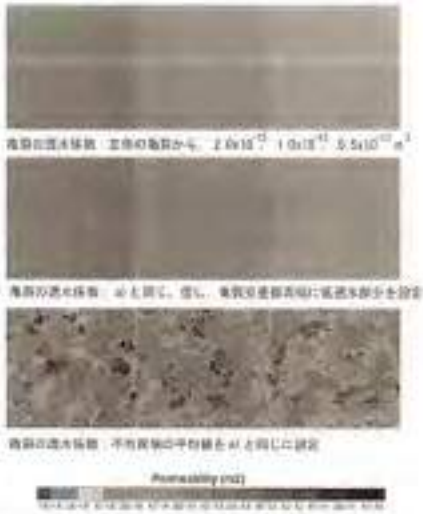


図 5.2-31　亀裂の透水係数を変化させた解析ケース

図 5.2-32 は解析ケース a)～c)の透水係数場を用いた水理解析によって得られた流速場を用いて粒子追跡法により解析を行ったときの 6.0×10^{11} 秒後の粒子の移動経路である。左側境界に粒子を一定間隔に配置した。ケース a)では，亀裂交差部に低透水性部分も考慮していないことから，粒子は直線的に移動している。また，亀裂間の透水係数の違いの影響は見られない。ケース b)では，亀裂交差部に低透水性部分を考慮していることから，粒子はこの部分を迂回して移動していることがわかる。また，解析モデルに対して，上下，左右対称的な移動経路を形成している。ケース c)では，三つの亀裂においてそれぞれの平均値の回りにランダムに不均質場を発生させていることから，流速は低流速を持つ領域から高流速をもつ領域に分布し，その結果として得られる粒子の移行経路は複雑な形状を呈している。また，右側の流出境界に早く到達している粒子とそうでない粒子の差が非常に大きいことが図から読みとれる。ケース a)と b)におけるほとんどの粒子は右側の流出境界に到達しているのに対し，ケース c)のように不均質性を考慮すると一部の粒子しか流出境界に到達しておらず，これは，不均質性を考慮した場合，亀裂の移行物質に対する遅延効果あるいは保持性能が顕著に現われることを示している。

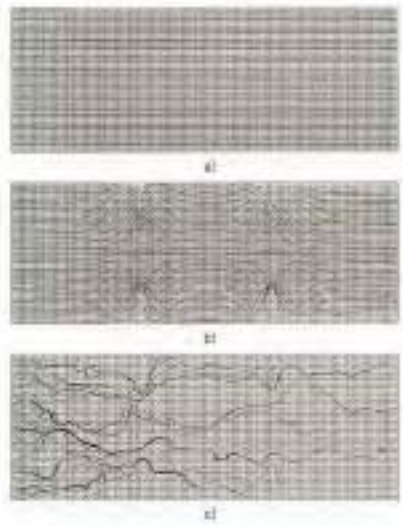


図 5.2-32　粒子追跡法により求めた移行経路

図 5.2-33 は，流出境界に移動してきた粒子の割合を時間の経過にしたがってプロットしたヒストグラムである。この図からもわかるように，ピーク到達時間はケース a)が一番短く，しかもピーク値は三ケース中最大値をもつ。一方，不均質性を考慮したケース c)では二つのピークが現われており，ピーク値はケース a)と b)に比べて非常に小さくなっている。このことは，不均質性を考慮したケース c)においては，主要なチャンネルは二つ存在し，左側の流入境界に設置された粒子はそれぞれのチャンネルに分配されて移動し，分散現象により希釈されながら流出境界まで移動することを意味している。

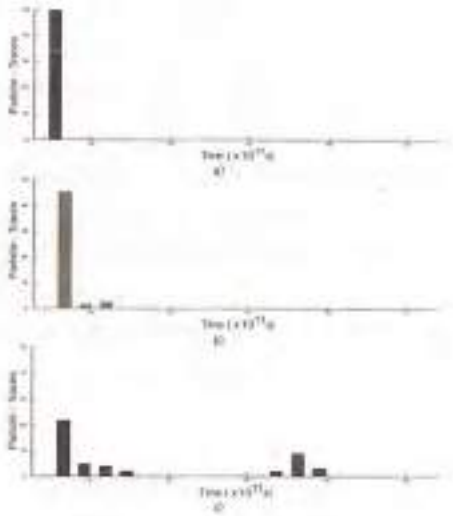


図 5.2-33　流出境界での粒子割合の時間変化

亀裂表面からの岩石基質部へのマトリクス拡散，あるいは変質帯を介した岩石基質部へのマトリクス拡散は亀裂性岩盤の性能評価における重要な核種移行プロセスであるが，ケース a)と b) のように単一の亀裂内において均質性を仮定するとほぼ全領域が流れに寄与するため，その領域に接する亀裂表面からマトリクス拡散が生じる。一方，ケース c)のように不均質性を考慮すると，図 5.2-32c)からもわかるように，亀裂中には流れに寄与する領域と寄与しない領域が出現する。この場合，流れに寄与する領域では，亀裂表面から直接マトリクス拡散するが，流れに寄与しない領域については，流れに寄与する領域から寄与しない領域へ拡散により核種が移行し，そのあと，マトリクス拡散するものと考えられる。したがって，流れに寄与しないと考えられる領域，すなわち，亀裂内充填物，澱み域等への拡散現象が亀裂内の核種移行に与える影響を十分理解し，既存の平行平板モデルの信頼性評価や新たな評価モデル構築へ反映させる必要があるものと考えられる。

ii）流れに寄与しない部分の拡散現象

単一亀裂内に流れに寄与しない部分として澱み域が存在する場合に，その大きさが亀裂内の移行現象にどのように影響を及ぼすかの評価解析を行った。

図 5.2-34 は解析に使用した，a)澱み域のない単一亀裂のモデル，b)単一亀裂内に矩形の澱み域を考慮したモデルである。これらの二つのモデルを用いて，b)のモデルについては矩形の澱み域の深さと幅をそれぞれ変化させて，流れの解析及び粒子追跡法による物質移動解析を実施した。流れの解析では，それぞれのモデルにおける亀裂部の左側境界に 0.01mm，右側境界に 0.00mm の水頭を固定させて水頭分布と流速を計算し，粒子追跡法による物質移動の解析では流出境界における破過曲線を求めた。

図 5.2-34　解析に使用したモデル

図 5.2-35 は澱み域の幅を 10mm で固定し，深さを 0～40mm まで変化させた場合の破過曲線の時間変化である。

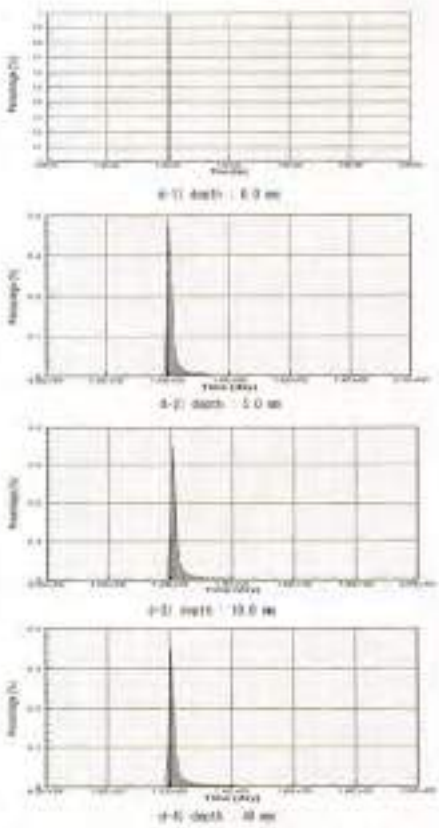


図 5.2-35　澱み域の深さを変化させた解析結果

ケース d-1)は澱み域の深さを考慮していない，すなわち，澱み域を考慮しない場合の流出境界に

おける破過曲線である。流入境界におけるパルス的な粒子の設定条件をそのまま維持して移流のみにより流出境界まで粒子が運ばれたことがわかる。ケースd-2)～d-4)は澱み域の深さを5～40mmまで変化させた場合の流出境界における破過曲線であるが，破過曲線のピーク値，ピーク時間，形状は3ケース間ではほとんど変化していない。

図5.2-36は澱み域の深さを10mmで固定し，幅を5～20mmまで変化させた場合の破過曲線の時間変化である。これらの解析結果をみると，破過曲線は澱み域の幅に大きな影響をうけることがわかる。澱み域の幅が大きくなるにつれて，破過曲線のピーク値は現象し，テールは長くなっている。

以上のことから，亀裂中に澱み域が存在する場合，亀裂中の核種移行は，澱み域の深さの影響はほとんど受けず，幅に大きな影響を受け，幅が大きくなるにしたがって，核種移行率の低減効果も大きくなるものと考えられる。

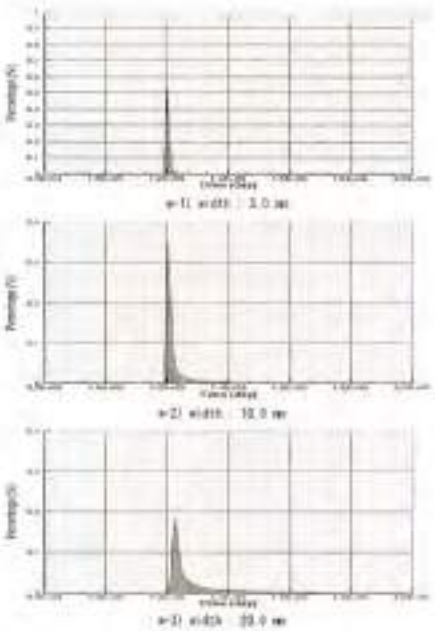


図5.2-36　澱み域の幅を変化させた解析結果

③ まとめ

本報告では，亀裂性媒体中の物質移行プロセスの信頼性評価に関する研究として，「第2次取りまとめ」で考慮していない亀裂性媒体中の移行プロセスのうち，亀裂開口幅の不均質性の影響および流れに寄与しない部分の拡散現象についての影響解析の結果について述べた。ここで述べた研究成果は，LBNLとの共同研究で得られた成果である。今後，LBNLとの共同研究では，これらの成果をサイクル機構が東濃および幌延で推進している深地層の研究施設における調査・研究や諸外国で実施されている地下研究施設での原位置試験に適用することにより，サイト特性調査に基づくモデル化手法の開発及び性能評価とサイト特性調査の連携のための方法論の開発を行う予定である。具体的には，堆積岩系では幌延深地層研究計画，結晶質岩系ではスウェーデンのエスポ地下研究施設（HRL）で実施されている調査や水理試験を研究対象としてLBNLとの共同研究を進めていく。

参考文献

Tsang, C.F., Tsang, Y.W. and Hale, F.V. (1991) : Tracer Transport in Fractures : Analysis of Field Data Based on a Variable Aperture Channel Moedl, Water Resour. Res. Vol.27, No.12, pp.3095-3106.

Tsang, C.F. and Karasaki, K. (1999) : JNC-DOE Collaborative Program on Mass Transport : Characterization and Predictive Technologies, 1998-1999 Annual Report, JNC Technical Report, JNC TY8400 99-001.

Tsang, C.F. and Karasaki, K. (2000) : JNC-DOE Collaborative Program on Mass Transport : Characterization and Predictive Technologies, 1999-2000 Annual Report, JNC Technical Report, JNC TY8400 2000-007.

Tsang, C.F. and Karasaki, K. (2001) : JNC-DOE Collaborative Program on Mass Transport : Characterization and Predictive Technologies, 2000-2001 Annual Report, JNC Technical Report, JNC TY8400 2001-006.

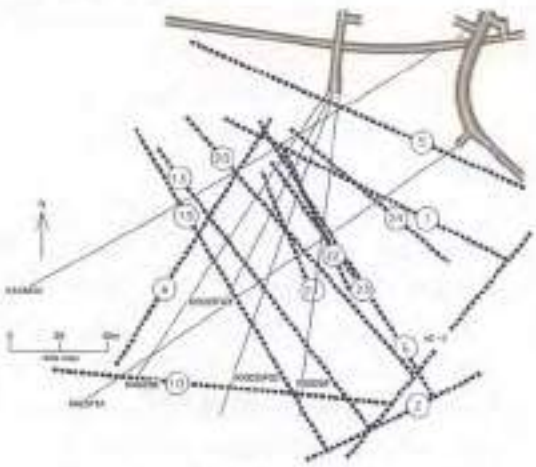
3-5) 亀裂ネットワーク・原位置トレーサー試験（TRUE ブロックスケール試験）

① 課題と計画の概要

「第２次取りまとめ」においては，10～100m スケール（ブロックスケール）の岩盤中における核種の移行・遅延が重要であるとの認識のもと，地層処分の性能評価を実施した。この評価結果の妥当性を確認するためには，ブロックスケールにおける水理・物質移動現象のモデル化の信頼性を評価すること，および水理特性を把握する調査手法の有効性を確認することが必要である。

TRUE ブロックスケール試験は，スウェーデンのエスポ地下研究施設（HRL）で実施されている国際共同研究プロジェクトの一つである。本試験は亀裂性岩盤における 10～100m 規模の亀裂ネットワークを対象とした水理・物質移動プロセスの理解を目的として，1996 年から開始され，サイクル機構は 1998 年から参加している。

TRUE ブロックスケール試験は，①予備段階，②予察的な特性調査段階，③詳細特性調査段階，④トレーサー試験段階，⑤評価段階からなる。これまでに掘進長 100～200m の試錐孔 6 本の掘削，および地質学的・地球物理学的・水理学的調査などが実施され，複数の透水性亀裂が推定されている（図 5.2-37）。



実線：ボーリング孔，点線：透水性亀裂

図 5.2-37　構築された地質構造モデル

その結果に基づき水理地質構造モデルが構築・改良されるとともに，推定された亀裂ネットワークを対象とした孔間水理試験やトレーサー試験などが実施された。また，これらの試験について，複数の異なるモデル化手法（Discrete Fracture Model，Stochastic Continuum Model，Channel Network Model）を用いて予測解析を実施した。このうちサイクル機構は，水理地質構造モデルの構築・改良や Channel Network Model によるトレーサー試験の予測解析などを担当した。

本試験は 2001 年までに現場での試験およびモデル解析を終了し，現在は評価・取りまとめ段階にある。

② これまでの成果

これまでにサイクル機構は主として，ｉ）水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析，ii）トレーサー試験の解析を実施した。おもな成果は以下に示すとおりである（吉添・Dershowitz, 2002）。

ｉ）水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析

水理地質構造モデルの構築の過程では，地下水流動解析やトレーサー試験の予測解析などに資するため，地質構造モデルで考慮している構造要素（亀裂）の各試錐孔での特徴（走向傾斜や岩質など）を整理し概念化（図 5.2-38）するとともに，透水試験および流体検層の結果や掘削時の圧力干渉などの全ての情報を総合的に解釈した。

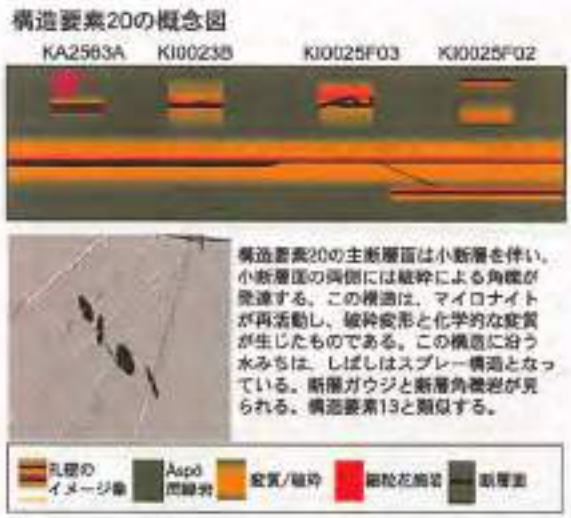


図 5.2-38　概念化された亀裂構造（一例）

また，構築した水理地質構造モデルをもとに地下水浸透解析コード（MAFIC）を用いて孔間水理試験の解析を行った（図 5.2-39）。その結果，解析値は実際の試験結果と概ね一致し，構築された水理構造モデルの妥当性が示された。

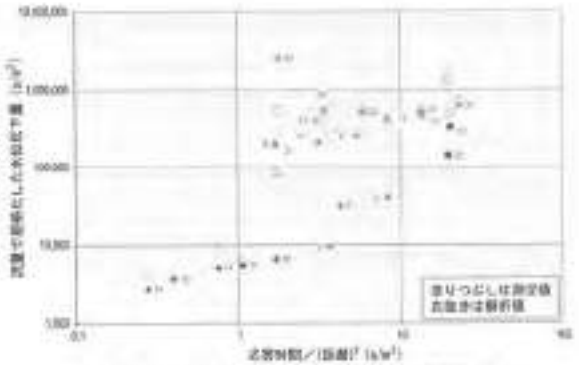


図 5.2-39　孔間試験の解析結果

ii）トレーサー試験の解析

TRUE ブロックスケールのトレーサー試験はフェーズ A から C の 3 段階で，ソースとシンクの組み合わせを変えた 20 通りの試験が実施され，各々のトレーサー試験についての解析が実施された。この解析に使用した概念モデルを図 5.2-40 および 5.2-41 に示す。このモデルでは，ソースとシンクの間に亀裂の交差部が存在する場合において，ソースとシンクに水みちをモデル化したパイプが直接連結するケースと亀裂交差部を介して別のシンクに連結するケースを考慮した。さらに，モデルには，微小構造の観察結果に基づいて概念化された四つのゾーン（亀裂面，その内側の破砕帯，変質帯，未変質帯）を表現した。

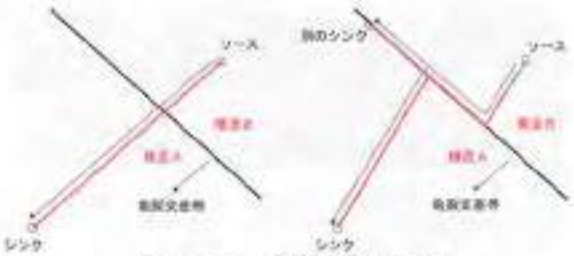


図 5.2-40　移行経路モデル

図 5.2-41　微小構造モデル

図 5.2-42 にトレーサー試験の感度解析結果と実際の試験結果の一例を示す。

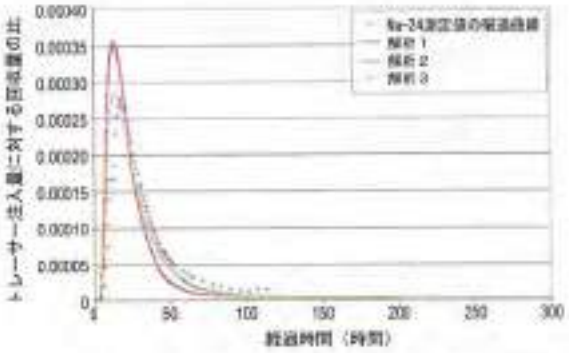


図 5.2-42　トレーサー試験結果と予測解析結果との比較（一例）

感度解析のパラメータ（厚さと空隙率）は図 5.2-41 に示した微小構造のモデルに示した値の範囲で設定した。この結果，解析結果は試験結果を概ね表現できているものの，微小構造モデルの各ゾーンの厚さと空隙率を小さく設定した時に破過曲線のテイル（尾）部が実測値を再現できない場合や，破過曲線を再現するように調整した収着係数を室内での実測値と比較すると，数倍～100 倍程度大きい場合も認められた。

③ まとめ

これまでの TRUE ブロックスケール試験の成果として，調査手法に関しては，150m を越えるスケールの亀裂を介した岩盤の特性調査に，釜石鉱山で適用したボーリング掘削時の圧力干渉測定が有効であること，100m 規模の亀裂ネットワークを含むブロックにおいて，品質管理されたトレーサー試験が実施可能であることが確認できたことなどが挙げられる。

一方，トレーサー試験の解析に関しては，テイル（尾）部のトレーサー回収率や解析に使用した収着係数などは実測値を表現できていない場合も認められた。したがって，今後の課題として，移行経路の詳細な構造，亀裂交差部を含む岩盤中の不均質性，卓越流がある場合の物質移行特性，割れ目幅の評価が挙げられる。これらを解決するために，これまでの成果をもとに，新たなプロジェクト(TRUE CONTINUATION)を立ち上げ，展開することとしている。

参考文献

吉田　誠，Dershowitz,W.（2002）：亀裂ネットワークモデルによる解析作業の実施および長期揚水試験の計画策定に関する支援，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 2002-002。

3-6) サイトスケール・原位置試験（水理－地下水化学総合モデル）

① 課題と計画の概要

近年，水理モデルを構築あるいは検証する上での地球化学データの利用の重要性が認識されてきている。利用可能な地球化学データとしては，地下水化学，地下水年代，鉱物結晶形などがある。高レベル放射性廃棄物の地層処分においては，モデルの信頼性の確保が重要な課題であり，水理モデルの妥当性を水理データ以外のデータを用いて検証するための努力がなされている。水理と地下水化学の統合については，世界的にも手法が開発段階にあり，近年スウェーデンのエスポ地下研究施設(HRL)において，坑道掘削に伴う地下研究施設周辺の水位低下の予測解析（例えば，Uchida et al., 1997）に加え，坑道等における湧水の水質変化に着目し，水理と地下水化学を統合したモデル化に関する検討が行われた。サイクル機構は，「第２次取りまとめ」以降，実際の地質環境に対するモデル化技術開発を進めており，その一環としてエスポ地下研究施設の水理・物質移行モデリングタスクフォースを活用して必要な技術開発を行った（内田ほか，2002）。

② これまでの成果

エスポ地下研究施設（HRL）は，図5.2-43に示すようにスウェーデン南部のエスポ島に位置し，3600mの斜坑で地下460mに達している。地質は主として先カンブリア紀のスモランド花崗岩とエスポ閃緑岩から構成される。坑道掘削は，1990年10月に開始され，1994年9月に終了した。坑道内には堰が各所に設置され，堰に挟まれた区間毎の流量が測定された。また，エスポ島およびその周辺に掘削された63孔のボーリング孔で水頭の経時変化が測定された。地下水水質データに関しては，ボーリングと坑道の98箇所でNa, K, Ca, Mg, HCO_3, Cl, SO_4, ^3H, ^{14}C, ^{18}O等の経時変化が測定された。

i）モデル化の基本方針

モデル化は，坑道切羽が2900mまでのデータを用いたキャリブレーションと2900～3600mまでのデータに対する予測解析の2段階に分けて行った。この際，水質データの有効性を示す上で，水理データだけに対するキャリブレーションを行ったモデルと水質データを加えたキャリブレーションを行ったモデルを比較することとした。

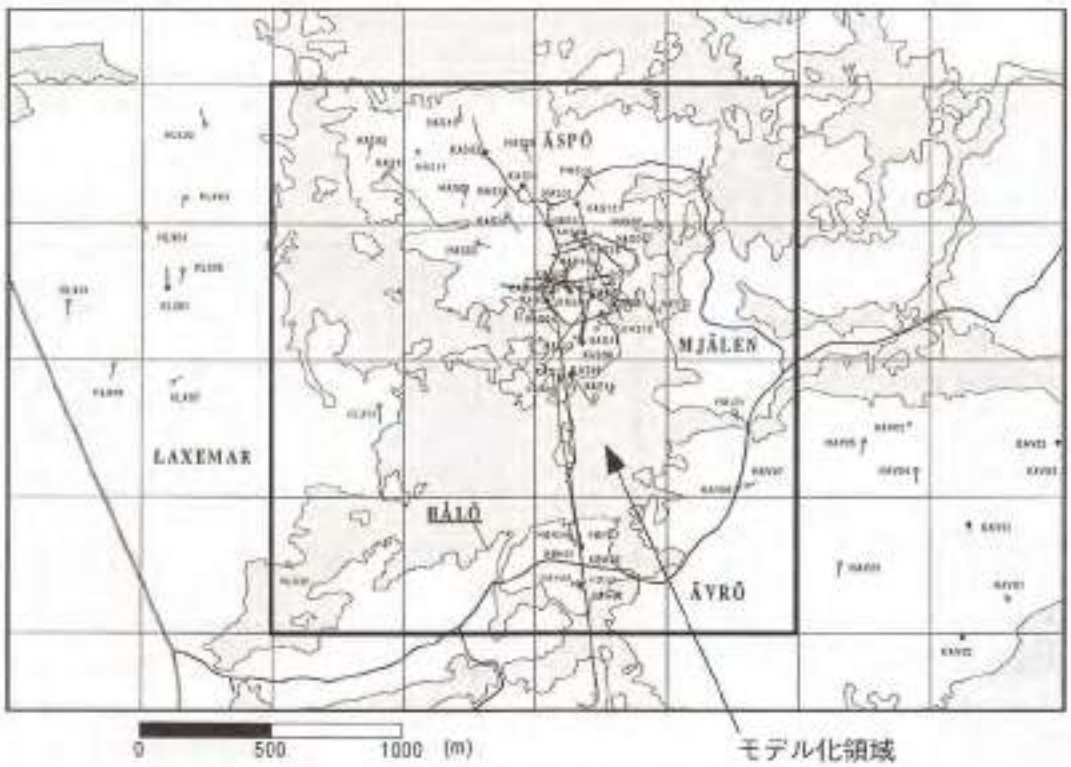


図5.2-43　エスポ地下研究施設（HRL）の位置とモデル化領域

ii）モデル化領域と地質構造モデル

モデル化領域は，図 5.2-43 に示すようにアクセス坑道の螺旋状部を中心とし，エスポ島全体を含む 2km×2km×深さ 1km とした。

主要な地質構造として，図 5.2-44 に示した 22 本の断層をモデル化した。また，健岩部については，トレース長および透水量係数の実測値から得た確率密度関数を基に統計的に亀裂を発生させた。使用した主なパラメータを表 5.2-9 に示す。

図 5.2-44　モデル化した主要な断層

表 5.2-9　水理地質構造モデルのパラメータ

割れ目発生手法	決定論的割れ目	統計的割れ目
割れ目の種類	断層	健岩部の割れ目
割れ目中心位置	22 本の断層の地表トレース中央 (Rhén et al., 1997)	Baecher/Bart モデル
割れ目規模	地表トレース長 (平均1429 m)	対数正規分布 (平均：μ=13.7m, σ=12.7m)
割れ目方向	22 本の断層の方位，傾斜 (Rhén et al., 1997)	Bootstrap法
透水量係数	Rhén et al., 1997	対数正規分布 (μ=9x10^{-9}m^2/s, σ=8x10^{-8}m^2/s)
貯留係数	0.001 T[10] (T：透水量係数)	0.001 T^{-2} (T:透水量係数)
亀裂密度 (P_{32}：亀裂面積合計/領域体積)	22本の断層の地表トレース	P_{32} = 0.020214 (m^2/m^3) (22704 割れ目)
物質移行開口幅	2 T[10] (T：透水量係数)	2 T[10] (T：透水量係数)

iii）水理境界条件

水理境界については，底面は不透水境界，側方境界は広域水理モデル(Svensson, 1999)から得られる水頭を与えた固定水頭境界，上部境界については陸上部は浸透量を与えた固定流量境界，バルト海については水頭を 0m とする固定水頭境界とした。坑道内側境界は，各堰で測定された湧水量をグループ節点流量として与えた。

iv）地下水の端成分の同定と初期の混合割合の推定

本解析においては，端成分と呼ばれる起源の異なる地下水を特定し，坑道への地下水流入に伴いどのように地下水が混合したかをモデル化する必要がある。このためには，地下水組成のデータ全てを対象とした主成分分析を含むケモメトリックス法（Cave and Harmon, 1997; Cave and Wragg, 1997）を適用した。ここでは，図 5.2-45 に示すように実測された地下水組成をもたらす端成分の組成とその混合割合を計算した。計算の結果，七つの端成分が特定された。得られた端成分の組成を表 5.2-10 に示す。

図 5.2-45　端成分と混合割合の計算

表 5.2-10　端成分の組成

端成分	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	HCO_3 (mg/l)	Cl (mg/l)	SiO_2 (mg/l)	$\delta^{18}O$ (‰)	δ^2H (‰)	^3H (TU)	Charge Balance (%)
1	3268.6	5.1	17235.0	0.0	47.1	44601.3	980.3	-11.8	-75.7	14.6	-1.1
2	2066.3	0.0	1379.1	169.1	225.4	6163.5	0.0	-8.8	-60.5	0.0	-1.4
3	456.9	5.5	258.4	16.7	0.0	1207.0	79.8	-12.4	-94.2	0.0	-2.1
4	0.0	1256.2	0.0	2920.1	585.6	0.0	0.0	0.0	0.0	-492.0	92.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	22839.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-100.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	298.8	0.0	0.0	0.0	0.0	-391.3	-100.0
7	2021.3	17.3	205.3	8.9	0.0	3230.3	1254.4	-14.3	-107.9	0.0	-8.6

端成分 1 は滅水（ここでは塩分濃度が 100,000 mg/l 以上の塩水），端成分 2 はバルト海水ないし塩分濃度の高いリトリナ海水，端成分 3 は氷河水，端成分 5,6 は現在の岩石－水反応に微生物の影響が加わったもの，端成分 7 は堆積物中の空隙水，端成分 4 は K,Mg に富む岩石－水反応による水，と解釈された。各端成分の深度分布を図 5.2-46 に示す。

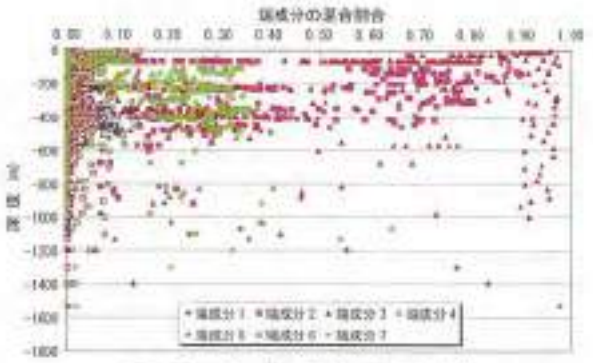


図 5.2-46　端成分の深度分布

v）水理キャリブレーションと坑道掘削開始後の混合割合の推定

水理キャリブレーションの最終モデルの水頭の実測値との比較の一例を図 5.2-47 に示す。坑道掘削開始後の混合割合の推定に際しては，バックトラッキング法を用いて複数の粒子の各時間ステップ毎の位置を観測地点から上流側に追跡し，その位置での地下水の初期の混合割合を粒子に与え，観測地点での地下水の混合割合を各時間における全ての粒子の混合割合を合計することにより計算した。

水理キャリブレーションを行ったモデルを用いて地下水端成分の混合割合を計算すると，図 5.2-48，49 に示すように良好に混合割合を予測した区間と誤差の大きい区間とが認められた。

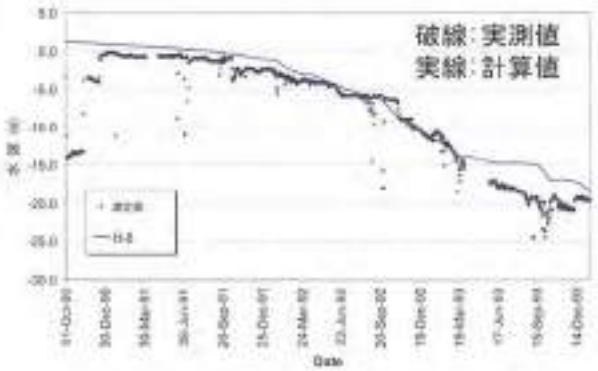


図 5.2-47　KAS08 孔 MA81 区間の水頭変化

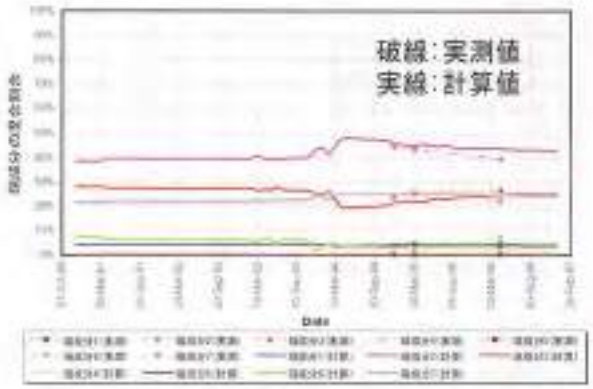


図 5.2-48　KA3005A 孔における端成分の実測と計算の比較

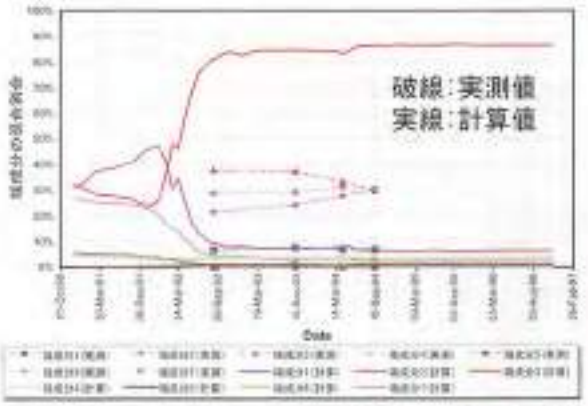


図 5.2-49　KAS07 孔における端成分の実測と計算の比較

vi）地下水組成に対するキャリブレーション

水頭変化は水圧の伝播現象であるのに対して，地下水組成の変化は物質移行現象である。しかし，ここではトンネル掘削後の加速された流速場での現象であるため拡散現象等の緩慢なプロセスの影響は少なく，主として実流速を反映していると考えられる。図 5.2-49 に見られるような実測と計算の違いについては，計算の方が実流速が速いため変化が早く起きていると推定される。この違いは，亀裂の物質移行開口幅の想定に起因する可能性がある。このため，当初は亀裂の物質移行開口幅 $a_T = \alpha T^{1/2}$ を過去のトレーサー試験に基き $\alpha = 2$ に設定したが，EW-1S については 3 倍，EW-3 (z<200) については 3.2 倍，NE-2 については 3.4 倍，NE-4N については 2.5 倍，NNW-2 については 2 倍した。補正後は，図 5.2-50 に物質移行開口幅補正後の結果の一例を示すように実測と計算がほぼ一致した。

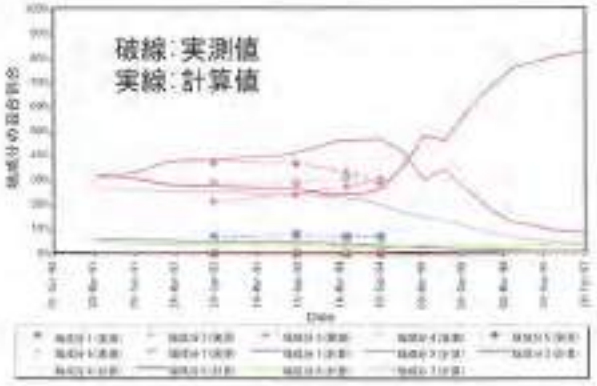


図 5.2-50 KAS07 孔における端成分の実測と計算の比較

③ まとめ

従来の水理モデルは，水頭変化あるいは流量といったパラメータで検証され，途中の移行経路の妥当性に関する検討が困難であった。しかし，今回のように地下水組成データを使用することは，移行経路の情報が追加されることになり，水理モデルの検証および信頼性向上に有効と考えられる。さらに，地下水組成の変化は物質移行現象であり，本来移流に加えてマトリクス拡散が関わるほか，収着性の溶質である場合には収着も関わってくる。今回のような，坑道掘削後の坑道全体が揚水試験と見なせる速い流速場においては移流が卓越するため，実流速の推定，すなわち亀裂性媒体では物質移行開口幅，多孔質媒体においては空隙率の推定・検証に有効と考えられる。

今回開発した手法を我が国の実際の地質環境に適用するとともに，地下水水質に加え鉱物結晶形や鉱物組成，放射性同位体，温度等の種々のデータも加味した水理地質構造モデルの統合的構築手法の確立が今後の課題と考えられる。

参考文献

Cave, M.R. and Harmon, K. (1997) : Determination of Trace Metal Distributions in the Iron Oxide Phases of Red Bed Sandstones by Chemometric Analysis of Whole Rock and Selective Leachate Data, Analyst, 122, pp.501-502.

Cave, M.R. and Wragg, J. (1997) : Measurement of Trace Element Distributions in Soils and Sediments Using Sequential Leach Data and a Non-specific Extraction System With Chemometric Data Processing, Analyst, 122, pp.1211-1221.

Rhén, I. (ed)., Gustafson, G., Stanfors, R. and Wikberg, P. (1997) : Äspö HRL - Geoscientific evaluation 1997/5, Models based on site characterization 1986-1995, SKB Technical Report TR-97-06, SKB, Stockholm.

Svensson, U. (1999) : Äspö HRL Task Force on Modeling of Groundwater Flow and Transport of Solutes, Data delivery No 11, Pressure and salinity boundary conditions, Task No 5 - Integration of hydrology and chemistry.

内田雅大，Bill Dershowitz，Richard Metcalfe，Dawn Shuttle，Mark Cave，竹内真司 (2002) : 地下水水質変化を考慮した水理解析の試み－スウェーデンエスポ地下研究施設での例－，第11回岩の力学国内シンポジウム論文集，D05.

Uchida, M., Dershowitz, W., Sawada, A., Wallmann, P. and Thomas, A (1997) : FracMan Discrete Fracture Modeling for the Äspö Tunnel Drawdown Experiment, SKB Äspö Project International Cooperation Report ICR-9703, SKB, Stockholm.

3-7) トレース長のフラクタル性

① 課題と計画の概要

「第２次取りまとめ」においては，我が国の岩盤は岩種にかかわらず亀裂が支配的な移行経路になっていることから，全ての岩盤は亀裂性岩盤として保守的に評価できるとし，亀裂ネットワークモデルを用いた核種移行解析により天然バリア中の核種移行評価を実施している。亀裂ネットワークモデルのさらなる信頼性向上のためには，岩盤中の支配的な核種移行経路となる亀裂の構造の一般的特性の把握が重要となる。亀裂の構造特性の中でも亀裂の大きさは，地表の露頭や坑道壁面などで観察される亀裂のトレース長から推定する。しかしながら，地表の露頭や坑道壁面などはモデル化・評価対象となるスケールより小さい領域に限られることが多く，その場合，亀裂を観察するスケールとモデル化・評価対象となるスケールの違いに注意する必要がある。従来，亀裂の大きさを表すトレース長の分布には，数メートル規模の比較的小さい領域で測定されたデータに基づいて対数正規分布が多く用いられてきた（例えば，Rouleu and Gale, 1985）。一方で，大野・小島（1992, 1993）は，大小様々なスケールで亀裂のトレース長を測定してトレース長の累積頻度分布がべき乗分布にしたがうことを示し，その傾きから亀裂のトレース長のフラクタル次元を求めている。「第２次取りまとめ」においても観察スケールに依存しない分布に着目して亀裂半径分布にフラクタル分布を採用している（「第２次取りまとめ」分冊３付録Ｃ参照）。

このような観点から，既存の大規模地下空洞やダムサイトなど様々なスケールで収集された亀裂マップを用いて亀裂トレース長の分布形状のフラクタル特性について検討してきた（井尻ほか，2000；大西ほか，2001；大津ほか，2001）。下記では，それらの成果の概要を述べるとともに，亀裂ネットワークモデルを用いた検討としてフラクタル特性の不確実性が地下水浸透・汚染物質移行に及ぼす影響（澤田ほか，2002）の概要を示す。

② これまでの成果

これまでに収集した亀裂マップデータは，様々な地域や深さを対象に地下石油備蓄基地や地下発電所等の大規模地下空洞やダムサイト，リニアメントデータ等の合計13サイトで，そのスケールは数メートルから数十キロメートルにわたる。岩種に関しても花崗岩類だけではなく，安山岩，流紋岩類，砂岩頁岩互層，片麻岩，チャート／粘板岩，溶結凝灰岩と多種にわたる。

いずれのサイトにおいても観察断面を横断するような大きな亀裂が観察されている一方で，観察断面に比べて極端に小さな亀裂は任意の下限値の設定等によりマッピングされていないことが多く，観察断面のスケールが大きくなるほど小さな亀裂の頻度が少なくなる。したがって，観察断面よりも大きなスケールの亀裂や観察断面に比較して非常に小さい亀裂のトレースの頻度は信頼性が低いと考えられることから，サイト毎に比較的信頼性が高いトレース長データ範囲（観察断面の短辺長からその1/10の範囲）を設定して，トレース長分布を求めると図5.2-51の結果を得た。同図は1km²あたりに換算して整理した。この結果から，亀裂トレース長の累積亀裂数は岩種・サイトにかかわらず一定の範囲（図5.2-51に示した２本の直線の範囲）で直線上に分布し，傾きから求められるフラクタル次元はほぼ1～2に分布する。菊間地下石油備蓄基地や久慈地下石油備蓄基地は他のサイトと若干異なりその値が小さい。これらのサイトでは，全ての岩盤タンクを横切るような大きな亀裂や断層が記載されている一方で，各岩盤タンクスケールや複数の岩盤タンクを連続するスケールの亀裂の記載数が相対的に少なくなっているためと考えられる。リニアメントデータは他のデータよ

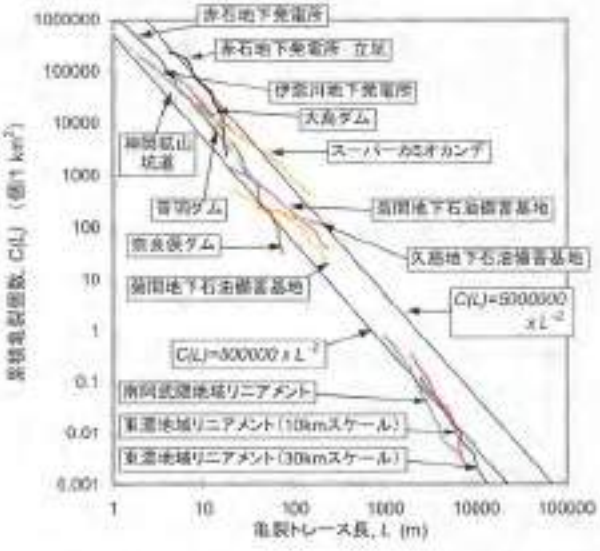


図5.2-51　亀裂のトレース長累積頻度分布

観察面積比を用いて1km²あたりの亀裂数に規格化。
図中の2本の直線はリニアメント以外の全てのデータを包含するように任意に引いた直線

り全体的な数が少なくフラクタル次元が大きい傾向があるが，これはリニアメントデータが数十キロメートルにおよぶ比較的広範囲のデータであり，かつ全ての断層や亀裂を抽出できていない可能性が高いためと考えられる。

観察したスケールがモデル化・評価の対象となるスケールより極端に小さい場合には，図 5.2-51 のようにスケール依存性を考慮して，より大きな亀裂の頻度の過小な評価を防ぐ必要がある。また，サイトや岩種に依存せずに同様の傾向が得られたことから，今後の調査初期の段階において鉛直や坑道を対象とした亀裂観察が十分でない場合には図5.2-51をトレース長分布の経験則として適用することも可能と考えられる。しかしながら，図 5.2-51 の 2 本の直線の幅は亀裂数にして一桁の不確実性（切片の差）で，これが亀裂モデルに与える影響は大きいと考えられる。そこで，亀裂ネットワークモデルを用いた解析により，図 5.2-51 の不確実性が構築した亀裂モデルの状況，水理特性，物質移行特性に与える影響について感度解析的に検討した。

解析対象領域としては，100m×100m×100m の立方体領域を設定した（図 5.2-52 参照）。図 5.2-51 より累積亀裂数 $C(L)$はトレース長 L の関係は次式で示される。

$$N(L) = aL^{-D} \tag{5.2-6}$$

ここで，Dはフラクタル次元，aは比例定数で単位平面当たりの亀裂密度に関連した定数を表す。式(5.2-6)を微分してトレース長の確率密度関数$P(L)$を得る。

$$P(L) = \frac{d}{dL} N(L) \propto L^{-(D+1)} \tag{5.2-7}$$

二次元平面上の亀裂のトレース長の確率密度を三次元空間における亀裂半径 rの確率密度$f(r)$へと次元を拡張する場合には，フラクタル次元にさらに 1 を加える（Piggott，1997）。比例定数を k とすると$f(r)$は次式で表される。

$$f(r) = kr^{-(D+1)} = kr^{-b} \tag{5.2-8}$$

亀裂半径分布として式(5.2-8)を用いることとし，トレース長のフラクタル次元 D が 1～2 に分布することからべき指数 b を 3～4 と変えてその影響を検討した。

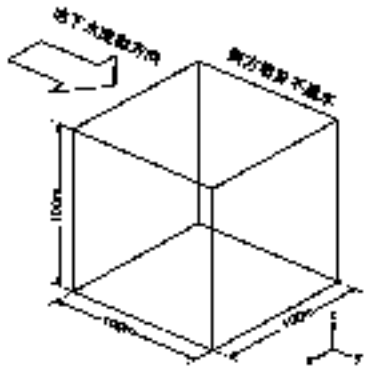


図5.2-52　モデル領域と境界条件

表5.2-11　亀裂ネットワークモデルのパラメータ一覧

方向性 (-)	直交 2 組の鉛直亀裂群 各群は Fisher 分布（κ=10）
半径 [m]	べき乗分布 b=3.0 （b を変えたケース：b=3.0～4.0）
亀裂密度 [m^2/m^3]	P_{32}=0.8（P_{32} を変えたケース： P_{32}=0.4～1.6）
空間分布ﾓﾃﾞﾙ	Baecher モデル
透水量係数 T[m^2/s]	対数正規分布（対数平均 -8.99，標準偏差 1.07）
開口幅　a [m]	$a = 2\sqrt{T}$

三次元亀裂ネットワークモデルの構築にあたっては，亀裂密度の指標として単位体積あたりの亀裂表面積（m^2/m^3；P_{32}と呼ぶ）が用いられる。本解析ではbとP_{32}をパラメータとし，これらのパラメータを図5.2-51の不確実性の範囲で変化させた場合に亀裂ネットワークモデルの構造や地下水流動に与える影響を検討した。なお，亀裂半径分布以外のパラメータについては表5.2-11を仮定し，これらの値の不確実性は考慮しないこととした。

それぞれのケースについて，図5.2-52に示す境界条件（動水勾配0.01を仮定）を設定して実施した定常浸透流解析の結果から，モデルの平均的な透水係数を評価した。解析の結果（図5.2-53），モデルの平均的な透水係数はP_{32}よりもbに強く依存し，bが増加するにつれてモデルの平均的な透水係数が低下することがわかった。これは，bの増加にしたがい大きな亀裂の数が減少するとともに相対的に小さな亀裂の数が増加し，亀裂と亀裂の連結

性が低下したためと考えられる。

地下水移行時間は，亀裂ネットワークモデルをチャンネルネットワークモデルに変換して上部境界側に設定した一定濃度のトレーサーが移流分散によって下流側へ破過する様子から求めた（澤田ほか，1999）。平均的な地下水移行時間は，下流側への破過濃度が 50%に達した時間（$t_{1/2}$ と呼ぶ）により求めた。解析の結果（図 5.2-54），b が増加するにつれて平均的な地下水移行時間も増大することがわかった。これは，b が増加するにつれてモデルの平均的な透水係数が低下する結果と整合的である。また，P_{32} が増加するにつれて平均的な地下水移行時間が減少する傾向が見られるものの，P_{32} が 0.8 以上になるとおよそ 50～70 年の範囲で推移している。これは，P_{32} が増加するにつれてモデルの平均的な透水係数は増大するものの，個々の透水量係数の値は相対的に増減せず，ある程度以上の亀裂密度になれば，平均的な地下水移行時間に与える影響が小さくなるためと考えられる。

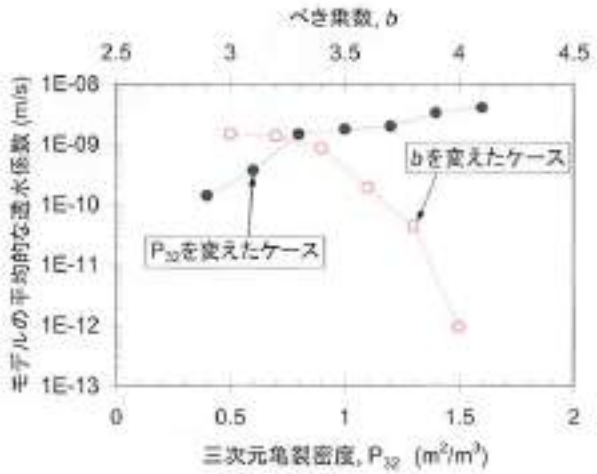


図5. 2-53　各モデルの平均的な透水係数

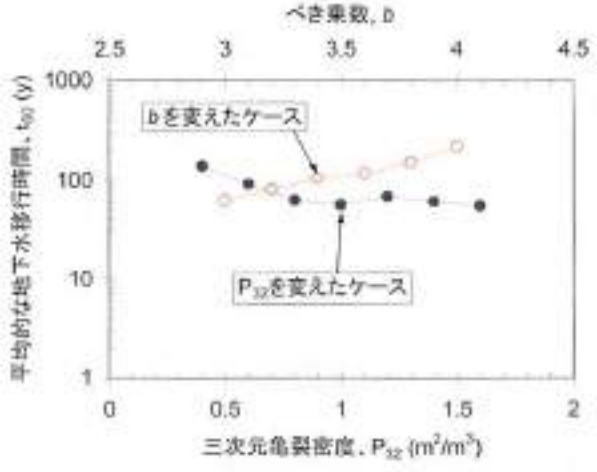


図5. 2-54　各モデルの平均的な地下水移行時間

③ まとめ

これまでに，土木分野で広く集められている亀裂データのうち，亀裂の長さに着目してデータを解析した。その結果，亀裂のトレース長はべき乗則にしたがい，地域や岩種によらずほぼ一定の範囲に分布することが分かった。従来，亀裂の長さのデータは調査対象地域に存在する露頭や坑道のスケールに依存してきたが，本成果を活用することでこれらのデータの入手が困難な調査初期段階においてもある程度亀裂の長さの分布を予測可能になると期待される。また，このようなスケール依存性を考慮して構築した亀裂ネットワークモデルには，少なからずモデル全体を横断するような大きな亀裂が存在する。大きな亀裂であるほど調査初期の段階から物理探査等によりその位置等の把握が容易であると考えられ，存在頻度が小さくても評価の対象となる領域を横断するような大きな亀裂の水理・物質移行特性を初期の段階から十分に調査しておく必要がある。

本研究で得られた亀裂トレース長のべき乗則にはある範囲の不確実性を伴っており，その幅は亀裂数にして一桁の違いがある。この違いが亀裂ネットワークモデルに与える影響は大きいと考えられ，このべき乗分布特性をパラメータに構築した亀裂ネットワークモデルに与える影響を検討し，トレース長のべき乗則の不確実性と構築したモデルの関係を概略的に把握することができた。本検討では一般的な検討として評価指標にモデルの平均的な透水係数と平均地下水移行時間を用いたが，評価する目的に応じて適切な指標を選定し，その上で指標に対する不確実性の影響を検討することで，次の調査計画策定に対して重要度を提示していく必要がある。

参考文献

井尻裕二，澤田　淳，山田直之，大西有三，大津宏康，土山富広（2000）：亀裂のトレース長分布とそのモデル化に関する考察，第 35 回地盤工学研究発表会講演集，pp. 63-64.

大津宏康，西山　哲，土山富広，中井亮太郎，澤田　淳，山田直之，坂本和彦，内田雅大（2001）：我が国の岩盤における亀裂特性とそのモデル化に関する研究，サイクル機構技術資料（共同研究報告書；京都大学）。

JNC TY8400 2001 004.

大西有三，大津宏康，西山　哲，澤田　淳，中井完太朗（2001）：不連続性岩盤の統計的手法に基づく空間分布特性に関する研究，土木平成 13 年度土木学会関西支部年次学術講演概要，III 36 1.

大野博之，小島圭二（1992）：岩盤割れ目のフラクタル（その1）　フラクタル分布ー，応用地質 33 巻 3 号，pp.11 24.

大野博之，小島圭二（1993）：岩盤割れ目のフラクタル（その2）　・フラクタル分布の分布とばらつきー，応用地質 34 巻 2 号，pp.12 26.

Piggott, A. R. (1997) : Fractal relations for the diameter and trace length of disc-shaped fractures, J. Geophys. Res., vol.102. No.B6, pp.18121 18126.

Rouleau, A. and Gale, J. E. (1985): Statistical characterization of the fracture system in Stripa granite, Sweden. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.22, No.6, pp.353 367.

澤田　淳，井尻裕二，坂本和彦，山　貴宏（1999）：亀裂性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 99 093.

澤田　淳，井尻裕二，大西有三，大津宏康，西山　哲（2002）：亀裂トレース長のスケール依存性を考慮した検討，第 11 回岩の力学国内シンポジウム論文集，A04.

4) 不均質堆積岩中の物質移行評価

① 課題と概要

「第２次取りまとめ」においては，わが国の岩盤は保守性を考慮すると亀裂性岩盤で代表できると考え，天然バリアの評価解析では，亀裂性岩盤を評価対象として一次元平行平板モデルの重ね合わせを使用している。亀裂の透水量係数についてはその不確実性を考慮して確率分布を与えている。また，その他のデータの不確実性やモデル変更を考慮して網羅的な感度解析を実施しており，モデル・パラメータの変動に伴うシステム挙動の変化を体系的に整理している。

多孔質岩盤については，「第２次取りまとめ」の補完的な技術報告書において，堆積岩を純粋に多孔質岩盤とみなした核種移行解析が実施されている（井尻ほか，1999）。この中で，多孔質岩盤とみなされた堆積岩に対して，連続体として不均質性を表現した水理地質構造モデルが構築され，粒子追跡法により算出された核種移行経路に沿った解析を行うことで，そのバリア性能が評価されている。しかしながら，多孔質岩盤を対象としたこの評価では，「第２次取りまとめ」のレファレンスケースに対応する解析が行われているのみであり，水理・核種移行パラメータの変化が多孔質岩盤の移行特性に与える影響については述べられていない。岩盤のバリア性能を評価するためには，モデル・パラメータの変化が岩盤中の水理・核種移行挙動にどのように影響を及ぼすかを体系的に評価する必要がある。したがって，本研究では，透水係数データを分析することによる確率分布モデルや相関モデルの推定，それらのモデルに基づく不均質透水係数場の発生，そこでの地下水流れと核種移行の解析，および解析結果に基づく岩盤性能の評価からなる一連の多孔質岩盤性能評価の流れにおいて，特に，不均質透水係数場発生のもととなる相関モデルに着目し，その統計パラメータの変化が，多孔質岩盤の移行特性に与える影響について検討したので，その結果について述べる。

② これまでの成果

ｉ）多孔質岩盤の評価方法

多孔質岩盤の評価方法について以下に述べる。また，図5.2-55は多孔質岩盤評価の流れを概念的に示している。

a) 不均質透水係数場の生成

既存の透水係数に関するデータを解析することにより，透水係数の確率分布と空間的相関関係に関する統計モデル（確率分布モデルと相関モデル）を推定する。推定した確率分布モデルと相関モデルに基づき，SGSIM法（Deutsch and Journel, 1992）を用いて，200m×200m×200mのブロック領域に不均質透水係数場を発生させる。また，200m×200m×200mのブロック領域の中心部分に地下水流れの方向と直交するように処分坑道および掘削影響領域を考える。処分坑道から評価断面までの距離は約100mあり，この領域が本研究における物質移行特性の評価対象となる。

b) 水理解析および移行経路の抽出

発生させた不均質透水係数場における飽和浸透流解析を実施する。浸透流解析から得られた移流速度を用いて，粒子追跡法により処分坑道から評価断面に至る移行経路を抽出する。また，抽出した移行経路の長さと移行経路に沿った地下水のトラベルタイムを算出する。

c) 物質移行解析

発生した不均質透水係数場の移行特性を評価するために，算出した移行経路の長さと移行経路に沿った地下水のトラベルタイムに基づき，評価断面における破過曲線を求める。

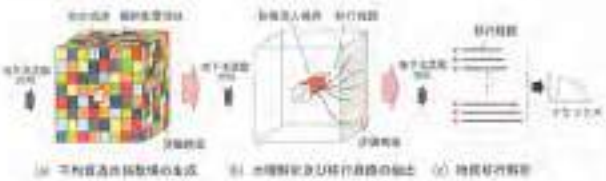


図5.2-55　多孔質岩盤評価の流れ

ⅱ）感度解析の方法

今回実施した感度解析では，不均質透水係数場の空間的相関性に関する統計モデルであるセミバリオグラムに着目した。地質統計法で透水係数の空間的相関性を論ずる場合，(5.2-9)式に示すセミバリオグラムの球形モデルが頻繁に用いられており，本研究における透水係数の空間的相関関係を定義するにあたっても球形モデルを使用している。

$$g(h)=\begin{cases} s\left[1.5\dfrac{h}{a}-0.5\left(\dfrac{h}{a}\right)^{3}\right] & if\ h\le a \\ s & if\ h\ge a \end{cases} \qquad (5.2\text{-}9)$$

ここで，g：セミバリオグラム，h：2 点間の距離，a：レンジ，s：シルである。

レンジとは，透水係数が相関性を有している空間的範囲であり，2 点間の距離がレンジ以上になると 2 点を代表する透水係数間には何の相関もないことになる。三次元領域での相関性を考える場合，互いに直交する 3 方向のレンジを評価する必要があるが，本研究では，水平 2 方向の相関性は同一モデルで近似できると仮定した。したがって，レンジについては水平方向と垂直方向の二方向を考えた。また，シルとは，2 点を代表する透水係数間には何の相関も無いときのバリオグラムモデルの値をいい，この値は，透水係数分布を確率分布で表わしたときの分散値に相当する。すなわち，セミバリオグラムと共分散の間には以下の関係があり，2 点間の距離 h がレンジを超えるとセミバリオグラムは原点における共分散値すなわちその点での分散値と等しくなる。

$$g(h) = C(0) - C(h) \qquad (5.2\text{-}10)$$

ここで，C：共分散である。

本研究で実施した感度解析では，シルおよび水平方向と垂直方向のレンジを変化させることにより，これらの変化が不均質透水係数場の物質移行特性にどのような影響を及ぼすのかを検討した。解析ケースを表 5.2-12 に示す。表 5.2-12 には，現地データに基づき推定した透水係数の確率分布の平均値も併せて示している。なお，確率分布モデルと相関モデルは，透水係数の対数変換値で評価した。

表 5.2-12　解析ケース

解析ケース	対象平均値	シル	水平方向のレンジ (m)	鉛直方向のレンジ (m)
1-4-2	-11.81	0.32	80	16
2-4-2		0.64		
3-4-2		1.27		
4-4-2		2.54		
5_4-2		5.08		
3-1-2		1.27	20	16
3-2-2			40	
3-3-2			60	
3-5-2			80	
3-6-2			100	
3-1-1		1.27	80	8
3-1-2				16
3-1-3				24
3-1-4				32
3-1-5				48

基本解析ケースは 3-4-2 であり，このケースのパラメータを基準にシル，水平方向と垂直方向のレンジを変化させた。また，解析ケース間の比較をわかりやすくするため基本解析ケース 3-4-2 のみ再掲して表 5.2-12 中に示している。

iii) 解析結果

図 5.2-56～5.2-58 はそれぞれ，シル，水平方向のレンジ，垂直方向のレンジを変化させたときに得られた不均質透水係数場を用いた解析で得られた評価断面における破過曲線である。評価断面における破過曲線は，処分坑道から評価断面まで移流により移行してくる粒子に一定濃度をもたせ，粒子追跡法により得られた移行経路に沿った地下水のトラベルタイムに対して移行経路上の平均流速で重み付けを行い，評価断面において総和をとることにより算出した。濃度は，基準化した濃度 (C/C_0) で示している。

図 5.2-56 は基本解析ケース 3-4-2 のシルを変えて行った移行経路評価解析の結果であるが，シルが 0.32 から大きくなるに従って，破過時間も短くなっていることが確認できる。これは，シルすなわち分散が大きくなるにつれて，透水係数は，より広い確率分布を持つことになるから，発生される透水係数値の取り得る範囲も広がり，より速い移行経路が形成されていることを意味している。また，破過時間で s = 0.32 の場合と s = 5.08 の間には約 3 万年の違いがあることがわかる。

図 5.2-57 は基本解析ケース 3-4-2 の水平方向のレンジを変えて行った移行経路評価解析の結果である。水平方向のレンジが 20m から少しずつ大きくなるに従って，破過時間も長くなっていることが確認できる。水平方向は大局的な地下水流れの方向であり，この方向にレンジが大きくなることは，移行経路がより長くなる，すなわち，より大きな迂回路が生じやすくなり，それに応じてトラベルタイムも長くなるものと考えられる。

図 5.2-58 は基本解析ケース 3-4-2 の垂直方向のレンジを変えて行った移行経路評価解析の結果である。垂直方向のレンジについては 6～48m までの間でレンジを変化させているが，最小値のレンジ 8m のケースを除いた，4 ケースについては破過曲線の傾きは異なるものの，破過時間に大きな差異はないことがわかる。

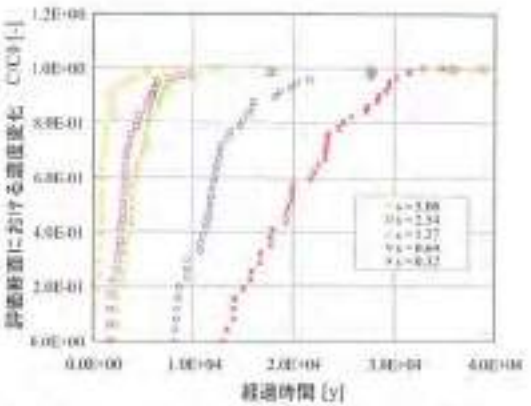


図 5.2-56　シル(s)を変化させた場合の評価断面における濃度変化

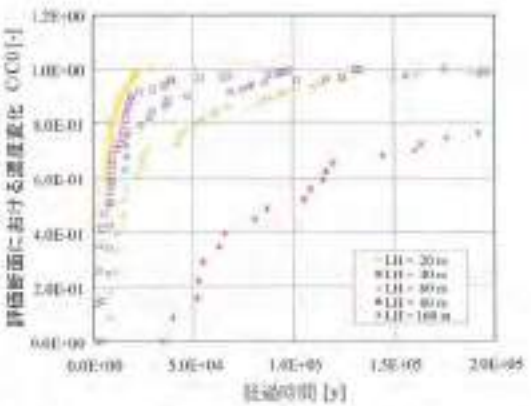


図 5.2-57　水平方向のレンジ(LH)を変化させた場合の評価断面における濃度変化

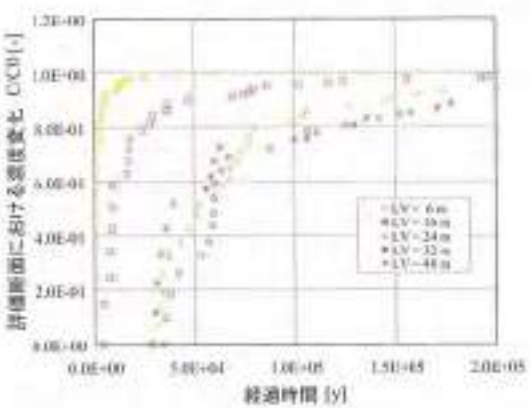


図 5.2-58　垂直方向のレンジ(LV)を変化させた場合の評価断面における濃度変化

ⅳ）考察

前節で得られた解析結果から，シル，水平方向のレンジ，垂直方向のレンジは不均質透水係数場における物質移行特性に影響を与えることがわかった。この影響を定量的に評価するために，図 5.2-56～5.2-58 に示された破過曲線に対して一次元の移流分散方程式の解析解（Ogata and Banks, 1969）をフィッティングし，縦方向分散長とこれらパラメータの変化の関係を調べた。その結果を図 5.2-59～5.2-61 に示す。図 5.2-59 は，シルと縦方向分散長との関係である。シルが増加するのに比例して，縦方向分散長も増加し，その関係は線形式で近似できることがわかる。線形近似式の傾きは 1.29 であり，シルの増加に対してほぼ同率の割合で縦方向分散長も増加する。これは，シルが増加すると透水係数分布もより広範囲に値を取り得ることから，発生させた透水係数場の中により高透水性領域およびより低透水性領域が出現し，その結果，トラベルタイムの取り得る範囲も大きくなり，処分坑道から評価断面までの領域における巨視的な分散係数が増加する。したがって，それに比例して縦方向分散長も増加するものと考えられる。

図 5.2-60 は，水平方向のレンジと縦方向分散長との関係である。この場合もシルの場合と同様に，水平方向のレンジが増加するに従い，縦方向分散長も増加し，線形式で近似できる。しかしながら，シルの場合と異なり，線形近似式の傾きは 0.13 と小さく，水平方向のレンジの増加に対して，縦方向分散長の増加の割合はそれほど大きくない。水平方向のレンジの場合，シルの場合と異なり，透水係数場を発生させるための確率分布には影響を及ぼさないと考えられることから，発生される透水係数値の範囲については大きな変化はないものと考えてよい。レンジについては，いわゆる相関性を有する最大の範囲であることから，その大きさに比例して移行経路長の屈曲性が大きくなり，その結果，移行経路長が増加することになる。したがって，その分，処分坑道から評価断面までの巨視的分散係数も増加し，縦方向分散長も増加するものと考えられる。しかしながら，その増加の程度は大きくない。

図 5.2-61 は，垂直方向のレンジと縦方向分散長との関係である。この場合は，シルの場合および水平方向のレンジの場合と異なり，垂直方向のレンジが増加するに従い，縦方向分散長は減少していることがわかる。図 5.2-61 からわかるように，各解析ケースの破過時間はレンジ 6m のケースを除いてほぼ等しく，それぞれの破過曲線の広がりが異なっている。しかしながら，それぞれの破過曲線の広がりは，レンジが小さいケースから大きい

ケースになるに従って，大きくなっている。これらのことがレンジと縦方向分散長との関係に逆比例関係が生じている原因であると考えられる。

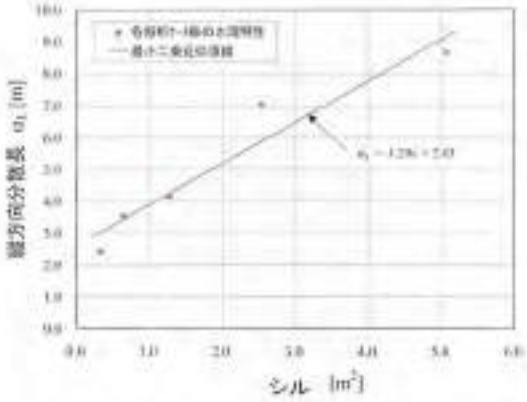


図 5.2-59　シルと縦方向分散長との関係

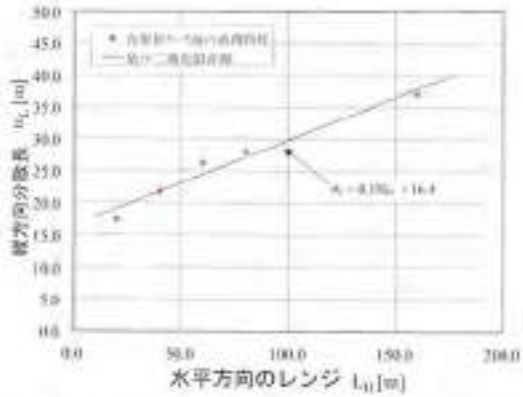


図 5.2-60　水平方向のレンジと縦方向分散長との関係

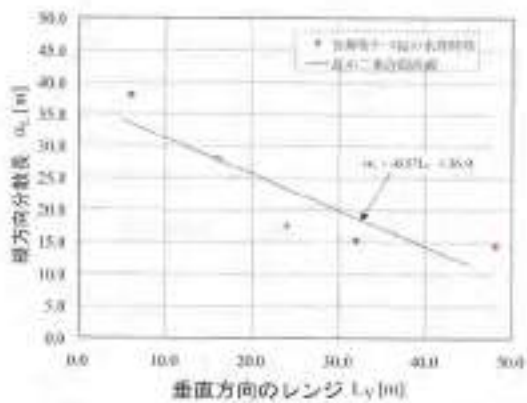


図 5.2-61　垂直方向のレンジと縦方向分散長との関係

③ まとめ

本研究では，不均質透水係数場を生成するための統計モデルであるバリオグラムのパラメータ（シル，レンジ）に着目して物質移動の観点から感度解析を行った。その結果，処分坑道から評価断面までの移行挙動を巨視的に記述する物質移動パラメータである縦方向分散長はシルおよび水平方向のレンジに比例して大きくなることがわかった。しかしながら，垂直方向のレンジに対しては反比例する結果が得られた。

以下に本研究において今後解決すべき課題を述べる。解析では 200m×200m×200m のモデル化領域および 5m×5m×5m の単位メッシュを用いているが，モデル化領域の大きさやメッシュサイズが感度解析に用いたシル，水平方向および垂直方向のレンジと縦方向の分散長との関係が評価結果にどのように影響を及ぼすか検討する必要がある。また，本報告の評価では三つのパラメータが透水係数場の物質移行特性に与える影響について個別に検討したが，三つのパラメータの変化を同時に考慮したシステム応答の総合的な評価を実施する必要がある。また，リアライゼーションの差が解析結果に与える影響の評価も検討課題として挙げられる。さらに，上記した課題を解決するとともに，本研究で採用した手法を幌延等の原位置に適用し，原位置の水理・物質移行特性を把握するために活用していく予定である。また，新第三紀層中には多くの場合，割れ目が含まれるのでこれらの影響評価，および堆積岩分布域には化石水が分布することがあり，これらを含む密度流解析にも取り組み，原位置の特性評価に反映させる予定である。

参考文献

Deutsch, C.V. and Journel, A.G. (1998) : GSLIB, Geostatistical Software Library and User's Guide, Second Edition, Oxford University Press.

井尻裕二，澤田　淳，坂本和彦，笹　真吾，Erik Webb，中島研吾，長坂和佳，野邊　潤（1999）：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.

Ogata, A. and Banks, R.B. (1961) : A Solution of the Differential Equations of Longitudinal Dispersion in Porous Media, Geological Survey Professional Paper, 411-A.

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

地下水水質については，「第２次取りまとめ」においては，既存地下水水質データの統計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についての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。したがって，信頼性の高い実測地下水に対し，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を行うとともに，このようなモデル化の試みを通じて，限られた地質環境情報から，地下水水質を推定する手法についての検討も実施する。

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，副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課題が残された。また，圧縮ベントナイトの微細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。

また，これらの地下水，間隙水水質のモデル化に必要な地球化学元素の熱力学データの整備，鉱物の溶解・沈殿反応速度データおよび酸化・還元反応速度データの調査・評価を継続し，データベースの整備を継続する。

② これまでの成果

i）実測地下水水質に対する地球化学的解釈およびモデル化

実測された地下水水質の，鉱物―地下水平衡反応に基づく地球化学的モデル化は，「第２次取りまとめ」における地下水水質形成モデルの妥当性を確認する目的で実施してきた（例えば，Sasamoto et al., 1999a, 1999b）。しかしながら，これらはいずれも降水系地下水であるため，海水系地下水に着目し，千葉県茂原地域の地下水水質形成のモデル化を試みた（Sasamoto et al., 2001）。同地域の深部地下水は被圧地下水であり多量の溶存ガスを含むが，地下水サンプリングが地上で行われていることから，脱ガスの影響が懸念される。したがって，脱ガスの観点からデータの品質について議論を行うとともに，地下水の方解石との平衡を仮定したデータ補正方法の適用性の検討を行った。また，２価鉄含有鉱物との平衡やH_2Sガスの存在を考慮した酸化還元状態の推定を行った。さらに，亀井（2001）は，同地域の地下水中の高濃度のヨウ素に着目し，地下水水質の解釈には，鉱物－地下水反応のみならず堆積環境に存在した藻類などの分解が強く関与しているとして，有機物の寄与を考慮することが不可欠であることを指摘した。

ii）緩衝材間隙水水質モデルの改良

間隙水水質に関するいくつかの課題のうち，可溶性塩の散逸およびスメクタイトのイオン型や間隙水組成の時間空間変化に関する実験的な把握とその地球化学－物質移行連成コードを用いたモデル化を実施中である。

室内試験として，セルに圧縮成型したベントナイト（長さ10mm，直径10mm）を，蒸留水，人工海水および低アルカリ性セメント平衡液にフィルターを介して接触させ，所定の時間経過後に，ベントナイト試料をスライスし，ベントナイト中の元素分析，pH試験紙を挟みこんでの圧搾による間隙水のpH測定等を行った。また，天然類似現象の観察として，河川付け替え工事により，1987年以降ベントナイト層と河川水が接触することになった地点に着目した。そのベントナイト層を河川水との接触面に対し垂直にボーリングして，深さ方向に一連の試料採取を行い，鉱物組成，化学組成，交換性陽イオン組成等の深度変化を調べた。今後，これらのデータの解析を行う予定である。

iii）粘土鉱物のイオン交換特性の把握

地下水水質形成に粘土鉱物のイオン交換反応が影響を及ぼすことは知られているが，還元環境で起こることが予想されるFe^{2+}やMn^{2+}に対する交換特性については，必ずしも十分なデータが得られていない。そこで，雰囲気制御グローブボックスを用い，九州大学，大分大学と共同で，粘土鉱物（スメクタイト，カオリナイト，イライト）のCa^{2+}

とFe^{2+}, Mn^{2+}とのイオン交換選択係数を求めた。その結果、いずれの粘土に対しても，ほぼ1の選択係数が得られ，粘土鉱物に対するFe^{2+}, Mn^{2+}の吸着特性は，アルカリ土類金属イオンとほぼ同様であると推察された（佐伯ほか，2001）。

③ まとめ

・海水系地下水のデータを用いて，深部地下水の水質推定方法に関する検討を行うとともに，地下水水質に影響を及ぼす要因の検討を行った。今後は，幌延の深地層研究計画における調査等から得られる実測地下水に対し，地下水水質形成のモデル化を実施する。

・緩衝材間隙水組成の時間空間変化に対する現象理解のために，室内試験およびベントナイト鉱床でのデータの取得を実施した。今後，これらのデータに対し，地球化学反応と物質移行を連成させた解析を実施する。

・低酸素条件下において粘土鉱物のFe^{2+}やMn^{2+}に対するイオン交換特性に関するデータ取得を行った。

参考文献

佐伯和利，中川　啓，和田信一郎，柴田雅博，神野健二（2001）：Ca-カオリナイト，-スメクタイト，-イライトにおける2価鉄・マンガンイオンのイオン交換選択係数．第45回粘土科学討論会講演要旨集，pp. 202-203.

Sasamoto, H., Yui, M. and Arthur, R.C. (1999a) : Hydrochemical investigation and status of geochemical modeling of groundwater evolution at the Kamaishi in-situ tests site, Japan, JNC Technical Report, JNC TN8400 99-033.

Sasamoto, H., Yui, M. and Arthur, R.C. (1999b) : Status of geochemical modeling of groundwater evolution at the Tono in situ tests site, Japan, JNC Technical Report, JNC TN8400 99-074.

Sasamoto, H., Yui, M. and Arthur, R.C. (2001): Modelling Studies of Saline Type Groundwater Evolution -A Test Case for the Hobara Groundwater Chemistry, Japan-, JNC Technical Report, JNC TN8400 2001-016.

亀井玄人（2001）：夜原ガス田の地下水に含まれるヨウ素の起源と挙動，資源地質，51(2)，pp. 145-151.

5.2.3 現象論的核種移行モデルの開発

i) 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

「第２次取りまとめ」では，ガラス溶解速度に関して，長期浸出試験から得られている各種ガラス固化体の溶解速度をもとに，処分場温度を考慮し，温度依存性に関する回帰式から算出している。一方，ガラス固化体の溶解に伴う核種の溶出挙動については，可溶性核種についてはガラス溶解に伴う飽和溶解で放出されるが，難溶性核種については固化体近傍で飽和溶解度に律するとした。

これらの考え方に関しては，次のような知見が得られている。

- ガラス固化体からの可溶性核種の浸出挙動が，次溶解反応の考え方により評価することが可能であること（例えば，Ashida et al., 1998）
- ガラス固化体から溶出した難溶性核種の濃度が溶解度により制限されていること（Ashida et al., 1994；黒羽ほか，1998）
- ガラス固化体の溶解，プルトニウムの溶解度や緩衝材中における核種の拡散といった個別モデルにより，ガラス/緩衝材複合系の浸出拡散試験結果を説明できること（Ashida et al., 1994, 1998）

今後は，ガラスの長期溶解挙動及び核種の溶解現象に関する現象理解を深め，より現実的な安全評価を行うため，以下のような研究を進めていく。

[ガラスの長期溶解現象]

- ガラス固化体の浸出及び浸出拡散複合挙動の長期データや還元環境下でのデータの蓄積
- 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

[核種の溶解現象]

- 溶解度制限固相の時間的変遷の把握
- 共沈現象の核種溶解挙動に与える影響の把握

② これまでの成果

i) ガラスの長期溶解現象

ガラス固化体からの核種の浸出拡散複合試験として，大気下，蒸留水系における長期試験を継続中である。また，より処分場に近い環境を模擬した系での試験として，還元環境下での試験，海水系地下水のようにイオン強度の高い系での試験及び処分場のセメント環境を模擬したアルカリ環境下での試験実施についての検討を実施した。

長期の処分期間においてはガラス固化体と地下水との接触によって，ガラス成分が溶解するのみならず，より安定な鉱物に変質（鉱物化）することが予測される。このため，ガラス固化体の処分環境における溶解／鉱物化とそれに伴う核種浸出の機構を実験的，解析的に明らかにすることを目的として，模擬ガラス固化体（PNL76-68ガラス）を蒸留水やアルカリ性溶液と接触，反応させ，溶解／鉱物化実験を行った。結果については解析中であるが，アルカリ溶液を用いることでガラスの溶解が加速される現象が確認された。これは，ガラスの主成分である SiO_2(am) の溶解度が溶液 pH とともに増加するためであると考えられる。しかしながら，ガラスマトリクス構成元素のホウ素と比べ，他の主成分の多くの浸出量が少なく変質層内に留まり鉱物化が進行している兆候を確認した。

このほか，ガラスの浸出における炭素鋼とその腐食生成物の影響を確認する目的でバッチ式試験を行い，模擬廃棄物ガラスの溶解速度に対するこれらの加速効果が１桁以内であることを明らかにした（Satake and Kamei, 2002）。

ii) 核種の溶解挙動

「第２次取りまとめ」においては，アクチニド元素（4 価）の溶解度制限固相に非晶質酸化物を選定し評価を行ったが，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 との共同研究を通じ，高温での加速条件（90℃）で，ThO_2(am) から ThO_2(cr) への固相の変遷を確認してきた（Rai et al., 2000）。さらに，U(IV) についても還元条件において同様の研究に着手し，非晶質固相の結晶化の傾向が認められている。また，東北大学との共同研究により，Fe，Co 等を用いて，含水酸化物，酸化物の溶液中での結晶化に関する基礎的な研究も進めている。

核種の共沈現象に関する研究では，現在共沈現象について報告されている諸報告についてレビューを行っており，共沈現象の評価が必要な核種として Ra やアクチニド元素に着目し，実験方法の検討を実施している。

③ 今後の予定

ガラスの長期溶解現象の把握として，還元環境下及び海水系地下水環境下における実ガラス及びPu添加ガラスを用いた浸出試験及び浸出拡散複合試験を実施する。また，処分場のセメント模擬を模擬したアルカリ環境下での浸出試験を実施する。

鉱物化研究については，ガラス変質層における，結晶性鉱物，非晶質相の分布状態や大きさといった変質層の形態（morphology）に関する情報が必要であり，それらの分析を行う。また，熱力学的平衡計算およびナチュラルアナログとの比較により，鉱物の生成条件を整理、評価し，鉱物化を考慮したガラスの長期浸出モデルの構築に資する予定である。

核種の共沈現象に関する研究では，諸文献で報告されている実験手法の整理を行っており，今後データ取得を予定している。

参考文献

Ashida, T., Kohara, Y. and Yui, M. (1994) : Migration Behaviour of Pu Released from Pu-doped Glass in Compacted Bentonite, Radiochimica Acta, 66/67, pp.359-362.

Ashida, T., Kohara, Y., Shibutani, T. and Yui, M. (1998) : Migration Behavior of Cesium Released from Fully Radioactive Waste Glass in Compacted Sodium Bentonite, PNC Technical Report, PNC TN8410 98-014.

Sei, D., Moore, D.A., Oakes, C.S and Yui, M. (2000) : Thermodynamic model for the solubility of thorium dioxide in the Na+-Cl--OH--H2O system at 23 ℃ and 90 ℃, Radiochimica Acta, 88(5), pp.297-306.

鈴木克忠、遠谷和紀、岡崎克彦、佐藤 耕一、山田 実、油井三和(1998) : プルトニウム含有ガラス固化体からのプルトニウムの溶解挙動に関する研究，サイクル機構技術資料，JNC TN8410 98-001.

Satake, K. and Kamei, G. (2002) : Influence of carbon steel and sus corrosion products on the leaching of elements from a simulated waste glass, JNC Technical Report, JNC TN8410 2002-003.

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

「第２次取りまとめ」に向けて，緩衝材および岩石に対する収着・拡散現象モデル開発が進められ，個別の実験データに対しては，モデルによる現象の説明が可能なレベルに達していると考えてきた（例えば，Sato et al., 1995）。しかしながら，収着・拡散の現象解析モデルの性能評価への利用は，国際的にも議論のある課題であり（例えば，OECD/NEA, 2001），専門家の合意を得るレベルには達していないと判断し，「第２次取りまとめ」における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，拡散パラメータの設定は，実験データに基づいて行った。今後は，データの不確実性の把握（例えば，環境条件に依存した変化の幅の推定），バッチ収着試験から得られる分配係数と拡散試験から導出される分配係数との不整合の説明等を行うため，試験条件を系統的に制御した初歩な試験研究を実施し，現象を説明するモデルを開発することが必要である。

収着の現象解析モデルに関しては，OECD/NEA による国際共同プロジェクトにより，性能評価の観点からのモデルの適用可能性，問題点などの抽出が行われようとしており，本プロジェクトへ多様なモデル開発を進めるとともに，クオリティ等を用いて，環境条件を適切に制御した試験から重要元素の収着挙動を理解するための研究を進める。拡散試験に関しても，試験パラメータを適切にコントロールしたデータ取得を行うとともに，緩衝材に関しては，ベントナイトの微細空隙構造把握のための観察や，分子動力学-均質化（MD-HA）結合解析法といった計算科学的な手法の導入を検討する。

② これまでの成果

「第２次取りまとめ」以降は，主に現象理解を目的とした収着研究を進めてきている。一般に，分配係数は水溶液の pH, Eh やイオン強度（塩濃度）に依存することから，メカニズム解明や収着挙動予測を行うことは容易ではないが，アクチニドの場合は条件によって価数や化学種が変化するためさらに現象が複雑となる。また，酸化還元を伴う鉱物表面にネプツニウムやプルトニウムなどが収着する際，固液界面において酸化還元反応が起こる可能性も指摘されている。このような複雑な現象の解明を目指した研究例を以下に紹介する。さらに，拡散現象に関して，圧縮ベントナイト中の拡散に関するデータ取得と，ベントナイトの間隙構造を考慮した分子動力学-均質化結合解析法の適用の試みについて紹介する。

ⅰ）還元条件・炭酸共存下におけるスメクタイトに対するネプツニウムの収着挙動

これまで分配係数の報告例がほとんどない炭酸共存下におけるアクチニドイオンの収着挙動を明らかにすることを目的として，スメクタイトに対するネプツニウムの収着挙動に関する研究を行った。実験はバッチ法を用いて窒素雰囲気で行い，分配係数の全炭酸濃度依存性を調べた。この際の水溶液は，混合系還元性中性地下水（URNP）（Yui et al., 1999）を想定して，1 M NaCl に 10^{-2} ～10^{1} M の $NaHCO_3$ を加え，pH を約 8.5 に調整したものを用いた。一定期間振とう後に溶液の一部を採取し，固液分離のため分画分子量 10^{5} の限外ろ過フィルターに通したのち，ネプツニウムの酸化状態を決定するためテノイルトリフルオロアセトン（TTA）を用いた溶媒抽出を行った。ネプツニウム濃度の定量は，Np-237 のα線を半導体検出器もしくは液体シンチレーション検出器で測定することにより行った。

得られた結果を図 5.2-62 に示す。分配係数が全炭酸濃度の増加とともに減少していることがわかる。この依存性を TTA 抽出の結果と併せて考察し，Np(IV)および Np(V)の複数の溶存化学種によって得られた複合的な分配係数であると予想した。し

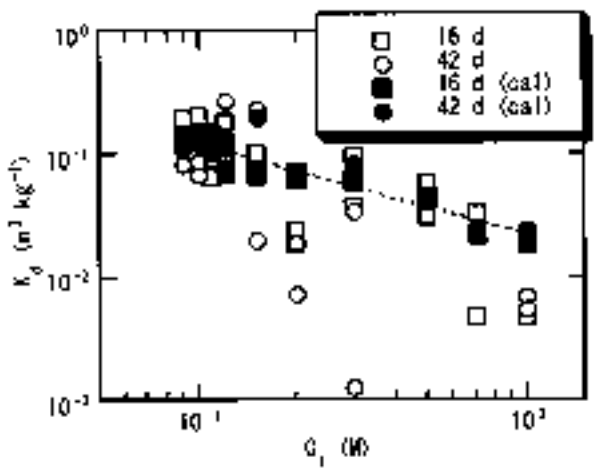


図 5.2-62　スメクタイトに対する Np の分配係数の全炭酸濃度（C_t）依存性
（pH=8.6±0.3）

たがって，各化学種の分配係数をパラメータとして，最小二乗法による適合を実施した．この解析で得られた各化学種の分配係数を表 5.2-13 に示す．分配係数が，化学種の負電荷が大きくなるとともに減少していく傾向のあることがわかる（Kitamura et al., 2002）．

表 5.2-13　解析によって得られた，各溶存化学種のスメクタイトに対する分配係数（K_d）

溶存化学種	K_d ($m^3 \cdot kg^{-1}$)
NpO_2^+	4.8×10^{-1}
$NpO_2CO_3^-$	1.8×10^{-1}
$NpO_2(CO_3)_2^{3-}$	$< 5.3 \times 10^{-1}$
$NpO_2(CO_3)_3^{5-}$	$< 7.0 \times 10^{-1}$
$Np(CO_3)_2(OH)_2^{2-}$	1.4×10^{-1}

ii）固液界面におけるアクチニドの酸化還元反応メカニズム

Fe(II)など酸化還元に鋭敏な化学種を含有する鉱物に対して放射性核種が収着する場合，対象核種が酸化還元に鋭敏であれば固液界面で酸化還元反応が起こることが指摘されている．このような酸化還元反応は，放射性核種の収着挙動を評価するうえで重要な情報と考えられるが，そのメカニズムは明らかになっていない．このような固液界面の酸化還元反応メカニズムに関して東京大学との共同研究を進めている．本研究の最終的な目標はネプツニウムの収着における酸化還元の影響であるが，手法の確立などを目的として，予備的にクロムを用いて実験を行った．

実験はバッチ法を用いて窒素雰囲気中で行った．マグネタイト（Fe(II)Fe(III)$_2$O$_4$）と Cr(VI)を含む水溶液を混合して pH を約 4 に調整し，一定期間振とうしたのち水溶液中の Fe(II)，全 Fe，Cr(III)濃度の定量を吸光光度法で，全 Cr 濃度の定量を ICP-AES で行った．比較のために，Fe(II)と Cr(VI)を水溶液中で接触させて同様の実験を行い，酸化還元反応の速さを調べた．

後者の実験の結果から，液相中での Fe(II)と Cr(VI)の酸化還元反応は 5 分以内に起こることが確認された．一方，Cr(VI)とマグネタイトを接触させた実験の結果を図 5.2-63 に示す．この場合でも Cr(VI)は時間とともに減少するが，1 時間以内で起こる「速い反応」と 20 日間ほど引き続いて起こる「遅い反応」のあることがわかった．マグネタイトの溶出速度と比較した結果，Cr(VI)の減少のほうが速いことがわかった．このことから Cr(VI)は，液相での Fe(II)よりもマグネタイト表面の Fe(II)と反応して還元された可能性が示唆された（中田ほか，2001）．現在，同様の実験を，ネプツニウムを用いて行っている．

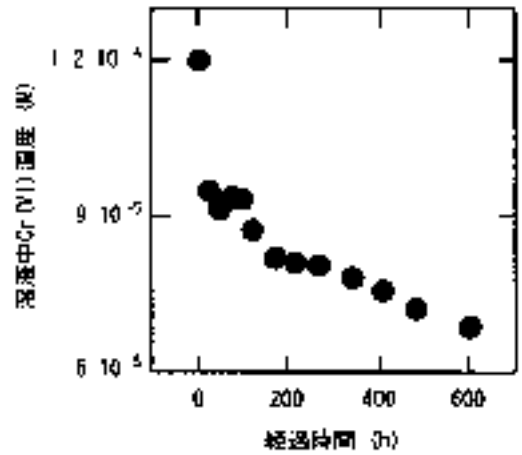


図 5.2-63　マグネタイト−Cr(VI)系における Cr(VI)濃度の時間変化（中田ほか，2001）

iii）圧縮ベントナイト中の I 及び HDO の拡散係数の塩濃度依存性

ベントナイト中の核種の拡散移行挙動を評価するに当て，実効拡散係数は物質移行を特徴づける重要なパラメータの一つである．実効拡散係数は地下水の塩濃度に影響を受けると考えられるが，その関係を実験的に調べた研究は少ない．

ベントナイト中の陰イオンの実効拡散係数は，塩濃度との間に正の相関があり，これは陰イオン排除効果により解釈されている．しかし，このような実効拡散係数の塩濃度依存性については報告例が少なく，その汎用性や，実験の系統性，再現性に問題がある．

そこで本研究では，低い乾燥密度の条件で，かつ広い塩濃度の範囲において，ベントナイト中の実効拡散係数の塩濃度依存性を取得し，乾燥密度による間隙構造の変化から拡散メカニズムについて議論する（鈴木・佐藤，2002）．

実験は，非収着性物質の代表として I，HDO を用い，実効拡散係数の塩濃度依存性を Through-diffusion 法により調べた．ベントナイト試料は，乾燥密度 0.9，1.6Mg/m^3 のクニピア F（クニミネ工業製）より精製したベントナイト（以下，精製ベン

トナイト：スメクタイト含有率>99wt%）及び1.8Mg/m³のMX80ベントナイトを使用し，NaCl濃度0.01～0.5Mの水溶液で飽和させた。含水飽和後，拡散源セルの溶液を，NaCl濃度を調製したSrI₂溶液及びHDO溶液に交換し，I^-はICP発光法で，HDOはFT-IRで測定した。

実験の結果，図5.2-64に示すようにI^-の実効拡散係数は，精製ベントナイトとMX-80ベントナイトの両方において，塩濃度の増加とともに増加したが，HDOの拡散係数はほとんど変化しなかった。また，精製ベントナイトの実効拡散係数の塩濃度依存性は経験的にべき乗則（$De=\beta(\gamma_{\pm})^n$）で表され，べき指数nは，I^-，HDOについてそれぞれ0.6，0.1であった。

非収着性物質であるI^-とHDOの拡散挙動の違いは，拡散経路の違いに起因するものと考えられる。実験の結果，HDOの実効拡散係数は塩濃度に依存しなかった。含水飽和した圧縮ベントナイト中の拡散経路が層間間隙と粒子間間隙から構成されるとすると，HDOは粒子間間隙水と層間水の両方の間隙を拡散していると考えられる。

一方，I^-は塩濃度の増加とともに実効拡散係数が増加した。I^-はスメクタイトの表面から静電的に排除され，スメクタイトの粒子間間隙を拡散しているものと考えられる。塩濃度が高くなると静電的な反発が弱くなることから，陰イオンの正の塩濃度依存性は陰イオン排除効果として説明することができる。I^-の実効拡散係数の塩濃度依存性は，過去の結果と比較しても，ベントナイト試料の違い，乾燥密度によらず再現性のある結果であった。

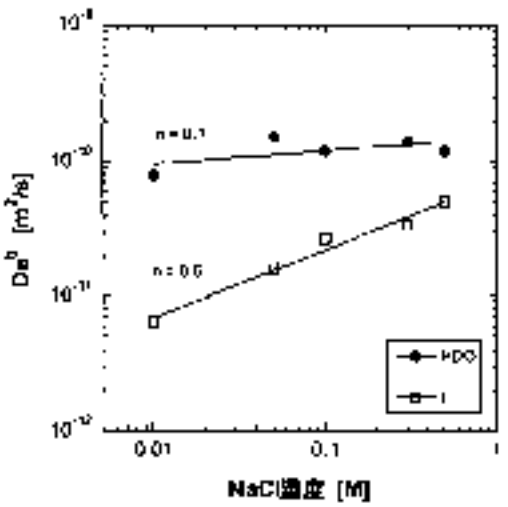


図5.2-64 I^-，HDOのDeの塩濃度依存性

iv）圧縮ベントナイトの間隙構造を考慮した分子動力学-均質化（MD-HA）結合解析法の拡散問題への適用

緩衝材中の水および溶質の拡散挙動をMD-HA結合解析法という手法で説明しようという研究を東京工業大学および名古屋大学との共同研究で進めている。同手法は，まず，分子動力学計算から算出される粘土分子近傍の水分子の物性などミクロな領域での物性値を把握し，次に，モデル化したベントナイトの間隙構造をもとに，ミクロな物性値の分布から材料全体の物性値を導出する均質化解析という手法を組み合わせ，圧縮ベントナイトの拡散係数の導出を行うものである。

圧縮ベントナイトへの同手法の適用にあたっては，間隙構造のモデル化が重要である。このため，走査型電子顕微鏡観察，圧縮成型したベントナイト試料のXRD測定などから，圧縮ベントナイトの乾燥密度とスメクタイト層間（内部間隙）と積層体間（外部間隙）の存在割合を表現する簡易なモデルを構築した。このモデルを基に，スメクタイト粒子が配向して圧縮成型されているクニピア（クニミネ工業製）中の水の実効拡散係数を解析した（鈴木ほか，2001a；鈴木ほか，2001b）。図5.2-65中の●がスメクタイトの配向方向と平行な方向への拡散，■が配向方向と垂直な方向への拡散の解析値であり，白抜きは実験値の◇に，後者はその他の実験値のプロットと対応する。

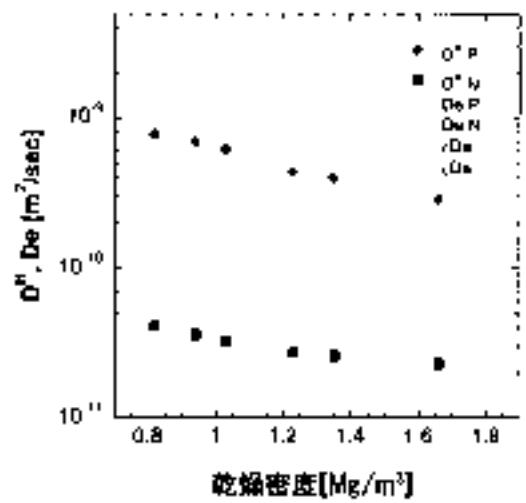


図5.2-65 圧縮ベントナイト中のHTOの拡散結果とMD-HA結合解析結果の比較

配向方向の値は解析値が2倍程大きいものの傾向性は良い一致をしている。一方，配向と垂直方向への拡散は，低密度側で解析値との一致が悪

くなるが，これは低密度での配向の乱れなどに起因するものと推定される。今後，継続して間隙構造モデルの改良を行うとともに，水分子以外の溶質の拡散への適用を試みて行く。

③ まとめ

- 還元条件下で炭酸濃度をパラメータとしたネプツニウムの収着試験を実施し，化学種毎の収着特性に関する考察を行った。
- 酸化還元をともなう，成熟の固相への収着挙動を把握するための研究を開始し，予察的データが得られた。
- 精製スメクタイトを用い，間隙水中の塩濃度をコントロールした条件で，I，HDO の透過拡散試験を実施し，それぞれの実効拡散係数の塩濃度依存性を把握し，拡散メカニズムに関する考察を行った。
- 圧縮ベントナイトの観察などから簡易な間隙構造モデルを構築し，同モデルに基づいた分子動力学 均質化結合解析法により，ベントナイト中の水の拡散挙動の解析を行い，実験値の傾向性と一致する解析結果を得ることができた。

今後は，重要元素に対して試験条件を適切に制御した精緻な試験を実施し，収着・拡散現象を説明するモデルの構築を行い，安全評価の信頼性向上を行っていく。

参考文献

Kitamura, A., Tamura, T. and Shibutani, T. (2002): Sorption Behavior of Neptunium onto Smectite under Reducing Conditions in Carbonate Media, NUCEF 2001, JAERI Conf 2002-004, pp.659-666.

OECD/NEA(2001). Using Thermodynamic Sorption Models for Guiding Radionuclide Distribution Coefficient Investigations.

中田弘太郎，佐藤伸哉，田中 知，北村 暁，舘 幸男，戸村 勇，佐藤治夫(2001)：マグネタイト/溶液界面における Cr(VI)の還元，日本原子力学会 2001 年秋の大会要旨集，p.916.

Sato, H., Ewt, N. and Yoshikawa, H. (1995) : Diffusion Behaviour for Se and Zr in Sodium Bentonite, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 353, pp.269-276.

鈴木 覚，佐藤治夫(2002)：圧縮ベントナイト中のストロンチウムイオン，ヨウ素イオン，重水の実効拡散係数の塩濃度依存性，サイクル機構技術資料，JNC TJ8400 2002-002

鈴木 覚，徐 色 敦，上野健一，市川博明，阿村能行，藤井直樹，柴田雅博，佐藤治夫，北山一美 (2001a)，圧縮ベントナイトの微細構造のモデル化と MD-HA 結合解析法の拡散問題への適用，粘土科学，41，pp.49-57.

鈴木 覚，上野健一，徐 色 敦，柴田雅博，佐藤治夫，市川博明，藤井直樹，阿村能行 (2001b)：圧縮ベントナイトの微細構造のモデル化と MD-HA 結合解析法の拡散問題への適用，日本原子力学会 2001 年秋の大会要旨集，p.899.

Yui, M., Sasamoto, H. and Arthur, R.C. (1999): Groundwater Evolution Modeling for the Second Progress Performance Assessment (PA) Report, JNC Technical Report, JNC TN8400 99-030.

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粒子が存在し，また緩衝材として用いられるベントナイトは微粒子で構成されているため，地下水の水質や流動によって浸食され，ベントナイトの微粒子（コロイド）も地下水中に流出する懸念がある。緩衝材から溶出した放射性核種はこのようなコロイドに収着されることによって，擬似的なコロイドを形成すると考えられている。一般に天然のコロイドは岩石と同様に負に帯電し，また粒子の大きさによってはマトリクス拡散が起こりにくいことが推測されるため，放射性核種が擬似的なコロイドとして移行した場合，地層中における放射性核種の移行に対する遅延作用が阻害される可能性がある。このようにコロイドが放射性核種の移行を助長する媒体として作用する影響は，「第２次取りまとめ」でも天然バリアについてのモデル変更ケースとして評価を行った。

コロイドが放射性核種の移行・遅延に及ぼす影響について，さらに信頼性を向上させた評価を行うために，「第２次取りまとめ」以降，以下のような試験・研究計画を実施している。

- 地下水中のコロイドに関する事例調査
- 緩衝材を起源とするコロイドの発生条件，分散安定条件の検討
- 放射性核種のコロイドへの収着性に関する検討
- 地質媒体を想定した系でのコロイド移行評価
- 結晶質岩中の亀裂を対象とした放射性核種とコロイドの移行挙動の評価（グリムゼル原位置試験・CRR プロジェクト）
- コロイド影響評価モデルの高度化と適用性確認

以下にこれらの計画に基づいて実施されている試験の進捗について報告する。

② これまでの成果

i) 地下水中のコロイドの事例調査

地下水中に存在するコロイドに関する調査・研究としては，「第２次取りまとめ」までに，岐阜県東濃地域に分布する新第三紀堆積岩層を対象とした調査を実施している。本調査では，ベントナイト鉱山（山形県・月布鉱山）を事例として，地下水中のコロイドに関するデータの取得，およびニアフィールドでのコロイド生成に関するナチュラルアナログ研究を実施した（Kuno et al., 2002）。当鉱山の地質は，新第三紀の泥岩および砂岩と，これに挟まれるベントナイトを含む凝灰岩からなり，鉱山内には鉛直方向に約 30m の間隔で水平坑道が開削されている。本調査では鉱床の直上の沢水（サンプル A），および海抜約 180m（同 B），約 90m（同 C），約 30m（同 D），約 -30m（同 E）のそれぞれの深度の坑道において，ベントナイト鉱床と接触する地下水をサンプリングし，イオンやコロイド成分の濃度を測定した。

図 5.2-66 に示すように，地表の沢水に対し，坑内の地下水は深度が増加するにつれ，イオン強度が増加する傾向が確認された。浮遊成分については採水地点によって顕著な存在量の相違が認められ，有意な量のコロイドが検出されなかった採水地点（濃度 1mg/L 以下，サンプル A,B,E）がある反面，採水時に懸濁が目視された地下水も存在した（サンプル C,D）。しかしこれらのサンプルについても，静置した状態ではほとんどの懸濁成分は沈降し，上澄み液には主としてスメクタイトと考えられるコロイドが数 mg/L 程度しか確認されなかっ

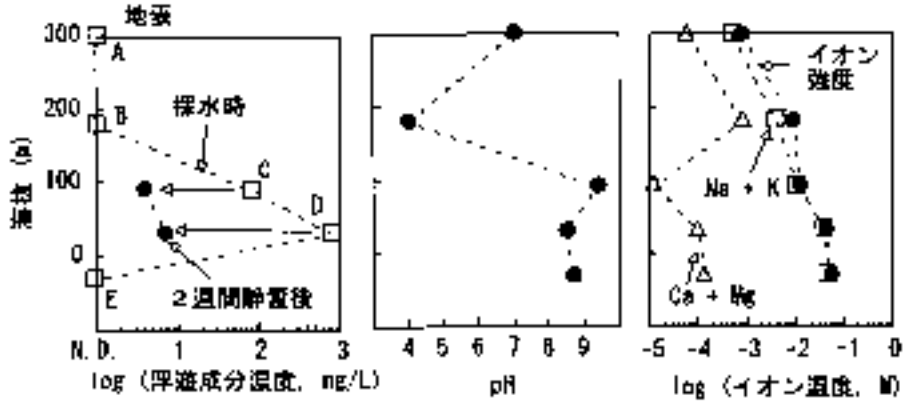


図 5.2-66　採水地下水の pH，イオン濃度および浮遊成分濃度

た．サンプル C-1 は湧出に伴う擾乱によって一時的に還元環境が生じたと考えられ，イオン強度がおよそ 10^{-1} よりも大きいこれらの地下水は，ベントナイトに起因するコロイドが安定に存在しにくい水質環境であると思われる．またこれより，天然の環境を極力維持しながら採水するための手法開発が重要であることが示唆された。

ii) コロイド影響評価

岩石亀裂中でのイオンの移行挙動にコロイドが及ぼす影響を試験から確認するとともに，「第２次取りまとめ」で用いた影響評価モデルの適用性の確認ならびにモデルでの課題を抽出するために，カラム試験を実施した（黒澤ほか，2000；久野・油井，2001）．亀裂開口幅 0.5mm，長さ 46mm の平行平板状の単一模擬亀裂を花崗岩で作製し岩石カラムとした．イオンとして Sr（濃度 100μg/L；放射性 ^{85}Sr を 1Bq/L 添加），コロイドとしてベントナイトコロイド（濃度 6mg/L 相当）を用いた．上述の事例調査から判断すると，このコロイド濃度は試験条件として適当であると考えられる。試験溶液として，コロイド単体，イオン単体および両者を共存したイオン溶液の３種類を調製し，各々流速 6mm/min で岩石カラムへ送液した。

図 5.2-67 に，この岩石カラムへ各試験溶液を送液したときの破過曲線を示す。ベントナイトコロイドは速やかに移行し亀裂を破過するが，Sr は亀裂表面への収着に伴う移行の遅延が確認された。一方，ベントナイトコロイドが共存した Sr については，コロイドの移行挙動に支配されることなく，Sr 溶液（単体）と同様の破過挙動を示した。カラム試験と同様の試験溶液を用いてバッチ式収着試験を実施したところ，ベントナイトコロイドに収着された Sr については，岩石が添加されることによりコロイドから一部が脱離することが確認され，その結果，コロイドへの分配係数が減少し，イオンの移行に及ぼす影響が生じにくい方向に作用する現象が認められた．ここで用いた Sr のようにコロイドへの可逆性収着核種に関しては，亀裂中の移行過程で生じる再分配により，核種の遅延効果が期待できることが示唆された．

またカラム試験の結果は，イオン，コロイドおよび岩石間での相互作用（瞬時／線形／可逆的な収着）を想定している，「第２次取りまとめ」で用いた簡略な核種移行モデルでの評価結果とおおよそ一致し，このモデルに基づく予測解析が本試験条件においては妥当であることが確認された。

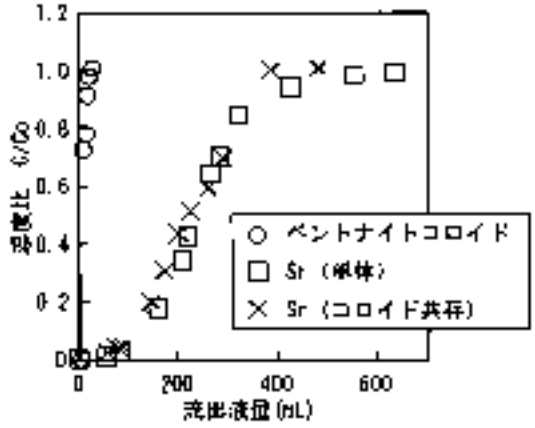


図 5.2-67　岩石カラムからの破過曲線

iii) 結晶質岩の亀裂中での放射性核種とコロイドの移行挙動評価

グリムゼル原位置試験場（5.2.1 項参照）では，結晶質岩中の透水性亀裂における，コロイドによる放射性核種の移行・遅延の評価を目標とした総合的な原位置試験研究（CRR：コロイドと放射性核種の遅延評価プロジェクト）が，1996 年から国際共同プロジェクトとして展開されている。これまでに，室内試験とモデル解析を主体としたフェーズ１（1998 年～2000 年３月）では，人工バリア・母岩（岩盤）境界部の地質環境条件下でのベントナイトコロイドの安定度（分散・凝集現象）やアクチニドとベントナイトコロイドおよび岩石との収着反応などに関する新たな知見が取得されるとともに，原位置試験に必要な技術やモデルなどが整備された（Ota et al., 2000；Uchiyama et al., 2001）。

フェーズ２（2000 年４月～）では，フェーズ１の成果を踏まえ，試験対象亀裂の水理学的特性の評価やその亀裂中でのコロイドと放射性核種の移行挙動の予測解析などを実施した。さらに，放射性核種の移行・遅延に対するコロイドの影響を評価するため，同一の試験条件下で放射性核種のみ（^{131}I，^{85}Sr，^{241}Am，^{233}Th，^{237,242}Pu，^{237}Np，^{99}Tc），および放射性核種（^{131}I，^{137}Cs，^{85}Sr，^{241}Am，^{99}Tc，^{233}Th，^{237,242}Pu，^{237}Np，^{99}Tc）とベントナイトコロイド（20mg/L）を共存させた二つのケースの原位置試験を実施した。この原位置試験は，試験対象亀裂に直交する２本の試錐孔（孔間距離＝2.50m）において，一方の試錐孔から放射性核種（およびベントナイトコロイド）を注入し，他方の試錐孔で亀裂を破過してきた放射性核種の濃度を測定した。

図 5.2-68 に試験結果の一例を示すが，その結果

から，

・Pu(Ⅳ)の移行はベントナイトコロイドが共存する場合，非収着性のIとほぼ同じように破過すること

・Sr，Np(Ⅴ)の移行はベントナイトコロイドの共存に大きく依存せず，弱～中程度の収着性（移行・遅延挙動）を示すこと

・Csの移行はベントナイトコロイドが共存する場合は助長され（破過曲線の第1ピーク），ベントナイトコロイドが共存しない場合は著しく遅延される（第2ピーク）こと

などが認められる。この試験結果に基づけば，実際の地質環境中で，人工バリア近傍で想定される程度の濃度のベントナイトコロイドが共存する場合，放射性核種の種類によっては移行が助長される可能性があることが示唆される。なお，この試験結果については，現在，詳細な解析が行われているところである。

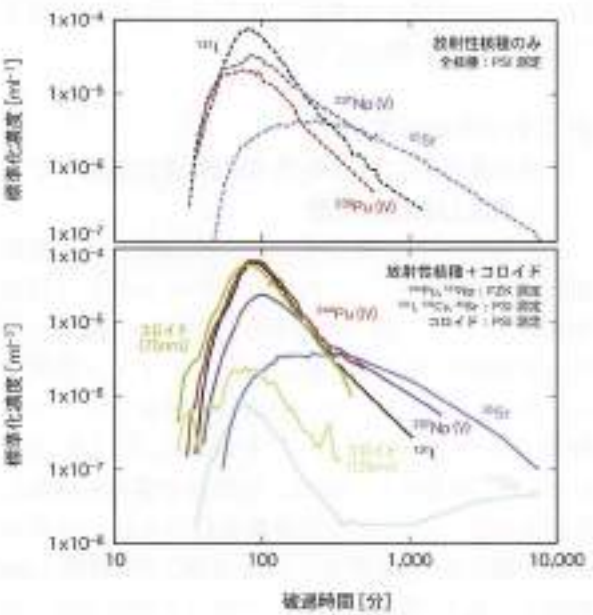


図 5.2-68　ベントナイトコロイド共存下での放射性核種の移行・遅延挙動
（グリムゼル原位置試験結果の一例）

③ まとめ

天然バリア中での放射性核種の移行挙動にコロイドが及ぼす影響に関して，評価の信頼性を向上させることを目的として，「第2次取りまとめ」以降に実施してきた取り組みについて報告した。ベントナイト鉱山での事例調査より，イオン強度がおよそ 10^{-2} よりも大きい地下水中ではコロイドが安定に存在しにくいこと，またSrとベントナイトコロイドを用いたカラム試験より，「第2次取りまとめ」で用いた影響評価モデルの適用性が確認された。さらに，グリムゼル原位置試験・CRPプロジェクトでは，ベントナイトコロイドの物理的・化学的特性などに関する新たな知見を得るとともに，実際の結晶質岩中の透水性亀裂において，ベントナイトコロイドが共存する場合，放射性核種の種類によっては移行が助長されるケースもあることが認められた。

今後は，採水・分析手法に留意した地下水コロイドの特性調査をさらに継続し，コロイド種や濃度，その安定性などに関するデータを蓄積・整理する。また，放射性核種の移行に及ぼすコロイドの影響については，グリムゼル原位置試験結果のモデル解析を継続し，コロイドと放射性核種の移行挙動を詳細に評価するとともに，これまでに開発・改良した評価モデルの高度化を図る。特に，放射性核種の移行は，コロイドへの収着挙動（特に不可逆的な場合）に顕著に依存することが推測されることから，収着の可逆・不可逆性の評価を含めたより詳細な現象の解明が必要と考えられる。

さらに，コロイドと岩石との相互作用を考慮するとともに，亀裂性媒体だけではなく，堆積岩で代表されるような多孔質性の媒体についても評価し得る，現実的かつ汎用性のある影響評価モデルを構築していくことが重要である。

参考文献

Kuno, Y., Kamei, G. and Ohtani, H. (2002) : Natural colloids in groundwater from a bentonite mine, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. (in press)

久野義夫，油井三和(2001)：ベントナイトコロイドに収着したSrの岩石亀裂中での移行挙動，サイクル機構技報，No.13，pp.53-63.

黒澤　進，林　賢一，加藤博康，上田真三，久野義夫，油井三和(2000)：ベントナイトコロイドに収着されたSrの岩石亀裂中の移行，日本原子力学会2000年秋の大会予稿集，p.695.

Möri, A., Geckeis, H., Missana, T., Guimera, J., Degueldre, C., Meyer, P., Ota, K., Papenguth, H., Alexander, W. R. and Hernan, P. (2001) : The Colloid and Radionuclide Retardation Experiment (CRR) at the Grimsel Test Site, Abst. 8th International Conference on Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere (Migration'01), p.117.

Ota, K., Kuno, Y., Shibata, M., Yoshida, Y. and Yui, M. (2000) : Laboratory work in support to CRR Phase 1 experiments at GTS. JNC Tech. Rep., JNC TN7420 2000-003.

2) 天然有機物の影響評価モデルの開発

① 課題と計画の概要

天然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，「第２次取りまとめ」における天然有機物の影響評価は，性能評価を行う上で暫時的に考慮されたレベルにとどまっている．しかし地質環境が特定されれば，核種移行に及ぼす有機物の影響を実験的にある程度定量化できると考える．詳細な影響評価は今後の具体的な地質環境での研究に依存するところが大きいが，「第２次取りまとめ」までの課題を整理しておくことが重要である．有機物影響評価について現状と課題をまとめると以下のようになる．

・地下水中に存在する天然有機物の特性

深部地下水中の有機炭素濃度について複数の測定結果が報告されている（例えば，長尾，1995）．地下水中の有機物の特性はその生成過程や地下水の化学組成に依存するため，具体的な地質環境における調査の準備として，既存の知見をまとめるとともに，調査項目や分析等の方法論を整理する必要がある．

・放射性核種の溶解度に及ぼす影響

地下水やベントナイト間隙水中に存在する可溶性天然有機物の影響により，核種の溶解度の上昇が考えられるものの，処分環境においては核種は主に炭酸と錯体を形成するものと考えられる．アクチニド元素は弱アルカリ性環境では難溶であり，有機物との相互作用が大きいといわれている（例えば，Kim et al.，1987）が，このような条件における溶解度のデータは不足している．

・人工バリア中の有機物透過性

降水系地下水環境では，既知分子量100,000を超える有機物は圧縮ベントナイトを透過できない，との知見がある（金持ほか，1999a），一方，海水系地下水のような高イオン強度環境では圧縮ベントナイトの微細間隙構造が変化し，大きな間隙が生じる可能性があり（例えば，Pusch et al.，1990），データの拡充をはかりつつ圧縮ベントナイトのフィルター効果を定量的に検討する必要がある．

・人工バリア中の核種移行の遅延に及ぼす影響

人工バリアとして使用が想定されるベントナイトには天然有機物が含有されているため，「第２次取りまとめ」において，分配係数を評価する際の不確実性に含まれるとして取り扱われた．

・天然バリア中の核種移行の遅延に及ぼす影響

有機物濃度の上昇に伴い，岩石に対する核種の分配係数が減少するとの報告があるが（例えば，Hoggs and Smith，1984），「第２次取りまとめ」において，この影響は分配係数の不確実性として取り扱われた．ただし，有機物を含むコロイドによる遅延に与える影響について，これまでの知見を整理するとともに，データを取得する必要がある．

特に「第２次取りまとめ」以降充実させるべきデータは，放射性核種の溶解度に及ぼす影響，およびより詳細な人工バリア中の有機物透過性に関するデータであると考えられる．

以上を踏まえ，処分環境を模擬した条件において，代表的な天然有機物の一つであるフミン酸を用い，安全評価上重要なアクチニドIV価の溶解度に及ぼす影響を検討した．

② これまでの成果

ⅰ）還元条件下におけるThの溶解度に及ぼすフミン酸及び炭酸の影響

未飽和側からの弱アルカリ性領域における溶解度測定試験を行った．Th(IV)のアモルファス固相$Th(OH)_4$とフミン酸（Aldrich社製フミン酸ナトリウムを精製）を共存させ，pH7～9，イオン強度を0.1または0.01とした．また炭酸イオンとフミン酸が共存する系についても試験した（Ｌ.Ｍほか，2000；加藤ほか，2000）．深部地下環境を模擬した嫌酸素かつ還元条件で試験を行うため，分析以外の全操作をO_2濃度0.1 ppm未満，CO_2濃度1ppm未満であるAr雰囲気グローブボックス内で行った．温度は室温である．

試験溶液が飽和に達した時点でTh濃度はpHの増加と共に若干減少した．イオン強度の差による影響は見られなかった．図5.2-69のようにフミン酸濃度が増加するとほぼ一対一の関係でTh濃度も増加する傾向が見られ，弱アルカリ性領域におけるTh(IV)－フミン酸錯体の形成が示唆された．

次に炭酸イオンとフミン酸が共存する系におけるTh濃度を図5.2-70に示す．炭酸イオンのみの影響を見ると，炭酸イオン濃度の増加に伴ってTh濃度は顕著に増加した．炭酸イオンおよびフミン酸が共存する場合，やはりTh濃度の上昇が見られ

たが，炭酸のみの系における Th 濃度との大きな差が見られなかった。その原因として，Th－炭酸－フミン酸複合錯体の形成という可能性が考えられるものの，錯体種については今後の検討が必要である。

以上の結果は，核種の溶解度に与える有機物の影響が炭酸に比べて顕著ではないとする「第２次取りまとめ」における取り扱いが，概ね妥当であることを示している。

ii）還元条件下における Np の溶解度に及ぼすフミン酸の影響

Np-237 とフミン酸（Aldrich 社製フミン酸ナトリウムを精製）が共存する系において，pH8，イオン強度 0.1 でのバッチ試験を行った。試験は過飽和法とし，溶媒抽出法により Np の価数を確認した（飛塚ほか，2001）。深部地下環境を模擬した低酸素かつ還元条件で試験を行うため，分析以外の全操作を O_2 濃度 1 ppm 未満である Ar 雰囲気グローブボックス内で行った。温度は約 22℃の室温である。

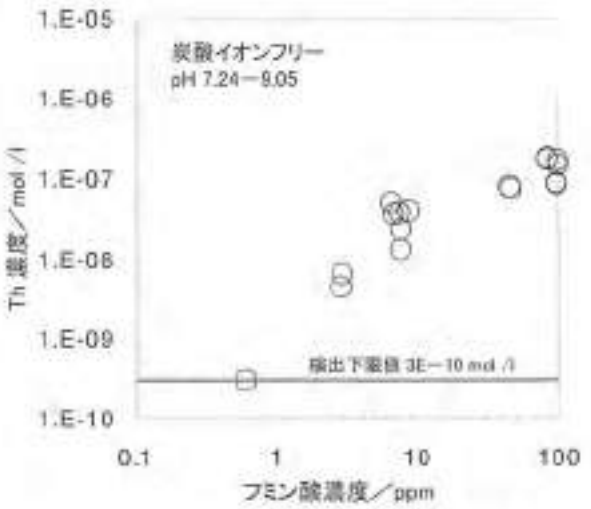


図 5.2-69　Th 濃度のフミン酸濃度依存性

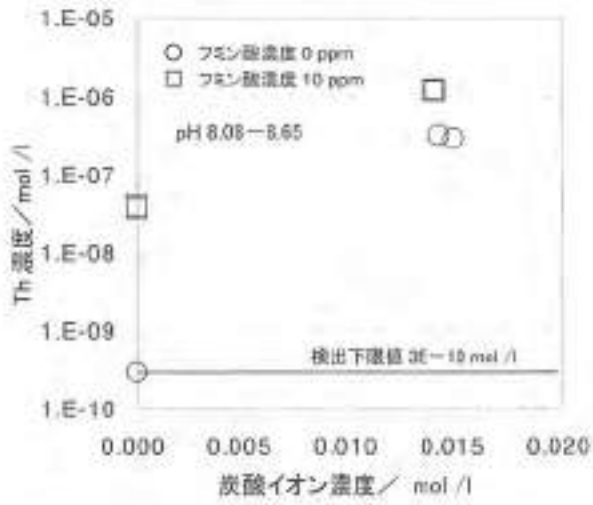


図 5.2-70　Th 濃度の炭酸イオン濃度依存性

フミン酸濃度に対する全 Np 濃度を図 5.2-71 に示す。フミン酸濃度の増加に伴い，全 Np 濃度も増加する傾向が見られ，弱アルカリ性領域における Np－フミン酸錯体の形成が示唆された。これは Sm(Ⅲ)（金持ほか，1999b）や前項 i)の Th(Ⅳ)（上田ほか，2000；加藤ほか，2000）と同様の傾向である。特にフミン酸濃度 10ppm 以上の領域ではその上昇が顕著であった。初期添加 Np 濃度による相違は見られなかった。前述した天然有機物の存在量を考慮すると，処分環境において Np の溶解度に及ぼすフミン酸の影響は顕著ではないと考えられる。

また，Np(Ⅳ)－フミン酸錯体の見かけの錯生成定数 β(Ⅳ)を求めた。溶媒抽出により，試験溶液には Np(Ⅳ)のみならず Np(Ⅴ)も存在することが示唆されたため，Np(Ⅴ)に対する見かけの錯生成定数 β(Ⅴ)を用いて計算した。この値は本試験と近い条件で取得された Tochiyama et al.（2000）による $\log\beta$(Ⅴ)=4.29±0.05（pHc 6.93）を参考に設定した。

その結果，$\log\beta$(Ⅳ)は 4 であった。試験日数やフミン酸濃度に対する β(Ⅳ)の相関関係は明確ではなかった。Ⅳ価のアクチニドはⅤ価のアクチニドに比べ天然有機物との相互作用が大きいと言われているが，今回の計算結果では，β(Ⅳ)と β(Ⅴ)は同程度であった。

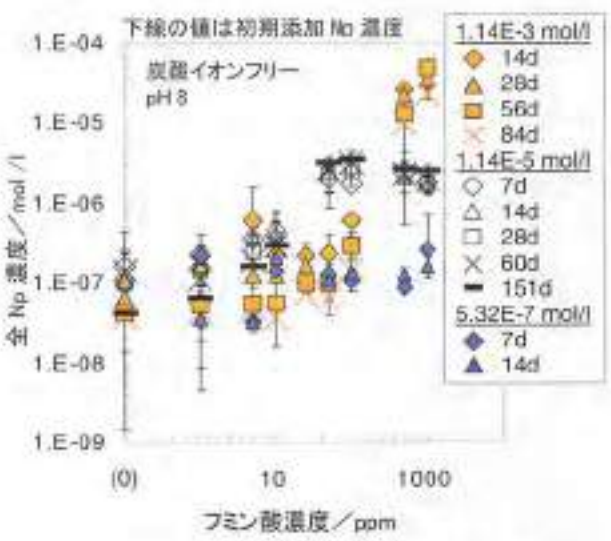


図 5.2-71　全 Np 濃度のフミン酸濃度依存性

③ まとめ

以上の結果から，例えば深部地下環境に存在するフミン酸が数 ppm 程度である場合，IV価のアクチニドの溶解度に及ぼすフミン酸の影響は大きくないと考えられる。また，フミン酸による影響は炭酸による溶解度の増加と同程度であると考えられる。炭酸が共存する弱アルカリ性領域でのデータは多くないことから，今後は天然有機物と錯合する炭酸やCaイオンなどが共存する系での放射性核種の溶解度を調査する予定である。

また，海水系地下水を想定した高イオン強度環境における圧縮ベントナイト中の有機物透過試験の実施を検討している。

以上のように天然有機物と放射性核種との相互作用については更なるデータの充足を図る必要があり，今後も安全評価に資する基礎的な知見の集約を図っていく。

参考文献

Boggs, S. Jr. and Seitz, M.G. (1984) : The Influence of Dissolved Organic Substances in Groundwater on Sorption Behavior of Americium and Neptunium, Argonne National Laboratory, ANL-83-84.

Kim, J.I., Buckau, G. and Zhuang, W. (1987) : Humic colloid generation of transuranic elements in groundwater and their migration behaviour. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 84, pp. 747-756.

金井昇理子，久野義夫，油井三和 (1999a)：圧密ベントナイトに対する有機物の透過試験，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-080.

金井昇理子，佐藤治夫，笹平　朗 (1999b)：フミン酸およびベントナイトに由来する有機物のサマリウム溶解度に及ぼす影響評価，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-059.

加藤博康，岡田賢一，上田真一，柴田雅博，油井三和 (2000)：トリウムの溶解度へ及ぼすフミン酸および低分子有機酸の影響，日本原子力学会 2000 年秋の大会要旨集，p. 706.

良尾敏也 (1995)：地下水に存在する腐植物質の特徴とTRU 元素との錯体形成能，放射性廃棄物研究，Vol. 1, No. 2, pp. 231-242.

Pusch, R., Karnland, O. and Hökmark, H. (1990) : GMM A General Microstructural Model for Qualitative and Quantitative Studies of Smectite Clays, SKB Technical Report 90-43.

原塚早智子，小原幸利，佐藤治夫(2001)：還元条件でのNpの溶解度に及ぼすフミン酸の影響，日本原子力学会 2001 年秋の大会要旨集，p. 937.

Tochiyama, O., Yoshino, H., Kubota, T., Sato, M., Tanaka, K., Niibori, Y. and Mitsugashira, T. (2000) Complex Formation of Np(V) with humic acid and polyacrylic acid, Radiochimica Acta, 88, pp. 545-552.

上田真一，加藤博康，黒澤　進，中禅寺敦之 (2000)：核種移行評価データの信頼性確認，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 2000-002.

5.2.5 生物圏評価モデル

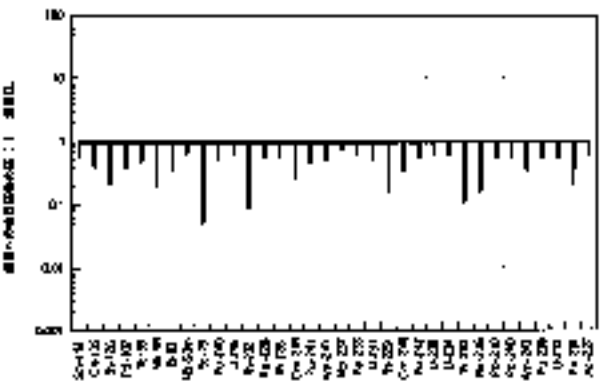
① 課題と計画の概要

「第２次取りまとめ」では，わが国における幅広い地質環境条件を考慮して，国際共同研究 BIOMASS で検討されたレファレンスバイオスフィアの構築手法に基づいた生物圏評価モデルを構築した。今後は，実際の地表環境への適用に向けて，既存の生物圏評価手法の適用性向上と信頼性向上のため，サイトを特定しない生物圏評価に対して検討されたレファレンスバイオスフィアの構築手法を高度化するとともに，地質環境と生物圏とのインターフェイス（以下，GBI）の具体化に関する検討等を行い，既存の評価手法の改良あるいは新しい評価手法の開発を行う必要がある。また，解析に必要なデータを選定するための方法論についても，国際的な研究動向を踏まえながら，わが国での評価に適用できるデータ選定手法を構築する必要がある。

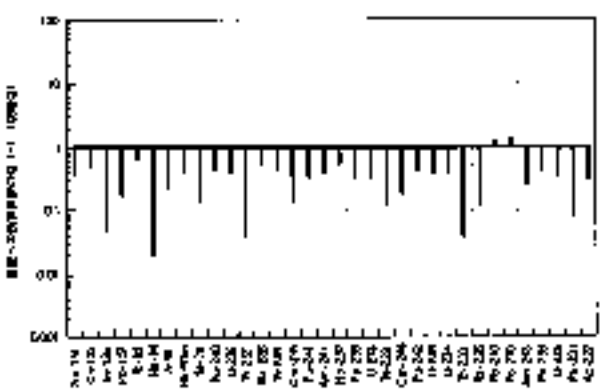
② これまでの成果

ｉ）気候変動による影響を考慮した生物圏評価モデルの構築

「第２次取りまとめ」の生物圏評価では，現在の地表環境条件が継続するという評価の前提条件のもと，気候についても現在の温暖気候が継続するものとして，生物圏モデルの構築を行った。本検討では，気候変動による生物圏システムへの影響を生物圏モデルに取り入れた場合，その影響がどの程度のものとなるかを把握することを目的として，気候変動に関する学術的な知見をもとに温暖気候以外の気候状態を想定して生物圏モデルを作成した。なお，気候変動によるシステムの影響の取り扱いについては世界中に現存する気候状態をアナログとして利用した。作成された生物圏モデルから求められる線量への換算係数は，現在の気候状態（温暖気候）に基づくシステムのもの（「第２次取りまとめ」での検討結果）と比較した。具体的には，深井戸を GBI として想定した生物圏システムについて，冷帯気候とツンドラ気候の２つの気候状態を考慮して生物圏モデルを作成した。気候変動を考慮するにあたっては，モデルの比較を容易にする観点から，各モデルの評価条件は可能な限り同じにすることとし，冷帯気候やツンドラ気候では降水量が現在よりも減少することから，降水量の変動に対して感度が小さい深井戸を GBI として想定した。灌漑水量，浸透／流出量，食物摂取に関わるパラメータについてはそれぞれの気候の特徴を表す値を設定したものの，それ以外の評価条件，概念モデルや数学モデルについては「第２次取りまとめ」の深井戸を GBI とした生物圏モデルと同様のものを使用した。これらの生物圏モデルから算出した線量への換算係数を温暖気候の場合の生物圏モデルのものと比較したところ，図 5.2-72 に示すようにほとんどの核種で換算係数は減少し，減少幅は最大でも２桁より小さいことが明らかとなった。それぞれの気候の特徴を表すパラメータを設定したことで灌漑水量や浸透／流出量が減少したことから，表面土壌コンパートメント中の放射性核種濃度が減少し，当該コンパートメントからの被ばく経路を考慮している農作業従事者グループの線量への換算係数が減少した（加藤ほか，2001a）。



(a) 冷帯気候



(b) ツンドラ気候

図 5.2-72 気候変動を考慮した生物圏モデルを用いて算出した線量への換算係数の規格値*（農作業従事者グループ）

*第２次取りまとめの生物圏モデル（気候状態は温暖気候，GBI は深井戸）を用いて算出した線量への換算係数で規格化

ii）海域を GBI とした生物圏評価の代替モデルに関する検討

「第２次取りまとめ」では，わが国の幅広い地質環境に対応できるよう，処分場からの放射性核種が流入する場所（GBI）として様々な地質環境との接点を想定した生物圏モデルを作成し，線量を算出した。これらの生物圏モデルは，サイトを特定しない研究開発の段階のものであることから，想定しうる生物圏システムの一般的な特徴のみに焦点をあてたものとなっている。このうち海域に放射性核種が流入することを想定したモデルでは，沿岸海域（沿岸海域水または沿岸海域堆積層）をひとつのコンパートメントとして取り扱い，移行プロセスや被ばく経路についても陸域に比べ概略的なものとしたことから，海域環境における物質移行プロセスを単純化したモデルであった。処分事業の段階に入ると，サイト選定の進捗に応じてサイトに関する情報の質と量が高まっていくことが想定される。このため，得られる情報の質と量に応じて生物圏モデルを実環境に適用できるよう，これまで作成してきたモデルをもとに想定される範囲でモデルを改良しておくことが重要となる。その検討のひとつとして，海域を GBI とする生物圏モデルについて，「第２次取りまとめ」で検討した沿岸海域堆積層を GBI とした生物圏モデル（以下，沿岸海域モデル）をベースに海域の環境に関する知見を取り込みながら代替モデルを作成し，沿岸海域モデルとの比較により代替モデルの特性を把握することを試みた。具体的には，これまで沿岸の海域としてひとつのコンパートメントとして取り扱っていた領域について，その空間的な広がりに着目し，海域と陸域との境界部における領域（潮間帯）および沿岸の海域よりも沖合の領域（周辺海洋）をそれぞれコンパートメントとして設定し，それらが GBI となる代替生物圏モデルを作成した（以下，潮間帯モデルおよび周辺海洋モデル）。それぞれのモデルから算出した被ばくグループごとの線量への換算係数について比較したところ，海洋漁業従事者グループの線量への換算係数が農作業従事者グループよりも大きな値となった。また，潮間帯モデルおよび周辺海洋モデルと沿岸海域モデルの結果を比較したところ，潮間帯モデルおよび周辺海洋モデルの線量への換算係数のほうがほとんどの核種で同程度か小さい値となった。図 5.2-73 に沿岸海域モデル，潮間帯モデル，周辺海洋モデルを用いて算出した線量への換算係数を示す。潮間帯を GBI とした生物圏モデルでは，生物圏内に流入した放射性核種の大部分が海域における核種の移行プロセスによって拡散された後，最終シンクに移行するため，被ばくに寄与するコンパートメント（例えば，沿岸海域コンパートメントなど）に存在する放射性核種が減少することが考えられる。一方，周辺海洋を GBI とした生物圏モデルでは，生物圏内に流入した核種は固相の分配係数が高く，かつ海洋漁業従事者グループの被ばくに寄与しない周辺海洋堆積層に蓄積するため，沿岸海域や表面土壌など被ばくに寄与するコンパートメントに移行する核種量が減少する。したがって，沿岸海域を GBI とした生物圏モデルと比較して線量への換算係数が減少した（加藤ほか，2001c；加藤ほか，2001d）。

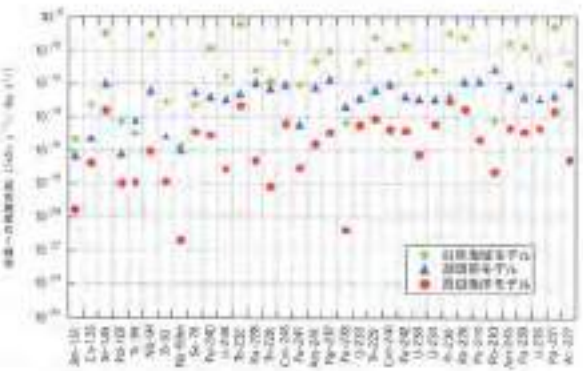


図 5.2-73　海域を GBI とした生物圏モデルを用いて算出した線量への換算係数（海洋漁業従事者グループ）

iii）感度解析による生物圏評価パラメータの不確実性に関する検討

生物圏モデルで用いるパラメータには，分配係数の測定などデータ取得に伴う不確実性，統計値などに含まれるデータ加工に伴う不確実性，さらに蓄積された多くのデータで構成されるデータ範囲の中からデータを選択する際の判断に伴う不確実性などが存在し，結果としてモデルによる評価結果やその特性にも不確実性が内在することになる。これらの不確実性については，感度解析を行うことによってモデル全体に与える影響を定量的に把握することが可能である。本検討では，一例として「第２次取りまとめ」で取り上げた河川水を GBI とした生物圏モデルについて，各パラメータの取りうる範囲に基づく感度解析を行い，モデル全体に与える影響を定量的に求めることによっ

て，各パラメータの重要度を把握することを試みた。その結果，コンパートメント間の移行パラメータのうち，河川流量，灌漑水量，摂食量，および表面土壌の分配係数，表面土壌コンパートメントの大きさ（深さ，面積，体積），土壌から農作物への移行係数について，線量への換算係数に与える影響が大きいことが明らかとなった。一例として，図5.2-74にコンパートメント間の移行パラメータを変動させた場合の線量への換算係数の変動幅を示す（加藤ほか，2001b）。

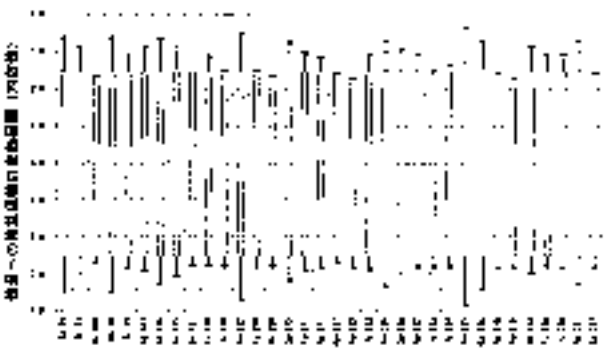


図 5.2-74　コンパートメント間の移行パラメータの変動による線量への換算係数の変動範囲
（農作業従事者グループの線量への換算係数を，河川水をGBIとした場合の生物圏モデルを用いた場合の解析結果で規格化し，対数値で示した。また，図中の白いボックスは河川流量の変動範囲を表している。）

iv）生物圏評価データベース

上記の感度解析により，河川水をGBIとした生物圏モデルにおいて重要なパラメータが抽出された。

一方，IAEAのBIOMASSでは，レファレンスバイオスフィアの構築手法と同様に，評価パラメータに関しても，透明性と整合性を有する手続きでデータを収集できるような方法論の開発を試みている。ここでは，BIOMASSでの検討をベースとして，生物圏評価に使用するパラメータ値の選定において，透明性と信頼性を確保し，かつ効率的なデータ選定手法を開発した（吉田ほか，2001）。また，実環境を対象とした生物圏評価における本データ選定手法の適用性を確認する観点から，「第２次取りまとめ」の生物圏評価で用いた被ばくモデルおよびデータについてレビューを行い，パラメータの分類および重要パラメータのデータ設定方法を検討しつつある。現在までの検討の結果では，一部のパラメータに対しては調査・検討事例の数が多く，当該パラメータに対する理解の程度が高い状況でのデータ設定が可能となったが，依然として知見が乏しく，データ設定の参考となる情報が少ないパラメータが存在することが明らかになっている。

v）実際の地表環境条件に対する既存のモデル化手法の適用性検討

「第２次取りまとめ」の生物圏評価では，帯水層における放射性核種の希釈および吸着による遅延効果はないものとして，単純化された方法で核種移行を表現し，生物圏モデルを構築した。しかし，現実には地質環境から生物圏への核種の移行は非常に複雑であり，相互にリンクした多くの物理的，化学的および生物学的プロセスを含んでいる。そこで，生物圏評価の信頼性を向上させるため，GBIを適切にモデル化するための検討のひとつとして，地表近傍に着目した予備的なFEPデータベースを作成し，このFEPデータベースからわが国における幅広い環境で起こりうる様々な放出事象を記述したシナリオを開発している。現在までの検討の結果，「第２次取りまとめ」では評価の対象としていなかったいくつかのシナリオ（例えば，淡水と海水の混合が核種移行に影響を及ぼす物理，化学，生物学的プロセスを引き起こしうる河口環境への地下水の放出など）の考慮が必要になる可能性があることがわかりつつある。

③ まとめ

- 地表環境中の物質移行評価モデルの高度化の一環として，気候変動による影響を考慮した生物圏評価モデルを構築し，「第２次取りまとめ」で検討したモデルとの相違を明らかにするとともに，気候変動の影響が線量への換算係数にどの程度影響を与えるかについて定量的に把握した。今後は，土壌をGBIとする生物圏モデルを構築し，「第２次取りまとめ」において検討した水域をGBIとする生物圏モデルとの相違について検討するとともに，パラメータの感度解析等によりモデルの特性を把握する。
- 生物圏評価データベースに関しては，「第２次取りまとめ」の生物圏評価に使用したパラメータに対する感度解析の結果および国際的に検討されているデータ選定手法に基づくデータのレビューを行った。今後はこの結果を踏まえて，

特に知見が乏しく，かつ評価結果に与える影響が大きなパラメータのデータ設定に関わる調査・検討を重点的に実施する。

・実際の地表環境条件に対する既存のモデル化手法の適用性検討では，地表近傍に着目した予備的なFEPデータベースを作成し，このFEPデータベースからわが国における幅広い地質環境で起こりうる様々な放出現象を記述したシナリオを開発している。今後は，具体的な地表環境条件が与えられた場合のCBI設定を網羅的な観点から検討するとともに，「第2次取りまとめ」では評価の対象にしていなかったいくつかのシナリオについて，検討を進める。

参考文献

加藤智子，石原義尚，鈴木祐二，内藤守正，石黒勝彦，池田孝夫，Richard Little (2001a)：気候変動による影響を取り入れた地層処分安全評価の生物圏モデルの検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-003.

加藤智子，石原義尚，鈴木祐二，内藤守正，石黒勝彦 (2001b)：感度解析による地層処分安全評価生物圏モデルのパラメータの不確実性に関する検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-014.

加藤智子，鈴木祐二，石黒勝彦，内藤守正，池田孝夫，Richard Little (2001c)：海域を核種放出域とする地層処分生物圏評価の代替モデルに関する検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-013.

加藤智子，鈴木祐二，石黒勝彦，池田孝夫，Richard Little，内藤守正 (2001d)：沿岸海域を核種放出域とした地層処分生物圏評価の代替モデル，日本保健物理学会第35回研究発表会予稿集，C16.

吉田英爾，三本松史，中居邦治 (2001)：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，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 2001-001.

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の整備

1) 安全評価の基本事項の検討

① 課題と計画の概要

安全評価の指標・基準と時間スケールに関し，「安全規制の基本的考え方」では，事業許可申請時における安全評価において，「一般公衆に対する評価線量が最大になる時期においても，あらかじめ基準値として定められた放射線防護レベルを超えていないこと等を確認すること」が基本であるとしている。「第２次取りまとめ」に対する国の指針である「高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について」（原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会，1997；以下，専門部会報告書）では，安全評価の指標として線量を基本とし，基準として諸外国で提案されている考え方を参照することを求めるとともに，安全評価の評価期間に関し以下のように考え方を示した。

- 評価期間に関する時間スケールについては特に限定せず，現在の人々と対比して人間への影響が最大となる時期やその期間がわかるように評価を行っておく。
- 安全評価の時間スケールにおいて将来の人間環境の予測の困難さを考慮し，長期については天然の放射線レベルに有意な影響のないことを確認するため補完的な解析結果をあわせて示す。

また，専門部会報告書では，安全評価の時間スケールについて，人間環境の長期的な変化，地質環境の長期安定性，放射線源としての高レベル放射性廃棄物の特性といった視点の重要性を指摘した。安全評価の時間スケールについては，指標・基準と併せて今後も原子力安全委員会の場で議論されることと考えられる。

一方，地層処分システムの安全評価において生じる生物圏評価の不確実性に対処するため，IAEAでは，レファレンスバイオスフィアの構築手法のほかに，線量やリスクに基づく評価結果を別の独立した指標によって補完することを提案している。特に，IAEAの国際共同研究においては，天然に存在する放射性物質や化学物質の濃度やフラックス（以下，天然安全指標）の補完的指標としての適用性を検討するプロジェクトが発足し，サイクル機構からも参加している。

そこで，「第２次取りまとめ」における検討を出発点として，海外での評価事例や国際共同研究の成果を踏まえ，天然安全指標に関する検討を継続している。今後は，これまでに整備してきた天然放射性核種濃度データベースを，文献調査等により更新・拡充するとともに，放射性物質以外の指標に関する検討の一環として，天然に存在する化学物質等の濃度についても情報を収集する必要がある。さらに，国内外のデータを参考に，天然放射性物質のフラックスを評価する方法論の検討を行う必要がある。

② これまでの成果

i) 安全評価の時間スケール

ここでは，「第２次取りまとめ」において時間スケールをどのように取り扱ったかを安全評価を中心にかえりみることにより，安全評価の時間スケールに関する論点について整理することとする。

a) 放射性廃棄物の時間的変化

安全評価において長期にわたり地層処分システムの性能を評価するのは以下の理由による。

- ガラス固化体の放射能は，固化後数百年は比較的半減期の短い核分裂生成物からのものが支配的であるが，これらの放射性核種の崩壊が進むにつれて放射能は減衰し，ガラス固化されてから1,000年後には，固化時の数千分の1に低下する。それ以降の期間については，半減期の長いアクチニドやいくつかの種類の核分裂生成物による放射能が，減衰しつつも長期にわたって残存し，核燃料1 MTUから発生するガラス固化体の放射能が，燃料の製造に必要なウラン鉱石の全量（品位1%の場合，約750 t）がもつ放射能と同レベルになるまでに数万年程度という時間を要する。
- オーバーパックが閉じ込め機能を発揮している間（「第２次取りまとめ」では，1,000年と評価）は，ガラス固化体と地下水が接触することを完全に防ぐことができ，また，オーバーパックが破損した後も，地下水との相互作用によりガラス固化体から溶解した核種は人工バリアや岩盤中をゆっくりとしか移行しないことから，人間の生活環境に核種が達するまでに極めて長い時間を要する。

b) 地質環境の長期安定性

わが国の地質環境の安定性に関する時間スケールについて，専門部会報告書では，

・地震・断層活動や火山・火成活動のように急激かつ局所的な現象については，「場所によっては地質環境への影響は大きいものの，大きな変形を伴うような影響を及ぼす地域は比較的狭い範囲に限定されており，また過去数十万年の時間スケールでみれば，これらの現象が規則的に起こっていることから，今後十万年程度であれば，その規則性及び継続性からそれらの影響範囲を推論することが出来ると考えられる。」

・隆起・沈降・侵食及び気候・海水準変動のように緩慢かつ広域的な現象については，「地下水系などに広い範囲で影響を及ぼすが，緩慢かつ広域的であるから，過去数十万年程度について，広域にわたる比較的精確な地質学的な記録が残されている。それらの記録を基に，将来についても十万年程度であれば，その及ぼす影響の性質や大きさ，また影響範囲の移動や拡大の速度などを推測することができると考えられる。」としている。

すなわち，「地質環境の安定性に関する十万年という時間スケール」は，十万年の期間を厳密に保証しようとするものではなく，「地層処分の観点から地質環境の将来的な条件変動について検討することを見込める概略的な期間」として示された。

このような考え方を踏まえ，「第２次取りまとめ」では，地震・断層活動や火山・火成活動などの天然現象について，過去から現在までの活動履歴や地質環境への影響などを踏じ，「地層処分に際して，天然現象による重大な影響が及ぼないような地域を選定し，あるいは想定される変化を考慮して必要な対策を講じることができるとの見通しを得た。」（「第２次取りまとめ」結論，III-43）と結論した。

c) 人間環境

一方，人間が生活する地表環境の長期的な変化については，主に氷河の発達のような気候変動に起因して発生するものであることから，信頼性をもって地表環境を評価できる期間として，次期氷河期が到来すると考えられている10,000年を設定している国もあるが，地表環境に関する予測が可能な期間は1,000年未満であるという見解も示されている（IAEA，1998）。

「第２次取りまとめ」では，「約１万年後に到来すると考えられている次期氷河期により，人間の生活形態や地表の環境条件は大きく変化することが想定されるが，わが国においてこのような氷河期の到来による地質環境への影響は小さいものと考えられる。」（「第２次取りまとめ」結論，VI-40 頁）とした。

d) 安全評価での時間スケールの取り扱い

以上を踏まえ，安全評価では，適切にサイトが選ばれれば，火山や断層の影響などは，十万年程度の時間スケールでは生じないであろうという「見込み」を念頭に置きつつも，現在の地質環境条件が十万年を超えてもほぼ継続されるといったケースから，様々な変動が生じるようなケースまでを地下水シナリオという軸で検討を行った。そのうえで，火山や断層が直撃するようなケース（接近シナリオ）についても仮想的な評価を行った。

地下水シナリオについては，基本シナリオ（天然現象，工学的対策の欠陥，将来の人間活動といった外部影響要因を考慮せず，地下水との相互作用によるシステムの時間的推移を考慮するもの）と変動シナリオ（上記の外部影響要因によるシステムへの影響を考慮するもの）に分類した。

生物圏のモデル化にあたっては，将来の人間の環境や生活様式を予測することが困難であるため，「その環境や様式に関する仮定を安全評価の目的に沿って整合性を取りながら合理的に設定し，適切な指標に換算するための道具として生物圏をとらえる」というレファレンスバイオスフィアの概念（例えば，IAEA，1996）を適用した。また，将来においても現在と同様の生活様式を仮定することに加え，グループによって平均的な個人を代表させる決定グループの考え方（ICRP，1977）を取り入れ，このグループの構成員には今日のわが国に見られる平均的な生活様式を有することを想定した。

時間スケールが長くなるにしたがい，安全評価の不確実性は増加するものの，基本シナリオでは現在の地質環境と地表環境が継続するものと仮定したうえでの「人間への影響が最大となる時期」を包含する期間までの線量評価を行った。また，生物圏評価については，上述のようにレファレンスバイオスフィアの考え方を導入するとともに，生物圏での長期予測の困難さに伴う不確実性の影響を被りにくい指標の例として，放射性物質の濃

度を用いた解析結果をあわせて示した。一方，地質環境の長期的な変化などに伴う不確実性については，変動シナリオによる線量評価を行うことにより考慮した。システム性能の総合的解析における線量評価結果が１千万年や１億年まで示してあるのは，このような考え方に基づき，システム性能を例示したものである。

接近シナリオについては，適切なサイト選定と設計により重大な影響が生じる可能性を十分に小さくできると判断したものの，適切な地質環境を選ぶことの重要性を示す意味も含めて，簡略な評価を行った。接近シナリオのうち人間侵入に関わるものについては，受動的な管理（記録の保存やマーカー）は，人間侵入シナリオの発生を抑制する効果が期待され，それをどの程度安全評価上見込むかについては国によって異なってはいるものの，おおむね数百年から 1,000 年間は有効であると考えられている。人間侵入シナリオは，このような受動的な管理による有効期間を無視して評価を行ったものである。

なお，時間スケールについて専門部会報告書では，「高レベル放射性廃棄物の放射能は時間とともに減衰し，それにともなって潜在的な危険度も減少する。このように，その潜在的な危険度が減少するという特性は，放射性廃棄物に特有の性質であり，他の廃棄物には見られない性質である。このことは，地層処分の安全評価にともなう遠い将来に関する不確実性の問題をある程度は相殺するものと考えることができる。」との考えを示している。図 5.3-1 に「第２次取りまとめ」のレファレンスとしたガラス固化体の潜在的な危険度の経時変化を示す。

また，「第２次取りまとめ」では，「安全評価の時間スケールの設定にあたっては一つの要因のみではなく，種々の要因を考慮し，防護目標や安全指標をどのように設定するかという問題とあわせて検討しておくことが重要となる。このことは，地質環境の長期安定性について論ずることが可能であると結論した少なくとも将来十万年程度の期間を越える予測の不確実性が増大する期間の性能評価を行う際にはとくに配慮する必要があると考えられる。」（「第２次取りまとめ」総論，VI-41 頁）としている。

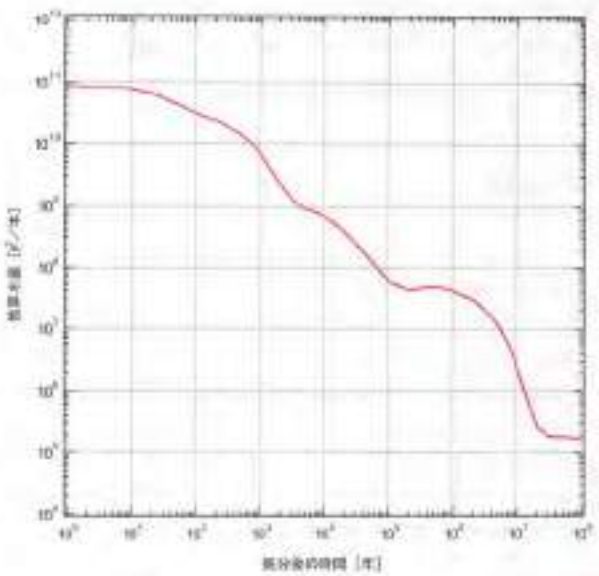


図5.3-1　ガラス固化体１本あたりの潜在的危険度（換算水量）の経時変化（石原ほか，1999）

ii）天然安全指標に関わるデータベースの更新

既存の地球化学関連の研究，環境放射能研究で示された，天然に存在する放射性物質濃度等に関する文献調査を行い，わが国の地質環境物質（岩石・土壌・地下水等）の濃度データおよび隆起・侵食速度等のプロセスデータを収集した。特に天然放射性物質濃度に関しては，天然放射性物質濃度の値をはじめとして，文献に記載されている地形，サンプリング手法，分析方法等の情報を入力したデータベースを作成し，収集した情報を整理した。これによって，対象物質または対象元素ごとのデータ収集状況を迅速に把握することが可能となった。

これらのデータベースの一部については，IAEA の国際共同研究「放射性廃棄物処分の評価における安全評価指標の利用に関するプロジェクト」において国際的データベース作成に供するわが国の研究状況として情報提供した。

③ まとめ

補完的安全評価技術に関しては，天然安全指標に関わるデータベースの構築を継続するとともに，得られた地質環境物質の濃度データや侵食速度等のプロセスデータに基づいた物質移行フラックスを算出するための方法論等について検討を進める。これを踏まえ，時間スケールやシナリオに応じて

線量やリスク以外の指標としてどのような指標を適用することが考えられるかを，国際的な経緯も取り入れつつ具体的に検討していく。

参考文献

原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会（1997）：高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について

IAEA (1996). International Programme on Biosphere Modelling and Assessment Methods (BIOMASS), Themes for a New Co-ordinated Research Programme on Environmental Model Testing and Improvement, Theme 1: Radioactive Waste Disposal, Theme 2: Environmental Releases, Theme 3: Biospheric Processes, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

IAEA (1998): Long-term Releases from Solid Waste Disposal Facilities: The Reference Biosphere Concept, BIOMASS Theme 1, Working Document No 1. International Atomic Energy Agency, Vienna.

ICRP (1977). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (adopted January 17, 1977). ICRP Publication 26, Pergamon Press, Oxford.

石原義尚，牧野仁史，大井貴夫，石黒勝彦，宮原　要，梅木博之，赤坂秀成，鎌田登司，橋　雄幸（1999）高レベル放射性廃棄物ガラス固化体のインベントリ評価，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-085.

2) シナリオ開発技術の高度化

① はじめに

「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（「第２次取りまとめ」ではシナリオ作成までをシナリオ開発と定義した．図 5.3-2 の左のフロー参照）．このようにして作成したシナリオは，「第２次取りまとめ」における安全評価の出発点として，解析ケースの設定やモデル構築に反映された。これらシナリオ作成の手法については，「国による第２次取りまとめ評価報告書」において一定の評価を受けている。一方，「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）においては，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。これについては，最終版までに可能な限りの対処を行ったものの，まだ改善の余地は残されていると考えている。なお，「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，今後のシナリオ開発に係わる研究においては，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検討を行うこととした。

② これまでの成果

シナリオ開発の方法論についての検討を進めるにあたって，まず国際的な動向を調査・整理し，それらを踏まえつつ「第２次取りまとめ」の特徴と課題を整理した後に，今後の取り組みの考え方をまとめた。

ｉ）シナリオ開発に関する国際的な動向

シナリオ開発に関しては国際的な議論が進められており，最新の検討（OECD/NEA，2001）においては以下のような議論が行われている：

・シナリオ開発の役割としては，評価に必要な科学的そして技術的な情報の整理と統合を行うことが重要。これは，FEP の同定，科学的理解に基づくモデル化，そして解析ケースの選定までを含む。また，シナリオ開発は，解析ケースやその結果について，見逃しや知識の欠如に起因する偏りや不足を議論するための全体的なフレームワークを提供する。
・可能性のあるすべてのシナリオを完全に洗い出すのは不可能であり，シナリオ開発においては，十分性や網羅性を目指すことが重要。また，シナリオ開発プロセスの透明性が重要であり，方法や結果が追跡できること，オープンであることおよび簡単であることが重要（結果が複雑な場合でも方法は明確に述べることができること）．
・シナリオ開発における体系的なアプローチの採用は，FEP の取り扱いおよび種々の判断や決定を記録に残すルールを与え，これにより，何が評価に含まれたか／含まれないかやその理由などを抜けなくかつ整理された形で提示することができる．
・シナリオ開発は，それを実施する側と科学的専門家，規制側あるいは公衆との交流のインターフェイスとなる．またこのような交流を通じてシナリオ開発の十分性などがチェックされる。

以上のことは，基本的には OECD/NEA(1991)の段階と同じではあるが，それ以降の国際的な経験の蓄積を踏まえてより深い検討がなされている。

ⅱ）「第２次取りまとめ」の特徴と課題

ここでは，ⅰ）で述べた最新の国際的な検討結果も踏まえて，シナリオ開発の役割を「FEP の同定，科学的理解に基づくモデル化，そして解析ケースの選定までを含むもの」と新たに定義した上で，その新たな定義に基づき「第２次取りまとめ」の特徴と課題を整理する。以下では，「シナリオ開発」という用語を，特に断らない限り上記定義に従うものとして使用し，①で述べた「第２次取りまとめ」における技術の定義と区別する。

「第２次取りまとめ」では，シナリオ開発を含む安全評価の流れとして図 5.3-2 の左のフローを示した（以下，基本フロー）．しかしながら，このフローは基本的な流れを示すものであり，「第２次とりまとめ」で行ったシナリオ開発に係わる実務的な作業内容およびその報告書での記述（図 5.3-2 の右のフロー：以下，作業・記述フロー）は，必ずしも左の基本フローの各項目に正確に一対一対応するものではなかった。

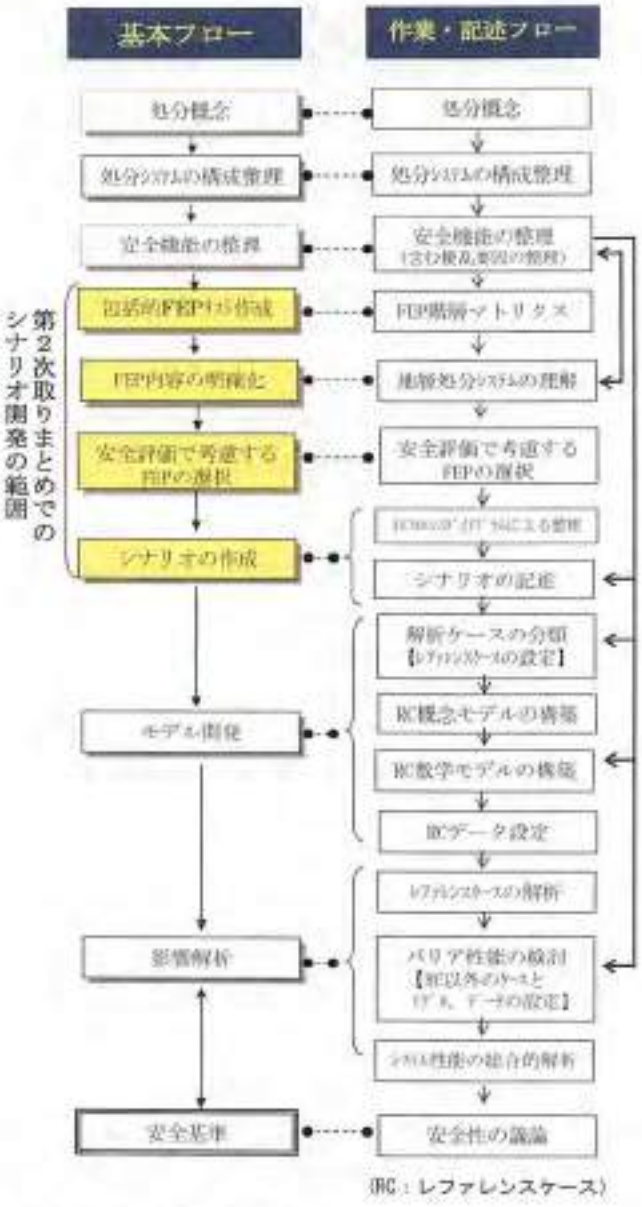


図 5.3-2 「第２次取りまとめ」におけるシナリオ開発を含む安全評価の流れ

例えば，図 5.3-2 の左右のフローを比較すると，以下のように一対一対応を外れる場合があった：

a) 基本フローでは，「安全機能の整理」が「包括的 FEP リスト作成」の項目のみと一対一対応となっている。一方，作業・記述フローでは，「安全機能の整理」は，「FEP 階層マトリクス」の作成のみならず「解析ケースの分類」「数学モデルの構築」および「バリア性能の検討」にも反映されており，一対多の対応になっている。また，作業・記述フローにおいては，「地層処分システムの理解」の内容が『安全機能の整理』において先取りする形で反映されている。

b) 基本フローでは，「モデルの開発」から「影響解析」が一対一対応になっている。一方，作業・記述フローでは，まずレファレンスケースに係わる「モデルの開発」と「影響解析」を行い，そのあとにレファレンスケース以外についての「モデルの開発」や「影響解析」を行うという繰り返し構造になっている。

a) は，FEP からのボトムアップのみではその組み合わせの数が膨大となることを勘案し，それを避けるための対処として，複数の FEP をまとめた表現となっている安全機能あるいは擾乱要因とそれらの組み合わせを参考にすることにより，合理的な数でのシナリオや解析ケースの設定を試みたことに起因する。しかしながら，「第２次取りまとめ」において幅広い地質環境を考慮する必要があったことなどから，そのような対処を行ってもなお多数の解析ケースの設定が必要となった。b) は，それら多数の解析ケースを整理し比較しやすくするために，まず参照となるレファレンスケースを対象としてモデルやデータの設定および解析までを一通り実施した後に，レファレンスケースとの対比としてそれ以外の解析ケースの検討を行ったことに起因する。

これらのことは，「第２次取りまとめ」において以下に示すような利点があったものの，その反面で透明性やわかりやすさの面で不十分な点もあったと考える。

利点としては，安全機能や擾乱要因を参考にしたことにより，

- 個々の FEP に対して記述するよりも簡潔で整理された形での FEP に係わる情報の提示
- システム性能への影響に特に着目した FEP リストの階層マトリクス化と FEP のスクリーニングならびにシナリオの記述
- システムが固有の安全機能を有するケースとしてのレファレンスケースの設定

ができたことが挙げられる。また，レファレンスケースを設定したことにより，

- 地質環境や処分場設計の多様性，あるいはデータやモデルおよびシナリオの不確実性を考慮する代替的な解析ケースの設定が容易
- 多数の解析結果についての比較や解釈が容易

となった。

一方，不十分な点としては，

- 基本フロー（図 5.3-2 左）と作業・記述フロー（図 5.3-2 右）との対応についての説明が不十分
- 特に，「FEP からのボトムアップ」のみでシナリオ作成や解析ケースの設定を行うのでなく，実際には複数の FEP をまとめた表現となっている安全機能や撹乱要因も参考にしながら検討しているという構造が，「第 2 次取りまとめ」に記載されている基本フローのみでは十分に表現できていない

ということが挙げられ，それらが透明性やわかりやすさを阻害している一因になっていると考える。

iii）シナリオ開発の高度化に向けた取り組み

今後の展開としては，サイトを特定しない研究開発の段階から，実際の地質環境への適用を重視した研究開発が重要となる。

サイトを特定しない段階では，処分システムの構成（地質環境条件や処分場仕様など）が多数考えられ，それら構成を包括するシナリオ開発あるいはそれぞれの構成を対象にしたシナリオ開発を行うことになる。「第 2 次取りまとめ」では前者の方法を採用した。一方，サイト（あるいはその候補）が設定されるあるいは評価の対象とする地質環境が仮定されると，シナリオ開発で対象とすべき処分システムの構成が絞り込まれることになる。このことは，地質環境条件や処分場仕様の多様性に比べて，対象とする地質環境におけるシナリオ，モデルおよびデータの不確実性が，シナリオ作成や解析ケースの設定においてより重要になることを意味する。

さらに，シナリオ開発の役割は，プログラムの進展に応じて変化する（OECD/NEA, 2001）。すなわち，実際の地質環境への適用を考える場合，調査研究が中心となる段階においては，主にモデル開発やデータ取得などの調査研究をガイドする役割が重要になるが，安全評価が求められる段階では，評価において考慮している内容の網羅性の提示や判断の記録などを行うことがシナリオ開発の重要な役割となると考えられる。このことは，「シナリオ開発は，プロジェクトの進展の中で見直されていくことが期待される（OECD/NEA, 2001）」との指摘とも整合する。これらの役割をより具体的に考えると，初期の調査段階では，それまでに得られている情報に基づき FEP リスト作成からシナリオ作成までを予察的に行うとともに，その結果に基づきスコーピング解析や不確実性解析を行うことにより，優先的に取り組むべきモデル開発やデータ取得の課題を抽出し，それを調査研究の計画に反復的に反映していくことが重要となる。これは，シナリオ開発および不確実性評価を調査研究と結びつける作業フレームを構築することの重要性を意味する。このとき，FEP リストやシナリオの作成を含むシナリオ開発の作業は，必ずしも安全評価で必要とされるような網羅的なものである必要はなく，現実的には，対象とする地質環境の特徴あるいは情報に応じて部分的な検討を積み重ねていくことになると考えられる。

一方，安全評価を行う段階では，シナリオ開発から安全評価解析に至る整理された流れを構築するとともに，その流れの中で行われる作業内容や判断などをフォーマルに文書化（あるいは計算機を用いて記録）することが特に重要であり，十分性や網羅性とともに透明性や追跡性を確保することが求められる。また，この段階では，内・外部の専門家および規制側や公衆との交流が重要となり，わかりやすくプレゼンテーションできることも重要となる。

以上のことから，シナリオ開発の高度化に向けて重点的に取り組むべき項目を以下のように設定した：

- シナリオ開発は，FEP の同定，科学的理解に基づくモデル化，そして解析ケースの設定までを含むものとする。
- 調査研究をガイドする役割と安全評価の中での役割を区別しつつ，それぞれの役割におけるシナリオ開発の要素や手法について，共通点と相違点を整理しながら検討を進める。
- FEP リスト，シナリオおよび解析ケースの設定について，その十分性や網羅性を確保するための体系的で実務的な手法を検討・整備する。このとき，手法と結果を簡潔にわかりやすく説明できるようにする。
- 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に，そのプロセスにおいてなされた作業や判断などを抜けなくかつ整理された形で記録する方法を検討・整備する。また，記録された情報を効率的に参照できる手段を準備する。
- 以上のような手法の検討・整備を進めることとあわせて，それら手法の実際の地質環境への適用性の確認と不具合点の見直しを繰り返し行う。
- 安全評価の基本的なシナリオである地下水シナリオについては，基本シナリオと天然現象などによる影響を想定する変動シナリオに分類する。変動シナリオについては，包括的な FEP リストを出

発点とする基本シナリオと同様の構築手法以外に，別途基本シナリオを作成した上で，その部分的変更として変動シナリオを取り扱うという方法も対象にした検討を行う。変動シナリオでは，利用可能な知見の範囲で可能な限り現象に即したシナリオと解析ケースの例示を行う。接近シナリオについては，安全評価において考慮すべきかどうかの取捨選択に関する判断を適切に記録できるようにする。

② まとめ

シナリオ開発の方法論についての検討を進めるにあたって，まず国際的な動向の調査・整理および「第2次取りまとめ」の特徴と課題の整理を行い，それらを踏まえて今後の取り組みにおける重点事項をまとめた。

今後当面は，シナリオ開発手法の検討を，調査研究をガイドする役割に重点をおいて進める。このとき，堆積岩地層研究計画などを活用しながら実際の地質環境への適用性の確認と不具合点の見直しを繰り返し行う。あわせて，天然現象に起因する影響の評価に適したシナリオ開発手法の検討と影響評価例の蓄積を進める。また，研究機構が行うサイト選定計画とその進展なども勘案しながら，安全評価の段階で用いるシナリオ開発手法についての検討を，調査研究をガイドする役割に対しての検討成果を活用しながら進める。

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/RWM/PEER(99)2

OECD/NEA (2001) : Scenario Development Methods and Practice, An Evaluation Based on the NEA Workshop on Scenario Development, Madrid, Spain, May 1999, OECD Nuclear Energy Agency.

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の変化や天然の地層が有する場の不均質性，あるいは理解や情報の不十分さから生ずる不確実性が内在し，それらを完全に排除することは困難である。このため，種々の不確実性要因（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，それら不確実性要因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，幅広い地質環境を対象としたシステムの多様性，データ，モデルおよびシナリオの不確実性による個別の影響を定量的に評価することにより安全評価上重要な要因を整理し，それらを合理的に組み合わせることで処分システムの性能を把握した。ここで，「第２次取りまとめ」で採用した決定論的解析では，

・個々の不確実性の取扱いが分かりやすい
・考慮する不確実性に対する結果の変動の程度を把握することが容易である

等の利点が挙げられるが，一方で，

・考慮する不確実性の組み合わせが適切であることを示すことが困難である
・複数の不確実性が同時に寄与する状況で，どの不確実性の影響度が高いかを定量的に示すことが困難である

等の課題も挙げられる（例えば，OECD/NEA, 1997）。

今後は，これら決定論的解析における課題への対処として，不確実性要因が安全評価結果に及ぼす影響の定量的な評価を網羅的かつ効率的に実施するための技術開発や，不確実性要因の重要度や感度構造についての定量的な分析を効果的に行うための技術開発を進める。

② これまでの成果

これまでに，安全評価で考慮すべき不確実性のうち特にデータの不確実性に着目し，この不確実性が解析結果に与える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を検討した（「データ不確実性の影響評価技術の開発」）。さらに，このコードを用いた評価から得られる入力データセットと解析結果の関係に基づき，パラメータの重要度や感度を定量的に評価するための手法の検討を行った（「感度分析手法の検討」）。以下に，その成果をまとめる。

i）データ不確実性の影響評価技術の開発

核種移行解析に対するデータの不確実性の影響を網羅的かつ効率的に評価するために，確率論的シミュレーションプラットホーム "GoldSim"（Golder Associates, 2001）を用いて核種移行解析コードを新たに開発した（岩杉ほか，2002）。GoldSim は，データの不確実性による影響を評価するために必要な入力パラメータ値の統計的サンプリング機能や複数の入力データセットに対する繰り返し計算機能が整備されており，モンテカルロシミュレーション等の確率論的な解析に適している。また，「第２次取りまとめ」において採用した人工バリアおよび天然バリアに対する核種移行解析コードで考慮した種々のプロセスやそれら解析コードの機能を，グラフィカルユーザーインターフェース（GUI）環境において視覚的に構築することができる。なお，開発した解析コードについては，「第２次取りまとめ」で用いた解析コードとの比較解析を行い，正しくモデル化されていることを確認している。

データの不確実性が安全評価結果に及ぼす影響の定量的な評価は，開発した解析コードを用いて，モンテカルロシミュレーションと呼ばれる確率論的な手法（例えば，Saltelli et al., 2000）により行った。

モンテカルロシミュレーションでは，まず，解析モデルに用いられているパラメータのうち不確実性を有すると考えられるパラメータを抽出した上で，不確実性を定量的に表現するために必要なデータや情報を整理することによりパラメータに確率密度関数を設定する。ここで，不確実性パラメータに与えた端や分布型（これらが確率密度関数として表現される）が解析結果に影響を及ぼすため，その設定には注意を要する。

次に，データの不確実性を網羅的に考慮するために，各不確実性パラメータの分布からパラメータ値をサンプリングし，入力データセットを複数作成する。ここでは，分布からパラメータ値をサンプリングする手法として，ランダムサンプリング法より少ないサンプリング回数で，ランダムサ

ンプリング法と同等の網羅的な組み合わせを作成することが可能なLHS(Latin Hypercube Sampling)法（Mckay and Beckman, 1979）を用いた。

最後に，各入力データセットを用いた解析を複数回実施し（以下，これら個々の解析を「リアライゼーション」という），得られたリアライゼーションの結果を整理することにより，パラメータの不確実性に起因する解析結果の不確実性を定量化する。

以上の手法に基づき，「第２次取りまとめ」レファレンスケースに対するデータの不確実性を考慮したモンテカルロシミュレーションを行った。使用した不確実性パラメータの一覧を表 5.3-1 に示す。

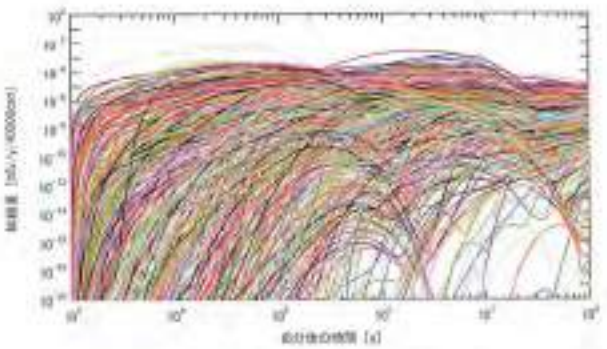
表 5.3-1　不確実性パラメータの一覧

元素	溶解度 [mol l^{-1}]	分配係数（緩衝材） [m^3 kg^{-1}]	分配係数（岩盤） [m^3 kg^{-1}]
Se	U[10^{-8}, 10^{-6}]	E[8, 10^{-1}]	E[8, 10^{-1}]
Zr	U[10^{-9}, 10^{-6}]	U[10^{-1}, 1.5×10^{1}]	U[10^{-1}, 10^{1}]
Tc	U[10^{-8}, 10^{-6}]	U[10^{-3}, 2×10^{-1}]	U[5×10^{-3}, 10^{0}]
Pd	U[10^{-8}, 10^{-6}]	U[10^{-1}, 1×10^{1}]	U[5×10^{-1}, 1]
Sn	U[10^{-8}, 10^{-6}]	U[1, 2×10^{2}]	U[10^{0}, 10^{2}]
Cs	不溶性	U[10^{-1}, 1×10^{1}]	U[10^{-1}, 10^{1}]
Pb	E[10^{-8}, 10^{-6}]	U[10^{-1}, 2×10^{1}]	U[10^{-1}, 10^{1}]
Ra	U[10^{-8}, 10^{-6}]	U[10^{-1}, 2×10^{1}]	U[5×10^{-1}, 5×10^{1}]
Ac	Amのアナログ	E[1, 5]	U[5×10^{-1}, 5×10^{1}]
Th	U[10^{-9}, 10^{-6}]	Uのアナログ	U[10^{-1}, 10^{1}]
Pa	E[10^{-9}, 10^{-6}]	Snのアナログ	U[10^{-1}, 10^{1}]
U	U[10^{-9}, 10^{-6}]	U[1, 5×10^{1}]	U[10^{-1}, 10^{1}]
Np	U[10^{-9}, 10^{-6}]	Uのアナログ	U[10^{-1}, 10^{1}]
Pu	U[10^{-9}, 10^{-6}]	E[10^{0}, 10^{2}]	U[10^{-1}, 10^{1}]
Am	U[10^{-9}, 10^{-6}]	E[10^{0}, 5×10^{1}]	U[5×10^{-1}, 5×10^{1}]
Cm	Amのアナログ	Amのアナログ	U[5×10^{-1}, 5×10^{1}]
Ni	U[10^{-8}, 10^{-6}]	E[1, 10^{2}]	U[10^{-1}, 10^{1}]
Sr	Raのアナログ	Raのアナログ	U[5×10^{-1}, 5×10^{1}]

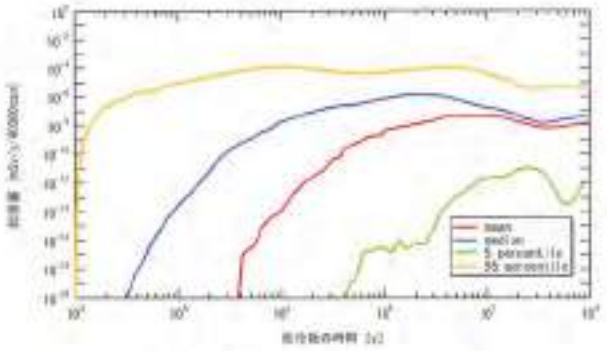
パラメータ	分布
ガラス溶解速度 [g m^{-2} d^{-1}]	U[10^{-1}, 10^{1}]
処分孔径 (Cs, Sn分配なし) [m^3 y^{-1}]	U[5×10^{-1}, 1×10^{0}]
Csの処分孔径 [m^3 y^{-1}]	U[2×10^{-1}, 2×10^{0}]
Snの処分孔径 [m^3 y^{-1}]	U[1×10^{-1}, 2×10^{0}]
透水量係数分布の平均値 [m^2 s^{-1}]	U[10^{-9}, 10^{-7}]
動水勾配と移行距離の比 [-]	U[10^{2}, 10^{3}]
マトリクス拡散深さ [m]	U[5×10^{-3}, 1]
マトリクス拡散容量係数 [-]	U[10^{0}, 10^{2}]
岩盤の空隙率 [-]	U[10^{-2}, 3×10^{-1}]
核種別Kd係数 [-]	U[10^{0}, 10^{1}]

U：一様分布，E：指数一様分布

不確実性パラメータの幅と分布型については，「第２次取りまとめ」において各パラメータについてまとめられた情報（東ほか，1999；柴田ほか，1999；濱谷ほか 1999）を基に，一様分布あるいは対数一様分布として設定した（若杉ほか，2002）。全リアライゼーションにおける各核種の線量の和（以下，「総線量」という）の経時変化，およびそれらの平均値，中央値，5 パーセンタイル，95 パーセンタイルを図 5.3-3 に示す。また，安全評価上重要と考えられる総線量の最大値に着目し，総線量が最大になる時間とその値を散布図として図 5.3-4 に示した。



(a) 総線量の経時変化



(b) 平均値，中央値，5 ﾊﾟｰｾﾝﾀｲﾙ，95 ﾊﾟｰｾﾝﾀｲﾙ

図 5.3-3　総線量の経時変化
（ガラス固化体 4 万本あたり）

図 5.3-4 より，複数のリアライゼーションから得られた総線量の最大値は広範囲にわたって分布しているが，総線量の最大値の支配核種に着目した場合には，例えば「総線量の最大値が Cs-135 に支配されるケースの集団」といったように，結果をいくつかの集団に分割することができる。これは，結果がランダムに分布しているのではなく，類似した特徴を有する集団として類型化できる可能性を示唆している。

一方，「第２次取りまとめ」においてデータ不確実性の組み合わせを考慮したケースでの総線量の最大値は，55 のパラメータの不確実性を同時に考慮することにより十数オーダーにわたって分布しているモンテカルロシミュレーション結果の上限値とほぼ等しいことがわかった(図5.3-4参照)。このことから，「第２次取りまとめ」における不確実性の評価では，影響の高いデータ不確実性が適切に取り込まれていることが確認できた。

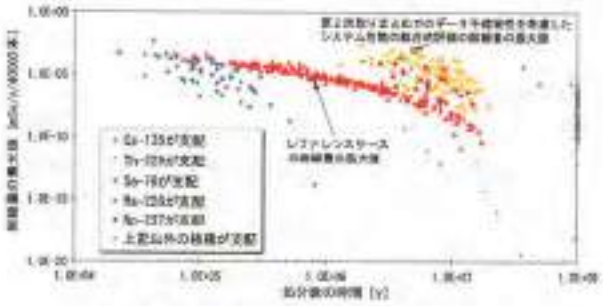


図 5.3-4　総線量の最大値の散布図
（ガラス固化体 4 万本あたり；各プロットのシンボルは総線量が最大となるときに最も支配的な核種を示す）

ii）感度分析手法の検討

解析結果の不確実性に大きく寄与する不確実性パラメータの重要度を定量的に分析することは，安全評価に内在する不確実性を効率的に減少させるために必要不可欠であるとともに，多くの研究分野にまたがる地層処分研究において，安全評価の信頼性に大きく影響する課題を絞込む上でも重要である。ここでは，パラメータの感度を分析するために，安全評価上重要と考えられる総線量の最大値に着目し，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の不確実性に対して多変量解析手法を複合的に適用することにより，影響の高い重要パラメータの抽出とその感度の定量的分析を行った例を述べる（若杉ほか，2002）。

地層処分の安全評価の特徴として，複数のパラメータがある一つの解析結果へ対応付けられるため，入出力の関係が非線形になることが挙げられる。このため，総線量の最大値とパラメータの関係に対して通常の全域的な線形回帰モデルが適合しにくいという問題を生ずる。この問題に対して，既存の多変量解析手法であるクラスタ分析と重回帰分析を組み合わせた感度分析手法の適用を試みた。

まず，総線量の最大値に対して類似性を有するいくつかの集団（以下，「クラスタ」という）にグルーピングすることを目的としてクラスタ分析を実施した。具体的には，図 5.3-4 に示した総線量の最大値について，階層型クラスタ分析法を適用し，全リアライゼーションでの総線量の最大値とその最大値が生ずる時間に対してユークリッド平方距離を求め，その距離が近いもの（すなわち類似度が高いもの）から逐次クラスタに統合していくことにより，複数のクラスタにグルーピングした。クラスタの構成手法は，ウォード法（Ward, 1963）を用いた。クラスタ分析の結果を図 5.3-5 に示す。クラスタ 1 はおよそ 2×10^5 年までに総線量が最大値を生ずるケースの集団であり，処分後早い時期に総線量が最大値となるケースも含まれている。クラスタ 2 はクラスタ 1 の後に総線量が最大値を生ずる比較的高い線量のケースの集団であり，クラスタ 3 は総線量の最大値が生ずる時間が遅く，線量も比較的低いケースの集団となった。

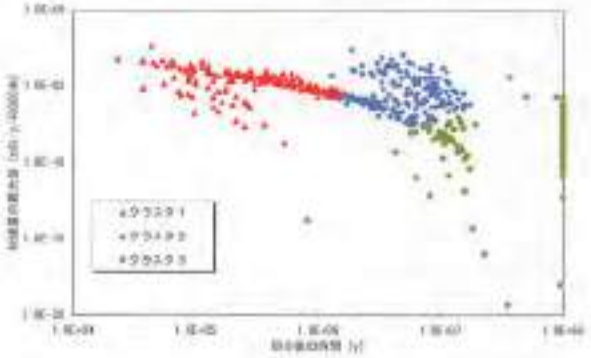


図 5.3-5　クラスタ分析の結果
（ガラス固化体 4 万本あたり）

次に，クラスタ分析により類似性を持つ集団としてグルーピングされた三つのクラスタのそれぞれにおいて，総線量の最大値の変動に顕著な影響を持つパラメータを定量的に把握することを目的として，総線量の最大値を目的関数，表 5.3-1 に示した 55 の不確実性を有するパラメータを説明変数として重回帰分析を行った。重回帰分析においては，単位や分布幅の違いの影響を無くすために，パラメータ及び総線量の最大値に対して平均が 0 で分散が 1 となるように標準化を行った。総線量の最大値の変動に対する各パラメータの影響度は偏回帰係数で表現され，この値の絶対値が大きいほど総線量の最大値の変動に対してパラメータが顕著な影響を有することを示す。全リアライゼーションと各クラスタに含まれるリアライゼーションを対象とした重回帰分析の結果から示された顕著な感度を有するパラメータを表 5.3-2 にまとめる。

表 5.3-2　重回帰分析の結果*

順位	オリアライゼーション**	クラスター1	クラスター2	クラスター3
1	核種溶解度の平均値（正）	核種溶解度の平均値（正）	核種溶解度の平均値（正）	核種溶解度の平均値（正）
2	岩盤における分配係数（負）	岩盤における分配係数（負）	マトリクス拡散深さ（負）	マトリクス拡散深さ（負）
3	マトリクス拡散深さ（負）	マトリクス拡散深さ（負）	岩盤における分配係数（負）	岩盤における分配係数（負）
4	マトリクス拡散有効断面積率（負）	マトリクス拡散有効断面積率（負）	マトリクス拡散有効断面積率（負）	岩盤における分配係数（負）
5		ガラスの溶解速度（正）	Pu の溶解度（正）	岩盤における分配係数（負）

* 表の順位は各クラスタ内の総線量の最大値を増加させる順位。
** 各リアライゼーションの総線量の最大値を増加させる順位。

透水性係数（モンテカルロシミュレーションではその平均値をサンプリング：表5.3-1参照）は，全リアライゼーションを対象にした分析と，各クラスタを対象にした分析の両方で影響が最も大きいパラメータであることが示されており，解析結果の全域について影響が高いパラメータであると考えられる。一方，クラスタ2におけるNpの溶解度やクラスタ3におけるUやThの岩盤中の分配係数については，全リアライゼーションを対象とした重回帰分析では顕著な影響は検出されないが，特定のクラスタにおいて顕著な影響が検出された。これは，クラスタ分析を適用し，全リアライゼーションをクラスタに分けたことにより，各クラスタ内での被曝量の最大値の変動に対して特徴的かつ顕著な影響を有するパラメータが抽出され，その感度を把握できることを示している。

以上の検討から，クラスタ分析により類似性を有する結果をグルーピングした上で，重回帰分析を行うという複合的な方法を適用することにより，全域的な重回帰分析では見落とされる可能性のあるパラメータの感度が把握できる見通しが得られた。

③ まとめ

データの不確実性を網羅的かつ効率的に評価するための解析コードを開発し，データの不確実性が安全評価結果に及ぼす影響を検討した。また，解析結果の不確実性に大きく寄与する不確実性パラメータとその重要度を明らかにするために，クラスタ分析や重回帰分析などの多変量解析手法を複合的に適用し，より詳細にパラメータの感度を分析するための手法について検討した。

今後，データ不確実性の影響評価技術については，より詳細な現象を核種移行解析コードへ取り込むことにより高度化を図る予定である。

感度分析については，様々な多変量解析手法の適用性の検討を継続することにより，パラメータと解析結果の複雑な感度構造を効果的に解きほぐしていくための基盤技術の開発とそのノウハウの蓄積を進めていく予定である。

以上の課題を進めることにより，パラメータの不確実性の影響を網羅的かつ効率的に評価するための基盤技術，および不確実性要因の重要度や感度構造を定量的に把握するための基盤技術を構築していくとともに，それらを不確実性要因の効果的な低減を支援する技術として体系化していきたいと考えている。

参考文献

東 孝郎，柴田雅博，油井三和，盛谷朝紀，能登屋信，吉田 英 (1999)：地層処分研究開発第２次と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.

Golder Associates (2001)：GoldSim Contaminant Transport Module, User's Guide, Golder Associates Inc.

Mckay, M. D. and Beckman, R. J. (1979)：A comparison of three methods of selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code, Technometrics, 21, pp.239-245

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 (1997)：Lessons Learnt from Ten Performance Assessment Studies, Working Group on Integrated Performance Assessments of Deep Repositories.

Saltelli, A., Chan, K. and Scott, E. M. (2000)：Sensitivity Analysis, WILEY, pp 20-28

柴田雅博，佐藤治夫，小田治恵，油井三和 (1999)：地層処分研究開発第２次とりまとめにおける緩衝材への放射性元素の分配係数の設定，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-072.

盛谷朝紀，関山忠幸，柴田雅博 (1999)：性能評価で用いる岩石に対する核種の分配係数，サイクル機構技術資料，JNC TN8410 99-051

椎名保 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，JNC TN1340 2001-010，pp.149-160.

Ward, J.H. (1963)：Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function, Journal of the American Statistical Association, 58, pp 236-244.

5.3.3 統合解析システムの整備

1) 統合解析システムの整備

① はじめに

地層処分技術の研究開発は，地質環境調査，処分技術（設計），性能評価の3分野から成り立っている。これら3分野における様々なデータや観察・試験結果およびそれらの解釈・解析・考察を踏まえた各種の技術情報を総合的に活用し，地層処分システム全体の性能を定量的に評価することが，地層処分システムに求められる長期の安全性を判断するための材料となる。

「第2次取りまとめ」では，3分野の情報の流れを整理し，明らかな不整合を回避しながら，それらの情報の統合を行った。しかしながら，3分野すべてにわたって必ずしも密な連携が実現できたわけではなく，特にサイトを特定しない研究開発の段階であることから，具体的な地質環境を対象にしながら，3分野の研究を集約していくという部分については，課題が残っている。今後は，研究開発成果の集約や，研究開発のさらなる効率的実施，および事業化段階の進展をにらんで，実際の地質環境における地層処分技術の適用性を示すことが，重要な課題となる。これら課題への対処として，研究開発分野間をはじめとする，種々のレベルの情報の流れを体系化するための技術・環境を整備することが，ひとつの有効なアプローチである。そのための3分野共通の作業基盤となる情報システムとして，地層処分統合解析システムの開発に取り組むこととした。

② これまでの成果

地層処分技術の研究開発において，3分野における研究開発は独立ではなく，研究開発分野間，研究開発課題間さらには研究開発課題内において，相互に種々の技術情報（現象理解，データ，処理，判断，解析結果，ノウハウ等）のやりとりが必要となる。例えば，天然バリア中の核種移行を評価するためには，水理および物質移行のプロセスの理解，場となる地質環境特性の理解，場の特性を表現するデータの取得・設定など複数の研究開発分野からの情報が必要であり，それらの情報を，整合をとりつつ適切に水理，核種移行のモデルやデータに取り込む必要がある。

このため，データ取得からモデル評価に至るまでの3分野にまたがる情報の流れ・連携を整理し，検討の手順とそこで必要となるノウハウの体系化・集約を図り，研究者間でそれらの情報を，効率的に共有・参照・活用できる知識ベース機能を中心とする，統合解析システムを整備する。

体系化すべき技術情報および技術情報間の連携は，膨大かつ多岐にわたることから，それらを効率的に管理・活用するためには，データベースを中心とした計算機システムの構築が不可欠である。よって，体系化のための分析は，計算機システム上への展開を考慮して進めている。本システムにより，3分野の情報およびその流れを管理するとともに，情報とその流れを連携に即した形で参照・活用可能とするシステムとして運用し，解析の支援とその信頼性向上を図る。地層処分統合解析システムの開発イメージを図5.3-6に示す。

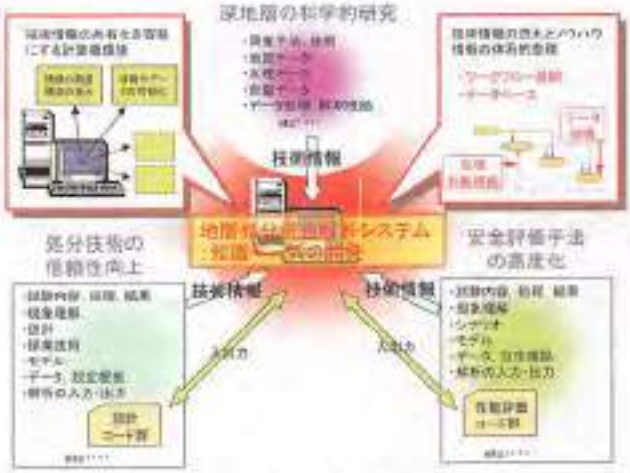


図5.3-6　統合解析システム概念図

上記の目的を踏まえた，統合解析システムへの要求機能の検討結果を，以下にまとめる。

- **知識ベース機能**：地層処分システムの安全評価における様々な解析や論証を支援するためには，これまでおよび将来において取得される各種のデータや知見の管理と活用を行なうデータベースが不可欠となる。体系化された評価のプロシージャ，研究成果はこの知識ベースに集約されることになり，本システムの核といえる。また，可視化，解析支援機能へデータを提供する。
- **可視化機能**：各分野の様々な技術情報を研究者にわかりやすく提供するために，三次元空間上に処分場モデルを作成し，そこへグラフィカルに処理した技術情報（ジオメトリデータ，入力データ，解析結果等）を重ね合わせたユーザイ

ンターフェースを提供する。たとえば，複数の解析結果を同時に表示させることにより，現象の複合的評価等を支援する。

・解析支援機能：地層処分の安全評価を行うためには，各分野にまたがる多数の入力データを適切に設定する必要がある。このため，評価解析ケースに応じたパラメータの設定を，整合性を保ちつつ効率的に行うことを支援する機能の実現を目指す。さらに，解析の品質保証を行うには，解析の追跡性，再現性，透明性，整合性を確保することが重要であり，このため，解析に係る必要な情報を一括管理，記録する機能を開発する。

以上の機能を具体化するための具体的な成果として，まず，地層処分に関する技術情報を体系化する必要がある。体系化すべき技術情報は，「第２次取りまとめ」時点でも膨大かつ多岐にわたっているが，今後の研究開発の進捗により，その情報量はさらに増加するため，各分野の研究開発の進捗に応じ，技術情報体系の整備・拡充・改訂を継続してゆく必要がある。

さらに，体系化の手法そのものについても，現時点では，後述するワークフローによる整理を試みているが，適宜見直しを図ることも必要である。統合解析システムには，これらの拡充・改訂・見直しに柔軟に対応可能であることが要求される。

また，統合解析システムの運用により期待される効果としては，

・研究者間での情報の共有化の促進，効率化が図れる。たとえば，知識ベース機能の活用により，設計，性能評価の各担当者が，相互の解析状況を共有しながら，自らの解析条件を設定することが可能となる。
・複雑な構造を有する技術情報の追跡性，整合性が向上し，その結果，研究成果全体の信頼性や透明性・追跡性が向上する。たとえば，知識ベース機能の活用により，地質環境調査と設計・性能評価のつながりが明確になり，設計・性能評価の見地から重要なデータを効率的に追跡可能となる。
・個別研究に関する進捗状況の確認，適切な尺度を用いた重要課題の抽出等による，研究管理の支援。

が挙げられる。

当面の５年間は，システムの主要機能である知識ベースの開発とその試運用，解析の支援および品質保証のための手法の検討を中心に実施する。

これまでに，まず「第２次取りまとめ」を出発点として，地質環境調査分野，処分技術（設計）分野，性能評価分野についての技術情報の種類と，その流れについての分析を進めてきている。

地質環境調査分野については，まず，地質構造（岩盤，断層分布等），地下水流動特性，地球化学特性，岩盤熱物性・力学特性を対象として，地層処分の設計・性能評価に直接的あるいは間接的に関係する地質環境データを，網羅的に抽出する検討を行った。次に，地質環境モデルの構築に関する情報処理の体系化の一環として，地質構造，および水理地質構造モデルを対象として，取り扱うデータ範囲，モデルの構築手順，データ変換処理に関する検討を行い，情報処理の流れをワーク（作業）とデータ（ワークに入出力される情報）に分離して表現するワークフロー図として，整理を進めている。

処分技術（設計）分野については，「第２次取りまとめ」の目次構成に準じ，人工バリアおよび処分施設の設計項目，ならびに設計された処分システムに対する，長期健全性評価の項目などを階層的にまとめたワークフローの全体構成を検討した。次に，設計の各検討項目において使用されているパラメータを整理し，各評価（設計）項目ごとに，評価内容，材質等のケース分けがある場合の選択肢，検討（設定）内容，検討に際して考慮すべき影響要因と，影響要因の変動原因となる影響因子について整理した。これらの整理結果を参考に，ワークフローの全体構成に対して，個々の設計・評価項目に関するワークフロー図の整理を進めている。

性能評価分野については，「第２次取りまとめ」の目次構成に準じ，放射線学的特性，水理学的特性，化学的特性，物質移行特性に関するワーク項目を階層的にまとめたワークフローの全体構成を検討した（図５3-7）。このワークフローの全体構成に対して，個々の評価項目に関するワークフロー図の整理を進めている。ワークフローの作成にあたっては，各ワーク項目内で行う具体的な検討項目（試験，データ設定，解析等），その検討に対する上流／下流の検討項目，各検討項目間の情報（データ）の流れ，検討に使用するツール（解析コード等），判断基準に使われる情報（データ）等を考慮している。

図 5.3-7　ワークフロー構成(性能評価)の検討例

一方，システムの具体化に向けた検討としては，取り扱うべきデータ，情報の範囲を検討し，知識ベースを格納するための，データベース構造の設計検討を開始した。また，可視化機能の開発に向けて，地質環境を含む地層処分システムのコンピュータグラフィックスを GUI とする，システム操作環境を計算機上に構築するための方針について検討した。表示方法について具体的に検討するために，「第２次取りまとめ」のレファレンスケースにおける一部の解析を例に，データのハンドリング，操作画面，画像表示機能の設計検討を行った（図 5.3-8）。

図 5.3-8　画像表示機能の検討例

③ まとめ

これまでに，地層処分統合解析システム開発の出発点と言える 3 分野の情報の流れを整理するために，技術情報の体系化のための分析を各分野について進めてきた。

当面は，3 分野の技術情報とその流れの体系的な分析と整理を進めるとともに，それらを統合することにより，技術情報とその流れを総合的に取り扱える知識ベース機能の開発を目指す。また，解析の支援および品質保証のための手法の検討をあわせて行う。

また，近年の情報通信技術の進展はめざましく，このようなシステムに対して当初から最終形を目指すことは，必ずしも得策ではない。地層処分研究開発から，いくつかの主要な領域を選び出し，効果の高い，実現可能な部分から，適用検討，試運用を行ないつつ，研究開発の進捗と歩調を合わせ，段階的にシステムの機能を拡張していくことが，より実効的であると考えられる。

2) 広域安全評価モデルの統合化に関する研究

① 課題と概要

諸外国及び我が国で実施されている地層処分システムの安全評価においては，基本的な評価モデルとして，単一廃棄体からの核種漏出を基本とした保守的仮定により単純化された核種移行モデルを用いて，人工バリア及び天然バリア中の核種移行解析が行われ，その結果に基づき，処分システムの安全性が検討されている。このような手法に対し，保守的仮定をできるだけ排除して，処分場領域を考慮したより現実的な地下水流れ及び核種移行のモデルを用いた安全評価手法は，上述した従来型の安全評価手法の保守性を定量的に把握することを可能とするばかりでなく，処分場が本来有する核種移行に対するバリア性能あるいは核種保持性能の適切な把握・認識も可能とする。したがって，このような手法を開発することは，処分場性能をより現実的に把握するとともに，従来型の安全評価手法の信頼性を評価するという観点からも重要な課題である。また，我が国においては，地層処分の実施に向けた具体的な計画がすでに策定されており，今後，処分施設の詳細な設計情報やサイト調査で取得される地質環境に関する詳細データが明らかになる。したがって，これらの情報を有効に活用した個別現象解析モデルの構築及びそれらを連成・統合化した性能評価を行うことが必要となるものと考えられる。

本研究では，1)統合解析システムの整備において述べられている，3つの課題，すなわち，地質環境条件の調査，処分技術，安全評価の3分野における解析を統合的に支援するための知識ベースの開発とその試運用，統合解析システムで取り扱うべき詳細モデルの体系化に向けた検討，解析の支援及び品質保証のための手法検討のうち，統合解析システムで取り扱うべき詳細モデルの体系化を目指して，処分場領域で生じると考えられる個別現象を現実的にモデル化するとともにそれらの個別現象を記述するモデルを統合化することにより，処分システム全体の安全評価を行うことができる手法を開発することを目的としている。

「第2次取りまとめ」の処分場領域を考慮した解析ケースに関しては，レファレンスケースに対するモデル変更ケースとして，処分場レイアウトを考慮したケースと処分場内での密度干渉効果を考慮したケースが設定されており，レファレンスケースとの比較が行われている。また，これらのケースでは，保守性を考慮して単純化された流れのモデルと核種移行モデルが用いられている。

本研究では，「第2次取りまとめ」におけるこれらの処分場領域を考慮した解析ケースのうち，密度干渉効果を考慮した解析ケースで使用された評価モデルをベースにして，これを発展させ，広域安全評価モデルの開発を行っている。具体的には，処分場領域を包含する広域地下水の流れを評価するモデル及び地下水流れに沿って密度干渉効果を評価するモデルを開発する。また，個別現象解析モデルとして，処分場が亀裂性岩盤中に建設されることを仮定し，処分坑道周辺の岩盤の亀裂ネットワークによるモデル化，その等価連続体近似及び地下水流れと物質移行のモデル化を行う。また，亀裂性岩盤中に掘削された処分坑道内に充填される緩衝材が地下水により膨潤し，亀裂中に侵入する現象のモデル化を行う。さらに，これらの個別現象解析モデルを密度干渉を考慮した核種移行モデルと連成させることにより，広域安全評価モデルを開発し，処分システムの性能を評価する。

本研究は，サイクル機構と米国カリフォルニア大学バークレー校原子力工学科（以下，「UCB」という）との共同研究で実施している。本報告では，「第2次取りまとめ」以降に得られたUCBとの共同研究の成果の概略について紹介するとともに，今後の研究計画について簡単に述べる。

② これまでの成果

i）ニアフィールド岩盤中の地下水流れと核種移行に関するモデル開発

処分坑道周辺のニアフィールド岩盤中の地下水流れと核種移行を評価するために以下の機能を有する解析コードFEHM（Finite-element Flow code for Discrete Fracture networks）を開発した(Lin et al., 2001)。

- 亀裂ネットワーク発生
- 流れに寄与する亀裂群（FBC）の抽出
- FBCをカバーする有限要素メッシュの生成
- 個々の有限要素の透水係数と空隙率の算出（等価連続体モデルの作成）
- 数値解析による水頭値の算出
- 粒子追跡法による物質移行解析
- 流量に関する統計解析

図5.3-9は亀裂ネットワーク発生（一段目），流れに寄与する亀裂群（FBC）の抽出（二段目），FBC

をカバーする有限要素メッシュの生成（三段目）を行ったときの，地下水流動解析結果から得られる地下水流速ベクトル図（四段目）の一連の解析の一例であり，亀裂密度の小さいケースから順に左側から示している。亀裂密度が小さいほど流れに寄与しない亀裂が増加し，流れ方も非常に不均質な流れから均質的な流れへと大きく変化していることがわかる。

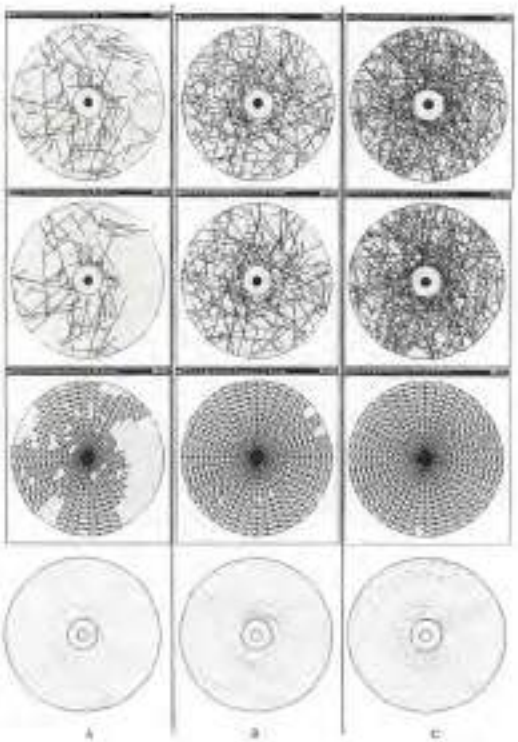


図 5.3-9　亀裂密度を変化させた場合の解析ケースの一例

ii）亀裂中へのベントナイト侵入モデルの開発

膨潤したベントナイトの亀裂中への侵入を記述する数学モデル及びそれを実装した有限要素法による解析コード SABRE を開発した(Ahn et al., 1999；Shinoda et al., 2001)。SABRE コードに実装されている数学モデルは，図 5.3-10 に示す概念モデルに基づき導出されている。SABRE コードを用いて，サイクル機構で実施された単一亀裂中へのベントナイト侵入流出に関する試験との比較解析を行った。その結果，単一亀裂中へ侵入したベントナイト先端の位置（亀裂入口からの長さ）が時間の平方根に比例するという試験での観察事実がモデル解析により確認できた。しかしながら，より確実に SABRE コードの検証を行うためには，サイクル機構で取得した亀裂に侵入したベントナイト先端位置の時間変化に関するデータに加え，ベントナイト先端位置における間隙比等のさらに付加的な試験データが必要なことがわかった。

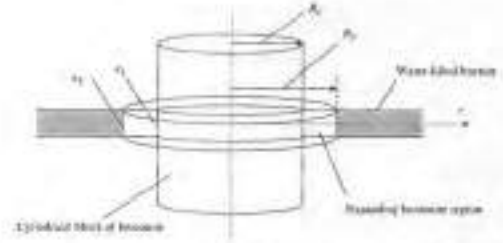


図 5.3-10　単一亀裂へのベントナイト侵入に関する概念モデル

iii）処分場領域を考慮した核種移行評価モデルの開発

VR (Virtual Repository) コード，バージョン 1.0 を開発した(Tsujimoto et al., 2000)。本コードは，処分場領域をそこに処分するキャニスタ数と同じ数のコンパートメントに分割し，各コンパートメント内にキャニスター，オーバーパック，緩衝材，EDZ 岩盤をモデル化することにより，処分位置が異なることにより生じるキャニスタ間の濃度干渉効果を考慮した核種移行を評価することができる。また，コンパートメント内及びコンパートメント間での核種移行については，複数の崩壊系列を考えることができる。VR コードに PVM(Parallel Virtual Machine)と呼ばれるコンピュータ技術を適用することにより，処分場内での核種移行解析をイントラネットで連結した 6 台の Windows NT マシンで分散処理し，高速化することを可能とした。

③ まとめ

UCB との共同研究において，ニアフィールド岩盤を亀裂ネットワークでモデル化し，地下水流れと物質移行を解析するコード FFDF，単一亀裂中へのベントナイト侵入を解析するコード SABRE 及び処分場内の濃度干渉効果を考慮できる処分場領域内での核種移行解析コード VR を開発した。今後 3 年間（2002～2005 年）の計画としては，本共同研究で開発したこれら 3 つの個別モデルを高度化するとともに信頼性を高めるための研究を進める。また，高度化した個別モデルを VR コードに統合化し，廃棄体の配置を考慮した核種移行解析を行い，核種の滞留時間で表現される処分場性能についての

パラメータの影響を評価する。さらに，統合化したモデルとファーフィールド岩盤中移行モデルとの連結についても検討を加えるとともに，VR コードにより出力される処分場からの移行率をファーフィールド移行解析における入力条件として使用することにより，地層処分全体システムでのファーフィールド岩盤の役割を明らかにする。

参考文献

Ahn, J., Chambre, P.L. and Verhoke, J. (1995) : Long Term Behavior of Bentonite Buffer in a Geologic Repository for High-Level Waste, University of California, UCB-NE-4222

Lin, D., Ahn, J. and Chambre, P.L. (2001) : Analysis of Water Flow through A Fracture Network in the Near Field, University of California, UCB-NE 4227.

Shinoda, K., Chambre, P.L. and Ahn, J. (2001) : Analysis of Expanding Bentonite, University of California, UCB-NE-4233.

Tsujimoto, K., Kawasaki, D., Ahn, J. and Chambre, P.L. (2000) : Virtual Repository (VR) Version 5.0 Operation Manual, University of California, UCH-NE-4230.

6. おわりに

6　おわりに

わが国の地層処分計画が，研究開発段階から事業化段階へと進展した状況を踏まえ，サイクル機構では，事業化段階におけるサイクル機構の研究開発の基本的考え方や取り組むべき研究開発課題を整理し，「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」として平成13年度に公表した。現在，この「全体計画」に基づき，研究開発を着実に進めているところである。本報告書では，「第２次取りまとめ」から２年余りが経過し，二つの深地層の研究施設計画が進展するなど新たな成果が蓄積されつつあることから，「第２次取りまとめ」以降の研究開発の計画と成果の現状をまとめた。本報告書を通じて，国や関係機関をはじめとする幅広い専門家の方々にサイクル機構の研究開発の現状をご理解いただくとともに，幅広いご意見をいただき，ニーズをより具体的に把握することで，今後の研究開発の重点化や効率化を図っていきたいと考えている。

サイクル機構では，今後も，深地層の研究施設，エントリー，クオリティなどを活用した基盤的な研究開発を分野間の連携を強化しつつ進め，概要調査地区の選定と概要調査，安全審査基本指針の策定等に資する基盤的な技術や情報の取りまとめに向けて成果の集約を図っていく。高レベル放射性廃棄物の地層処分は，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り，今後も研究成果等の情報を積極的に発信するとともに，様々な機会の場を通じて幅広いご意見を取り入れつつ，品質の高い研究開発を透明性をもって進めていく所存である。

本報告書に記載した研究成果は，国内外の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，一層のご支援とご指導をいただければ幸いである。

【付録A】

主な業務実績（平成13年度）

付録A　(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13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・討論の座談等）	・[illegible] ・[illegible] ・[illegible]	・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible]	・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible]	・[illegible]
主要な出版・報告書等の公表	・[illegible] ・[illegible]	[illegible] ・[illegible]	・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible]	
国際共の委員会・検討開催等	・[illegible] ・[illegible]	・[illegible] ・[illegible]	・[illegible]	・[illegible]
国、関係機関との調整・協力等	・[illegible] ・[illegible] ・[illegible]	・[illegible] ・[illegible]	・[illegible]	・[illegible]
主な国際会議への参加・報告	・[illegible] ・[illegible] ・[illegible]	・[illegible] ・[illegible]		・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible]
主な国内学会への参加・報告	・[illegible] ・[illegible]	・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible]	・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible]	・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible]
その他の情報普及活動	・[illegible] ・[illegible] ・[illegible]	・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible]	・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible] ・[illegible]	・[illegible]

付録A(1)平成13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) 核燃料サイクル開発機構 (2001)：第3回サイクル機構シンポジウム予稿集，平成13年10月17日．

2) 核燃料サイクル開発機構 (2002)：地層処分技術に関する研究開発報告会 ー実施段階を迎えた研究開発の新たな展開ー 予稿集，平成14年1月23日，東海ホール，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2001-017.

3) 核燃料サイクル開発機構 (2002)：我が国の地質環境の長期安定性について ー天然事象研究シンポジウムー 要旨集，平成14年3月11日，虎の門パストラル，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2001-018.

4) 核燃料サイクル開発機構 (2001)：中長期事業計画，平成13年7月．

5) 核燃料サイクル開発機構 研究開発課題評価委員会 (際業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 評価課題「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」，平成13年12月，サイクル機構技術資料，JNC TN1440 2001-008.

6) Miyakawa,K., Nakino,M., Takasu,A., Naito,M., Umeki,H., Wakasugi,K. and Ishiguro,K.(2001): Application of Non-dose/Risk Indicators for Confidence-Building in the H12 Safety Assessment, Specialists Meeting to Resolve Issues Related to the Preparation of Safety Standards on the Geological Disposal of Radioactive Waste, June 18-22, 2001 IAEA, Vienna. (in press)

7) Kawata,T., Yamasaki,S., Shimizu,K., Igarashi,H. and Shiotsuki,M.(2001): A new scope of JNC's R&D program to support implementing phase of Japanese HLW disposal program. Global 2001, September 9-13, 2001, Paris, France. (in press)

8) Miyahara,K., Nakino,M., Kato,T., Wakasugi,K., Sawada,A., Ijiri,Y., Takasu,A., Naito,M. and Umeki,H.(2001): An Overview of the H12 Performance Assessment in Perspective. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXV, Mat. Res. Soc. Symp., Nov. 26-29, 2001, Boston. (in press)

9) 梅木博之，清水和彦，内藤守正 (2001)：地層処分の技術的信頼性 地層処分研究開発2000年レポートー，資源と素材，Vol.117, No.10, pp.768-774.

10) 清水和彦，瀬尾俊弘，吉田英一 (2001)：高レベル放射性廃棄物地層処分と我が国の地質環境，資源と素材，Vol.117, No.10, pp.775-784.

11) 藤田朝雄，清水和彦 (2001)：高レベル放射性廃棄物地層処分の工学技術，資源と素材，Vol.117, No.10, pp.794-800.

12) 宮原 要，笹 幸男，牧野仁史，高須亜紀，内藤守正，梅木博之 (2001)：地層処分システムの安全評価，資源と素材，Vol.117, No.10, pp.801-807.

13) 清水和彦，宮原 要 (2001)：「高レベル放射性廃棄物の地層処分はできるか」に対して ー『地層処分研究開発第2次取りまとめ』批判への見解，科学，Vol.71, pp.1479-1494.

[東濃地科学センター]

14) 核燃料サイクル開発機構(2001)：第14回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告書，サイクル機構技術資料，JNC TN7200 2001-001.

15) 核燃料サイクル開発機構 (2001)：平成13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 2001-011.

16) 核燃料サイクル開発機構 (2001)：広域地下水流動研究年度計画書 (平成13年度)，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-012.

17) 核燃料サイクル開発機構 (2001)：超深地層研究所計画年度計画書 (平成13年度)，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-013.

18) 核燃料サイクル開発機構 (2002)：超深地層研究所計画年度計画書 (平成13年度改訂版)，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-019.

19) 核燃料サイクル開発機構 (2001)：東濃鉱山における調査試験研究年度計画書 (2001年度)，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-010.

20) 核燃料サイクル開発機構（2001）：地質環境の長期安定性に関する研究年度計画書（平成13年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-014.

21) 核燃料サイクル開発機構（2001）：広域地下水流動研究年度報告書（平成12年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-017

22) 核燃料サイクル開発機構（2001）：超深地層研究所計画年度報告書（平成12年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2001-011.

23) 核燃料サイクル開発機構（2001）：東濃鉱山における調査試験研究年度報告書（2000年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2001-007.

24) 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（2001年4月），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-009.

25) 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（2002年2月），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-018.

26) McCrank,G.F.D., Sugiyama,K., Ota,K., Mikake,S., Amano,T., Koide,K. and Takeda,S.（2001）：The MIU Research Laboratory, Japan - Geoscience activities during construction and operation. Proc. 9th International High-level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM), Las Vegas, USA, April 29-May 3, 2001, CD-ROM, American Nuclear Society.

27) Metcalfe,R., Kunimaru,T., Hama,K., Amano,K. and Iwatsuki,T.（2001）：Water-rock interaction around the fault: Implications for waste disposal. Proc. 10th International Symposium on Water-Rock Interaction (WRI-10), Villasimius, Italy, 10-15 July 2001, vol.2, pp.1343-1346, A.A Balkema, The Netherlands.

28) Ota,K., Nori,A., Schild,M. and Alexander,W.R.（2001）：Influence of the mode of matrix porosity determination on matrix calculations. Abst. 8th International Conference on Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere (Migration'01), Bregenz, Austria, 16-21 September 2001, p 87.

29) 小出　馨，杉原弘造，延谷昭健，武田耕悦（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.

[幌延深地層研究センター]

30)サイクル機構（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 2001-001，2001年3月．

31)サイクル機構（2001）：深地層研究所（仮称）計画　平成12年度調査研究計画，サイクル機構技術資料，JNC TN1410 2001-002，2001年3月．

32)サイクル機構（2001）：幌延深地層研究計画　平成13年度調査研究計画，サイクル機構技術資料，JNC TN1410 2001-003，2001年4月．

33)サイクル機構（2001）：幌延深地層研究計画　平成12年度調査研究成果報告，サイクル機構技術資料，JNC TN1410 2001-008，2001年7月．

34)山崎誠一（2001）：放射性廃棄物の地層処分と幌延深地層研究所（仮称）計画，エネルギーレビュー，No.243，p.17-21，2001年4月．

35)山崎誠一（2001）：幌延深地層研究計画の概要，日本原子力学会バックエンド部会主催　第17回夏期セミナー資料集，2001年8月．

36)山崎誠一（2001）：幌延深地層研究計画概要，日本原子力学会「2001年　秋の大会」要旨集，p.総5，2001年9月．

37)内田雅大（2001）：幌延における安全評価技術開発上の課題，日本原子力学会「2001年秋の大会」要旨集，p.総6，2001年9月．

38)油井三和，栗原雄二，宮野廣俊一（2001）：幌延における処分技術開発上の課題，日本原子力学会「2001年秋の大会」要旨集，p.総7，2001年9月

39) Metcalfe, R.（2001）：Some Implications for Site Characterization at Horonobe from Experience at Sellafield, U.K. and Äspö, Sweden; Constraining Groundwater Flow Models Using Hydrogeochemistry，日本原子力学会「2001年秋の大会」要旨集，p.総8，2001年9月．

[東海事業所処分研究部]

40) Nakino, M., Mckenna, S. A. and Wakasugi, K. (2001): Sensitivity Analysis of Monte Carlo Simulation Results Using the Kolomogorov-Smirnov d Statistic, Proceedings of 2001 Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology(IAMG 2001), Session L.

41) Suzuki, S. and Saco, H. (2001): Effect of salinity on diffusivities of Sr^{2+} and I^- ion in compacted sodium-bentonite. Migration'01. ABSTRACTS, pp.80-81

42) Sato, H. and Miyamoto, S. (2001): Diffusion behavior of 210Pb in compacted sodium bentonite. Migration'01. ABSTRACTS. pp.85-86.

43) Suzuki, S., Fujishima, A., Ueno, K., Shibata, M., Saco, H., Ishikawa, Y. and Kawamura, K. (2001): Microstructural modeling of compacted Na-bentonite for prediction of mass transport properties, Migration'01. ABSTRACTS. p.173.

44) Kitamura, A., Tomura, T. and Shibutani, T. (2002). Sorption Behavior of Neptunium onto Smectite under Reducing Conditions in Carbonate Media. NUCEF 2001. JAERI Conf 2002-004. pp 559-566.

45) Saco, H. and Niyamoto, S. (2002): The Effects of Silica Sand Content and Temperature on Diffusion of Selenium in Compacted Bentonite under Reducing Conditions. NUCEF 2001. JAERI Conf 2002-004. pp.675-682.

46) Kitamura, A. and Kohara, Y. (2001). Solubility of Neptunium (IV) in Carbonate Media, Actinides-2001 International Conference. Final Program and Abstracts. p.104.

47) Ishikawa, H. (2001). Actinides Geochemical Database for Performance Analysis of High-level Radioactive Waste Repositories and The Program to Increase Its Confidence. Actinides-2001 International Conference. Final Program and Abstracts. p.37.

付録A　(2)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13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13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管理共同組合） [redacted]	Nagra（原子力発電所等の放射性廃棄物の処分を行うスイスの機関）との協力の取り決め ［1996年より実施］	・[redacted] ・緩衝材研究計画（[redacted]） ・[redacted] ・[redacted]	[redacted]
SKB （スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社）	SKBとの放射性廃棄物管理に関する研究協力 （1995年より実施）	・[redacted] ・[redacted] ・[redacted]	[redacted]
ANDRA （フランス放射性廃棄物管理機関） CEA （フランス原子力庁）	ANDRAとの放射性廃棄物処分分野における研究協力 （1991年より実施） フランス原子力庁との廃棄物処理に関する包括協力 （1991年より2国間協力として1991年より実施）	・[redacted] ・地下水地球化学モデルの高度化、ベンチマーク ・地震動マップ作成及び地震動の予測に関する共同研究 ・ベンチマーク、核種移行解析、物質移行データベース	[redacted] サイクル機構における[redacted]の地圧の影響評価、ニアフィールドの力学連成解析に関する研究、ニアフィールドの安定性評価モデルの開発及びこれを用いた解析的研究に関する協力を実施している。[redacted]
SSI （スウェーデン放射線防護協会） [redacted]	スウェーデンの原子力発電所周辺における地下水流動に関する研究 （1992年より2国間協力として1992年より実施、1999年より[redacted]と共同研究） [redacted]	・[redacted] ・水理・物質移動モデルによるベンチマーク ・[redacted]	[redacted]
US-DOE （米国エネルギー省） LBNL （ローレンスバークレー国立研究所） PNNL （パシフィックノースウェスト国立研究所） SNL （サンディア国立研究所）	[redacted] [redacted] [redacted] [redacted]	・[redacted] ・[redacted] ・[redacted] ・[redacted] ・[redacted] ・[redacted] ・[redacted]	[redacted] [redacted] [redacted]
UCB （カリフォルニア大学バークレー校）	[redacted]	・[redacted] ・[redacted] ・[redacted]	[redacted]
DOE/BMBF-JRC （ドイツ・日本研究センター）	[redacted] [redacted] （2003年3月完了、これまでのPhase1は2年間）	・[redacted] ・[redacted] ・[redacted] ・[redacted]	[redacted]
Mr. Terry [redacted] （[redacted]） [redacted]	[redacted]	・[redacted]	[redacted]
経済産業省 （財団法人[redacted]）	[redacted] （2004年3月完了、これまでのPhase1は2年間）	・[redacted] ・[redacted] ・[redacted] ・[redacted]	[redacted]
経済産業省 （[redacted]）	[redacted] ［2004年3月完了、Phase1で終了］	・[redacted] ・[redacted] ・[redacted]	[redacted]
METI/JNC （[redacted]） [redacted]	[redacted] ［2004年3月完了、Phase1で終了］	・[redacted] ・[redacted] ・[redacted]	[redacted]
METI/[redacted] （[redacted]） [redacted]	[redacted] ［2004年3月完了、Phase1で終了］	・[redacted]	[redacted]
[redacted] （[redacted]）	[redacted] （2003年3月完了、これまでのPhase1は2年間）	・[redacted] ・[redacted] ・[redacted]	[redacted]
[redacted] （[redacted]）	[redacted] （2003年3月完了、これまでのPhase1は2年間）	・[redacted] ・[redacted] ・[redacted]	[redacted]

【付録B】

公開文献リスト（平成12～13年度）

付録B　公開文献リスト(本社・各事業所：平成12～13年度)

【本社(各事業所共通の項目を含む)】

〔平成12年度〕

核燃料サイクル開発機構（2001）：高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発，原子力 eye，Vol. 47，No. 3，pp. 22-26.

核燃料サイクル開発機構（2000）：『高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性』批判に対する見解，サイクル機構技術資料，JNC TY7410 2000-008.

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）（2000）：平成12年度研究開発課題評価（中間評価）報告書 評価課題「高レベル放射性廃棄物地層処分研究の今後の進め方」，平成12年11月，JNC TN1440 2000-009.

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）（2000）：平成12年度研究開発課題評価（中間評価）報告書 評価課題「深地層の研究施設における研究計画」－主に超深地層研究所計画第2段階の計画案について－，平成12年11月，JNC TN1440 2000-010.

澤田純男，梅木博之，内藤守正（2000）：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，日本原子力学会誌，Vol. 42，No. 6 pp. 486-506.

Miyanara, K., Nakano, H., Takasu, A., Narita, M, Umeki, H., and Masuda, S. (2000) Confidence Building in Safety Assessment of Geological Disposal in Japan: Proceedings of International Conference on Radioactive Waste Disposal (DisTec 2000), Berlin, Germany, pp. 395-400.

笠井間秀樹（2000）：高レベル放射性廃棄物地層処分の社会合意形成と技術，日本原子力学会バックエンド部会第16回夏季セミナー資料集，2000年7月.

清水和彦（2000）：高レベル放射性廃棄物の地層処分と地質環境調査技術，物理探査，53(6)，pp. 532-542.

油井正雄，石川博久（2000）：「地層処分研究総合評価システム」の構築－地層処分研究開発第2次取りまとめの透明性，客観性の向上－，サイクル機構技報，No. 9(2000. 12)，pp. 41-46.

梅木博之（2000）：わが国における地層処分のセーフティ・ケース　－地層処分研究開発第2次取りまとめの概要－，日本原子力学会2000年秋の大会予稿集，pp. (論)9-12.

〔平成13年度〕

Aoki, K. (2001)：Recent Activities at Underground Research Laboratories in Japan. NUCEF 2001, JAERI Conf 2002-004, pp. 361-362.

藤田朝雄，清水和彦（2001）：高レベル放射性廃棄物地層処分の工学技術，資源と素材，Vol. 117，No. 10，pp. 794-800.

五十嵐寛，宇留　栗，油井正雄，新　幸男（2001）：高レベル放射性廃棄物処分の事業化段階におけるサイクル機構での地層処分技術に関する研究開発，日本原子力学会　東北支部，第35回研究交流会　講演要旨集，pp. 33-34.

核燃料サイクル開発機構（2001a）：中長期事業計画，平成13年7月.

核燃料サイクル開発機構（2001b）：第3回サイクル機構シンポジウム予稿集，平成13年10月17日.

核燃料サイクル開発機構（2002a）　地層処分技術に関する研究開発報告会　－実施段階を迎えた研究開発の新たな展開－予稿集，平成14年1月23日，東京ホテル，JNC TN1400 2001-017.

核燃料サイクル開発機構（2002b）：我が国の地質環境の長期安定性について　－天然事象研究シンポジウム－　要旨集，平成14年3月11日，虎の門パストラル，JNC TN1400 2001-018.

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」，平成13年12月，JNC TN1440 2001-008.

前川恵輔(2001)：地層処分研究開発成果の普及に関する検討，実践及び評価，サイクル機構技報，No. 12(2001. 9)，pp. 1-12.

Miyahara, K., Makino, H., Kato, T., Wakasugi, K., Sawada, A., Ijiri, Y., Takeda, A., Saito, N. and Umeki, H. (2001): An Overview of the H12 Performance Assessment in Perspective. Abst. 2001 MRS Fall Meeting, Boston, Massachusetts, November 26-30, 2001, p 682.

宮原　要，舘　幸男，牧野仁史，高瀬亜紀，内藤守正，梅木博之（2001）：地層処分システムの安全評価，資源と素材，Vol.117，No.10，pp.801-807.

清水和彦，宮原　要（2001）：「高レベル放射性廃棄物の地層処分はできるか」に対して－『地層処分研究開発第２次取りまとめ』批判への見解，科学，Vol.71，pp.1179-1184.

清水和彦，瀬尾俊弘，吉田英一（2001）：高レベル放射性廃棄物地層処分と我が国の地質環境，資源と素材，Vol.117，No.10，pp.775-784.

Takasu, A., Naito, M., Umeki, H. and Nasuda, S.(2001) : Application of Supplementary Safety Indicators for H12 Performance Assessment, MRS Symposium Proceedings Vol 663(24th International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management, August 27-31, 2000, Sydney, Australia), pp.907-917.

梅木博之，清水和彦，内藤守正(2001)：地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発2000年レポート－，資源と素材，Vol.117，No.10，pp.768-774.

Umeki, H. (2001) : Key Aspects of the H12 Safety Case, MRS Symposium Proceedings Vol.663(24th International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management, August 27-31, 2000, Sydney, Australia), pp.701-711.

【東濃地科学センター】

[平成12年度]

Alexander, W.R., McKinley, I.G., Ota, K., Wersin, A., Frieg, B. and Kickmaier, W. (2000) : The study of in situ radionuclide retardation in the geosphere: Examples from Nagra's Grimsel Test Site, Switzerland. Proc. 5th International Conference on Nuclear and Radiochemistry, Pontresina, Switzerland, 3-8 September 2000.

安藤雅孝, 活断層研究チーム (2000) : 赤坂川断層帯での地殻活動研究, サイクル機構技報, No.9(2000.12), pp.131-141.

浅井和晃 (2001) : 山水・河川水の採取・分析 (平成12年度), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書, 株式会社地球科学研究所), JNC TJ7440 2001-017.

吾妻崇*, 北川有一, 鹿田 亮 (2000) : 岐阜県上宝町の東濃鉱山周辺でおこっている地殻内部の多成分連続観測について, 地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会予稿集, Ai-011.

藤原 治 (2000) : 日本の後成段丘アトラスの作成, 地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会予稿集, Qa-P007.

Fujiwara, O., Masuda, F., Sakai, T., Irizuki, T. and Fuse, K. (2000) : Tsunami deposits in Holocene bay mud in southern Kanto region, Pacific coast of central Japan. Sed. Geol., 135, pp.219-230.

Fujiwara, O., Nakatsuka, N., Nakano, T., Ishimaru, T. and Ueda, K. (2000) : Long-term stability of the geological environment in Japan. Proc. 2000 Joint Workshop on HLW Management between Korea and Japan, Taejon, Korea, November 6-7, 2000.

Gautam, M. R., Saegusa, H., Kaizuka, T. and Watanabe, K. (2000) : Runoff characteristics of two subcatchments in Tono area. 土木学会第55回年次学術講演会, II-90.

Gautam, M. R., Watanabe, K. and Saegusa, H. (2000) : Runoff analysis in humic forest catchment with artificial neural network. Jour. Hydrol., 235, pp.117-136.

笹 克彦 (2000) : 東濃鉱山における花崗岩長期浸漬試験－地質環境編, サイクル機構技術資料, JNC TN7430 2001-001

笹 克彦, 三ツ井誠一郎, 吉木里奈子, 広瀬亮雄 (2000) : 東濃鉱山における土岩石長期浸漬試験－ガラス材料編, サイクル機構技術資料, JNC TN7430 2000-001.

笹 克彦, 中井勝志 (2000) : 地下水の地球化学特性調査技術開発 (東濃地域を例として), 地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会予稿集, Ac-P004.

笹 克彦, 松 勝, 岩月輝希 (2000) : サイクル機構における四重極質量分析計の運転状況, 日本放射化学会誌, 別冊 1 Supplement 2, p.155.

笹 克彦, 吉田英一, Bateman, K. (2000) : 微生物が触媒する黒雲母からのスメクタイト生成反応の可能性について, 地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会予稿集, Jc-006.

Harrington, J. F. and Horseman, S. T. (2000) : Stress-sensitivity of the hydraulic properties of a clay bearing fault gouge from the Tsukiyoshi Fault, Tono Mine, central Japan. JNC Tech. Rep. (Work performed by British Geological Survey under contract with JNC). JNC TJ7400 2000-016.

長谷川健 (2000) : DH-2 号孔掘削ならびに調査研究結果速報, サイクル機構技術資料, JNC TY7400 2000-009.

長谷川健, 杉原里詞, 武田精悦 (2000) : 地下深部における地質環境の研究 広域地下水流動研究および超深地層研究所計画 (地表からの研究段階) について, 地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会予稿集, Ac-011.

Hashem, M., Mohamed, A. A., Watanabe, K., Ali, S. A., Mohamed, A. A., Abdel Ish, A. S. and Saegusa, H. (2000) : Grain size effect on both saturation and pollutant migration. 土木学会第55回年次学術講演会, III-B359.

堀 浩二, 丸山 誠, 島井昭誠 (2001) : 土岩石境界中の割れ目を対象としたジョイント せん断試験, 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 TJ7430 2001-002.

林信太郎, 梅田浩司, 桐越元史, 二ノ宮淳 (2000) : 西白山地, 最新 300 万年間の火山活動の時空分布, 日本地質学会第107年学術大会講演要旨, p.170.

林信太郎, 梅田浩司, 通浦得史, 桐越元史, 二ノ宮淳 (2000) : 西白山地の鮮新－更新世火山活動の時空分布, 地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会予稿集, Vu-P016.

平賀忠行, 今井保行 (2001) : 岩石用長期クリープ試験機の設計・製作, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書 : 株式会社丸東製作所), JNC TJ7410 2001-001.

藤原 昇, 松井裕哉, 三枝博光, 今井 久, 相原 靖 (2000) : 地下空洞周辺岩盤を対象とした浸透流解析における境界条件設定方法に関する提案, 土木学会第55回年次学術講演会, III-B171.

Horikawa,T., Kimura,K. and Toyoda,S. (2000) : Radiation damage halos in quartz - A geodosimeter for natural radionuclide retention. 2000 Western Pacific Geophysics Meeting. Eos, Trans., Amer. Geophys. Union, Suppl., 81, #255, W52A-15, American Geophysical Union.

堀川恵三，木村充男，豊田　新 (2000)：ウラン鉱床中心奥の放射線損傷の研究(1)－照射実験試料とウラン鉱石のESR観察．地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会予稿集，Wa-P005.

地田敏開，堀利利之 (2001)：AN-1号孔における地下水水圧・水質観測装置の設置，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 TJ7410 2001 018.

市川康明 (2001)：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12年度），サイクル機構技術資料（研究委託報告書，名古屋大学），JNC TJ7400 2001 002.

井尻裕一，鈴木俊一，大石琢巳，杉原　弘，下丸貴人，西尾　智，安村賢一 (2001)：水理地質構造モデル化手法及び地下水流動解析手法の総合性評価，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 TJ7400 200: 007.

今井　久，　輪夕イ (2000)：MPシステムによる地下水の採水・水圧計測，サイクル機構技術資料（契約業務報告書：味式会社ベスコ），JNC TJ7410 2000 003.

今井　久，山宮　晶，松井裕哉，林　為人，前村陽之，鎌塚　史，石原輝行 (2000)：電磁波伝播特性を利用した水分量計測に関する人工地盤試験，ハザマ研究年報(2000.12)，pp.47-55

岩佐健二，下山昌宏，中村哲久，竹村生吾，永野純一 (2001)：引出連続妥当性水理研究装置調査，サイクル機構技術資料（契約業務報告書：太洋地質株式会社），JNC TJ7440 2001-011.

石丸恒存，都合順英，中司　昇，鈴木元孝 (2000)：長期安定性評価を目指した「地質環境データベース」の構築，応用地質学会中部支部平成12年度支部研究発表会講演予稿集，pp.31-36.

伊藤　茂，徐　勝，阿部雅人，渡辺雅人，有坂宏幸，岩月輝希 (2001)：東濃地科学センターにおけるタンデム型加速器の現状，第15回タンデム加速器およびその周辺技術の研究会報告書，pp15-17

伊藤　茂，徐　勝，阿部雅人，渡辺雅人，有坂宏幸，岩月輝希 (2001)：東濃地科学センターにおけるタンデム型加速器の現状，第3回AMSシンポジウム，pp.42-45.

岩月輝希，村上由紀，長沼　毅，佐竹　洋 (2000)：硫酸同位体にもとづく地下微生物の酸化・還元活性の考察，地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会予稿集　Wa-010

岩月輝希，徐　勝，伊藤　茂(2000)：14C測定の地質学への応用，第46回質量分析総合討論会(2000)講演要旨集，pp.266-267.

Iwatsuki,T., Xu,S., Ioka,S., Abe,M. and Watanabe,M. (2000) : Estimation of relative groundwater age in the granite at the Tono research site, central Japan. Nucl. Instr. Methods Phys. Res. B, 172, pp.624-629.

岩月輝希，徐　勝，佐竹　洋 (2000)：同位体的解析に基づく地下深部のpH環境の考察，地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会予稿集，Ac-P001.

岩月輝希，吉田英一，湯　克宏，リチャード・メトカルフェ (2000)：実際地質物の間位体組成に基づくpH条件の長期安定性の解析手法，サイクル機構技報，No.6(2000.9)，pp.41-48.

Jin,A.S., Moya,C.A. and Ando,M. (2000) : Simultaneous determination of site responses and source parameters of small earthquakes along the Arotaugawa fault zone, central Japan. Bull. Seismol. Soc. Amer., 90, pp.1430-1445

核燃料サイクル開発機構 (2000)：広域地下水流動研究の現状　平成4年度～平成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 (2000)：超深地層研究所計画　地表からの調査予測研究段階計画－平成12～14年度計画書，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2000-001.

核燃料サイクル開発機構 (2000)：広域地下水流動研究実施計画書(平成12～16年度研究計画書)，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2000-002

核燃料サイクル開発機構(2000)：平成12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 2000-003

核燃料サイクル開発機構 (2000)：東濃鉱山における調査試験研究年度計画書（平成12年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2000 001

核燃料サイクル開発機構 (2000)：超深地層研究所計画年度計画書（平成12年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2000-005

鎌塚史信 (2000)：堆積シーケンス中における光合成生物群の形成：中部更新統上総層群梅ヶ瀬層の例，日本地質学会第107年学術大会講演要旨，p.127

北川浩之 (2000)：深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書：法政法人システム総合研究所），JNC TJ7400 2000-015

加藤春實（2001）：DH-2孔における水圧破砕法による初期応力測定，サイクル機構技術資料（契約業務報告書：同和工営株式会社），JNC TJ7430 2001-001.

加藤春實，佐藤稔紀，前田信行，松井裕哲（2000）：水圧破砕法から推定される初期応力分布と弾性波速度異方性の関係－岐阜県瑞浪市の土岐花崗岩を対象とした1,000mボーリング孔での測定例．第21回西日本岩盤工学シンポジウム論文集，pp.87-92.

加藤春實，佐藤稔紀，前田信行，松井裕哲，佐野　修（2000）：深度1,000m試験孔のコアの弾性波速度異方性と原位置の応力関係との関係について，資源・素材2000ポスターセッション発表要旨，A0-7.

菊地廣二（2001）：深部岩盤における初期応力測定用のレコーダー，方位傾斜計の製作，サイクル機構技術資料（契約業務報告書：日本国土開発株式会社），JNC TJ7410 2001-004

Kita, H., Sato, T., Chen, Y., Nishiyama, T. and Kaneko, K. (2000) : Processes of microcracking and faulting in granite. Abst. 31st International Geological Congress, Rio de Janiero, Brazil, August 6-7, 2000, CD-ROM.

岩多悟之，佐藤稔紀，金子勝比古（2000）：高温下における岩石の力学・透水特性，第21回西日本岩盤工学シンポジウム論文集，pp.33-38.

岩多悟之，佐藤稔紀，辻上博司，蓮　友晴，西山　孝，金子勝比古（2000）：温度履歴に伴う砂岩の間隙構造の変化，資源と素材，116，pp.656-661.

北川有一，岩友純一（2000）：東濃鉱山周辺における地下水位の地設ひずみ・気圧応答の周波数特性と地震に伴う地下水位変動の研究，サイクル機構技報，No.8(2000.9)　pp.57-63.

北川有一，岩友純一，藤田　宏（2000）：岐阜県土岐市東濃鉱山敷地で行っている地下水位測定及び他の観測項目の地震関連現象の方法，地球惑星科学関連学会2000年合同大会予稿集，Af-P003.

小出　馨（2000）：DH-11号試錐孔およびその周辺の研究結果速報，サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2000-011

Kaido, K., Hasegawa, K., Sugihara, K. and Takeda, S. (2000) : Current status of the JNC geoscientific R&D programs on deep geological environment. Proc. 2000 Joint Workshop on HLW Management between Korea and Japan, Taejon, Korea, November 6-7, 2000.

小室光世，國田新，藏部博志，根橋信之，堀川誠正，渡井貴之（2000）：石炭の放射線探査解析によるウラン鉱床のナチュラルアナログ研究，地球惑星科学関連学会2000年合同大会予稿集，Ae-012.

近藤康生，藤巻孝信（2000）：二枚貝類を中心とした下総層群の化石群集，特に生活様式組成と堆積作用の関係，2000年第四紀学会大会シンポジウム講演要旨，pp.158-159.

岸山　浚，統多　勝，戸井田宏，石塚峰夫（2001）：超深地層研究所研究坑道における研究及び施工に関する検討，サイクル機構技術資料（研究委託報告書：大成建設株式会社，株式会社大林組，鹿島建設株式会社，清水建設株式会社），JNC TJ7400 2001-005.

熊澤峰夫，岡友孝洋，横山由紀子，中島崇裕，遠藤佳代子（2000）：アクロス：理論と技術開発，及び将来展望，サイクル機構技報，No.9(2000.12)，pp.115-129.

Kumazawa, M., Yokoyama, Y. and Nakajima, T. (2000) : A model for decomposition of electromagnetic transfer function in 3D structure. 2000 Fall Meeting, San Francisco, California, December 15-19, 2000, Eos, Trans, Amer. Geophys. Union, Suppl., 81, GP61B-05, American Geophysical Union.

岡友孝洋，熊澤峰夫（2000）：東濃アクロス地殻計アレー観測システム，地球惑星科学関連学会2000年合同大会予稿集，Aj-P005.

前田信行，松井裕哲（2001）：東濃鉱山における初期応力状態の再評価，サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2001-004.

前田信行，松井裕哲（2001）：東濃鉱山における双設坑道の安定解析，サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2001-005.

前田信行，松井裕哲，瀬戸政宏（2001）：電源開発技術総合研究所／サイクル機構共同研究報告書－岩盤空洞の安定性に関する評価方法の検討－平成12年度共同研究報告書，サイクル機構技術資料，JNC TY7400 2001-001.

前村耕之，徳丸昌則（2001）：本邦和領域の原位置地温予測の研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書：株式会社ダイヤコンサルタント），JNC TJ7400 2001-001.

前村耕之，徳丸昌則（2001）：本邦和領域の原位置地温予測の開発，サイクル機構技術資料（研究委託報告書：株式会社ダイヤコンサルタント），JNC TJ7400 2001-006.

増田富士雄，藤原　治，酒井哲弥（2000）：房総半島太平洋側の沖積層と海水の変動－特に，九十九里浜平野と夷隅川低地の完新統，2000年第四紀学会大会シンポジウム講演要旨，pp.172-173.

松井裕哲（2000）：AN-1号孔およびMIZ-1号孔における力学特性調査結果，土木学会第55回年次学術講演会，CS-171.

松井裕哲，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及び正馬様用地における土被圧強岩体の岩盤力学的概念モデル，サイクル機構技術資料，JNC TY7420 2001-001.

伊井裕哉，佐藤稔紀，杉原弘造（2000）：結晶質岩における坑道掘削等に伴う周辺岩盤中の間隙水圧変化，トンネル工学研究論文報告集，10，pp.209-214.

桜岡永憲（2001）：北延 NATM 坑道における間隙水圧計測システムの設置，サイクル機構技術資料（契約業務報告書：大成基礎設計株式会社），JNC TJ7410 2001-003.

桜岡永憲（2001）：北延 NATM 坑道における間隙水圧計測システムの設置，サイクル機構技術資料（契約業務報告書：大成基礎設計株式会社），JNC TJ7440 2001-002.

桜岡睦幸，武田祐彦，中野勝志（2001）：花崗岩分布地域における反射法地震探査の適用例，日本原子力学会 2001 年春の年会要旨集，p.620.

桜谷慶生，本多敬彦（2001）：AI 孔を用いた水位観測のための準備調査業務（AI 孔水位計設置（その 1）），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 TJ7440 2001-001.

Metcalfe,R., Amano,K., Hama,K., Kunimaru,T., Yoshida,H., Milnes,A.G. and Gillespie,M.R. (2000) : Characterising groundwater flow histories in faults : a case study of the Tsukiyoshi Fault, Tono Mine, Japan. 2000 Western Pacific Geophysics Meeting, Eos, Trans., Amer. Geophys. Union, Suppl., 81, WP40, H816-09, American Geophysical Union.

見掛信一郎，杉原弘造，永崎建志（2000）：地下 1,000m に研究坑道を掘る，東濃地科学センター超深地層研究所計画，トンネルと地下，31，pp.55-63.

見掛信一郎，杉原弘造，永崎建志，久野　悟（2000）：超深地層研究所における研究の進め方と研究坑道の設計概念，日本原子力学会 2000 年秋の大会予稿集，p.691.

森川徳敏（2001）：地球化学的調査に基づいた地下水流動に関する研究－東濃地域を対象とした溶存希ガスによる地下水調査，サイクル機構技術資料，JNC TA7400 2001-003

森川徳敏，徐　勝，岩月輝希（2000）：東濃鉱山周辺の地下水中のヘリウム同位体比，2000 年度日本地球化学会年会講演要旨集，p.138.

Murakami,T., Iwatsuki,T. and Naganuma,T. (2000) : Microbial abundance and activity in deep groundwater in the Tono uranium mine area. Abst. 2nd Eurocongress on Bacterial-Metal/Radionuclide Interaction: Basic Research and Bioremediation, Rossendorf/Dresden, Germany, 30 August-1 September 2000, pp.41-42.

長沼　毅，今中忠行，岡見晴幸，村上由紀，岩月輝希（2000）：深部地質環境に対する微生物の影響に関する研究（先行基礎工学共同研究），サイクル機構技術資料，JNC TY7100 2000-002.

Naganuma,T., Murakami,Y. and Iwatsuki,T. (2000) : Fotmation of colloidal iron hydroxide by deep subsurface bacteria in Abst. PACIFICHEM 2000, Honolulu, Hawaii, December 14-19, 2000. Bios63.

中島崇裕，国友孝洋，熊澤峰夫，横山由紀子（2000）：電気ダイポールからの送信及びモニタリングの試み，第 108 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会講演予稿集，p.153

中島崇裕，国友孝洋，熊澤峰夫，横山由紀子（2000）：東濃地震アクロスシステム技術開発と送信受信点間の伝達関数の試験観測，地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会予稿集，Fc-P002.

中島崇裕，国友孝洋，熊澤峰夫，横山由紀子（2000）：電磁アクロスの開発と送信実験，東京大学地震研究所彙報，75，pp.413-429.

中間俊彦，前田宜行，臼井裕哉，吉田和夫（2001）：掘進ボーリング孔を利用した東濃鉱山における初期応力状態の評価，日本原子力学会 2001 年春の年会要旨集，p.621.

中野勝志，天野健治，竹内真司，笹井裕昌（2000）：地下深部の地質環境を把握するための調査技術開発（超深地層研究所計画における研究成果の一例），地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会予稿集，Ac-P009.

中司　昇，湯佐泰久（2000）：旭層処分における地質環境の現状と将来予測，日本地質学会第 107 年学術大会講演要旨，p.10

野原　壯，郡谷順英，今泉俊文（2000）：活断層 GIS データを用いた地震の震源深，地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会予稿集，SF P014.

Ohmori,H. Sunga,T., Fujiwara,O. and Suga,T. (2000) : Distribution of erosion rates over the Japanese Islands and its regional characteristics. Trans., Jap. Geomorph. Union, 21, pp.41-42.

岡崎浩子，佐藤努，中里裕臣，檀原徹，笹田政克（2000）：中部更新統下総層群模式地から産出した珪藻－海洋システム，地質学雑誌，52，pp.63-74.

大久保誠介（2001）：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 12 年度），サイクル機構技術資料（研究委託報告書：東京大学），JNC TJ7400 2001-003.

Ota,K., Alexander,W.R., Smith,P.A., Wort,A., Frieg,B., Frick,U., Imeki,H., Amano,K., Cooper,N.W. and Berry,J.A.

(2000) : Building confidence in radionuclide transport models for fractured rock - The Nagra/JNC Radionuclide Retardation Programme, Abst. 20th International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management (MRS2000), Sydney, Australia, 27-31 August 2000, p.47.

Ota, K., Kunu, Y., Shibata, M., Yoshida, Y. and Yui, M. (2000) : Laboratory work in support to CRR Phase I experiments at GTS. JNC Tech. Rep., JNC TN7420 2000-003.

Ota, K., Sakano, K., Ueda, H., Amano, K., Takeuchi, S. and Ikeda, K. (2001) : An overview of the MIU-4 borehole investigations during phases I and II. JNC Tech. Rep., JNC TN7400 2001-002.

幌延地下開発フロンティア研究プロジェクト*グ (2001) : 幌延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.

三枝博光, 舘山泰宏 (2000) : 超深地層研究所計画における地質構造モデルの構築及び地下水流動解析, サイクル機構技報, No.9(2000.12), pp.89-101.

青柳 宏, 川瀬啓一, 内田伸彰, 脇田秀樹 (2000) : 超深地層研究所計画への情報提供技術の適用, 日本原子力学会中部支部第32回研究発表会講演報要集, p.26

青柳 宏, 川瀬啓一, 杉原弘造, 山本純太 (2000) : 超深地層研究所3-Dに関する情報提供活動へのVR技術の適用, サイクル機構技報, No.7(2000.6), pp.93-99.

坂井雪路 (2001) : 通気・防災技術の展開と地下GIS, 月刊技術士, pp.2-5.

三浦哲二, 藤原 治 (2000) : 高度分散媒を用いた堆積地区からの推移・地質的特徴の抽出, 情報地質, 11, pp.118-121.

佐藤伸哉, 向井和行 (2000) : HTVデータの解析作業, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 株式会社レアックス), JNC TJ7440 2000-030.

佐藤伸哉, 向井和行, 高橋雅司 (2001) : 005E-03孔におけるボアホールテレビ観察, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 株式会社レアックス), JNC TJ7420 2001-005.

Sato, M., Maeda, N. and Matsui, H. (2000) : Vertical stresses around drift excavated in sedimentary rock determined by the acoustic emission technique. Proc. GeoEng2000, Melbourne, Australia, 19-24 November 2000, Ue0940.

島田純夫, 前田勝宏, 稲田雅亮, 梅木和俊, 藤原 陽 (2000) : 花崗岩地域の割れ目系とリニアメント, 応用地質学会中部支部平成12年度支部研究発表会講演予稿集, pp.47-50.

Shinshi, Y., Nakano, K., Mikake, S. and Takeuchi, S. (2000) : Integration of well hydraulic formulae considering several condition of pumping test and/or hydraulic boundaries. Proc. International Symposium 2000 on Groundwater, Saitama, Japan, May 8-10, 2000, pp.471-472, IAHR.

進士喜英, 中野勝志, 竹内竜史, 竹野裕之 (2000) : 単孔式現場透水試験の解釈に関する一考察, 第35回地盤工学研究発表会, pp.1531-1532.

Smith, P.A., Alexander, W.R., Kicksnior, A., Ota, K., Frieg, B. and McKinley, I.G. (2001) : Development and testing of radionuclide transport models for fractured rock : Examples from the Nagra/JNC Radionuclide Migration Programme in the Grimsel Test Site, Switzerland. Jour. Contam. Hydrol., 47, pp.335-346.

笹原武徳, 相田 宏, 下山晶宏, 永野敬一, 竹村恵彦 (2001) : MIU-3号孔における地下水水圧・水質観測装置の設置, 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 2001-003.

Sugai, T., Ohmori, H., Sarga, T. and Fujiwara, O. (2000) : Hypsometric integral for small drainage basins in tectonically active regions and its geomorphological implications. Trans., Jap. Geomorph. Union, 21, pp.59-60.

杉原弘造, 吉岡尚也, 松井裕哉, 佐藤稔紀, 山本肇也 (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.

舘山泰宏, 三枝博光 (2000) : 広域地下水流動研究における地質構造モデルの構築と地下水流動解析, サイクル機構技術資料, JNC TN7400 2000-012.

立花明子, 村上由記, 長沼 毅, 岩月輝希 (2001) : 地質試料の有機分析による地下微生物相の解析, 第17回しんかいシンポジウム予稿集, p.166.

高瀬尚悟, 渡辺俊樹, 藤内 聡, 松岡俊文, 芦田 譲 (2000) : フルウェーブトモグラフィの実データへの適用, 物理探査学会平成12年度春季学術講演会講演論文集, pp.298-301.

竹内竜史, 仙波 毅, 三野勝志 (2000) : 孔間水理試験装置の開発, サイクル機構技報, No.6(2000.9), pp.49-56.

竹内真司, 下茂道人, 西原 巧, 後藤和幸 (2001) : 1000mボーリング孔を用いた圧力干渉試験による断層近傍の透水性調査, 第31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.295-300.

山中雅彦, 西垣和雄, 新宮 弘 (2001) : 濃度変動シミュレーション技術に関する調査, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 株式会社CRC総合研究所), JNC TJ7420 2001-002.

戸井田克，風late幸弘，吉中龍勝，井元 一彦，新田泰文，河野泰典（2001）：地質環境の不均一性評価における統計解析手法の適用性調査（その2）－2次元データを基にした統計解析手法の適用性調査と実用化に関する課題の検理，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 2001-015

達山恵之，笹松尚樹，小田川信哉（2000）：土壌水分地下水位観測データの整理実施，サイクル機構技術資料（契約業務報告書：パシフィック航測株式会社），JNC TJ7440 2000 026.

越智佳代子，藤沢琢夫，國友孝洋，山崎財善（2000）：可搬型弾性波速度測定装置（DPT）の実用化に向けた加振部設置技術の開発，地球惑星科学関連学会2000年合同大会予稿集，A-P002.

渡辺邦夫，上杉博光（2000）：地下水流動調査研究－地下水流動の総合調査・解析システムの開発，サイクル機構技術資料，JNC TY7400 2000 004.

渡辺邦夫，戸沢達夫，今井 久，上杉博光（2000）：オパリナス・クレイ層の透水係数の推定，土木学会第55回年次学術講演会，CS 110.

亀田浩利，小松 亮，関瀬充史，湯佐泰久（2001）：西南日本領家帯（四国），高知花崗岩類の冷却史，特に新第三紀貫入岩類による熱的影響，岩石鉱物科学，30，pp.17-27.

Best, J.M., Hama, K., Bateman, K., Connolly, P., Eards, V., Milodowski, A.E., Wetton, P. and Yoshide H. (2000): Laboratory examination of microbial perturbations in a granitic environment. Abst. 24th International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management (MRS2000), Sydney, Australia, 27-31 August 2000, p.37.

Xu, S., Doshizumi, H., Ochiai, Y. and Uto, K. (2000): Preliminary results of AMS ^{14}C dating for the younger Izuno Volcano, Japan. 2000 Western Pacific Geophysics Meeting, Eos, Trans., Amer. Geophys. Union, 81, WP240, IP41B-07, American Geophysical Union.

Xu, S., Doi, S., Ewetsuki, T., Abe, H. and Watanabe, M. (2000): A new AMS facility at the JAERI Tono Geoscience Center, Japan. Nucl. Instr. Methods Phys. Res. B, 172, pp.8-12.

薛 自求，松井裕哉，吉川和夫，松村真一郎（2001）：ボーリングコアの弾性波速度異方性と地下応力の関係について，第31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.106-110.

山本純夫，永嶋靖久，西村 修（2000）：超深地層研究所計画－最終の調査結果，サイクル機構技術資料，JNC TY7420 2000-005.

山内大治，笠原初徳，竹内真司，小田川信哉（2000）：超深地層研究所計画用地周辺の水収支観測結果，サイクル機構技報，No.9（2000.12），pp.103-114.

山内大治，竹内真司，二戸嘉之（2000）：DEM による地形解析に基づく水文観測地点の代表性確認について，応用地質学会中部支部平成12年度支部研究発表会講演予稿集，pp.37-42.

横山由紀子（2000）：情報量規準を使用しないAICオーダの推定法，第15回ディジタル信号処理シンポジウム，pp.197-202.

横山由紀子，熊澤峰夫，國友孝洋，中島崇裕（2000）：情報に制御された可聴波を用いた3次元精密構造探査のためのディジタル信号波形の設計，東京大学地震研究所彙報，75，pp.375-392.

横山由紀子，熊澤峰夫，中島崇裕（2000）：射線モデルと自己回帰型のモデルを組み合わせた地震波走時関数の分解方法－水平成層構造の場合，東京大学地震研究所彙報，75，pp.393-411.

横山由紀子，中島崇裕，熊澤峰夫（2000）：人工震源波動を用いた3次元構造探査で扱う送受信点走時伝達関数の性質とその処理法，地球惑星科学関連学会2000年合同大会予稿集，Eo-P001.

横山由紀子，中島崇裕，熊澤峰夫（2000）：人工震源波動を用いた3次元構造探査で扱う送受信点走時伝達関数の性質とその処理法2，第108回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会講演予稿集，p.161.

吉川和夫，前田信行，松井裕哉（2000）：堆積岩のスケール効果と破壊現象との関係に関する一考察，応用地質学会中部支部平成12年度支部研究発表会講演予稿集，pp.43-46.

吉川和夫，松井裕哉，前田信行（2001）：超深地層研究所建設に伴う坑道掘削周辺岩盤中の破壊影響に関する予察的解析，サイクル機構技術資料，JNC TY7400 2001-012.

吉沢達夫，越智佳代，土橋博光，今井 久（2000）：Evaporation logging System の改良と原位置での適用検討，土木学会第55回年次学術講演会，CS-128.

吉原 誠，Dershowitz, W.（2001）：亀裂ネットワークモデルによる解析作業の実施，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 TJ7410 2001-003.

湯佐泰久（2000）：核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター，安全工学，39，pp.351-353.

湯佐泰久（2000）：自然から学ぶ放射性廃棄物処分の安全 アナログ研究のすすめ，地学雑誌，109，pp.605-606.

Zhou, Q.Y., Shimada, J., Matsui, H. and Sato, A. (2000): Numerical analysis of the sensitivity of electrical resistivity tomography to the water movement in fractured rocks. 2000 Western Pacific Geophysics Meeting, Eos, Trans., Amer. Geophys. Union, 81, WP51, B51A-07, American Geophysical Union.

*1 活断層研究チーム：伊藤谷生，水田義明，佐野　修，宇根和朗，佐竹　洋，竹内　章，西上欽也，伊藤　潔，岡谷　隆，藤田和夫，田中秀実，伊藤久男．

*2 地殻地下構造フロンティア研究プロジェクト：熊沢峰夫，岡田知己，蔵下英司，中島淳一，横山正紀子，鵜trick　宏，井川猛一，石井　紘，北田奈々，谷々米嘉子，田阪美樹，山内常生，安藤雅孝，伊藤　潔，伊藤久男，佐竹　洋，竹内　章，田中秀実，西上欽也，平原和朗，梅谷　隆，中司　昇，藤原　治，檜垣和夫．

[平成13年度]

天野健治，前田勝彦，鳴島直樹，木野　忠，三枝博光，竹内真司，笹　尾英嗣，中野勝志，グレン・マックラング，リチャード・メトカーフ（2001）：透水性割れ目を固定・分離する地質学的手法の開発－［その1］．土岐花崗岩体を例とした研究開発の現状と課題－，日本地質学会第108年学術大会講演要旨，p.172.

Arthur, R.C., Iwatsuki, T., Hama, K., Amano, K., Metcalfe, R. and Ota, K. (2001) : The redox environment of deep groundwaters associated with the Tono uranium deposit, Japan, Abst. 2001 MRS Fall Meeting, Boston, Massachusetts, November 26-30, 2001, p.687.

御倉利明，東條文治，鎌滝孝信（2002）：下総層群地蔵堂層から産出した二枚貝化石の種組成・殻サイズ・成長速度の変化と期間について，日本古生物学会第151回例会講演予稿集，p.53.

Debski, K. (2001) . Tomographic imaging of thermally induced fractures in granite using Bayesian inversion, 地球惑星科学関連学会2001年合同大会予稿集，Sz-001.

Debski, K. and Ando, M. (2002) : Robust and accurate seismic location in noisy media, Abst. 2002 Japan - Taiwan Joint Seminar on Earthquake Mechanisms and Hazards, Nagoya, Japan, January 27-28, 2002.

Doughty, C. and Karasaki, K. (2001) . Evaluation of uncertainties due to hydrogeological modeling and groundwater flow analysis (2) - LBNL effective continuum model using TOUGH2, 地盤工学会「亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム」発表論文集，pp.259-268.

藤縄明浩，林信太郎，梅田浩司（2001）：安達太良火山のK-Ar年代・安達太良火山形成史の再検討．火山，46，pp.95-106.

藤田奈佳，村上裕記，長沼　毅，岩月輝希，笹　尾英嗣（2001）：東濃地域における地下水微生物相の分子系統学的解析，第18回しんかいシンポジウム予稿集，p.196.

藤原　治（2001）：新四紀構造結果の統合展望．小池一之・町田　洋編「日本の海成段丘アトラス」，東京大学出版会，pp.95-106.

藤原　治（2001）：高密度での^{14}C年代測定による完新世の地震イベント解析，第14回タンデム加速器およびその周辺技術の研究会報告書，サイクル機構技術資料，JNC TY7200 2001-001，pp.158-161.

藤原　治，鈴木孝信（2001）：いわゆる"混合群集"を利用した地層からのイベント解析－南関東の完新統の津波堆積物を例として，日本地質学会第109年学術大会講演要旨，p.125.

藤原　治，三原智二，大森博雄（2001）：日本列島における侵食速度の分布（CD-ROM版），サイクル機構技術資料，JNC TY7410 2001-015.

Hama, K., Satoman, K., Coombs, P., Hards, V.L., Milodowski, A.E., West, J.M., Wetton, P.D., Yoshida, H. and Aoki, K. (2001) : Influence of bacteria on rock water interaction, and clay mineral formation in subsurface granitic environments, Clay Min., 36, pp.599-610.

光木達美，鈴木　一，小谷節夫（2001）：東濃鉱山におけるモニタリングシステムについて，資源と素材，117，pp.351-355.

羽佐田葉子，笹澤純史（2001）：ブートストラップ法を用いた石合イベント解析の誤差評価，日本地震学会講演予稿集2001年度秋季大会，P101.

ハスバートル，安江健一，竹内　章（2001）：越後川断層中部で新たに確認された断層破砕とその意義，日本地質学会第108年学術大会講演要旨，p.270.

ハスバートル，安江健一，竹内　章，佃栄吉（2001）：越後川断層中部で新たに確認された断層破砕（速報），活断層研究，20，pp.46-51.

堀　治二，丸山　茂，鳥井原誠（2002）：土岐花崗岩体の力学物性評価のための室内試験，サイクル機構技術資料（委託業務報告書，株式会社大林組），JNC TJ7400 2001-016.

広城吉成，仲野誠二，佐伯和利，池見洋明，舌間悟，松岡俊明，岡村正紀，田部久也（2002）：環境同位体による低水化地下水の地球化学的考察，水工学論文集，46，pp.205-210

細田　宏，下山昌宏，永野修一，竹村聖吾（2002）：MIU-2 号孔における地下水水圧・水質観測装置の引上げ作業，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 TJ7410 2001-035.

舘野隆雄，前村昭之（2002）：不飽和領域の原位置試験計画手法の研究（平成 13 年度），サイクル機構技術資料（研究委託報告書，株式会社ダイヤコンサルタント），JNC TJ7400 2001-014.

市川康明（2002）：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 2001-017.

稲葉　薫，狩坂博之，三枝博光，藤永朋行（2001）：断層を含む大規模地表・地下水モデリングの試み，日本応用地質学会平成 13 年度研究発表会講演論文集，pp.339-342.

石丸恒存，藤原　治，鈴木崇英，中司　昇，三箇智二，小笠原宏（2001）：日本列島における地下地質情報（CD-ROM 版），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-010.

石丸恒存，角田地文（2002）：日本列島における大規模火砕流の特徴と熱的影響解析，サイクル機構技報，No.14（2002.3），pp.161-170.

伊藤久男，桑原保人，今西和俊，大口　勇，西上欽也，水野崇志，ハスバートル，竹内　哲（2001）：発破による浅部地下構造の探査：概要，日本地震学会講演予稿集 2001 年度秋季大会，P054.

伊藤　茂，徐　勇，阿部寿人，渡辺雅人，石井英和，岩月輝希（2001）：東濃地科学センターにおけるベリトロンの乳板，第 14 回タンデム加速器およびその周辺技術の研究会報告書，サイクル機構技術資料，JNC TN7200 2001-001，pp.51-54.

岩月輝希，鍋　克宏（2001）：東濃ウラン鉱床を対象としたナチュラルアナログ研究：地下水・鉱物データに基づく酸化還元フロントの解析，日本原子力学会 2001 年秋の大会予稿集，p.930.

Iwatsuki,T., Metcalfe,R., Amano,K., Rana,K., Artinger,R.C. and Sasamoto,H. (2001) : Data book on groundwater chemistry in the Tono area. JNC Tech. Rep., JNC TN7450 2001-003

岩月輝希，村上由紀，風早　毅（2001）：深部地下環境における微生物による CO2 ガス生成，地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会予稿集，A6-P003.

岩月輝希，松管　洋，吉田英一，鍋　克宏（2001）：方解石の結晶形・同位体に基づく地下深部の古水理地球化学的研究，地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会予稿集，A6-P003.

岩月輝希，徐　勇，伊藤　茂（2001）：岐阜県東濃地域における C-14 を用いた研究の現状，第 14 回タンデム加速器およびその周辺技術の研究会報告書，サイクル機構技術資料，JNC TN7200 2001-001，pp.108-111.

Iwatsuki,T., Xu,S., Mizutani,Y., Ihara,K., Sueoka,H. and Nakano,K. (2001) : Carbon-14 study of groundwater in the sedimentary rocks at the Tono study site, central Japan. Appl. Geochem., 16, pp.849-859.

角田地文，石丸恒存，松崎達二，鎌田浩毅，檀原　徹（2001）：日本列島における大規模火砕流の特徴と基盤岩への熱的影響解析，日本応用地質学会中部支部平成 13 年度研究発表会講演予稿集，pp.15-20.

核燃料サイクル開発機構（2001）：第 14 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告書，サイクル機構技術資料，JNC TN7200 2001-001.

核燃料サイクル開発機構（2001）：超深地層研究所3ヶ所の現状－平成 8 年度～平成 11 年度，サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2001-001.

核燃料サイクル開発機構（2001）：東濃鉱山における調査試験研究年度報告書（2000 年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2001-007.

核燃料サイクル開発機構（2001）：超深地層研究所計画年度報告書（平成 12 年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2001-011.

核燃料サイクル開発機構（2001）：広域地下水流動研究年度計画書（平成 11 年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-001.

核燃料サイクル開発機構（2001）：広域地下水流動研究年度計画書（平成 12 年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-002.

核燃料サイクル開発機構（2001）：超深地層研究所計画年度報告書（平成 11 年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-003.

核燃料サイクル開発機構（2001）：超深地層研究所計画年度計画書（平成 11 年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-004.

核燃料サイクル開発機構（2001）：東濃鉱山における調査試験研究年度計画書（平成 11 年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-005.

核燃料サイクル開発機構（2001）：東濃鉱山における調査試験研究年度報告書（平成12年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-006.

核燃料サイクル開発機構（2001）：広域地下水流動研究年度報告書（平成12年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-008.

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 2002-009.

核燃料サイクル開発機構（2001）：東濃鉱山における調査試験研究年度計画書（2001年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-010.

核燃料サイクル開発機構（2001）：平成13年度地層科学研究情報・意見交換会一要旨集，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-011.

核燃料サイクル開発機構（2001）：広域地下水流動研究年度計画書（平成13年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-012.

核燃料サイクル開発機構（2001）：超深地層研究所計画年度計画書（平成13年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-013.

核燃料サイクル開発機構（2001）：地質環境の長期安定性に関する研究年度計画書（平成13年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-014.

核燃料サイクル開発機構（2001）：広域地下水流動研究年度報告書（平成12年度），サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-017.

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(2002)：超深地層研究所計画年度計画書(平成13年度改定版)，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-019.

鎌滝孝信，藤原　治（2001）：急速埋没イベントをめぐる具体化の一例：千葉県鴨山市に分布する完新統の例，日本第四紀学会2001年大会講演要旨集，pp. 20-21.

鎌滝孝信，藤原　治（2001）：房総半島九十九里浜の完新統における前弧－外弧環境をめぐる具体化事例，日本地質学会第108年学術大会講演要旨，p. 125.

鎌滝孝信，藤原　治（2001）：地層に高確度で放射性炭素年代値を入れる意義：房総半島における研究例から，第14回タンデム加速器およびその周辺技術の研究会報告書，サイクル機構技術資料，JNC TX7206 2001-001，pp. 118-121.

鎌滝孝信，藤原　治（2002）：九十九里浜平野地下に分布する完新統の発達過程，日本古生物学会第151回例会講演予稿集，p. 52.

神谷俊治，狩野公明，世日　高（2001）：平成13年度正馬川モデル流域河川流量計の拡充，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；株式会社三祐），JNC TJ7440 2001-031.

菊地直樹，近藤康生，鎌滝孝信（2001）：天草下島半渡沖で海域にうち上げられた絶滅種トウキョウホタテを含む貝類遺骸群（予報），日本古生物学会2001年年会講演要旨集，p. 189.

小出　馨（2001）：衛星データによる地すべり地の規模及び活動性の推定，日本応用地質学会平成13年度研究発表会講演論文集，pp. 183-186.

小出　馨，前田勝彦（2001）：凝灰地域を対象とした広域地下水流動研究の現状（その2），サイクル機構技報，No. 12（2001. 9），pp. 107-122.

小出　馨，杉原弘造，長谷川健，武田博規（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.

小松　元，福田大輔，浅沼曽弘，石丸恒存，座間有司（2001）：紀伊半島における温泉ガスのヘリウム同位体比分布，日本火山学会講演予稿集2001年度秋季大会，p. 162

近藤康生，鎌滝孝信（2001）：房総第四系の二枚貝類を中心とする底棲生物群集の再評価，特に貧化石層に含まれる低多様度の前兆について，第四紀研究，40，pp. 259-265.

熊崎由樹，水野　崇，前田勝彦，竹内貴司，中野勝志，グレン・マックランク，天野健治（2001）：透水性割れ目を同定・分類する地質学的手法の開発－［その3　地球物理学的手法（物理検層）を用いた試み］，日本地質学会第108年学術大会講演要旨，p. 173.

竪丸幸洋，塚澤伸元（2001）：回転型ACROSS震源装置の新制御システム，日本地震学会講演予稿集2001年度秋季大会，P100.

倉本真一，中尾征二，湯浅真人，村上文敏，長谷川功，中司　昇，高木俊夫，雷　興林（2001）：「日本周辺海域音波探査データベース（CD-ROM版）」，［編集・発行　地質調査所］.

前田勝彦，熊崎由樹，水野　崇，清　克宏，中野勝志，リチャード・メトカーフ，天野健治（2001）：透水性割れ目を同

定・分析する地質学的手法の開発－（その２）鉱物学的・地球化学手法を用いた試み－．日本地質学会第 108 年学術大会講演要旨，p. 172.

Manada, Y., Kuwahara, Y., Ito, H. and Takenaka, H. (2001) : 3-D finite-difference simulation of fault zone trapped waves - Application to the fault zone structure of the Mozumi-Sukenobu Fault, central Japan. 2001 Fall Meeting, Eos, Trans. Amer. Geophys. Union, 82, F886, S410-0589, American Geophysical Union.

植田　豊，桑原保人，伊藤久男，竹村恵二（2001）：３次元差分法による断層トラップ波のシミュレーション－淡路島東部への適用．日本地球惑星科学合同大会講演予稿集 2001 年度秋季大会，C49.

Martin, A. J., Takahashi, M. and Amano, K. (2001) : West to east shift of the locus of magmatism of small monogenetic volcanoes in the first collided oceanic arc segment, south Fossa Magna. 日本地質学会第 108 年学術大会講演要旨，p. 49.

増田富士雄，藤原　治，酒井哲弥，安斉　忠（2001）：房総半島九十九里浜中部の海浜堆積物から求めた過去 6000 年間の相対的海水準変動と地震隆起．地学雑誌，110，pp. 650-664.

増田富士雄，藤原　治，酒井哲弥，安斉　忠，羽佐　学，鎌塚幸信（2001）：千葉県九十九里浜中部の完新統の発達過程，第四紀研究，40，pp. 223-233.

杉井俊廣，大西有二，大湊宏成，西山　登，矢野隆夫（2002）：地下空洞の変位計測へのデジタル画像計測法の応用，第 31 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集 CD-ROM，B05.

宝蘭邦　正，梅田浩司，石丸和彦，湯佐泰久，檀原　徹（2001）：岩石の年代測定による基盤上昇速度推定の試み，日本応用地質学会平成 13 年度研究発表会講演論文集，pp. 205-206

McCrank, G. F., Amano, K., Knide, K., Matsui, H., Mikake, S., Nakano, K., Ota, K., Saegusa, H., Sugihara, K., Takeda, S. and Takeuchi, S. (2001) : Mizunami Underground Research Laboratory in Japan - Pre-excavation site characterization and influence on design concepts. Proc. 8th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation (ICEM'01), Brugge, Belgium, September 30-October 3, 2001, CD ROM, American Society of Mechanical Engineers.

McCrank, G. F., Amano, K., Nakano, K., Takeuchi, S., Iwa, E., Osawa, H. and Sugihara, K. (2001) : The Mizunami Underground Research Laboratory : Geotechnical and science challenges. 日本地質学会第 108 年学術大会講演要旨，p. 304.

McCrank, G. F. D., Sugiharu, K., Ota, K., Mikake, S., Amano, T., Koide, K. and Takeda, S. (2001) : The MIU Research Laboratory, Japan - Geoscience activities during construction and operation. Proc. 9th International High-level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM), Las Vegas, USA, April 29-May 3, 2001, CD ROM, American Nuclear Society.

McKenna, S. A., Eliassi, M., Iwaba, K. and Saegusa, H. (2001) : Evaluation of uncertainties due to hydrogeological modeling and groundwater flow analysis (Part 5) - Groundwater flow modeling focused on complexity in the interpreted fault network using FOR-SALSA. 地盤工学会「亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム」発表論文集，pp. 289-296.

Metcalfe, R. (2001) : Geochemical approaches to evaluate groundwater flow system stability : Implications of research at Sellafield, UK and Äspö, Sweden. 地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会予稿集，A0-005.

Metcalfe, R. (2001) : Some implications for site characterisation to Horonobe from experience at Sellafield, U.K. and Äspo, Sweden : Constraining groundwater flow models using hydrogeochemistry. 日本原子力学会 2001 年秋の大会予稿集，p. 経 9

Metcalfe, R., Amano, K., Iwa, K., Iwatsuki, T., Saegusa, H., Arthur, R. C. and Pearson, F. J. (2001) : Groundwater geochemistry in the Toki granite - New approaches for understanding a groundwater flow system using groundwater geochemistry (a case study of the Toki granite). 日本地質学会第 108 年学術大会講演要旨，p. 174.

Metcalfe, R., Kunimaru, T., Iwa, K., Amano, K. and Iwatsuki, T. (2001) : Water-rock interaction around the fault : Implications for waste disposal. Proc. 10th International Symposium on Water-Rock Interaction (WRI-10), Villasimus, Italy, 10-15 July 2001, vol. 2, pp. 1343-1346, A. A. Balkema, The Netherlands.

水野　崇（2001）：DH-12 号試錐調査ならびに調査研究結果速報，サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2001-009.

水野　崇（2001）：DH-13 号試錐調査ならびに調査研究結果速報，サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2001-010.

水野　崇，舟崎淳郎，前田勝彦，中野勝志，グレン・マックファク，天野健治（2001）：透水性亀裂頻度を測定・分類する地質学的手法の開発－（その１）：構造地質学的手法を用いた試み，日本地質学会第 108 年学術大会講演要旨，p. 173.

水田義明（2002）：３次元応力場の測定手法に関する研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書：社団法人資源・素

核学会), JNC TJ7400 2001-012.

Möri, A., Geckeis, H., Missana, T., Guimera, J., Degueldre, C., Meyer, P., Ota, K., Tanaguth, H., Alexander, W.R. and Herman, P. (2001) : The Colloid and Radionuclide Retardation Experiment (CRR) at the Grimsel Test Site - First evidences for the colloid-mediated radionuclide transport in a granitic fracture. Abst. 8th International Conference on Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere (Migration '01) Bregenz, Austria, 16-21 September 2001, p. 117.

森田　昇，瀬辺邦夫 (2001)：水理地質構造モデル化概念の違いによる深部地下水流動への影響評価（その4）－人工源の地下水流動と物質移動に与える影響に着目したフラクチャ・ネットワーク解析，地盤工学会「亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム」発表論文集，pp. 279-288.

中島崇裕，國友孝洋，熊澤峰夫，横山由紀子，茂田直孝 (2001)：東濃地震アクロスシステムを用いた連続波探査実験，地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会予稿集，Eq P011.

中野勝志，大澤英昭 (2001)：超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階の現状，サイクル機構技報，No.12(2001.9)，pp.91-100.

中田耕治，徳永朋祥，浅井和泉，三枝博光 (2001)：沿岸海底からの淡水性湧水の探査－黒部川扇状地沖合での例，月刊地球，23，pp.857-862

中田耕治，徳永朋祥，浅井和泉，渡辺正晴，長沢勝郎，三枝博光 (2001)：海底からの淡水性湧水分布のマッピング－黒部川扇状地沖合での検討，日本応用地質学会平成13年度研究発表会講演論文集，pp.343-346.

中山芳朗，竹友浩典 (2002)：AI 孔を用いた水位観測調査業務（AI 孔水位計設置（その2）），サイクル機構技術資料（契約業務報告書；株式会社日本パブリック），JNC TJ7440 2001-034.

西垣　誠，南部邸也，竹内竜史，竹内真司 (2001)：クロスホール試験の解析法の開発に関する研究，サイクル機構技術資料，JNC TY7400 2001-002.

野原　壮，田中秀実，瀬辺邦夫，内山　晃，森見　明 (2001)：幾春別断層新第三紀堆積岩の水理地質学的特徴，地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会予稿集，Sm-007.

大久保誠介 (2002)：長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による系統的研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；東京大学），JNC TJ7400 2001-010.

Onishi C.T. and Shimizu, I. (2001) : Characterization of pore structure of crystalline rock affected by a basement fault using laser scanning confocal microscope technique, Tono area, Japan. Abst. Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics, Noordwijkerhout, Netherlands, 2-4 April 2001, p.125.

大西セリア智恵美，湯水欧知子，上原森一，満仁一生，岩本利彦 (2001)：断層近傍の花崗岩の間隙構造と浸透率・下線，地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会予稿集，J9-P002.

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，Alexander, W.R. (2001)：珪質岩石を対象とした放射性核種の移行・遅延モデルの構築と妥当性評価－Nagra/JNC 核種移行試験研究の概要，サイクル機構技報，No.11(2001.6)，pp.119-126.

Ota, K., Alexander, W.R., Smith, P.A., Möri, A., Frieg, B., Frick, U., Uneki, H., Amano, K., Cowper, M.M. and Berry, J.A. (2001) : Building confidence in radionuclide transport models for fractured rock: The Nagra/JNC Radionuclide Retardation Programme. Sci. Basis Nucl. Waste Manag. XXIV, pp.1039-1041.

Ota, K., Möri, A., Schild, M. and Alexander, W.R. (2001) : Influence of the mode of matrix porosity determination on matrix calculations. Abst. 8th International Conference on Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere (Migration'01), Bregenz, Austria, 16-21 September 2001, p.87.

三枝博光，前田勝彦，福島　徹 (2001)：水理地質構造モデル化概念の違いによる深部地下水流動への影響評価（その6）－不連続構造の水理特性及び水理学的境界条件に着目した水理地質構造のモデル化及び地下水流動解析，地盤工学会「亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム」発表論文集，pp.299-308.

坂井章浩，田口　聡，鈴木　一 (2001)：微生物条件下における東濃亀山の鉱物溶解解析，資源素材学会 2001 年春季大会講演集(1)資源編，pp.95-96

榊　利博，Rajaram, H.，松井裕哲，佐藤　努 (2002)：亀裂性堆積岩の不飽和領域における水分移動，月刊地球号外，36，pp.68-73.

酒見　泰，前田勝彦，須　克彦，大野健治，清水　洋 (2001)：地下深部の花崗岩のガラス－岩石反応に伴う希土類元素の挙動，日本地球化学会 2001 年会，p.11.

笹見英嗣，笠原初穂 (2001)：第14回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会，サイクル機構技報，No.12(2001.9)，

pp. 145-150.

稲本義一 (2002)：深部地質環境の調査・解析技術の体系化に関する研究（その2），サイクル機構技術資料（研究委託報告書；社団法人システム総合研究所），JNC TJ7400 2001-011.

瀬戸政宏，知見康弘，前田信行，安井裕哉，Villaescusa,E.，藤田朗久 (2001)：AE法とDRAによる地下応力測定試験方法とケーススタディ，資源と素材，117，pp. 829-835.

船山 純，高倉 栄，落 克志，小島圭二，山田 稔 (2001)：地下水中の陽原同位体から見た西濃水脈の地下水挙動，日本地下水学会 2001 年秋季講演会要旨集，p. 20.

清水以知子，大西セリア智恵美，渡辺一生，上原再一，鶴木利彦 (2001)：断層近傍の花崗岩の浸透率と割隙構造，日本地質学会第108年学術大会講演要旨，p. 91.

Shimo,M., Nishijima,N. and Funimura,K. (2001) : Evaluation of uncertainty due to hydrogeological modeling and groundwater flow analysis (3) - Tsinet Equivalent Heterogeneous Continuum Model using EQUIV_FLO, 地盤工学会「亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム」発表論文集，pp. 269-278.

下山晃宏 (2001)：平成13年度堆積地下水流水理研究測位調査，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 2001 010.

世十喜英，狩野裕之，竹内真司，竹内竜史 (2001)：井戸貯留の影響までの回復試験の実施と解析方法に関する一考察－揚水／回復過程で井戸特性を変更する場合，第36回地盤工学研究発表会，pp. 1243-1244.

Stenhouse,M.J., Arthur,R.C., Iwatsuki,T., Ota,K. and Takase,H (2001) : Application of systems analysis to a natural analogue project. Abst. 2001 MRS Fall Meeting, Boston, Massachusetts, November 26-30, 2001, p. 688.

鈴木毅彦，Eden,D.，檀原 徹，藤原 治 (2001)：東北日本最大の大規模火砕流にともなう中期更新世広域テフラ－八甲田－鷹ノ巣テフラ，日本第四紀学会 2001 年大会講演要旨集，pp. 8-9

鈴木毅彦，Eden,D.，檀原 徹，藤原 治 (2001)：東北日本の大規模火砕流は広域テフラを生成したか？，月刊地球，23，pp. 610-613.

谷本大輔，長須 健，松下由記，渡辺史子，天野健治，岩川和希，落 克志 (2001)：酸素分析による東濃地域の深部地下微生物相の推定，第18回しんかいシンポジウム予稿集，pp. 194-195.

鈴木明洋，渡井和泉，中田晋治，谷口真人，岩田 純，千枝博光 (2001)：沿岸海底下での地下水採取技術の開発とその適用－黒部川扇状地沖合での例，地下水学会誌，43，pp. 279-297.

鈴山英一，本間栄一，大村政昭，倉本真一，戸苅一郎，岡村行信，荒戸裕之，伊藤康人，徐 垣，日野亮太，野原 壮，阿部恵信，坂井眞一，向山建二郎 (2001)：日本島辺海域中新世最末期以降の構造発達史，海洋調査技術，13，pp. 27-53.

鳥井原誠，Juli 誠，湯 浅二，鈴木健一郎 (2002)：応力集中による破壊現象のモデル化に関する研究（その1），サイクル機構技術資料（研究委託報告書；株式会社大林組） JNC TJ7400 2001-013.

鶴我佳代子，國友孝洋，及川真司，羽生田薫子，熊澤峰夫，山岡耕春 (2001)：可搬型アクロス震源による地下構造探査手法の開発－第一報，地球惑星科学関連学会 2001 年合同大会予稿集，Su P003.

West, J. M., Hama, K., Bateman, K., Coombs, P., Hards, V., Milodowski, A. E., Wetton, P. and Yoshida, H. (2000) : Laboratory examination of microbial perturbations in a granitic environment. Sci. Basis Nucl. Waste Manag. XXIV, pp. 657-664.

湯 浅，星住英夫，落合洋治，青木治三，宇都浩三 (2001)：新潟雲仙火山の加速器放射性炭素年代，第48回日本地球化学会年会講演要旨集，pp. 150.

湯 浅，星住英夫，落合洋治，青木治三，宇都浩三 (2001)：雲仙火山科学掘削コア試料の AMS14C 年代，第14回タンデム加速器およびその周辺技術の研究会報告書，サイクル機構技術資料，JNC TN7200 2001-001，pp. 130-134.

山田稔司，福井久美子，床次眞司，寺田宏和，花本進美 (2001)：GSA 法によるウラン子孫核種の核種分析測定，日本原子力学会 2001 秋の大会予稿集，p. 6.

山口正秋，須貝俊彦，大森博人，檀原 徹，鎌倉孝信，杉山雄一 (2002)：濃尾平野における完新統の堆積速度とその時間変化，日本地理学会発表要旨集，61，p. 196.

山口正秋，須貝俊彦，太田 陽，大森博雄，杉山雄一，檀原 徹 (2001)：ボーリング・コアの総合解析にもとづく濃尾平野の堆積環境の推定，日本地理学会 2001 年度秋季学術大会講演要旨集，p. 90.

山口卓敏，小嶋 智，矢入敬子，中尾 隆，中野勝志 (2001)：美濃帯メランジュの頁岩基質の透水性－ボーリングコアを用いた室内透水試験，日本応用地質学会中部支部平成13年度支部研究発表会予稿集，pp. 1-4.

山本幸也 (2002)：放射性廃棄物処分施設建設時の地下水流動解析，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 TJ7400 2001-015.

横尾 誠，檀原 徹，佐々木俊法，三箇智二 (2001)：日本の地形分布図－地形・地質との関連，日本応用地質学

会中部支部平成13年度支部研究発表会講予稿集，pp. 11-14.

相田　誠，佐々木俊法，藤原　治（2001）：起伏比と谷密度による山地と丘陵との区分，地球惑星科学関連学会2001年合同大会予稿集，Gh-P009.

梅田康久（2001）：自然から学ぶ放射性廃棄物処分の智恵－地質学の役割，日本地質学会発行「明日を拓く地質学－現場に応える地質学へ」，pp. 82-112.

周　啓友，松井格哉，嶋田　純，佐藤　朗（2001）：地面配置電極による地下水水位変動を検知する比抵抗映像法の有効性，日本水文学会学術大会発表要旨集15，pp. 19-21.

Zhou, Q. Y., Matsui, K. and Shimada, J. (2002) : Characterization of unsaturated zone near around cavity in fractured rocks by using electrical resistivity tomography. Proc. Bridging the Gap between Measurement and Modeling in Heterogeneous Media. Berkeley, California, March 25-28, 2002, pp. 179-183.

Zhou, Q. Y., Matsui, H., Shimada, J. and Sato, A. (2002) : Applications of electrical resistivity tomography in mapping rock dispersivity and monitoring water flow in heterogeneous media. Proc. Bridging the Gap between Measurement and Modeling in Heterogeneous Media, Berkeley, California, March 25-28, 2002. pp. 173-178.

【幌延深地層研究センター】

〔平成 12 年度〕

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（2001）：深地層研究所（仮称）計画平成12年度調査研究計画，サイクル機構技術資料，JNC TN1410 2001-002.

島田耕史，真田　悟，安部誠一，笹池一男，大釜　宏(2001)：堆積岩地域における試錐掘削に関する調査・試験（その２），サイクル機構技術資料（契約業務報告書；帝石削井㈱），JNC TJ1440 2001-001.

杉原　豊(2001)：堆積岩を対象とした深地層の研究施設工程および安全に関する研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書，大成建設㈱），JNC TJ1400 2001-002(1).

澤田圭司，吉田　孝，塚　哲群，石川　誠(2001)：岩盤物性均一化装置の特性評価研究，サイクル機構技術資料（契約業務報告書，㈱サンソフトサイエンス），JNC TJ1400 2001-012.

〔平成 13 年度〕

青木治三(2001)：地質環境の長期安定性に関する調査報告書，サイクル機構技術資料（契約業務報告書，(財)地震予知総合研究振興会），（印刷中）

阿波野敏浩，坂井　彰，香野　毅，神宮　敏(2001)：人工バリア遠隔搬送定置装置開発に向けた技術調査，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；石川島播磨重工業㈱），（準備中）

東　宏志，五十嵐　亨，池田和彦，今村移文，大島雅治（2001）：ヘリコプターを用いた空中物理探査，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；応用地質㈱），JNC TJ1420 2001-035.

瓜田政国，柳家光男(2001)　堆積岩における長期水圧観測及び揚水手法の概念検討，サイクル機構技術資料（研究委託報告書，清水建設㈱），JNC TJ1410 2001-003.

今井久，前田信行，千々松正和，西宮清，塩崎功(2001)：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（研究委託報告書；御開組），（準備中）

今村遵平，村松尚則，小田川信也(2001)：深地層研究所（仮称）計画における表層水理観測計画の策定，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；アジア航測㈱），JNC TJ1401 2001-001.

今井　久，山下　亮，由宮　清，塩崎　功(2001)：堆積岩における広域地下水流動解析手法に関する検討，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；御開組），JNC TJ1410 2001-002.

入矢桂史郎，三上哲司，保岡宏治，上垣亀明(2001)：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，サイクル機構技術資料（研究委託報告書，鹿島建設㈱），JNC TJ1400 2001-004.

入矢桂史郎，三上哲司，秋好宏治，上垣亀明(2002)：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(II)，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；鹿島建設㈱），（準備中）

窪田　茂(2002)，幌延深地層研究計画地下施設建設技術に関する研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；大成建設㈱），JNC TJ1400 2001-005.

津木宗丸，高山純一，横井浩一（2001）：電磁法による地上物理探査，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；H応用開発㈱），JNC TJ1420 2001-036.

核燃料サイクル開発機構（2001）：幌延深地層研究計画　平成13年度調査研究計画，サイクル機構技術資料，JNC TN1410 2001-003.

核燃料サイクル開発機構（2001）：幌延深地層研究計画　平成12年度調査研究成果報告，サイクル機構技術資料，JNC TN1410 2001-006.

二階都二(2002)，SARデータを用いた地殻変動量調査，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；H応用開発㈱），（準備中）

中村　健，濱口真伸，岩松尚則，陰矢　自(2002)：深地層研究所（仮称）計画に係わる現地調査，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；アジア航測㈱），JNC TJ1420 2001-043.

中林宏典，佐藤隆光，松岡直規，松尾　清，中野洋一(2002)．幌延深地層研究計画における表層水理地質調査，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；(財)日本気象協会），JNC TJ1410 2001-005.

尾方伸久，我位尚則，小田川信哉 (2001)．海成地の堆積岩分布域における岩盤被透水の観測手法，日本応用地質学会平成13年度研究発表会，pp.159-162

澤田昭彦，奥池司郎(2001)：幌延町内における地質調査，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；㈱サンコーコンサルタント），JNC TJ1420 2001-037.

鈴木治雄，如　沛二，山田　弘(2001)：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，サイクル機構技術資料（研究委託報告書，鋼管計測㈱），(準備中)

鈴木治雄，如　沛二，倉田　透，山田　弘(2002)：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（研究委託報告書，鋼管計測㈱），(印刷中)

鳥巣政樹(2002)：幌延深地層研究計画地上施設概念検討，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；㈱日建設計），JNC TJ1410 2001-004.

山田　守，中西敏隆，戸高法文，赤坂千寿，長野延夫，新井　隆，百嶋　顕，杉山弘泰，五月女　敬(2002)：幌延深地層研究計画における地質環境モデルの構築・統合化手法の検討，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；電源開発㈱），JNC TJ1400 2001-008.

山本卓也(2002)．幌延深地層研究センターにおける試錐調査(HDB-1,2孔)，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；大成建設㈱），(準備中)

山崎第一 (2001)．放射性廃棄物の地層処分と幌延深地層研究所（仮称）計画，エネルギーレビューNo.213，pp.17-21.

山崎第一 (2001)．幌延深地層研究計画の概要，日本原子力学会バックエンド部会主催第17回夏期セミナー資料集，2001年8月.

山崎第一 (2001)：幌延深地層研究計画概要，日本原子力学会「2001年秋の大会」要旨集，p.5.

【東海事業所処分研究部】

【平成 12 年度】

Altman, S.J., Tidwell, V.C. and Uchida, M. (2000) : Visualization and quantification of heterogeneous diffusion rates in granodiorite samples by X-ray absorption imaging - Diffusion within gouge materials, altered rim and intact rock matrix, First TRUE Stage - Transport of solutes in an interpreted single fracture. SKB Technical Report 01-24, pp.31-48.

Altman, S.J., Uchida, M. and Tidwell, V.C. (2000) : Visualization and quantification of heterogeneous diffusion rates in granodiorite samples by X-ray absorption imaging, H31A-08, Proc. 2000 Western Pacific Geophysics Meeting, June 27-30, 2000 Tokyo, Japan.

Detalvelis, R., Doe, T., Fox, A., Uchida, M. and Cvetkovic, V. (2000) : Learning from recovery: Thoughts on Feature A transport experiments. First TRUE Stage - Transport of solutes in an interpreted single fracture, SKB Technical Report 01-24, pp 51-70

千々松正和，間宮　剛，山下　亮 (2001)：人工バリアにおける緩衝材等動評価研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；株式会社間組），JNC TJ8400 2001-020.

Chijimatsu, M., Fujita, T., Kobayashi, A. and Nakano, M. (2000) : Experiment and validation of numerical simulation of coupled thermal, hydraulic and mechanical behaviour in the engineered buffer materials, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.24, pp.403-424.

千々松正和，藤田朝雄，小林　晃，大西有三，中野政詩 (2000)：高レベル放射性廃棄物の地層処分における熱・水・応力連成モデルの開発および検証解析，計算工学講演会論文集 Vol.5, pp.681-684.

Chijimatsu, M., Fujita, T., Sugita, Y., Amemiya, K. and Kobayashi, A. (2000) : In situ coupled thermo-hydro-mechanical experiment at Kamaishi mine, GeoEng 2000, p.280.

千々松正和，杉田　裕，藤田朝雄，間宮　剛，小林　晃，大西有三 (2000)：原位置試験場における熱・水・応力連成試験結果および解析評価，土木学会論文集，No.652/III-51，pp.125-139.

千々松正和，谷口　航，藤田朝雄 (2000)：２次元簡易モデルを用いた緩衝材の再冠水時間の評価，第 35 回地盤工学研究発表会，pp.1503-1504.

千々松正和，谷口　航，藤田朝雄 (2000)：第２次とりまとめにおける地層処分の工学技術的検討（その３）－再冠水時の人工バリア挙動評価－，土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集，共通セッション CS-176.

鹿島　敦，久保田満，金善永，横本一昭，集田明博，佐藤　努 (2000)：酸化環境条件下で鉄と接触していたベントナイトの特性評価，第 44 回粘土科学討論会講演要旨集，pp.68-69.

鹿島　敦，鈴木　功，上野健一，鵜　吉男，渡谷朝紀 (2000)：EXAFS 解析によるモンモリロナイトに対する Sm の吸着構造の検討，日本原子力学会 2000 年秋の大会要旨集，p.690.

鹿島　敦，上野健一，佐々木康雄，能登屋信，加藤智子，国部　志，岡田常夫，盛神正徳，五十嵐直 (2001)：地層処分研究開発に関する情報資及素材（データ集・記録集），サイクル機構技術資料，JNC TN8450 2001-003

Fujita, T., Suzuki, H., Sugita, Y., Sugino, H. and Nakano, M. (2001) : Hydraulic properties of compacted bentonite under unsaturated condition, Clay Science for Engineering, pp.229-238

藤田朝雄，集田雅博 (2000)：高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材の物理的特性，スメクタイト研究会会報，Vol.10, No.1, pp.3-14.

藤田朝雄，谷口　航，杉野弘幸，長谷川安，村松健吾 (2000)：第２次とりまとめにおける地層処分の工学技術的検討（その１）－設計の基本的考え方と前提条件及び人工バリア仕様例－，土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集，共通セッション CS-176

井尻裕二，安達智也，鈴木俊一，大石雅也，杉原　學 (2001)：境界逆解析プログラムの作成，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 TJ8440 2001-002.

井尻裕二，澤田　淳，山田卓之，大西有二，大津宏康，土山富広 (2000)：亀裂のトレース長分布とそのモデル化に関する考察，第 35 回地盤工学研究発表会講演集，pp.63-64.

井尻裕二，服部弘通，鈴木俊一，大石雅也，徳田　光，安達哲也，山本卓也，五十嵐孝文，杉原　學 (2001)：地質環境の不確実性評価技術の基礎研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；大成建設株式会社），JNC TJ8400 2001-010.

今村雅弘，千々松正和，杉田　裕，茅池広人，村田雅彦，間宮　剛，斉藤敏明 (2001)：高レベル放射性廃棄物の地層処

分におけるベントナイト緩衝材緩衝材の力学および透水性，土木学会論文集，No.673/III-54，pp.61-70.

井上博之，藤田朝雄，大久保誠介（2001）：軟質泥岩中の長期変形特性の把握に関する一考察，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，共通セッション CS-167.

石黒勝彦，笹尾英嗣，佐川 寛，阿原慧一，戸田知一，藤原芳紀，宇井晋介，上野 勇，辻本恵一，大橋弘忠（2001）：地層処分統合解析システムの基本設計に関する研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；三菱重工業株式会社，三菱マテリアル株式会社），JNC TJ8400 2001-011(1)

Kamei, G., and Chaoro, H. (2000) : Mechanisms of pyrite oxidation inferred from direct measurements of DO, Eh and pH of experimental solutions in a closed system, Geochimica Cosmochimica Acta, 64, 15, pp.2585-2601.

Kamei, G., Yusa, Y. and Arai, T. (2000) : A natural analogue of radioactive waste glass in a compacted bentonite, Applied Geochemistry, 15, pp.141-155.

Kobayashi, A., Fujii, K., Fujita, T. and Chijimatsu, M. (2000) : Experimental and thermodynamic examination on buffer material, Clay Science for Engineering, pp.585-592.

Kanno, T., Iwata, Y. and Sugita, H. (2000) : Modelling of bentonite swelling as solid particle diffusion, Clay Science for Engineering, pp.561-570.

片岡伸一，阿原慧一，佐木健一，石原義尚，根田敬史，中田博一，吉田 浩，森 康二（2001）：地震解析に係わる基盤情報調査研究 －成果報告書－，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；三菱重工業株式会社），JNC TJ8400 2001-036.

加藤博康，岡田賢一，上田真二，柴田雅博，油井三和（2000）：ヘリウムの溶解度へ及ぼすアミン酸および錯体の影響，日本原子力学会 2000年秋の大会要旨集，p.706.

加藤智子，石原義尚，鈴木祐二，内藤守正，石黒勝彦（2001）：感度解析による地層処分安全評価生物圏モデルのパラメータの不確実性に関する検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-014.

加藤智子，石原義尚，鈴木祐二，内藤守正，石黒勝彦，池田孝夫，Little, R.（2001）：気候変動による影響を取り入れた地層処分安全評価の生物圏モデルの検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-003.

加藤智子，鈴木祐二，石黒勝彦，内藤守正，池田孝夫，Little, R.（2001）：海底を接種放出口とする地層処分生物圏評価の代替モデルに関する検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-013.

Kitamura, A. and Kohara, Y. (2001) : Solubility of Np (IV) under Carbonate Conditions, JNC Technical Report, JNC TN8400 2001-006.

北村 暁，岡崎充宏（2001）：分光光度計および光音響分光装置を用いたネオジム(III)およびサマリウム(III)の測定 Np (IV) スペシエーションのための予備的検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-009.

北村 暁，岡崎充宏，鹿島和敏（2001）：レーザー誘起光音響分光法によるネオジムの測定 ネプツニウム(IV)溶存化学種のスペシエーションのための予備的検討，日本原子力学会 2001年春の年会要旨集，p.555.

Kobayashi, A., Fujii, K., Chijimatsu, M. and Fujita, T. (2001) : Experimental and thermodynamic examination on buffer material, Clay Science for Engineering, JS-Shizuoka, pp.565-592.

Kobayashi, A., Hosono, K., Fujita, T. and Chijimatsu, M. (2000) : Coupled hydraulic and mechanical model with nonlinear elasticity of fractured rock mass, Geoeng 2000, p.255.

坂本雅徳，谷口 航（2000）：第2次とりまとめにおける地層処分の工学技術的検討（その2） 地下空洞の力学的安定性評価 ，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，共通セッション CS-177.

里嶋 進，林 賢一，加藤博康，上田真三，久野義夫，油井三和（2000）：ベントナイトコロイドに吸着されたSrの岩石亀裂中の移行，日本原子力学会 2000年秋の大会要旨集，p.696.

斗元一泰，原啓二，杉田 裕，藤田朝雄，吉田光昭（2001）：カナダ地下実験施設（URL）における閉鎖技術の検証試験－実規模プラグにおけるトレーサー注入試験－，土木学会第56回年次学術講演会講演概要集，共通セッション CS-184.

森山裕丈（2001）：超ウラン元素の溶解度に関する研究III，サイクル機構技術資料（研究委託報告書，京都大学），JNC TJ8400 2001-015.

Morivama, H., Yamana, H., Fujikawa, K. and Kawamura, A. (2001) : Chemical Analogy in the Case of Hydrolysis Species of f-Elements, Proceedings of "Evaluation of Speciation Technology", October 1999, Tokai-mura, Ibaraki, Japan.

森 康二，根山敬史，谷口 航，高治一彦，杉野弘幸，前子栄治（2000）：第2次とりまとめにおける地層処分の工学技術的検討（その5）－有機物安定性評価における解析コードの開発と適用性の検討－，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，共通セッション CS-180.

尾崎善也，巳差 哉，加藤博康，川田 守正，小崎 完，佐藤治夫，中田正，真木紀彦，山口徹治（2001）：地層処分のための水・鉱物表面における表面拡散（2）研究の必要性と課題，日本原子力学会 2001年春の年会要旨集，p.628.

Ochs, M., Lothenbach, B., Wanner, H., Sato, H. and Yui, M. (2001) : An Integrated Sorption-Diffusion Model for

the Calculation of Consistent Diffusion and Distribution Coefficients in Compacted Bentonite, Journal of Contaminant Hydrology 47, pp.283-296.

大藤弘一，佐藤正知，小崎　完（2001）：緩衝材中の核種移行挙動に対する粘土の幾何学的微細構造の影響に関する研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書，北海道大学），JNC TJ8400 2001-005.

大久保博生（2001）：地層処分の性能評価手法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；株式会社　建設技術研究所），JNC TJ8400 2001-007.

大津宏康，藤山　悟，土山宏二，中井克太郎，澤田　淳，山田卓之，坂本和彦，内田雅大（2001）：我が国の岩盤における地震特性とそのモデル化に関する研究，サイクル機構（共同研究報告書，京都大学），JNC TY8400 2001-004.

佐伯和則，和田信一郎，柴田雅博，神野健二（2000）：粘土鉱物における2価鉄イオンの関与するイオン交換平衡の選択係数測定，第44回粘土科学討論会講演要旨集，pp.224-225.

Sasamoto, H., Yui, M. and Arthur, R.C. (2001): Modelling Studies of Saline Type Groundwater Evolution -A Test Case for the Mobara Groundwater Chemistry, Japan-, JNC Technical Report, JNC TN8400 2001-016.

Sato, H. (2000): Effect of Ionic Charge on Effective Diffusion Coefficients in Compacted Sodium Bentonite, MRS Symposium Proceedings Vol.608, pp.267-274

Sato, H., Kitamura, A. and Suzuki, S. (2001): JAGRA-JNC GAMLIEV and Migration Workshop, JNC Technical Report, JNC TN8200 2001-002

Sato, H. and Miyamoto, S. (2001): A Study on Diffusion and Migration of Lead in Compacted Bentonite -The Effects of Dry Density, Silica Sand Content and Temperature on Diffusion and Migration of Pb-210 in Sodium Bentonite-, JNC Technical Report, JNC TN8400 2001-019

佐藤治夫（2001）：中・軟岩拡散媒体に対する透過拡散実験シミュレーション及び解析プログラム，サイクル機構技術資料，JNC TN8410 2001-003.

佐藤治夫，宮本真哉（2000）：圧縮ベントナイト中のPbの拡散挙動に関する研究，日本原子力学会2000年秋の大会要旨集，p.689.

佐藤治夫，宮本真哉（2001）：還元条件での圧縮ベントナイト中のセレン（Se）の拡散に及ぼす珪砂混合及び温度の影響，日本原子力学会2001年春の年会要旨集，p.631.

佐藤秀治（2001）：核種移行評価の信頼性向上に関する研究，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；原子力安全研究協会），JNC TJ8420 2001-001.

Sawada, A., Ohnishi, Y. and Ijiri, Y. (2000): Fractal nature of fracture trace length distribution as an alternative model, Proceedings of migration of contaminants in fractured media, pp.11-19.

Sawada, A., Uchida, M., Shimo, M., Yamamoto, H., Takahara, H. and Doe, T.W. (2000): Anisotropy, reversibility and scale dependence of transport properties in single fracture and fractured zone - Non-sorbing tracer experiment at the Kamaishi mine, First TRUE Stage - Transport of solutes in an interpreted single fracture, SKB Technical Report 01-24, pp.151-161.

Sawada, A., Uchida, M., Shimo, M., Yamamoto, H., Takahara, H. and Doe, T.W. (2000): Non-sorbing tracer migration experiments in fractured rock at the Kamaishi Mine, Northeast Japan, Engineering Geology, vol.56, pp.75-96.

澤田　淳，坂本和彦（2001）：チャンネルネットワークモデル近似に伴う不確実性の検討，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-010

柴田俊夫，瀬尾眞浩，杉本克久，木滝　徹，井上博之（2001）：オーバーパック候補材料の局部腐食モデルの高度化研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；社団法人腐食防食協会），JNC TJ8400 2001-008.

白石伊代，渡辺邦夫，佐光武文，松田史朗，三ツ井誠一郎，本田　明，亀井玄人（2000）：銅オーバーパックのナチュラルアナログ研究，住友金属鉱山中研所報，15，pp.26-34.

白川能良，片尾松一，長坂和佳，松本昌昭（2000）：核種移行解析コードMATRICSによる解析の信頼性の検証，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2000-021.

鈴木　覚（2000）：ベントナイトの間隙水のラマン分光測定，日本原子力学会2000年秋の大会要旨集，p.688.

鈴木　覚，田中光雄，森田光男（2000）：ベントナイト間隙水のラマン分光測定，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2000-020.

鈴木　覚，牛腸治夫（2001）：圧縮ベントナイト中のSr^{2+}イオンの実効拡散係数の塩濃度依存性，日本原子力学会2001年春の年会要旨集，p.632.

鈴木　覚（2000）：ラマン分光法によるベントナイトの間隙水の構造の研究，第44回粘土科学討論会講演要旨集，pp.210-211.

鈴木　覚，河村雄行（2000）　分子動力学計算による Na 型スメクタイトの層間水の振動スペクトルと運動性の研究，第44回粘土科学討論会，pp. 84-85.

鈴木　覚（2000）：ラマン分光法によるベントナイトの層間水の構造の研究，地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会予稿集，Wh-007.

鈴木　覚（2000）：ラマン分光法による粘土層間水の構造，物性の研究，月刊地球，vol. 22, no. 7, pp.476-481.

Tachi, Y., Shibutani, T., Sato, H. and Yui, M. (2001): Experimental and Modeling Studies on Sorption and Diffusion of Radium in Bentonite, Journal of Contaminant Hydrology 47, pp.171-186.

高治　一彦，杉野弘幸（2000）：第2次とりまとめにおける地層処分の工学技術的検討（その4）－ニアフィールドの力学的長期安定性評価－，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，共通セッション CS-179.

Tanai, K., Yui, M., Ueki, H. and Yamamoto, S. (2000): The Treatment of Gas in The H-12 Performance Assessment for HLW Disposal in JAPAN, Gas Generation and Migration in Radioactive Waste Disposal Safety-relevant Issues, Workshop Proceedings, Session II, pp.113-117.

谷口直樹，本田　明（2000）：高レベル放射性廃棄物の地層処分容器材料の寿命評価，まてりあ第39巻第9号，pp.843-846.

谷口直樹，本田　明，川崎　学，塚本　剛，藤原和雄（2000）：腐食生成物としてのマグネタイトによる炭素鋼オーバーパックの腐食への影響，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-001.

谷口直樹，川崎　学，藤原和雄（2001）：ベントナイト中における硫酸塩還元菌の活性と緩衝水系によるオーバーパック材料の腐食への影響，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-011.

谷口　航，高治一彦，杉野弘幸，森　康二（2000）：第2次とりまとめにおける地層処分の工学技術的検討（その6）－ニアフィールドの耐震安定性評価－，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，共通セッション CS-181.

戸井田克，佐藤幸弘，井元一彦，須山泰宏，阿部泰典，吉田光昭（2001）：実規模シーリングシステムの研究開発，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；鹿島建設株式会社），JNC TJ8400 2001-018.

Tsang, C.F. and Karasaki, K. (2000): JNC-DOE Collaborative Program on Mass Transport - Characterization and Predictive Technologies, 1999-2000 Annual Report, JNC Technical Report, JNC TN8400 2000-007.

Nakayagi, K., Ueda, H.K., Makino, H., Ishihara, Y., Ijiri, Y., Sawada, A., Baba, T., Ishiguro, K. and Ueki, H. (2000): A Trial of Probabilistic Simulation for Reference Case in the Second Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan, Proceedings of the 5th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM5), Vol3, pp.1469-1475.

山田直之，鍬　哲一，澤田　淳（2001）：実岩体を用いた透水試験－SETBLOCK 試験報告－，サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2001-003.

吉新　誠，Dershowitz, W.（2001）：亀裂ネットワークモデルによる解析 Fracture network modeling and performance assessment support，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 TJ8440 2001-001.

山口徹治，出光一哉，加藤博康，川田千佳良，小崎　充，牧島亮男，中山真一，長崎晋也，真木紀彦（2001）：地層処分のための水・鉱物表面における表面拡散（1）表面拡散の寄与に関する既往の研究からの考察，日本原子力学会 2001 年春の年会要旨集，p.627.

吉田英俊，三木崇史，口居邦彦（2001）：地層処分安全計価における生物圏評価手法の高度化に関する検討，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 2001-001

[平成13年度]

Alraan, S.J, Uchida, K., Tidwell, V.C., Baney, C.M. and Chambers, B.P.（2001）：Visualization and Quantification of Heterogeneous Diffusion Rate in Granodiorite Samples by X-Ray Absorption Imaging, SANDIA REPORT, SAND2001-1812.

Boogesson, L., Chijimatsu, M., Fujita, T., Nguyen, T. S., Rutqvist, J. and Jing, L.（2001）：Thermo-hydro-mechanical characterisation of a bentonite-based buffer material by laboratory tests and numerical back analyses, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol.38, pp.95-104.

レジスプロス，亀井玄人，大貫敏彦，田高　洋（2001）：Retardation of Diagenetic REE in hydrothermal clays surrounding the Oklo nuclear reactor 2 (Gabon), 日本原子力学会 2001 年秋の大会要旨集，p.932.

Bros, R. (2001): Natural analogue studies at the Oklo uranium deposit (Gabon), Proceedings, JNC Int. Fellowship Program Workshop, Oarai, Oct. 2001, pp.55-79.

Bros, R. (2001): The geological disposal of nuclear wastes - What do we learn from natural analogues ?, Proceedings, Science and Technology Workshop, Tokyo, Nov. 2001.

Bros, R., Kamei, G. and Ohnuki, T. (2001): Rare element transport in the Bangombe nuclear reactor zone (Gabon) - Evidence from U and Sm isotopes, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. (in press)

千々松正和, 田崎 祥, 杉田 裕 (2001): ベントナイトペレットを用いた緩衝材の膨潤変形性に関する検討（その2）模型試験の結果に対する考察性に関する検討, 土木学会第56回年次学術講演会概要集, 共通セッション pp.1-5.

Chijimatsu, M., Fujita, T., Sugita, Y., Amemiya, K. and Kobayashi, A. (2001): Field Experiment, Results and THM Behavior in the Kamaishi mine experiment, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol.38, pp.67-78.

千々松正和, 田崎 祥, 山下 亮 (2002): 人工バリアにおける熱-水-応力連成挙動に関する研究, サイクル機構技術資料（研究委託報告書；株式会社大間組）, （印刷中）

千々松正和, 田崎 祥, 山下 亮 (2002): 実規模原位置試験の連成挙動評価研究, サイクル機構技術資料（研究委託報告書：株式会社大間組）, （印刷中）

千々松正和, 根山敦史, 千原貴尚, 前田 治, 塩崎 功, 岩田 裕, 笹尾 英嗣, 中山雅 (2002): 熱-水-応力-化学連成挙動に関する研究 - 成果報告書 -, サイクル機構技術資料（研究委託報告書：三菱重工業株式会社, 株式会社大間組）, JNC TJ8400 2002-003.

千々松正和, 杉田 裕, 小林 晃, 大西有三 (2001): DECOVALEX プロジェクトにおいて実施された各解析手法による FEBEX トンネルの緩衝材水理解析結果の比較, 地殻性岩盤における透気現象に関するシンポジウム, pp.233-242.

千々松正和, 谷口 航, 鈴木英明, 西垣 誠 (2001): 熱-水-応力連成モデルを用いた高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるニアフィールド評価, 土木学会論文集, No.687/III-56, pp.9-25

新堀雄一 (2001): コロイドの付着における物質移動係数の評価手法, 日本原子力学会 2002 年春の大会要旨集, p.653.

Chinju, H., Kono, Y., Nagasaki, S. and Tanaka, S. (2001): Deposition Behavior of Polystyrene Latex Particles on Solid Surfaces during Migration through an Artificial Fracture in a Granite Rock Sample, J. Nucl. Sci. Technol., Vol.38, pp.439-445.

江崎哲郎, 神野健二, 三谷泰浩 他9名, 内田雅大, 吉野尚人 (2001): 岩盤不連続面の力学・透水メカニズムの実験的・解析的研究 先行基礎工学分野に関する平成12年度報告書 , サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2001-005.

上口克人, 橋本秀樹, 坂本勇治, 三ツ井誠一郎, 亀井玄人 (2001): ベントナイトのイライト化のナチュラルアナログ新潟県西頸城半深成岩による接触変成事例, サイクル機構技術資料（研究委託報告書；株式会社ダイヤコンサルタント）, JNC TJ8400 2001-007.

上口克人, 桜本明弘, 坂本純也 (2002): アンカリ性環境でのガラスおよびベントナイトの変質に関するナチュラルアナログ研究, サイクル機構技術資料（研究委託報告書；株式会社ダイヤコンサルタント）, JNC TJ8400 2001-046.

原 啓良, 今一 毅 (2002): 温度勾配下での緩衝材の変質時における間隙水化学に関する研究, サイクル機構技術資料（研究委託内容報告書：株式会社コベルコ科研）, （印刷中）.

畑 明仁, 井尻裕二, 鈴木俊一, 大石雅也, 杉原 豊 (2002): 原位置トレーサー試験の逆解析による核種移行特性の不確実性評価, 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 TJ8400 2002-002.

大間 昭, 山口伸吾 (2002): 土被りの厚い空洞余掘り量の監視に関する調査(IV), サイクル機構技術資料（研究委託報告書：日本コンピュータシステム株式会社）, JNC TJ8400 2001-045.

木岡信之, 堀井秀治, 倉持昭英 (2002): 海外の地下研究施設における研究内容の調査および特定課題の整理, サイクル機構技術資料, JNC TN8420 2001-007.

井尻裕二, 澤田 淳, 坂本和彦, Hershowitz, W.S., 内田雅大, 石黒勝彦, 梅木博之 (2001): ラプラス変換有限要素法を用いた流れ日ネットワーク中の核種移行解析モデルの開発, 土木学会論文集, No.694／III-57, pp.229-240.

井尻裕二, 澤田 淳, 坂本和彦, 内田雅大, 石黒勝彦 (2001): 放射性廃棄物地層処分の性能評価に及ぼす不連続体の影響について, 地球惑星科学関連学会 2001 合同大会, A0-007

井尻裕二, 澤田 淳, 坂本和彦, 内田雅大, 石黒勝彦, 梅木博之, 大西有三 (2001): 割れ目ネットワークモデルの水理特性に及ぼす割れ目スケール効果の影響, 土木学会論文集, No.694／III-57, pp.179-194.

井尻裕二, 澤田 淳, 内田雅大, 石黒勝彦, 坂本和彦 (2001): 割れ目ネットワークモデルを用いた岩盤中の核種移行解析, 亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム発表論文集, pp.201-210 地盤工学会.

今村哲弘, 千々松正和, 杉田 裕, 村田雅彦, 斎藤雄男 (2001): 高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるベントナイ

下線制御材縦目筋のせん断力学特性，第36回地盤工学研究発表会，pp. 925-926.

石原雅尚，福才　裕，佐山　覚，伊藤達哉，佐永健一，小峯和治，桑山有紀（2002）：地層処分システムの設計・安全評価体系のシステム化に関する研究，サイクル機構技術資料（業務委託報告書：三菱重工業株式会社），（印刷中）．

石原雅尚，岩本　裕，小林茂樹，塩山敦史，佐藤健司，近藤智徳（2002）：地層処分統合解析システムの設計設計，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），（印刷中）．

Ishikawa, H.（2001）: Actinides Geochemical Database for Performance Analysis of High-Level Radioactive Waste Repositories and The Program to Increase Its Confidence, Actinides-2001 International Conference, Final Program and Abstracts, p. 37.

伊藤　洋，山上　進，油井三和（2002）：熱-水-応力-化学連成挙動研究の現状と今後の計画，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-029.

亀井玄人（2001）：海水性地下水中に含まれる有機酸とヨウ素，日本原子力学会2001年秋の大会要旨集，p. 936.

亀井玄人（2001）：頁岩ガス田の地下水に含まれるヨウ素の起源と挙動，資源地質，51(2)，pp. 145-151.

亀井玄人（2001）：高レベル放射性廃棄物の地層処分システム－その研究手法の特徴－，日本原子力学会中部支部第33回研究発表会要旨集S1，pp. 14-17.

加藤智子，鈴木祐二，石黒勝彦，浜住幸生，Richard Little，内藤守正（2001）：沿岸海域を核種放出域とした地層処分生物圏評価の代替モデル，日本保健物理学会第35回研究発表会予稿集，C16.

川上　進，酒井裕一，油井三和（2002）：処分坑道離間距離，廃棄体ピッチに関する解析におけるインプットデータ－処分坑道横置きレファレンスケース－，サイクル機構技術資料，JNC TN8450 2001-009.

川上　進，酒井裕一，油井三和（2002）：処分坑道離間距離，廃棄体ピッチに関する解析におけるインプットデータ－処分坑道竪置きレファレンスケース－，サイクル機構技術資料，JNC TN8450 2001-011.

川上　進，酒井裕一，油井三和（2002）：有限要素法による支保工厚の評価－処分坑道（竪置き）解析での入力データセット－，サイクル機構技術資料，JNC TN8450 2001-006

河村秀紀，長谷川宏，棚多　勝，本田ゆうき，大貫里子（2002）：人工バリア性能モニタリングに関する検討，サイクル機構技術資料（研究委託報告書，株式会社大林組）　（準備中）

河村秀紀，小西一宏，棚多　勝，長谷川宏，志村友行，佐藤昌子，平岡健一，金森千亜子（2002）：地層処分における廃棄体再取り出しについての検討，サイクル機構技術資料（研究委託報告書：株式会社大林組）　（準備中）

鍋島広人，杉田　裕，鈴木英明，下々松正和，小松　満，西垣　誠（2001）：多孔質媒体不飽和水理試験設備（CLHE）を用いた不飽和水理試験に関する検討，土木学会第56回年次学術講演会講演概要集，共通セッション，pp. 46-47.

鍋島広人，杉田　裕，鈴木英明，下々松正和，小松　満，西垣　誠（2002）：多孔質媒体不飽和水理試験設備（CLHE）試験結果および解析評価，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2002-001.

Kitamura, A. and Kubota, T.（2001）: Solubility of Neptunium (IV) in Carbonate Media, Actinides 2001 International Conference, Final Program and Abstracts, p. 104

Kitamura, A., Tohura, T. and Shibutani, T.（2001）: Sorption Behavior of Neptunium onto Smectite under Reducing Conditions in Carbonate Media, JNC Technical Report, JNC TN8400 2001-015.

Kitamura, A., Tohura, T. and Shibutani, T.（2002）: Sorption Behavior of Neptunium onto Smectite under Reducing Conditions in Carbonate Media, NUCEF 2001, JAERI Conf 2002-004, pp. 659-666.

北村　暁，小原幸利（2002）：炭酸共存下におけるNp(IV)の溶解度測定，日本原子力学会2002年春の年会要旨集，p. 726.

Kobayashi, A., Fujita, T. and Chijimatsu, M.（2001）: Continuous approach for coupled mechanical and hydraulic behavior of a fractured rock mass during hypothetical shaft and sinking at Sellafield, UK. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol.38, pp. 45-57.

小崎　完（2002）：緩衝材ニの膨潤挙動に対する粘土の凝集学的微細構造の影響に関する研究（II），サイクル機構技術資料（研究委託報告書，北海道大学），JNC TJ8400 2001-044.

Kozaki, T., Suzuki, S., Kozai, N., Sato, S. and Ohashi, H.（2001）: Observation of microstructure of compacted bentonite by microfocus X-ray computerized tomography (micro-CT), Journal of Nuclear Science and Technology, Vol 38, No 9, pp 697-699

久野義人，横守浩史，亀井玄人，長崎晋也，田中　知（2002）亀裂充填中でのコロイドおよび溶質の移行研究－先行基礎工学分野に関する研究報告－，サイクル機構技術資料（共同研究報告書：三菱マテリアル株式会社），JNC TN8400 2001-007.

久野義人，亀井玄人，大谷洋之（2001）：ベントナイト起源の地下水中のコロイド－コロイド生成と地下水水質との関係－，日本原子力学会2001年秋の大会要旨集，p. 930.

久野義夫，油井三和（2001）：ベントナイトコロイドに収着したSrの岩石亀裂中での移行挙動，サイクル機構技報，No.13，pp.53-63.

Kuno, Y., Kamei, G. and Ohtani, S. (2002): Natural colloids in groundwater from a bentonite mine, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. (in press)

早澤　紘，柴田雅博，上田真一，市毛　悟，油井三和（2002）．高アルカリ性環境で変質させたベントナイトのコロイドフィルトレーション効果，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2002-013.

Makino H., McKenna S.A. and Wakasugi K. (2001): Sensitivity Analysis of Monte Carlo Simulation Results Using the Kolmogorov-Smirnov d Statistic. Proceedings of 2001 Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology (IAMG2001). Session L

二本奈史，吉田英爾，油井三和（2002）．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（II），サイクル機構技術資料（業務委託報告書，日揮株式会社）．（準備中）

井元一彦，杉田　裕（2001）．カナダURLにおける原位置試掘調査による透水変化の評価．土木学会第56回年次学術講演会，共通セッション，pp.32-33.

森山裕丈（2002）：超ウラン元素の加水分解及び錯生成に関する研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書，京都大学），JNC TJ8400 2001-048

長崎晋也（2002）：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 2001-051.

中田弘太郎，佐藤治夫，田中　知，長崎晋也，北村　暁，舘　幸男，戸村　豪，佐藤治夫（2001）　マグネタイト/溶液界面におけるCr(VI)の還元，日本原子力学会2001年秋の大会要旨集，p.916.

Nguyen, T. S., Boogesson, L., Chijimatsu, M., Rutqvist, J., Fujita, T., Hernelind, J., Kobayashi, A., Ohnishi, Y., Tanaka, H. and Jing, L. (2001): Hydro-mechanical response of a fractured granitic rock mass to excavation of a test pit - the Kamaishi Mine experiment in Japan. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. Vol.38, pp.79-94.

西田光宏，小林　晃，吉山成雄，杉田　裕（2001）：トンネル掘削による周辺岩盤の水圧挙動，亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム，PP.243-248.

Ochs, M., Lothenbach, B., Shibata, M., Sato, H. and Yui, M. (2001): Sensitivity analysis of radionuclide migration in compacted bentonite: A mechanistic model approach, Migration'01, ABSTRACTS, pp.163-164.

Ochs, M., Lothenbach, B., Shibata, M., Sato, H. and Yui, M. (2001): Sensitivity analysis of radionuclide migration in compacted bentonite: A mechanistic model approach, Radiochimica Acta. (in press)

Oda, C., Shibata, M. and Yui, M. (2001): Experimental Indications of Effects of Surface Deprotonation on Na-Bentonite Porewater Chemistry in a Geological Repository, MRS Symposium Proceedings, Vol.663. (in press)

大場半信（2002）：天然におけるスメクタイトの緑泥石化に関する調査，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 2001-054.

大久保博生（2002）：地層処分の性能評価におけるシナリオ解析の高度化（I），サイクル機構技術資料（業務委託報告書；株式会社三菱総合研究所），（準備中）

大西有三，大津宏康，西川　協，澤田　淳，中井亮太郎（2001）：不連続性岩盤の統計的手法に基づく空間分布特性に関する研究，平成13年度土木学会関西支部年次学術講演概要，III-36-1.

Rai, D. and Yui, M. (2002): Status and Future Needs in Actinide Chemistry for Performance Assessment of Nuclear Waste Disposal, NUCEF 2001, JAERI Conf 2002-004, pp.315-322.

佐伯和利，中川　啓，和田信一郎，神野健二，柴田雅博（2001）：Caカオリナイト，-スメクタイト，-イライトにおける2価鉄・マンガンイオンのイオン交換選択係数，第45回粘土科学討論会講演要旨集，pp.202-203.

佐伯和利，中川　啓，和田信一郎，神野健二，柴田雅博（2001）：粘土鉱物における2価鉄・2価マンガンイオンの関与するイオン交換平衡の選択係数，日本土壌肥料学会2001年福岡大会講演要旨集，p.22.

Sasaki, K. and Kamei, G. (2002): Influence of carbon steel and its corrosion products on the leaching of elements from a simulated waste glass, JNC Technical Report, JNC TN8400 2002-003.

Sato, H. (2001): The Effect of Pore Structural Factors on Diffusion in Compacted Sodium Bentonite, MRS Symposium Proceedings Vol.663. (in press)

Sato, H. (2002): A Study on the Effect of Clay Particle Orientation on Diffusion in Compacted Bentonite, WM02 Conference Proceedings, pp.1-15

Sato, H. and Miyamoto, S. (2001): Diffusion behavior of 210Pb in compacted sodium bentonite, Migration'01,

ABSTRACTS, pp.85-86.

Sato, H. and Miyamoto, S. (2002): The Effects of Silica Sand Content and Temperature on Diffusion of Selenium in Compacted Bentonite under Reducing Conditions. NUCEF 2001, JAERI Conf 2002-004, pp.675-682.

Sato, H. and Miyamoto, S. (2002): Effect of Redox Potential of Diffusion of Redox Sensitive Elements in Compacted Bentonite -Selenium (Se) -, TreePro2002 Workshop Proceedings, pp.86-93.

佐藤治夫 (2001): 「MIGRATION'00」国際会議およびポールシェラー国立研究所(PSI)における専門家会議, サイクル機構技術資料, JNC TN1200 2001-005.

佐藤治夫 (2002): WM'02 国際シンポジウム - 第29回高レベルおよび低レベル廃棄物, 混合廃棄物と廃坑修復に関する国際シンポジウム - (海外出張報告), サイクル機構技術資料, JNC TN1200 2001-007.

佐藤治夫, 鈴木 覚 (2002): 圧縮ベントナイト中の拡散に及ぼす粘土粒子の配向性の影響に関する基礎的研究, 日本原子力学会 2002 年春の年会要旨集, p.680.

澤田 淳 (2002): 亀裂ネットワークモデルによる割れ目を有する岩盤の水理・物質移動解析, つくばテクノロジーショーケース, p.29, つくばサイエンスアカデミー.

澤田 淳 (2001): 高レベル放射性廃棄物の地層処分研究 (地層中の水理・核種移行問題について), 第18回計盤システム工学セミナー, pp.27-46, システム総合研究所.

澤田 淳, 井尻裕二, 大西有三, 大津宏康, 西垣 誠 (2002): 亀裂トレース長のスケール依存性を考慮した検討, 第11回計の力学国内シンポジウム論文集, A04.

澤田 淳, 千田明光, 竹内真司, 中野勝志, 井尻裕二 (2001): 水理地質構造モデル化概念の違いによる深部地下水流動への影響評価 (その1), 亀裂性岩盤における核種移行問題に関するシンポジウム発表論文集, pp.249-258, 地盤工学会.

柴田俊夫, 瀬尾眞浩, 杉本克久, 永瀬 徹, 井上博之 (2002): オーバーパック候補材料の腐食挙動モデルの高度化研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書: 社団法人腐食防食協会), JNC TJ8400 2001-049.

白川敏彦, 加中耕一郎 (2001): 多孔質岩盤中の水理/核種移行解析評価プログラムの理論的背景と使用方法の概要, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2001-027.

杉田 裕, 千々松正和, 雨宮 清 (2001): ベントナイトペレットを用いた緩衝材の施工性に関する検討 (その1) ベントナイトペレット膨潤後の止水性に関する検討, 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集, 共通セッション, pp.2-3.

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, 油井三和 (2002): 岩石の一軸圧縮強度と圧裂引張強度の関係 データセット, サイクル機構技術資料, JNC TN8450 2001-007.

杉田 裕, 油井三和 (2002): 岩石の一軸圧縮強度と各物性値の相関関係 データセット, サイクル機構技術資料, JNC TN8450 2001-010.

鈴木英明, 千々松正和, 藤田朝雄, 中野政詩 (2002): 不飽和圧縮ベントナイト中の水分移動パラメータに関する考察, 土木学会論文集, No.701/III-58, pp.107-120.

鈴木英明, 藤田朝雄, 杉野弘幸 (2001): 圧縮ベントナイト中の温度勾配による水分移動, 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集, 共通セッション, pp.24-25.

鈴木 覚 (2001): 圧縮ベントナイト中の Sr^{2+} 及び I^- イオンの実効拡散係数に対する地温度の影響, 地球惑星科学関連学会2001年合同大会予稿集, J6-006.

鈴木 覚 (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 2002-008

鈴木 覚, 藤井直樹, 上野健一, 市川康明, 河村雄行 (2001): 圧縮ベントナイトの微細構造のモデル化と MD-HA 結合解析法の拡散問題への応用, 粘土科学討論会, B28.

鈴木 覚, 藤島 敦, 上野健一, 市川康明, 藤井直樹, 河村雄行, 柴田雅博, 佐藤治夫, 北山一美 (2001): 圧縮ベントナイトの微細構造のモデル化と MD-HA 結合解析法の拡散問題への応用, 粘土科学, Vol.41, No.2, pp.45-57.

鈴木 覚, 藤島 敦, 上野健一, 市川康明, 河村雄行, 藤井直樹, 柴田雅博, 佐藤治夫 (2001): 圧縮ベントナイトの微細構造のモデル化と MD-HA 結合解析法の拡散問題への適用 -先行基礎工学研究に関連した共同研究の研究開発状況-, サイクル機構技術資料 (共同研究報告書: 名古屋大学, 東京工業大学), JNC TY8400 2001-003.

鈴木 覚, 河村雄行 (2001): 分子動力学によるメメクタイトに対する Sr の収着構造の研究, サイクル機構技報 No.13, pp.65-75.

鈴木 覚, 河村雄行 (2001): 分子動力学による Na 型スメクタイトの層間水の誘動スペクトルの研究, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2001-006.

鈴木　覚，向井雅行，市川康明，藤井直樹，北田　孝（2002）：高レベル放射性廃棄物の地層処分と分子拡力学法による物質移行シミュレーション，シミュレーション，vol. 21, No. 1, pp. 9-14.

鈴木　覚，佐藤治夫（2002）：緩衝型透過拡散試験システムの製作と透過拡散試験方法の改良，サイクル機構技術資料，JNC TN8410 2001-028.

鈴木　覚，佐藤治夫，石寺孝充，藤井直樹，向井雅行（2002）：ｲｵﾝ交換ベントナイトにおける重水の実効拡散係数の活性化エネルギー透過拡散試験と分子動力学シミュレーションの比較，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-031.

鈴木　覚，佐藤治夫（2002）：圧縮ベントナイト中のストロンチウムイオン，ヨウ化物イオン，重水の実効拡散係数の塩濃度依存性，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2002-002.

鈴木　徹，上野健一，徳満　勉，柴田雅博，佐藤治夫，市川康明，藤井直樹，向井雅行（2001）：圧縮ベントナイトの間隙構造のモデル化とMP-HA結合解析法の拡散問題への適用，日本原子力学会2001年秋の大会要旨集，p899.

Suzuki, S., Fujishima, A., Ueno, K., Shibutani, T., Sato, H., Ikeuchi, Y. and Kawamura, K. (2001): Microstructural modeling of compacted Na-bentonite for prediction of mass transport properties, Migration'01, ABSTRACTS, p.173.

Suzuki, S. and Sato, H. (2001): Effect of salinity on diffusivities of Sr^{2+} and I^- ion in compacted sodium bentonite, Migration'01, ABSTRACTS, pp.80-81.

G.de博一（2002）：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，サイクル機構技術資料（契約業務報告書；原子力安全研究協会），JNC TJ8420 2001-011.

棚井憲治，新里忠弘，出光充之，瀬尾光男（2002）：地下構造物の耐震設計手法の整理，サイクル機構技術資料，JNC TN8410 2001-026.

谷口直樹，本間　佑，幡谷　剛，藤原和雄（2001）：腐食生成物としてのマグネタイトによる炭素鋼オーバーパックの腐食への影響，材料と環境2001講演集，pp.267-270.

谷口直樹，田下　誠，森住光男（2001）：ベントナイト／ケイ砂混合体における炭素鋼の不動態化条件，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-025.

福　井一，深田　博（2001）：ｱﾙｶﾘ性流体を用いた人工岩盤供試体の透水試験　－NETBLOCK試験報告－，サイクル機構技術資料，JNC TN8430 2001-006.

飛塚早智子，小原義和，佐藤治夫（2001）：還元条件下でのNpの溶解度に及ぼすフミン酸の影響，日本原子力学会2001年秋の大会要旨集，p.907.

戸井田克，旭　吾郎，井元一彦，須山泰宏，阿部善典，戸中光昭（2002）：実規模シーリングシステムの研究（II），サイクル機構技術資料（研究委託報告書：鹿島建設株式会社），（印刷中）

戸村健，油谷朝紀，北村　暁（2001）：炭酸共存下におけるNp(IV)のスメクタイトに対する分配係数，日本原子力学会2001年秋の大会要旨集，p.908.

Tsang, C.F. and Kurasaki, K. (2001): JNC-DOE Collaborative Program on Mass Transport : Characterization and Predictive Technologies, 2000-2001 Annual Report, JNC Technical Report, JNC TE8400 2001-006.

辻本恵一，塚原芳紀，齋藤俊幸，土井良三，阿村浩二，富山真哲，大橋弘忠（2002）：地質環境モデルの構築技術に関する研究，サイクル機構技術資料（業務委託報告書：三菱マテリアル株式会社），（印刷中）

土田良一，黒澤　進（2002）：地下水中に存在するコロイドの特性評価に関する研究，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 2001-052.

内田雅大（2001）：高レベル放射性廃棄物地層処分における安全余裕度の大きさと信頼性向上に向けた水理上の取り組み，地球惑星科学関連学会2001年合同大会予稿集，q-008.

内田雅大（2001）：検証における安全評価技術開発上の課題，日本原子力学会2001年秋の大会要旨集，p.終7.

内田雅大，Dershowitz, B., Wescott, R., Shuttle, J., Cave, M., 竹内真司（2002）：地下水水質変化を考慮した水理解析の試み－スウェーデンエスポ地下研究施設での例－，第11回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，J05.

内田雅大，三野尚人（2001）：低裂罅岩体水理試験設備（LABROCK）用試験岩体の切りだし・搬入，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-015.

内田雅大，三野尚人（2001）：LABROCK用透水性キャリブレーション岩体の採取，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2001-016.

和田陽太郎，栗本克幸，藤原和雄，安倍　隆，進石　剛，塚原　剛（2002）：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（研究委託報告書：株式会社神戸製鋼所），JNC TJ8400 2002-002.

和田陽太郎，山口憲治，西村　彦，栗本克幸，中内芳明，竹内靖典，藤原和雄，進石　剛（2002）：地層処分環境下におけるオーバーパック材料の超長期試験研究，サイクル機構技術資料（研究委託報告書：株式会社神戸製鋼所），JNC TJ8400 2002-001.

青柳圭一郎，小尾　繁，牧野仁史（2002）：ヒンデ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，No.14，JNC TN1340 2001-010，pp.149-160

吉田英一，佐藤治夫，仙波　毅（2002）：マトリクス拡散による物質移動の遅延効果の評価手法とその検討，応用地質，第43巻，第1号，pp.24-34.

上田　豪，柴田雅博（2001）：熱力学データベース利用環境の整備，日本原子力学会2001年秋の大会要旨集，p.898.

古川雅英，五十嵐寛，石川博久（2001）：東海事業所処分研究報告会報告書（全体報告），サイクル機構技術資料，JNC TN8200 2001-004.

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年度までの成果一，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 2002 001.

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，第56回土木学会年次学術講演概要集，第3部門セッション，pp.42-43.

Yui, M.（2001）: Database Development of Glass Dissolution and Radionuclide Migration for Performance Analysis of HLW Repository in Japan, Journal of Nuclear Materials, 298, pp.136-144.

油井三和，粟原敏二，吉野尚雄一（2001）：報告における処分技術開発上の課題，日本原子力学会2001年秋の大会要旨集，p.緒7.

Yui, M., Shibutani, T., Shibata, M., Rai, D. and Orhs, M.（2001）: A Plutonium Geochemical Database for Performance Analysis of High-level Radioactive Waste Repositories. Plutonium in the Environment, 1, pp.165-174.