



高レベル放射性廃棄物の 地層処分技術に関する研究開発

—平成14年度報告—

2003年6月

核燃料サイクル開発機構

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122 (代表)
ファックス：029-282-7990
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2003

「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発—平成 14 年度報告—」 の発行にあたって

わが国の原子力利用を取り巻く昨今の情勢には、従前にも増して厳しいものがあります。ただ一方で、原子力発電が国内電力需要の約 3 分の 1 をまかなう主要なエネルギー源として国民生活を支えているという事実に変わりはありません。研究開発に関わる我々は、そのことを十分に認識し、批判を真摯に受け止めながらも、平常の研究活動を着実に進めることが重要だと考えます。

とくに、原子力エネルギーを利用する上で、高レベル放射性廃棄物の処分対策は避けて通れない喫緊の課題であり、現在、地層処分の実施に向けた基盤的な研究開発と並行して、事業および安全規制の取り組みが進められているところです。昨年 12 月には、原子力発電環境整備機構によって、「高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域」の公募が開始され、わが国の地層処分計画は概要調査地区の選定に向けた新たな段階へと踏み出しました。

このような状況の中で、わが国における地層処分技術の信頼性をさらに高め、社会の理解を深めていくことが、今後の研究開発の課題です。サイクル機構では、2 つの深地層の研究施設やエントリー、クオリティなどの室内試験施設を活用し、また国内外の関係機関と協力しながら効率的に研究開発を進め、処分事業と安全規制の双方の基盤となる技術や情報を整備していきます。あわせて、地層処分という非常に長期にわたる国家的な事業を支えていくための研究者の育成や技術の継承、ならびに国民各層の地層処分に対する理解の醸成に努めてまいります。

今後の研究開発の中核となる深地層の研究施設計画については、地元のご理解とご協力のもと、着実に進展しております。岐阜県の瑞浪市で進めている超深地層研究所計画においては、地上からの調査と並行して、昨年度に研究所用地の造成工事を行い、今年度より研究坑道の掘削を開始する予定です。また、北海道の幌延町で進めている幌延深地層研究所計画においても、地上からの調査と並行して、今年度から研究所用地の造成工事に着手します。

深地層の研究施設計画など地層処分技術に関する研究開発の成果については、技術報告書を中心に、関連する学会や報告会、シンポジウムなど様々な場を通じて、広く情報発信に努めていく所存です。その一環として、今般、研究開発全体にわたる進展を見渡せる報告書「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発—平成 14 年度報告—」を作成しました。本報告書は、「第 2 次取りまとめ」以降の研究成果をまとめた昨年度の「平成 13 年度報告」に引き続き、平成 14 年度の研究開発成果を中心にその概要を取りまとめたものです。

わが国の地層処分計画が事業と規制の両面で段階的に進展していくなか、これらに先行して各研究機関が効率良く連携しながら研究開発を進め、成果を集約していくことがますます重要になってきます。本報告書等を通じて、サイクル機構の研究開発への取り組みや現状をご理解いただくとともに、これから建設が始まるわが国初の深地層の研究施設をはじめ、サイクル機構が有する技術や施設を、わが国の貴重な研究開発資源として活用していただけるよう広く開放していきたいと考えております。

本報告書が、サイクル機構の研究開発へのご理解を深め、また叱咤激励を頂戴する一助となれば幸いです。

経営企画本部バックエンド推進部長
福島 隆
(平成 15 年 6 月 記)

高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発 -平成 14 年度報告-

- 目次 -

1. はじめに	1-1
2. 研究開発計画と成果の概要	2-1
2.1 地層処分技術に関する研究開発の全体概要	2-1
2.2 各研究開発分野における計画と成果の概要	2-9
2.2.1 深地層の科学的研究	2-8
2.2.2 処分技術の信頼性向上	2-19
2.2.3 安全評価手法の高度化	2-27
3. 深地層の科学的研究	3-1
3.1 広域地下水流動研究と超深地層研究所計画の役割と研究の進め方	3-1
3.2 広域地下水流動研究	3-4
3.2.1 研究の概要	3-4
3.2.2 各調査研究の成果	3-7
1) 地質・地質構造に関する調査研究	3-7
2) 岩盤の水理に関する調査研究	3-10
3) 地下水の地球化学に関する調査研究	3-14
3.3 超深地層研究所計画	3-17
3.3.1 計画の概要	3-17
3.3.2 各調査研究の成果	3-20
1) 地質・地質構造に関する調査研究	3-20
2) 岩盤の水理に関する調査研究	3-23
3) 地下水の地球化学に関する調査研究	3-26
4) 岩盤力学に関する調査研究	3-28
5) 深地層の工学技術の基礎に関する研究	3-31
3.4 東濃鉱山における調査試験研究	3-37
3.4.1 調査試験研究の概要	3-37
3.4.2 各調査試験研究の成果	3-39
1) ナチュラルアナログ研究	3-39
2) 岩盤の力学的安定性に関する試験研究	3-41
3) 坑道周辺の地質環境に関する調査研究	3-43

3.5 地質環境の長期安定性に関する研究	3-45
3.5.1 研究の概要	3-45
3.5.2 研究成果の概要	3-47
1) 陸起・侵食に関する研究	3-47
2) 気候・海水準変動に関する研究	3-50
3) 火山活動に関する研究	3-51
4) 地震・断層活動に関する研究	3-54
5) 地質環境の長期予測に関する研究	3-58
3.6 幌延深地層研究計画	3-59
3.6.1 計画の概要	3-59
3.6.2 地質環境調査技術開発	3-62
1) 地表から地下深部までの地質環境データの取得	3-62
1-1) 物理探査	3-62
1-2) 地質調査	3-65
1-3) 垂下水理調査	3-68
1-4) 試錐調査	3-72
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	3-86
2-1) 地質構造モデル	3-86
2-2) 地下水の水理モデル	3-88
2-3) 地下水の地球化学モデル	3-92
2-4) 岩盤力学モデル	3-94
3) 調査技術・調査機器開発	3-98
3-1) 試錐孔掘削のための技術	3-98
3-2) 試錐孔を用いた調査試験のための技術	3-101
3.6.3 地質環境モニタリング技術の開発	3-103
1) 試錐孔を用いたモニタリング技術開発	3-103
2) 遠隔監視システムの開発	3-106
3.6.4 深地層における工学的技術の基礎の開発	3-106
3.6.5 地質環境の長期安定性に関する研究	3-112
1) 地震研究	3-112
2) 天然現象に関する研究	3-114
3.6.6 環境調査	3-115
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 オーバーバックの基本特性	4-1

1) 炭素鋼オーバーバックの腐食挙動に関する研究	4-1
2) 代替オーバーバ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礎情報整備	4-11
4.2 人工バリア等の長期板合挙動に関する研究	4-14
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	4-14
1) 緩衝材／岩盤の力学的変形挙動に関する研究	4-14
1-1) 緩衝材の長期力学挙動に関する研究	4-14
1-2) 岩盤の力学的変形挙動に関する研究	4-16
2) 緩衝材の流出・侵入挙動に関する研究	4-20
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	4-32
1) 緩衝材ガス透気回復挙動に関する研究	4-32
2) 人工バリアせん断応答挙動に関する研究	4-36
4.2.4 人工バリア等のナチュラルアナログ研究	4-38
4.3 人工バリア等の工学技術の検証	4-42
4.3.1 閉鎖技術の検証試験	4-42
4.3.2 人工材料の開発	4-46
4.4 設計手法の適用性確認	4-50
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	5-6
5.2 安全評価モデルの高度化	5-9
5.2.1 岩盤中水理・物質移行モデルの高度化	5-9
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	5-9
2) 結晶質岩中の移行パラメータの信頼性評価手法の開発研究	5-13
3) 岩盤中の水理・物質移行モデルの信頼性向上研究	5-15
3-1) 単一亀裂／亀裂交差部室内試験（移流・分散）	5-15
3-2) 単一亀裂・モデル開発（LBNL 共同研究）	5-19
3-3) 亀裂を有する堆積岩の水理特性	5-23
5.2.2 地下水・間隙水水質形成モデルの高度化	5-27
5.2.3 現象論的核種移行モデルの開発	5-29
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	5-29

2) 核種の収着・拡散現象に関する研究	5-32
5.2.4 コロイド等の影響評価モデルの開発	5-38
1) コロイドの影響評価モデルの開発	5-38
2) 天然有機物・微生物の影響評価モデルの開発	5-41
2-1) 天然有機物の影響評価モデルの開発	5-41
2-2) 核種移行評価モデルにおける微生物の取扱いに関する検討	5-44
5.2.5 生物圏評価モデル	5-45
5.2.6 天然現象影響評価モデル	5-49
5.3 安全評価手法の整備・高度化	5-51
5.3.1 シナリオ等の安全評価基盤の整備	5-51
1) 安全評価の基本事項の検討	5-51
2) シナリオ開発技術の高度化	5-55
5.3.2 不確実性評価技術	5-57
5.3.3 技術情報統合システムの整備	5-61
5.4 安全評価手法の適用性確認	5-64
6. おわりに	6-1
付録A 平成14年度の業務実施体制および各研究開発課題の実施担当組織	
付録B 平成14年度の主な業務実績	
付録C 国内外の関係機関との研究協力体制と平成14年度の協力状況	
付録D 公開文献リスト(平成14年度)	

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、平成 12 年には、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（以下、「最終処分法」）の成立、処分事業の実施主体である原子力発電環境整備機構（以下、原環機構）の発足、「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）」（以下、「安全規制の基本的考え方」）の公表など、処分事業や安全規制の枠組みが整備され、わが国の地層処分計画は事業化段階へと進展した。

今後、処分事業については、原環機構により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段階的に進められる。また、事業の進展にあわせて、安全審査基本指針、安全審査指針、処分場の技術基準といった安全規制に関連する指針・基準類の策定が国により進められることになっている。概要調査地区の選定に向けて、平成 14 年 12 月には原環機構により「高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域」の公募が開始され、また、これに先立ち同年 9 月に原子力安全委員会より「高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について」が公表された。

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展開とも整合をとりつつ、双方の基盤となる技術や情報を整備していくことが求められる。平成 12 年 11 月の「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、実測データの豊富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を踏まえて新たに策定した「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の全体計画」（平成 13 年 12 月公開、以下、「全体計画」）に沿って研究開発を進めているところである。なお、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

技術に関する研究開発」は、「地層処分研究開発」とその基盤となる「深地層の科学的研究」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」から構成されるものとした。サイクル機構ではこれらの 3 つの分野について研究開発を進めている。

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、成果等の情報積極的に発信するとともに、様々な議論の場を通じて幅広い意見を取り入れつつ研究開発を展開していくことが重要である。そのような観点から、サイクル機構では、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、平成 13 年度より、「地層処分技術に関する研究開発」の成果を年度毎に報告書として取りまとめて公表することとした。本報告書は、「第 2 次取りまとめ」以降の研究開発の計画と成果の概要を報告した「平成 13 年度報告」（平成 14 年 6 月公開）に引き続き、「平成 14 年度報告」として、「全体計画」に沿って平成 14 年度の成果・進捗の概要を報告するものである。なお、本報告書には平成 14 年度に実施した研究開発の成果をできるだけ網羅的に盛り込むこととしたため、途中段階の成果（速報的なデータや解釈）を含んでいるなど、各研究開発項目の進捗度に応じて記載の程度が異なることを予めご理解いただきたい。

本報告書は、「概要報告」と各分野の「個別報告」により構成している。2 章の「概要報告」においては、「地層処分技術に関する研究開発の全体概要(2.1)」を紹介した上で、3～5 章に詳細に示す各分野の個別成果の要点を「各分野の計画と成果の概要(2.2)」としてまとめる。「個別報告」では、個々の研究開発項目における平成 14 年度の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 3 つの分野毎に報告する。さらに、巻末には、平成 14 年度の「研究開発体制」、「業務実績」、「国内外関係機関との協力状況」及び「公開文献リスト」を添付する。なお、「1. はじめに」と「2.1 研究開発の全体概要」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概要

サイクル機構が、平成11年11月に公表した「第2次取りまとめ（サイクル機構、1999）」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「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「原子力長期計画（原子力委員会、2000a）」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「安全規制の基本的考え方（原子力安全委員会、2000）」が公表された。なお、「第2次取りまとめ」については、原子力委員会による評価がなされ、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、2000b）」（以下、「国による第2次取りまとめ評価報告書」）として評価結果が公表されている。

以上のように、処分事業や安全規制の枠組みが整備され、わが国の地層処分計画が事業化段階へと進展した状況を踏まえ、サイクル機構では、新たに策定した「全体計画（サイクル機構 研究開発課題評価委員会、2001）」に沿って研究開発を進めている。ここでは、事業化段階における関係機関の役割と研究開発課題を紹介した上で、「全体計画」で示したサイクル機構の研究開発計画と、取組みの現状や今後の展開について概要を報告する。

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3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、安全審査指針、処分場の技術基準といった指針・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。

概要調査地区の選定に向けて、平成14年12月

には原環機構により「高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域」の公募が開始され、「処分場の概要」や「概要調査地区選定上の考慮事項」などの資料が公開された。また、これに先立ち同年9月に原子力安全委員会より「高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について（原子力安全委員会、2002）」が公表された。

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
(青字は研究開発に関する役割)

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、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。

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上で、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

上記の課題等を踏まえると、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調査技術や工学技術的信頼性確認、実際の地質環境条件も考慮した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全体としての総

合的な評価的信頼性向上など、地層処分技術的信頼性をさらに高めていくことが重要となる。

3) サイクル機構の研究開発計画と取組み状況

サイクル機構では、「上記の役割分担や今後の研究開発課題を踏まえ、「第2次取りまとめ」までに蓄積した知見や経験のもとに、深地層の研究施設、地層処分基盤研究施設（エントリー）、地層処分放射化学研究施設（クオリティ）等を活用して、処分事業や安全規制の今後の展開とも整合を図りつつ、双方の基盤となる技術や情報を整備していく。

(1) 研究開発目標

「第2次取りまとめ」までの研究開発は、具体的な地質環境を特定することなく、わが国における地層処分概念の成立性を科学的根拠に基づき概括的に示すことを目標として進めてきた。今後は、上述したように、地層処分に関する技術的信頼性を向上させることが研究開発の大目標となる。そのため、これまで蓄積してきた様々な技術の実際の地質環境への適用性を確認するとともに、地層処分システムに関連する現象への理解をさらに深めつつより現実に即した評価手法へと改良・高度化を図っていくことが重要である。このような観点から、今後の研究開発は、以下の2つを目標として進めていく（図2.1-2）。

(1) 実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認

「第2次取りまとめ」までに整備してきた地質環境の調査・評価技術、地下施設、人工バリアの工学技術、安全評価手法といった地層処分に関する様々な技術や手法を、深地層の研究施設等において実際の地質環境へ適用することを通じて、その信頼性を確立しつつ、調査の進展に応じた段階的な地層処分技術として体系化していく。

(2) 地層処分システムの長期挙動の理解

上記①の調査研究やナチュラルアナログ研究などを通じて地下深部の地質環境条件やその長期的な変遷に対する理解を深め、また、人工バリアの長期挙動や核種の移行、遅延等に関する現象をより現実的なデータとモデルで再現することを通じて、地層処分システムの長期挙動評価的信頼性を高めるとともに、「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を確認する。



図 2.1-2 研究開発目標「①実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」と「②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 2 つの目標を達成するために重要な研究開発課題を具体的に設定した上で、それらを効率的に実施する観点から、『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 3 つの分野に整理し、分野毎に連携をとりつつ研究開発を進めている (図 2.1-3)。ここで、サイクル機構を進める「地層処分技術に関する研究開発」は、「地層処分研究開発」とその基盤となる『深地層の科学的研究』から構成され、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』から構成されるものとしている。なお、サイクル機構では、『深地層の科学的研究』を地層科学研究と称して進めている。各分野の研究開発の概要を以下に示す。

① 深地層の科学的研究

深地層の研究施設計画を段階的に進めていく中で、これまで整備してきた地質環境の調査・評価技術を適用することにより、その信頼性を確認しつつ、段階的な調査・評価技術としての体系化を図る。あわせて、地下施設の設計・施工を通じて、深地層における工学技術の基盤を整備する。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、特定地域における地質環境の長期的な変化や物質の移動現象を評価するための手法の信頼性向上を図る。

② 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、および工学要素技術の検証を行うことにより、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に重点をおいて、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。

③ 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、また、深地層の科学的研究の成果を基盤情報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る。各現象をより現実的に理解し、実際の地質環境に起因する不確実性を考慮しつつモデルや評価手法を改良することを通じて、地層処分システムの長期挙動評価の信頼性向上を図る。

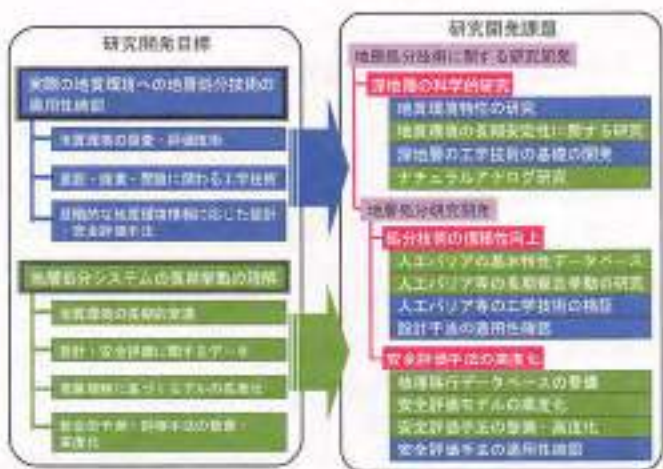


図 2.1-3 2 つの目標に向けた研究開発課題

(3) 研究開発施設の役割と取組み状況

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、東濃鉱山等の研究開発施設を活用して、東濃地科学センター、幌延深地層研究センター、東海事業所において進めていく(図2.1-4参照)。また、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。



図 2.1-4 サイクル機構の研究開発施設

① 深地層の研究施設の役割

サイクル機構では、地層処分技術に関する研究開発を進めるための中核的な研究施設として、深地層の研究施設計画を進めている。「第2次取りまとめ」までは、釜石鉱山(花崗岩)や東濃鉱山(堆積岩)の既存坑道を活用した調査研究、あるいは海外の地下研究施設での共同研究の成果などに基づき、地質環境を調査するための要素技術や基盤的な手法を整備してきた。「第2次取りまとめ」では、これらの研究で得られた知見や、室内・工学試験、文献等の様々な情報に基づく評価により、地層処分の成立性を示した。これを受け、深地層の研究施設では、未擾乱の状態から段階的に調査研究を進めながら、「第2次取りまとめ」で示したような地層処分に関連する様々な技術を体系的に実際の地質環境に適用して、その信頼性を確認していくことが重要である。あわせて、わが国固有の地質環境に対する理解を深めていくことも、深地層の研究施設の重要な役割である。

一方で、深地層の研究施設は、「学術研究の場であるとともに、国民の地層処分に関する研究開発の理解を深める場としての意義を有する」(「原子力長期計画」)ことから、深地層の研究施設につい

ては、一般の方々に実際の地下深部の環境を体験してもらい、地層処分やその研究開発に対する理解や信頼を深めていただく場としても整備していく。

② 2つの深地層の研究施設計画と研究の進め方

深地層の研究施設については、わが国の地質環境の多様性を考慮して、その特徴が異なる2つの計画を進めている。東濃地科学センターが岐阜県瑞浪市で進めている結晶質岩(花崗岩)を対象とした「超深地層研究所計画」と、幌延深地層研究センターが北海道幌延町で進めている堆積岩(泥岩)を対象とした「幌延深地層研究計画」である。わが国で地層処分の対象となる岩盤は大きく結晶質岩と堆積岩に分けることができ(分布は半々程度)、両者は地層処分にとって重要な地質環境の特性が明瞭に異なる。例えば、「超深地層研究所計画」が対象としている結晶質岩は緻密で硬く、地下水は割れ目を通して移動するが、「幌延深地層研究計画」が対象としているような堆積岩は結晶質岩に比べて軟らかく、粒子の隙間を通して地下水が移動する。なお、「超深地層研究所計画」が対象としている領域は内陸にあって、地下水は降水起源の淡水であるのに対し、「幌延深地層研究計画」の領域は海岸に近く、深部の地下水には相当の塩分が含まれることなども、2つの深地層の研究施設の重要な特徴である(図2.1-5)。

2つの深地層の研究施設計画は、いずれも大きく3段階からなり、全体で約20年の計画である。まず第1段階(地上からの調査研究段階)として、地表からの調査によって、地下の状況や坑道を掘削した際の変化を予測する。第2段階(坑道掘削時の調査研究段階)は、坑道を掘削しながら、第1段階の予測結果を確かめるとともに、坑道周辺の状況などを予測していく。第3段階(地下施設での調査研究段階)には、第2段階の予測結果を確かめながら、坑道を利用して様々な試験を行う(図2.1-2参照)。このように、調査研究を段階的に進めることにより、地下深部の地質環境についての理解を深めながら、これを体系的に調査・解析・評価するための技術基盤を整備していく。さらに、得られた地質環境情報に基づき、地下の研究坑道を設計・施工していくことを通じて、合理的な地下施設を設置するための工学技術を整備していく。また、得られた地質環境情報は、東海事業所において、「処分技術の信頼性向上」や「安全評価手法

		超深地層研究所 計画(瑞浪)* (結晶質岩/淡水系地下水)	幌延深地層 研究計画 (堆積岩/塩水系地下水)
深地層の科学的 研究	地質環境 特性	 <ul style="list-style-type: none"> 結晶質岩では主に亀裂を地下水が移動する→亀裂の分布の評価 淡水系地下水の水質形成メカニズム解明 	 <ul style="list-style-type: none"> 堆積岩では主に鉱物粒子の間を地下水が移動する→多孔質構造の評価 塩水系地下水の水質形成メカニズム解明
	地質環境の 長期安定性	<ul style="list-style-type: none"> 内陸部の隆起・沈降・侵食・地質的/水文系地下水における地震・断層影響の評価 	<ul style="list-style-type: none"> 沿岸部の隆起・沈降・侵食・堆積岩/塩水系地下水における地震・断層の影響の評価
	深地層の 工学技術の 基礎	<ul style="list-style-type: none"> 放射系岩盤は強度が高いため、鋼支保(部分的にコンクリート充填)での掘進を想定 	<ul style="list-style-type: none"> 放射系岩盤は強度が低いので、支保を入れた掘進を想定
地層処分研究 開発	処分技術	<ul style="list-style-type: none"> ホワイテシュル地下研究所(カナダ)：実規模トンネルシーリング試験 エスホ炭層研究所(スウェーデン)：人工バリアの実規模浸透試験 等 	<ul style="list-style-type: none"> オーバーバックの掘削・安置技術の開発、セメント系材料の人工バリアに対する影響試験 等
	安全評価 手法	<ul style="list-style-type: none"> グリムゼル貯留研究所(スイス)：掘削中の結核移行に対する粘土コロイド影響評価試験 等 	<ul style="list-style-type: none"> 地層処分システム(人工バリア+天然バリア)における物質移行試験 等

* 超深地層研究所計画においては、「地層処分研究開発」は実施しない。また、東濃地科学センターで進める「地質環境の長期安定性に関する研究」は、超深地層研究所計画とは別のプロジェクトとして、全国規模で実施する。

図 2.1-5 2つの深地層の研究施設計画と研究開発課題

の高度化)に関する研究開発を進める上での基盤情報となる。なお、幌延深地層研究計画においては、深地層の科学的研究に加えて、堆積岩における人工バリアの施工・設置技術の開発や性能評価研究など、地層処分研究開発をあわせて進めていく。結晶質岩における地層処分研究開発については、海外の地下研究施設を活用した共同研究として進めている(図 2.1-5)。

③ 各事業所・センターの役割と取組み状況

【東濃地科学センター】

深地層の科学的研究として、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を主とする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ている。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(正馬様用地)において、地上からの調査研究を進めてきたが、平成 14 年 1 月に瑞浪市との間で市有地(研究所用地)の土地賃貸借契約を締結し、研究坑道などの設置場所をこの研究所用地に変更した。これを受け、それまで調査研究を行ってきた正馬様用地で得られた成果や経験をもとに、研究所用地

内での地表からの調査研究を開始した。これまでに、地上物理探査、浅層試験調査(1 孔)を実施するとともに、掘削長 1,350m の深層試験調査を開始している。また、調査研究と並行して平成 14 年 7 月には用地の造成工事に着手した。平成 15 年度に研究坑道の掘削を開始し、平成 22 年度には地下 1,000m までの立坑等の施設を完成させる計画である。

【幌延深地層研究センター】

幌延深地層研究計画として、深地層の科学的研究と地層処分研究開発を進めている。平成 13 年 3 月より地表からの調査研究を開始するとともに、平成 13 年 4 月に「幌延深地層研究センター」を開設した。平成 14 年 7 月には、それまでに広域的な領域を対象として実施した空中・地上物理探査、地質調査、試験調査(2 孔;各 720m)の結果を踏まえ、研究所設置地区(今後の調査研究を中心的に行う 3km 四方程度の領域)を選定した。その後、平成 14 年度の調査研究として、研究所設置地区内の 3ヶ所において試験調査(各 520m)を実施するとともに、物理探査や環境調査などを行った。また、研究所を設置するための用地については、土地利用に係る許認可手続きを経て、平成 15 年 3

月に幌延町などから購入取得した。平成15年度には造成工事に着手し、平成22年度には、地下500m程度までの立坑等の施設を完成させる計画である。

【東海事業所(処分研究部)】

東海事業所では、エントリーとクオリティを中心に、地層処分研究開発として「処分技術の信頼性向上」と「安全評価手法の高度化」に関する研究開発を進めている。エントリーは、放射性核種を用いず、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有する。一方、クオリティは、放射性核種を用い、実験室レベルで地下深部を模擬した環境下での核種移行データ等を取得するための施設である。東海事業所では、「第2次取りまとめ」以降も幅広い地質環境条件を念頭にデータの取得やモデルの高度化などを進めてきているが、今後は、上述したように、深地層の研究施設計画等から得られる情報を活用して、モデルや評価手法の実際の地質環境への適用を検討していくことが重要となる。そのため、従来より進めている海外の地下研究施設における共同研究に加えて、2つの深地層の研究施設計画などから得られる情報を活用した検討を、東濃地科学センターや幌延深地層研究センターとも連携して実施しつつある。今後の深地層の研究施設計画等の進展にあわせ、さらに実際の地質環境条件を対象とした研究に重点化していく計画である。

(4) 研究開発成果の集約に向けた取組み

地層処分技術の信頼性向上を目指した2つの研究開発目標を達成するためには、実際の地質環境を対象とした各分野の情報を体系的に取扱いながら、バランスよく研究開発を進めることが重要となる。そのため、東海事業所を中心に進めている地層処分研究開発においては、上記のように深地層の研究施設計画等の成果を活用して、設計・安全評価手法の実際の地質環境への適用性についての検討を進めつつある。この検討結果を調査側へフィードバックすることにより、地質環境の理解度と安全評価上の感度や必要な調査量との関係などを検討することができる。これらの検討は、調査の進展に応じて、すなわち得られる地質環境情報が段階的に詳細化されるのに応じて、繰り返し進めることが重要である(図2.1-6)。このような過程を通じて、地質環境を合理的に調査・評価す

る技術や、限られた地質環境情報あるいは段階的に得られる情報に基づいて効率的に設計や安全性の検討を進める手法などを整備、体系化していく。これにより、地層処分技術全体としての適用性を確認することができる。現在、このような分野間の連携や体系化に向けた具体的な方策について検討を進めているところである。また、情報伝達を効率的に進めつつ、品質や透明性を高める観点から、情報とその流れを体系的に集約・管理できるツールの開発を東海事業所にて進めている(図2.1-6)。



図 2.1-6 分野間の連携と集約のイメージ

研究開発の成果は、処分事業と安全規制の双方にとっての基盤的な技術や情報として寄与できるよう、双方のニーズやスケジュールを勘案しつつ、段階的に取りまとめて公表していく。処分事業と安全規制の主要なマイルストーンに先行する形で深地層の研究施設計画を段階的に進め、各段階の節目に着目して、地層処分技術に関する研究開発全体の成果を取りまとめる予定である(図2.1-7)。当面は、平成10年代後半を目途とされる概要調査地区の選定とそれに続く概要調査や、安全審査基本指針の策定への反映を念頭において、地上からの調査研究段階における成果を中心として、平成17年度頃を目途に成果を取りまとめる計画である。内容的には、2つの深地層の研究施設計画等における地上からの調査研究や設計・安全評価手法の適用性検討などの実際の地質環境に対する一連の地層処分技術の適用事例、幅広い地質環境も考慮しつつ進めている地層処分システムの長期挙動に関わる様々な現象の理解や個々のデータベース、モデルや評価手法の改良・高度化の進展をまとめることを考えている。

なお、個別成果については技術資料や論文としてその都度報告するとともに、全体の進捗や成果については年度毎に成果報告書（平成 13 年度報告：サイクル機構、2002）として公開していく。

このような成果の積極的な公表に加え、計画や成果の外部専門家によるレビューの実施、学会等の外部機関の活動への積極的参加などを通じて、研究開発の信頼性や透明性の向上を図っていく。

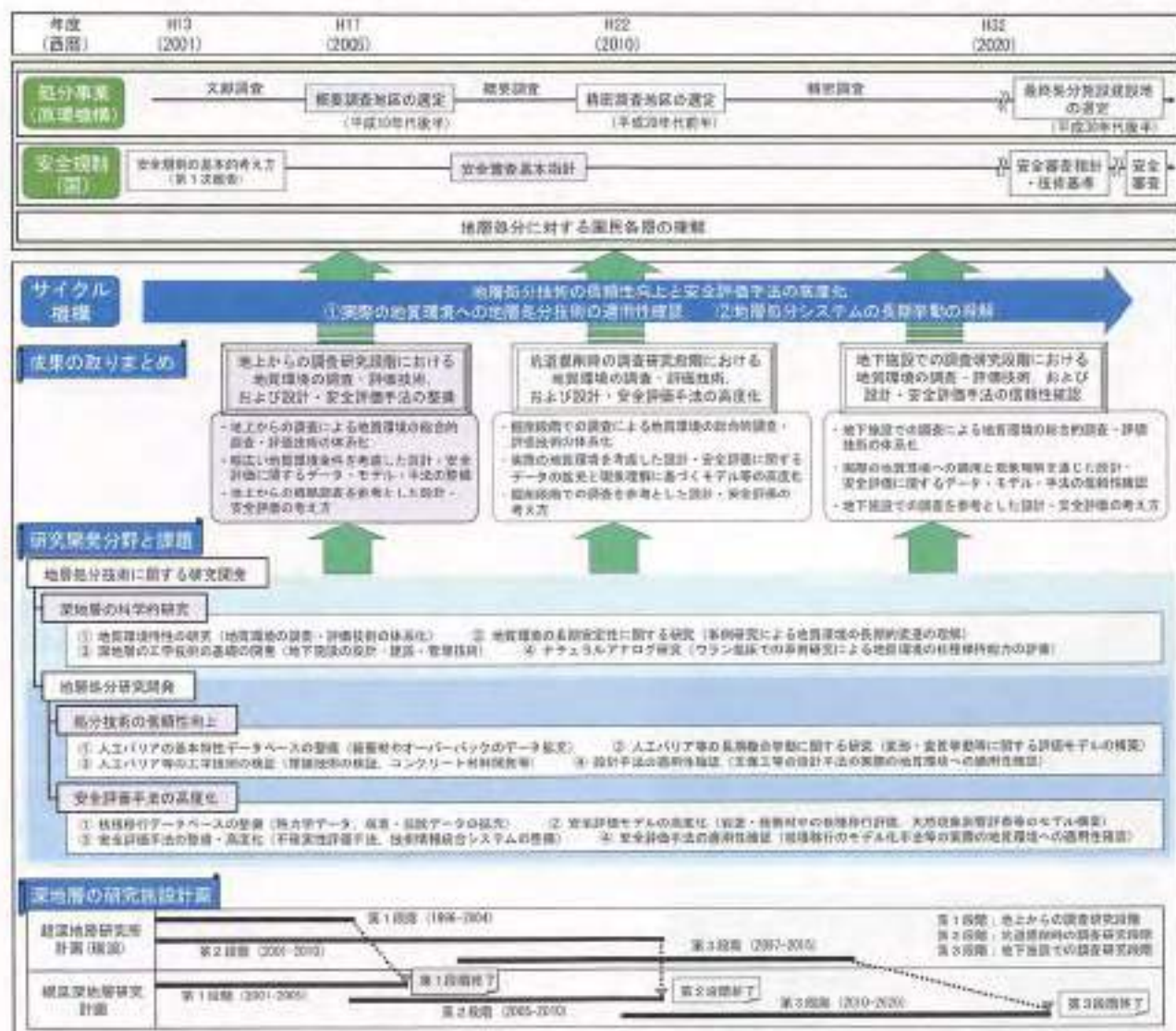


図 2-1-7 成果の取りまとめと反映先

参考文献

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)。平成 12 年 11 月 6 日。

原子力安全委員会(2002)：高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について。平成 14 年 9 月 30 日。

原子力委員会 (2000a)：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。

原子力委員会 (2000b)：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。平成 12 年 10 月 11 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 TN141D 99-020~024。

核燃料サイクル開発機構(2002)：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発—平成 13 年度報告一。サイクル機構技術資料、JNC TN1400-2002-003。

核燃料サイクル開発機構 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 TN1400-2001-008。

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。平成 13 年 6 月。

2.2 各研究開発分野における計画と成果の概要

2.2.1 深地層の科学的研究

地層処分において地質環境には、①廃棄物を物理的に隔離すること、②人工バリアに適した設置環境を提供すること、および③核種の移行を遅延する天然バリアとしての働きが期待されている。これらの役割を果たすために地質環境には、まず長期にわたって十分に安定であること、ついで人工バリアの設置環境および天然バリアとして、岩盤や地下水の物理的・化学的性質が適切であることが求められる（「第2次取りまとめ」）。そのためには、地震・断層活動、火山活動、隆起・侵食、気候・海水準変動といった天然現象から、地下水の流れや水質、岩盤の熱や力学に関する特性、岩盤中での物質の移動現象など、地球科学の幅広い分野にわたる研究が必要である（図2.2-1）。

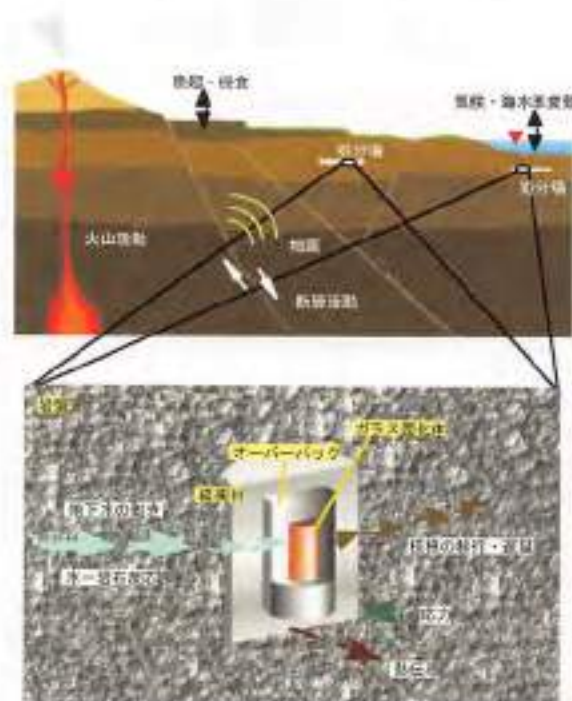


図 2.2-1 地層処分にとって重要な天然現象と地質環境の特性

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

1) 「第2次取りまとめ」以降の研究課題

「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（2.1.2）項参照）。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」）などを挙げるができる。

これら国の報告書で示された課題を踏まえ、以下の4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、研究開発を進めている（「全体計画」）。

① 地質環境特性に関する研究

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

② 地質環境の長期安定性に関する研究

火山活動、地震・断層活動、隆起・侵食などの天然現象の活動の特徴や影響の程度を明らかにし、地質環境の将来における変化を予測評価する研究

③ 深地層における工学技術の基礎の開発

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

④ ナチュラルアナログ研究

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

これら4つの課題項目は、表2.2-1に示すよう

に東濃地科学センターおよび幌延深地層研究センターにおいて、5つのプロジェクトとして取り組んでいる。

表 2-2-1 4つの課題項目とプロジェクト

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	130km ² 超の調査領域	地層環境の長期安定性に関する研究	地層環境の長期安定性に関する研究
① 地質環境特性に関する研究	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	地質環境の長期安定性に関する研究				○ (日本全国)	△ (幌延地層)
③ 深地層における工学技術の開発	深地層における工学技術の開発		○			○
④ ナチュラルアナログ研究	ナチュラルアナログ研究			○		

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

上記①の「地質環境特性に関する研究」では、結晶質岩を対象とした研究を東濃地科学センターにおける「広域地下水流動研究」および「超深地層研究所計画」として、また、堆積岩を対象とした研究を幌延深地層研究センターにおける「幌延深地層研究所計画」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、図 2.1-6 に示した広域スケールの調査研究に該当し、東濃鉱山周辺の 10km² 四方程度の領域を調査の対象（研究実施領域）としている。一方、「超深地層研究所計画」は、同図の施設スケールと坑道スケールの調査研究に該当する。超深地層研究所計画の研究所用地と正馬様用地は、この広域地下水流動研究の研究実施領域の中に位置しており、双方の研究成果を有機的に組み合わせることにより、広域スケールから坑道スケールに至るまでの地質環境を体系的に調査・評価するための技術が整備される。一方、堆積岩を対象とした広域スケールから坑道スケールの調査研究は、「幌延深地層研究所計画」の中で、一元的に進めていく。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。

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。それらは、原研機構が概要調査などを進めるうえでの技術基盤となるものである。

②の「地質環境の長期安定性に関する研究」は、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データベースの整備を進める。また、幌延深地層研究センターでは、幌延町の地域特性に着目して地殻・断層活動などの事例研究を実施する。

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

④の「ナチュラルアナログ研究」は、東濃地科学センターにおいて、東濃鉱山における調査試験研究の一つとして重点的に実施している。本研究では、天然のウラン鉱床を活用して、地質環境中の物質の長期的な移行・遅延挙動を解明するための知見を整備する。

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整備していく。

2) 地層科学研究の現状

東濃地科学センターおよび幌延深地層研究センターにおいて実施している地層科学研究の現状を平成 14 年度の成果を中心に、以上にまとめる。

(1) 東濃地科学センター

東濃地科学センターにおいては、2.2.1) 項において示した 4 つの課題項目のうち、地質環境特性に関する研究に該当する広域地下水流動研究と超深地層研究所計画、ナチュラルアナログ研究を中心とした東濃鉱山における調査試験研究、および地殻や火山活動などの天然現象を対象とした地

皆環境の長期安定性に関する研究の 4 つのプロジェクトを実施している。また、課題項目の 1 つである深地層における工学技術の基礎の開発は、超深地層研究所計画において進めている。

① 研究の進め方

広域地下水流動研究と超深地層研究所計画は、東濃地層を事例に地層処分にとって重要な地質環境特性を段階的に理解するための体系的な技術基盤を開発・整備するとの共通した大きな目標を有しているため、双方の成果を有機的に組み合わせつつ調査研究を進めている。現在、「全体計画」および図 2.1.6 で示した地変からの調査研究に該当する広域と施設の 2 つのスケールを、表 2.2-2 に示すように、リージョナル・ローカル・サイト・ブロックの 4 つのスケールに細分化している。そのうち、リージョナルとローカルスケールを広域地下水流動研究が、サイトとブロックスケールを超深地層研究所計画が担っている。これらのスケールは、地層処分研究開発における「安全評価手法の高度化」の基盤となる地質環境特性に関わる情報を体系的に整備する観点から設けたものである。なお、坑道スケールについては、今後、超深地層研究所計画の第 2 段階の計画を具体化する中で、必要に応じてスケールの細分化などを検討する。

表 2.2-2 地質環境のモデル化の目標とスケール (安全評価手法の高度化への反映の観点)

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

これら 2 つのプロジェクトにおいては、調査の進展に伴う情報量の増加に応じて、地質環境特性に関わる理解度や調査の達成度を順次評価しつつ次の調査または段階へ移行するかどうかを判断することが重要との考え方より、図 2.2-2 に示すループ(繰り返しアプローチ)を基本に調査研究を進めている。

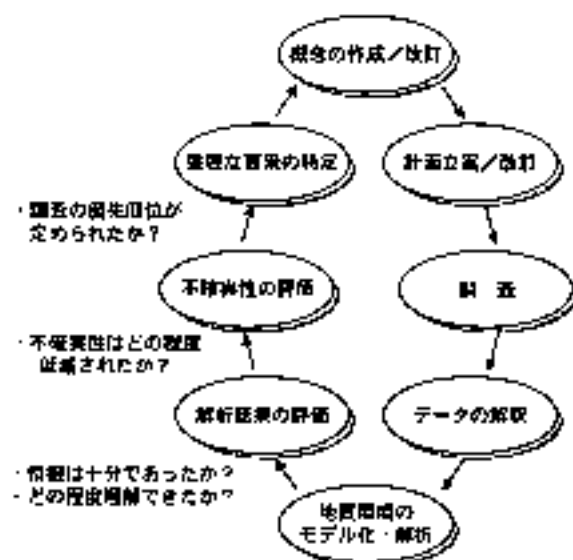


図 2.2-2 調査研究の繰り返しアプローチ

地質環境の長期安定性に関する研究については、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全国の中から選り出して事例研究を進めている。

また、東濃鉱山における調査試験研究においては、クラン鉱床を利用したナチュラルアナログ研究のほかに、堆積岩を対象とした岩盤の力学的安定性に関する試験研究と坑道周辺の地質環境に関する試験研究を実施している。

② 広域地下水流動研究

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

本研究は、東濃鉱山周辺の 10 km 四方程度の領域を調査の対象として進めている。本領域では、後期白亜紀の上坂花崗岩を基盤として、第三紀堆

積岩の瑞浪層群がこれを覆って分布している。本研究は、表 2.2-2 に示したスケール設定のうち、リージョナルとローカスケールの役割を担っている。

平成 13 年度までの調査研究において、深度 1,000 m までの地下水や岩盤の特性を調査・観測するための機器や手法を整備した。また、空中・地表および試錐孔を利用した調査により得られたデータを用いた予測解析などにより、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、大局的には地形に沿って流動していることが確認されつつある。さらに、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、領域北部（湖養域）から中央部の地下水は、浅部では中性かつ酸性性の Na-Ca-HCO₃ 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-HCO₃ 型であること、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などの知見を蓄積してきた（サイクル機構、2002a）。

平成 14 年度は、これらの成果を踏まえつつ、リージョナルスケールのモデル化の一環として、文献情報を基にスケールの異なる複数のモデルを

用いて、ローカスケールのモデル化領域および境界条件を設定する方法について検討した。その結果、図 2.2-3 に解析結果の一例を示すように、ここで対象とした領域では、標高 -2,000m 付近を境に流動系が異なること、および標高 -2,000m 以浅では、土岐川と木曾川の流域境界の尾根部を湖養域に土岐川へ流出する流動系であることなどが予測された（稲葉ほか、2003）。

また、ローカスケールのモデル化の一環として、地下水流動や地下水の水質を規制すると考えられる大規模な断層や割れ目の同定や分類、およびその分布や地質学的・水理学的特性を把握するための技術の整備を目的に、研究実施領域（10km 四方程度）においてリニアメント調査、地表調査、物理探査（反射法弾性波探査）、および瑞浪超深地層研究所用地近傍の既存試錐孔（DH-2 号孔）を利用した VSP 調査や水理試験を実施した。その結果、断層など連続する規模の大きな構造の分布を推定するとともに、水みちとして機能する構造の地質学的特性と水理学的特性を把握した。また、これらの調査の一環として DH-2 号孔で実施した電気伝導度検層が他の検層に比べてより多くの流入および流出点を検出でき、水みち検出技術として優れた方法であることなども明らかとなった。



- 1) 上記 4 つのスケールの解析結果は、左図が研究所用地の地下（モデル底部境界標高-10mまで）の領域を通る地下水の流動経路の予測結果（流線）を示す。一方、右図はそのうち標高-2km以浅の領域を通る流線のみを取り出して示している。
- 2) 図中の線で着色した部分は、土岐川の流域範囲を示す。
- 3) 標高-2km以浅の研究所用地の地下水は、各モデルの解析結果によると研究所用地の北部から湖養し、南側に位置する土岐川に流出する流動系が見て取れる。ただし、20kmモデルではその他に東部から湖養する流動系も認められる。

図 2.2-3 地下水流動解析結果（研究所用地を通過する地下水の流線）

なお、DH-2号孔における水理試験を利用した予察的な採水調査の結果、瑞浪超深地層研究所用地周辺の花崗岩中の地下水は、Na、Clイオンに富むことが明らかとなった。

今後は、平成10年代後半を目途とされる概要調査地区の選定とそれに続く概要調査や、安全審査基本指針の策定への反映を念頭において、広域地下水流動研究で得られた成果を一連の体系化された調査技術の事例および知見として取りまとめる。このために、今後の本研究における重要な課題として、断層の分布および水理特性を調査する技術の整備、地下水の流れと水質変化をあわせて表現できるモデルの開発、図2.2-2に示した繰り返しアプローチの実践による一連の調査の進め方の妥当性の評価などを行う。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も留意しながら、試錐孔を利用した地下水の水圧や水質のモニタリングを継続して、経時的な変化を追跡する(サイクル機構, 2002b)。

③ 超深地層研究所計画

超深地層研究所計画は、2.2.1 1)項で示した課題項目①の一つに位置づけられる「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」と、課題項目③に該当する「深地層における工学技術の基盤の整備」を全体目標とした約20年の計画である(サイクル機構, 2002c)。全体を3つの段階(地表からの調査予選研究段階、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。

本計画では、平成8年度より、岐阜県瑞浪市明世町のサイクル機構が保有する用地(正馬様用地)において、地表からの調査を実施してきたが、平成14年1月、瑞浪市との間で市有地に関する賃貸借契約を締結し、研究坑道などの設置場所を市有地(瑞浪超深地層研究所用地、以下「研究所用地」)へ変更することとした。新たな研究所用地は、正馬様用地の約2km東方の同じ明世町内にあり、両者は土岐花崗岩体という同一の花崗岩体上に位置しているため、継続性をもって調査研究を進めることができる。瑞浪市との賃貸借契約の締結を受け、平成14年に研究所用地およびその周辺において第1段階の調査研究を開始した。また、平成14年7月には瑞浪超深地層研究所の

建設に着工し、平成15年3月までに敷地の造成工事が完了した。一方、正馬様用地は、これまで蓄積してきた月吉断層やその周辺の地質環境の情報や試錐孔などの研究資源を利用した要素技術開発の場として活用していく。

i) 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備

本計画は、地表からの調査研究として、表2.2-2に示したスケール設定のうち、サイトとブロックの2つのスケールの役割を担っている。

平成14年度においては、それまでの知見や情報を基に、研究所用地およびその周辺の地質・地質構造、水理、地下水の地球化学特性などの地質環境特性を把握し地質環境モデルを構築するために、反射法弾性波探査(図2.2-4)や花崗岩を被覆する堆積岩を対象とした浅層試錐調査(図2.2-5)などを実施した。



図2.2-4 反射法弾性波探査の実施風景

その結果、堆積岩および基盤花崗岩上部の地質・地質構造(不整合面の形状、チャンネル構造、堆積構造、基盤花崗岩風化部の分布など)、水理特性(透水係数、間隙水圧分布)および地下水の水質を把握した。また、断層や割れ目帯の分布特性(連続性、幾何学的性状など)を評価した。これらの調査結果で得られた特徴的な点として、堆積岩の透水係数分布は、正馬様用地などで得られた結果に比べ相対的に高く、堆積岩中の間隙水圧分布が地形と調和的でないこと、堆積岩下部および花崗岩上部の地下水は正馬様用地での調査結果などと大きく異なりNa、Clイオンに富む水質であることが明らかとなった。このような調査結果は、研究所用地周辺では、堆積岩と深層の花崗岩中での地下水流動が大きく異なること、また、地下水の水質形成機構として、花崗岩深部に海水と



図 2.2-5 研究所用地周辺の試験孔の配置

同様の高塩素濃度地下水が存在し、その一部と堆積岩下部および花崗岩上部の地下水が混合している可能性を示唆している。

一方で、正馬様用地周辺での地質環境特性に関する情報などを活用したローカスケールの水理地質構造のモデル化・解析の一環として、平成 13 年度に引き続き複数のモデル化手法を適用して、地下水流動解析結果（移行時間・移行経路など）の不確実性の幅、および地下水流動を把握する上で重要な因子について検討を進めてきた。この結果、移行時間や移行経路に大きく影響している因子として、岩盤の透水係数の設定の違いや断層などの透水異方性の影響を新たに抽出した。平成 13 年度までに断層などのモデル化方法、境界条件および有効空隙率の設定方法の 3 つを大きな影響因子として抽出していたが、平成 14 年度の検討により抽出した 2 つの因子も、これら 3 つの因子と同じように影響が大きいことが明らかとなった（澤田ほか, 2003；三枝ほか, 2003）。

今後は、地表からの調査によるサイトスケールおよびブロックスケールの調査研究を引き続き実施する。サイトスケールの調査研究については、研究坑道の掘削が本格化する平成 17 年度までに一旦取りまとめる計画である。なお、これらの調

査研究の一環として、研究所用地において断層などの不連続構造の分布や性状および深部地質環境の特性を効率的に把握するために、コントロール試験による掘削長 1,350 m の試験調査（MIZ-1 号孔）の計画を策定し（Nakano et al., 2003）、平成 15 年 3 月より掘削を開始した。

ii) 深地層における工学技術の基盤の整備

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

平成 14 年度は、以上の点を踏まえて、第 2 および第 3 段階で行う調査研究が合理的かつ効率的に実施できるように研究坑道の設計および施工計画を具体化するために、①計画結果の設計・施工計画へのフィードバック技術、②研究および施工技術の品質を確保する技術、③突発湧水に対する掘削・施工対策技術、④研究坑道における地震動評価、⑤適切な防災計画と坑内環境の情報管理などに関わる安全対策、および⑥研究坑道の設計と施工計画の策定の 6 項目について検討を進めた。

平成 14 年度の主な成果として、上記③の一環として実施した立坑の健全性評価において、動的解析結果との比較により、応答震度法による等価震度の算定においては最大せん断力による算定を用いることが適切であると判断できた。また、この等価震度を用いた三次元の有限要素法による立坑掘削の影響と地震時の影響の両方を考慮した静的解析により、主立坑の地震時の健全性が確認できた。さらに、上記⑥の一環として実施した立坑や水平坑道における三次元の有限要素法による空洞安定性解析により、立坑の各断面における支保を設定するとともに、安定度を算出した。

このような検討結果と平成 13 年度に策定した具体的な研究坑道のレイアウト案に基づき、実際に適用する施工技術や掘削に必要な機器設備を選定し、今後の具体的な施工計画を決定した。

今後は、地表からの調査において取得される情

報を反映して第3段階での試験計画を具体化しつつ、設計および施工計画を見直す予定である。また、第2、第3段階において、新たな施工対策技術や工学材料などの改良・開発、さらに花崗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技術に関する研究を実施する。

④ 東濃鉱山における調査試験研究

東濃鉱山における調査試験研究は、ウラン鉱床に掘削された既存の地下坑道を利用して、昭和61年度に開始した。深度約150 mまでに分布する新第三紀堆積岩（礫層群）が主な研究対象である。本研究は、以下に示す2つを目標として、東濃鉱山の既存施設や東濃ウラン鉱床などを活用して進めている（サイクル機構、2002d）。

- ・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

上記2つの目標達成に向けて、①ナチュラルアナログ研究、②岩盤の力学的安定性に関する試験研究、および③坑道周辺の地質環境に関する調査研究の3つの課題を設けて進めている。

平成14年度の主な成果として、ナチュラルアナログ研究において、地下水-鉱物-微生物システムの安定性についての長期的な評価を行うため、これらの反応に関わる物質の供給量と存在量に関する調査を実施した結果、現在の水理環境が続く場合、図2.2-6に示す堆積岩中の水-鉱物-微生物システムが今後数百万年間にわたって継続し得ることが示唆された（岩月ほか、2009）。

岩盤の力学的安定性に関する試験研究においては、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とした双設坑道安定性評価として、東濃鉱山北延坑道を例に予測解析を実施した。その結果、坑道間距離が2.5 m以下になると坑道間の局所安全率が1.5となり塑性領域が発生する可能性が高いことがわかった。

坑道周辺の地質環境に関する調査研究においては、平成13年度に引き続き、坑道周辺の水理特性調査として、観測に基づく坑道周辺の間隙水圧の三次元的な分布と坑道掘削による変化の程度の把握、および不飽和領域の原位置計測手法の開発

に関する調査研究を継続した。このうち、岩盤の不飽和領域を把握するために開発したTDR（Time Domain Reflectometry）法を適用した試験装置により岩盤の比誘電率が正確に求められること、TDR法により得られた比誘電率の計測結果と孔間での連続波レーダーによる比誘電率の計測結果は同じ傾向を示し、両者を組み合わせることで坑道周辺の水理特性を面的に把握できる可能性が示された。



図 2.2-6 ウラン鉱化帯周辺で見られる酸化還元プロセス

本調査試験研究は、今後、ナチュラルアナログ研究を主体とし、その他の課題については、超深地層研究所計画および幌延深地層研究計画の進捗に応じて、それらに調査研究の重点を移行していく。

⑤ 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、日本列島で生起する天然現象のうち、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・侵食、気候・海水準変動に着目して、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と地質環境への影響を評価することを目的に実施している。

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などが明らかとなり、わが国においても長期的に安定とみなせる地質環境が存在するとの一般的な見通しを示すことができた（「国による第2次取りまとめ評価報告書」）。

平成13年度より、天然現象の評価方法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・解析技術の開発を実施している。

平成14年度は、平成13年度に引き続き、三次元地形変化モデルの開発の一環として隆起・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技術の開発、地下構造との関係が比較的不明確な西南日本地域を事例対象とした震源断層や地下深部のマグマ溜まりなどの探査技術の開発に重点を置いて研究を実施した。

地形変化プロセスのシミュレーション技術の開発においては、プログラムを設計するとともに、図2.2-7に一例を示すように、東濃地域の日吉川流域を事例に12万年間のシミュレーションを試行した（Nogami et al., 2002）。その結果、プログラムの開発コンセプトや機能の妥当性を概ね確認できた。



図2.2-7 東濃地域の日吉川流域を対象とした12万年間の侵食と堆積量の予測結果（寒色系が侵食、暖色系が堆積を示す）

また、地下深部のマグマ溜まりなどの探査技術の開発として、紀伊半島南部（本宮地域）を対象にMT法電磁探査による深部比抵抗構造調査、重力構造解析などを実施した。紀伊半島の地熱地帯の熱源については、地殻下部にマグマが存在する可能性も指摘されていたが（Wakita et al., 1987）、今回実施したMT法による深部比抵抗構造調査の解析の結果からは（図2.2-8）、地殻下部にはマグマと考えられる顕著な低比抵抗部は存在しないことが示された（上原ほか, 2003）。

中国地方を事例対象とした震源断層の抽出技術に関する研究においては、既存の判読技術に加え地下震源断層に対応する可能性のあるリニアメントの空中写真判読を行い、地震活動などとの関連性について検討した。その結果、震源分布の集中帯と活断層帯および判読したリニアメントの方向は調和的であることなどが確認できた。

今後の地質環境の長期安定性に関する研究については、概要調査地区などの選定や国の安全規制に関わる指針・基準などの策定への反映を念頭に置き、三次元地形変化モデルや火山活動の長期予測モデルなど将来の天然現象を予測するための技術（長期予測技術）の開発、震源断層や地下深部のマグマ溜まりなどの探査技術などを包含した体系的な調査・評価手法（地層変動調査技術）の開発を進めるとともに、安全評価の信頼性を向上させるための知的基盤・研究情報基盤の整備を図る。

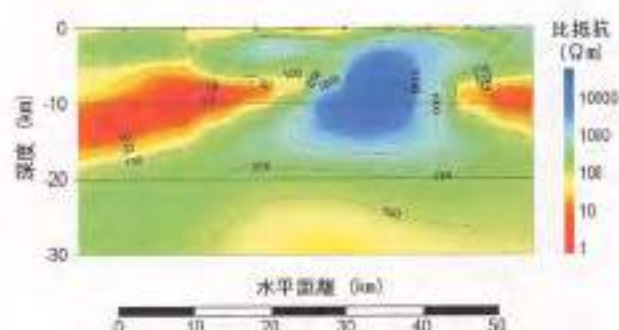


図2.2-8 紀伊半島における深部比抵抗構造

(2) 幌延深地層研究センター

幌延深地層研究センターにおいては、堆積岩を対象とした深地層の研究施設計画として、幌延深地層研究計画を進めている。本計画については、平成12年11月に北海道および幌延町との間で研究に関する協定を締結し、翌年3月に地表からの調査に着手した。本計画は、東濃地科学センターの超深地層研究所計画と同様、約20年の計画で

あり、全体を3つの段階（地上からの調査研究段階（第1段階）、坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階）、地下施設での調査研究段階（第3段階））に分けて進める（サイクル機構、2001）。

① 研究の進め方

本計画の第1段階においては、堆積岩を対象に現在の地質環境調査技術を適用し、地表から地下深部までの地質環境を調査・把握できることを具体的に提示するとともに、これにより地質環境調査技術の適用性を確認することを目的としている。具体的には、地表から行う調査研究により取得されるデータに基づき地質環境モデル（地質構造モデル、地下水の水理モデル、地下水の地球化学モデル、岩盤力学モデル）を構築し、調査の進捗に応じて、逐次これらのモデルの更新を行う。また、地下施設建設による地質環境の変化の予測解析を行い、これらを第2段階で得られる実測データを用いて確認する。これらにより、一連の調査研究で用いた調査機器、モデル化手法を含めた体系的な地質環境調査技術を確立する。

幌延町には、研究の対象となる新第三紀の堆積岩が広く分布しており、南北方向の軸を持つしゅう曲構造や南北系の断層構造が発達し、第四紀以降の新しい時代の活動（断層活動や地盤の傾動など）も認められる。また、地下深部には、塩水系の地下水が存在することや、地下水にガスが溶存していることが確認されている。幌延深地層研究計画では、このような地質環境の特徴を活かした研究を進めていく。

幌延深地層研究計画においては、表2.2-1で示した地層科学研究の課題項目のうち、地質環境特性に関する研究、地質環境の長期安定性に関する研究（幌延町内およびその周辺を対象）および深地層における工学技術の基礎の開発の3項目についての調査研究を進めている。なお、地質環境特性に関する研究については、課題をより具体化する観点から地質環境調査技術開発と地質環境モニタリング技術の開発の2つの項目に分けている。また、本計画においては、地層処分研究開発として、「処分技術の信頼性向上」および「安全評価手法の高度化」の2つの課題についても研究開発を進めている。

② 研究の現状

平成12年度末から14年度上期にかけて、研究所設置地区の選定に資することを第1目的とし、空中・地上物理探査、地質調査および試錐調査（HDB-1,2孔：深度720m）を実施した。これらの調査結果を踏まえ、研究対象となる地層や地下水が存在し、安全に地下施設を建設できる環境であることなどの基本的な要件に照らし、研究所設置地区を選定した（サイクル機構、2002e）。地下施設を含む施設建設を行う研究所設置場所については、研究所設置地区の中から幌延町市街地の北約3kmに位置する土地を選定し、幌延町などから購入した。

平成14年度下期には、地質環境調査技術開発として、地質環境のモデル化に関する情報取得などを目的に、反射法弾性波探査、地表地質調査、表層水理調査、および3本の深層試錐調査（HDB-3,4,5孔：深度520m）（図2.2-9）を実施した。これらの調査結果の特徴的な点として、HDB-1,2孔の調査で得られた結果（サイクル機構、2002f）と比較して、透水性の高い岩盤（透水係数： 10^{-3} m/s オーダー）が存在すること、塩水系地下水のほか、淡水系の地下水が存在することなど、地質環境が不均質であることを示す情報が得られている（図2.2-10；サイクル機構、2003）。



図2.2-9 試錐調査現場（HDB-4孔）

一方、地質環境モニタリング技術の開発に関しては、平成13年度に掘削したHDB-1孔に長期モニタリング機器を設置し、水圧の観測を開始した。また、地質環境の長期安定性に関する研究においては、地震観測用の地震計、地殻変動観測用のGPS（Global Positioning System）観測機器、NT観測機器を設置して観測を継続している。深地層における工学技術の基礎の開発においては、それまでに得られた地質環境特性に関わる情報を基に、

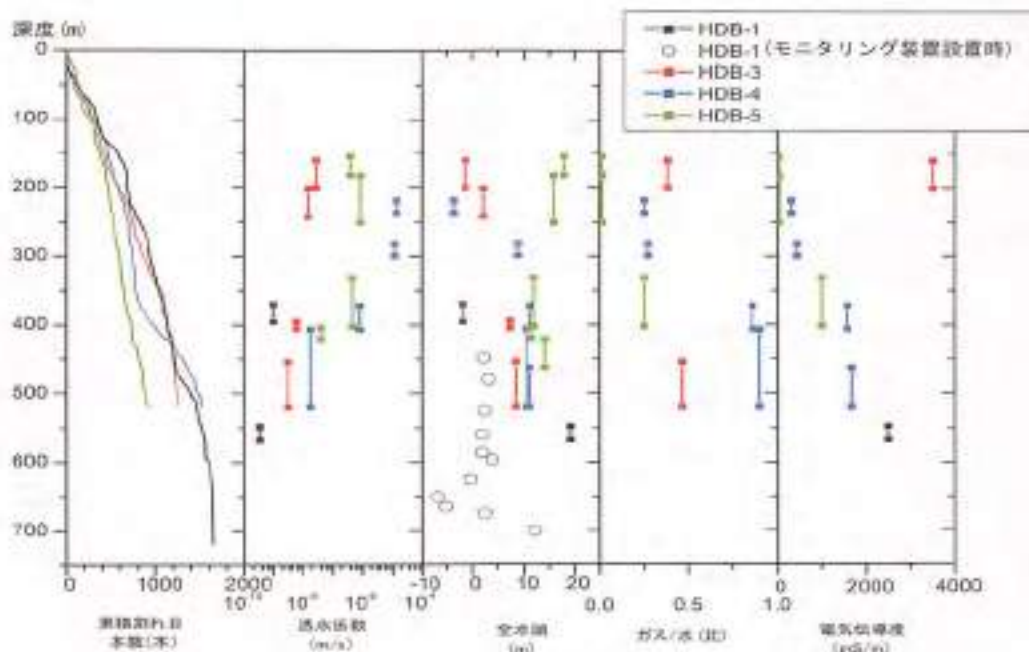


図 2.2-10 試験錐孔 (HDB-3, 4, 5) における試験結果の例



図 2.2-11 環境調査の例
(フィールドサイン調査)

地下施設の基本レイアウトおよび基本的な施工計画を策定した。

地上施設については、建設用地造成工事の基本設計および一部分の実設計を行った。また、研究所設置場所を対象に地下施設の基本レイアウトなどに基づき研究管理棟およびコア倉庫・ワークショップ棟について、配置・構造など基本計画の検討を行った。

さらに、研究所設置地区において環境調査を実施した (図 2.2-11)。

今後は、第 1 段階の目標である以下の 3 つを達成すべく調査研究を進めていく。

- ・地表から地下深部までの地質環境データの取得
- ・地表から地下深部までの地質環境のモデル化

・地下施設の建設に伴う地質環境の変化の予測

なお、施設の建設に関しては、平成 15 年度夏頃に研究所用地の造成工事を開始し、平成 22 年度の地下施設完成を目指し計画を進めていく。

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書。動力炉・核燃料開発事業団技術資料, JNC TN7020 98-001。
- 稲葉 薫, 三枝博光, 中野勝志, 小出 馨 (2003) : 深部地下水の流動系を把握するためのモデル化領域とその境界条件の設定に関する検討, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 359-364。
- 岩月輝希, 村上由記, 長沼 毅, 濱 克宏 (2003) : ウラン鉱床の長期保存に関わる岩盤の酸化還元緩衝能力—東濃地域における天然環境の水—鉱物—微生物システムの研究例—, 地球化学, 37, pp. 71-82。
- 核燃料サイクル開発機構 (2001) : 軽延深地層研究計画平成 14 年度調査研究計画, サイクル機構技術資料, JNC TN1410 2001-004。
- 核燃料サイクル開発機構 (2002a) : 東濃地域における地質環境特性に関する研究—地表からの調査研究の考え方と進め方—, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2002-008。
- 核燃料サイクル開発機構 (2002b) : 広域地下水流動研究年度計画書 (平成 14 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2002-004。
- 核燃料サイクル開発機構 (2002c) : 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 (2002d) : 東濃鉱山における

- 調査試験研究年報計画書 (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 (2002-) 軽減深地層研究計画平成 13 年度調査研究結果と研究所設置地区選定, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2002-017.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002f) 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発一平成 13 年度報告, サイクル機構技術資料, JNC TN1410 2002-003.
- 核燃料サイクル開発機構 (2003) 地層処分技術に関する研究開発報告会 処分技術の信頼性を支える基盤の強化に向けて 予稿集, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2002 019, pp. 15-22.
- Makino, K., Anano, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Saegusa, H., Ikoma, K., Kumazawa, N., Iwatsuki, T., Yabuuchi, S. and Sato, T. (2003) Working program for MJZ-1 borehole investigations, JNC Tech. Rep., JNC TN7400 2002 008.
- Nogami, Y., Fujiwara, O. and Sangsri, T. (2002) : Simulation of a small drainage basin during the future of 120,000 yrs, Trans. Jap. Geomorph. Union, 21, pp.105-106. (Abst. Japan-China (Yunnan) Geomorphological Conference)
- 三枝博光, 稲葉 成, 深川 淳 (2003) 断層の透水異方性に着目した水理地質構造のモデル化・地下水流動解析—東濃地域を例として—, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 371-376.
- 澤田 淳, 三枝博光, 中野勝志, 大澤英昭 (2003) 複断層のモデル化手法を用いた地下水流動挙動の不確実性について, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 161-166.
- J.原大二郎, 石丸恒存, 榎瀬充晃, 小川康雄, 梶山恒臣 (2003) : NT 社におけるフリーリモートリファレンス処理の効果と紀伊半島南部地域の深部比抵抗構造, 応用地質, (印刷中)
- Vakuta, H., Sano, Y. and Mizuno, Y. (1997) : High ^3He emanation and seismic swarms observed in a nonvolcanic, forearc region, Jour. Geophys. Res., 92, pp. 12539-12546.

2.2.2 処分技術の信頼性向上

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

1) 今後の研究開発課題と進め方

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

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

「処分技術の信頼性向上」では、上述したような個別／連成現象の評価手法および関連する工学技術の信頼性向上を目指し、以下の4つの課題を設定して研究開発を進めている（図2.1.3参照）。

・人工バリアの基本特性データベースの整備

オーバーバックおよび緩衝材の基本特性データの拡充を図り、長期挙動評価の信頼性向上に資するとともに、技術基準の基盤となる性能保証に係わる知見などを整備する。

・人工バリア等の長期複合挙動に関する研究

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

・人工バリア等の工学技術の検証

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

・設計手法の適用性確認

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

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

2) 各研究開発課題の計画および成果の現状

以下に研究開発項目毎に計画および平成14年度の成果の概要について示す。

(1) 人工バリアの基本特性データベースの整備

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

① オーバーバックの基本特性

【炭素鋼オーバーバックの腐食挙動に関する研究】

炭素鋼オーバーバックに関しては、「第2次取

りまとめ」における評価の長期的な信頼性を確認するための検討を継続し、長期試験概念の検討や腐食生成物による腐食への影響、支保工材料のセメントによる影響、緩衝材仕様の腐食への影響を把握するための検討を行った。

腐食生成物の影響としてマグネタイト共存下での炭素鋼の腐食挙動に関するこれまでの研究を基に現状の知見を整理し、課題の抽出を行った(柴田ほか, 2003)。今後は特にベントナイト共存系での腐食機構、長期挙動を把握することが課題である。セメントの影響としては、高 pH 環境での腐食試験データを取得し、図 2.2-12 のように高 pH 環境における炭素鋼の孔食係数は弱アルカリ性環境でのそれと同程度であることを確認した(谷口ほか, 2003)。また、緩衝材仕様の腐食速度への影響を確認するための浸漬試験を行い、緩衝材の乾燥密度が大きいほど腐食速度が小さく、ケイ砂混合率が 70% までは腐食速度への明確な影響が認められないことがわかった。ここでは、一部で電子ビーム溶接部付き試料を用いた試験もを行い、非溶接材と同程度の腐食速度であることを確認した。今後も長期的信頼性の確認のための腐食試験を継続するとともに、応力腐食割れや溶接影響などの材料因子による耐食性への影響について検討していく。

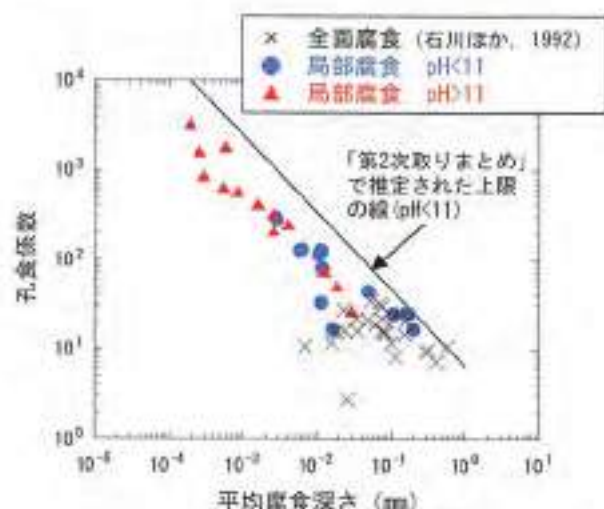


図 2.2-12 弱アルカリ性～アルカリ性環境における炭素鋼の孔食係数

【代替オーバーバック材料の腐食挙動に関する研究】

代替オーバーバック材料として、チタンおよび銅に関する検討を行っている。

チタンに関しては、還元性環境における腐食速度を把握するため、長期浸漬試験(最長 5 年間の予定で実施中)の内 1 年間までの試験から圧縮ベントナイト中および水溶液中での腐食速度データを取得した。また、水素吸収挙動の検討として、電気化学的な加速試験による水素吸収率・量に関するデータの取得・整理を行った(鈴木ほか, 2003)。今後も試験データの取得を継続し、水素脆化生起条件のより詳細な検討を行うとともに、高 pH 環境の影響などの基礎データを取得する。

銅に関しては、純銅の被膜破壊電位について陰イオンの種類と濃度および温度の影響について検討した(川崎ほか, 2002)。その結果から温度の影響は認められなかったが、陰イオンの影響については炭酸水素イオンは不動態域における被膜の破壊を抑制し、塩化物イオンや硫酸イオンは促進する傾向が観察された。今後は、腐食局在化や硫化物共存下での還元性環境における腐食挙動、高 pH 環境の影響などの基礎データを取得していく。

② 緩衝材の基本特性

緩衝材の基本特性については、「第 2 次取りまとめ」までに降水系地下水条件下でのデータを主に取得してきた。「第 2 次取りまとめ」以降、実際の地質環境を考慮し、熱や水質などの影響の把握、また関係式の一般化や測定手法の標準化に関する基盤情報整備の観点から、緩衝材の膨潤特性、飽和水理特性、熱特性などのデータ取得と評価並びに測定手法について検討を進めている。

膨潤特性については、供試体スケール効果による膨潤応力への影響を確認する試験を行った。飽和水理特性については、海水系地下水条件下および温度をパラメータとした透水特性データの拡充を行うとともに、有効粘土密度と透水係数や固有透過度との関係式の一般化を図った。得られたデータを固有透過度の概念を用いて整理した結果(図 2.2-13) などより、ベントナイト単体およびケイ砂混合体の双方に適用可能な関係式を導いた(菊池ほか, 2003)。熱特性については、複数の測定手法によって得られたデータを比較し、熱伝導率では測定手法間の差は認められないものの、熱拡散率では若干ではあるが差が生じることを確認した。今後は、温度や水質を考慮したデータの拡充、測定手法の標準化に関わる基盤情報の整備を継続する。あわせて、海外産ベントナイトに関して、モンモリロナイト含有率による関係式の一般

化や国産ベントナイト（クニゲル VI）との性能比較を通じた適用性評価など、いくつかの評価手法について検討していく。

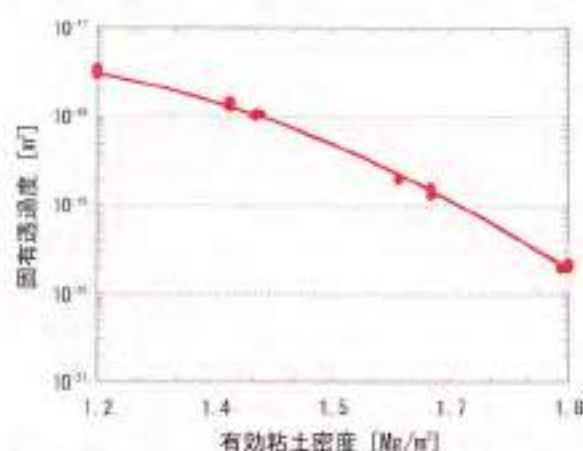


図 2.2-13 有効粘土密度と固有透過度の関係

③ 人工バリアの性能保証に関する基盤情報整備

本課題では、国による安全基準・指針等の策定および実施主体が進める処分事業へ資することを目的として、人工バリアの性能保証に関する基盤情報の整備を進めている。また、視延深地層研究計画に資するものとして、人工バリアの搬送・定置に関わる検討を行っている。

性能保証に関する情報整備として、埋め戻し材・プラグ・坑道などについて、それぞれが有すべき性能/性能保証項目の整理と課題の抽出を行った（杉田ほか，2003a）。今後は、抽出された課題について、サイクル機構における取り組み状況を踏まえ、処分事業の推進および安全基準・指針の策定への反映を念頭においた性能保証に関わる技術的根拠の整理を行っていく。

また、人工バリアの搬送・定置に関わる検討として、人工バリア定置後の緩衝材の膨潤挙動を再現した試験を継続するとともに（杉田・菊池，2002）、膨潤挙動を予測する解析手法の検討に着手した。今後も、膨潤試験の継続と解析手法の検討を進め、試験データを用いた解析手法の検証を行っていく。

(2) 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究

人工バリア変形・変質等の長期挙動（緩衝材/岩盤の力学的変形挙動、緩衝材の流出・侵入挙動、人工バリアの変質・劣化挙動）に関する基礎データを拡充し、モデルの信頼性を確認するとともに、長期的な熱-水-応力-化学連成挙動に関する予測技術（数値実験）を構築し、設計の妥当性や核種

移行の場の変遷を記述する技術基盤を構築する。また、人工バリア性能維持限界条件の把握を目的として、緩衝材中のガス透気回復挙動および人工バリアのせん断応答挙動に関する研究を行う。さらに、人工バリア等の相互作用や変質に関するナチュラ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。

① 人工バリア等の変形・変質等の長期挙動に関する研究

【緩衝材/岩盤の力学的変形挙動に関する研究】

緩衝材/岩盤の力学的変形挙動として、緩衝材の長期力学挙動および岩盤の力学的変形挙動に関する研究を行っている。

緩衝材の長期力学挙動については、「第2次取りまとめ」における評価の信頼性を確認するために、クリープ破壊試験データの取得および緩衝材の長期力学挙動に係わる基本的な評価モデルの構築を進めている（平井・棚井，2003）。平成14年度は、既往の評価モデルの適用性に関する検討を行い、モデルで用いるパラメータの選定やパラメータの非線形性の考慮方法に検討の余地があるが、緩衝材の長期力学特性を概略的に評価できることがわかった。試験データの取得については、クリープ破壊試験を継続中である。今後はクリープ破壊に関するデータ取得と評価を行うとともに、海水系地下水環境における評価、岩盤、オーバーバック、緩衝材の力学相互作用を考慮した解析評価などを検討していく。

岩盤の力学的変形挙動については、乾湿繰り返しや熱の影響（宮野前ほか，2002）、拘束圧依存性などのニアフィールドで想定される事象を考慮した評価を行っている。平成14年度は、主に岩盤の変形特性の拘束圧依存性について岩石圧縮クリープ試験により基礎データを取得したほか、坑道掘削後のニアフィールド岩盤の実挙動を把握する目的で模型実験を行った。これらの実験結果を踏まえ、ニアフィールドの長期構造力学安定性について検討する目的で例示的に人工バリア-岩盤の連成解析を行った。その結果、ニアフィールド岩盤の長期変形挙動が緩衝材からの反力や膨潤圧の作用に依存していることが確認され、相互の影響を考慮した評価の必要性が示唆された。今後、基礎的な研究を継続し、岩盤の長期変形挙動評価の体系化を図るとともに、ナチュラルアナログ的な考え等も考慮して研究を進めていく。

【緩衝材の流出・侵入挙動に関する研究】

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

平成14年度は、海水系地下水（人工海水）を用いた侵入現象データの拡充を行い、海水系地下水条件下では亀裂への侵入距離が降水系地下水条件より小さくなることを確認した（図2.2-14）。また侵入現象のモデル化のための基礎データとして粘性係数を取得した。さらに、浸食現象の評価に必要な、コロイド粒子の移行に直接的に影響する水流速を把握するため、三次元亀裂ネットワーク解析コードを用いて亀裂内流速を求めた（松本・棚井，2003）。今後も、侵入挙動に関するデータの拡充やモデルの構築を進めるとともに、浸食現象の定量的な把握を目指したデータの拡充を継続する。

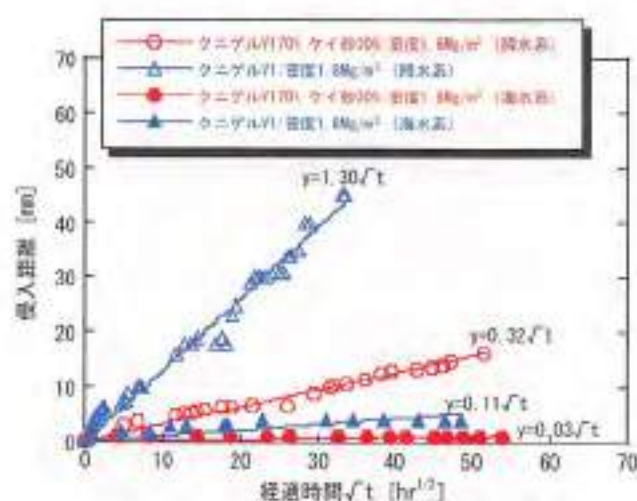


図 2.2-14 経過時間と侵入距離の関係

【人工バリアの変質・劣化学動に関する研究】

人工バリアの変質等の長期挙動に関する研究としては、オーバーバックの腐食生成物とセメント材料の利用による高アルカリ環境が緩衝材の長期健全性に及ぼす影響について検討を行っている。

腐食生成物との相互作用については、ベントナイトと鉄あるいは磁鉄鉱を接触させる変質加速試験を継続し、その環境における生成物の確認、および天然事例における調査・分析による生成機構に関する考察を行った（大場，2003）。高アルカリ環境での変質については、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い、溶解速度が、pH、温度および溶液中 Si 濃度の増加とともに

に上昇することを確認した。今後は、腐食生成物との相互作用を伴う変質加速試験や長期接触試験の継続、アルカリ環境における変質評価のためのスメクタイト溶解速度の定式化および緩衝材の設置環境での変質速度の推定を行っていく。

② 熱-水-応力-化学連成挙動に関する研究

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

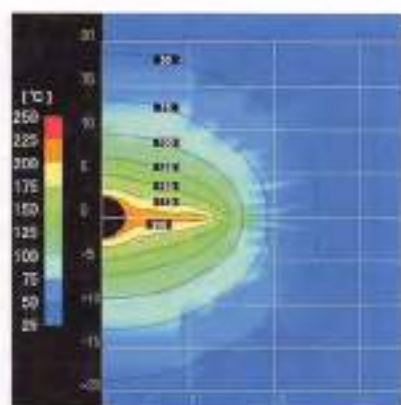
モデルの開発としては、平成13年度に構築したプロトタイプモデルへの地球化学モデルの導入として、地球化学反応を考慮した連成モデル/解析コードの開発（図2.2-15）、連成挙動に係わる物性値の相互依存性を整理した（伊藤ほか，2003）。また、開発コードによる解析を例示すべく、ニアフィールド連成挙動の事例解析を行った。今後は、地球化学モデル等のさらなる拡張に取り組み、仮想地質環境に対するニアフィールド連成挙動の数値実験を試行していく。



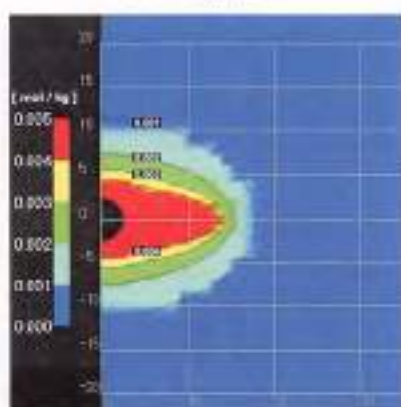
図 2.2-15 熱-水-応力-化学連成解析コードの概要

国際共同研究としては、DECOVALEX およびスウェーデン SKB の地下研究施設 (HRL) での Prototype Repository Project (PRP) に参画し、原位置人工バリア試験の予測解析などを行っている（伊藤ほか，2003）。DECOVALEX では、米国・ユッカマウンテンの坑道規模加熱試験をテーマとした予測解析や、仮想問題を取り扱うベンチマークテスト解析として緩衝材再冠水挙動をテーマとした解析などを行った。ユッカマウンテンの予測解析では、実測値や他の解析チームの解析結果と概ね一致する

結果が得られている(図2.2-16)。また、PRPでは試験で使用されているベントナイト(米国产MX-80)の特性評価および予測解析に取り組んでいる。今後も継続して国際共同研究に参画し、実測データや参加各機関の解析結果との比較を通じて、連成モデル/解析コードの高度化、検証・確認を行っていく。



(a) 温度分布



(b) Si 溶解濃度分布

図 2.2-16 Drift Scale Test の熱-水-化学連成解析結果例(試験開始4年後)

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

緩衝材中のガス移行挙動の研究については、降水系地下水条件下におけるデータの充足や実際の地質環境条件(温度や水質)を考慮したデータの拡充、基本的なガス移行モデルの開発を目指した研究を進めている。

平成14年度は、X線CT法による現象の可視化に関する検討を行い(榎井ほか, 2003)、緩衝材中への水の浸潤挙動の把握は可能となったものの、ガス移行挙動を捉えるまでには至っていない。X線CT法による水の浸潤挙動の可視化の例を図2.2-17に示す(時間の経過とともに水の浸潤領域が広が

っている様子がわかる)。また、基本的な透気特性の把握として、ガス移行試験による降水系地下水条件下でのデータ拡充を行い、これまでのデータと合わせて有効粘土密度とガスの破過圧力の関係を整理した(図2.2-18)。ここで、「第2次取りまとめ」における膨潤応力と有効粘土密度の関係より(図中曲線)、膨潤応力がガス破過圧力の一つの閾値であることが明確となった。ガス移行モデルについては、国際共同研究(GAMBIT)において開発を進めている。今後、X線CT法による可視化研究については、試料内部の液相や気相飽和度の変化に伴うCT値の変化を捉える観点からの検討を進める。また、海水系地下水条件下での試験、国際共同研究を活用したガス移行モデル開発を進めていく。

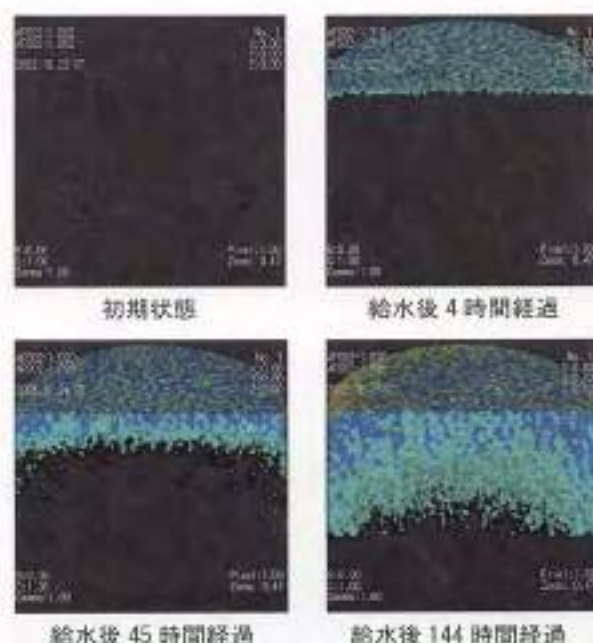


図 2.2-17 時間経過毎の三次元画像

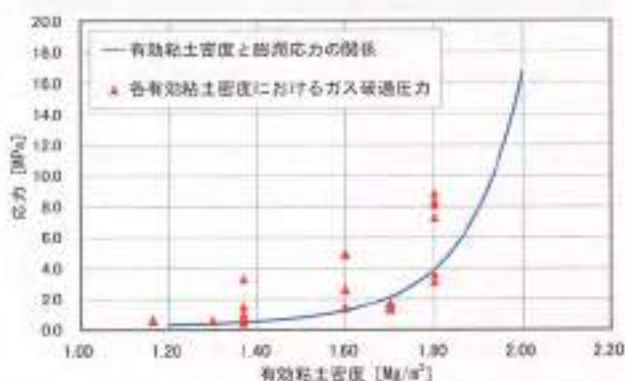


図 2.2-18 有効粘土密度と破過圧力および膨潤応力の関係

【人工バリアせん断応答挙動に関する研究】

わが国の地層処分概念では、地層処分システムに著しい影響を及ぼす可能性のある断層活動などの天然現象については、サイト選定によってその影響を避けることを基本としている。しかし、新層帯以外でのC級断層（変位速度0.01m/1000年オーダー）など、未確認のものが存在している可能性もある。このため、人工バリアの頑健性を明らかにし、安全機能の裕度を示す観点から、断層を模擬した模型試験とシミュレーション解析により、人工バリアの挙動把握を試みている（平井ほか、2003）。

平成14年度は、土圧計設置などの改良を加えた断層模擬試験装置を用いた模型試験を行い、せん断荷重がわずかな変位で一定となること、オーバーバックの回転に伴う応力再配分などにより、オーバーバックに作用する土圧がせん断変位に伴い増加することがわかった。また、模型試験に対するシミュレーション解析を行い（図2.2-19）、せん断荷重とせん断変位の関係は実測値とよく一致したものの、土圧に関しては応力の再配分を十分に評価するには至らなかった。今後は、断層挙動に対する情報を収集するとともに、模型試験の継続および大変位時の挙動をより精度よく評価するシミュレーション解析のための構成モデルの検討などを行っていく。

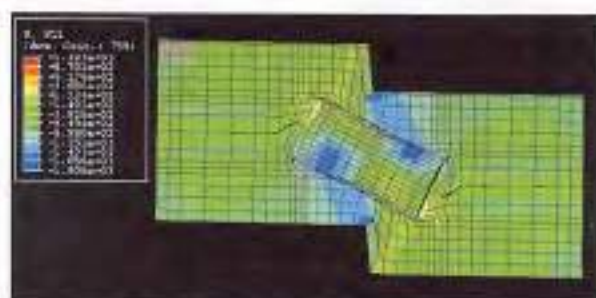


図 2.2-19 解析による鉛直応力分布
（黄色は鉛直応力が大きく土圧の集中する部分）

④ 人工バリア等のナチュラルアナログ研究

天然における処分環境に類似した現象を研究するナチュラルアナログ研究により、人工バリア材の長期健全性評価に資するデータ取得を行っている。現在行っている研究は、土中に長期間埋設していた天然ガラスや鉄製造物の変質・腐食、ベントナイトの変質や粘土中の核種移行に関する研究、およびそれらを補完する室内試験である。

平成14年度は、ガラスの変質については、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）を調査し、温度70℃で化石海水と推定される地下水と約50万年間にわたって接触していた環境で、ガラス組成が変質した事例であることを確認した。鉄製造物の腐食については、出雲大社遺跡の粘土中より発掘された約750年前の鉄製斧を対象にX線CTによる腐食の調査を行った。その結果、腐食量は最大でも2mm程度と見積もれ、「第2次取りまとめ」で評価に用いた数十年間のデータを外挿した値を超えていない（図2.2-20）ことが確認された（吉川ほか、2002）。ベントナイトの変質については、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を進めている。粘土中の核種移行については、カナダ・シガーレイクのウラン鉱床をとりまく粘土質岩石中の核種の存在状態について調査し、ウランが二次鉱物化して粘土周辺に留まっていることを確認した（レジス・ブロスほか、2003）。これは、性能評価における瞬時・可逆的な取替の取扱いが保守的であることを示している。今後も、実際の地質環境条件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していく。

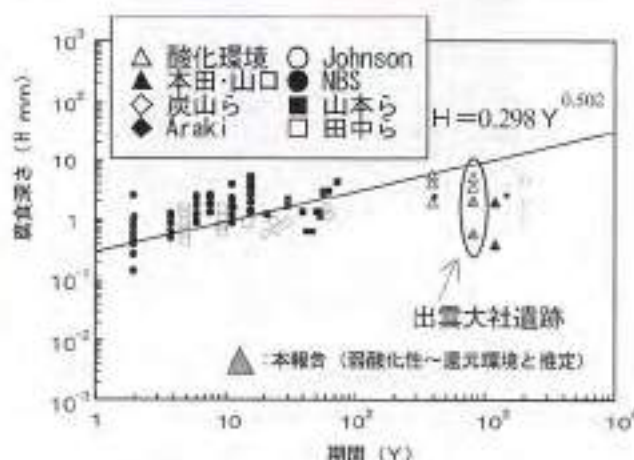


図 2.2-20 最大腐食深さの経年変化
（直線は数十年のデータをフィットさせ外挿した線）

(3) 人工バリア等の工学技術の検証

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

① 閉鎖技術の検証試験

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

検証試験は、カナダ AECL との共同研究として AECL の地下研究施設で実施している。平成 14 年度は、プラグからの湧水量の測定や加熱の影響などについて原位置データを測定するとともに、プラグ周囲の湧水経路の検討としてトレーサー試験および解析を行った。また、閉鎖シナリオに関する検討として、閉鎖構成要素の地下環境での機能に関するデータを基に「第2次取りまとめ」で埋め戻し・プラグの施工不良を想定した保守的な検討にとどめていた閉鎖シナリオについてより具体的な検討を行った（杉田ほか、2003b）。今後も、閉鎖シナリオの検討、閉鎖性能に関わる検証データの蓄積を継続していく。

② 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、坑道の支保工の代替材料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、HFSC の施工性開発に取り組んでいる。この開発では、平成 13 年度までの成果を踏まえて、施工における課題を、①施工性の確認、②目標品質の達成、③品質変動の把握、④耐久性の評価の 4 項目とし、室内試験などによる施工性開発を行った後、幌延の深地層の研究施設において原位置での施工性確認を行う予定である。

平成 14 年度は、①施工性の確認として、吹付け施工の材料適用性を確認するための材料配合・種類を変化させた試験を行い、いずれも十分な施工性を有することを確認した。②目標品質の達成では、圧縮強度の目標値として設定した幌延の深地層の研究施設の支保工コンクリート強度の最大値を場所打ちコンクリートはほぼ達成したものの、吹付けコンクリートは達成していない。③品質変動の把握では、フライアッシュ（FA）の品質の変動に起因するコンクリートの品質変動について、製造時期の異なる FA を用いた室内試験により、吹付けコンクリートに比べて場所打ちコンクリートの変動が大きいという結果が得られたものの、施

工管理上大きな問題とはならないと判断される。④耐久性の評価では、坑道支保工に鉄筋コンクリートが使われる可能性があるなどの観点から、供用期間における耐久性の評価として HFSC 中の鉄筋の腐食挙動試験を行った。HFSC 中では普通コンクリート中より鉄筋の腐食速度が大きく、発錆条件も異なる可能性が示唆された。今後も、これらの施工性に係る課題について、室内試験などによる施工性の評価や品質の確認を進め、幌延の深地層の研究施設の一部に HFSC を適用することにより原位置における適用性の確認を行う予定である。

(4) 設計手法の適用性確認

「第2次取りまとめ」では、わが国の幅広い地質環境を想定して設計を行い、技術的実現性を提示した。そこで提示された事項を技術的特性から分類し、実際の地質環境への適用に関わる課題とその解決のための方策をまとめた（図 2.2-21）。設計手法の適用性確認では、人工バリア設計と適用性確認のための計画である原位置試験計画に関する検討を行う。

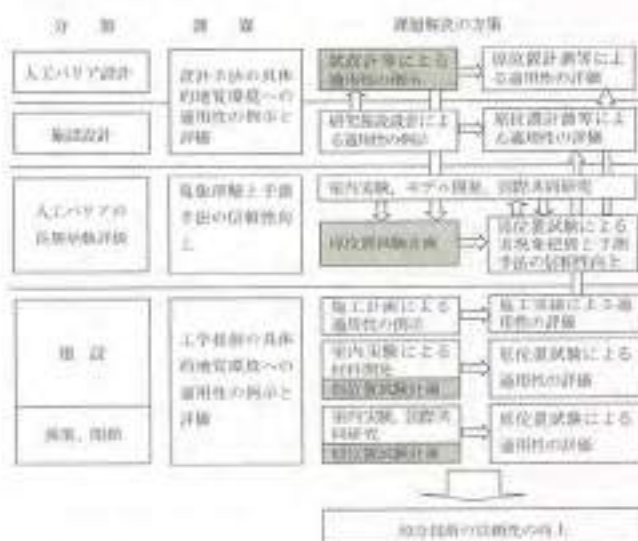


図 2.2-21 処分技術の課題とその解決方策

人工バリア設計では、「第2次取りまとめ」に示された設計手法が、幌延深地層研究計画における地表からの調査で把握される地質環境に対して有効であるかを確認する。平成 14 年度は、「第2次取りまとめ」に示された設計の内容を踏まえて、オーバーバックと緩衝材について、特に入出力情報に着目して設計フローの作成に着手した。

また、人工バリアの長期挙動評価と建設・換業・閉鎖の工学技術に関しては、幌延の深地層の研究

施設での原位置試験により適用性を評価する予定であり、このための原位置試験計画の検討を行う（サイクル機構、2002）。平成 14 年度は、人工バリアの長期挙動評価に関する原位置試験として 5 項目、建設・操業・閉鎖の工学技術に関する原位置試験として 3 項目を選定した。それらを以下に示す。

- (人工バリアの長期挙動評価の 5 項目)
- 人工バリア試験（熱-水-応力-化学連成試験）
- 緩衝材/岩盤クリープ試験
- ガス移行挙動試験
- オーバーバック腐食試験
- セメント膨張試験
- (建設・操業・閉鎖の工学技術の 3 項目)
- 低アルカリ性コンクリート施工性確認試験
- 定置精度確認試験
- 坑道閉鎖試験

これらの選定・計画にあたっては、関連する研究テーマの中での原位置試験の位置付けを明確にし、その必要性を確認した。今後、人工バリア設計では、オーバーバックと緩衝材の設計フローを取りまとめ、人工バリア設計に必要な地質環境情報やデータを抽出する。また、原位置試験計画では、進捗からの調査結果に基づく定量的な検討を行い、試験概念の具体化など原位置試験に向けた準備を行う。

参考文献

平井 卓、榎井憲治（2003）：緩衝材の弾塑性挙動評価モデルに関する検討、日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集、P9、p. 929.

平井 卓、榎井憲治、菊池広人、鈴木英明、高橋一彦、大沼 敏（2003）：断層ずれに伴う人工バリアの力学的挙動評価、サイクル機構技術資料、JNC TN8400 2003-009

石川博久、本間 明、國領裕二、井上邦博、小畑俊道、片岡木道男（1992）：オーバーバック緩衝材材選定と炭素鋼オーバーバックの寿命評価、動燃事業団技術資料、JNC TN8410 92-139.

伊藤 彰、川上 進、船井三和（2003）：熱-水-応力-化学連成挙動に関する数値解析コードの開発、サイクル機構技術資料、JNC TN8400 2002-023.

核燃料サイクル開発機構（2002）：軽近深地層研究計画 平成 14 年度調査研究計画、サイクル機構技術資料、JNC TN1410 2001-004.

山崎 学、谷口直樹、川上 進（2002）：炭酸塩水溶液およびケイ酸混合ベントナイト中における緩衝材のモード分極挙動、サイクル機構技術資料、JNC TN8400 2002-016.

菊池広人、榎井憲治、松本一浩、佐藤治夫、上野健一、磯 剛志（2003）：緩衝材の飽和透水性・II - 雨水性地下水が緩衝材の透水性に及ぼす影響、サイクル機構技術資料、JNC TN8400 2003-002.

松本一浩、榎井憲治（2003）：ベントナイト緩衝材の流出特性の評価（II）、サイクル機構技術資料、JNC TN8400 2003-006.

宮町隆一、小川寛和、井上博之、梨本 裕（2002）：放射線の長期力学的変形挙動に関する研究、サイクル機構技術資料、JNC TN8400 2002-015.

大塚孝信（2003）：スモクタイトの緑泥石化に関する研究、サイクル機構技術資料（研究委託報告書、上越教育大学）、JNC TN8400 2003-004

レジス・ブロス、久保田満、上野健一、吉川英樹、船井三和（2003）：A natural analogue study of transport and retardation in clays enclosing the Cigar Lake high-grade uranium ore (Canada)、日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集、P30、p. 953

柴田俊夫、瀬尾敏彦、杉本克久、木直 徹、藤本信司、井上博之（2003）：マグネタイト共存下における炭素鋼の腐食挙動に関する研究の現状と課題、サイクル機構技術資料（研究委託報告書、社団法人腐食防食協会）、JNC TN8400 2002-060.

杉田 裕、菊池広人（2002）：人工バリアにおける緩衝材の隙間膨潤挙動に関する基礎研究、サイクル機構技術資料、JNC TN8430 2002-003.

杉田 裕、栗原雄二、川上 進、神徳 敏、船井三和、柴田雅博（2003）：高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア等の性能保証に関わる研究の進め方と反映先（その 2）、サイクル機構技術資料。（登録準備中）

杉田 裕、川上 進、船井三和、牧野仁史、深山 洋、栗原雄二、三原守弘（2003）：高レベル放射性廃棄物地層処分における閉鎖性能に関する検討（平成 14 年度）、サイクル機構技術資料、JNC TN8400 2003-010.

鈴木宏幸、谷口直樹、川上 進（2003）：還元性環境下におけるナタンの腐食速度と水素吸収挙動、サイクル機構技術資料、JNC TN8400 2003-003.

榎井憲治、松本一浩、菊池広人（2003）：X線 CT 法の適用性に関する検討、サイクル機構技術資料、JNC TN8430 2003-001.

谷口直樹、川崎 学、川上 進、鈴木治雄（2003）：高アルカリ性〜アルカリ性環境における炭素鋼オーバーバックの局部腐食進展挙動、サイクル機構技術資料。（登録準備中）

吉川英樹、上野健一、本間 卓、山口新吾、亀井玄人（2002）：考古学的試料を用いた放射性廃棄物研究（金属ラデュラルアナログ）、日本アイソトープ協会第 39 回理工学における同位体分析・放射線研究発表会要旨集、p. 125.

2.2.3 安全評価手法の高度化

地層処分安全評価では、処分概念に基づき構築される地層処分システムの将来挙動について、シナリオ、モデル、データに基づく予測解析により評価した上で、結果を基準などと比較し、評価の信頼性を様々な観点から論ずることによって、長期的安全性の判断がなされる。したがって、シナリオ、モデル、データのそれぞれについて、現象理解による信頼性の向上、不確実性への対処、透明性や追跡性が確保しやすいシステム構築などが重要である。

「第2次取りまとめ」においては、幅広い地質環境を対象として、簡略・保守的な考え方に基づき評価を行ったが、「第2次取りまとめ」以降の研究開発では、2.1項にも示したように「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」、「地層処分システムの長期挙動の理解」を目標とした取り組みを進めている。

1) 安全評価手法の高度化における今後の課題

「安全評価手法の高度化」としては、「図による第2次取りまとめ評価報告書」や「安全規制の基本的考え方」などに示された課題等を考慮して、安全評価に必要なデータの蓄積、モデルや評価手法の高度化を行うとともに、実際の地質環境への適用を通じた安全評価手法の信頼性確認が重要であるとの認識から、以下のように4つの研究開発課題を設定している（図2.1-3）。

・核種移行データベースの整備

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

・安全評価モデルの高度化

安全評価において考慮すべきプロセスについて、安全評価の基礎としての現象理解を深めるとともに、モデルの詳細化や信頼性の確認を図る。

・安全評価手法の整備・高度化

安全評価の考え方や安全指標などの基本事項に関する技術・情報、シナリオ開発技術、不確実性評価技術、および総合的な安全評価を行う方法などについて基礎技術の整備・高度化を図る。

・安全評価手法の適用性確認

実際の地質環境調査から得られる情報に基づき、

安全評価モデルおよび安全評価手法の適用を図るとともに、研究開発の留意点等を明らかにしていく。

これらの課題を達成するため、エントリーやクオリティ、幌延の深地層の研究施設などを活用するとともに、「深地層の科学研究」との連携を図りつつ、安全評価に関するデータの蓄積、モデルや手法の高度化を進める。さらに、実際の地質環境において段階的に取得されるデータに応じた安全評価のあり方について検討を進めていく。

2) 各研究開発課題の計画および成果の現状

以下に研究開発課題毎に計画および平成14年度の成果の概要について示す。

(1) 核種移行データベースの整備

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

① 放射性核種の熱力学データベースの整備

平成14年度における主な成果としては、安全評価上重要なアクチニド4価（特にネプツニウム）に着目し、クオリティにおいて炭酸共存下での溶解度試験を進め、炭酸錯体およびヒドロキソ炭酸錯体の生成反応の平衡定数を導出した（北村・小原、2002）。また、鉄共存下でのセレンの溶解度に関する実験的研究を進めた（北村ほか、2003）。さらに、整備した熱力学データベースを各種地球化学計算コードで利用可能なフォーマットに変換す

るプログラムを作成し（吉田・油井，2003a），各種フォーマットに変換した既往の熱力学データベースの公開を行った（吉田・油井，2003b）。

② 収着・拡散データベースの整備

クオリティ等の施設において，データの充足が望まれる海水を起源とする地下水環境を想定した条件での緩衝材および堆積岩に対するデータ拡充を継続した。海水系地下水中のセシウム、ヨウ素のベントナイト、砂岩および泥岩への収着試験を実施し、収着に及ぼす共存陽イオンの影響に関するデータを得た。また、砂岩に対するセシウム、ヨウ素の拡散試験を実施し、セシウムの見かけの拡散係数のイオン強度依存性などに関するデータを得た。

(2) 安全評価モデルの高度化

岩盤中での水理・物質移行現象，地下水・間隙水水質形成，ガラスの長期溶解，核種の溶解および収着・拡散，核種移行に対するコロイド・有機物・微生物の影響，生物圏評価などの通常の地下水シナリオにおいて考慮すべきプロセス，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。

① 岩盤中での水理・物質移行モデル

結晶質岩については，性能評価上重要と考えられる数 10～100mスケールでの亀裂ネットワークモデルを用いた水理・物質移行評価の信頼性を向上させるため，単一亀裂，亀裂交差部において重要と考えられるプロセスについてエントリー，国際共同研究等を活用して知見を得るとともに，亀裂ネットワークモデルの信頼性向上とモデル化機能の拡充を行う。開発したモデル化手法については，東濃（正馬様用地周辺での地質環境特性のモデル化），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，幌延深地層研究計画で得られるデータを活用し，実際の堆積岩の不均質性を記述可能なモデル化手法を検討する。

平成 14 年度における主な成果としては，亀裂ネットワークにおける核種移行解析を一次元パイプ

ネットワークで近似する際に誤差が発生する可能性があるため，亀裂面を二次元で表現可能な LTG Plate コードの開発と検証を行った。また，亀裂内の開口幅の不均質性が流体の移動に与える影響を詳細に調べるために格子ガスオートマトン法による流体解析コードの開発を行った。

亀裂交差部を対象とした室内試験については，亀裂交差部を有する一辺が 50cm の天然亀裂岩体を用いた試験を行い，その結果亀裂交差部は亀裂の他の部分に比べ透水量係数が高くなる傾向が得られた（図 2.2-22）。

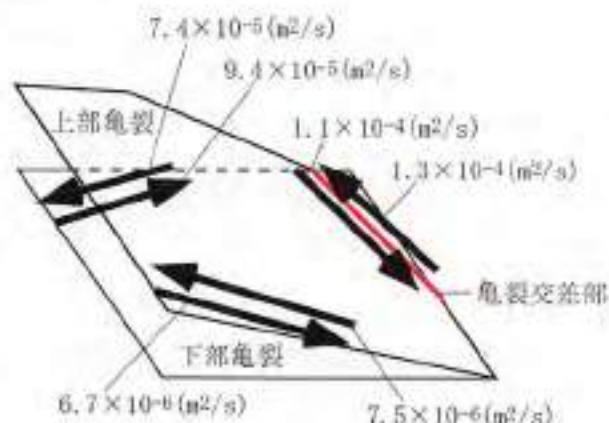


図 2.2-22 亀裂交差部とそれ以外の部分の透水量係数の比較

（赤色で示した部分：亀裂交差部，矢印：透水試験における流れ方向）

また，トレーサー試験等の原位置試験を通して，水理・物質移行パラメータの不確か性を把握するための逆解析手法を開発するとともに，スイスのグリムゼル原位置試験場で行われた原位置トレーサー試験結果に適用し，流速，縦方向分散長の 95% 信頼区間を評価した（細野ほか，2002；畑ほか，2002）。

堆積岩については，亀裂を有する堆積岩での水理・物質移行の概念モデルを構築するため，幌延深地層研究計画で得られたボーリングコアを用いて亀裂を有するコアと亀裂のないコアの透水性の比較を行った。その結果，亀裂を持たないコアの透水係数は 10^{-9} m/s のオーダーであるのに対し，亀裂を有するコアの透水係数は 10^{-8} ～ 10^{-6} m/s のオーダーであり，亀裂が高い透水性を有することが示唆された。

② 地下水・間隙水水質形成モデルの高度化

「第2次取りまとめ」においては、化学平衡に基づくモデルにより一般化した地下水水質の設定を行うとともに、緩衝材構成鉱物の表面反応や溶解沈殿反応に基づき緩衝材中の間隙水水質を推定した。「第2次取りまとめ」以降、地下水水質については、具体的な地質環境を対象とし地下水水質形成過程の理解とそれに基づく将来の変動可能性の推定が重要な課題である。間隙水水質に関しては、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などが課題である。

平成14年度における主な成果としては、幌延深地層研究計画における調査から得られた実測地下水に対し、「第2次取りまとめ」で用いられた地下水水質形成モデルの適用性を検討するための予想的解析を行い、地下水水質の形成に寄与する鉱物の推定や、地表での測定値に基づく原位置地下水水質の推定法の検討などを実施した(吉田・油井, 2003c)。緩衝材間隙水水質に関しては、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モデル化を継続した。

③ 現象論的核種移行モデルの開発

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

平成14年度における主な成果としては、ガラス表面変質層として、条件に依存してNa-バイドライトの生成が確認され、表面変質層へのCsの収着が推定される結果が得られた。また、溶解度制限固相の変遷については、 $UO_2(am)$ から $UO_2(cr)$ への固相の変化とそれともなう溶解度の変化を確認した(Rai et al., 2003)。さらに、放射性ガラスを用いた原位置試験(ベルギー、モル地下研究施設)の国際プロジェクトに対する事前解析を実施した。

核種の収着・拡散現象に関する研究としては、溶液条件などの環境の変化が、収着分配係数や拡散係数に及ぼす影響を実験的に明らかにするとともに、その影響をより詳細な現象理解に基づくモデルにより説明することなど、核種移行パラメータの設定に対する信頼性の向上を目指した研究を

進めている。なお、本研究から得られた収着・拡散データは、収着・拡散データベースの整備にも適宜反映されている。

平成14年度における主な成果としては、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試験を実施し、溶存化学種ごとに分配係数を与えることで、図2.2-23に示すように、溶液条件の変化にともなう分配係数の変化を説明できることを示した(戸村・北村, 2003)。また、OECD/NEAにおける収着プロジェクトに参加し、性能評価の観点から、熱力学的収着モデルの適用可能性の検討を行った。

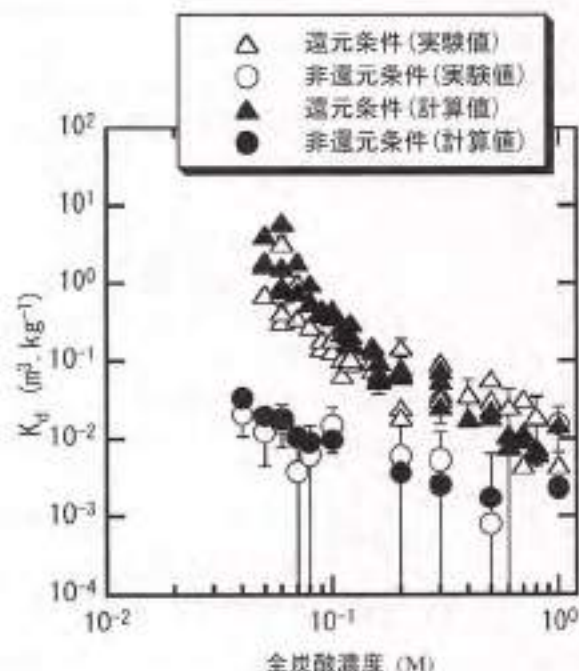


図 2.2-23 炭酸共存下におけるスメクタイトに対するネプツニウムの分配係数の全炭酸濃度依存性とその解析結果

拡散挙動については、緩衝材中の陰イオンの拡散に対する塩濃度の影響、ネプツニウムの拡散に及ぼす腐食生成物の影響などに関するデータ取得を行うとともに、観察された現象に基づき、拡散メカニズムの考察を行った。

④ コロイド等の影響評価モデルの開発

人工バリア材料から発生するコロイドおよび天然の地下水中に存在するコロイド、地下水やベントナイト中に存在する有機物などが、母岩中での核種の移行挙動に影響を及ぼす可能性がある。「第2次取りまとめ」では、簡略かつ保守的なモ

デルによる影響評価を実施し、その影響が大きくないことを例示した。「第2次取りまとめ」以降、核種移行に及ぼすコロイド等の影響に関する現象理解をさらに深め、より現実的かつ定量的な評価を行うためのモデル構築を進めている。また、有機物については、放射性核種の溶解度に及ぼす影響の評価および人工バリア中の透過性に関するデータの取得を行っている。

平成14年度における主な成果として、既存坑道を利用した地下水中のコロイド特性調査を実施するとともに、採取した地下水中のコロイドを対象とした核種の吸着試験を実施し、コロイドと核種の相互作用に関する知見を拡充した。また、地質媒体を充填したカラムを用いたコロイド共存系での核種移行試験や、スイス・グリムゼル原位置試験場でのコロイドによる核種の移行試験結果に対し評価モデルの適用性の検討を行った。その結果、図2.2-24に示すように、コロイドおよび岩盤への核種の吸着反応に対して、速度論的取り扱いを行うことが重要であることが示唆された。また、地層中の移行経路表面にコロイドが付着し移行が遅延する、いわゆるコロイドフィルトレーション効果について、実験的な確認と評価モデルの検討を行った（鎮守・油井，2003）。

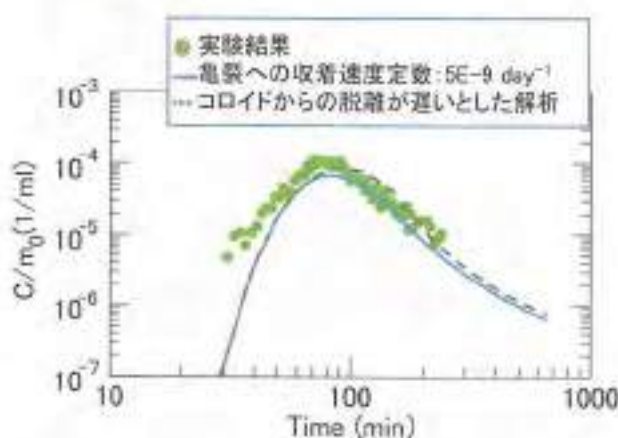


図 2.2-24 放射性核種のコロイドおよび岩盤への吸着、脱離反応の速度論を考慮したモデルによる Am-241 の解析結果の一例

有機物については、フミン酸の分子量分布に着目し、Np(IV)の溶解度に対するフミン酸の影響を調べる試験を実施するとともに、圧縮ベントナイトに対する有機物の透過試験を開始した。また、微生物影響については、影響評価モデルの考え方を整理した。

⑤ 生物圏評価モデル

「第2次取りまとめ」以降の検討として、平成13年度までに、海域を核種放出域とした生物圏モデルの詳細化や地質環境と生物圏とのインターフェース（Geosphere-biosphere interface；以下、「GBI」）の具体化に関する検討、生物圏評価データの設定手法の開発等を実施した。その結果、地表環境中の物質移行評価モデルの高度化やデータベースの整備、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を行ううえで必要となる情報が得られた。

上記の成果を踏まえて、平成14年度においては、飽和度が変化する表面下部の土壌領域（以下、「下部土壌」）をGBIとする生物圏モデルの構築を行い、天然バリアからの核種移行率を放射線量に変換する係数を被ばくグループごとに算出した。

一方、天然に存在する放射性核種または化学元素の濃度あるいは移行量（以下、「フラックス」という）を用いた評価の方法論の検討の一環として、天然放射性核種または化学元素のフラックス（以下、「ナチュラルフラックス」という）の試算方法に関する検討を実施した。



注：ボックスは物質存在の場を、矢印はボックス間を横切るプロセスとその方向を示す。イタリック体はプロセス名を示す。

図 2.2-25 ナチュラルフラックスを用いた評価におけるプロセス、物質および場の体系（齋藤ほか，2003）

物質循環やそれが起こる場を定めるための基本的な考え方を踏まえてモデル化を検討した。天然環境の構成要素を、大気、地表環境、地下環境に分類し、地表環境と地下環境についてはさらに上流域（涵養域）と下流域（流出域）に分割したうえで、これら5つの場に存在する物質と物質移動プロセスを設定し（図2.2-25）、フラックスの試算を行った。あわせて、実際の地質環境に適用する際の課題を検討・抽出した（齋藤ほか，2003）。

また、放射性廃棄物に含有される物質の化学毒性影響に関する予察的な検討として、国内の規制基準や元素の毒性情報などに基づいて、ガラス固化体などの人工バリア材料に含まれる化学元素に対して、評価対象元素の選定および影響解析を実施した。その結果、どの元素についても、評価結果は規制基準を大きく下回る結果となった。

⑥ 天然現象影響評価モデル

「第2次取りまとめ」においては、隆起・侵食、気候・海水準変動、火山・火成活動、地震・断層活動などの天然現象を対象に、シナリオの検討および例示的に簡便で保守的な影響評価を行った。「第2次取りまとめ」以降は、天然現象が発生し地層処分システムに影響を及ぼすことを想定した場合の影響解析において、過度に保守的とならないように、より現象に則した合理的なものとしていくための考え方および評価技術の開発・整備を進めている。

平成14年度においては、全体的な包含性と合理性を確保しつつ、事例研究成果から影響評価に至る検討の整合性を向上させるために、火山・火成活動および地震・断層活動を対象として、事象の発生様式の分類と事象により引き起こされる影響発生のパターンの対応づけを、東濃地科学センターにおける地質環境の長期安定性に関する研究と連携しながら進めている。地震・断層活動を対象とした検討の例を図2.2-26に示す。また、それら事象・影響が発生する条件やシステムへの影響などを定量化するための知見の整理を進めている。

(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。

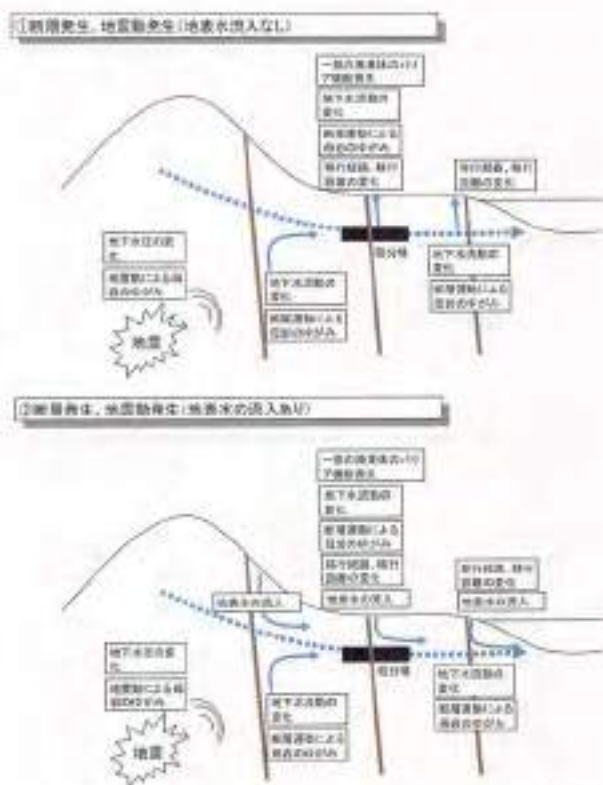
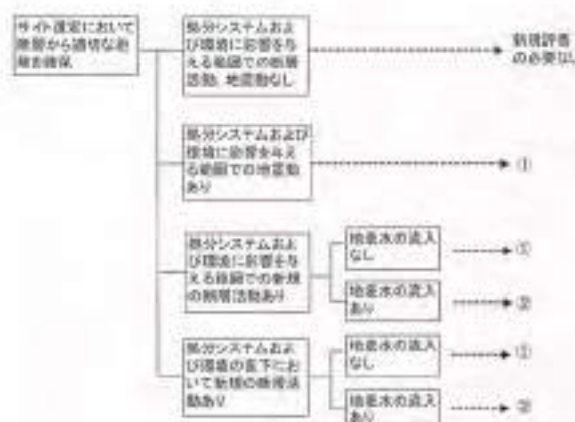


図2.2-26 地震・断層活動を対象とした結果の例
 上段：事象の発生様式の分類の例
 中斷・下段：影響発生のパターンの分類の例

① 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て安全評価の枠組みとなるシナリオを設定した。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が必要になる。そのため、平成14年度においては、Features(特性)、Events(事象)、Processes(プロセス)（以下、頭文

字をとってFEP)の設定、FEPと作成されるシナリオの対応、さらには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きている。

具体的には、FEPの相関関係の表示の仕方を工夫することを検討している。すなわち、これまでのように全てのFEPを同等として相関関係を表示するのではなく、相互作用マトリクスの対角要素に特性や状態量を表すFeaturesを、非対角要素にFeaturesを入出力とするProcessesやEventsを配置することにより相関関係をコンパクトに表現する(図2.2-27)。これにより、複数の特性や状態量とそれらを入出力とするProcesses/Eventsのまとまりをシナリオの一部と対応づけたり、あるいはモデルと対応づけたりすることが容易になる。さらに、各FEPに複数のインデックス(例えば、Importance level)を与えることにより、インデックスの種類とインデックス値の与え方の組み合わせで、様々なスクリーニングを行うことを検討している。



図 2.2-27 シナリオ開発に関わる方法論の概念 (従来の方法論との比較)

② 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、現象理解の向上による代替モデルの開発、データの拡充および実際の地質環境の情報等を活用した不確実性解析により重要な不確実性要因を適切に抽出し、これを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。

平成14年度は、モデルの不確実性として掘削影響領域(以下「EDZ」)中の核種移行に着目し、「第

2次取りまとめ」の安全評価において、保守的な観点から考慮されなかったEDZ内での核種の移行遅延効果について検討を行った。緩衝材外側に達した核種は、そこに接するEDZ内の亀裂部のみならずEDZ内の健岩部にも移行し、収着により遅延されることが期待される。この検討を行うため、二次元円筒座標系での数学モデルに基づき、人工バリア及びEDZ中核種移行解析モデルを構築した(図2.2-28)。その結果、EDZから母岩への移行率の最大値が、「第2次取りまとめ」での一次元人工バリア核種移行モデルと比較して、Pu-239で3桁低減、Cs-135で1桁低減し、EDZが遅延効果を有すること等を示した(図2.2-29;若杉ほか,2003)。

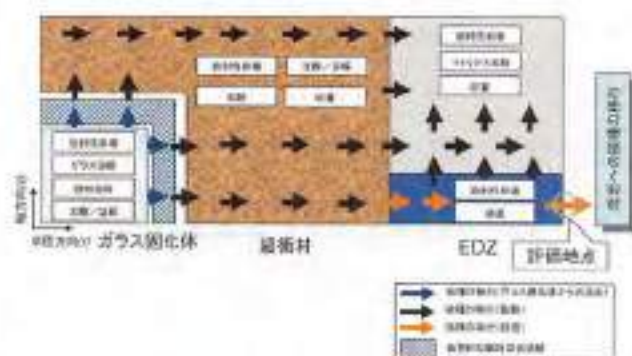


図 2.2-28 二次元人工バリア及びEDZ中核種移行モデルの概念図

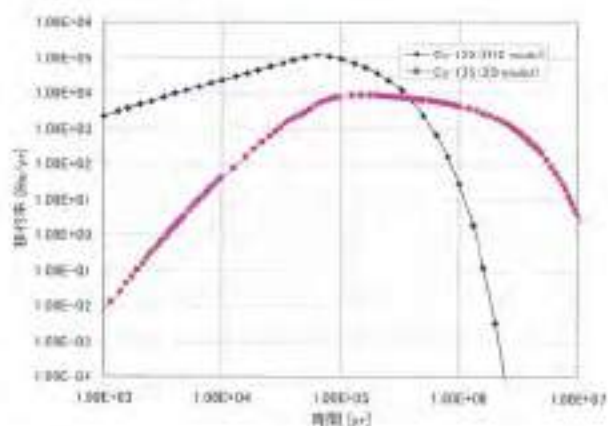


図 2.2-29 EDZからの移行率の経時変化(Cs-135)
H12 model: 「第2次取りまとめ」での一次元人工バリア核種移行モデル
2D model: 二次元人工バリアおよびEDZ中核種移行解析モデル

③ 技術情報統合システムの整備

「処分技術の信頼性向上」と「安全評価手法の高度化」およびその基盤となる「深地層の科学研究」における研究開発は、独立ではなく、研究開発分野間や研究開発課題間で種々の連携が必要である。また、この各分野間の連携に関しては、「国による第2次取りまとめ評価報告書」においても、工学技術や安全評価と関連付けた地表から地下深部までの調査の体系化の必要性が指摘されている。このため、今後、サイクル機構が研究開発を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。

技術情報の体系化にあたっては、以下の3つの視点から利用可能となるよう検討を行い、「第2次取りまとめ」をベースとした技術情報の流れをワークフローに整理した(図2.2-30)。

- a) 主に調査・実験・モデル化研究を行う研究者のための、作業の流れを記述するワークフロー
- b) 主に評価・取りまとめを行う作業者のための、現象・特性の相関関係を記述する現象・特性フロー

- c) 主にプロジェクトマネージャーが、プロジェクトの進行状況、あるいは現象・特性フローによる評価の進捗状況を管理するためのa), b)の利用。

また、ワークフローの実作業への適用性確認のため、瑞浪超深地層研究所周辺の地質環境モデル構築作業の一部についてワークフローの適用を試行した(伊藤ほか, 2003)。

(4) 安全評価手法の適用性確認

深地層の研究施設設計画において段階的に得られる情報などを参考として、天然バリアや生物圏モデル等の安全評価モデルやシナリオ開発手法等の安全評価手法の実際の地質環境に対する適用性を検討することを通じて、安全評価に係わる研究開発課題を抽出するとともに、安全評価における不確実性を低減する上での地質環境の調査における課題を抽出する。

これまでに、調査から評価に至る手順、さらにはデータやモデルの不確実性評価とそれに基づくフィードバックまでを含む手順と、手順を進めるための情報がどのレベルまで整備されているかを示す「連携の達成度」と、地表からの調査の各段

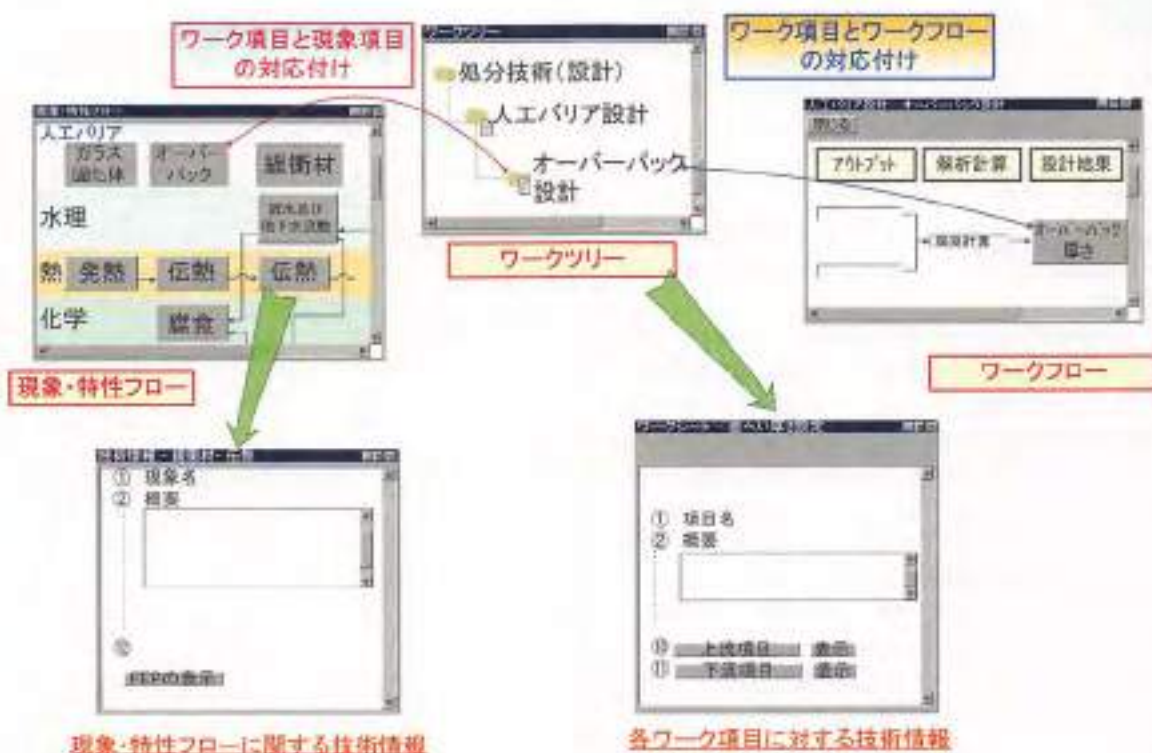


図 2.2-30 技術情報の体系化

際でどのような内容の連携が図れるか、またそれがどのように変化するかを明らかにするため、調査から得られる情報の種類や量の増加に伴いどのような連携が行えるようになるかを示す「調査の進行に伴う連携の進展」の視点から整理・検討を行った(図2.2-31)。その結果、検討の過程で、水理地質構造モデルおよび地下水化学が不確実性の大きさや設計・安全評価の多くの分野と関連することから、重要な連携のポイントとなることが確認できた。

今後、優先して実施する事項を暫定的に設定し、実際に調査から評価までの連携の作業を具体化するとともに、その際の留意事項を整理していく予定である。

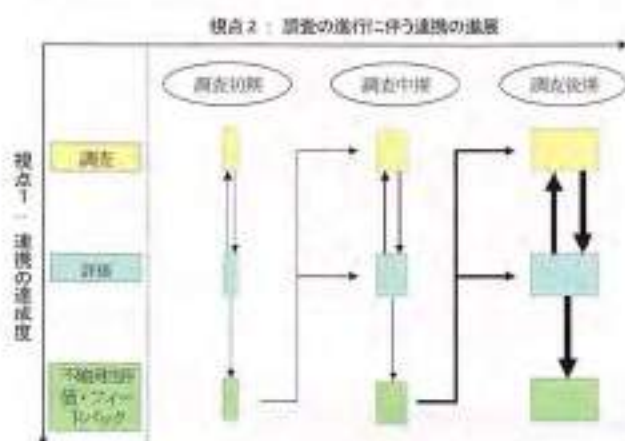


図2.2-31 地表からの調査段階における連携のとりえ方

参考文献

鎮守浩史, 油井三和 (2003): コロイドの移行過程における付着係数の評価, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, p. 927.

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2 モデルの不確実性の評価), 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, CS10-018, pp. 417-418.

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1 データの不確実性の評価), 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, CS10-017, pp. 415-416.

伊藤貴司, 牧野仁史, 若杉圭一郎, 内田雅大, 石原義高, 辻本恵一 (2003): 地層処分研究の技術情報統合システムの構築 (その1) - 研究開発の連携支援への取り組み -, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, p. 876.

北村 純, 小原幸利 (2002): アルカリ性水溶液中における Np(IV) の炭酸錯体生成, サイクル機構技術, No. 17 (2002. 12), pp. 87-95.

北村 純, 柴田雅博, 北尾秀夫 (2003): 還元条件下における鉄セレン化合物の溶解度測定, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, p. 851.

Bai, D., Yui, M. and Moore, D. A. (2003): Solubility and Solubility Product at 22 °C of $UO_2(cr)$ Precipitated from Aqueous U(IV) solutions, J. Solution Chemistry, 32, pp. 1-17.

齋藤茂幸, 佐々木良一, 石黒勝彦, 加藤智子 (2003): ナチュラルフラックス評価の方法論, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, p. 943.

戸村 努, 北村 純 (2003): 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吸着挙動, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, p. 858.

若杉圭一郎, 牧野仁史, 小尾 繁 (2003): 2次元核種移行解析モデルによる規制影響領域の遅延効果に関する検討, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, p. 872.

吉田 泰, 油井三和 (2003a): 熱力学データベースフォーマット変換プログラムの作成, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2002-024.

吉田 泰, 油井三和 (2003b): 地球化学計算コードで利用可能な JNC 熱力学データベース, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-005.

吉田 泰, 油井三和 (2003c): 幌延地域における地下水水質形成モデル構築のための予想的検討, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2002-025.

【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と超深地層研究所計画の役割と研究の進め方

東濃地科学センターにおいては、2.2.1 1)項において示した課題項目①の結晶質岩（花崗岩）を対象とした「地質環境特性に関する研究」を、広域地下水流動研究と超深地層研究所計画の2つのプロジェクトが担っている。超深地層研究所計画の研究用地と正馬様用地は、広域地下水流動研究の研究実施領域の中に位置しており、双方の研究成果を有機的に組み合わせることにより、図2.1-6に示した広域スケールから坑道スケールに至るまでの地質環境を体系的に調査・評価するための技術を整備する。ここではこれら2つのプロジェクトの役割と研究の進め方について紹介する。

広範な領域において空間的に不均質な地質環境を対象として、例えば人工バリア周辺と同等の精度で地層処分にとって重要な地質環境特性を、くまなく理解することは不可能である。このことから、調査量や時間的制約などを考慮した現実的な方策として、対象となる領域をいくつかのスケ-

ールに区分した上で、段階的に地質環境特性を理解していくアプローチを採用している。この場合、各段階における調査研究の達成目標や、そこで記述される地質環境特性に関わる情報の精度や確からしきは異なり、一般的には段階が進むにつれ、その精度や確からしきは向上する。

これら2つのプロジェクトでは、東濃地域を事例として「安全評価手法の高度化」や「処分技術の信頼性向上」の基礎となる地質環境特性に関わる情報（データセット、地質環境モデル、予測解析結果など）を蓄積しつつ、地質環境を体系的に調査・解析・評価するための技術基盤を整備する。また、超深地層研究所計画においては、研究坑道などの設計・施工に資する地質環境特性に関する情報と、研究坑道掘削に伴う地質環境への影響評価などに関する情報を効率的かつ効果的に取得し、データセットとして取りまとめることも必要である。このように、超深地層研究所計画においては、情報の反映先が多様となるとともに、データの種類や品質も反映先毎に異なる。さらに、反映先に受け渡すまでのデータの解釈やモデル化の考え方も多岐にわたるため、研究目標/反映先、それを達成するための方法や系統的なデータの流れ、お



図 3.1-1 研究目標/反映先と系統的なデータの流れを記述・整理したフローの一例
—超深地層研究所計画の統合化データフロー（地質・地質構造）—

よびそのスケールを明示しつつ研究を展開することが重要である。

以上の点を踏まえ、研究目標/反映先と系統的なデータの流れを記述・整理した統合化データフロー（図 3.1-1）を作成し、研究を進めている（大澤ほか，2001）。なお、この統合化データフローは、研究の進展により得られる知見を踏まえ、その妥当性を評価しつつ段階的に最適化および詳細化していく。

スケールの考え方については、「全体計画」に示した広域・施設・坑道の 3 つを基本としている（「全体計画」；サイクル機構，2002）。ただし現状では、「安全評価手法の高度化」などとの連携のために、主に地表からの調査において中心となる広域と施設スケールをそれぞれ 2 つに区分し、図 3.1-2 に示すように、リージョナル・ローカル・サイト・ブロックの 4 つに細分化して進めている。なお、坑道スケールについては、今後、超深地層研究所計画の第 2 段階の計画を具体化する中で、必要に応じてスケールの細分化などを検討する。

表 3.1-1 に、安全評価手法の高度化への反映の観点から設けた地表からの調査研究における地質環境のモデル化の目標と対象スケールを示す。地質環境特性に関わる情報は、先に示した反映先の目的に応じて取得され、反映先別に相互に活用される。このことから、「処分技術の信頼性向上」、「地下研究施設の設計・施工」、および「地質環境への影響評価」などの反映先に関する基礎情報についても、図 3.1-2 に示したスケールを参考に、それぞれの目標を整理している（表 3.1-2）。

表 3.1-1 地質環境のモデル化の目標とスケール（安全評価手法の高度化への反映の観点）

安全評価手法の高度化		
領域	目的/ねらい	スケール
広域スケール	リージョナル	・ローカルスケールの領域および境界条件の設定 平面：数100km ² 程度 （数10km×数10km） 深さ：10km程度
	ローカル	・地層処分システム全体の評価 平面：数10km ² 程度 （数km×数km） 深さ：数km程度
施設スケール	サイト	・人工バリア周辺～天然バリアの評価 ・人工バリア周辺の境界条件の設定 平面：数km ² 程度 （数100m～数km×数100m～数km） 深さ：2～5km程度
	ブロック	・人工バリア周辺の評価 ・地層処分システムの一部の地質環境に着目した評価 平面：数100m ² 程度 （数10m～数100m×数10m～数100m） 深さ：数100m～1km程度

表 3.1-2 反映先別の地質環境のモデル化の目標

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

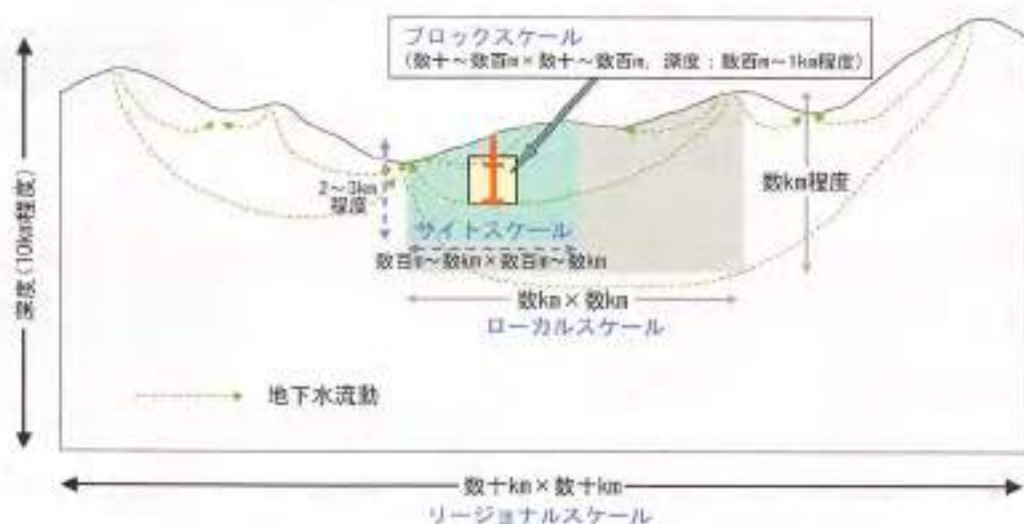


図 3.1-2 スケールの概念

リージョナルスケールは、数 10km 四方以上の広範な領域を対象に大局的な地下水流動を理解しつつ、地層処分システム全体の安全評価を考える上で重要となる一つの地下水流動系を包含した領域（ローカルスケール）を抽出するために設けている。また、ローカルスケールの領域やその境界条件の設定も実施する。ここでは、広範な領域を対象に文献情報を基に地質環境のモデル化などを進めている。

ローカルスケールは、基本的に涵養域から流出域までの一つの地下水流動系を包含した領域で、とくに地層処分システム全体の安全評価に資する地質環境特性に関する情報の取得と地質環境のモデル化に重点をおいて進める。また、サイトスケールの領域や境界条件の設定も実施する。ここでは、一つの地下水流動系の確認、地下水流動を大きく規制している大規模不連続構造の分布や物性および地下水の地球化学特性など、対象となる領域の地質環境特性を概括的に把握するための空中および地上からの物理探査や試錐調査などを実施する。

サイトスケールは、ローカルスケールの中から研究坑道周辺の地質環境に着目して、人工バリア周辺の天然バリアの評価、および研究坑道を設置する母岩を通過する流束などの評価に資するための領域である。また、ブロックスケールの領域および境界条件の設定も実施する。ここでは、研究所用地周辺に焦点をあてて、ローカルスケールに比べて密度の高い地上物理探査や試錐調査などを実施する。

ブロックスケールは、人工バリア周辺の天然バリアのより詳細な評価に資するために、サイトスケールの中から、研究坑道周辺の割れ目密度の低い健全な岩体、あるいは主要な水みちと考えられる断層や割れ目帯など、一部分のブロックに注目して地質環境特性を詳細に把握する領域である。ここでは、地表および試錐孔を利用した密度の高い調査、試錐孔間での試験など多様な調査を実施する。このスケールの調査研究で得られる地質環境特性に関する情報は、第 2 段階以降の研究坑道を利用した調査研究の計画立案において特に重要となる。その一方で、ここで得られた地質環境特性に関する情報や知見は、ローカルやサイトスケールへフィードバックすることで地質環境モデルの妥当性の評価や更新のための情報として活用する。

なお、プロジェクト別には、リージョナルとローカルスケールを広域地下水流動研究が、サイトとブロックスケールを超深地層研究所計画が担っている。

ここまでに示したスケールに応じた研究の進め方に沿って実際に研究を進めるにあたっては、調査の密度に依存する地質環境特性に関わる情報の精度や確からしさに限界があることを踏まえたアプローチが必要となる。このことから、東濃地科学センターにおいては、スケール毎に「安全評価手法の高度化」などの反映先において重要となる地質環境特性をあらかじめ明示し、調査量と地質環境モデルがもつ不確かさとの関係の評価（不確かさの幅、不確かさの低減に向けた重要な要素の抽出）をできるだけ定量的に繰り返し実施するアプローチを適用している（図 3.1-3）。このアプローチにより、次の調査や段階へ移行する判断根拠が提示できると考えている。

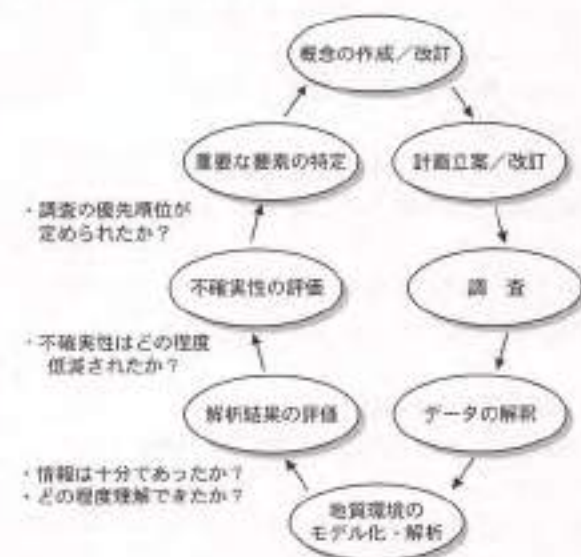


図 3.1-3 調査・研究の繰り返しアプローチ

参考文献

- 核燃料サイクル開発機構 (2002)：東濃地域における地質環境特性に関する調査研究－地表からの調査研究の考え方と進め方、サイクル機構技術資料、JNC-TN7410-2002-008。
- 大澤英昭、中野勝志、太田久仁雄 (2001)：超深地層研究所計画における地表からの調査研究成果の統合化、日本原子力学会「2001年秋の大会」予稿集、p.918。

3.2 広域地下水流動研究

3.2.1 研究の概要

① 背景と目的

広域地下水流動研究は、2.2.1 1)項において示した課題項目①の「地質環境特性に関する研究」を担う一つのプロジェクトである。3.3 項で示す超深地層研究所計画の研究用地および正馬様用地は、広域地下水流動研究の研究実施領域の中に位置しており、双方の研究成果を有機的に組み合わせることにより、図 3.1-2 に示したリージョナルスケールからブロックスケールに至るまでの地質環境を体系的に調査・評価する技術を整備する。

本研究は、平成 4 年度から東濃鉱山周辺の 10 km 四方程度を調査対象（研究実施領域）（図 3.2-1）に、広域における地表から地下深部までの地質・地質構造、地下水の流動特性や地球化学特性などを明らかにするために必要な調査・解析技術ならびに調査・解析結果の妥当性を評価するための技術の開発を主な目的として進めている（動燃事業団、1997）。

研究実施領域を含む東濃地域では、基盤をなす後期白亜紀の土岐花崗岩を新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）が不整合で覆い、さらにそれを固結度の低い新第三紀鮮新世の砂礫層（瀬戸層群）が不整合で覆っている（図 3.2-2）。

② 実施項目と進め方

本研究では、実際の地質環境を対象にリージョナルおよびローカールスケールの調査研究を通して、限定された情報量で地質環境の何がどの程度把握できるのかを事例的に示すこと。適用した各種調査・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、研究全体を通しての主要な研究課題としている（サイクル機構、2002）。

リージョナルスケールの調査研究では、まず数十 km 四方の広域における地下水流動系を推定する。次に、超深地層研究所計画の研究用地および正馬様用地を包含する涵養域から流出域までの一つの地下水流動系を推定するとともに、ローカールスケールのモデル化領域やその境界条件を設定する（表 3.2-1）。そのためには、対象とする地下水流動系を適切に評価するためのモデル化領域や境界条件の設定方法を構築することが重要な検討

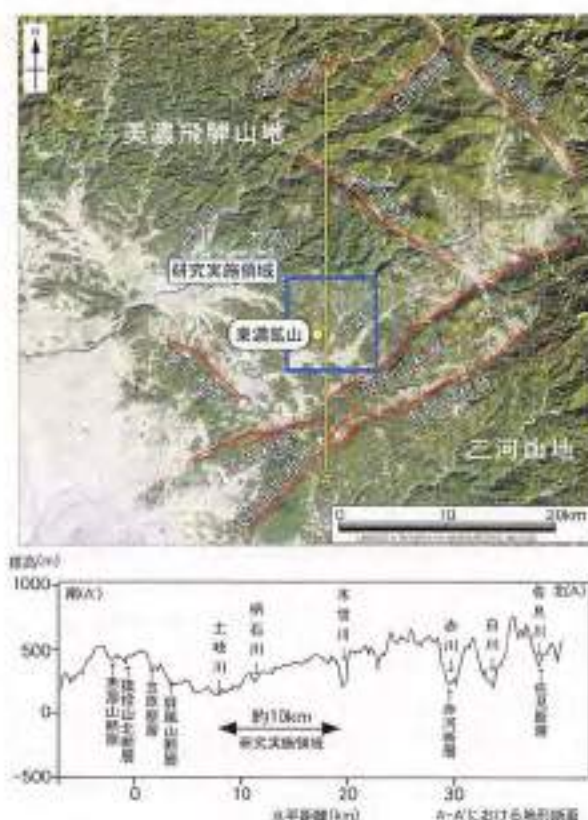


図 3.2-1 広域地下水流動研究の研究実施領域

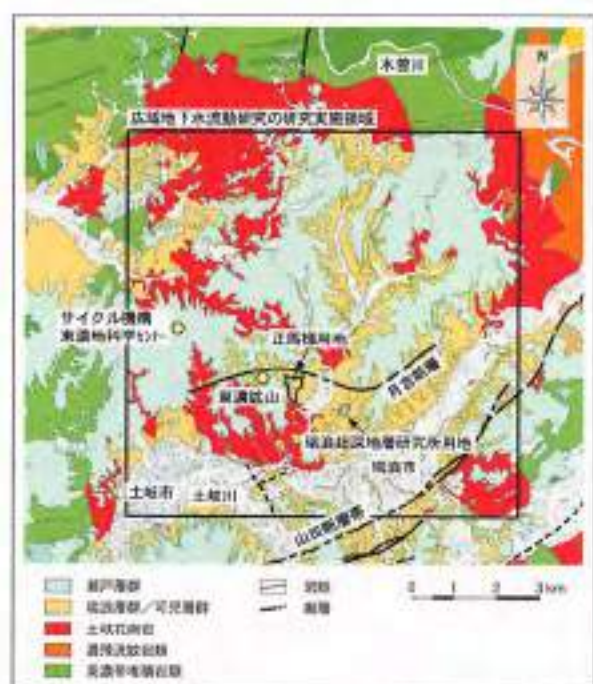


図 3.2-2 東濃地域の地質概要

課題となる。

ローカールスケールの調査研究では、表 3.2-1 に示すように、領域の地下水流動を大きく規制して

表 3.2-1 広域地下水流動研究で対象とするスケールと地質環境特性の記述要案

	地質環境モデル				スケール
	地質構造	水理地質構造	地球化学	水質力学	
リージョナル スケール (Regional Scale)	<p>場のモデル</p> <ul style="list-style-type: none"> 文献および既存資料に示された以下の地質構造要素 <ul style="list-style-type: none"> ①地帯 ②領域内を区分する可能性のある長さ数km以上の大規模不連続構造 ③地帯 ④層位および地層厚の分布 	<p>場のモデル/現象モデル</p> <ul style="list-style-type: none"> 文献および既存資料を基に構築した地質構造モデルに示された不連続構造および地帯構造区分等の平均透水係数、地下水位など 			<p>平面： 約100km² [幅10km× 長10km]</p> <p>深さ： 10km程度 まで</p>
ローカル スケール (Local Scale)	<p>場のモデル</p> <ul style="list-style-type: none"> 領域内に存在する可能性のある以下の主要な不連続構造 <ul style="list-style-type: none"> ①領域を横断または縦断する構造 ②Site Scaleの調査を考えた場合、領域を区分する可能性のある長さ3km以上の構造分布と地質学的性状 対象となる地帯において、割れ目帯や空層構造または岩相に明瞭なコントラストが認められ、領域内に広く連続して分布することが予測される構造区分または異相区分 地形および母岩の配列面 層序を基にした地層厚の区分 	<p>場のモデル/現象モデル</p> <ul style="list-style-type: none"> 地質構造モデルで記述された不連続構造の内、母岩と対象となる地帯に比べオーダー単位で平均透水係数が異なる点と考慮される構造 地質構造モデルで区分した構造においてオーダー単位で平均透水係数が異なる点と考慮される区分 新設地となり得る構造を評価・記述するための情報 地下水面または地表からの高水位 Regional Scaleの解析に基づく境界条件 	<p>場のモデル/現象モデル</p> <ul style="list-style-type: none"> 領域内の裂隙水および河川水の地球化学的特性と分布 地層厚および母岩の対象となる岩層中の地下水の地球化学的特性の地質学的分布 地質構造に示された主要な不連続構造等の地下水の地球化学的特性 地下水の年代に関する風情的な記述 		<p>平面： 約10km² (約5km× 約2km)</p> <p>深さ： 3km程度 まで</p>

いる可能性のある地質構造として、同領域を横断または縦断する規模の長さ数 km 以上の不連続構造の分布と幾何学的性状、領域の概略的な動水勾配や地下水の流動経路、および地下水の地球化学特性を合理的に調査・評価することが重要である。また、この調査研究を通して、地質環境が本来持つ不均質性、調査データの品質と量などに依存する地質環境モデルや地下水流動解析結果の不確実性の評価が重要な検討課題となる。

平成 14 年度、リージョナルスケールの調査研究においては、後背地地形の影響を考慮した領域の異なる複数の水理地質構造のモデル化と地下水流動解析などを行い、ローカルスケールのモデル化・解析領域および境界条件の設定に関する検討を実施した。

また、ローカルスケールの調査研究については、サイトスケールとの整合性を考慮して、①数 km から数百 m 規模の断層や割れ目帯および水みちを検出するための調査技術の開発、②ローカルスケールにおける水理地質構造のモデル化と地下水流動解析技術の構築、③地下水流動解析結果と地球化学モデルの整合性の確認の 3 つの課題について検討した。具体的には、精密空中写真判読調査による長さ数 km ～ 数百 m のリニアメントの抽出およ

び断層や割れ目帯の位置との比較、試錐孔近傍における規模の大きな断層や割れ目帯および主要な水みちの位置や透水性の確認、地下水の水質分布と水質形成機構の検討を行うとともに、これらの調査に必要な手法の構築を実施した。

③ 成果の反映先

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

④ 今後の計画

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

この調査研究の過程で断層などの同定とその特性を評価する技術の適用性確認など残された課題の解決に向けて深層試験調査などを実施し、平成17年度までに研究成果を取りまとめる予定である。

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 森本計画書，動力事業団技術資料，PNC TR7020-98-001。
- 糸倉川淳二（1980）：稲波地域の地質，岩波市化石博物館専報，1，pp 1-50。
- 核燃料サイクル開発機構（2002）：広域地下水流動研究 年度計画書（平成14年度），サイクル機構技術資料，JNC TR7410 2002-004。

3.2.2 各調査研究の成果

1) 地質・地質構造に関する調査研究

① 課題と計画の概要

広域地下水流動研究における地質・地質構造に関する調査研究は、ローカルスケールの地質環境を対象に、

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

を主要な課題として進めている。

平成 13 年度までに、衛星・空中写真判読調査、空中・地上物理探査および試錐調査を実施し、活断層や数 km を超える規模の断層（あるいは、対応するリニアメント）、基盤花崗岩および被覆堆積岩の分布を概括的に把握するとともに、それに係る調査技術を整備した（サイクル機構、2002）。

平成 14 年度は、超深地層研究所計画における研究坑道などの設置場所が新たな研究所用地に変更されたことを受けて、研究所用地周辺の地質・地質構造の把握に焦点をあてつつ、ローカルスケールからサイトスケールにおける地質・地質構造を包括的に検討する観点から調査研究を実施した。具体的には、空中写真判読調査、反射法弾性波探査および試錐孔における地質学的・地球物理学的調査を通して、数 km～数百 m およびそれより小さい規模の断層や割れ目帯の分布、地質学的特性の把握、ならびにその調査に必要な技術の開発を試みた。

② これまでの成果

i) 広域的な断層・割れ目調査

平成 13 年度までに実施した衛星・空中写真判読調査において今後の課題として示された、数 km～数百 m 規模の断層や割れ目帯（あるいは、地下構造に対応するリニアメント）の抽出を目的に、大縮尺の空中写真（1 万分の 1 スケール）を用いた空中写真判読調査を実施した。その結果、100 m 程度の規模の小さなリニアメントを含め、計 472 本のリニアメントを判読した（図 3.2-3）。

判読した数 km～数百 m 規模のリニアメントと、これまでに実施した地表調査や試錐調査により確認した断層や割れ目帯の位置とを比較した結果、位置や方向においてそれらの一部が整合的な分布を示していることが確認できた。このことから、研究実施領域において判読されたリニアメントは、数 km～数百 m 規模の断層や割れ目帯に対応している可能性が考えられる。



図 3.2-3 研究実施領域における小規模リニアメントの分布

また、研究実施領域の中央部において反射法弾性波探査を実施し、断層や割れ目帯の分布、堆積構造などを把握するための解析作業とともに、既存の地質構造モデルの妥当性ならびにリニアメントと断層や割れ目帯との関係についての検討を進めている。

ii) 試錐孔における断層・割れ目調査

試錐孔における断層や割れ目帯の同定・特性評価技術を開発・整備するために、瑞浪超深地層研究所用地の近傍の既存試錐孔である DR-2 号孔（垂直孔、掘削深度 501 m；図 2.2-5 および 3.3-4）において、流体換層などと組み合わせた地質学的調査ならびに物理探査（マルチオフセット VSP (Vertical Seismic Profiling) 探査）を実施した。

この調査においては、地質構造モデルの作成にあたり、地下水流動を規制する構造を分類すると

いう観点から、調査対象となる断層や割れ目帯を、以下の三つに区分して検討した。

- ・断層などの大規模かつ連続する構造
- ・小規模な割れ目（帯）が集中する岩盤
- ・水みちとして機能している構造

a) 断層などの大規模かつ連続する構造

規模の大きな断層や割れ目帯を抽出するために、岩芯観察およびボアホールテレビユーアー観察による割れ目の分布調査を行った。その結果、割れ目の分布密度が有意に高く、かつ規模の大きな断層岩が分布する割れ目帯を計 5 区間抽出した。このうち 2 区間の割れ目帯は、これまでに確認されている断層の推定位置と概ね一致している（図 3.2-4）。また、DH-2 号孔におけるマルチオフセット VSP 探査により、図 3.2-4 中に青色の点線で示すように、DH-2 号孔近傍に 3 本の不連続構造の分布を推定した。これらの不連続構造は、超深地層研究所計画において実施した地表地質調査および反射法弾性波探査（3.3.2.1）参照）の結果から確認された図 3.2-4 中に赤色の点線で示す断層の分布と概ね一致している。

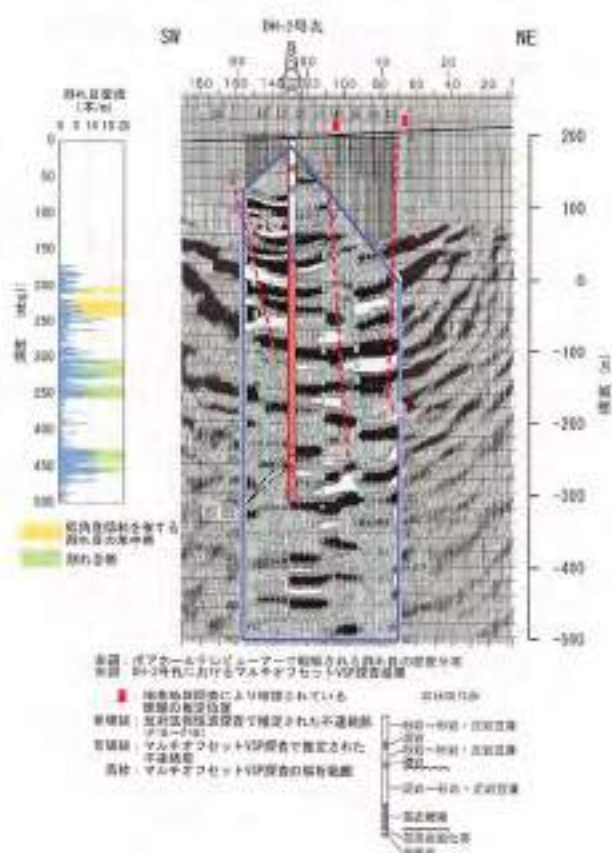


図 3.2-4 DH-2 号孔におけるマルチオフセット VSP 探査により推定した断層の分布

b) 小規模な割れ目（帯）が集中する岩盤

水平面に対して低角度の傾斜（0～30 度）を有する割れ目の分布密度およびマルチオフセット VSP 探査における低角度の反射面の分布に関する検討を行った。その結果、不整合直下から DH-2 号孔の孔底深度（501 m）までの区間は、「上部割れ目帯（基盤花崗岩の上部において低角度傾斜を有する割れ目の分布密度が有意に高い区間）」に該当することが明らかになった。このうち、深度 200～240 m 付近の区間は、上部割れ目帯の中でも低角度傾斜を有する割れ目の分布密度が高く、反射法弾性波探査では強い反射イベントが確認された（図 3.2-5）。

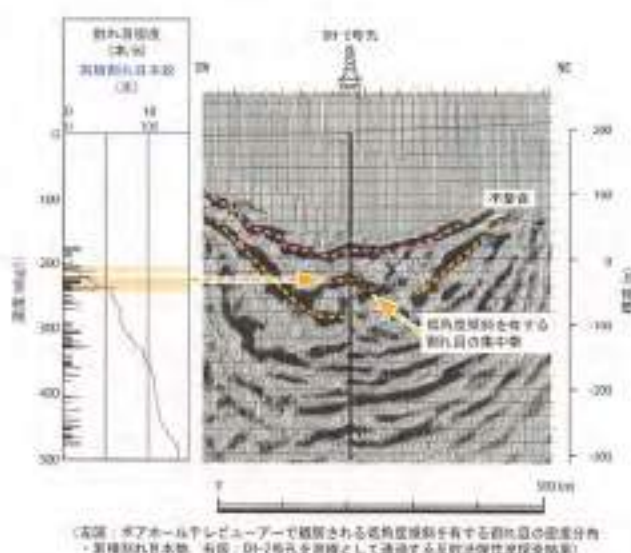


図 3.2-5 低角度傾斜を有する割れ目の集中帯の分布

c) 水みちとして機能している構造

岩芯観察およびボアホールテレビユーアー観察の結果に基づき、流体検層（電気伝導度検層；3.2.2.2）参照）によって抽出された地下水の流入・流出箇所における地質学的特徴を評価した。その結果、地下水の流入・流出箇所として抽出された計 19 箇所のうち 16 箇所は（電気伝導度検層結果の詳細については 3.2.2.2）参照）、割れ目帯あるいは低角度傾斜を有する割れ目の集中帯のいずれかに位置していることが明らかになった（図 3.2-6）。

また、地下水の流入・流出箇所において観察される割れ目の多くは、東西走向もしくは東北東走向を示し（石井ほか、2002）、とくに割れ目帯においては、前述の 2 方向の割れ目に、北北西走向を示す割れ目の交差も観察された（図 3.2-7）。

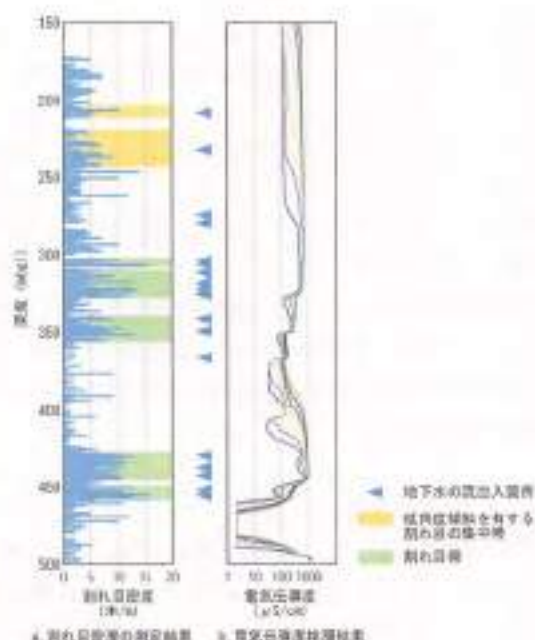


図 3.2-6 地下水の流入箇所と地質構造

図 3.2-6 地下水の流入箇所と地質構造

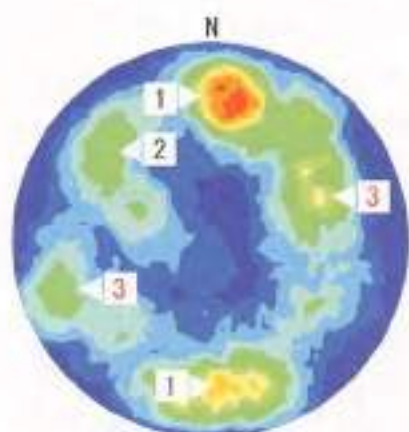


図 3.2-7 地下水の流入箇所と地質構造

図 3.2-7 地下水の流入箇所と地質構造

③ まとめ

平成 14 年度に実施した地質・地質構造に関する調査研究により、数 km～数百 m 規模の断層や割れ目帯の分布が推定でき、それより小さい規模を有する構造の分布に関する知見を得た。また、岩体を区分するような構造として、「上部割れ目帯」ならびに低角度傾斜を有する割れ目の集中帯の分布を把握したほか、水みちとして機能する構

造の地質学的特性を評価した。さらに、一連の調査を通して、数 km～数百 m 規模の断層や割れ目帯の同定、ならびに地質学的特性評価のための技術を開発・整備した。

今後は、これまでに推定された断層や割れ目帯の分布を確認するために試錐調査および地上物理探査を行い、得られた情報に基づいてローカルおよびサイトスケールの地質構造モデルを更新するとともに、これまでに整備した断層や割れ目帯の同定・特性評価技術の適用性を評価し、その高度化を図る。あわせて、整備した調査・解析・評価技術を組み合わせ、その体系化を図る予定である。

参考文献

石井英一、天野健治、水野 崇、竹内真司 (2002)：亀裂性岩盤中の水みちに認められる特徴—土岐花崗岩を対象とした研究事例—、日本応用地質学会中部支部平成 14 年度支部研究発表会講演会予稿集、pp.1-4。
核燃料サイクル開発機構 (2002)：広域地下水流動研究年度報告書 (平成 13 年度)、サイクル機構技術資料、JNC TN7410 2002-007。

2) 岩盤の水理に関する調査研究

① 課題と計画の概要

広域地下水流動研究における岩盤の水理に関する調査研究は、リージョナルおよびローカスケールを対象に、地下水流動特性を明らかにするために必要な調査・解析技術ならびに調査・解析結果を評価するための技術の開発を目的としている。この研究では、図 3.2-1 および図 3.2-2 に示した東濃地域を対象に、水収支観測を含む表層水理調査、試錐孔による原位置透水試験、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。

本研究における今後の主な課題は、リージョナルスケールの地下水流動系を対象としたモデル化・解析領域の設定方法、ならびにローカスケールに該当する涵養域から流出域を包含する流動系の推定と同スケールのモデル化・解析結果の妥当性の確認方法の構築である。この検討の過程で得られる成果は、超深地層研究所計画の基礎情報として活用する。

平成 14 年度は、ローカスケールの地下水流動解析のためのモデル化領域や境界条件の設定のため、当該領域を含むリージョナルスケールを対象とした地下水流動解析を実施した。また、現場の調査においては、ローカスケールの地下水流動解析に資する新たな表層水理観測の開始、既存試錐孔 (DH-2 号孔) における詳細な水みちの検出技術の開発を目的とした深層水理調査ならびに同孔への地下水位長期観測装置の設置を行った。また、既存試錐孔における地下水位・間隙水圧の長期観測を継続した。

② これまでの成果

表層水理調査では、水収支解析の結果、流域面積が大きくなると岩盤浸透量は小さくなる傾向が見られた (宮原ほか, 2002)。これは涵養域から流出域を含む広範な流域の地下水流動系の中で、その一部分に該当する上流域の観測地点では涵養の割合が大きくなるのに対し、より広範な流域を対象とした観測地点は、流出域までを含むため、流域全体では岩盤浸透量が小さくなるものと考え

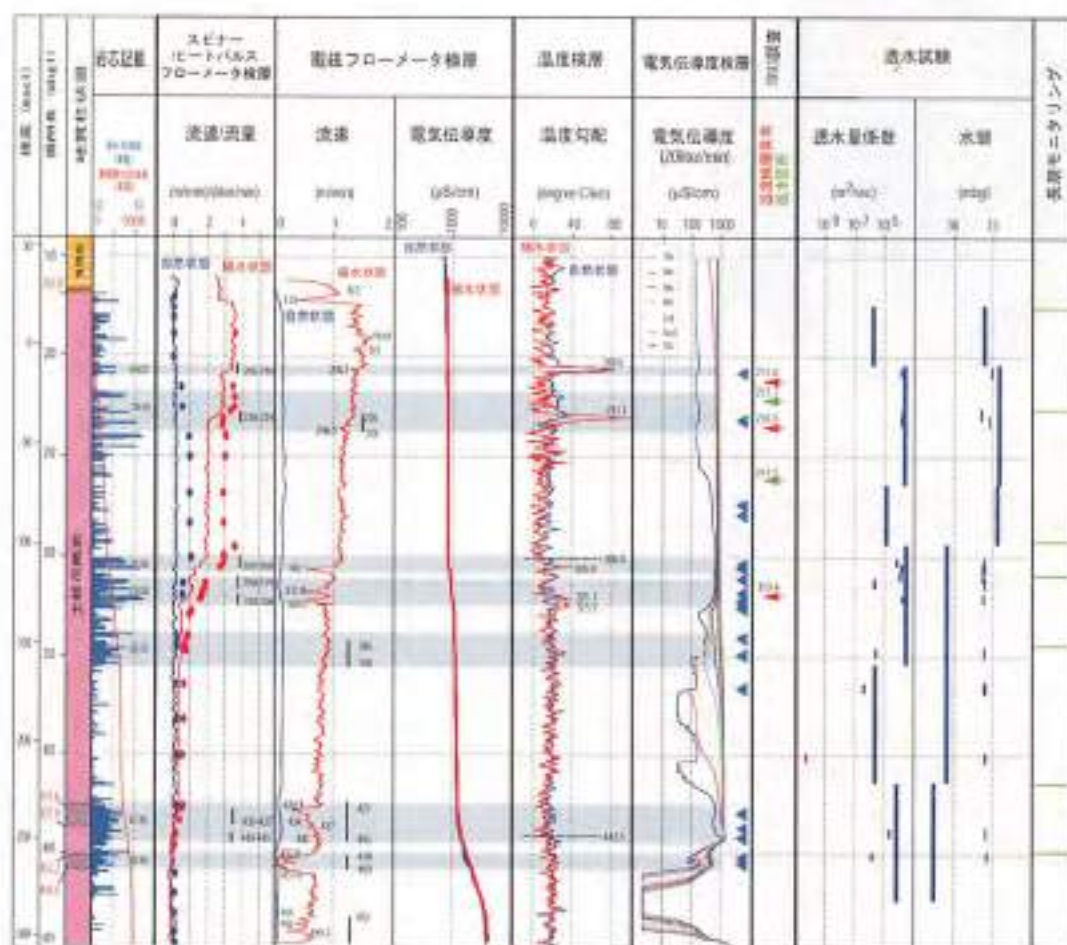


図 3.2-8 DH-2 号孔における検層・水理試験結果

られる。このことから、ローカルスケールにおける地下水流動解析の上部境界条件の設定に必要な、広範な流域を対象とした河川流量を把握するために、ローカルスケールの領域の中央部を流れる日吉川において新たに河川流量観測を開始した。

深層水理調査では、広域地下水流動研究の一環でこれまでに掘削された試錐孔のうち、深度約500 mの試錐孔(DH-2号孔)において瑞浪超深地層研究所用地周辺の水理学的な特性の把握と詳細な水みちを検出するための技術開発を目的とした水理調査を実施した。調査は岩芯記載、物理検層、ポアホールテレビ観察、ポアホールテレビユーアー計測、流体検層(温度検層、スピナー、ヒートパルスおよび電磁式のフローメータ検層、電気伝導度検層(試錐孔内の地下水をイオン交換水に入れ替え、その電気伝導度の時間変化から、有意な水みちの位置を検出する検層技術); Doughty and Tsang, 2002)、原位置透水試験を実施した(地質・地質構造に関する成果は、3.2.2 1)を参照)。

調査の結果、地質学的観察結果から5区間の割れ目帯と2区間のシーディング節理の集中帯が抽出された。また、水みちの検出を目的に実施した流体検層のうち、温度検層やスピナーおよびヒートパルス式フローメータ検層においては、主として上記の割れ目帯やシーディング節理の集中帯において、それぞれ、5箇所から7箇所において孔内流速や流量の変化点(地下水の流入出点)が認められた。電磁式フローメータ検層と電気伝導度検層においては、上記の3種類の流体検層で認められた地下水の流入出点の他に、10箇所以上の流入出点が認められ、この2つの検層技術が、他の流体検層と比較して、より多くの地下水の流入出点を検出できることを確認した(図3.2-8)。また、電気伝導度検層で抽出された地下水の流入出点を対象として原位置透水試験を実施した結果、すべての区間において高い透水性を示す結果が得られた。これらのことから、電気伝導度検層は花崗岩中の水みちを検出する有効な技術の一つであることが明らかとなった。なお、図3.2-8の深度450~500 mの間に電気伝導度の低い領域が存在するが、これは、この区間は割れ目が極めて少なく、またイオン交換水は孔底付近まで降下させたホースから注入していることから、初期の低い電気伝導度が保持されているためと推察される。

地下水のモデル化・解析においては、ローカルスケールのモデル化領域や地下水流動解析の境界

条件設定のため、ローカルスケールを包含するより広域的なリージョナルスケールの地下水流動解析を実施した。

リージョナルスケールを対象とした地下水流動解析については、ローカルスケールの地下水流動解析におけるモデル化領域および境界条件の設定方法の構築に主眼を置いた検討を実施している。平成13年度までは、主に正馬塚用地を中心とした領域を対象に地下水流動特性に関する調査研究を行ってきたが、平成14年1月、瑞浪市と研究所用地の賃貸借契約を締結し、研究坑道などの設置場所を研究所用地(市有地)に変更することとした。これを受けて、研究所用地の地表から深度1,000 m程度までを通過する地下水の涵養域から流出域を含む地下水流動系に着目したローカルスケールのモデル化領域およびその境界条件の設定に関する検討に着手した。

これまでの検討により、後背地地形が地下水流動へ及ぼす影響を考慮したモデル化・解析領域の設定が課題として挙げられている(サイクル機構, 2002)ことを踏まえ、研究所用地の周辺領域の地形的特徴の抽出(図3.2-9)と、それに応じた複数のスケール領域におけるモデル化・解析を実施し、後背地地形が研究所用地付近の地下水流動へ与える影響を検討した。

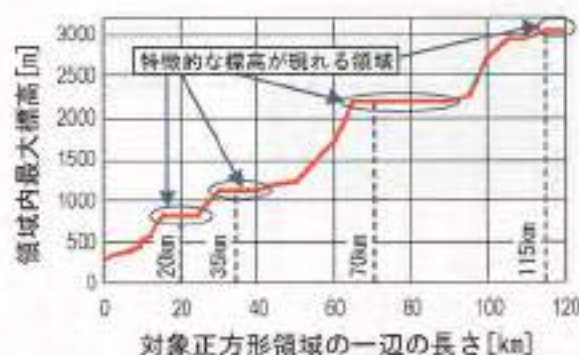


図3.2-9 研究所用地からの距離と最大標高の関係

本検討では、試錐孔で得られた情報は使用せず、一般に得られる文献による情報を用いてモデルを構築した上で地下水流動解析を実施した。なお、広域的な地下水流動へ与える影響が大きいと思われる大規模な断層についても、文献による情報を用いてモデル化した。

研究所用地の周辺領域の地形的特徴から、図 3.2-10 に示す 20 km～115 km 四方の 4 つの異なる

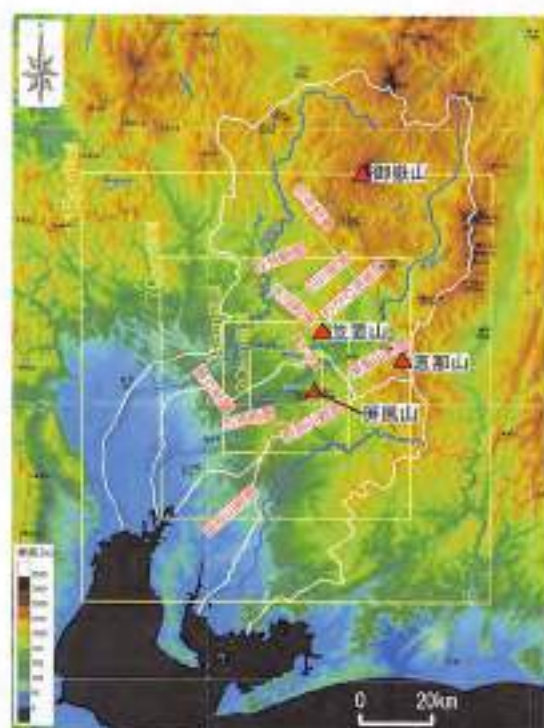
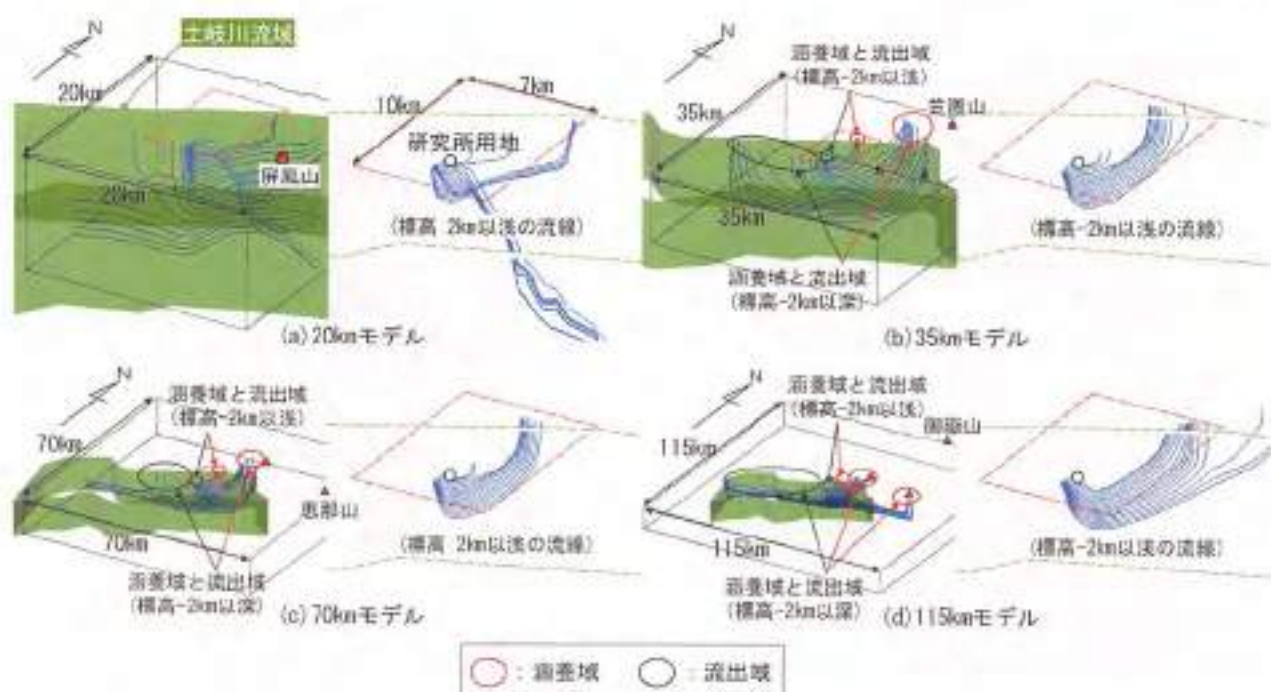


図 3.2-10 リージョナルスケールのモデル化領域

スケールにおいて、モデル化・解析を実施した（稲葉ほか、2002）。

図 3.2-11 に地下水流動解析結果（研究所用地の地下標高 -2,000 m 付近より浅い領域を通過する地下水の流線）を示す。この結果から、研究所用地付近の地下水流動系は研究所用地周辺 35 km 四方に含まれる地形の影響を受けていること、標高 -2,000 m 程度付近に流動系境界があり、それより浅い領域では土岐川と木曽川の流域境界の尾根を涵養域とし、土岐川を流出域とする系であることが推定された。

ローカスケールのモデル化領域の範囲設定に関しては、研究所用地周辺の地下水の涵養域から流出域までを包含する観点から、図 3.2-12 に示す領域をローカスケールのモデル化領域として抽出した。このローカスケールのモデル化領域において、地形面のみをモデル化し、側方境界条件を固定水頭境界としたケースと不透水境界としたケースを設定し、側方境界条件設定方法に関する予想的な地下水流動解析を実施した（稲葉ほか、2002）。その結果、側方境界条件を変化させても地下水流動解析により得られる研究所用地周辺の



- 1) 上記 4 つのスケールの解析結果は、左図が研究所用地の地下（モデル底部境界標高-10kmまで）の領域を通る地下水の流線経路の予測結果（流線）を示す。一方、右図はそのうち標高-2km以上の領域を通る流線のみを取り出して示している。
- 2) 図中の緑で着色した部分は、土岐川の流域範囲を示す。
- 3) 標高-2km以上の研究所用地の地下水は、各モデルの解析結果によると研究所用地の北部から涵養し、南側に位置する土岐川に流出する流動系が見取れる。ただし、20kmモデルではその他に東部から涵養する流動系も認められる。

図 3.2-11 地下水流動解析結果（研究所用地を通過する地下水の流線）

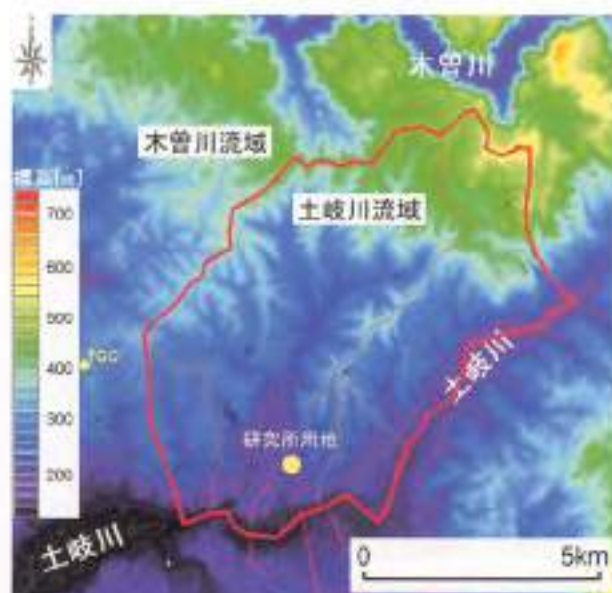


図 3.2-12 ローカルスケールのモデル化領域

移行経路や移行時間に大きな変化は認められず、側方境界条件が解析結果に与える影響は小さいと判断した。このことから、本検討で抽出されたローカルスケールのモデル化・解析を実施する場合の側方境界条件は、固定水頭境界あるいは不透水境界として設定できると考えられる。また、研究所用地周辺の地下水流動系は標高 -2,000 m 付近を境に流動系が異なることから、ローカルスケールにおけるモデル化・解析の際は底部境界として標高 -2,000 m に不透水境界を設定できると考えられる。

③ まとめ

広域地下水流動研究における岩盤の水理に関する研究では、リージョナルスケールにおける地下水流動解析を実施し、研究所用地周辺の地下水流動系に着目したローカルスケールのモデル化・解析領域およびその境界条件を設定した。また、ローカルおよびサイトスケールの両モデル化・解析に関わる調査研究の一環として、研究所用地のごく近傍に位置する既存試錐孔 (DH-2 号孔) において、地質構造および水理地質構造モデルの入力情報の取得などのために再調査を実施し、水みち検出技術の有効性を確認するとともに、複数の地下水の流入出点を把握した。

今後は、ローカルスケールの水理地質構造のモデル化および超深地層研究所計画へ情報を提供するためにローカルスケールのモデル化領域において深層試錐調査を実施する。また、同試錐孔に水

圧の連続観測などのために長期モニタリング装置を設置する。さらに、モデル化・解析結果の妥当性の確認方法の検討のため、モデル化・解析結果と試錐孔における水頭分布との比較や、水質情報との相互比較により、ローカルスケールの地下水流動系を対象とした地下水流動特性の評価を実施する予定である。

参考文献

- Doughty, C. and Tsang, C. F. (2002) : Inflow and outflow signatures in flowing wellbore electrical conductivity logs, rep. LBNL-51468, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発～平成 13 年度報告～, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2002-003.
- 稲塚 薫, 三枝博光, 中野勝志, 小出 啓 (2002) : 産部地下水の流動系を把握するためのモデル化領域とその境界条件の設定に関する検討, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 359-364.
- 宮原智哉, 片岡達彦, 竹内真司 (2002) : 水収支観測による岩盤浸透量の算出と観測流域スケールの検討, 日本地下水学会 2002 年秋学術講演要旨集, pp. 202-205.

3) 地下水の地球化学に関する調査研究

① 課題と計画の概要

広域地下水流動研究における地下水の地球化学に関する調査研究では、ローカールスケールを対象に深部地下水の地球化学特性の三次元的分布を把握し、地球化学モデルを構築するための調査研究を通して、花崗岩分布域における水質形成機構を明らかにするとともに、地下水の地球化学特性を把握するための調査・解析技術を構築することを目的としている。そのため広域地下水流動研究の研究実施領域（図 3.2-13）の土岐花崗岩を対象に、

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

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

平成 13 年度までに、研究実施領域に分布する地下水の地球化学特性について三次元的分布を把握した。平成 14 年度は、データ数の少ない研究実施領域の南方領域（土岐川周辺）の地下水について、調査・解析を実施した。



図 3.2-13 広域地下水流動研究における試錐孔位置図

② これまでの成果

i) 水質分布の把握

これまで、研究実施領域の北方領域に分布する地下水は、深度約 300 m 以浅において Na, Ca, HCO₃ イオンに富む中性の水質であり、深度約 300 m 以深では Na, HCO₃ イオンに富む弱アルカリ性の水質であることが確認されている。一方、流出域である南方領域の土岐川周辺に位置する DH-12 号孔（図 3.2-13）では、深度 200 m 以深において海水の 1% 程度の塩分濃度の Na, Cl イオンに富む地下水が存在することが確認された。この Na, Cl イオンに富む地下水は、瑞浪超深地層研究所に近接する DH-2 号孔（図 3.2-13）においても分布が確認され、同試錐孔ではこれらの濃度が深度とともに上昇する傾向が観察された。以上の観察結果から、研究実施領域の地下水の化学特性について、北方領域（ローカールスケールの地下水流動解析における上流域）では Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型地下水が、南方領域（ローカールスケールの地下水流動解析における下流域）では Na-Cl 型地下水が分布する水質分布モデルが構築できる（図 3.2-14）。また、地下水中の放射性塩素（³⁶Cl）の濃度は、中流域（超深地層研究所計画正馬様用地内の MIU-4 号孔）の地下水に比べ、下流域（DH-12 号孔）の地下水の方が濃度が低く、滞留年代が長いと推察され（図 3.2-15）、ローカールスケールの地下水流動解析により得られた移行経路や移行時間と整合的である。

ii) 水質形成機構の考察

Na-Ca-HCO₃ 型～Na-HCO₃ 型地下水の起源は、水素・酸素同位体比から天水と考えられる。この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、長石類の溶解反応などが挙げられる（サイクル機構, 2002）。

Na-Cl 型地下水については、1) 長期にわたる水-岩石反応、2) 化石海水などの混合、3) 温泉水との混合などがその成因として想定される。成因を同定するため、溶存化学成分の濃度比を計算した結果、地下水の Br, Cl 濃度は互いに非常に良い相関を示し（図 3.2-16）、その比は約 0.002 であった（Metcalf et al., 2003）。この相関は、水-岩石反応の程度または同じ比を持つ高塩素濃度地下水との混合の程度を反映している可能性がある。

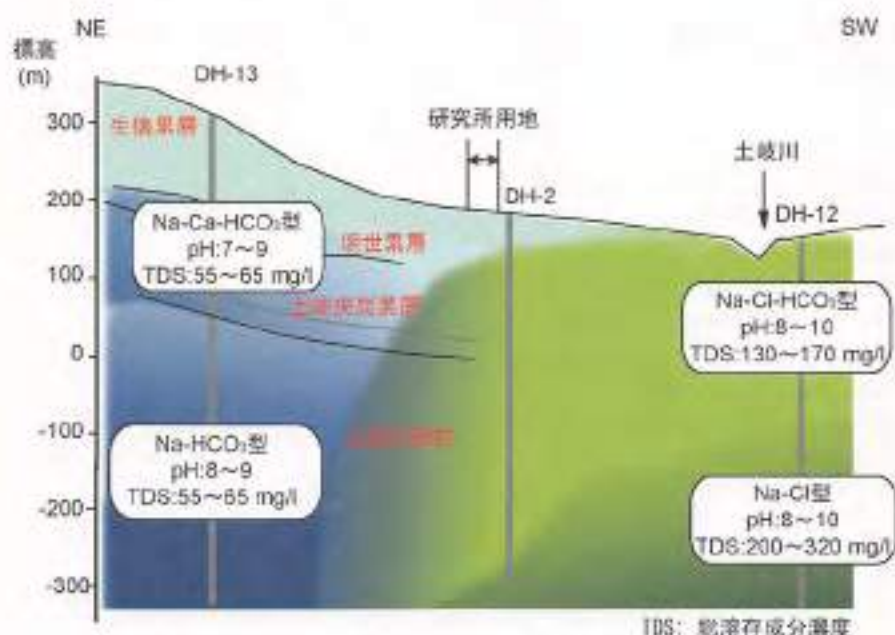


図 3.2-14 研究実施領域内の地下水水質分布モデル

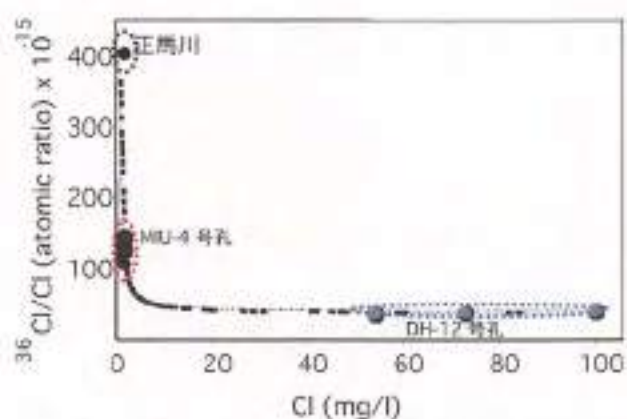


図 3.2-15 ローカールスケールの地下水流動解析における中流域から下流域の放射性塩素濃度

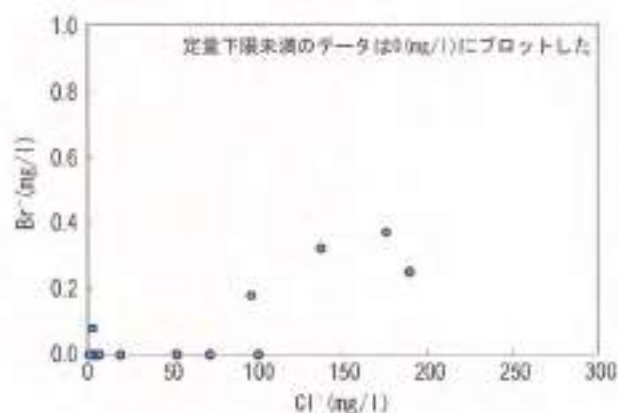


図 3.2-16 花崗岩中の地下水の Br と Cl 濃度の相関

一方、Na イオンと Cl イオンの濃度比は約 0.42 であり、海水の濃度比に近い値を示し、より深部に化石海水などに由来する高塩素濃度地下水が存在している可能性も考えられる。いずれにしても、土岐花崗岩中の水質は深部に存在する高塩素濃度地下水と、浅部の低塩素濃度地下水との混合により形成されていると考えられる。観察された地下水中の塩分濃度は海水の約 1% と非常に低いことから、混合している高塩素濃度地下水の割合が小さいと考えられるが、現段階では、その起源や成因を明確にすることは困難である。

このような異なる水質を持つ地下水の混合により水質が形成される環境では、各化学成分濃度の深度依存性や化学成分間の相関を把握することで領域内の水質を推測し、水質形成機構を明確にできると考えられる。今後の調査では、土岐川周辺の深部地下水について、混合の端成分となっていると推測されるより高塩素濃度の地下水の起源や成因について明確にすることが課題である。

③ まとめ

DH-12 号孔に引き続き、地下水の流出域である土岐川近傍の試錐孔 DH-2 号孔からも Na-Cl 型の地下水が確認された。平成 14 年度はこれら Na-Cl 型地下水の存在を反映した水質分布の概念モデル構築を行った。今後はこの Na-Cl 型の地下水について、より詳細な分布を把握するために、試錐調査および既存試錐孔から採取した地下水の分析お

よび解析を実施する。また、その水質形成機構についても調査を実施し、モデルへ反映させていく。

参考文献

- 核燃料サイクル開発機構 (2002) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発—平成 13 年度報告—。サイクル機構技術資料, JNC-TN1400-2002-003.
- Metcalf, H., Hama, K., Anno, K., Iwatsuki, T., Saegusa, H. (2003) : Geochemical approaches to understanding a deep groundwater flow system in the Iono area, Gifu-ken, Japan, 地盤工学会「地盤環境における地下水問題に関する国際シンポジウム」発表論文集。(印刷中)

3.3 超深地層研究所計画

3.3.1 計画の概要

① 背景と目標

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

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

これを受けて、平成 14 年、研究所用地およびその周辺において第 1 段階の調査・研究を開始した。また、平成 14 年 7 月には研究所の建設に着工し、平成 15 年 3 月までに用地の造成工事を完了した。一方、正馬様用地は、これまで蓄積した月古断層やその周辺の地質環境の情報や試錐孔などの研究資源を利用した要素技術の改良・高度化の場として活用していくこととしている。

研究所用地および正馬様用地を含む東濃地域では、基盤をなす後期白亜紀の土岐花崗岩を新第三紀中新世の堆積岩（瑞浪層群）が不整合で覆い、さらにそれを固結度の低い新第三紀鮮新世の砂礫層（瀬戸層群）が不整合で覆っている（図 3.3-1）。



図 3.3-1 研究所用地周辺の地質

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

② 実施項目と進め方

本計画の「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」においては、3.1 項で示したように、地層処分にとって重要な地質環境特性を段階的に把握するとの考え方のもと、広域地下水流動研究と組み合わせて地表からの調査研究のスケールを設定し、調査研究を進めている。超深地層研究所計画は、図 3.1-2 に示したスケール設定のうち、サイトスケールとブロックスケールの研究を担っている。

サイトスケール（数百 m～数 km 四方）の調査研究においては、研究坑道を掘削する母岩を通過する流束、研究坑道の掘削による地下水流動への影響や応力分布および力学物性に与える影響を把握することが重要となる。そのため、地下水流動に大きな影響を与え境界をなす可能性のある長さ数 km 未満～数百 m 以上の不連続構造の分布とその幾何学性状や、母岩となる岩盤およびその周辺岩盤中の不連続構造と分布密度を把握するとともに、それらの地質構造要素の透水性、地下水の水質、岩盤の応力分布や力学物性を把握し、地質環境のモデル化や予備解析をとおして地下水流動への影響や、応力分布および力学物性に与える影響を予測することが第 1 段階の目標となる（表 3.3-1）。

ブロックスケール（数百 m 四方）においては、母岩となる岩盤およびその周辺岩盤における物質移行特性を把握することが重要となる。そのため、母岩とその周辺岩盤中の長さ数百 m～数十 m の不連続構造の分布と幾何学的性状、分布密度、空隙構造特性やこれらの地質構造要素の透水性、母岩および地下水移行経路となる不連続構造中での遅延特性などを把握することが重要な目標となる。

本計画の目標である深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備を達成するためには、研究成果の反映先を明確にし、どのようなデータをどのような手法で取得し、研究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示すことが重要である。

表 3.3-1 超深地層研究所計画で対象とするスケールと地質環境特性の記述要素

	地質環境モデル				スケール
	地質構造	水理地質構造	地球化学	岩盤力学	
超深地層研究所計画	<p>場のモデル</p> <ul style="list-style-type: none"> 領域を区分する可能性のある長さ数km未満～数百m以上の不連続構造分布と幾何学的性状 母岩と成り得る岩盤およびその周辺岩盤中の不連続構造と分布密度および傾向(割れ目の不均質な分布を考慮した確率的アプローチへの対応) 地形および母岩の起伏箇の詳細記述 層序あるいは岩相に基づいた堆積岩の詳細区分 	<p>場のモデル/現象モデル</p> <ul style="list-style-type: none"> 地質構造モデルに記述された不連続構造の内、母岩と成り得る岩盤に比べオーダー単位で平均透水係数が異なると考えられる構造 地質構造モデルで区分した構造においてオーダー単位で平均透水係数が異なると考えられる区分 水理学的特性 (K, Sa) の不均質分布 地下水係または地表からの崩壊量 ローカルスケールの解析結果に基づく境界条件 	<p>場のモデル/現象モデル</p> <ul style="list-style-type: none"> 地質構造モデルに示された堆積岩区分に基づく地下水の地球化学的特性 地質構造モデルに示された母岩の対象となる岩盤の構造区分に基づく地下水の地球化学的特性または深度分布(コントラストが明確な場合) 地質構造モデルに示された不連続構造中での地下水の地球化学的特性 地下水移行経路に基づいた地下水の年代に関する記述 地質構造モデルに基づく岩盤の地球化学特性に関する記述 	<p>場のモデル/現象モデル</p> <ul style="list-style-type: none"> 広域応力場や歪みの情報に基づき設定した領域における、対象となる岩盤の応力分布および岩盤力学物性の空間的分布 応力分布や力学物性に明確な変化が認められるゾーンの区分 	<p>平面： 数km² (数100m ～数km × 数100m ～数km)</p> <p>深度： 2～3km 程度まで</p>
	<p>場のモデル</p> <ul style="list-style-type: none"> 母岩とその周辺岩盤中の長さ数100m～数10mの不連続構造の分布と幾何学的性状、分布密度および不均質性 母岩とその周辺岩盤および不連続構造の空間構造特性、鉱物学的・地球化学的特性および不均質性 <p><物質移行特性></p> <ul style="list-style-type: none"> 母岩および地下水の移行経路となる不連続構造中での遅延(吸着・マトリクス拡散)特性 	<p>場のモデル/現象モデル</p> <ul style="list-style-type: none"> 地質構造モデルに記述された不連続構造の不均質性を考慮したK, Sa, 有効空隙率などの分布 母岩とその周辺岩盤の不均質性を考慮したK, Sa, 有効空隙率などの分布 サイトスケールの解析結果に基づく境界条件 	<p>場のモデル/現象モデル</p> <ul style="list-style-type: none"> 地質構造モデルに示された母岩、周辺岩盤および不連続構造の地球化学特性および地下水の地球化学特性 	<p>場のモデル/現象モデル</p> <ul style="list-style-type: none"> 対象となる岩盤の応力分布および岩盤力学物性の空間的分布 応力分布や力学物性に明確な変化が認められるゾーンの区分 	<p>平面： 数100m² ～数km² (数100m ×数100m)</p> <p>深度： 数10m ～ 1m程度まで</p>

そのため、処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化といった観点から、研究成果の反映先や具体的なアウトプットを設定し、このアウトプットに至る調査・解析およびモデル化の流れ(データフロー)を明確にするための取組みを行ってきた(中野・大澤, 2001)。

地表からの調査では、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。段階的に行われる調査により情報が增加する過程で、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 3.3-2)を繰り返すことにより、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 3.3-3 に、平成 14 年に開始した研究所用地およびその周辺における第 1 段階の調査研究のコンセプトを示す。

平成 14 年度はこのうち、反射法弾性波探査、浅層試験調査、既存試験孔における調査を行い、



図 3.3-2 調査・研究の繰り返しアプローチ

特に、水理地質、地下水の水質、岩盤力学の基礎となる地質構造のモデルの更新を行ってきた。また、水理地質や地下水の水質に関するデータを取得し、これらの調査を開始する前に設定したそれぞれの分野の概念モデル(仮説)の確認を進めてきている。さらに、得られた情報に基づき、新規の深層試験調査の計画を策定し(Nakano et al., 2003)、平成 15 年 3 月より掘削を開始した。

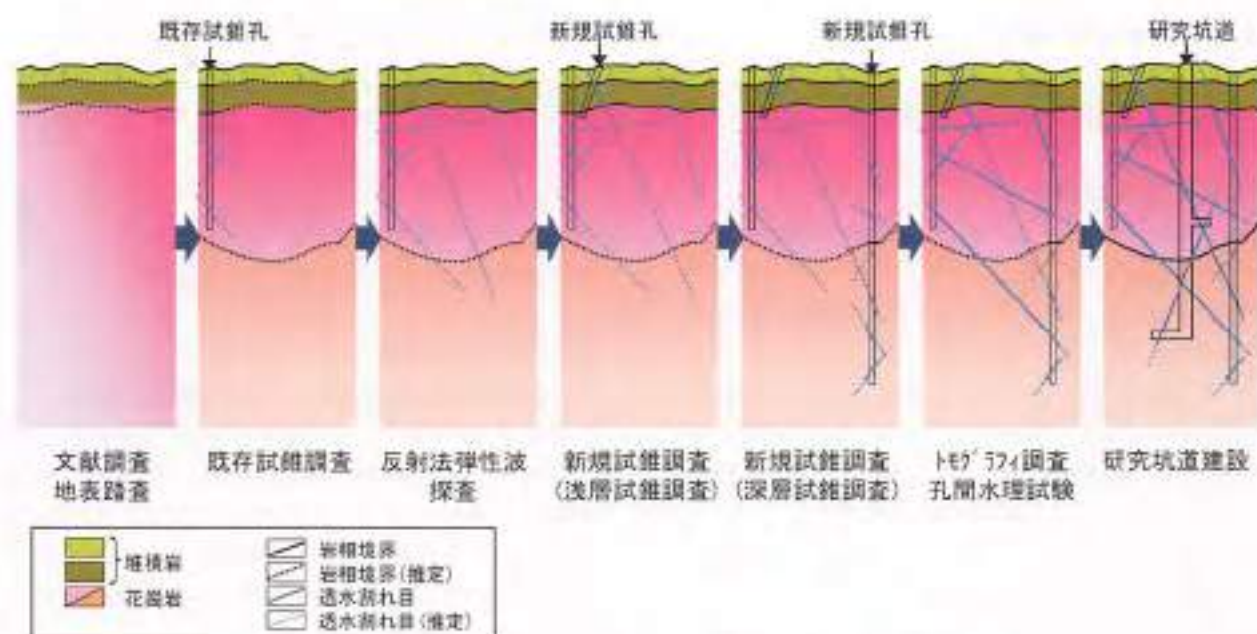


図 3.3-3 研究所用地における地表からの調査研究コンセプト

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

③ 成果の反映先

本計画の第1段階の成果（地表からの調査・解析・評価技術など）は、前述した広域地下水流動研究の成果と組み合わせて、地表からの調査研究により、サイトスケールからブロックスケールまでの地質環境を段階的に把握するための調査・評価技術として取りまとめる。これらの研究成果は、平成10年代後半を目標とされる概要調査地区の選定とそれに続く概要調査や、安全審査基本指針の策定を支援する技術基盤として反映する。

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

場としても活用していく。

④ 今後の計画

第1段階の調査研究については、平成16年度に現場での作業を終了し、取りまとめを開始する予定である。また、第2段階の調査研究については、平成15年度に研究坑道の立坑孔口部の掘削を開始し、平成16年度には槽を用いた立坑の本格掘削を開始する予定である。

なお、正馬様用地は、これまでに蓄積した月吉断層を含む地質環境の情報や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予定である。

参考文献

- 糸魚川淳二 (1980) : 瑞浪地域の地質, 瑞浪市化石博物館専報, 1, pp.1-50.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002) : 超深地層研究所地層科学研究基本計画, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2001-018.
- 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備研究段階の現状, サイクル機構技術, No.12 (2001.9), pp.91-106.
- Nakano, K., Arano, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Saogusa, H., Imai, E., Kumazawa, N., Iwatsuki, T., Yabuuchi, S. and Sato, T. (2003) : Working program for MIZ-1 borehole investigations, JNC Tech. Rep., JNC TN7400 2002-008.

3.3.2 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

超深地層研究所計画における地質・地質構造に関する調査研究は、サイト・ブロックスケールの地質環境を対象に、以下の2つを主要な課題として進めている。

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

平成13年度までに、正陽様用地において地上物理探査や試錐調査を実施し (Kumazaki et al., 2002, 2003)、地質構造の要素 (被覆堆積岩、基盤花崗岩、片古断層などの構造、および基盤花崗岩中の風化部、上部割れ目帯、下部割れ目低密度帯などの領域) を抽出するとともに、地質構造モデルを段階的に更新した。さらに、水みちの抽出・特性評価手法に関する知見を蓄積した (サイクル機構, 2002a)。

平成14年度は、研究所用地およびその周辺において、前述の知見や技術を活用しつつ、以下の調査を実施した。

- ・断層や割れ目 (帯) などの分布、被覆堆積岩と基盤花崗岩の不整合面の形状、堆積構造などに関する情報を取得するための反射法弾性波探査
- ・反射法弾性波探査において推定された被覆堆積岩および基盤花崗岩上部の地質・地質構造を

確認するとともに、断層や水みちとなっている可能性の大きな割れ目の分布・地質学的特性を把握するための調査 (浅層試錐調査の一環)

これらの調査で得られたデータをもとに、地質構造モデルを段階的に更新するとともに、必要な調査技術を改良し、その適用性を確認した。

② これまでの成果

1) 反射法弾性波探査による地質構造の推定

研究所用地およびその周辺における反射法弾性波探査は、断層や割れ目 (帯) などの分布、被覆堆積岩と基盤花崗岩の不整合面の形状、堆積構造などに関する情報の取得を目的に、図3.3.4に示す6測線で実施した。各測線における調査仕様を表3.3-2に示す。

広域地下水流動研究で実施した D11-2 井孔における地質学的・地球物理学的調査の結果 (3.2.2 1) 項) を参照し、反射断面記録において地質構造の解釈を行った。

その結果、被覆堆積岩と基盤花崗岩の不整合面は比較的大きな起伏を有し、被覆堆積岩はその起伏をほぼ水平に埋めるように堆積していることを把握した (図3.3-5)。また、古河川系を示すチャンネル構造は、研究所用地を通過し、北西 (LINE-1 および LINE-5) から南東 (LINE-3) に向かってその規模が大きくなることを推定した。この結果は、広域地下水流動研究において実施した地上電磁探査による基盤不整合面の推定結果 (サイクル機構, 2002b) と整合的であるが、反射法弾性波探査では地上電磁探査に比べて割りに測定をしていることから、より詳細な結果が得られた。

表 3.3-2 反射法弾性波探査の調査仕様

測線名	調査					
	発振器数	タイプ	発振の深さ	スイープ長	周波数	スタック数
LINE-1	2 (バイブレータ(YZ-2400))	P波	20m	15秒	10-300 Hz	5-20
LINE-2	30 (バイブレータ)		5m		20-100 Hz	5-10
LINE-3			2m		-	5-20
LINE-4					-	-
LINE-5a	モニタックター	S波	2m	-	-	-
LINE-5b	-	-	-	-	-	-

測線名	受信機					記録機 (Digital Telemetry G-DAPS-4)		
	受信点数	受信機間隔	受信機	受信機数/区	周波数	サンプリングレート	レコード長	チャンネル数
LINE-1	300ch	5m	SEA-1	9 Lines	80 Hz	4 msec	5 sec	500 ch
LINE-2	200 ch					280 ch		
LINE-3	2430 (LINE-1410 + LINE-3) (LINE-2)					240 ch		
LINE-4	200 ch					170 ch		
LINE-5	240 ch					340 ch		
LINE-5a	211 ch (3.15分)	2m	PE-6C	1 Lines	80 Hz	1 msec	2 sec	400 ch
LINE-5b	15 ch (3.15分)					200 ch		



図 3.3-4 研究所用地とその周辺における反射法弾性波探査の測線

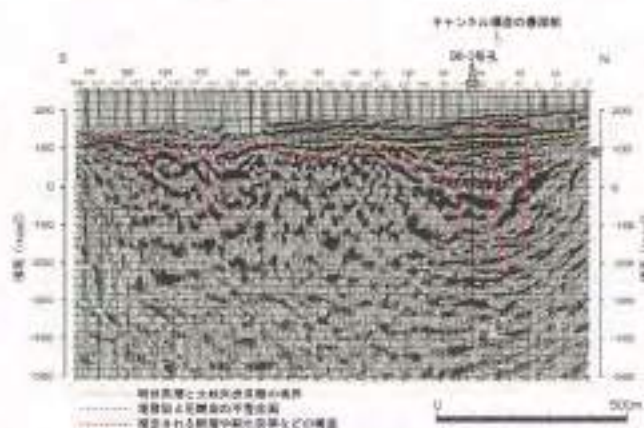


図 3.3-5 反射断面記録 (LINE-2) の地質構造解釈

断層や割れ目については、既存文献や地表踏査などの既存情報も活用し、月吉断層とそれに付随する新層のほか、研究所用地およびその近傍における小規模な断層や割れ目の分布を推定した (図 3.3-5 : 松岡ほか, 2002a, 2002b)。

基盤花崗岩を区分するような構造については、DH-2 号孔において認められた上部割れ目帯および上部割れ目帯中の低角度傾斜を有する割れ目の集中帯に対応した反射イベント (それぞれ図 3.3-6 中のイベント A および B) が認められ、研究所用地周辺の地質構造をモデル化する上で、割れ目帯などの水平分布を推定するための重要な情報が得られた (松岡ほか, 2002a, 2002b)。

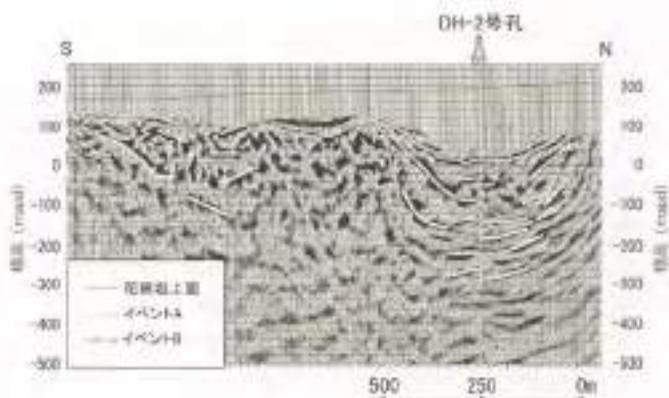


図 3.3-6 反射断面記録 (LINE-2) における基盤花崗岩中の反射イベント

ii) 浅層試験調査による地質構造の確認および特性評価

研究所用地において浅層試験調査を実施した。これは、反射法弾性波探査において推定された被覆堆積岩および基盤花崗岩上部の地質・地質構造 (不整合面の形状、堆積構造、基盤花崗岩風化部の分布など) の確認と、断層や木みちとなっている可能性の高い割れ目の分布・地質学的特性の把

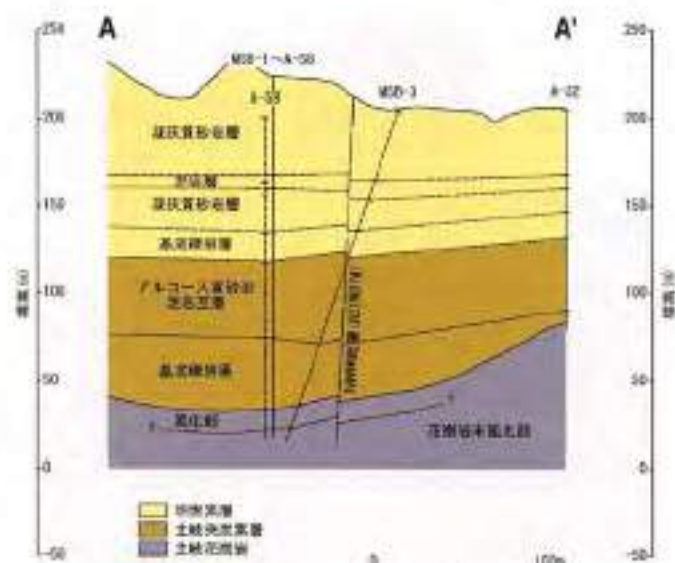


図 3.3-7 調査結果を基に推定した研究所用地を縦断する「NNW 断層」の分布

際を目的としている (Goto et al., 2002)。この調査では、新規に掘削した 4 本の試験孔 (MSB-1~4 号孔、掘削長約 100~200 m; 図 3.3-7) において、物理検層およびボアホールテレビ観察を行うとともに、岩芯観察や岩芯試料を用いた岩石鉱物試験を実施した。

その結果、地層・岩相 (明世累層、土岐夾炭累層、花崗岩風化部、花崗岩未風化部) 境界の深度を特定するとともに、研究所用地南東方に位置する地下壕および地表において確認された「NNW 断層 (北北西走向、ほぼ垂直、約 3 m 東落ちの垂直変位)」と連続すると考えられる断層破砕帯 (幅 1.2 m) を MSB-3 号孔において確認した (図 3.3-7 および 3.3-8)。この断層は断層粘土および断層角礫からなる断層コアを伴う。

一方、被覆堆積岩および基盤花崗岩上部において、水みちとなっている可能性の大きな割れ目の同定、およびその分布・地質学的特性の把握については、現在、ボアホールテレビ観察や物理・流体検層などのデータの解析を進めているところである。



*図中の A-32 および A-58 は、ウラン資源探査用の試験孔位置。

図 3.3-8 研究所用地における地質断面図

③ まとめ

平成 14 年度に実施した地質・地質構造に関する調査研究により、研究所用地およびその周辺における被覆堆積岩および基盤花崗岩上部の地質・地質構造 (不整合面の形状、チャンネル構造、堆積構造、基盤花崗岩風化部の分布など) を把握した。また、断層や割れ目帯の分布特性 (連続性、

幾何学的形状など) を評価した。これらのデータは、繰り返しアプローチに基づく地質・地質構造のモデル化のみならず、研究坑道の設計・施工に関わる地質・地質構造の基礎情報などとして、今後の調査研究全体の推進に必要不可欠なものである。また、一連の調査をとおして、正馬様用地において構築した地質構造の概念の妥当性、および反射法弾性波探査による地質構造の推定技術の適用性を確認するとともに、試験調査技術などの改良と適用性確認を行った。

今後は、これまでに取得されたデータを統合し、研究所用地 (ブロックスケール) の地質構造モデルを精度良く構築する。また、推定した地質・地質構造 (とくに断層や割れ目帯など) の分布を、今後の試験調査や孔間試験などにおいて確認することにより、これまでに整備した調査・解析・評価技術の妥当性を評価するとともに、その高度化を図る。

参考文献

- Goto, J., Ikeda, K., Kumazaki, N., Mukai, K., Iwatsuki, T. and Hama, K. (2002): Working program for shallow borehole investigations, JNC Tech. Rep., JNC TN7400 2002-005.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002a): 超深地層研究所計画年度報告書 (平成 13 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7400 2002-004.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002b): 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発一平成 13 年度報告一, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2002-003.
- Kumazaki, N., Ota, K., Nakano, K., Ikeda, K., Aneno, K., Takeuchi, S. and Hama, K. (2002): An overview of the MIU-4 borehole investigations during phase III, JNC Tech. Rep., JNC TN7400 2002-002.
- Kumazaki, N., Ota, K., McCrank, G. F. D., Ikeda, K., Aneno, K., Takeuchi, S., Hama, K., Nakano, K. and Osawa, H. (2003): An overview of the MIU-4 borehole investigations during phase IV, JNC Tech. Rep., JNC TN7400 2002-006.
- 松岡登幸, 上原大二郎, 藪内 聡, 中野勝志, 太田陽一, 川中 卓 (2002a): 花崗岩中の地質構造を対象とした反射法弾性波探査の適用, 日本地震学会 2002 年度秋季大会講演予稿集, P063.
- 松岡登幸, 上原大二郎, 藪内 聡, 太田陽一, 川中 卓 (2002b): 花崗岩地域を対象とした反射法弾性波探査の適用, 平成 14 年度応用地質学会中部支部研究発表会・講演会予稿集, pp. 31-36.

2) 岩盤の水理に関する調査研究

① 課題と計画の概要

岩盤の水理に関する調査研究は、サイトからブロックスケールの領域を対象としている。この研究では、地下水流動に関する調査・解析・評価技術の基盤を整備することと、研究坑道掘削前の地下水流動場を推定することが目標である。そのために、地表から地下深部までの岩盤の水理に関する情報の取得、水理地質構造モデルの構築、地下水流動解析とその評価を繰り返し実施する。

地下水流動に関する調査・解析・評価技術の基盤の整備に関しては、繰り返しアプローチ（図 3.3-2）におけるループの1項目として地下水流動解析結果の不確実性の評価を取り入れることにより、不確実性の低減に向けたより合理的な調査・解析・評価の体系化を試みている。

平成 14 年度においては、研究坑道などの設置場所が研究所用地に変更されたことを受けて、研究所用地およびその周辺では、文献調査をはじめ、地上物理探査や浅層試錐調査、既存試錐孔を利用した試錐調査などを実施した。また、これらの調査結果および広域地下水流動研究の知見とあわせて、研究所用地周辺を対象としたサイトスケールの水理地質構造のモデル化に着手した。また、研究坑道掘削前の初期状態の地下水流動場を推定し、同時にデータ量と不確実性の幅に関する検討を継続している。さらに、これらに用いた調査手法やモデル化・解析手法の適用事例を整理してきている。

正馬様用地および広域地下水流動研究の調査結果を用いたローカルスケールの水理地質構造のモデル化および地下水流動解析においては、解析結果の不確実性の幅に関する検討を取り入れた繰り返しアプローチの1回目の解析および評価結果を踏まえ、追加検討を実施した。なお、平成 14 年度までは、超深地層研究所計画においてローカルスケールの水理地質構造のモデル化および地下水流動解析を実施した。また、繰り返しアプローチの2回目として、情報量の少ない高角度の割れ目や研究所用地北東部の水理地質学的情報を取得することを目的として、正馬様用地中央部から北東方向に向かって掘削した M1U-4 号孔での試錐調査結果と長期揚水試験結果に基づくモデルの更新を行うとともに、地下水流動解析結果の不確実性の幅についての評価を行った。

さらに、研究坑道掘削前の間隙水圧分布を把握するための地下水圧の長期観測を既存試錐孔において実施している。

② これまでの成果

表層水理調査においては、岩盤浸透量算出手法に関して、これに必要なパラメータのうち複数の計算手法が提案されている蒸発散量算定式についてそれぞれの適用性の検討を行った。

研究所用地においては、浅層試錐調査（MSB-1～4 号孔）で実施した水理試験により、堆積岩中の各層および花崗岩最上部の水理パラメータを取得した。その結果、堆積岩の各層では一部の区間を除き $10^{-4} \sim 10^{-8}$ (m/s) の範囲の透水性を有することが明らかとなった。この結果は、これまで正馬様用地や東濃鉱山などで取得されたものと比較すると、統計的には同様の分布範囲には入るものの、相対的に高い（図 3.3-9）。

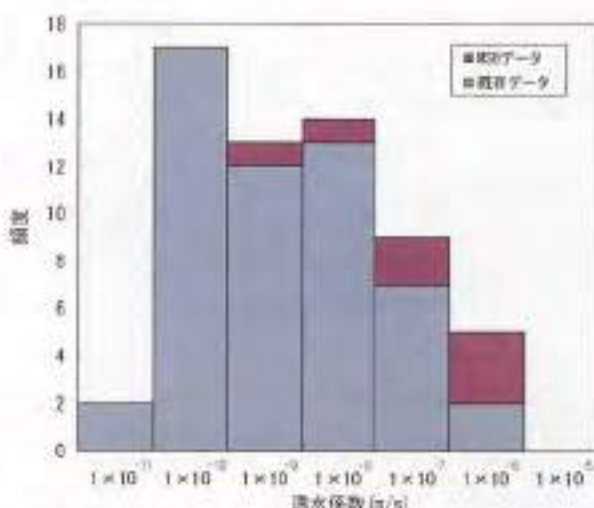


図 3.3-9 既存データと浅層試錐調査における堆積岩中の透水係数分布

さらに、上記浅層試錐孔において、研究坑道掘削に伴う地下水圧・水質の変化を観測するために、複数区間の水圧測定と水質観測が可能な地下水長期観測装置として MP システム（カナダ Westbay 社製）を設置した。

また、現場透水試験装置に関して、これまでの現場試験の経験に基づき、より高透水性の岩盤に対応可能な装置への改良を実施した。

繰り返しアプローチの実践をとおして一連の調査・解析・評価技術を体系化するために、地下水流動特性を評価する上で重要な因子の抽出を行うことを目的として、表 3.3-3 に示す複数のモデル

化手法を適用して水理地質構造のモデル化および地下水流動解析を継続実施した。

表 3.3-3 適用したモデル化手法の一覧

コード名	TOUGH2	Don-Chan	EQUI_FLO	FractAffinity	MODFLOW/ POR-SALSA
概念モデル	不均質連続体	チャンネルネットワーク	不均質連続体	均質連続体+割れ目モデル	均質連続体

正馬様用地および広域地下水流動研究の調査結果を用いたローカルスケールにおける繰り返しアプローチの1回目の検討の結果、特に①断層のモデル化や②境界条件、③有効空隙率の設定方法の違いが解析結果の移行時間や移行距離に大きな影響を与えることが明らかとなった（澤田ほか、2001）。しかし、この検討では、①から③の影響が大きく、それら以外の要因についての検討が困難であった。したがって、追加検討として、モデルに取り込む断層や境界条件を統一するとともに、移行時間の評価の際にはダルシー流速を用いることによって、前述の①～③の要因を排除した検討を実施した（澤田ほか、2002）。

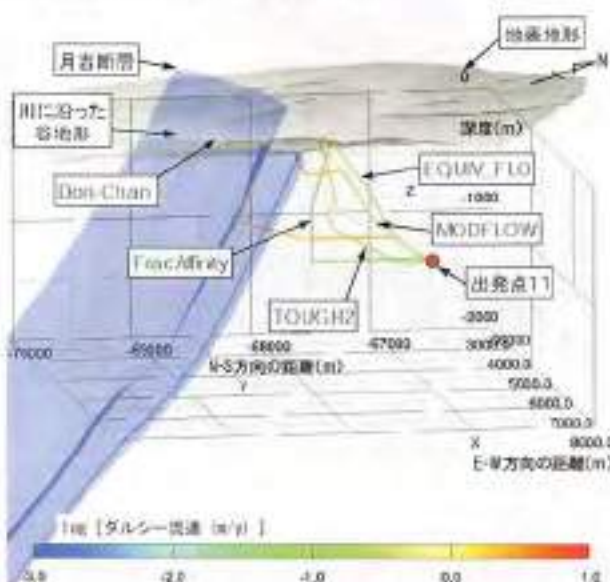
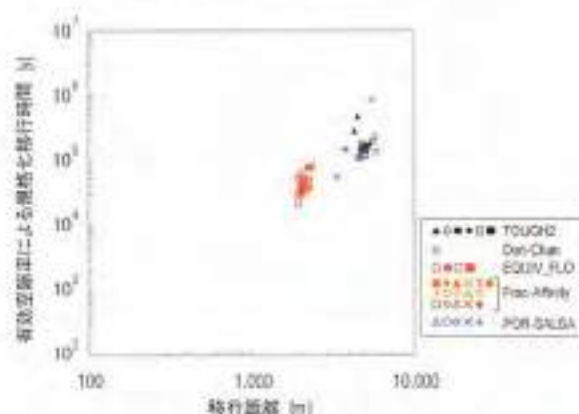


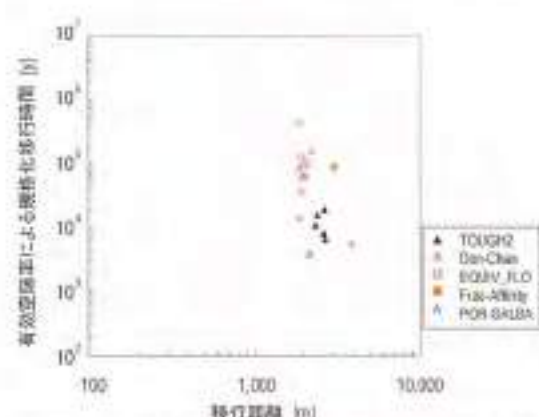
図 3.3-10 地下水の移行経路とダルシー流速

その結果、全体的には地下水の移行距離の推定値の幅が1回目の検討と比較して狭まった一方で、ダルシー流速に基づく移行時間はモデル間のばらつきが大きい結果となった（図 3.3-10、図 3.3-11）。移行距離については、境界条件やモデル化対象の断層を月吉断層に限定するなどの解析条件に制限を設けることにより、大局的な地下水の流動方向がほぼ同様の結果となったためと考えられ

る。一方、移行時間の違いについては、ダルシー流速が異なったためと考えられ、その主要な要因として岩盤中の透水係数分布のモデル化方法（不均質性を含む）の違いが考えられる。この透水係数分布のモデル化方法については、水理試験データの整理や解釈、モデル化に用いた3次元分布の推定方法の違いが原因として挙げられる。



a. 1回目の地下水流動解析結果



b. 追加検討による地下水流動解析結果

図 3.3-11 地下水流動解析による移行時間と移行距離の検討結果

また、上述した追加検討の一環として、モデル化・解析領域内に分布する月吉断層の水理特性が地下水の移行経路や移行距離、移行時間に与える影響を検討した（三枝ほか、2002）。その結果、地下水の流動方向にほぼ直交する方向に分布する透水異方性を有する月吉断層は、地下水の移行経路や移行時間、移行距離に与える影響が大きいことが確認できた。このことから、地下水の流動方向に直交する方向の断層については、遮水性といった定性的な評価のみならず、透水異方性といった定量的に評価するための調査項目が必要である

と考えられる。

さらに、M10-4 号孔での試験調査結果および長期揚水試験結果に基づくモデルの更新およびキャリブレーションを実施している。モデルのキャリブレーションにおいては、長期揚水試験などによって得られた非定常状態の水理に関するデータを使用した検討を実施している。

また、広域地下水流動研究における知見から研究所用地を包含するローカルスケールのモデル化領域を設定し、複数のモデル化手法による水理地質構造のモデル化、および地下水流動解析の結果を評価する上で重要な因子の抽出を目的とする検討を開始した（平成 14 年度においては、ローカルスケールの水理地質構造のモデル化および地下水流動解析は、超深地層研究所計画において進めてきた）。この検討では、割れ目分布特性に基づく等価不均質連続体や湧き流を考慮する機能を有する手法、断層などの不連続構造の透水異方性を考慮する機能を有する手法などを用いて、割れ目密度や浸透部の地下水流動、断層の透水性が地下水流動解析結果に与える影響に関する検討を実施している。

③ まとめ

超深地層研究所計画では、研究所用地における岩盤の水理に関する調査研究を開始した。また、繰り返しアプローチに地下水流動解析結果の不確実性の幅を評価するための検討を取り入れ、不確実性の低減に向けた合理的な調査・解析・評価の体系化を試みている。

今後は、研究所用地における深部試験調査（M12-1 号孔）により深部地質環境のデータを取得する。また、サイトおよびブロックスケールの領域を対象に、現場調査の進展に応じて水理地質構造モデルを更新しつつ、地下水流動解析を繰り返し実施することにより、段階的に増加するデータ量と理解度（不確実性）の変化の程度を継続的に検討する。さらに、第 2 段階に移行するにあたり、研究坑道掘削前の地下水流動場の推定、研究坑道掘削に伴う地下水流動場の変化の予測解析などを実施していく計画である。

参考文献

三枝博光、宇築 誠、澤田 淳（2002）：断層の透水異方性に着目した水理地質構造のモデル化・地下水流動解析－東濃地域を例として－、第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム論文講演集、pp. 371-376。

澤田 淳、三枝博光、中野勝志、大澤英昭（2002）：複数のモデル化手法を用いた地下水流動評価の不確実性について、第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム論文講演集、pp. 161-166。

澤田 淳、三枝博光、竹内真司、中野勝志、井原裕三（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）－複数の概念モデル化手法による不確実性の検討－、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

超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究では、研究坑道掘削の影響が及ぶ可能性のあるサイト～ブロックスケールの地質環境を対象に、深部地下水の地球化学特性の三次元的分布を把握し、これまでに構築された地下水の水質形成機構に関わる地球化学モデルを確認・更新することを目的とする。そのため、研究所用地の堆積岩および花崗岩を対象に、以下の項目を主要な課題として進めている (Goto et al., 2002; サイクル機構, 2002)。

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

平成 14 年度は、研究所用地に掘削された 4 本中 2 本の浅層試験孔 (MSB-2, 4 号孔; 深度約 100 ~ 200 m) を用いて調査・解析を行った。これは、堆積岩から花崗岩上部の地下水の地球化学特性を把握し、地球化学特性の三次元的分布・水質形成機構に関わる概念モデルを構築することを目的とする。調査では各試験孔から各層の地下水を採取し、地下水の水質・起源・滞留時間を明らかにするために、化学成分・同位体分析を行った。また、水質形成機構を推察するために試験孔岩芯試料の化学分析を行った。

② これまでの成果

1) 水質分布の把握

研究所用地の全ての地下水の起源は水素・酸素同位体比から天水と推測された。一方、水質は堆積岩上部 (明世累層) で Si, Na, Ca, SO₄, HCO₃ イオンに富み、堆積岩下部 (土岐夾炭累層)・基盤花崗岩では、Na, Cl イオンに富む水質を示した (図 3.3-12)。また、試験孔岩芯中の Cl 含有量を分析したところ、明世累層と土岐夾炭累層の境界で含有量が明らかに異なり (図 3.3-13)、海成層である明世累層よりも湖成層である土岐夾炭累層の方が Cl 含有量が高いという結果が得られた。これらは、土岐夾炭累層の岩石に地下水中から Cl が供給されている可能性を示唆するものである。これらのことから、明世累層と土岐夾炭累層の境界に水理学的境界が存在し、その上下の地層で異

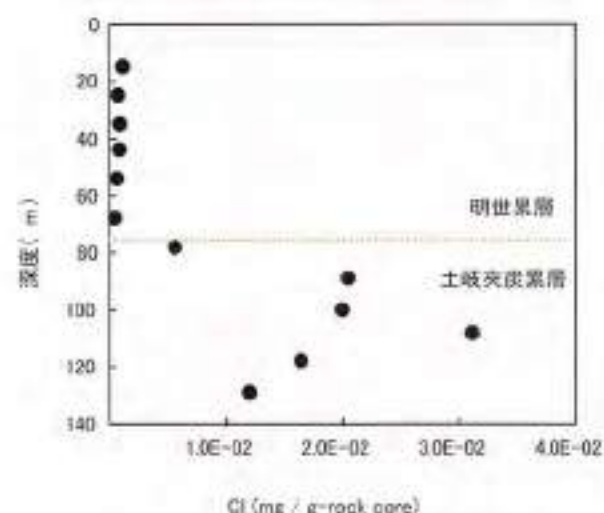


図 3.3-13 岩石中の塩素含有量 (MSB-2 号孔)

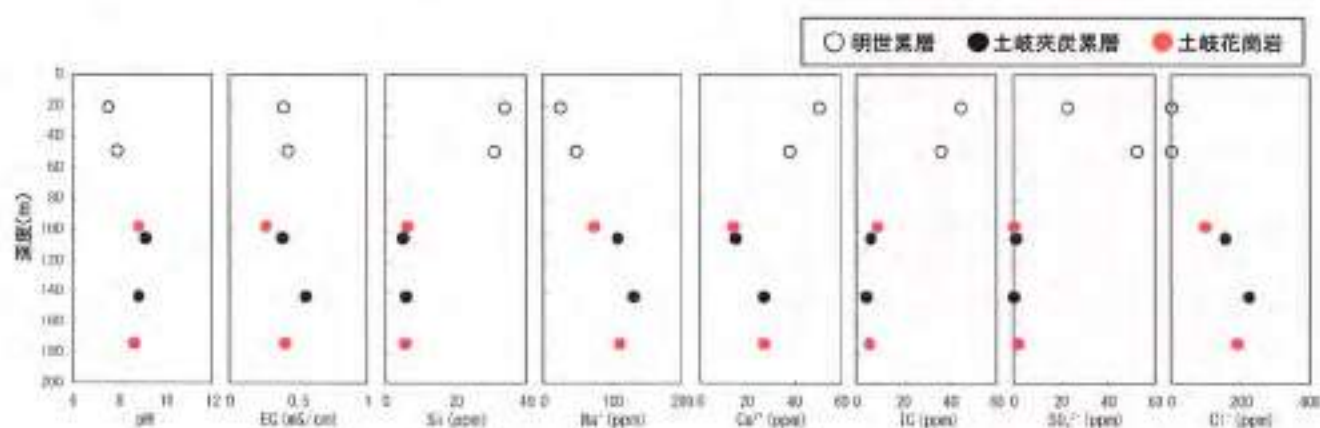


図 3.3-12 研究所用地における地下水の化学組成

なる水質の帯水層が存在すると推察された（岩月ほか、2003a）。

ii) 水質形成機構の考察

各帯水層中の水質形成機構は次のように推察された。明世累層中の地下水については、採水深度が深度約 15~60 m と浅く、岩石の風化変質が進んでおり、試錐岩芯に酸化的環境であることを示唆する鉄水酸化物の沈殿や低 pH 環境であることを示唆する炭酸塩鉱物（主に貝化石）の溶脱痕が観察されることから、長石類など構成鉱物の風化変質、海成硫酸塩・硫化物の酸化溶脱、炭酸塩鉱物の溶解などにより水質が形成されていると考えられる（岩月ほか、2003b）。一方、土岐夾炭累層・基盤花崗岩中の地下水のように Cl に富む地下水については、高塩素濃度地下水との混合などが、水質形成機構として想定できる。Cl 濃度に対する他の溶存成分濃度比を計算した結果、Cl イオンと Na イオンの濃度比が海水の濃度比とほぼ同様の値を示している。そのため地下水の水質形成機構として、花崗岩深部に海水と同様の Na/Cl 比を持つ高塩素濃度地下水が存在し、その一部と土岐夾炭累層・基盤花崗岩上部の地下水とが混合していると考えられる（図 3.3-14；水野ほか、2003）。

③ まとめ

研究用地における地下深部の地球化学環境について、明世累層では水-岩石反応により、また、土岐夾炭累層・基盤花崗岩中の地下水では、塩素

濃度の異なる地下水の混合状態に基づく地球化学概念モデルを構築することができた。今後、新規の深層試錐孔（MIZ-1 号孔）における調査を行い、花崗岩深部における地球化学概念モデルを更新していく。

また、調査を行った試錐孔に間隙水圧モニタリング装置を設置しており、研究坑道掘削に伴う地下水の水圧と水質変化を観測し、研究所用地周辺への地球化学的影響について評価していく予定である。

参考文献

- Goto, J., Ikeda, K., Kumazaki, N., Mukai, K., Iwatsuki, T. and Hama, K. (2002): Working program for shallow borehole investigations, JNC Tech. Rep., JNC TR7400 2002-005.
- 岩月輝希, 古江良治, 水野 崇 (2003a): 瑞浪超深地層研究所における地球化学研究 (その 1) - 堆積岩中の地下水の化学組成について -, 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会要旨集 CD-ROM.
- 岩月輝希, 村上由紀, 長沼 毅, 濱 寛宏 (2003b): ウラン鉱床の長期保存に関わる岩盤の酸化還元緩衝能力-東濃地域における天然環境の水-鉱物-微生物システムの研究例-, 地球化学, 37, pp. 71-82.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002): 超深地層研究所計画年度報告書 (平成 13 年度), サイクル機構技術資料, JNC TR7400 2002-004.
- 水野 崇, 古江良治, 岩月輝希 (2003): 瑞浪超深地層研究所における地球化学研究 (その 2) - 花崗岩中の地下水の化学組成について -, 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会要旨集 CD-ROM.

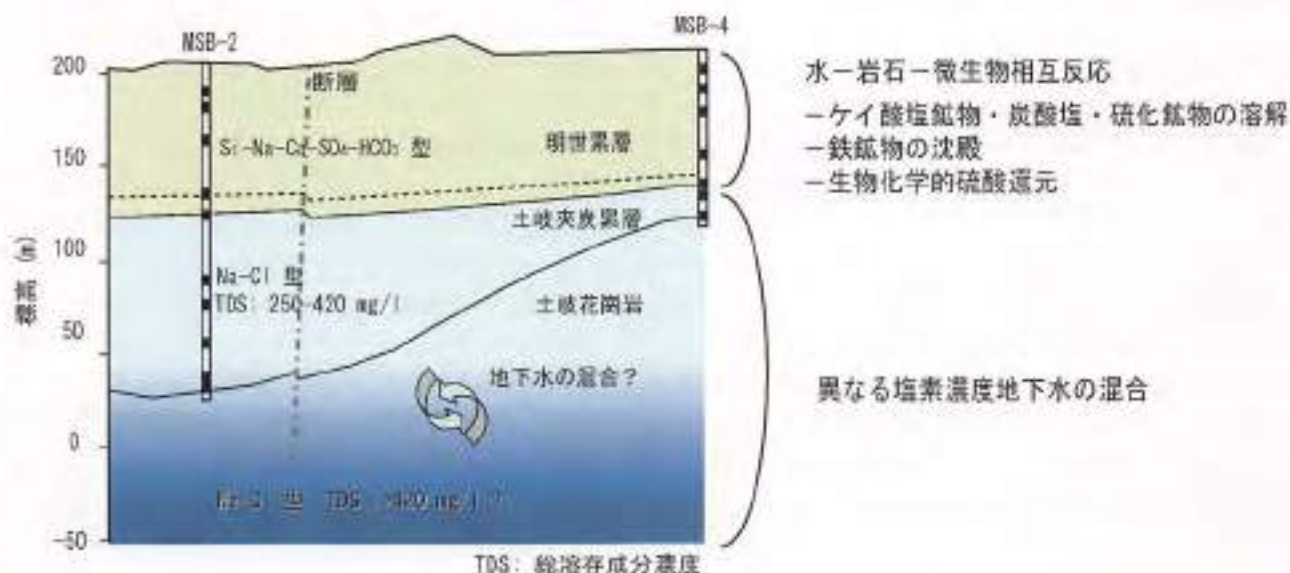


図 3.3-14 研究用地における地球化学概念モデル

4) 岩盤力学に関する調査研究

① 課題と計画の概要

超深地層研究所計画の地表からの調査予測段階における岩盤力学に関する調査研究の課題は、研究坑道の力学的安定性評価、力学的現象の評価に必要な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 MH-1～3 号孔において、試験岩芯あるいは試験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）を取得した。また、岩盤力学概念モデルは、情報が増加するごとに調査結果を分析・整理し、モデルの構築・更新を繰り返すアプローチを採用して進めている（松井ほか、2001）。

平成 14 年度より、研究坑道等の設置場所が正馬様用地から研究所用地に変更されたことを受けて、サイトスケールに相当する研究所用地の新たな岩盤力学モデルの構築および更新に向け、試験孔および試験岩芯を用いた物性試験や初期応力測定などに改めて着手する計画とした。平成 14 年度は、研究所用地のごく近傍に掘削した既存試験孔（DH-2 号孔）の試験岩芯を用いた室内試験を行った。また、これまでに得られている正馬様用地における岩盤力学データおよび構築された岩盤力学概念モデルを用いた解析を通じて、地表からの調査・解析・評価技術の適用事例を整理した。さらに坑道を利用した研究段階における調査試験を視野に入れた、研究坑道の掘削に伴う結晶質岩の破壊現象のモデル化に関する研究を実施した。

② これまでの成果

1) 研究所用地近傍の岩石室内試験結果

図 3.3-15 に研究所用地近傍の既存試験孔である DH-2 号孔の試験岩芯を用いた室内試験結果を示す。

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 60～140 MPa、50%接線ヤング率が 40～70 GPa であり日本の花崗岩の平均的な値とほぼ同じである。また、一軸圧縮強度については正馬様用地に比べてやや小さめの傾向が見受けられるが、その他の物性値については正馬様用地における試験結果とほぼ同様の分布傾向を示している。

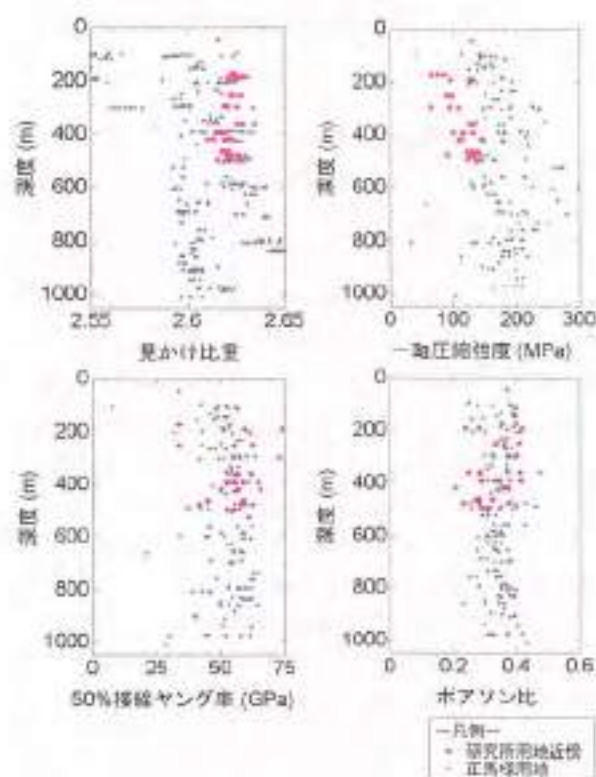


図 3.3-15 研究所用地近傍および正馬様用地における試験岩芯の室内試験結果

ii) 研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の掘削影響評価解析

地下に研究坑道を構築すると、坑道周辺岩盤には掘削により物理的ダメージを受けて物性が変化する領域（掘削影響領域）が発生する。瑞浪超深地層研究所の研究坑道は、最深ステージが深度 1,000 m に展開されるために岩盤応力が大きく、対象岩盤が結晶質岩であることから、掘削影響領域を予測するためには、坑道周辺岩盤の不連続面の挙動（既存のき裂の滑りや進展など）を適切に表現できる解析手法を構築する必要がある。この掘削影響領域発生 の程度と範囲を予測する手法を整備することを目的として、正馬様用地での調査研究結果をもとに、地表からの調査予測研究段階で得られた情報を用いて研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の掘削影響評価解析を実施した。解析は不連続面の挙動を考慮できる 3 つの手法により実施した。

平成 13 年度において構築した正馬様用地の岩盤力学概念モデル（松井ほか、2001）を図 3.3-16 に示す。このモデルでは正馬様用地周辺の岩盤力学特性（応力や物性）に関する情報をもとに、土岐花崗岩体を 4 つのゾーンに区分した。

掘削影響評価解析の実施に先立ち、解析の入力パラメータを決定するために、正馬様用地における岩盤力学概念モデルを基に三次元初期応力解析を実施し、岩盤力学モデルを作成した(図 3.3-17)。モデルは表層部(新第三紀堆積岩)、花崗岩部(Zone1~4)、月吉断層中心部およびその周辺部から構成されており、モデル内の各点の初期応力状態を定量的に表現した。また、それぞれのゾーンには室内試験などで得られた物性も具体的に付与した。

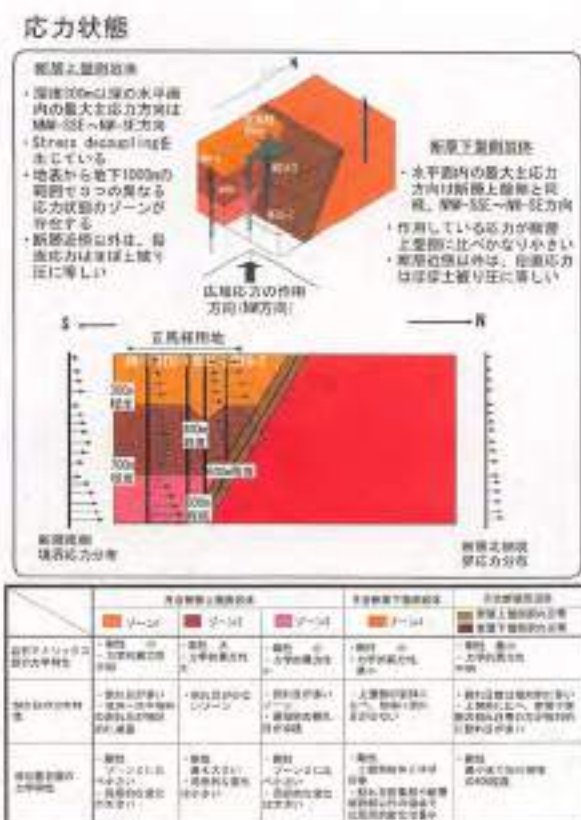


図 3.3-16 正馬様用地の岩盤力学概念モデル

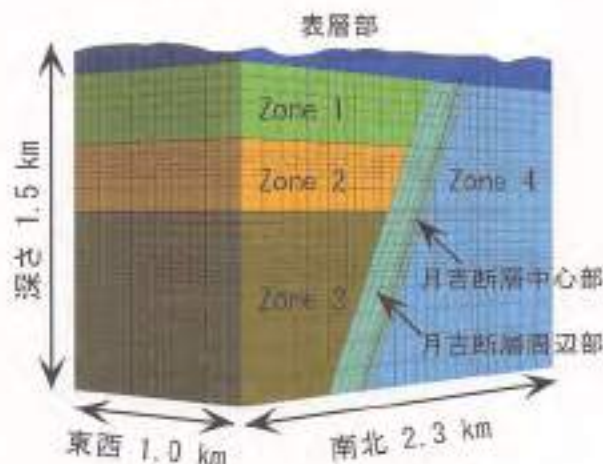


図 3.3-17 正馬様用地の岩盤力学モデル

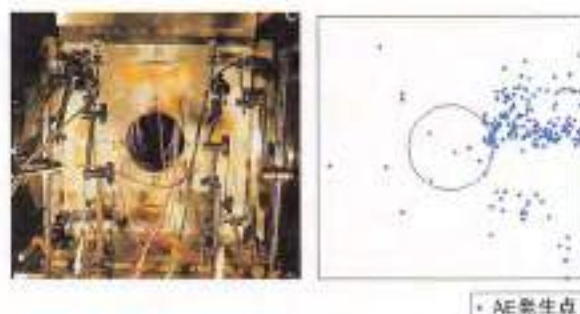
掘削影響解析については、岩盤の不連続面の影響を考慮できる解析モデルのひとつである、MBC (Micro-mechanics Based Continuum Model)、岩盤中に含まれる亀裂の進展を表現可能な BEMF (Boundary Element Method for Rock Fractures)、および研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の透水性変化を表現可能な仮想割れ目モデルを用いた解析を行った。

MBC 解析により主立坑の深度 200 m、500 m、945 m および横坑を深度 500 m、945 m に展開した場合の解析を行った(森ほか、2002)。その結果、主立坑の解析では、岩盤が堅硬なケースでは岩盤挙動としては微小で掘削影響領域も小さいものの、断層部となる深度 945 m では岩盤の剛性が小さいため、大きな変位が生じた。横坑の解析では、坑道の展開方向により坑道に対する亀裂の配向性や初期応力状態が変化し、亀裂開口量、岩盤変位挙動などから想定される掘削影響領域の範囲が異なる結果が得られたものの、岩盤挙動としては微小であった。また支保工に関する検討を行った結果、いずれのケースにおいても支保に発生する応力は小さく、健全性は確保されることがわかった。

なお、BEMF 解析および仮想割れ目モデルによる解析については、現在結果を取りまとめ中であり、これらの結果を総合的に評価し、解析手法の有効性を検討する予定である。

iii) 応力集中による破壊現象のモデル化に関する研究

結晶質岩(花崗岩)を対象とした大型供試体において、クラックテンソルにより評価した岩石中のクラックの構造特性、初期クラックによる構造と一軸および三軸圧縮試験による破壊に伴って発生・進展した微小クラックの構造を比較した。その結果、弾性波速度の異方性が、初期のマイクロクラックの異方的配列に起因することを確かめ、クラックテンソルが弾性波速度データを用いた逆解析により推定できることがわかった(鳥井原ほか、2002)。また、空洞に見立てた円孔を有する模型の載荷試験を実施した結果、空洞周辺岩盤の脆性破壊過程をひずみ・AE 計測により損傷の進展として捉えることができた(図 3.3-18)。この手法は、坑道周辺岩盤の破壊の予測手法として実際の坑道周辺岩盤の破壊進展が捉えられる可能性がある。また、破壊現象のモデル化としては、試験で得られた現象やクラックテンソルなどのパラメ



(a) 空洞模型試験状況 (b) 空洞周辺の損傷領域

図 3.3-18 空洞模型の載荷試験状況

ータを入力値とし、マイクロメカニクスに基づく解析法の導入を試み、空洞の長期変形挙動の試験解析を行った。

③ まとめ

研究所用地近傍の土岐花崗岩の物性値は、正馬様用地における物性値とほぼ同様の分布傾向を示していることが確かめられた。今後は研究所用地内で掘削される深層試験孔（MIZ-1 号孔）において物性値を取得し、正馬様用地における岩盤力学のモデル化の考え方を参考に、研究所用地における岩盤力学モデルを構築する。

また、地表からの調査・解析技術の適用事例の整理の一環で実施した掘削影響解析については、それぞれの解析結果がまとまった後、掘削影響領域の程度と範囲についての整理を行う。

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用地における土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデル、サイクル機構技術資料、JNC TN7420 2001-001。
- 森 孝之、森川誠司、田部井和人、岩野主太（2002）：研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤への力学的影響評価解析、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）、JSC TJ7400 2002-007。
- 島井原誠、丸山 誠、畑 浩二、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 2002-009。

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

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

平成 14 年度は、上記の内容を踏まえて、第 2 段階および第 3 段階で展開される各調査・研究が合理的かつ効率的に実施できるように研究坑道の設計を行い、施工計画を具体化することを目的として、次項についての検討を実施した。

② これまでの成果

i) 計測結果の設計・施工計画へのフィードバック技術の検討

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

地質構造と支保仕様については、空洞安定性の検討において重要な項目である地山条件と計測項目の関係を整理したうえで、要求される計測精度と対応する計測の仕様を検討した。地下水挙動については、断層などの特徴的な地質構造について、既往文献のデータによる透水係数と調査事例を整理し、これらの調査事例の適用可能性を検討した。フィードバック技術については、土木学会から提案されている地山評価のフロー（土木学会、1987）に対して、立坑掘削時に実施される調査項目を付加して、各調査項目のフィードバック解析における位置付けを明示した。

このような結果にもとづき、フィードバック技術の現状と今後の課題を以下に示す。

- a) 内空変位などの力学挙動に関しては、内空変位、初期地圧および微小振動音を用いた地山評価が考えられる。特に、突発事象としての山はね現象の予測には適切な方法による初期地圧（主応力）の測定が重要となり、モニタリングとしては AE (Acoustic Emission) 計測が可能である。
- b) フィードバック技術に関しては、既存の山所トンネルにおける地山評価に、上記の地質構造、坑道掘削に伴う変形挙動および地下水調査法を加味して提案する必要がある。

ii) 施工技術及び施工中に得られる地質環境情報の品質を確保する技術の検討

研究坑道の掘削、支保設置、すり出しの一連の施工にかかわる合理化技術、施工中に得られる地質環境情報の品質管理システム、施工後の品質確認のための調査・計測項目やその方法およびリスクマネジメント手法を用いた品質管理への適用性について検討を行った。

また、最新のトンネル施工技術などの調査、検討結果から、瑞浪超深地層研究所において適用可能な施工技術を抽出するとともに適用する際の課題を検討した。

さらに、施工の品質を確保するために必要な調査・計測項目や計測方法を検討するとともに、施工中に得られる地質環境情報の品質管理について検討した。各調査項目について、得られる生データ、解釈・データセット、モデル化・シミュレーションおよび結果・アウトプットのフローを研究坑道の設計・施工、研究坑道の掘削技術・施工対策技術および施工の品質管理のそれぞれについて作成した。

iii) 突発湧水に対する掘削・施工対策技術の検討

研究坑道掘削中の突発湧水として、破砕帯部、未固結堆積岩、花崗岩中の割れ目からの突発湧水が考えられることから、これらの突発湧水を対象として以下のことを検討することとした。平成 14 年度は①と②について検討した。

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

a) 対策工の事例調査および当地点での対策工

突発湧水に対する対策工について、国内、国外の事例を調査し、対策工選定の基本的な考え方並びに研究坑道における注入計画について以下のように整理した。

まず、対策工選定の基本的な考え方については、地質環境を極力保全することが必要なため、注入工法を用いることとした。注入工法の問題点としては、①現状の地質環境に起固するものとして、高水圧下（10 MPa 程度）での注入ポンプ、注入ツールがないこと、および、②研究坑道の特性に起固するものとして、地質環境を変化させないための注入方法（注入範囲限定、注入圧、注入材料）を検討する必要があることの大まか2つが挙げられる。

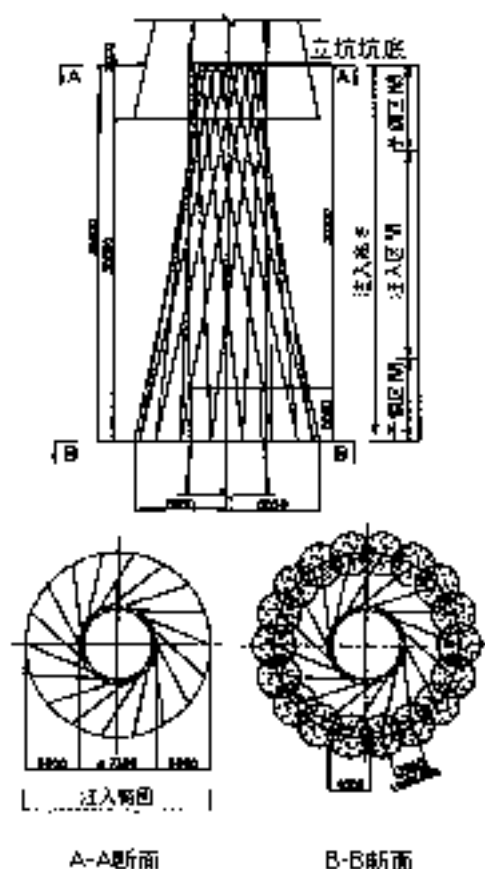


図 3.3-19 突発湧水対策の概要図

つぎに、注入計画としては、注入高さ、注入材料などについて考察し、具体的には注入範囲は中心から掘削半径の 3 倍、注入高さは掘削区間として注入区間の上下に掘削半径の 2 倍、注入材料としては普通ポルトランドセメントに上質安定用急硬剤を添加したものをを使用することを

検討した（図 3.3-19）。また深部については高水圧下であるため、水抜きボーリングとの併用を検討した。

b) 注入工法に関する検討

注入材料については、薬液系と非薬液系に大きく分類されるが、本検討においては、さらに①非薬液系（セメント系）注入材、②薬液系水ガラス系注入材－懸濁型、③薬液系水ガラス系注入材－溶液型、④超微粒子特殊シリカ系注入材、⑤高分子系注入材に細分類し、特性、適用範囲などについて以下にまとめた。

① 非薬液系（セメント系）注入材

利点として、危裂性岩盤や高い強度を必要とする場合に有効で、浸透性に優れたプレーン値の大きい超微粒子セメントがある。一方、欠点として、均一性がない、硬化時間が長い、地下水流の大きい箇所には不向きであることが挙げられる。

② 薬液系水ガラス系注入材－懸濁型

セメントに水ガラスを加えることで硬化時間の短縮、調整を可能としたもの、利点として硬化時間が短い、地下水流が大きい箇所でも有効、強度が比較的高い、範囲の限定注入が比較的容易などが挙げられる。一方、欠点として、硬化後にアルカリ・珪酸分の溶出に伴う劣化を生じることが挙げられる。

③ 薬液系水ガラス系注入材－溶液型

水ガラス主体の注入材で、反応材の組合せ、使用方法により固化時間が繰返～数時間と短がある。利点として固化時間の調整が可能、特にシリカゾル注入材は耐久性、安定性に優れている、固化時間の長いものは土粒子間に浸透しやすいことが挙げられる。一方、欠点として水ガラス系注入材は珪酸分の溶脱により安定性に問題がある。

④ 超微粒子特殊シリカ系注入材

粒了分の微細化をさらに高めて浸透性を向上させたもの、利点として安定性、強度が高いことが挙げられる。

⑤ 高分子系注入材

薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針により、緊急時を除き使用が禁止されている。

止水を目的とした場合、水ガラス系注入材の内から選定される。また、粘土系の半懸濁型注入材

は止水に適しており、セメント注人材の併用が効果的とされている。

iv) 研究坑道における地震動評価に関する検討

研究坑道における耐震解析手法の適用性について検討するため、既存の地下構造物耐震設計基準を整理し、耐震安全性についての評価を行った。検討内容としては、研究所周辺において発生した既往地震および活断層の存在を考慮し、検討用地震動を作成した。また、設定した地震動を用いて、等価震度を用いた応答震度法により掘削影響を考慮した非線形解析を行い、研究坑道の地震時健全性を評価した。

a) 検討の方法

主立坑の地震時健全性を検討するため解析を行った。立坑掘削により周辺岩盤が塑性化することが想定されていることから、最終的には地震時の岩盤や掘削コンクリートに発生するせん断ひずみで評価することが必要となる。このため、適切な静的解析手法を選定して評価する。まず、FEM 線形動的解析を実施し、周辺岩盤を含めた主立坑の地震時応答特性を把握し、静的解析手法の適用性について検討した。次に、周辺岩盤を考慮した有限要素法による静的解析を実施し、動的解析結果と比較することにより、適切な静的解析手法を選定した。最後に、非線形性を考慮した有限要素法による静的解析により、掘削の影響に加えて地震の影響を考慮することにより、主立坑の地震時健全性を評価した。

瑞浪超深地層研究所の主立坑（掘削径：2.3 m）は、深度 1,000 m 程度の掘削が計画されており、その地盤条件は、深部においては堅牢な花崗岩が存在するが、地表から 170 m 程度の区間は堆積岩が分布する（図 3.2-8）。堆積岩部においては、立坑近傍の岩盤は掘削に伴い塑性化することが想定され、地震時の健全性評価においては、塑性化の影響を考慮することが必要と考えた。

そこで、主立坑を対象として、FEM 動的解析と数種類の等価震度を用いた応答震度法を比較することにより適切な等価震度の算定方法について検討した。次に、選定した等価震度を用いた応答震度法により、掘削の影響を考慮した非線形解析を行い、主立坑の地震時健全性を評価した。解析に用いた物性値は、地表から深度 500 m までは DR-2 号孔、深度 500 m 以深は MU-1 号孔の岩体観察、

検層結果、室内物性試験などを参照して設定した。この解析・評価のフローを図 3.3-20 に示す。

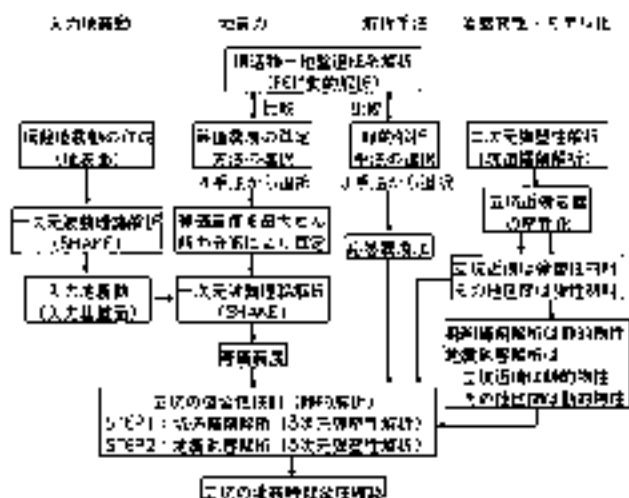


図 3.3-20 地震時健全性評価のフロー図

b) 入力地震動の設定

過去の地震や活断層から設計用地震の規模を設定し、模擬地震波を作成した。過去の地震では、1941 年に発生した岐阜県西部を震源とする濃尾地震が最も大きいと考えられる。これを合わせて 8 つの地震を選定し、金井式（金井、1968）により最大速度を算出すると共に、応答スペクトル（大崎、1994）を求めて模擬地震波を作成した。活断層については、活断層詳細デジタルマップ（活断層研究会編、1991）と新編日本の活断層（中田・今泉編、2002）から建設用地に影響を及ぼす可能性のある活断層を抽出した。前者については、高松断層帯などの 6 つの断層を、後者については、屏風山断層などの 4 つの断層を抽出し、これらの断層を震源と仮定した時の模擬地震波を過去の地震と同様の手順で作成した。

c) 等価震度の算定

解放基盤面（地表）における入力地震動としては、上記の活断層を考慮して設定した加速度応答スペクトル（最大加速度 1,500 gal）を有する人工地震波を使用した（基盤面（GL+1,500 m）における地震波の最大加速度は 478.6 gal）。同波を、工学的基盤面に入力し、一次元波動理論解析により解析上の基盤面（GL+1,500 m）における入力波を算定し、解析モデルの下端に入力した。次に、以下に示す 4 種類の手法により等価震度を算定した。

- 方法1：最大せん断力分布より算定
- 方法2：地表面において最大せん断力が最大となる時刻におけるせん断力分布より算出
- 方法3：立坑の上端と下端の相対変位が最大となる時刻におけるせん断力分布より算出
- 方法4：各時刻におけるせん断力分布より等価震度の時刻歴を算出し、その最大値分布を算出

算定した結果を図 3.3-21 に示す。また、応答震度法による静的三次元線形解析を実施し、動的解析結果と比較した。なお、岩盤の変形特性としては、DH-2 号孔における速度検層の結果から動的物性を算出し、これを入力した。減衰定数は既往の研究（嶋ほか、1983）を参照し、一律 1% と仮定した。同図より、方法1による結果が立坑全長において動的解析結果に最も近いことがわかった。

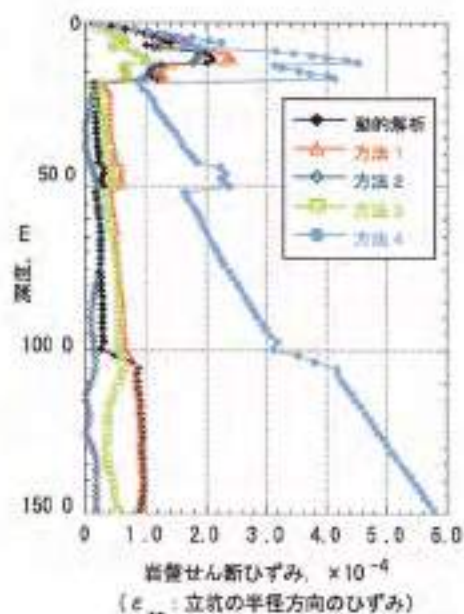


図 3.3-21 等価震度算定結果

d) 立坑の健全性評価

掘削による影響を考慮した地震時の健全性検討を行うために、掘削時と地震時の 2 ステップからなる非線形解析を実施した。立坑全長において動的解析結果に最も近かった方法1による等価震度を作用させた結果として、覆工コンクリート発生断面力のうちの水平方向軸力と面内せん断力を図 3.3-22 に示す。

同図より、掘削時に卓越していた水平方向軸力

は地震時増分が小さく、むしろ地震時には面内せん断力が卓越することがわかる。地震時において覆工コンクリートの発生応力度は 12.7 N/mm^2 と小さいため、地震による影響は小さく、圧縮破壊には至らないことがわかった。

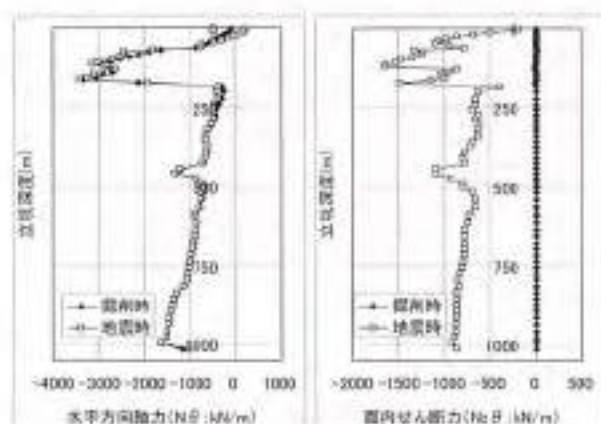


図 3.3-22 覆工コンクリート発生断面力

動的解析結果との比較より、応答震度法による等価震度の算定においては最大せん断力による算定を用いることが適切であると判断できた。また、この等価震度を用いた三次元の有限要素法による立坑掘削の影響と地震時の影響の両方を考慮した静的解析により、主立坑の地震時健全性を確認できた。

v) 安全対策に関する検討

入出坑管理、火災管理、環境管理および通信監視システムからなる坑内管理システムについて、段階ごとの情報を整理することにより、熟環境解析に基づいた適切な防災計画と坑内環境の情報管理方法を連動させたシステムとすることを検討した。また、大深度における施工環境や研究時間を確保する観点から、施工管理において安全上留意すべき点およびリスクマネジメント手法の品質管理への適用について検討した。

a) 坑内火災に対する防災基本コンセプトと坑内管理システムの構築

通常、土木工事等の立坑掘削工事における避難経路は立坑のみであり、万が一火災が生じた場合には消火活動あるいは立坑を利用した避難の選択肢しかない。瑞浪超深地層研究所においては、2本の立坑を水平坑道でつなげるというレイアウトとして、各レベルの水平坑道に避難所を設置し、

ここに退避するという避難の選択肢を増やす。しかしながら、2本の立坑以外に坑外まで避難することのできる安全区画（3本目の立坑あるいは2本の立坑のいずれかの中に安全区画を設置すること）を確保することは困難である。さらに、立坑の深度が大きいので、火災煙の移動の方が立坑を利用した地表への退避より早い可能性が高い。このため、瑞浪超深地層研究所における防災の基本コンセプトは避難所への退避としている。一方、幌延における防災の基本コンセプトは、幌延の地質環境（特に、メタンガスの存在）を考慮し、いかなる箇所で火災などの災害が発生しても通気制御により安全区画を確保し、入坑者が安全に地表まで退避できる防災システムを構築することとしている。

瑞浪超深地層研究所における防災の基本コンセプトから、以下の点が重要となる。

- ① 火災の発生を早期検知した際に、通気制御により火災による被害拡大を抑制し、安全区画の確保に努める。
- ② この場合、火災初期段階で自然通気圧がまだ小さく、入気環境下で仮昇降設備での避難が可能な時間的範囲の見極めが重要である。
- ③ 様々な火災パターンに対応した安全区画内の具体的な避難路と避難先の選定が必要となる。

上記の防災に対する事項に基づき、立坑内の安全対策システムとして、①入出坑管理システム、②坑内火災管理システム、③坑内環境管理システム、④坑内通信監視システムからなるそれぞれが独立したシステムを構築した。

b) リスクマネジメント手法の適用

リスクには多種多様なものが存在しており、何に主眼をおいてリスクを評価し、管理するかによって方法やプロセスが異なる。ここではまず研究坑道を施工する際に生じるおそれのあるリスクに関して評価を試みることにし、その目的と得られる成果および実施する評価の程度について検討した。また、選定した坑道施工時におけるリスク評価を具体的に実施した上で、考えられるリスクを抽出し、その予想されるリスク（年間損失日数期待値、年間損失金額期待値、年間の社会的常用低下指標の期待値）の算定を行った。それぞれの値は主観的評価によって与えたものであるが、これにより、リスクが定量化される。

平成14年度はとくにマネジメント手法の方法論の確立と研究坑道施工時のリスクに主眼を置き検討を進めた。はじめに一般的なリスクマネジメント手法について整理し、引き続き研究坑道におけるリスクマネジメントへの適用を試みた。とくに坑道を施工する際に生じるおそれのあるリスクに限定してリスクの抽出を行った。抽出したリスクについて被害事象の分類、分類した事象の発生確率の評価、事象発生時の損失量の評価を行い、リスクの定量化を試みた。ただし、被害確率および損失量の定量的評価に関しては、現段階では主観的評価にとどめている。したがって得られたリスクの値に関して数値として与えられてはいるが、あくまで試算値であり精度は実用に供するものではない。また、個々のイベントは互いに独立を仮定しており、相関性は考慮していない。

今後は、客観的な方法によるリスクの定量化を検討するとともに、イベントの相関性を考慮して評価を行う。さらに、実際の立坑掘削中においてデータを取得し、マネジメント手法の適用性について評価し、手法の高度化を図っていく。

vi) 研究坑道の設計と施工計画の策定

a) 研究坑道の安定性および支保の設計

立坑や水平坑道における空洞安定性解析と支保の設定については、研究所用地に近接する既存の試鉱孔（DH-2号孔；深度300m）や、正規模用地の試鉱調査結果などから入力値を設定し、初期応力（側圧係数：1.0及び1.5（水平面内応力；鉛直応力=1.0・1.0, 1.0・1.5及び2.0・2.0）と岩盤等級（B, C₁, C₂, C₃, D）をパラメータとして解析を実施した。まず、弾性解析による許容応力度の判定を行い、許容応力度を越えた場合には支保を増強して平面二次元 FEM 弾塑性解析を実施し、支保を再設定した。このようなアプローチは土木分野におけるトンネル掘削におけるものと同様のアプローチである。立坑と水平坑道の接続部分については、経験に基づき支保が増強されることが一般的であるが、今回は三次元 FEM 弾塑性解析を実施し、平面二次元で検討した断面への影響の程度について検討した。

これらの解析および検討の結果、立坑の各断面における支保を設定するとともに、これらの安定度を算出した。また、接続部分の標準部分に対する三次元的な効果の影響は、標準部分の支保の増強を要するに至らないことが分かった。

b) 掘削設備の設計

立坑の掘削設備や付帯する設備として、巻上機、スカフォールド、給排気設備、給排水設備、コンクリートプラント、受電配電設備などの地上設備について設計を行った。巻上機などの、再設置が困難な設備については、当初より深度1,000 m 対応の仕様とした。ワイヤーロープや排水処理設備などの取り換えや追加設置が可能な設備については、当初から1,000 m 対応の仕様として設置する方法や掘削の進捗に応じて増設する方法など、いくつかの方法を比較し、最適な方法を選択した。

c) 施工計画の策定

立坑の掘削において最も基本的で重要な施工計画はサイクルタイムの算出である。サイクルタイムは、準備、入坑、穿孔、装薬、退避、発破、換気、ズリ出し、壁面観察、掘削打設という一連の掘削作業の詳細な工程を示す。これにより、岩種や深度に応じた立坑掘削の作業時間を算出し、今後、全体工程を立案する。

③ まとめ

平成 13 年度において選定した超深地質研究所で実施すべき調査・研究項目、およびこれが実現できる具体的な研究坑道のレイアウト案にもとづき、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な機器設備を選定し、具体的な施工計画を決定した。

今後、第 1 段階の地表からの調査において取得される情報を反映して設計および施工計画を見直し予定である。また、第 2、第 3 段階において、新たな施工対策技術や工學材料などの改良・開発、さらに研究坑道の掘削が地質環境に及ぼした影響の検証あるいは採掘技術に関する研究の一環として、グリウト技術やプラグ設置などの技術の開発および設備が重要である。

参考文献

- 土木学会 (1997)：トンネルにおける調査・計測の計画と利用，土木学会，p. 189.
- 金井 清 (1968)：地震動・地盤振動，建築構造学林系 1 地盤工学，彰国社，p. 17
- 活断層研究会編 (1991)：新編日本の活断層，東京大学出版会。
- 中川 高，今泉俊文編 (2002)：高断層詳細デジタルマップ，東京大学出版会。

大崎剛彦 (1994)：新・地震動のスペクトル解析入門，電島出版会。

嶋 悦三，太田外氣晴，高橋克也，石田 寛 (1993)：鉛直プレー地震観測による地震動特性の研究 その 3：地盤の減衰性調査，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 641-642。

3.4 東濃鉱山における調査試験研究

3.4.1 調査試験研究の概要

① 背景と目標

東濃鉱山とその周辺では、主に地表から深度約150 m までに分布する新第三紀堆積岩（瑞浪層群）を対象とした調査試験研究を行っている。本調査試験研究では、昭和61年4月からウラン鉱床と地下坑道などが存在するという利点を活かし、地質・地質構造、地下水の流動と地球化学的特性、ウラン系列核種などの物質の分布とその移行特性、坑道掘削に伴う周辺岩盤への影響に関する研究を行ってきた。

これらの調査試験研究により、ウラン鉱床を胚胎する堆積岩の地質学的・水理的・力学的特性、地下水の地球化学的特性、物質移行特性や掘削影響に関する情報など、個々の地質環境特性や現象に関する知見が幅広く収集され、調査試験研究に必要な要素技術や機器が開発されてきた。その成果は「第1次取りまとめ」や「第2次取りまとめ」などに適宜取りまとめられ、深部地質環境条件として重要な特性の把握という観点から、地層処分研究開発の基盤として反映されてきている。

以上のような背景を踏まえ、現在は「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）に基づき、東濃鉱山（図3.4-1）の既存施設や東濃ウラン鉱床などを活用し、地質環境特性や現象に関する、より具体的かつ信頼性のある知見や事例を示すことを研究の基本方針としている。この観点から、本調査試験研究の最終目標は以下の二つに集約される。

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

② 実施項目と進め方

本調査試験研究では、以下の3項目の調査試験研究を実施している（サイクル機構、2002）。

i) ナチュラルアナログ研究

東濃ウラン鉱床を事例研究の場として、隆起・侵食や断層運動などの地質環境の変遷がウラン鉱

床の長期にわたる保存に及ぼした影響の評価とそのモデル化、ウラン系列核種の移行・遅延特性の定量化および影響要因（例えば、有機物や微生物）の評価、および異なる地質環境にも適用できる体系的な研究手法の整備を目的に研究を展開する。



図3.4-1 東濃鉱山における調査試験研究の実施領域

ii) 岩盤の力学的安定性に関する試験研究

本試験研究では、岩盤中の応力分布の不均一性、および坑道掘削に伴う周辺岩盤の力学的特性の変化や長期的な力学的挙動の評価手法の開発を目的に、応力状態に関する調査研究、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、とくにナチュラルアナログ研究で得られる地質環境中における物質の長期的な移行・遅延挙動に関する知見は、地層処分システムの長期挙動の理解の観点から、安全評価手法の高度化に反映される。また、適用性が確認された坑道からの調査・モニタリング技術、地質環境特性のモデル化・評価手法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。

④ 今後の計画

本調査試験研究では、これまでに地質環境中
における物質の長期的な移行・遅延挙動を評価する
ために必要な地球化学的条件に関するデータなど
を蓄積してきた。また、坑道からの調査・評価技
術については、必要な技術開発を行いながら、開
発した技術の適用性を確認し体系化を図るために
必要な情報を取得してきた。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
継続するが、ナチュラルアナログ研究以外の項目
については、超深地層研究所計画および幌延深地
層研究計画の進捗に合わせて、それらに調査研究
の重点を移行していくこととしている。

なお、得られた成果については、安全評価手法
の高度化や幌延深地層研究計画において活用する
とともに、処分事業や安全規制の基盤として反映
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

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
TS7410 99-006。

核燃料サイクル開発機構 (2002)：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 TS7410 2002-001。

3.4.2 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

東濃ウラン鉱床では、過去から現在にわたる長期的な地質環境の変化に伴うウランの移動や保持の記録が残されている。この記録を調査研究することによって、地層処分システムの長期的な安全評価の信頼性の向上に必要な長期的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できる。さらに、こうした知見は、物質の移行・遅延挙動に影響を及ぼす要因の評価に用いることが可能である。

以上のことから、本研究では以下の3つを研究課題として実施している。

i) 東濃ウラン鉱床の長期保存に関わる地質環境に関する研究

地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を目標として、東濃ウラン鉱床における地質学的変遷とそれに伴う水理学的・地球化学的環境の変化を解明するための調査研究を実施する。

ii) ウラン系列核種の移行・遅延およびその影響要因に関する研究

ウラン系列核種の移行・遅延特性の定量化およびそれに影響を及ぼす要因の評価を目標として、化学的・生物学的・地質学的条件などがウランの移行・遅延に及ぼす影響に関する調査研究を実施する。

iii) 体系的なナチュラルアナログ研究手法の整備

異なる地質環境にも適用できる、ウランの移動・保持に関わる体系的なナチュラルアナログ研究手法を整備する。

② これまでの成果

i) 東濃ウラン鉱床の長期保存に関わる地質環境に関する研究

これまでの研究では、ウラン鉱床が存在する深度では地層中の有機物を介した硫酸還元菌による硫酸還元とそれに続く硫化鉱物の沈降が還元状態の形成に関与する主要な酸化還元反応であることがわかっている（岩月ほか、2002；村上ほか、2003）。平成14年度は、このような地下水-鉱物-微生物システムの安定性について長期的な評価

を行うため、反応に関わる物質の供給速度や存在量に関わる調査を行った。その結果、地下水中の硫酸イオンは塩素イオンと良い相関を示しながら深度とともに増加しており、硫酸イオンの起源は堆積岩上部の海成層であると考えられた。岩石の比重や地下水/岩石比などを考慮すると、単位体積あたりの岩石中の総硫酸含有量は岩石から地下水への年間硫酸供給量（約 5.9×10^6 mol/l/年）の約 $10^4 \sim 10^5$ 倍と見積もられた。以上のことから、現在の水理環境が続く場合、堆積岩中の水-鉱物-微生物システム（図3.4-2）は今後数百万年間にわたって継続する可能性があると推測される（岩月ほか、2003a）。

地質環境の変遷については、堆積岩の各層の厚さから隆起量と沈降量を推定する方法によって、東濃ウラン鉱床では堆積岩が堆積し始めてから現在までに3回の沈降と隆起のサイクルが認められ、隆起量としては約150万年前と推定される瀬戸層群の堆積後から現在までの期間で約350mと最も大きいことが明らかになった（笹尾、2003）。また、段丘面の高度分布など、複数のデータから個別に算定したこの期間の平均隆起速度は0.10～0.30mm/年であると考えられた（天野ほか、2003）。

月吉断層の活動履歴はこれまでの調査研究によって明らかになりつつある。平成14年度は既存の試錐柱状図を用いて断層を挟んだ両側の地層の層厚の比較によって断層の活動時期の推定を行い、瑞浪層群中部の堆積時から上部の堆積前にかけての正断層系の運動と瑞浪層群上部の堆積後（もし

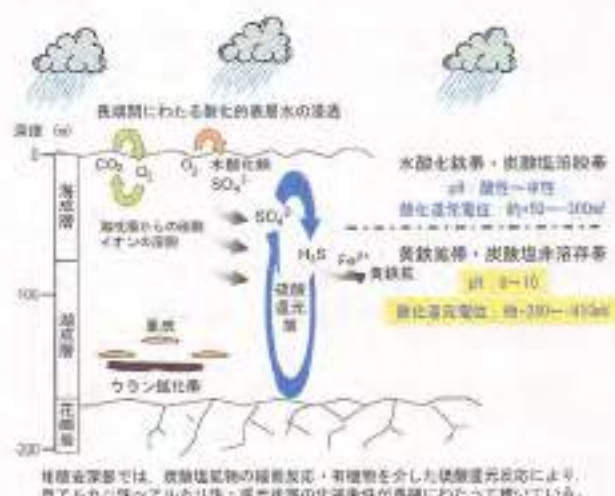


図 3.4-2 ウラン鉱化帯周辺で見られる酸化還元プロセス

くは堆積時)から瀬戸群堆積前にかけての逆断層系の運動が推測された(新里, 2003)。

II) ウラン系列核種の移行・運送およびその影響要因に関する研究

これまでの研究では、無機化学的な熱力学解析により、東濃ウラン鉱床におけるウランの溶解度を規制する環境条件が地下水の pH、酸化還元電位、炭酸ガス分圧であることを求めていた(岩月ほか, 2003b)。一方、実際の地下水中には溶解有機物が存在しており、ウランなどの金属元素は有機配位了と結合して有機錯体として移行する現象も想定される。そのため、平成 14 年度は一般的に地下水中に存在している有機物(酢酸塩、シュウ酸塩、腐食酸など)がウランの移行挙動に与える影響について、東濃地域で観測される地下水組成に基づいた予想的な解析を行った。その結果、実際の地下水と同程度の溶解有機物濃度の条件では、pH-Eh 条件によっては、有機物の存在を考慮しない無機化学的な解析結果よりもウランの溶解度が増加する可能性があるものの、その違いは 1 桁以内であることが示された。

III) 体系的なナチュラルアナログ研究手法の整備

隆起・侵食や断層活動などの長期の時間スケールで生じる地質環境の変遷が、東濃ウラン鉱床の長期保存に及ぼす影響を評価するために、性能評価研究に適用されるシステム解析手法を本研究に導入した(Stenhouse et al., 2002)。これまでに、東濃ウラン鉱床の長期保存に関わる FEP(特質、事象、プロセス)を抽出し、それらの関連性を記述するとともに、現時点で得られているデータに基づいて解析の前提となるシナリオの作成を行った。

④ 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条件として、堆積岩の還元緩衝能力を定量的に評価したほか、ウラン鉱床の隆起・沈降史や月吉断層の活動時期などに関する新たな知見を取得した。さらに、ウラン系列核種の移行・運送に及ぼす影響要因に関して、地下水中の有機物を考慮したウランの溶解度変動幅の解析を行うとともに、堆積岩中におけるウラン鉱物の同定を行った。また、ナチュラルアナログ研究手法を体系的に整

備するため、性能評価研究に適用されるシステム解析手法を導入した。

今後、東濃ウラン鉱床における隆起・侵食や断層活動の履歴を把握し、それらの現象に伴う地質環境条件の変化を明らかにしていく。

参考文献

- 大野健治, 伊尾英嗣, 太田久仁雄 (2003): 東濃ウラン鉱床におけるナチュラルアナログ研究—ウラン鉱床分布域における隆起現象について—, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集。
- 岩月輝希, 村上由紀, 長沼 敏, 濱 克宏 (2002): 天然環境の水—鉱物—微生物システムの子孫研究—ウラン鉱床の長期保存に関わる岩盤の酸化還元緩衝能力について—, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会要旨集 CD-ROM。
- 岩月輝希, 濱 克宏, 太田久仁雄, ランディ・アーサー (2003b): 東濃ウラン鉱床におけるナチュラルアナログ研究—ウランの長期的な溶解度変動幅の解析—, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集。
- 岩月輝希, 村上由紀, 長沼 敏, 濱 克宏 (2003a): ウラン鉱床の長期保存に関わる岩盤の酸化還元緩衝能力—東濃地域における天然環境の水—鉱物—微生物システムの研究例—, 地球化学, 37, pp. 71-92。
- 村上由紀, 岩月輝希, Munderack, K., 長沼 敏 (2003): 東濃地域の地下水における硫酸還元菌の活性と放射性廃棄物利用途, 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会要旨集 CD-ROM。
- 新田忠史 (2003): 東濃ウラン鉱床におけるナチュラルアナログ研究—ウラン鉱床分布域における月吉断層の活動履歴—, 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会要旨集 CD-ROM。
- 伊尾英嗣 (2003): 東濃ウラン鉱床におけるナチュラルアナログ研究—ウラン鉱床の隆起・沈降史の見積もり—, 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会要旨集 CD-ROM。
- Stenhouse, M. J., Arthur, R., Ota, K., Iwatsuki, T., Metcalfe, R. and Takase, H. (2002): Application of the Systems analysis approach to a natural analogue project. Sci. Basis Nucl. Waste Manag. XXV.

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、岩盤内で測定された初期応力データは様々な要因（結晶レベルからプレートレベルまでのスケールの異なる不連続面の存在や岩石および岩盤の不均一性など）に起因して、その応力状態は不均一であることが知られている。しかし、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、規延深地層研究計画や瑞浪超深地層研究所計画などで計画している地下構造物の設計施工および空掘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の整備が重要となる。

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、以下の一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二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、および試験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、岩盤の長期挙動データの蓄積を図るとともにこれらの挙動を評価する手法の検討を行う。

② これまでの成果

i) 応力状態に関する調査研究

平成12年度までに、東濃鉱山用地内に深度200～500mの試験孔を計5本掘削し、各孔において水圧破壊法およびコアを用いた AE (Acoustic

Emission) 法による応力測定を実施した。初期応力測定の結果、地形や岩盤物性、地質境界などの地質構造および断層の存在が、初期応力状態に影響を与えている可能性があることが示された。これを受けて、東濃鉱山領域の任意の断面について、次元有限要素法による予想的な解析を行った結果、地質構造および断層の存在は東濃鉱山の初期応力状態に複合的に影響を与えていることが示された(前田・松井, 2001)。

これらの調査・解析の結果を踏まえ、東濃鉱山領域およびこの領域を含む広い領域における二次元応力分布を解析的に推定・評価するための手法の開発に着手した(水田, 2002)。用いる数値解析手法は、既存の研究や文献調査などから有限要素法、境界要素法、有限差分法の3種類を選定した。

解析を実施するにあたり、不均一な岩盤モデルにおける解析結果の信頼性について検討した結果、不均一岩体では岩体の不均一性の程度に応じて初期応力の評価誤差が生じること、同一の岩体の測定点を増やしても評価誤差はほとんど変わらないこと、評価誤差を小さくするには異なる岩体から測定点を選ぶ必要があることが分かった(末村ほか, 2003)。

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間隔距離および試験レイアウトを検討する目的で二次元有限要素法による掘削影響予測解析を実施した(山本, 2002)。

その結果、坑道間隔距離が2.5m以下になると、坑道間の局所安全率が1.5以下となり、塑性領域が発生する可能性が高いことがわかった(図3.4.3)。これらの解析結果に基づいて、坑道間隔距離を3mと2mに設定し、双設坑道安定性評価試験のレイアウトを策定した。

iii) 長期挙動に関する研究

東濃鉱山の坑道周辺岩盤において岩盤の長期変位計測を実施し、これまでに例のない10年間という長期間にわたるデータを取得し、岩盤の長期挙動を評価した(中間ほか, 2002)。計測の結果、東濃鉱山の坑道周辺岩盤は時間の経過とともに変位が増大し続けるクリープ変形が認められた。これらの計測結果の解釈に必要な基礎データを取得

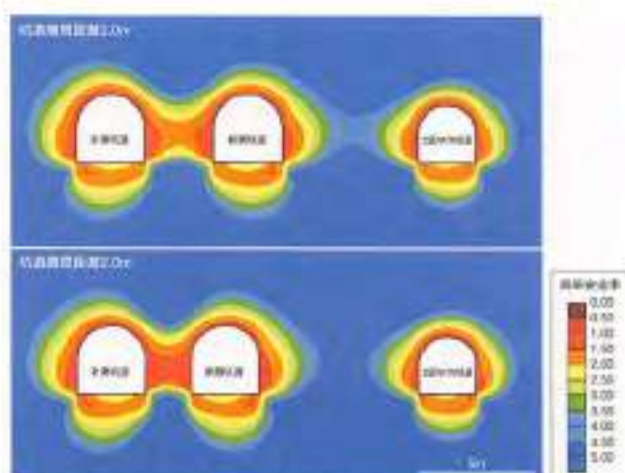


図 3.4-3 解析による局所安全率分布

するために、空圧式長期クリープ試験装置により、坑道周辺で取得されたコアを用いた長期クリープ試験を実施した（高倉ほか，2002）。湿潤状態下、クリープ応力 30%（破壊荷重の 30%）のクリープ試験を行った結果（図 3.4-4），東濃鉱山の細粒砂岩については 30 日の載荷後もなおひずみが増大し続けるクリープ変形が認められた。さらに、空圧式長期クリープ試験装置を用いた田下凝灰岩（栃木県産）のクリープ試験を 5 年を越える長期間にわたり実施し、クリープ変形挙動データの蓄積を図っている。

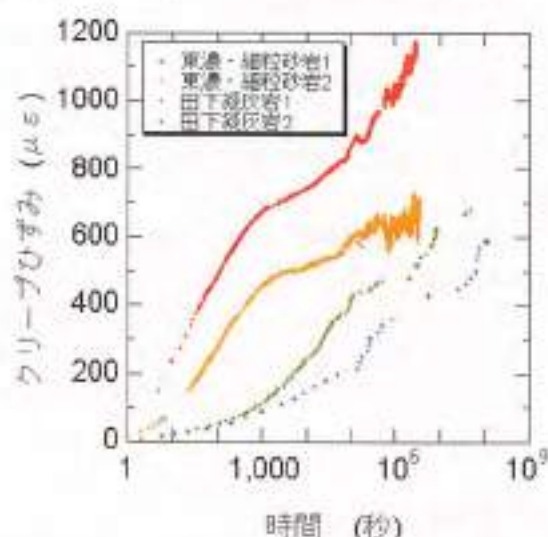


図 3.4-4 長期クリープ試験結果

東濃鉱山坑道内においては、低応力下における堆積軟岩中における孔壁崩壊現象の長期観察を継続実施した。これまでに、ほぼ同様の地質条件にもかかわらず、掘削から約 4 年を経過した現在においても大孔径の試験孔において孔壁の破壊現象

が観察されている。

③ まとめ

応力状態に関する調査研究では、東濃鉱山領域における初期応力状態はこれまでの測定によってほぼ把握されている。今後は、超深地層研究所計画における正馬様用地のデータを活用して、応力分布を解析的に評価する手法の開発を行う。

双設坑道安定性評価試験では、新規坑道掘削時の岩盤挙動予測解析結果に基づき、本試験のための詳細計画を策定した。

長期挙動に関する研究では、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、孔壁面の状態を継続的に観察するとともに、堆積軟岩中の孔壁崩壊のメカニズムに関する研究を進める。なお、これまで実施してきた長期挙動研究のうち、結晶質岩を対象とした研究については、超深地層研究所計画にその重点を移していく。

参考文献

- 木村直樹，松木浩二，坂口清敏，中間茂雄，佐藤稔紀（2003）：不均一岩体の広域応力場評価法に関する研究，資源・素材学会春季大会講演集（1）資源編，pp.93-94.
- 前田信行，松井裕哉（2001）：東濃鉱山における初期応力状態の評価解析，サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2001-004.
- 水田義明（2002）：3次元応力場の同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・素材学会），JNC TJ7400 2001-012.
- 中間茂雄，高倉 望，松井裕哉（2002）：東濃鉱山における坑道周辺岩盤の長期変位計測，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2002-002.
- 高倉 望，松井裕哉，大久保誠介（2002）：堆積岩を対象とした低応力レベルにおける一軸圧縮荷重下のクリープ試験，第 37 回地盤工学研究発表会講演集，pp.621-622.
- 山本卓也（2002）：双設坑道安定性評価試験のための新規坑道掘削による掘削影響予測解析，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.

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

坑道周辺岩盤に関しては、これまで掘削影響研究や物質移行研究としての力学的・水理学的・地球化学的な各種物性についての評価が個別に行われてきた(例えば、「第2次取りまとめ」)。その結果、個々の物性についての情報は蓄積されてきたものの、坑道掘削により生じる地質環境の状態変化(水理環境や地球化学的環境など)と物性変化(弾性係数や透水係数など)との関係に関する情報は得られていない。これらの関係を明らかにすることにより、個別の調査研究の成果を統合した坑道周辺における地質環境特性評価手法の構築や、瑞波超深地層研究所における坑道からの調査を具体化するために必要な坑道周辺の地質環境特性に関する概念モデルを構築することを目標としている。

平成14年度は、坑道周辺の水理特性調査として、坑道周辺の不飽和領域の原位置計測手法の開発に関する調査研究を実施するとともに、間隙水圧の観測を前年度に継続して実施した。

② これまでの成果

平成13年度までに、TDR(Time Domain Reflectometry)による岩盤の不飽和領域を計測する装置(バック式プローブ)を開発し、第2計測坑道の試錐孔において原位置適用試験を実施した(前村・徳丸, 2001; 前村・細野, 2002)。

平成14年度は、TDRで計測された比誘電率と岩盤の水分量との関係を詳細に把握するための室内試験と、TDR法による水分量の推定結果を孔間で補間するための連続波レーダーの原位置試験を実施した。

比誘電率が既知の溶媒を用いたバック式プローブの性能確認試験の結果、本プローブの計測値により算出される比誘電率は、溶媒の比誘電率と一致し、本手法により比誘電率が正確に算定できることが確認された。また、原位置で得られた岩石コア(泥質凝灰岩)を用いてキャリブレーション試験を実施した(図3.4-5)。その結果、飽和近傍で比誘電率が急激に増加する傾向が見られ、土壌において適用されている混合モデルでは説明できないことが分かった。

孔間連続波レーダーによる計測結果の妥当性を検討するために、レーダーによる試錐孔沿いの比

誘電率分布とTDRによる比誘電率計測結果の比較を行った(図3.4-6)。岩石の比誘電率には周波数依存性があり、周波数が小さいほど大きな値が計測される。今回レーダーで使用した周波数帯域は1~80MHzであるのに対し、TDRでは数GHzと大きいいため、レーダーの方がTDRに比べ大きい値が計測されたと考えられる。しかし、両者の深度方向の分布に着目すれば、比誘電率が深度方向に4m程度まで増加し、それ以降ではやや減少するという同じ傾向を示している。このことから、レーダー計測によりTDRの測定結果を孔間で補間することが可能で、両者を併用することにより坑道周辺の面的な飽和状態を詳細に把握できることが示された。

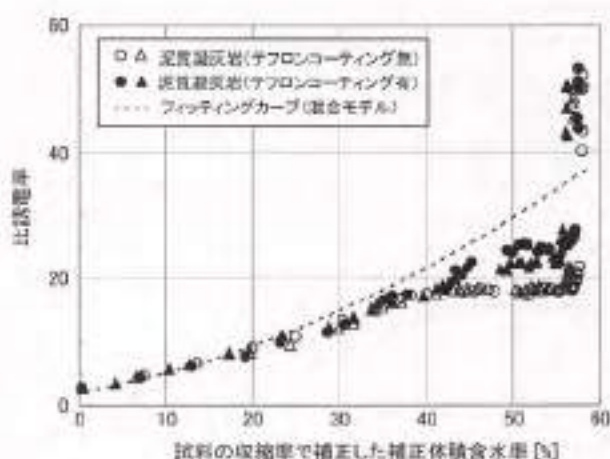


図3.4-5 岩石コアのキャリブレーション結果

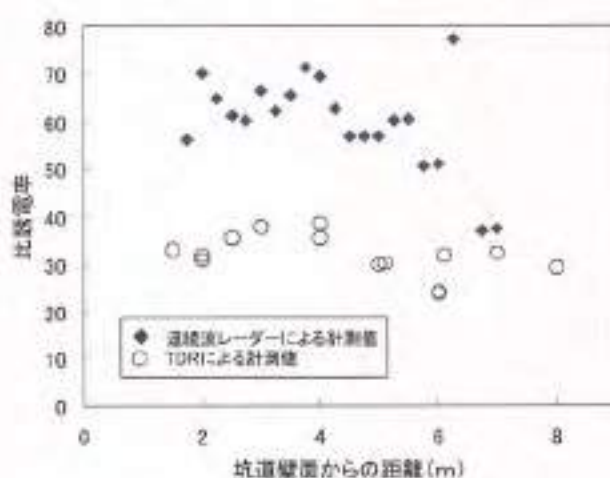


図3.4-6 原位置試験の結果

③ まとめ

TRM法を用いたバックカー式プローブにより、原位置で計測された比誘電率と、岩盤の水分量との関係を詳細に把握するために複数の溶媒や岩石を用いた TDR プローブのキャリブレーション試験を実施した。また、この手法の補完として、連続波レーダーによる不飽和領域の原位置試験を実施した。これらにより、坑道周辺の不飽和領域の広がりをも面的に把握できる可能性を示した。今後は坑道周辺の地質環境情報が豊富な東濃越山 NATM 坑道において同様な試験を実施し、坑道周辺における総合的な地質環境特性評価手法を構築していく予定である。

参考文献

- 前村康之、細野真康 (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；株式会社ダイヤンコンサルタント）、JNC TJI400-2001-014
- 前村康之、悠丸出則 (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；株式会社ダイヤンコンサルタント）、JNC TJI400-2001-001。

3.5 地質環境の長期安定性に関する研究

3.5.1 研究の概要

① 背景と目標

地質環境の長期安定性に関する研究は、日本列島で生じる天然現象のうち、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・侵食、気候・海水準変動について、平成元年度より全国的な観点から、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た。

本研究は、これらの現象について、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と地質環境への影響を評価することを目的とする。

② 実施項目と進め方

「原子力長期計画」などによれば、地層処分に因する今後の研究においては「第2次取りまとめ」などのこれまでの研究成果を踏まえ、地層処分技術の信頼性の確認や安全性評価手法の確立に向けた研究開発を推進することが必要である。

地質環境の長期安定性に関する研究では、隆起・侵食、気候・海水準変動、火山活動、地震・断層活動について、それらの変動の幅や地質環境に与える影響を調査・評価する技術の開発を進める。

なお、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との協力・連携を深めつつ進める。

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おいて、その安全性を評価するとともに信頼性を向上させるためには、地質環境の現在の状態を把握するだけでなく、その環境がなぜ作られたか、それが将来どのように変化するか（あるいは変化しないのか）を自然のプロセスと関連づけて予測・評価していく必要がある（武田、2002）。そのための科学的基盤として、天然現象の発生の規則性や地質環境への影響の範囲と程度に関する長期安定性研究の成果が重要となる。

④ 今後の計画

概要調査地区等の選定や安全審査に係る基準・指針等の策定に研究成果を反映できるよう、将来の天然現象を予測するための技術（長期予測技術）の開発、具体的な地質環境において長期安定性の評価データを取得するための体系化された調査技術および評価手法（地層変動調査技術）の開発を進めるとともに、安全評価に資する知的基盤・研究情報基盤の整備を図る。

i) 長期予測技術

長期予測技術は、将来の天然現象による地層の著しい変動が生ずる可能性を予測するための手法の開発を目指すものである。概要調査地区選定に際しては、「将来にわたって天然現象による地層の著しい変動が生ずるおそれが少ないと見込まれること」が選定要件として定められていることから、文献調査などのデータにより将来の地形変化や断層や火山の発生の可能性などを予測するための調査技術の開発を進める。

- ・二次元地形変化モデルの開発
- ・火山活動の長時予測モデルの開発
- ・地形学、構造地質学、測地学、地球物理学データ等による断層断層の解析手法の開発
- ・テクトニクスの将来予測に関する研究 など

ii) 地層変動調査技術

地層変動調査技術は、地層処分システムの設計や安全評価において考慮すべき現象の存在や過去の履歴を調査するための技術の開発を目指すものである。精密調査地区選定に際しては、「対象地層等において天然現象による地層の著しい変動が長期間生じていないこと」、「活断層や破砕帯による地下施設への影響が少ないこと」などが選定要件として求められており、地表調査、トレンチ掘削、物理探査、ボーリングにより、上記の選定要件を確認するための調査技術や断層周辺の力学的影響を評価するための技術の開発を進める。

- ・堆積・侵食量の算定手法の開発
- ・第四紀大成活動に関する精密復元技術の開発
- ・震源断層や地下深部のマグマ溜りなどの探査技術の開発
- ・断層周辺の破砕帯および変形帯や地下水理の変化等の評価技術の開発

参考文献

武田精悦 (2002) : 地質環境の長期安定性に関する将来予備研究の課題, 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－要旨集, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2001-018. pp 31-35.

3.5.2 研究成果の概要

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、土被り厚や勾配の変化などを通じて地下水流動などに影響するため、地層処分の長期的な安全性を評価する上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・町田編，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50 m/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などが示された。今後は、将来10万年間を対象とした地形変化シミュレーション技術と地形変化の影響評価技術の構築を進め、成果を地下水流動モデルの最適化に反映させる。

具体的には主として隆起と侵食による地形変化の三次元シミュレーション技術の開発、ならびに平野の地層・地形の発達プロセスの研究を進めている。

② これまでの成果

1) 地形変化シミュレーションに関する研究

万年オーダーの長期的な地形変化は、地形を作る物質が斜面を移動するプロセスであると考え、これを拡散方程式で表すことでシミュレーションを行う。シミュレーションに必要な条件（拡散係数、隆起速度など）を明確化し、シミュレーションプログラムを設計した。シミュレーションには地形変化に関する様々なパラメータが必要である。これらは現実の地形がどのような特徴を持つのかを地形計測や現地調査から求めることで得られ、以下のデータよりなる。

- ・隆起速度（文献調査と現地調査、数値地図などによる理論的解析）
- ・拡散係数（実測と数値地図などを用いた解析）
- ・斜面勾配などの分布（数値地図などを用いた解析）
- ・侵食速度（文献調査、数値地図などを用いた解析）
- ・気候変動（文献調査、事例研究）

拡散係数を数値解析的に求めるため、計測プログラムを作成し、日本全域について国土地理院刊行の50 m-DEMを用いて流域の地形計測を行った。

主成分分析の結果、隆起速度・地質および気候が地形を形成する主要因であることが分かった。拡散係数の値は段丘地形の測量結果からも求められる。気候や地質の差を考慮して、全国の河川や海岸で計測したデータを解析した。

これらの計測値から推定された拡散係数を参考値とし、斜面勾配に応じた地形物質の移動（フラックス）を考慮して、東濃地域を事例に12万年間のシミュレーションを試行した（Nogami et al., 2002）。

シミュレーション結果の一例（瑞浪市の日吉川流域）を図3.5-1から図3.5-4に示す。このシミュレーションでは地質や気候変動による拡散係数の違いは仮想的な値である。シミュレーションを現実的なものにしていくには、現地調査によって拡散係数などを具体的に設定する必要がある。ここではシミュレーションのイメージとして図を示す。

図で日吉川本流は右上から左下へ流れ、左下で土岐川と合流している。今回は隆起速度を与えていない。起伏の大きい山地や傾斜の急な河川の崖が大きく侵食され、谷部で堆積が進んでいる。

2) 平野の地層・地形の発達プロセスに関する研究

海水準変動による海岸平野の地層や地形の変化について、世界各地の事例をレビューするととも



図 3.5-1 現在の地形の5 m-DEM（陰影図）



図 3.5-2 12 万年後の地形の 5 m-DEM (陰影図)

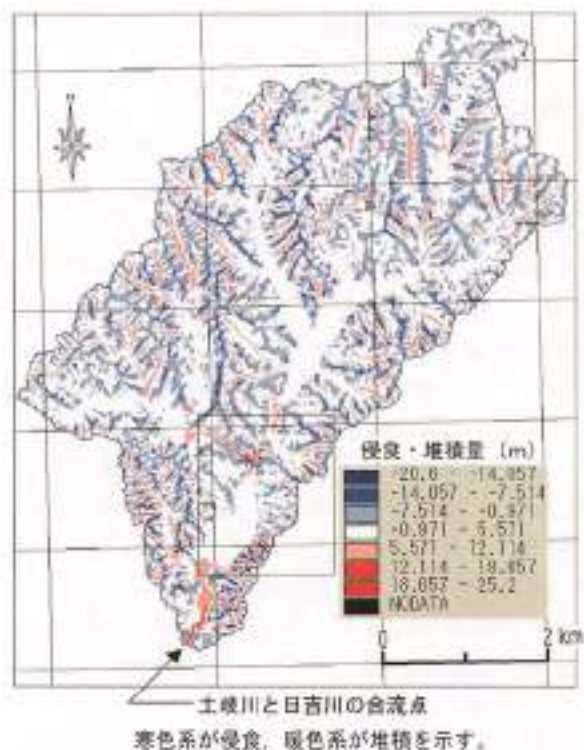


図 3.5-3 12 万年間の侵食と堆積量(単位 m)

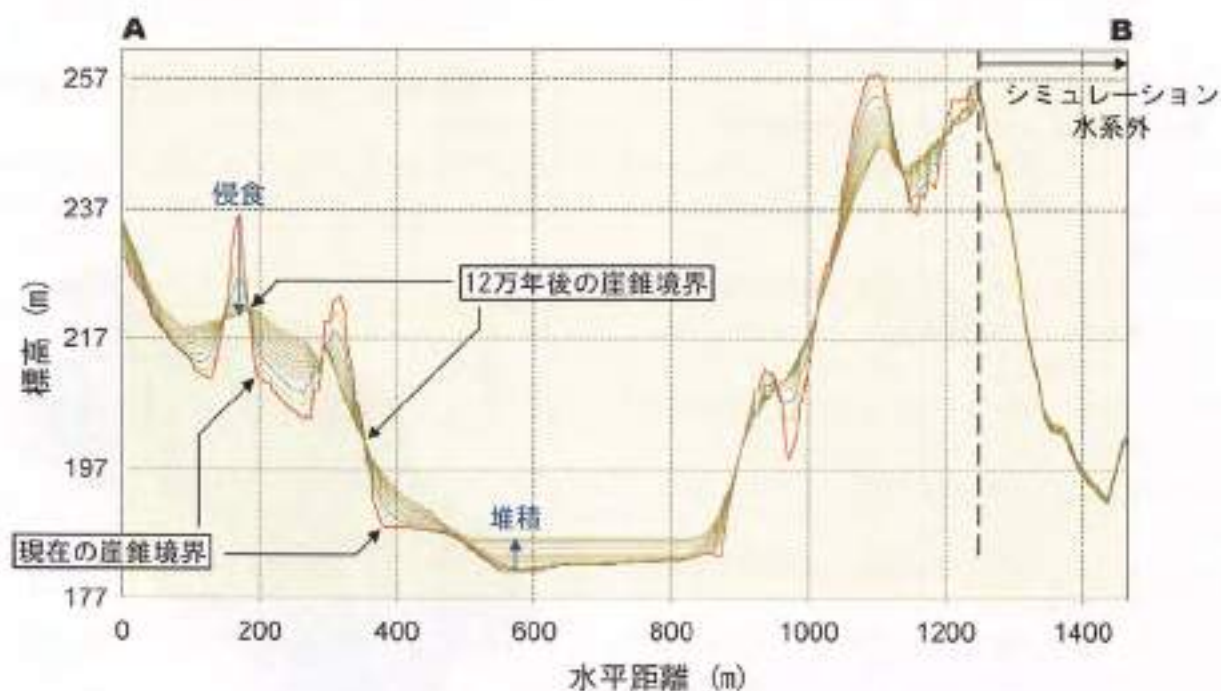


図 3.5-1 の A-B 断面の位置。峰で侵食，谷で堆積が起こる

図 3.5-4 1 万年ごとの侵食と堆積量

に、日本の海岸平野における地層の堆積プロセスを瀧尾平野を事例に検討した。瀧尾平野では、既存のボーリングコアを用いて堆積相の解析や¹⁴C年代測定などを行った。瀧尾平野では過去約6,000年間に、長さ約40 km、幅約25 kmの沖積平野が形成されたことがわかった(山口ほか, 2003)。この事例から、陸水と海水の境界である海岸線は海水準変動に対応して急速に移動することが確認できた。

堆積プロセスを正確に推定するには、信頼性の高い¹⁴C年代測定技術が必要である。そのための測定試料の選別技術を検討した(藤原・鎌滝, 2003a)。また、海岸の地盤隆起プロセスの解明に必要な海底地震の再来間隔を推定するため、津波堆積物を用いた研究を進めた(藤原・鎌滝, 2003b; 藤原ほか, 2003)。

③ まとめ

これらの研究で、隆起・侵食・堆積による地形や地層の発達プロセスのモデル化を進めてきた。今後は、これらの現象をより現実的にモデル化するため、以下の研究が必要である。

- ・現実的な拡散係数や隆起速度、断層活動や海水準変動などを地形変化シミュレーションに取り込む。同時に、解析結果の検証を進める。
- ・これらの資材となる地殻変動の予測のため、後述する地殻変動シミュレーターの開発(3.5.2.5)項を進める。
- ・海水準変動による平野の地形発達に関して、世界各地の事例のレビューと、事例調査ポイントの増加を図る。このモデルでは地震隆起などの地殻変動も考慮する。

参考文献

藤原 浩, 鎌滝孝信(2003a)・¹⁴C年代測定による堆積年代の推定における堆積学的時間平均化の重要性, 第四紀研究, 42, pp. 27-40.

藤原 浩, 鎌滝孝信(2003b)・内湾における津波堆積シーケンスとフィリピン海プレートと東縁の津波ポテンシャル, 北越話断層シンポジウム 2003-21 世紀の活断層巨大地震を探る-発表要旨集, pp. 39-42.

藤原 浩, 鎌滝孝信, 田村 亨(2003)・内湾における津波堆積物の粒度分布と津波震形との関連-房総半島内湾の完新統の例-, 第四紀研究, 43, pp. 67-81.

藤原 浩, 三島新一, 大森博雄(1999)・日本列島における侵食速度の分布, サイクル機構技術, 5, pp. 65-93.

小池 一之, 町田 洋輔(2001)・日本の隆起段丘アトラ

ス, 東京大学出版会, 106p, 3CD-ROMs.

Nogami, M., Fujiwara, O. and Senga, T. (2002) : Simulation of a small drainage basin during the future of 120,000 yr., *Trans. Jap. Geomorph. Union*, 24, pp.105-108 (Abst. Japan-China (Yunnan) Geomorphological Conference)

山口正秋, 須貝俊彦, 藤原 浩, 大森博雄, 鎌滝孝信, 杉山 雅 (2003)・ボーリングコアの解析に基づく瀧尾平野における完新統の堆積過程, 第四紀研究, (投稿中)

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。文献調査により、氷期には年平均気温が数～10℃程度低下し、100 m 程度の海面低下が起き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 200 m 程度であることを見積もった（藤原ほか、2002）。これらの変動のより正確な予測と地質環境への影響の検討が研究課題である。

② 成果の概要

i) 永久凍土が地質環境に与える影響調査

北海道北部の堆積岩（珪藻質泥岩）、本州の堆積岩（砂岩）、花崗岩を用いて凍結・融解実験を行い、凍結・融解の繰り返しによる岩石の強度などの変化を調べた。北海道北部の珪藻質泥岩は他の試料に比べて凍結破砕に対して弱いことがわかった。このために、北海道北部では氷期における凍結・融解の繰り返しによって岩石が破砕されやすく、現在見るようななだらかな周氷河地形が形成されたと考えられる。

ii) 気候変動の予測手法の検討

将来の気温や降水量が、いつどの程度の規模で変化するかを予測することは、地下水の涵養量や浸食量を推定する上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積を持つ堆積物（年縞堆積物）が重要な手がかりとなる。世界各地の研究レビューと福井県水月湖や長野県諏訪湖などで採取した年縞堆積物の研究により、アジア地域過去の 2 万年間の気候変動を 1,000 年程度の時間分解能で解析できるようになった（橋本ほか、2003）。

③ まとめ

長期的な気候変動やその影響について、解析手法などが整備されつつある。永久凍土は不透水層であり、そのような厚い不透水層が形成された場合の地下水流動などの変化を解明することが課題である。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の同期や規模に因

するデータを取得していく。

参考文献

- 藤原 浩、福田正己、末吉哲雄、五十嵐八枝子（2002）北海道における最終氷期以降の永久凍土の形成変化の推定、日本第四紀学会講演要旨集、32、pp. 58-59。
橋本仁之、斎藤排志、藤原 浩（2003）日本列島における更新世後期以降の気候変動のトリガーは何か？—チベットALPと West Pacific Warm Water Pool の役割—、第四紀研究、42、pp. 165-180。
松末和之、藤原 浩、末吉哲雄（2000）日本列島における最終氷期最寒冷期の気候、サイクル機構技術、6、pp. 93-107。

3) 火山活動に関する研究

① 課題と計画の概要

火山活動に関する研究では、主に①確率統計的手法や外挿法などにより将来の火山活動を予測するための技術（火山活動の長期予測モデルの開発）、②対象地域における過去の火成活動の履歴を精密に復元するための技術（第四紀火成活動に関する精密復元技術の開発）、③地下深部のマグマや高温岩体などを事前に把握するための調査技術（地下深部のマグマ溜りなどの探査技術の開発）に係わる研究開発を進めている。

このうち、「火山活動の長期予測モデルの開発」では、山陰や伊豆半島の独立単成火山群を事例として、過去の単成火山の発生の空間的パターンから空間統計モデルにより将来の火山の発生確率を評価する手法を検討している。また、「地下深部のマグマ溜りなどの探査技術の開発」については、地震波トモグラフィ、地磁気地電流法（Magnetotelluric Method；以下、MT法）比抵抗調査、重力構造解析などの地球物理学的手法に加えて、温泉ガスの同位体分析などの地球化学的手法の適用性の検討を行っている。以下では、平成14年度に実施した当該調査・研究の概要を示す。

② 成果の概要

i) 火山活動の長期予測モデルの開発

将来の火山活動を予測するための技術開発の一環として、東伊豆単成火山群および神鍋単成火山群を事例に、単成火山の発生パターンから今後1万年間に新たに形成される火山の確率分布をkernelモデル（Diggle, 1985）によって計算した（マーチンほか, 2002; Martin et al., 2003）。

この方法は、過去の単成火山の空間分布の特徴から任意の地点の密度関数を求め、対象期間の火山の発生数（単成火山群全体の発生確率）から確率分布を推定するものである。

図3.5-5に東伊豆単成火山群における今後1万年間の単成火山の形成される確率分布を示す。これによると、単成火山が密集している地域では、 10^1 オーダーの確率となる。ちなみに、1989年に噴火した手石海丘の周辺地域では、 10^2 オーダーの確率を示している。また、神鍋単成火山群では、発生確率が最も高い地域では 10^2 オーダーを示す。

単成火山の空間分布は、一般に火山群が置かれている場の地殻応力に支配されると考えられてい

る。例えば、図3.5-5に示すように、東伊豆単成火山群では北西-南東方向にその配列が卓越する。今後は、広域応力場、地熱構造、重力構造などの地球物理学的特徴を考慮しつつ、モデルの高度化を進めていく予定である。

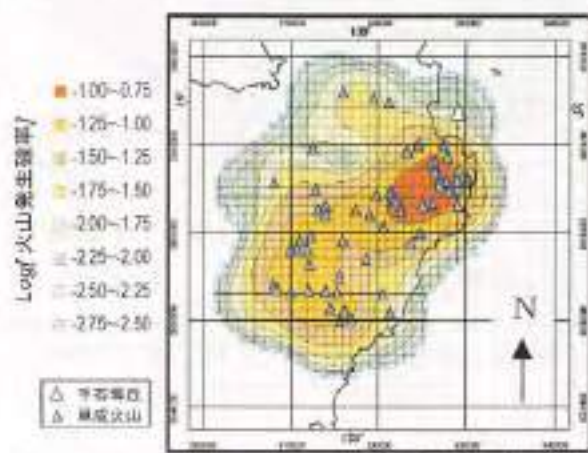


図3.5-5 東伊豆単成火山群における今後1万年間の火山発生の確率分布

ii) 地下深部のマグマ溜りなどの探査技術の開発

非火山帯の地熱地帯における熱源や地質構造などを明らかにするための調査技術の開発の一環として、紀伊半島南部（本宮地域）を対象にMT法による深部比抵抗構造調査、重力構造解析、代表的な温泉における温泉水・ガスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ などの測定を行った。

調査地域である紀伊半島南部は、白亜紀～中新世前期の四万十層群、中新世前期～中期の田辺・熊野群および熊野酸性岩類、大峯酸性岩類などの中期中新世の火成岩からなる（図3.5-6）。

a) 深部比抵抗構造

MT法による深部比抵抗構造調査は、図3.5-6に示す東西、約50kmの測線において、9点の観測点を設置し、磁場と電場を5日間観測した。また、ファーリモートリファレンス処理を行うため、調査地域から500km以上離れた鹿児島県においても観測点を設けた（上原ほか, 2003）。今回の観測では、二次元断面において解析可能なS/Nの高いデータを取得することができ、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。解析ではOgawa and Uehida (1996)のアルゴリズムを用いた二次元解析により深度30kmまでの比抵抗構造を求めた。図3.5-7の二次元断面図によると、半島中部～東部の地表付近から地下20km

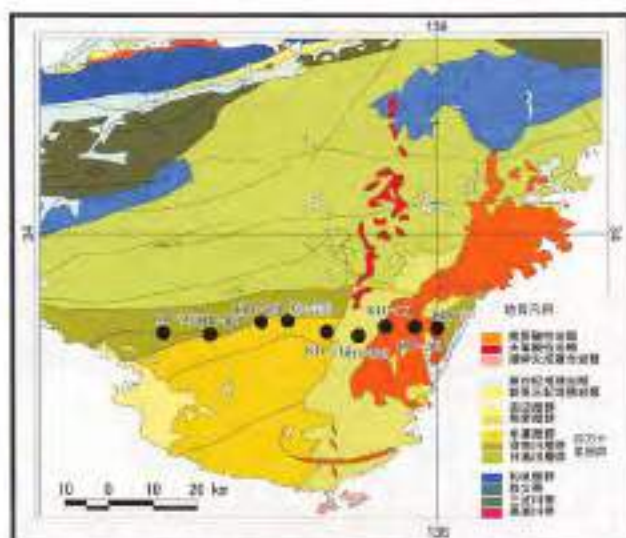


図 3.5-6 紀伊半島の地質と MT 法比抵抗構造調査における観測点の位置

にわたってやや西に傾斜する高比抵抗部（約 1,000～10,000 Ωm）が存在する。また、紀伊半島中～西部の地下 10～15km 付近には極めて比抵抗の低い層（約 1～100 Ωm）が広く存在する。Wakita et al. (1987) は、紀伊半島の地熱地帯の熱源として、地殻下部のマグマの存在可能性を指摘しているが、今回の解析の結果によると、地殻下部にはマグマと考えられる顕著な低比抵抗部が存在しないこと、地下 10～15 km 付近の低比抵抗部においても震源が分布している（マグマは溶融体であるため、そこでは地震が発生しない）ことなどから、マグマの存在を示唆するデータは得られなかった。

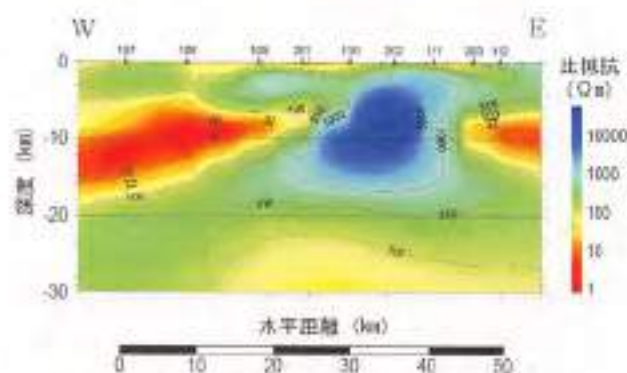


図 3.5-7 紀伊半島における深部比抵抗構造

b) 重力構造

重力構造解析については、Shichi and Yamamoto (2001) および地質調査所 (2000) による重力データベースを用い、補正密度 2.67 g/m³

として重力異常値を求め、0.1 分メッシュの格子点データに変換した。今回は上部地殻の密度の不均質性を議論するため、下部地殻やスラブの密度構造に起因する傾向平面および超波長成分（100 km 以上）を除去した。

重力異常分布図（図 3.5-8）によると、半島中～東部には、南北に伸びる高異常域が認められるが、これらの分布は上記の高比抵抗部と整合的である。この付近の地下には高比抵抗・高密度の物質が広く存在することが示唆されるが、地表には熊野酸性岩類や大峯酸性岩類などの中新世の火山・深成複合岩体が認められることから、これらに伴う大規模な潜在花崗岩体に相当すると考えられる。また、半島南東部の沿岸域には顕著な低異常域が認められるが、これらは熊野カルデラ (Miura, 1999) の分布と一致することから、ピストンシリンダー型カルデラの内部に堆積した空隙が多く、密度の小さい火山噴出物を反映するものと考えられる (角田ほか, 2002)。

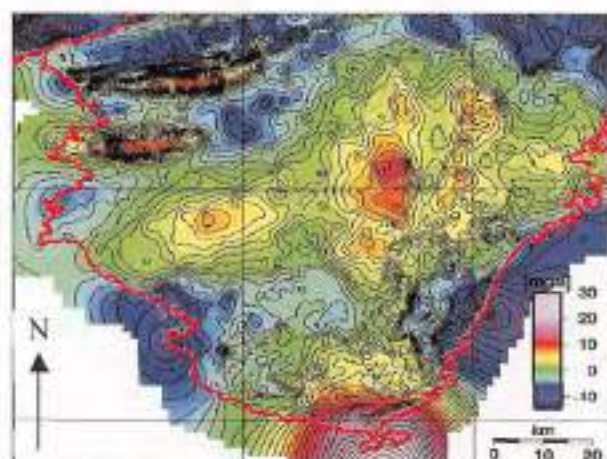


図 3.5-8 短波長重力異常分布図（波長 2～100 km 成分）

c) ヘリウム同位体比

火山ガスに含まれる He は、地殻中での化学反応を生じにくいことから地下深部の化学的な情報を得るための重要な指標の一つである。特に、温泉水・ガス中の ³He/⁴He は、マントル物質の寄与の程度を推定するための有効な手段であると考えられている (例えば, Sano and Wakita, 1985)。今回、紀伊半島東部の代表的温泉において、温泉水・ガス中の ³He/⁴He および ⁴He/²⁰Ne の測定を行った。

図 3.5-9 に He 同位体比および重力異常の水平勾配分布を示す。紀伊半島の温泉ガスの ³He/⁴He

の多くは、 $2.8 \sim 5.6 (\times 10^{-6})$ (以下同じ単位)で、西南日本弧の火山帯と火山フロントの海溝側の同位体比の中間的な値を示す。Wakita et al.

(1987)は、半島の中西部で $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の特異的な高異常域 (近畿スポット) を指摘したが、今回の研究でこの高異常域はより広く半島全域にわたって大気の値の2倍 (2.8×10^{-6}) 以上の高い値を示すことが分かった。また、岩相の違いによる明瞭な相関も認められない。

重力異常の水平勾配分布によると、ヘリウム同位体比が高い温泉は、重力異常の急変点に分布する傾向が認められることから、断層、カルデラの陥没構造や深成岩体の貫入など、地下構造や地質媒体の不連続構造に規制されていると考えられる。

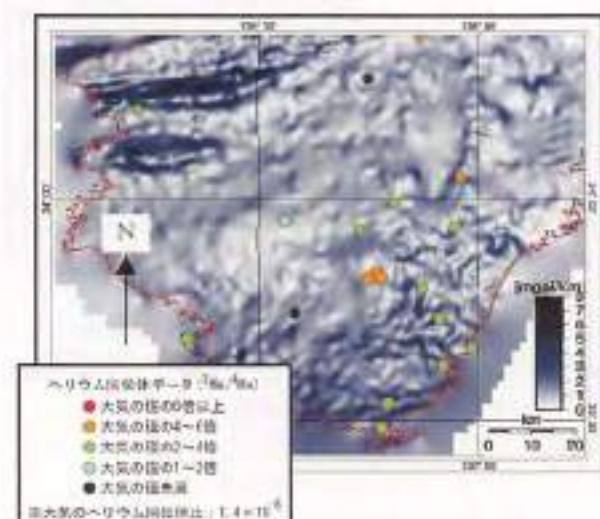


図 3.5-9 ヘリウム同位体比および重力異常の水平勾配分布図

以上のように、深部比抵抗調査、重力構造解析などの地球物理学的手法に加えて、ヘリウム同位体比測定などの地球化学的手法を用いることにより地下深部の熱源や地質構造などを推定することが可能となる。今後は、個別の調査技術の適用性を確認するとともに、非火山帯における高温泉の湧出の原因についての検討を進めていく。

③ まとめ

火山活動に関する研究では、「火山活動の長期予測モデル」、「第四紀火成活動に関する精密復元技術」および「地下深部のマグマ溜りなどの探査技術」に関する技術開発を進めている。これらの調査・評価に係わる要素技術は整いつつあるが、実際の地域や地質環境にどの程度適用できるのか

については、不明な点が多い。今後は、これらの技術の精度・不確実性などの検討を進めるとともに、体系化された技術の構築を目指す。

参考文献

- 地質調査所編 (2000) : 日本重力 (CD-ROM), 数値地質図 P-2, 地質調査所.
- Diggle, P. J. (1985) : A kernel method for smoothing point process data, *Appl. Statist.*, 34, pp. 139-147.
- 角田地文, 梅田浩司, 石丸恒存, 工藤 健, 棚瀬充史, 小松 亮 (2002) : 紀伊半島南部における地殻構造について—非火山地域における高温異常域の地殻構造の検討例—, 日本応用地質学会中部支部研究発表会講演会子集, 14, pp. 25-30.
- マーチン・アンドリュー, 高橋正樹, 湯佐泰久, 梅田浩司 (2002) : 単成火山群の確率的将来予測—東伊豆および東山陰地方の単成火山を例にして—, 日本地質学会第109年学術大会講演要旨, p. 317.
- Martin, A. J., Uneda, K. and Yusa, Y. (2003) : Probabilistic approaches for predicting the long-term spatial and temporal characteristics of monogenetic volcanoes: application to two monogenetic volcano fields in Japan, *JNC Technical Review*, no. 18 (2002. 3), pp. 59-70.
- Miura, D. (1999) : Arcuate pyroclastic conduits, ring faults, and coherent floor at Kumsu caldera, southwest Honshu, Japan, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 92, pp. 271-294.
- Ogawa, Y. and Uchida, T. (1996) : A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *Geophys. Jour. Inter.*, 126, pp. 69-76.
- Sano, Y. and Wakita, H. (1985) : Geographical distribution of $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in Japan: implications for arc tectonics and incipient magmatism, *Jour. Geophys. Res.*, 90, pp. 8729-8741.
- Shichi, R. and Yamamoto, A. (2001) : Gravity Database of Southwest Japan (CD-ROM), *Bull. Nagoya Univ. Museum, Special Rept.*, No. 9.
- 上原大二郎, 石丸恒存, 棚瀬充史, 小川康雄, 巖山恒臣 (2003) : MT 法におけるファーマリモトリファレンス処理の効果と紀伊半島南部地域の深部比抵抗構造, 応用地質, (印刷中)
- Wakita, H., Sano, Y. and Mizoue, M. (1987) : High ^3He emanation and seismic swarms observed in a nonvolcanic, forearc region, *Jour. Geophys. Res.*, 92, pp. 12539-12546.

4) 地震・断層活動に関する研究

① 課題と計画の概要

「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) では、テクトニクスと断層活動との関係を分析した結果をもとに、過去約 30 万年前以降に繰り返し活動し、その痕跡が地形に現われ、今後も活動を繰り返すと考えられる断層を「活断層」と定義し、既存情報の整理、解析および判読精度の向上により、全国一律の基準で活断層の見直しを行った。一方、中国地方では、鳥取県西部地震(2000 年)や鳥取地震(1943 年)など、活断層としての変位地形の累積が比較的不明瞭な地震が発生している。このような地震を引き起こす可能性が高い地下の震源断層の調査手法の開発を目的に、中国地方を事例対象として震源断層の抽出技術に関する調査を平成 13 年度に引き続き実施した。

断層活動による力学的影響範囲については、断層周辺の岩盤の変形に関する知見を整理するとともに、東畿地域を事例対象に、断層活動に伴い形成された小断層や亀裂分布の調査手法の検討を開始した。地震による地下水への影響の調査手法の開発については、鳥取県西部地震震源域を事例対象に、横ずれ断層の活動に伴う地下水位の変化と回復の状態を調査し、観察された変化の原因に関する検討を開始した。

地層科学研究に最先端の研究・技術を反映させる一環として、陸域変動による地質環境の変化に関する研究を実施している。このプロジェクトでは、地震発生に関する研究と活断層帯での地殻活動研究を進めている。

地震発生に関する研究(ACROSS 研究)の目的は、波動を用いて、高精度・高分解能で地質環境の調査と監視を行う汎用技術の開発実用化である。ACROSS は、精密制御定常信号システムの英語訳(Accurately Controlled Routinely Operated Signal System)の頭字を繋いだ、わが国の独創的新技术である。理論体系の整備がほぼ完了し、プロトタイプ装置の試験が進んだので、実用装置の連続運転、運用体制確立などに向けて、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は、地層処分の信頼性を高める上で重要な、地震・断層活動が地質環境に与える影響を把握する手法の開発と、その基礎となる広域地殻変動や活断層の形成メカニズム

に関する科学的知見の蓄積を目的としている。このため、鈴津川断層帯で、活断層の微砕帯とその周辺の構造および、断層帯の発達史(活断層がどのように生まれ、成長するか)の解明に焦点を当て、地震観測・GPS 観測・構造地質学的調査研究を実施している。

② 成果の概要

1) 震源断層の抽出技術に関する調査

地下の震源断層の調査手法の開発として、中国地方を事例対象に空中写真判読を行い、その結果と地震活動等との関連性を検討した(図 3.5-10)。

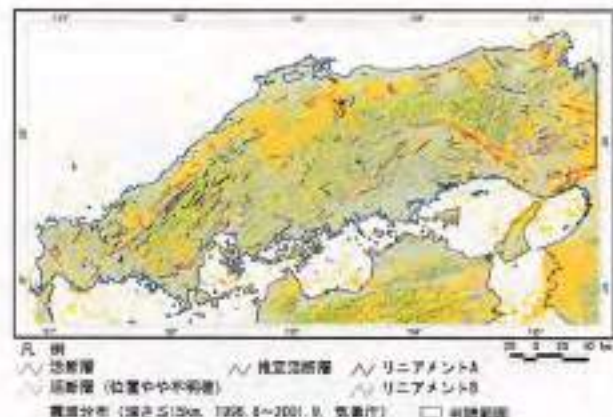


図 3.5-10 空中写真による地形リニアメント判読(事例対象:中国地方)

リニアメントの判読基準は以下のとおり。

- ・活断層, 推定活断層:
 - 都市圏活断層図, 詳細デジタル活断層マップにほぼ準じる
- ・リニアメントA:
 - 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、明瞭な変位地形を伴わないもの
 - c) 長大なリニアメントで、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
- ・リニアメントB:
 - 単独で発達する明瞭なリニアメントのうち、長さが短く、断層変位地形を伴わないかあるいは変位地形そのものの成因が不明なもの(単独では起震断層となる可能性はきわめて低く、周辺に主要な活断層が発達しないもの)

判読したリニアメント（以下、「リニアメント」）の分布の特徴と地震活動および地質構造等との関連性を検討した。震源データは、気象庁全国震源データ、京都大学高精度震源データ、国立大学観測網地震カタログを用いた。震源分布の集中帯と、活断層帯および「リニアメント」の方向は調和的である。それらの位置はしばしば重複、または隣接する。「リニアメント」は、先白亜系の分布線もしくは境界に帯状に分布するものが多い。一方で、白亜紀～古第三紀の火成岩類が広く分布する地域の一部では、「リニアメント」は、既知の地質断層とほとんど一致せず、散在し、明瞭な方向性は認められない。この結果は、早坂ほか（1998）が基盤地質の分布深度と地震発生層の関係性を考察した結果と整合的である。重力データ（Geological Survey of Japan, AIST and Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (eds.), 2002）との比較では、活断層および「リニアメント」が集中して分布する地域は重力値の変化が比較的大きい地域に対応し、重力値の変化がほとんどない地域では、「リニアメント」が分布しない傾向が認められた。

ii) 断層活動が地質環境に及ぼす影響の調査

断層活動に伴う周辺岩盤の変形の特徴を整理し、断層の周辺岩盤中の小断層や亀裂の分布の調査手法について、主に東濃地域を事例対象とした調査研究を行った。

周辺岩盤の変形については、Okada (1992) 等に基づき、主な活断層帯の変形の特徴を整理した。

断層の周辺岩盤中の小断層や亀裂の分布については、東濃地域の稠密なボーリングコアを用いて、月吉断層（地質断層）周辺の堆積岩（20-15 Ma）中のそれらの分布を調べ、断層運動に伴う力学的および水理学的な変化について検討を行った（野原ほか、2003）。

その結果、月吉断層直近と、断層周辺（深度200-500 m の範囲）で、断層の両側（上盤と下盤）の中新世の堆積岩中に、小断層および亀裂が列状に並んで分布することを確認した。下盤の小断層等の分布方向は、卓越する節理の方向と調和的であり、断層運動時の最大主応力方向とほぼ一致する。この列状分布を示す小断層直下にあたる花崗岩上部で、ボーリング孔内の地下水位の連続観測が行われ、地震に伴う地殻応力の変化に起因する水位の変化とその急速な回復が報告されてい

ること（King et al., 1999）等から、この花崗岩中の節理は、地震時に一時的に高透水性化する主要な水みちである可能性が高い。上盤の小断層等の分布は、その両側に分布する地質断層の延長部にあたり、その方向は月吉断層の走向方向と最大主応力方向の2方向に相当する。小断層等の形成に関与した地殻応力の変化は、距離と大きさの関係から、月吉断層および隣接する山田断層帯の活動時に生じた可能性が高い。

この堆積岩中のウラン系列核種の既存の調査で、小断層等の直上部において、過去数十万年以内にウランの再濃集が生じた可能性が報告されている（Yohara et al., 1992）。ウランの再濃集が生じた堆積岩中の富集部（以下、再濃集部）中の地下水は還元的、直下の花崗岩上部中の地下水はやや酸化的であり、花崗岩上部の透水性は比較的高い（「第2次取りまとめ」）。水理地質構造や地下水同位体年代の分布等の既存の情報（例えば、Yusa et al., 1992）からは、再濃集部の地下水の流入は通常ほとんどないと推定される。しかし、間隙水圧の長期観測の結果から、広域的な地震が発生すると、花崗岩上部と堆積岩中で空隙率が一時的に増加し、透水性が高まることで、地震直後に間隙水圧が一時的に減少、その後、花崗岩のすれた節理に沿って動水勾配により上流側から地下水が流下、間隙水圧が増加に転じ、直上の再濃集部へ酸化的な地下水の流入が生じると推定できる。酸化的な地下水が再濃集部に流入すると、微生物が関与する反応速度が速い硫酸等の還元反応（Lloyd and Macaskie, 2000）に伴うウランの沈殿、再濃集が生じると考えられる。つまり、月吉断層等の運動時に形成された小断層等は、広域的な地震に伴う地殻応力の変化に対応して堆積岩中の空隙率の変化が生じる際に一時的に再開し、ウランを含む花崗岩中の酸化的な地下水がウラン再濃集部に上昇する水みちとなることで、過去数十万年以内に生じた局所的なウランの再濃集に関与したと考えられる。

iii) 鳥取県西部地震震源域の水環境状況変化に関する調査

鳥取県西部地震の震源域である鳥取県西伯都西伯町町辺を対象に、地震発生前後の地下水位等の変化とその回復状態の聞き取り調査および河川流量の観測値の解析を行った（黒澤ほか、2003）。

地震発生に伴い地下水位の変化がみられた地点

(全 171 箇所うちの 4 割程度)のうち、3/4 が水位の低下、1/4 が水位の上昇(湧水量の増加を含む)であった。水位の上昇がみられた地域は、震央からみて北東と西、南西、南東の方向の各地域である。地すべり地形の末端から湧水した南東地域を除き、湧水量が増加した地域のほとんどは、2 週間から 3 ヶ月後に地震発生前の水量に戻っている。地震発生後 2 年間、水位低下の継続がみられた地域は、本震の震源断層の直上と、震源断層の北西および南東地域である(図 3.5-11)。

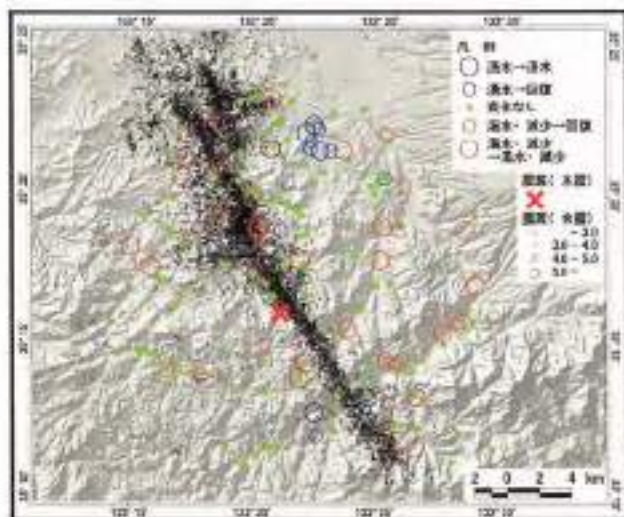


図 3.5-11 鳥取県西部地震震源域の地下水変化

川辺(1991)の「四象限分布パターン」を参考に、分岐断層を含めた一連の震源断層の活動から推定される地下水変化と、今回の調査結果の傾向を比較した結果、震源断層の直上の地域と南東地域を除いて、調和的であった。震源断層の直上で認められた水位低下は、横ずれの断層運動に伴って生じる dilatation(膨張)によると考えられる。湧水量が増加した北東地域の法勝寺川では、地震発生後に、降雨量との相関が認められない河川流量の増加が生じている。

北東地域内の西伯町清水川地区では、地震発生後新たに湧水が始まり、その後 2 年間湧水が継続している。この周辺は、他の地区に比べて地震後の湧水箇所および湧水量が比較的多い。この地区は、透水性が比較的高いと推定できる基盤花崗岩上部が地表に露出する部分で、地形的には急峻な山地と丘陵地の境界部分に相当する。ここでの湧水量の顕著な増加は、本地域の地形は急峻で地表付近から浅層の動水勾配が比較的高いと考えられる環境において、地殻歪の変化に伴う帯水層内の

間隙水圧の上昇や、地震動に起因する帯水層の空隙構造の変化に伴い透水性が高くなるなどの現象により、本地域の地下水流動場が一時的に変化していることが原因と考えられる。

iv) 陸域変動による地質環境の変化に関する研究

地震発生に関する研究(アクロス研究)の主な進捗と成果は次の通りである。

- ・弾性波アクロスの実用化に必要な廉価高精度地震計確保のため、地震計の簡便な高精度二次校正法を開発した(図 3.5-12)。
- ・弾性波と電磁波の長期連続定常送受信によるシステム安定性の試験を開始した。この試験では、逆転を含む周波数変調(FM)弾性波送信に成功し、東濃鉱山から 100 km 程度まで FM 信号の受信が確認できた。
- ・アクロスのデータ取得解析手法が逐次確立整備され、電磁波では、地下の微小な物性変化を信頼度付きで評価できるようになった。
- ・観測と解析の空間分解能を上げるための弾性波アレイ観測システムが完成し、周波数領域解析コードの設計に着手した。



図 3.5-12 二次校正用振動台

活断層帯での地殻活動研究では、広域の変動やスリップ面との関連を解明するために、勝津川断層帯でクリープが確認されている地域に加え、断層固着域を対象に、平成 13 年度 GPS 観測網を強化し、地震観測と合わせて、そのデータを着実に蓄積しつつある。これにより、クリープ域、固着域の分布と地震活動の関係、両域の境界で起こっている現象が理解されつつある。また、活動度の評価に向けてトレンチ調査、地表踏査等を実施した。さらに、地震活動と流体 pH の変化の関連を明らかにするための室内実験を行い、石英の粉砕

で溶液内の水素イオン濃度が上昇することなどが明らかとなった。

③ まとめ

地下の震源断層および断層活動が周辺の地質環境に及ぼす影響の調査技術の開発を目的に、事例調査を実施した。震源断層の抽出技術に関する調査では、抽出の基準の検討および抽出結果の既存情報との比較検討を行った。地質環境に及ぼす影響等に関する調査では、影響の特徴、傾向に関する情報を取得した。

今後は断層の活動履歴などの地域性を考慮した上で、一般化した調査技術の開発を目指した調査・研究を進める。震源断層の抽出技術に関する調査では、震源断層として抽出したリエアメントの活動履歴の評価手法の検討を行うほか、他の地域への適用を検討する。断層活動が周辺の地質環境に及ぼす影響に関しては、周辺岩盤の変形や地殻応力の変化、小断層等の形成、透水性の変化等の調査により、影響の特徴、傾向に関する情報を蓄積、整理し、それらをもとに調査手法の検討を行う。

陸域変動による地質環境の変化に関する研究では、アクロスの実用化に向けたハードウェアの高度化と信頼性の向上が図られつつある。今後はこれに加えてソフトウェアの高度化と信頼性の向上を目指す。また、活断層研究では、峠津川断層帯のGPS観測や地震観測等により、断層活動の性質、影響範囲が明らかになってきた。今後は、観測を継続し、これらの知見の信頼性を高めるとともに、深部を含む地質構造発達史や隣接逆断層区との活動の棲み分けの仕組みなどを明らかにしていく。

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, 15, 1 sheet.

Geological Survey of Japan, AIST and Korea (Institute of Geoscience and Mineral Resources Ltd.) (2002) : Geoscientific maps of southern part of Korea, Western part of Japan and their adjoining seas, 1:1,000,000, digital geoscience map P-4. Geological Survey of Japan, AIST.

早坂康隆, 大友幸子, 根本利彦 (1998) : 尾盤地質と活断層の対比による活断層系の力学モデルの構築 (中間報告), 地震研シンポジウム「日本列島の地質大構造と地震テクトニクス」講演予稿集, pp. 79-87

King, C. Y., Azuma, S., Igarashi, G., Ohno, H.,

Saito, H. and Wakita, H. (1999) : Earthquake-related water-level changes at 16 closely clustered wells in Tono, central Japan, [Journal of Geophysical Research, 104, B6, pp.13073-13082.

川辺岩夫 (1991) : 地塊に伴う地下水 - 地球化学現象, 地質, 第2巻, 44, Special Issue, pp.341-364.

黒澤英樹, 栗原 壯, 三輪敏志, 浅森浩一 (2003) : 鳥取県西部地域震源断層近傍の地下水位の変化とその原因について, 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会予稿集

Lloyd, J. R. and Macaskie, L. F. (2000) : Bioremediation of radioactive metals, [in "Environmental Microbe-Metal Interactions" Ed B. B. Levley ASM Press, pp.277-327.

Sohara, T., Ochiai, Y., Seo, T. and Yoshida, H. (1992) : Uranium-series disequilibrium studies in the Tono uranium deposit, Japan, Radiochimica Acta, 58/59, pp.409-417.

野原 壯, 郡谷順英, 鈴木元孝 (2003) : 第三紀月吉断層近傍の中新統中の小断層と地震に伴う地下水流動の変化との関係について, 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会予稿集.

Okada, Y. (1992) : Internal deformation due to shear and tensile faults in a half space, Bulletin of the Seismological Society of America, 82, 2, pp.1018-1030.

Yusa, Y., Ishimaru, K., Ota, K. and Umeda, K. (1992) : Geological and geochemical indicators of paleohydrogeology in Tono uranium deposits, Japan, Proceedings of an MEA Workshop Paris, 9-10 November 1992, pp.117-146.

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

信頼性の高い地質環境の将来予測手法を構築するには、日本列島のテクトニクスについて理解を深めるとともに、広域および局所的なテクトニクスを解析する地球物理学的なモデルを構築することも有効である。本研究では、過去を踏まえた外挿による地殻変動の将来予測の信頼性を高めるために、テクトニクスの将来予測に関する研究として、日本列島の隆起のメカニズムを説明する地球物理学的なシミュレーション技術を構築する（サイクル機構、2002）。

② これまでの成果

汎用の工学用のプログラムでは、地殻のせん断破壊の構成則、クリープ則の設定などに限界があるため、地殻の変形、断層の滑りなどを現実に即して解析することが困難である。本研究ではこれを解決するために、地殻の様々な物性を取り込んだ地殻変動解析専用のプログラムを開発している。

平成 13 年度には基本機能である微小変形解析機能を開発した（藤枝、2002）。平成 14 年度は実際の褶曲などの解析に必要な大変形解析機能を開発した。ここでは、地質体が大きく歪む現象を解析するため、計算ステップごとに座標系を変換しながら解析するアルゴリズムを導入した。

また、断層の滑りや破壊を解析する断層解析機能を開発した。ここでは、物体が摩擦滑りをする際に、接触面どうしの相対的な変位量と摩擦力の関係（摩擦構成則）をより厳密に解析できるアルゴリズムを考案した。この機能の検証例を図 3.5-13 に示す。(a)では離れていた 2 つの物体（断層両側の岩盤に相当）が接触し始める。続いて(b)では、上側の物体が押しつけられつつ右にずれることで摩擦が生じる。これは右横ズレ断層に相当する。(c)では次第に摩擦応力が増して、最大静止摩擦応力を超えると 2 つの物体は滑り出す。これは断層の破壊に相当する。物体が滑り出すと摩擦力は(d)のように低下する（動摩擦応力）。さらに 2 つの物体を押しえつける力が継続すると、動摩擦応力を受けながら、滑り量が増していく (e)。シミュレーションされた滑り変位と摩擦力の変遷は、室内実験で知られている理論と良く一致する。

③ まとめ

断層の滑りなどを考慮した地殻変動の解析ツールが整いつつある。ここでは理論実験のために物性が均質な物体同士の接触や変形を解析している。しかし、実際の地殻は物性とそれによる強度分布が不均質である。このプログラムの実用化のために、物性の不均質性を具体的に設定した地殻断面を事例に解析を行い、現地調査データと比較し検証・高度化を図る必要がある。また、本プログラムは、断層による周辺岩盤の変形・破壊解析へ応用可能であり、地殻変動による周辺岩盤への影響解析ツールとしても活用できる。応用性の高いツールとして完成させるため、断層変形・破壊に関して、種々の事例解析を行う予定である。

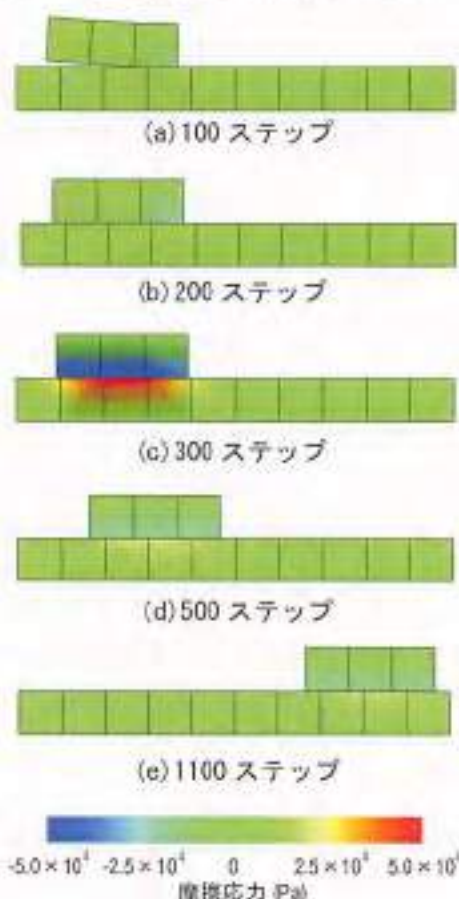


図 3.5-13 断層滑りに伴う摩擦応力の分布

参考文献

- 藤枝忠臣 (2002) : 地殻変動のシミュレーションに関する研究。サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 株式会社富士総合研究所), JNC TJ7400 2002-005。
- サイクル機構 (2002) : 地質環境の長期安定性に関する研究年度計画書 (平成 14 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN7440 2002-001。

3.6 幌延深地層研究計画

3.6.1 計画の概要

① 背景と目標

幌延深地層研究計画は、「原子力長期計画」で示された深地層の研究施設計画の一つとして、堆積岩を対象に地層処分技術に関する総合的な研究を行うものである。この深地層の研究施設は、地層処分技術の信頼性の確認や安全評価手法の確立に向けた研究開発を進めていく上での主要な施設であるとともに、国民の研究開発に対する理解を得ていく場としての意義を有している。本計画は、調査研究の開始から終了まで20年程度の計画とし、地上からの調査研究段階（第1段階）、坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階）、地下施設での調査研究段階（第3段階）と段階的に進めていく。平成13年3月より第1段階の調査研究を開始し、平成14年7月には、幌延町内において地表からの調査を実施していく主な領域として、研究所設置地区を選定した。また、平成15年3月には研究所を設置する用地を取得した。平成15年度から用地の造成、平成17年度から立坑の掘削を開始し、平成22年度の地下研究施設の完成を目指している。

幌延深地層研究計画では、「第2次取りまとめ」以降の研究開発課題として設定された項目について、大きく、地層科学研究と地層処分研究開発に区分して研究開発を実施する。地層科学研究としては、地質環境調査技術開発、地質環境モニタリング技術開発、地質環境の長期安定性に関する研究、深地層における工学的技術の基礎の開発の4課題を、地層処分研究開発としては、処分技術の信頼性向上、安全評価手法の高度化の2課題を設定している。

② 実施項目と進め方

i) 地質環境の特徴を踏まえた課題とアプローチ

幌延町は天塩堆積盆の東端部に位置し、幌延町の東縁部には蝦夷層群を含む中生界の地層と中生代末に主に形成されたと推定される神居古澤帯に属する変成岩類、堆積性メラランジェ、構造性メラランジェ（蛇紋岩等）が南北方向に分布する。一方、幌延町の西部は、先新第三系の地層を基盤岩とし、それを中期中新世以降に堆積した新第三系の地層（宗谷夾炭層、増幌層、稚内層、声間層）が不整合で覆う（保柳ほか、1986）。また、ほぼ南北方向

の褶曲構造や断層構造が発達し、活断層、とう曲、傾動等の第四紀に生じた活構造も認められる。また、研究対象とする新第三系堆積岩は透水性が比較的低いことや、地下水水質のタイプとしては塩水系地下水と淡水系地下水の両者が存在すること、その地下水には溶存ガスが存在することを確認しており、幌延深地層研究計画では、このような地質環境の特徴を活かして研究を進める。

本計画の第1段階においては、堆積岩を例に地質環境調査技術を適用し、地表から地下深部までの地質環境を具体的に提示するとともに、これにより地質環境調査技術の適用性を確認することを目的としている（図3.6-1）。具体的には、地表から行う調査研究により取得されるデータに基づき地質環境モデル（地質構造モデル、水理地質構造モデル、地下水地球化学モデル、岩盤力学モデル）を構築し、調査の進捗に応じて、逐次これらのモデルの更新を行うこととしている。また、地下施設建設による地質環境の変化の予測解析を行い、これらを第2段階で得られる実測データを用いて確認する。これらにより、一連の調査研究で用いた調査機器、モデル化手法を含めた体系的な地質環境調査技術を確立する。

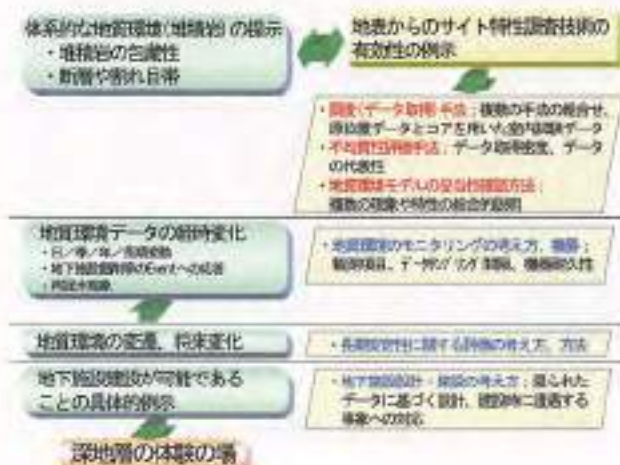


図3.6-1 地層科学研究（幌延深地層研究計画）の成果のイメージ

ii) 研究所設置地区の選定と研究所設置場所

幌延深地層研究計画では、平成14年度の早い時期に、今後の地表からの調査研究を実施していく主な領域として、研究所設置地区を選定することとしていた。研究所設置地区の選定については、地質環境要件（研究の対象となる地層と地下水が存在すること）、安全要件（安全に地下施設を建設でき、研究環境を確保できること）が基本的な要

作となる。

研究所設置地区の選定にあたっては、まず平成12年度末に文献等の既存資料に基づき、新第三紀の主に泥岩からなる声間層、稚内層、増幌層（上部）を研究の対象地層に選定し、これらの地層が500m程度の深さに十分な厚さ（150m以上）をもって分布すると推定される研究所設置対象区域（A区域、B1区域、B2区域、C区域）を抽出した。これらの区域のうち、北海道大学天塩研究林に位置するC区域を除いた、A、B1、B2区域を含む範囲を対象として、平成13年度に空中物理探査（磁気、電磁、自然放射能探査）、地上物理探査（電磁探査）、地質調査を実施し、上記4区域抽出の根拠とした既存の地質情報と整合する結果を得たことから、抽出した区域は研究所設置地区に求められる地質環境要件を満たしていると判断した。

次に、これらの区域から、既存の試錐掘削時に認められた大量のガスの産出記録（A区域）（長尾、1969）や社会的条件（C区域）等を考慮して、B1区域とB2区域を選定し、試錐調査（2孔：HDB-1孔、HDB-2孔）を実施した（図3.6-2）。



図3.6-2 研究所設置対象区域と試錐調査位置

試錐調査地点（HDB-1、2孔）は、それぞれの区域内において、試錐調査実施のためのアクセスや許認可手続き、調査に必要な用地の確保の容易性を考慮して選定した。

試錐調査の結果から、B1区域、B2区域ともに研究所設置地区としての地質環境要件および安全要件の両者の基本的な要件を満たしていることを確認した（サイクル機構、2002）。

次に、B1、B2区域の中から研究所設置地区の候補を選定した。研究所設置地区は、地表からの調査や施設の建設を効率的に行うために、地形が開

け、道路が整備されていることに着目して、B1区域の北進地区とB2区域の上幌延地区を最終の候補とした。

次に、北進地区と上幌延地区について、地質環境要件、地形、アクセス道路、土地利用状況の比較を行った。その結果、上幌延地区に掘削した試錐孔（HDB-2孔）では割れ目が発達し、ガスの湧出を認めたこと、北進地区の方がより地形が開け、道路が発達していること、土地利用状況についても北進地区の方が許認可や用地取得が容易と考えられる原野や公的な機関の所有地が多いこと等を総合的に判断して、平成14年7月に北進地区の約3km四方を研究所設置地区として選定した（図3.6-3）（山崎ほか、2002）。



図3.6-3 研究所設置地区

次に、地下施設を含む施設建設を行う研究所設置場所については、用地取得や許認可の観点から、公共機関の所有する土地で、かつ原野であること、また、地下施設建設のための安全要件などを満たしていることを、平成13年度の試錐調査（HDB-1孔）データにより確認できること等を考慮し、幌延町市街地北方約3kmの位置に研究所設置場所を選定した（図3.6-4）。



図3.6-4 調査研究位置と研究所設置場所

iii) 調査研究の進捗状況

平成14年度は、研究所設置地区周辺を対象とした調査研究の初年度であり、地質環境モデル（地質構造モデル、地下水の水理モデル、地下水の地球化学モデル、岩盤力学モデル）構築を目的とした地質環境データの取得を中心に実施した。具体的には、物理探査、地表地質調査、表層水理調査、試錐調査を実施した(図3.6-4)。試錐調査については、平成13年度に実施した試錐調査で得た知見を活かし、調査機器の改良を行うなどの調査手法の改善を行い、調査に活用した。

地質環境モニタリング技術の開発では、平成13年度に掘削した試錐孔（HDB-1孔）への長期モニタリング機器の設置を行い、地下水の圧力計測を実施した。

地質環境の長期安定性に関する研究では、地震観測用の地震計、地殻変動観測用のGPS(Global Positioning System)観測機器、HT観測機器を設置して観測を実施中である。

深地層における工学的技術の基礎の開発では、選定した研究所設置場所を対象として地下施設の基本レイアウト、基本的な施工計画を策定した。

地層処分研究開発に関しては、第2段階以降の地層処分研究開発の計画を具体化するために、人工ハリアの定置等に関する室内試験、低アルカリ性コンクリート材料に関する室内試験等を実施した。また、今後の研究課題を整理するため、安全評価において重要となる地質環境データや現象の整理ならびに量や精度等の検討を実施した（本報第4、5章参照）。

地上施設に関しては、建設用地造成工事の基本設計および一部分の実施設計を行った。また、研究所設置場所を対象に地下施設の基本レイアウトなどに基づき、研究管理棟およびコア倉庫・ワークショップ棟について、配置・構造など基本計画の検討を実施した。

環境調査については、地下施設の建設などが周辺の環境に与える影響を未然に防止する観点から、研究所設置地区を対象に自立的に行った。

③ 成果の反映先

幌延深地層研究計画では、平成17年頃に第1段階の成果取りまとめを行う予定である。この取りまとめでは、堆積岩/塩水系地下水の環境下において、試錐掘削や各種調査のための要素技術の適用結果をはじめとして、地質環境のモデル化までを

含めた一連の調査手法の具体的な提示を行う。また、東海地科学センターにおける地層科学研究の成果とともに、東海事業所で実施している地層処分研究開発、あるいは国際共同研究の成果と合わせて、実施主体が行う処分事業、国が行う安全規制等に反映する。

④ 今後の予定

地下施設の建設を計画どおりに進めるとともに、地質環境モデルの構築と並行して地質環境データの取得を継続していく。平成17年度に予定されている研究成果取りまとめに資するために、堆積岩/塩水環境を対象とした体系的な調査手法について、幌延を事例とした取りまとめを行う予定である。

参考文献

- 保坂伸一、宮坂晋吾、森岡 幸、木村 学、松井 忠（1985）：衝突帯のタービダイト形成とテクトニクス-中新世-中央東海道の例-、地研研報31、pp. 265-284。
- 核燃料サイクル開発機構（2002）：幌延深地層研究計画 平成13年度調査研究成果報告、サイクル機構技術資料、JNC TS1400 2002-004。
- 長尾裕一（1999）：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.1-5。
- 山崎真一、中村 昇、浴 信博、守坂俊文、竹内竜史、岡丸吉雄、口川伸明、尾方伸久（2002）：幌延深地層研究計画 平成13年度調査研究成果と研究所設置地区選定、サイクル機構技術資料、JNC TS1400 2002-017。

3.6.2 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、表層水理調査等の地上からの調査（第1段階の調査研究）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し、これを用いて地質環境をモデル化するとともに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段階の調査研究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ことを目的としている。

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 課題と計画の概要

平成13年度の物理探査は、幌延町に分布する地質・地質構造の概略を把握し、その成果を研究所設置地区の選定に資することを目的に、ヘリコプターによる空中物理探査および電磁法による地上物理探査を実施した（図3.6-5）。平成14年度は研究所設置地区およびその周辺において、地表から地下2,000m程度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し、地質構造モデルの構築に資することを目的として、反射法地震探査、VSP探査を実施した。

② これまでの成果

1) 反射法地震探査

南北約10.7km、東西約4.3km、合計約15kmの測線を設定した（図3.6-5）。発振源には大型パイプレータ（約18t）2台、市街地では人家などへの影響に配慮して小型パイプレータ（約4.2t）1台を使用して調査を実施した。発振を50m間隔、受振を25m間隔とした。

データ処理結果を図3.6-6,7に示す。この断面図は、共通反射点重合後、静補正や種々のフィルター処理を行い、HDB-1孔と既存試錐調査（石油公団、1995）のVSP探査で得られた速度情報を用いて、時間断面図を深度断面図に変換した深度マイグレーション断面図であり、中央部には物理検層記録から求めた合成地震記録を表示し対比させている。



図3.6-5 反射法地震探査測線図

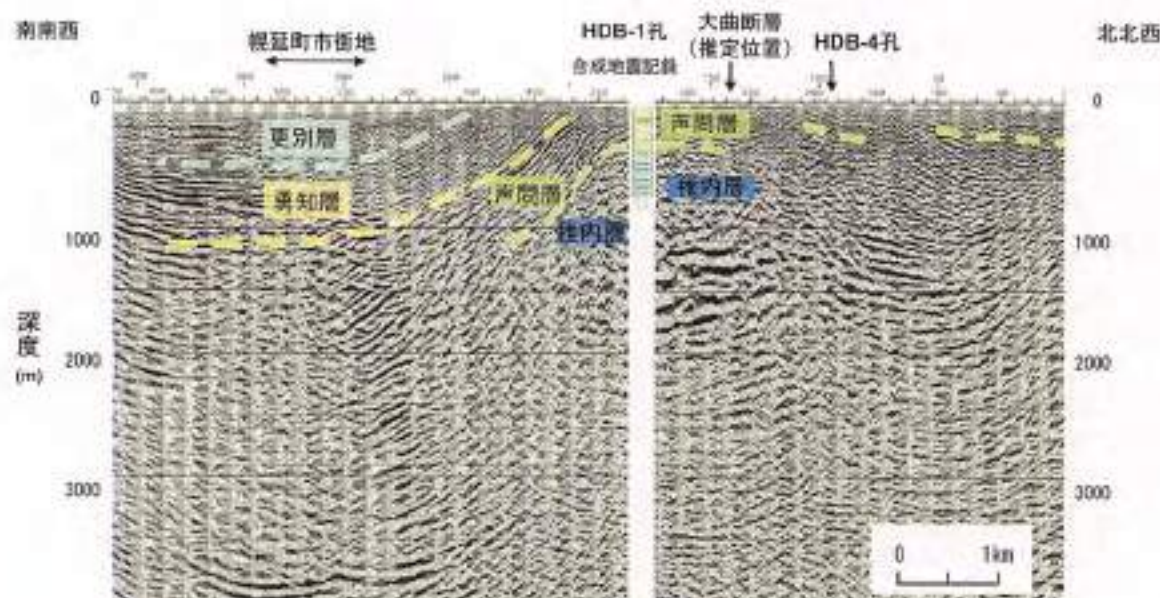


図3.6-6 深度マイグレーション断面図 (Line-1)

以下に各測線の特徴を述べる。

Line-1：地表から地下4,000m程度までの反射波が捉えられている。深度1,000m以浅の反射面の傾向は、HDB-1孔の南側では更別層と勇知層の境界、勇知層と声間層の境界と想定される南傾斜の連続性の良い強反射面が幌延市街地の地下まで確認でき、そのさらに南側では緩い北傾斜の連続性の良い反射面が確認できる。一方、HDB-1孔の北側では、緩い北傾斜の反射面が確認できる。このHDB-1孔からHDB-4孔にかけての反射波は何箇所にも分断されて単純な地層の累重以外の構造が存在している可能性を示唆している。これは、大曲断層の影響による可能性が考えられるものの、明瞭な断層面としては捉えられていない。HDB-1孔北側の深度1,000m～2,000m付近にはその浅部とは逆傾斜(南傾斜)の強振幅の反射面が確認できる。この反射波は、稚内層内の石英帯上面～増幌層内の砂岩層上面に対応していると考えられる。

Line-2：地表から地下2,000m程度までの反射波が捉えられている。深度1,000m以浅の反射面の傾向は、HDB-3孔の西側では緩い西傾斜の反射面が確認でき、深度100m付近の比較的連続性の良い強反射面は勇知層と声間層の境界と想定される。HDB-3孔付近では反射波は何箇所にも分断されて単純な地層の累重以外の構造が存在している可能性を示唆している。HDB-1孔付近の西側から東側にかけての深度100m付近にはやや西傾斜の反射波が確認でき、地質柱状図より珪藻質泥岩部の粗粒砂岩薄層と対応していると考えられる。その東側では東傾斜の連続性の良い強反射面が確認できるものの、大曲断層の地表推定位置(柳田, 1998)の東側でこれらの反射面が急に確認できなくなる。測線の中央部の深度1,000m～2,000m付近にはLine-1と同様に強振幅の反射面が確認でき、稚内層内の石英帯上面～増幌層内の砂岩層上面に対応していると考えられる。

ii) YSP 探査

平成13年度に掘削したHDB-1孔(深度720m)を用いて受振間隔5mで実施した。P波発振には大型パイプレータを、S波発振として小型パイプレータを使用した。HDB-1孔は地表より深度345mまでケーシングのセメントによる固定が不十分であることが分かっていた。そのため、P波データに関してはその影響により適切なデータを得ることができ

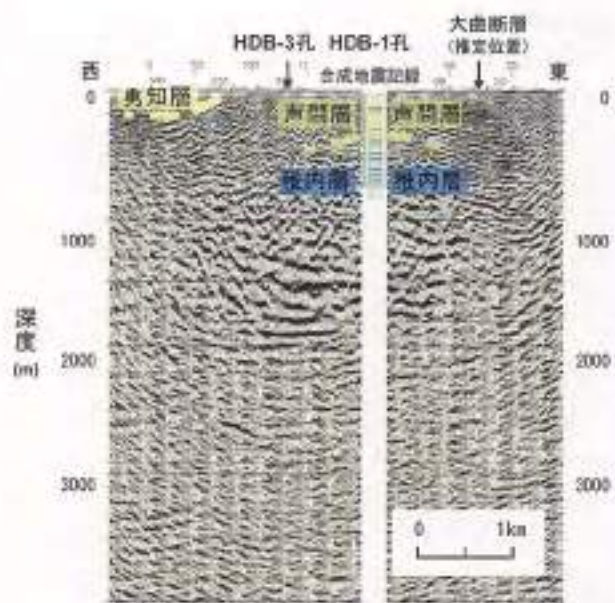


図 3.6-7 深度マイグレーション断面図(Line-2)

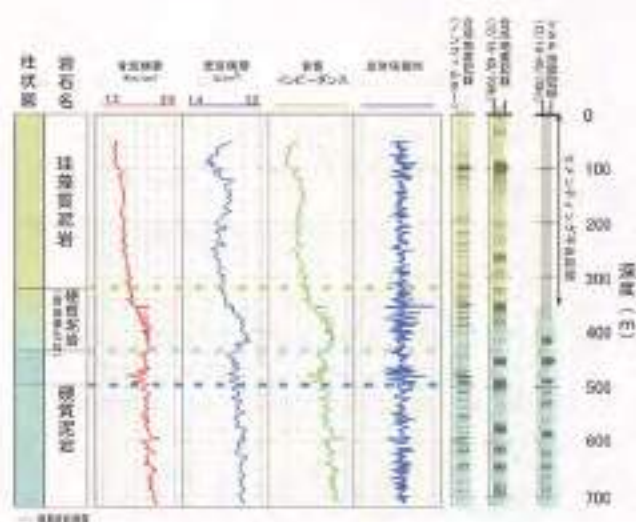


図 3.6-8 HDB-1 孔 合成地震記録

ず、データ処理において、その影響を受けたデータを除去したため、その深度区間の反射波情報を得ることができなかった。しかし、速度フィルターを施して、強いノイズに隠れていたP波の初動部分を抽出することにより時間-深度関係を得ることができ、反射法地震探査断面図の時間軸を深度軸の変換に使用することができた。なお、S波データに関してはセメンティング不良部分においても良好なデータが取得できた。HDB-1孔の物理探査記録(山本ほか, 2002)から得られた合成地震記録との比較を図3.6-8に示す。

③ まとめ

研究所設置地区およびその周辺地区の地表から地下2,000m程度までの地質構造を推定するためのデータを取得することができた。しかし、許認可上の制約から、測線を直線としたり、地質構造と直交したりするよう配置することはできなかった。また、声間層と稚内層の弾性波速度や密度等の物性値には大きな差異がなく反射面として捉えにくいことや、大曲断層推定位置付近では、Opal A帯とOpal CT帯との境界が地層の累積構造と斜交していることが示唆され、それらの反射面が斜交して現れている可能性もあるため、地質構造と深度マイグレーション断面図の対応が困難となっている。今後、地質調査、試錐調査のデータやVSP探査の結果を用いて反射面と地質との対比等を行い、地質構造を推定する予定である。

平成15年度は、大曲断層が推定されている場所周辺において電磁探査を実施し、そのデータを合わせて地表から地下1,000m程度までの地質構造や大曲断層の形状、位置などを推定する予定である。

参考文献

- 石油公団(1995)：国内石油・天然ガス基礎調査基礎試掘「天北」調査報告書。
- 山本卓也、下茂道人、藤原 浩、田部弘通、田所照夫、岩間啓衛、名合牧人、黒本 和(2002)：幌延深地層研究センターにおける試錐調査(HD9-1孔)報告書、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 T11400-2002-010。
- 柳田 誠(1998)：北海道北部地域の地質に関する研究報告書、サイクル機構技術資料(契約業務報告書；株式会社アイ・エヌ・エー)、JNC T11400-98-001。

1-2) 地質調査

① 課題と計画の概要

地質調査では、幌延町に広く分布する新第三系堆積岩の地質層序を確立し、地質構造やその発達史を解明することを目的とし、調査を進めている。本調査の結果は、地質環境を理解するための基礎情報となる。

幌延町に分布する新第三系堆積岩については、南北に縦断する東傾斜の逆断層とされる大曲断層やメカナン断層群を挟んで同じと考えられている地層の層厚や岩相、年代が異なることや、地層境界と堆積面との斜交が指摘されている(柳田, 1998)。平成 13 年度の地質調査および試錐調査における微化石分析の結果でも稚内層、声間層、勇知層、更別層の年代が、天北地域の一般的な年代(根本, 1979)よりも一様に若い結果を得ている。

また、幌延地域に広く分布する珪藻質泥岩や硬質頁岩などの珪質岩については、従来から統成変質(Opal A 帯/Opal CT 帯)の程度の相違に基づいた層序区分がなされており、平成 13 年度に行った試錐調査では、下部の硬質頁岩を稚内層に、上部の珪藻質泥岩を声間層に対比している。しかしながら、その統成変質境界は漸移的である。また、稚

内層とした硬質泥岩中のノジュールからは *Neodenticula kantschatica* 帯に属する珪藻化石が産出し、天北地域の一般的な稚内層よりも新しいこと、天北地域の広い範囲で確認されている声間層基底部に発達する砂岩層を欠くこと、声間層とした上部の珪藻質泥岩と時間的な間隙が存在しないこと、統成変質境界と岩相境界の不一致の可能性があることが示唆されている。このように天北地域の一般的な珪質岩の特徴と異なる点が確認されているため、今後、年代対比と統成変質境界の関係などを考慮した地質層序の確立が必要である。

研究所設置地区は、走向が北北西-南南東で東傾斜の大曲断層に切られていると考えられているが、地表では岩相変化が乏しく、層理不明瞭な珪藻質泥岩が大曲断層の地表推定位置を挟んで広く分布することから、大曲断層の正確な位置や特徴は把握できていない。また、断層と緩く斜交した南北系の背斜・向斜構造が推定されているが、地表調査ではその存在は明確に確認されていない。

② これまでの成果

平成 14 年度は、i) 新第三系の堆積岩の地質層序に関する既存地質データの確認、ii) 珪質岩の地質層序・地質構造の把握、iii) 大曲断層周辺の

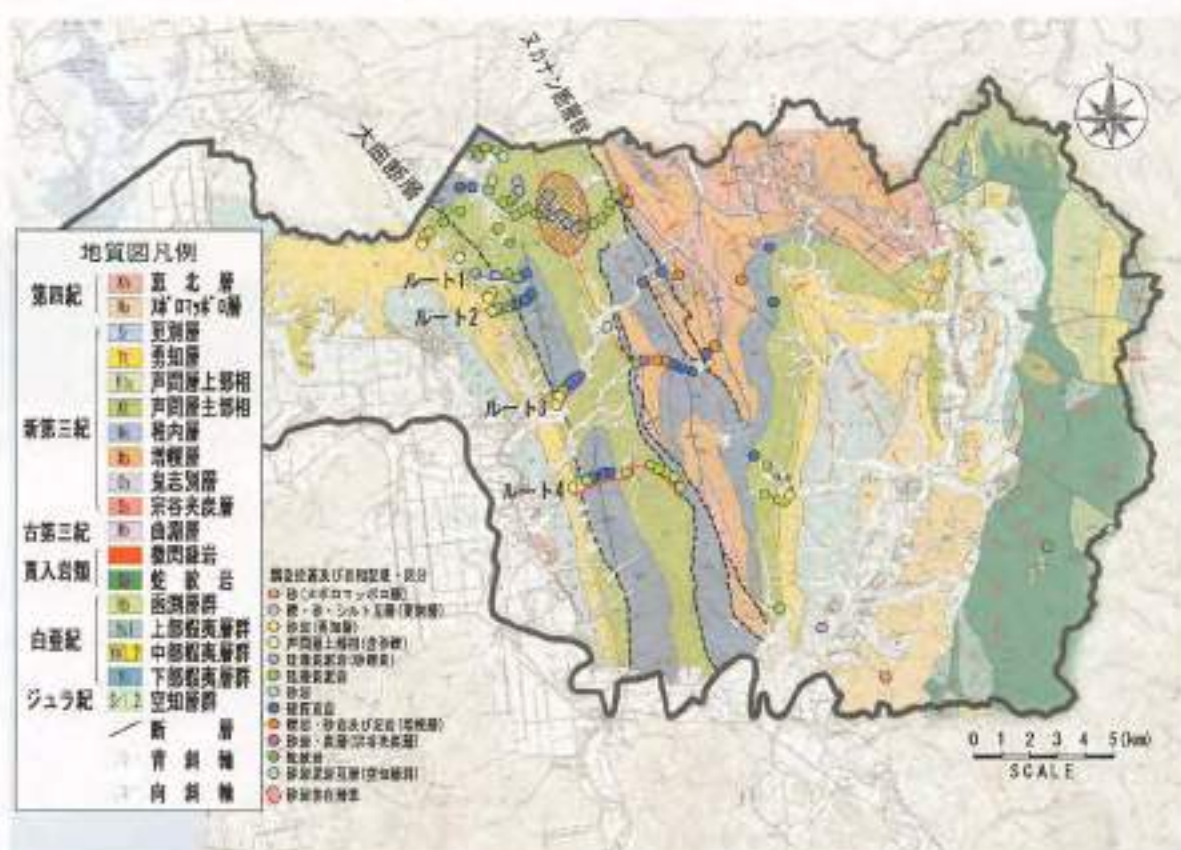


図 3.6-9 露頭観察・試料採取位置図

地質・岩相の確認を目的とし、幌延町内の約 130ヶ所について露頭調査を行い、岩石試料を採取した(図 3.6-9)。現在までに得られている主な結果は以下のとおりである。

i) 幌延町東部の新第三系の堆積岩の地質

- ・ 間寒別地区では、岩相分布や走向傾斜、珪藻質泥岩と硬質泥岩の境界付近に硬質頁岩とチャートの互層(層厚数十 cm 程度)が発達することなど、概ね既存データと整合的である。
- ・ 研究所設置地区の硬質頁岩よりも、全般的に硬質で、黒色と暗灰色を呈する硬質頁岩が数十 cm～数 m 程度の互層状に発達し、全体的に層理が明瞭である。珪藻質泥岩については、研究所設置地区の珪藻質泥岩よりも、全体的に多孔質・軟質で、岩相変化に乏しい。珪藻質泥岩中には数 m 程度の生痕化石が発達する層準が僅かに確認できる。
- ・ ヌカナン断層群よりも東側の宗谷夾炭層、増幌層、稚内層分布域では、地質構造が複雑であり岩相変化も著しい。硬質泥岩や硬質頁岩、チャートやそれらの互層、礫岩、未固結砂岩などが複雑に分布し、一部では、傾斜不整合状の形態を示す。しかし、稚内層基底部の砂岩層と増幌層の砂岩層が岩相的に類似しており、今後も各地層の年代を明らかにし、地質層序と岩相の関係を再検討する必要がある。

ii) 研究所設置地区及びその周辺地区に分布する珪質岩の地質層序・地質構造の確認

- ・ 珪藻質泥岩からなる声間層と砂岩が卓越する勇知層境界付近は、下部から塊状の珪藻質泥岩、径 2cm 以下の黒色チャートの角～亜角礫を含む珪藻質泥岩、厚さ数 cm のレンズ状の明灰色細粒砂岩層を挟む珪藻質泥岩、帯青灰色の塊状珪藻質細粒砂岩、細～中粒砂岩と珪藻質泥岩の数十 cm 程度の互層、明灰色を呈する細粒～中粒の塊状砂岩となっており、ルートによっては一部層準の欠如が認められ、また、勇知層と声間層上部相の境界、声間層上部相と主部相の境界の基準が異なっている。
- ・ 研究所設置地区およびその周辺地区に分布する珪藻質泥岩は、一般的には塊状であるが、層厚数 cm～数十 cm の砂岩層、径 2cm 以下のチャート礫や直径 5mm 以下の軽石片が多く含まれる層準、生痕化石を多産する層準、石英や長石類などの

鉱物片を多数含有する層準、Opal CT 化の影響を若干受けていると推定される硬質な層準が含まれることが確認された。また、スミアスライド(岩石を粉末にし、スライドガラスに載せ、封入材で固めたもの)による観察では、珪藻質泥岩中に含まれる珪藻化石の種類(円心目を中心とするノ羽状目がかなり混入する)や保存状態(成体/破片)に相違があることが確認された。

- ・ 南沢の従来から声間層上部相に分類されている地域には、勇知層の砂岩層や声間層の珪藻質泥岩中に挟在される砂岩層と酷似する青灰色～明灰色を呈する層厚約 20m 以上の細～中粒塊状砂岩が分布する(図 3.6-10)。この砂岩層は文献(柳田, 1998)よりも東西方向に広く分布しており、北方にも連続が確認された。この砂岩層に挟在される砂岩の走向傾斜は従来の向斜(柳田, 1998)と非調和であり、スミアスライドにおいても本砂岩層を挟んで珪藻質泥岩の色調や珪藻化石の群集が異なる可能性が示唆される。これらのことから、本地域周辺の既存石油・天然ガス調査井で確認されている層厚約 25m の声間層(珪藻質泥岩と硬質頁岩の境界部)の砂岩層(長尾, 1960)との関連性の確認が必要である。

露頭番号 No. 03

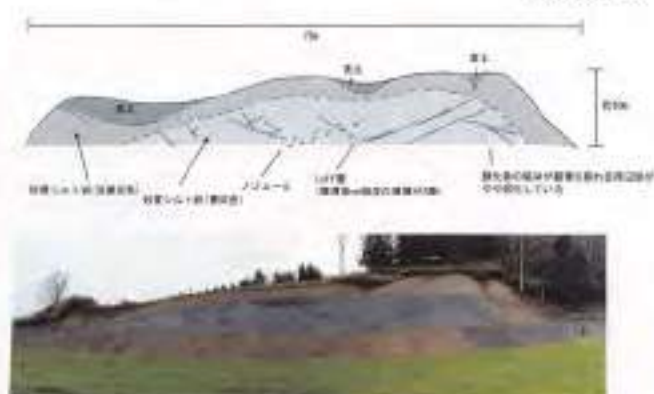


図 3.6-10 南沢に分布する塊状砂岩層

- ・ 研究所設置地区およびその周辺地区においては、稚内層の硬質頁岩と声間層の珪藻質泥岩とは漸移的に変化しており、下位から従来の続成作用による分類では稚内層とされる厚さ数 m 程度の暗灰色硬質頁岩と明灰色硬質頁岩との互層、軟体動物化石やノジュールを多産する硬質頁岩、チャートと硬質頁岩の数十 cm 程度の互層、珪藻化石片を含有する硬質頁岩、声間層主部相に分類される硬質な珪藻質泥岩と続く。しかし、同時異相による堆積面と岩相の斜交のため、稚内

層に分類される珪藻質泥岩が存在する可能性もあり、今後も微化石層序などを用いて年代を明らかにする必要がある。

iii) 大曲断層周辺の地質・岩相の確認

- ・ルート 1 では、従来の続成作用による分類では戸間層に分類される珪藻質泥岩から稚内層に分類される硬質頁岩へ西から東へ向かい漸移的に変化しており、珪藻質泥岩と硬質頁岩の境界付近に稚内層最上部付近に発達するチャートと硬質頁岩の互層が確認されるため、珪藻質泥岩と硬質頁岩の境界は断層関係ではないと推定される。
- ・ルート 2 では、戸間層の珪藻質泥岩と稚内層の硬質頁岩の境界付近において、戸間層下部の硬質化した珪藻質泥岩や稚内層最上部のチャートと硬質頁岩の互層が確認できなかった。この位置においては、断層の影響により上述の互層が欠如している可能性が考えられる。また、1~2 秒間に 1 滴程度の油徴も確認された。
- ・ルート 3 では、珪藻質泥岩の分布は確認できなかったが、文献（柳田、1996）では戸間層が分布する地域にも、明知層に分類されると推定される砂岩泥岩互層を遡頭調査において確認した。そのため、珪藻質泥岩の層厚は約 30m 以下と極めて薄いと推定される。また、大曲断層が推定されている地形の急変部では、硬質頁岩ブロックを珪藻質泥岩マトリックスが取りこむ岩相が発達する。
- ・ルート 4 では、ルート 3 同様に大曲断層が推定されている地形の急変部では、硬質頁岩ブロックを珪藻質泥岩マトリックスが取りこむ岩相が発達する。

③ まとめ

これまでの調査により、研究所設置地区およびその周辺地区に分布する珪藻質岩については、岩相や生物相、含まれる珪藻化石の種類や保存状態に不均質性が存在し、砂岩層が挟在されることが確認された。今後、これらの不均質性や砂岩層の連続性を確認するとともに、各層準の年代を測定することにより、研究所設置地区およびその周辺地区に分布する珪藻質泥岩および硬質頁岩の地質層序を珪藻および藻類化石を用いて明らかにしていく予定である。また、各岩相の年代、整合／不整合関係、岩相の側方変化などの調査を実施

することにより、幌延町および北海道の地質構造史・発達史を明らかにすることが可能である。そのためには宗谷夾炭層を含めた上位の新しい地層で検討が必要であり、今後は幌延町における広域的な地質調査が必要と考えられる。

参考文献

- 長尾格一 (1960) 北海道地下資源調査資料第 49 号天塩郡大曲油田調査報告、北海道開発庁。
- 根本隆文、佐川 昭、栢田芳郎、小田祐徳、松井 寛、二梨 祐 (1979) 天北炭田地質図説明書、日本炭田図 13、地質調査所
- 柳田 誠 (1996) 北海道北部地域の地質に関する研究報告書、サイクル機構技術資料（契約業務報告書：株式会社アイ・コス・エー）、JNC TJ1400 99-001。

1-3) 表層水理調査

① 課題と計画の概要

地下深部での地下水流動を予測するためには、その上部境界条件となる地表から岩盤への浸透量（地下水涵養量）を把握する必要がある。

このため、気象観測・河川流量および水質の観測・土壌水分観測・浅層地下水位観測等の表層水理調査を実施することにより、表層部における地下水流動系の把握と、その結果に基づく地下水涵養量の推定を行う計画である。平成14年度は、これまでの検討結果に基づき、降水が河川から流出する量を把握するための流量計を設置し、観測を開始した。

また、平成13年度の積雪期から融雪期にかけて実施した冬期現地調査の結果、融雪期における河川流量の増加とともに電気伝導度が大きな値を示した（中林ほか、2002）。その原因としては、積雪溶解やそれに伴う増水による河川周辺土壌の混入もしくは海岸側から吹く季節風により運搬された海塩粒子の影響等が推定された。その原因を明らかにするため、流量計に電気伝導度計を併設し、河川水質の経時的な変化を把握することとした。さらに、河川水の定期的な水質の分析を行うとともに、周辺土壌の混入や海塩粒子の影響を把握するため、定期的な降水のサンプリングを開始した。

② これまでの成果

i) 地下水涵養量推定の考え方

地下水涵養量の推定方法については、水収支法による計算を基本として検討を行っている。水収支法は、流域内での降水量から蒸発散量および河川への流出分を除いたものを地下水涵養量として計算する方法で、一般に以下の式で示される。

$$R(\text{地下水涵養量}) = P - E - Q - \Delta S$$

ここに、P: 降水量、E: 蒸発散量、

Q: 河川流出量、 ΔS : 貯留量変化

なお、 ΔS を直接計測することは困難であることから、計算にあたっては一般的に地下水位が一定（定常状態）であると仮定して、一水文単位（年間）の観測データを用いることで、貯留量変化の影響を無視できる（地盤調査ハンドブック編集委員会、1995）。

水収支法において的確に地下水涵養量を推定するためには、降水量・蒸発散量・河川流出量の測定精度を高める必要がある。



図 3.6-11 河川流量計設置箇所および流域図

ii) 調査対象流域と河川流量計設置箇所の選定

河川流出量観測のための流量計設置箇所選定にあたり、梶延町内を流れるすべての河川の流域特性（地形・地質・植生等）および積雪期の観測を前提とした交通アクセスの条件を比較した。その結果、梶延深地層研究計画における対象地質である新第三紀堆積岩が一様に分布し、河道に沿った一般道がある調査対象候補流域を抽出した（中林ほか、2002）。

そして、平成14年7月の研究所設置地区（北進地区）の決定を踏まえ、当該地区およびその周辺を流域とする下エベコロベツ川水系の二号川（P-1）、ベンケエベコロベツ川（P-2）、清水川（P-3）の3つの流域を対象流域として選定した（図3.6-11）。各流域の地質は、大半が声間層から成り、P-3下流域の一部に勇知層が分布する。流域の植生は類似しており、P-2流域では広葉樹林が60%、畑・牧草地18%、人工林（針葉樹林）12%、針広混交林7%、その他3%となっている（中林ほか、2002）。地形については、起伏量・水系密度ともに各流域で顕著な差は見られない。

抽出した3流域において、流量観測地点選定の条件（河床が安定し水面勾配が小さい、流速が安定している、積雪期のアクセスが容易である）を満たす3箇所に河川流量計を設置した。

iii) 河川流量および水質の観測方法

河川流量の観測は、各地点とも河道が広く降雨時の流量が大きくなること、魚類の遡上を妨げないために、パーシャルフリュームなどを設置する堰測法でなく、既存流路に水圧式の自記水位計を設置する方法とした。河川流量については、別途測定する水位および流量のデータの蓄積から水位

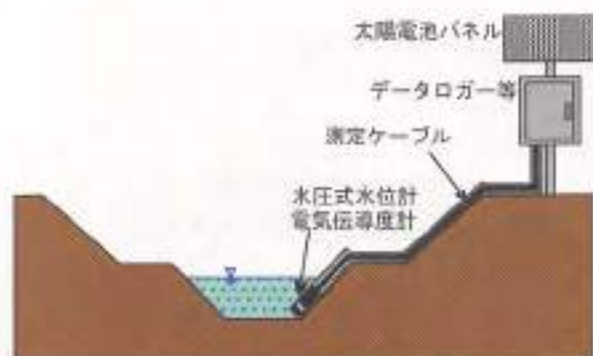


図3.6-12 河川流量計概念図

流量(H-Q)曲線を算定しておき、水位観測値から連続的な流量の変化を記録した。流量の測定は、可換式の回転式流速計により流水断面中の流速分布を、各河川幅の約10%の間隔で測定し、水深測定結果とあわせて区分断面毎に平均流速・流量を算出して河川全断面での流量を算定する方法(例えば、竹内, 2002)を採用した。

今回設置した河川流量計の概念図を図3.6-12に示す。システムは太陽電池パネルを併用した内部バッテリーとデータロガーを内蔵し、観測データは10分間隔の自動サンプリングとした。

また、河川流量計の観測システムは電気伝導度計を併設し、河川水質の経時的な変化の測定も実施した。

さらに、河川水質を分析するため、河川流量計

設置箇所付近で河川水の定期的なサンプリングを実施するとともに、研究所設置地区周辺において降水(雪)のサンプリングを開始した(図3.6-11)。河川水は12月および2月、降雪は2月にそれぞれサンプリングを実施した。

iv) 河川流量および水質の観測結果

平成14年10月30日から12月19日の間の断面流量計測結果に基づくH-Q式の回帰曲線の例(P-2地点)を図3.6-13に示す。なおP-2地点では、河川断面形状の変曲点となる標高(7.5m)を考慮し、その上下でそれぞれ2次曲線により近似した。

平成14年10月30日から平成15年1月17日の

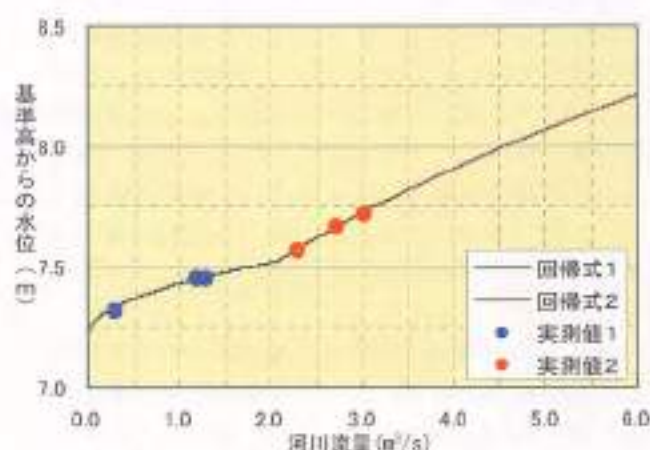


図3.6-13 推定H-Q曲線(P-2地点)

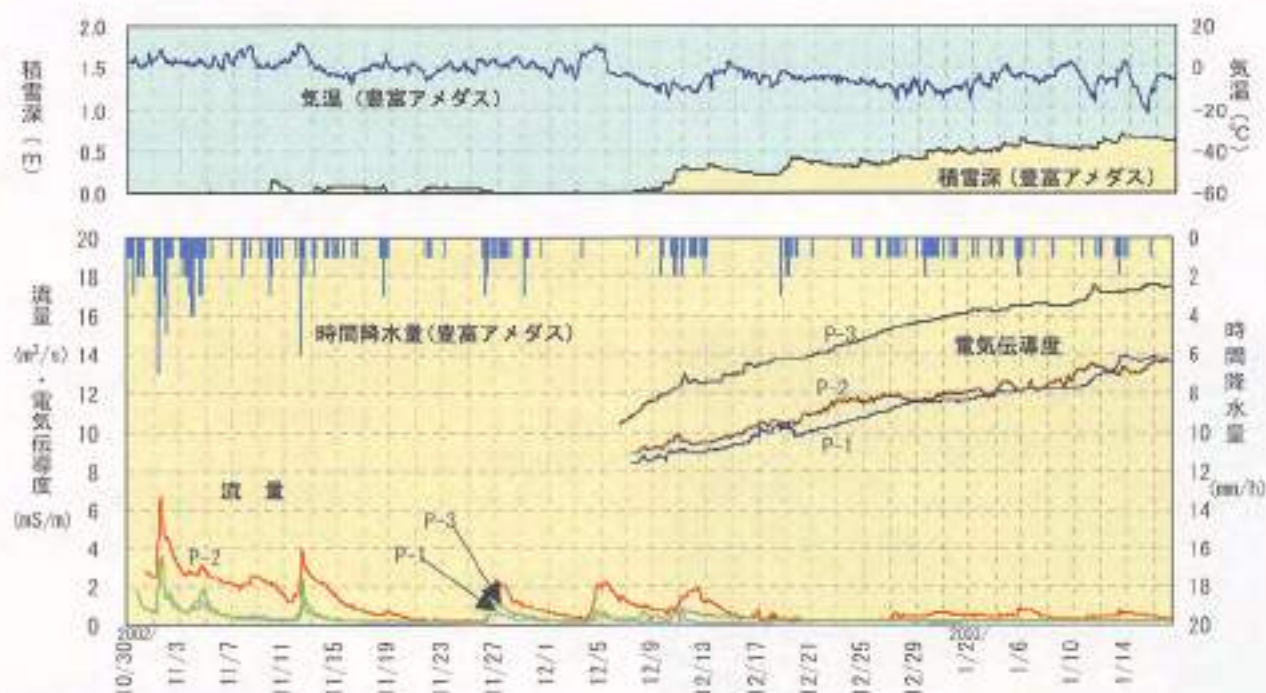


図3.6-14 河川流量・電気伝導度・気象観測値の経時変化図

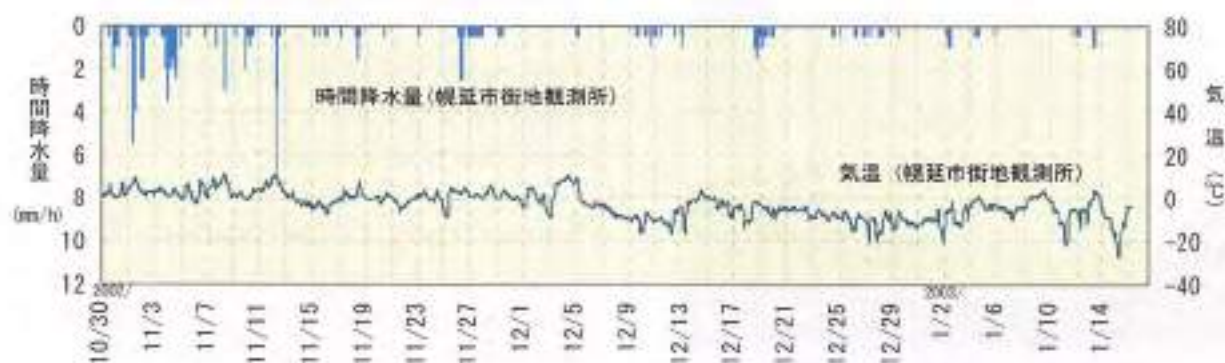


図 3.6-15 幌延市街地観測所における気象観測値の経時変化図

期間での、H-Q 回帰曲線により推定される河川流量と電気伝導度（12月7日以降）の経時変化および期間中の気象庁豊富アメダスによる気象観測値の経時変化を図 3.6-14 に示す。この結果から、各地点での河川流量は、降水および融雪による流出状況をよく反映していると考えられる。また、降雨後、河川流量が最大に達するまでの時間は観測点により若干異なっており、これは各流域の地形・地質・植生などの流域特性の違いによるものと考えられる。

図 3.6-15 に幌延市街地気象観測所における観測値の経時変化を示す。また、各観測所の位置を図 3.6-16 に示す。気温については、絶対値に若干の差は見られるものの大局的には同様の傾向を示している。しかし、時間降水量では、ピーク時において 2 倍程度の差が見られるものもある。このことから、降水量については、観測位置の地形などの条件により測定値にばらつきが生じることがわかった。

電気伝導度については、積雪開始後、各地点とも一様に値が上昇する傾向を示している（図 3.6-14）。これは、降水が積雪として地表面に固定

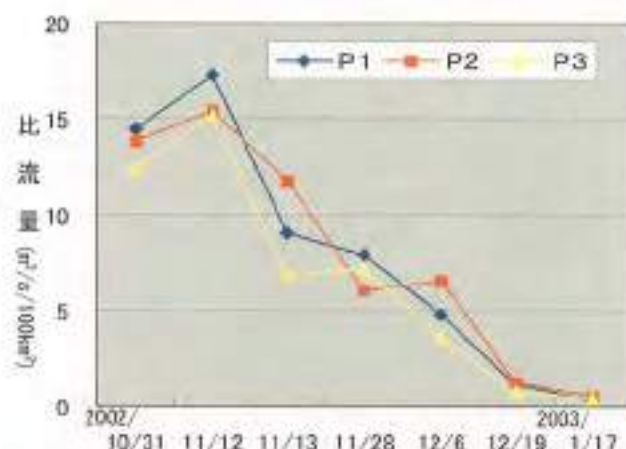


図 3.6-17 河川流量実測結果（比流量）

され、河川に流入する天水の量が減少したために河川水における地下水（降水よりも電気伝導度が高いと仮定）の占める割合が大きくなったためと考えられる。絶対値に着目すると、P-3 地点での電気伝導度は、他の 2 地点と比べ測定期間を通して高い値を示している。この原因については、流域の地質や土地利用の影響などが考えられるが、詳細は現在検討中である。

また、流速分布の測定により算定した実測流量を流域面積で標準化した比流量の変化を図 3.6-17 に示す。3つの流域での比流量はほぼ同様の傾向を示すことから、各流域での降水・融雪による流出特性は類似していると考えられる。

冬期間における河川水および降水の水質については、現在、物理化学パラメータおよび一般水質の分析を行っている。

③ まとめ

平成 14 年度は、地下水涵養量を推定する基礎データとなる河川への流出量を観測するための河川



図 3.6-16 幌延町周辺の気象観測所位置

流量計を設置し、観測を開始した。併せて、電気伝導度計による河川水質の変動の計測ならびに河川水・降水の定期的なサンプリングとその水質分析を開始した。

平成 15 年度以降は、各河川での実測による流量観測を継続し、水位流放曲線を適宜修正しながら河川流量観測の精度を向上させるとともに、河川水・降水の水質分析を行い、年間を通じた河川流量・水質の変動に関する検討を行う。

また、平成 14 年度までの分析では、気象観測データとして気象庁の豊筑アメダスや観延町内に設置した気象観測所のデータを用いてきたが、研究所設置地区の決定に伴い、北進地区に新たに定点観測所（図 3.6-16）を設置し、観測を開始する計画である。

さらに、研究所設置地区およびその周辺地域での降水量のばらつきを評価するため、地形条件の異なる位置に雨量計を増設するとともに、蒸発散量への植生の影響を評価するため、異なる植生上での蒸発散量の計測を追加して実施する予定である。また、積雪寒冷地における水収支を的確に推定するため、雪面蒸発量および融雪による流出量（積雪質量の変化）の連続的な観測を行う計画である。

参考文献

- 地質調査ハンドブック編集委員会(1995)：最新 地質調査ハンドブック，株式会社建設産業調査会，p.1016。
中林宏典、松岡汎基、松尾 尚、中野洋一(2002)：観延深地層研究計画における表層水理観地調査，サイクル機構技術資料（契約業務報告書：財団法人日本気象協会），JNC T11410 2001-005。
竹内尚 監修(2002)：地質環境調査計測事典 第 2 巻 図録編，フジ・テクノシステム，pp.57-69

1-4) 試錐調査

① 課題と計画の概要

平成14年度の試錐調査では、平成13年度に実施した空中物理探査、地上物理探査、地質調査、試錐調査などの結果を基に、大曲断層（推定）が存在する可能性を念頭に置き、研究所設置地区の地質環境の大略を把握することを主目的とし、大曲断層をはきんで両側に試錐孔を配置することとした。実際の試錐孔掘削位置は、調査実施の容易性（用地確保、アクセス、許認可）を考慮して決定した（図3.6-18）。

平成13年度実施した試錐調査（HDB-1,2孔）は、研究所設置地区の選定に資するデータの取得、試錐調査に係る既存の要素技術について、今後の調査への適用性を検討することが主目的であった。

平成14年度の試錐調査は、研究所設置地区選定後の最初の試錐調査であることから、今後の試錐調査をはじめとする各種調査の基礎となる場の概念の構築や更新も目的の一つとしている。また、

地質環境モデルの構築のためのデータ取得と並行して調査技術の改良も行った。具体的な実施内容は以下のとおりである。

- ・試錐孔掘削 520m×3孔
- ・岩芯採取（一部定方位採取）および観察（岩相、堆積構造）
- ・物理検層、水理試験、地下水採水（水理試験と組み合わせて実施）、水圧破砕試験
- ・試錐掘削中のガス成分等連続モニタリング
- ・地下水分析（主要成分、同位体など）
- ・岩芯室内試験（基本物性、力学特性（一軸・三軸圧縮試験）、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、微小空隙構造同定、鉱物試験、微化石分析、同位体比測定）
- ・定方位岩芯採取

以下の「これまでの成果」で述べる各調査については、データ取得を中心に実施している段階であることから、結果の解釈に加えて、調査方法およびその結果について記述した。

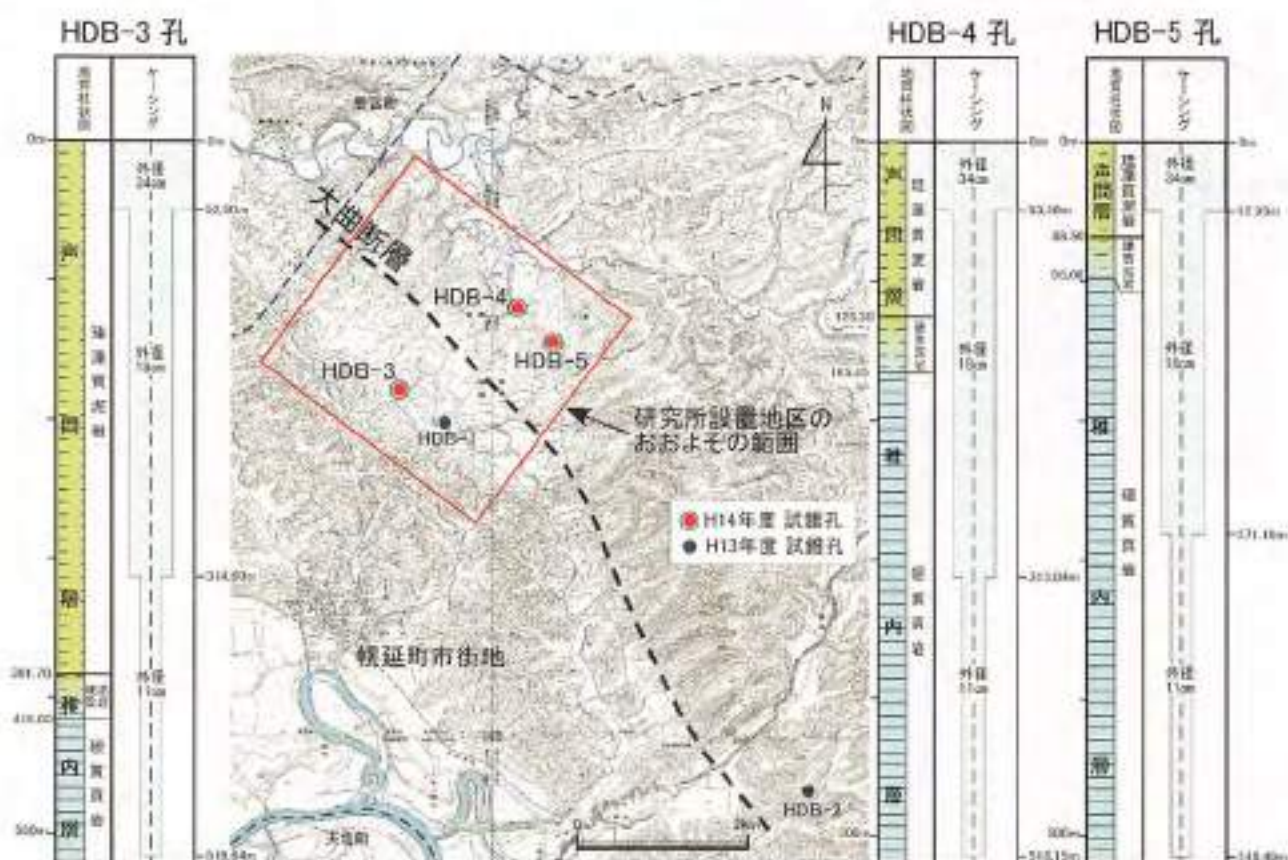


図 3.6-18 地質層序とケーシングプログラム

② これまでの成果

1) 地質

試錐掘削で得た岩芯の観察結果について、各試錐孔の特徴を以下に記述する。

(a) HDB-3 孔 (図 3.6-19)

深度 4.00m から深度 381.70m まで帯緑灰色～帯緑暗灰色を呈する声間層とされる珪藻質泥岩が分布する。色差計による計測では、深度 360m 付近から次第に色調が暗灰色へと変化するが、スミアスライド(岩石を粉末にし、スライドガラスに載せ、封入剤で固めたもの)による観察では深度 380m まで珪藻化石等が良好に保存されており、コア観察時に硬質化が確認された深度 381.70m 以深で珪藻化石などの殻の Opal CT 化を生じ始める。深度 381.70m 以深、深度 415.00m まで次第に硬質化し、稚内層とされる下位の硬質頁岩へと漸移的に変化する。

深度 17.70m までは風化の影響を被っており、割れ目に沿って酸化鉄鉱染が認められる。

深度 158.33～158.77m には層厚約 10cm、傾斜約 40～60° の細粒砂岩層を挟在し、深度 200m 以深には層厚数 cm～数 m の明灰色を呈する泥岩を挟在する。明灰色部については、一部では凝灰岩を挟在するものの、スミアスライドによる観察では周囲の珪藻質泥岩と比べ、鉱物片や有機物などの含有量が極めて少なく、大部分が珪藻化石や海綿骨針などの珪質生物遺骸から構成される。

深度 415.00m 以深の硬質頁岩では、声間層とされる珪藻質泥岩に比べ、集理が認められる。しかし、本孔の珪藻質泥岩および硬質頁岩の中では、石英、長石類等の鉱物片の含有量にほとんど変化が認められない。全体的には直径 1～3cm のリング状に白色変色した管状の生痕化石および変色を伴わないウニの遺跡や *Zoophycas* isp., *Chondrites* isp. などの半深海性(水深 200～2,000m)の生痕化石が発達することなど、Opal CT 化以外は共通する特徴を有する。

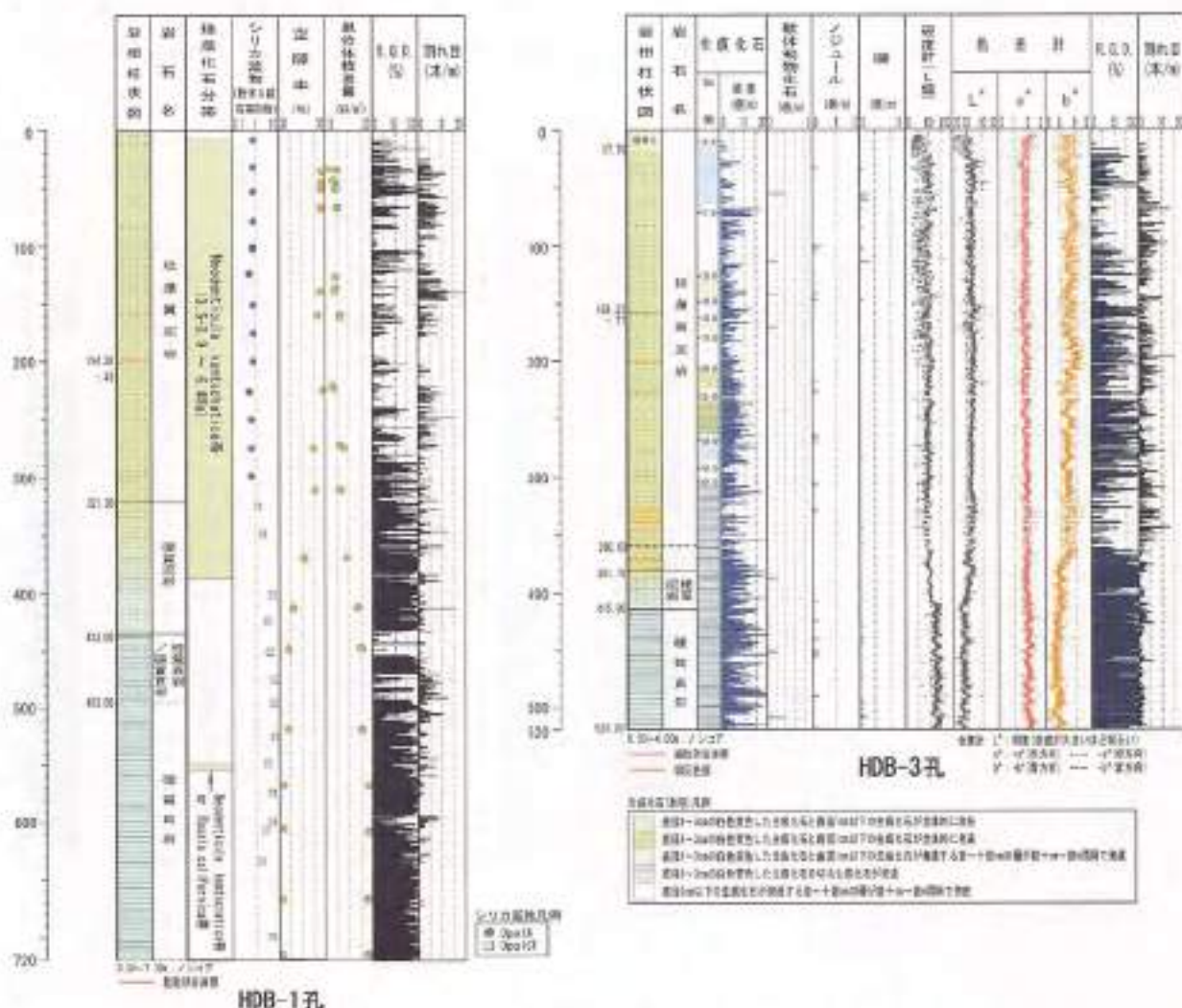


図 3.6-19 HDB-1 孔および HDB-3 孔の地質柱状図

(b) HDB-4 孔(図 3.6-20)

深度 4.10m から深度 128.30m まで、帯緑灰色～帯緑暗灰色を呈する声間層とされる珪藻質泥岩が分布する。深度 128.30m～深度 165.45m 区間では、珪藻質泥岩と硬質泥岩の厚さ数十 cm～数 m の不明瞭な互層状を呈し、稚内層とされる下位の硬質頁岩へと漸移的に変化する。色差計による計測においても、この区間で色調の暗灰色化が認められるが、スミアスライドによる観察では深度 125m 付近から珪藻化石などの殻の 0ppm CT 化を生じ始め、深度 135m 付近で珪質生物遺骸がほぼ消滅する。

深度 11.40m まで風化が著しく、土砂状の岩芯で酸化鉄鉱染および硫黄の晶出が認められる。深度 4.10m から深度 345.00m までは HDB-3 孔と同様な直径 1～3cm の生痕化石が発達し、珪藻質泥岩および硬質頁岩は全体的に類似する特徴を有する。

それに対し、深度 345.00m 以深に分布する硬質頁岩では、全体的に生痕化石が少なく(棄理にはほぼ水平な直径 1cm 未満の生痕化石が部分的に存在)、二枚貝などの軟体動物化石やノジュール、安山岩、泥岩などの異質円礫が多く含まれる。また石英、長石類などの鉱物片や化石片、有孔虫などを多数

含有する数 mm～数 cm の粗粒層が数十 cm～数 m 間隔で発達する。

(c) HDB-5 孔(図 3.6-20)

深度 4.00m から深度 68.50m まで帯緑灰色～帯緑暗灰色を呈する声間層とされる珪藻質泥岩が分布する。深度 68.50m～深度 98.00m 区間は珪藻質泥岩と硬質泥岩の厚さ数十 cm～数 m の不明瞭な互層状を呈し、色調が次第に暗灰色へと変化する。稚内層とされる下位の硬質頁岩との境界は漸移的ではあるが、他の試錐孔より比較的明瞭である。スミアスライドによる観察においても、深度 98m 付近で珪質生物遺骸がほぼ消滅する。

深度 25.61m まで風化の影響を被っており、酸化鉄鉱染及び硫黄の晶出が認められる。深度 4.00m から深度 173.75m までは、珪藻質泥岩および硬質頁岩は全体的に、HDB-3 孔および HDB-4 孔の深度 345.00m 以浅と同様な生痕化石が発達する。深度 173.75m 以深に分布する硬質頁岩では、HDB-4 孔の深度 345.00m 以深に分布する硬質頁岩同様に、生痕化石に乏しく、薄い粗粒層を挟在する。また、軟体動物化石やノジュール、異質礫を多数含む。

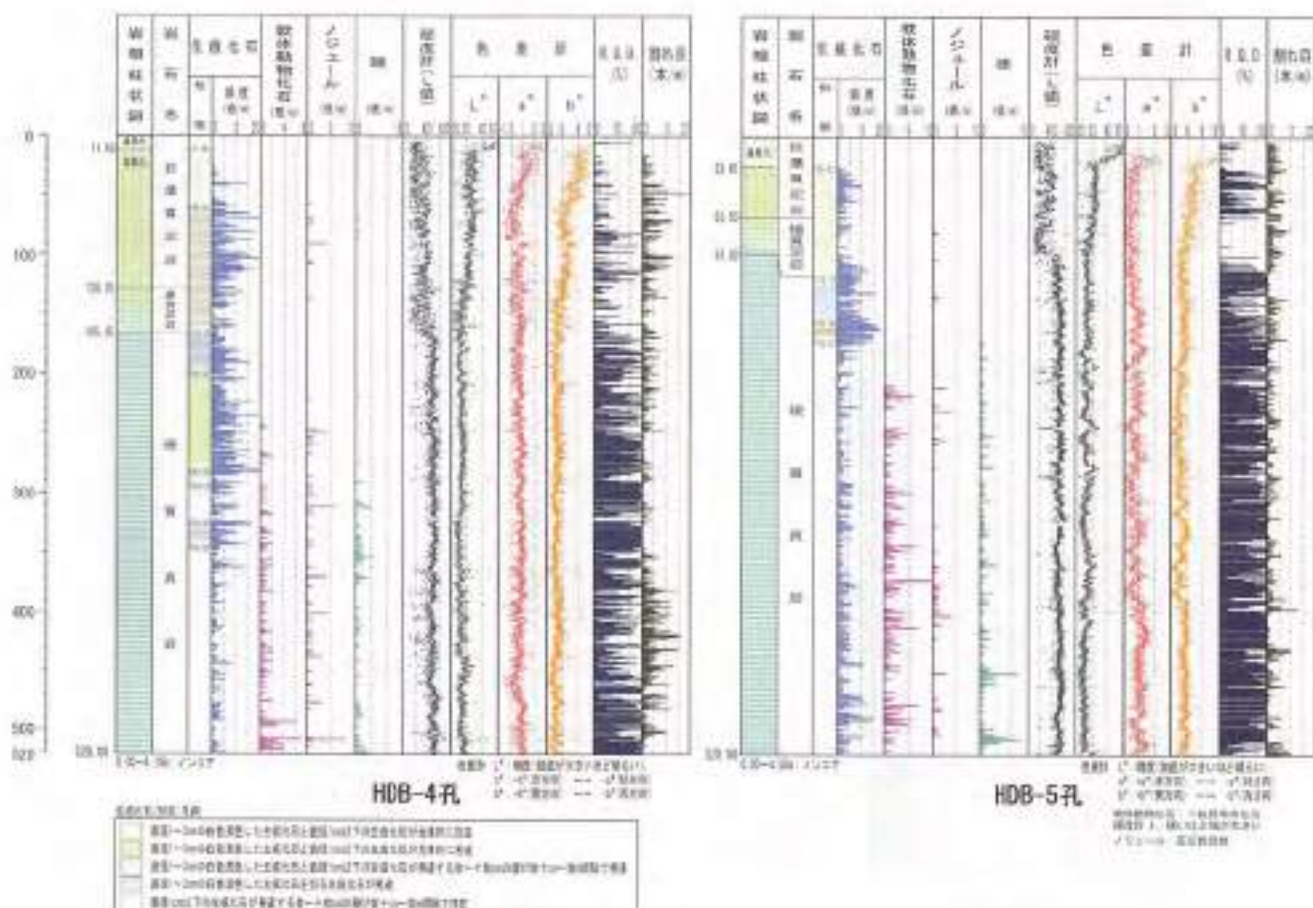


図 3.6-20 HDB-4 孔および HDB-5 孔の地質柱状図

ii) 物理検層

物理検層の目的は、岩石の物理特性などに関する連続的なデータを取得すること、地下水液出入箇所の有無を把握すること、孔内試験実施深度の選定のための基礎情報を取得することである。

物理検層種目は、孔径、電気(比抵抗、自然電位)、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(比抵抗型)、音波およびPS検層である。掘削やケーシングプログラムに基づき、PS検層を除く物理検層種目について、HDB-3孔では深度50～312mと312～520m、HDB-4孔では深度50～313mと318～520m、HDB-5孔では深度50～273mと273～520mの2回に分けて実施した。PS検層については3孔とも最終段階のフルホールセメンティングが終了後に実施した。電磁フローメーター検層については、検層機内の目詰まりを防止するため、他の物理検層種目の終了後に孔内の泥水を清水に置換した後に検層を実施した。

(a) 物理検層結果

・HDB-3孔(図3.6-21)

本孔では深度157.00mまで清水掘削、それ以後で泥水掘削を行っている。泥水掘削により清水掘削で見られていた孔径拡大の傾向は小さくなった。深度312～360mにおいて孔壁のある方向だけが崩壊している現象が見られており、この部分ではコアロスが生じている。比抵抗検層では、全深度で数 $\Omega \cdot m$ 以下と低比抵抗である。温度検層では、孔底で約24℃を示す。密度検層では、深度50mで1.5g/cm³、深度360mで1.7g/cm³と深度が増すごとに緩やかな上昇を示し、深度360～430mではその傾向が大きくなり(1.7～1.8g/cm³)、それ以後では約1.8g/cm³でほぼ一定であった。P波の音波検層においても密度検層と同様の傾向がみられ、深度50mで1.7km/sec、深度360mで1.8km/secと深度が増すごとに緩やかな上昇を示し、深度360～430mではその傾向が大きくなり(1.8～2.3km/sec)、それ以後では約2.3km/secとほぼ一定であった。

電磁フローメーター検層では、深度190mと460m付近で孔内水比抵抗と孔内水温度に異常値を示したが、孔内流速変化には大きな異常が認められなかったことから、大きな地層水の流入出はないものと推定される。

・HDB-4孔(図3.6-22)

本孔では深度160.20m以後で泥水掘削を行っている。それ以後で見られていた孔径拡大の傾向は

HDB-3孔と同様に小さくなり、それ以後では著しい孔径拡大は認められていない。比抵抗検層では、HDB-3孔よりも若干高いが全深度で20 $\Omega \cdot m$ 以下と低比抵抗である。温度検層では、深度190～290mの区間で地層水の流入の影響を示す温度上昇が見られ、孔底温度は約28℃を示す。密度検層では、深度50mで1.5g/cm³、深度200mで1.5g/cm³と深度が増すごとに緩やかな上昇を示し、深度200～390mではその傾向が小さく(1.8～2.0g/cm³)、それ以後では約2.0g/cm³でほぼ一定となる。P波の音波検層においては、深度50mで1.7km/sec、深度130mで1.8km/secと深度が増すごとに非常に緩やかな上昇を示し、深度130～150mではその傾向が大きくなり(1.8～2.0km/sec)、深度150～390mでは2.0～2.3km/secと増加し、深度390～450mでは速度が2.3～2.2km/secと減少する。それ以後では上昇傾向が認められ孔底では2.3km/secを示す。電磁フローメーター検層では、深度290m、380mおよび470m付近で孔内水比抵抗と孔内水温度が異常値を示し、孔内流速にも異常が認められることから、地層水の流入出があるものと推定される。

・HDB-5孔(図3.6-23)

本孔では深度54.0m以後で泥水掘削を行っている。これは物理検層を実施したほぼ全深度区間にあたる。深度90～100mの逸水した区間で孔径拡大が見られるほかは、著しい孔径拡大は認められない。比抵抗検層では、HDB-4孔と同様の傾向を示し全深度で20 $\Omega \cdot m$ 以下と低比抵抗である。温度検層では、孔底で約28℃を示す。密度検層では、深度50mで1.7g/cm³、深度140mで1.8g/cm³と深度が増すごとに増加傾向を示し、深度140m～孔底ではその傾向が小さかった(1.8～2.0g/cm³)。P波の音波検層においても、密度検層とほぼ同じ傾向がみられ、深度50mで1.7km/sec、深度140mで2.2km/secと深度が増すごとに上昇を示し、深度140m～500mではその傾向が小さくなった(2.2～2.3km/sec)。深度100m付近では孔壁崩壊の危険性があり、電磁フローメーター検層前の清水置換作業ができなかったため、スピナー検層機も用いて検層を実施した。泥水中での電磁フローメーター検層機による孔内比抵抗と孔内温度測定を実施した結果、深度170m付近で孔内水比抵抗と孔内水温度に異常値を示したが、孔内流速変化は小さく、地層水の流入出は非常に小さいものと推定される。また、深度475m付近でも孔内水温度に異常値を示したが、孔内流速変化は小さく、地層水の流入出は非常に小さいものと推定される。

(b) 物理検層の有効性

・室内試験結果との比較

物理検層種目のうち、密度、中性子、音波検層については、岩芯を用いた室内試験結果と比較できるデータを取得している。平成 13 年度に掘削した試験孔 (HDB-1, 2 孔) では、室内試験結果と物理検層結果について、一部で整合しない結果が得られていたが、平成 14 年度に掘削した試験孔では、ほぼ整合した結果が得られている。この理由としては、以下のことが考えられる。

- 平成 13 年度の調査では、孔径拡大が著しかったために、個々の物理検層データに対して、適切な孔径補正処理を施せなかった。部分的に厚い泥皮ができたことも原因の一つと考えられる。

- 平成 14 年度は孔内の状態が良好であり、スライムの除去も容易であった。

このことより、孔内状況が良好であれば物理検層から推定される物性値は、室内試験結果を補完できるデータになり得ると考えられる。

・電磁フローメーター検層結果について

電磁フローメーター検層は、地層中での透水性割れ目(帯)の検出に有効な方法であり、この結果を基に水理試験区間を選定している。電磁フローメーター検層以外にも、孔内水比抵抗、孔内水温度およびフローメーターカウンターの異常の有無を考慮している。しかし、これらの検層実施前の清水置換の際に、泥剤が残留する場合には、水みちの有無の判断が困難となる。例えば、HDB-1 孔で掘削時の逸水区間では、水理試験により高透水性(深度 218.45~236.53m, 透水係数: 10^{-3} m/sec オーダー)であることが確認されたものの、流体検層では異常が認められなかった。このように、電磁フローメーター検層の結果と水理試験結果との整合性は必ずしも良いものではなかった。今後は、清水置換の方法や清水置換後の孔内水比抵抗の確認など測定方法を改善することにより、水みちとなる割れ目の有無を調査する手法を検討していく。

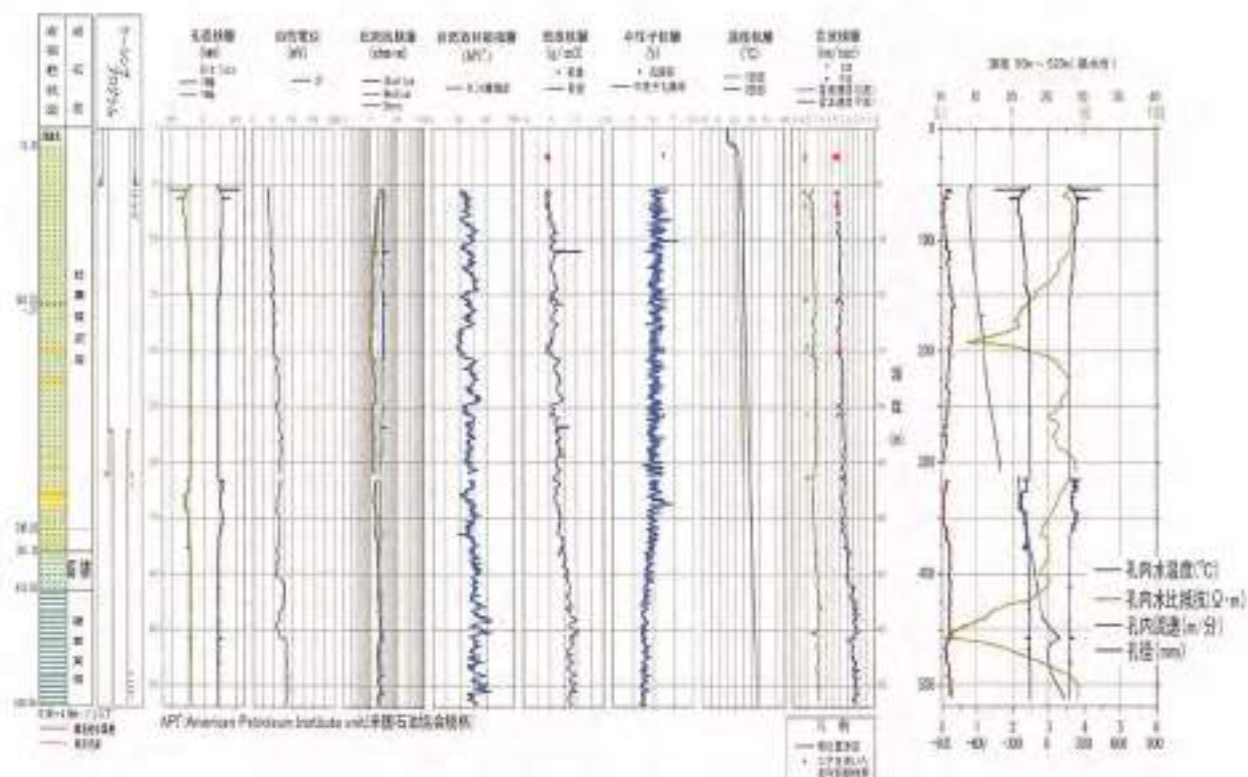


図 3.6-21 HDB-3 孔 物理検層柱状図

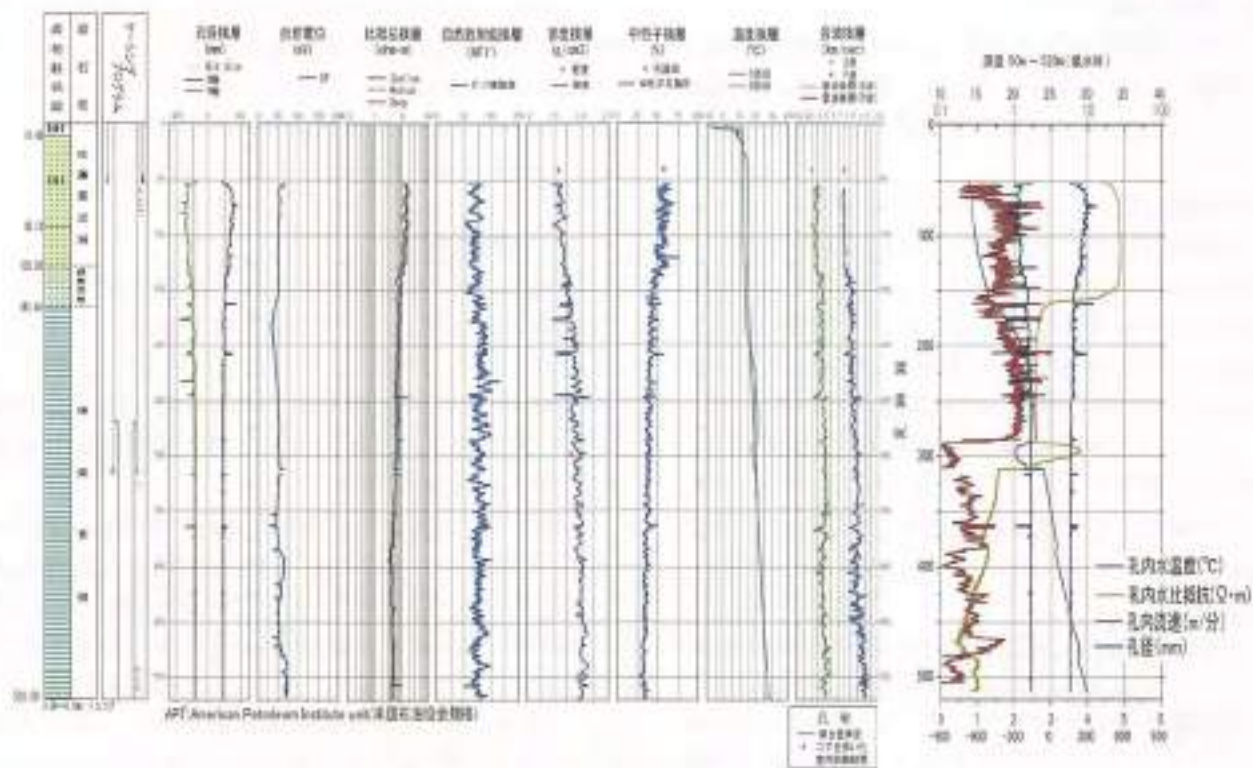


图 3.6-22 HDB-4 孔 物理檢層柱状图

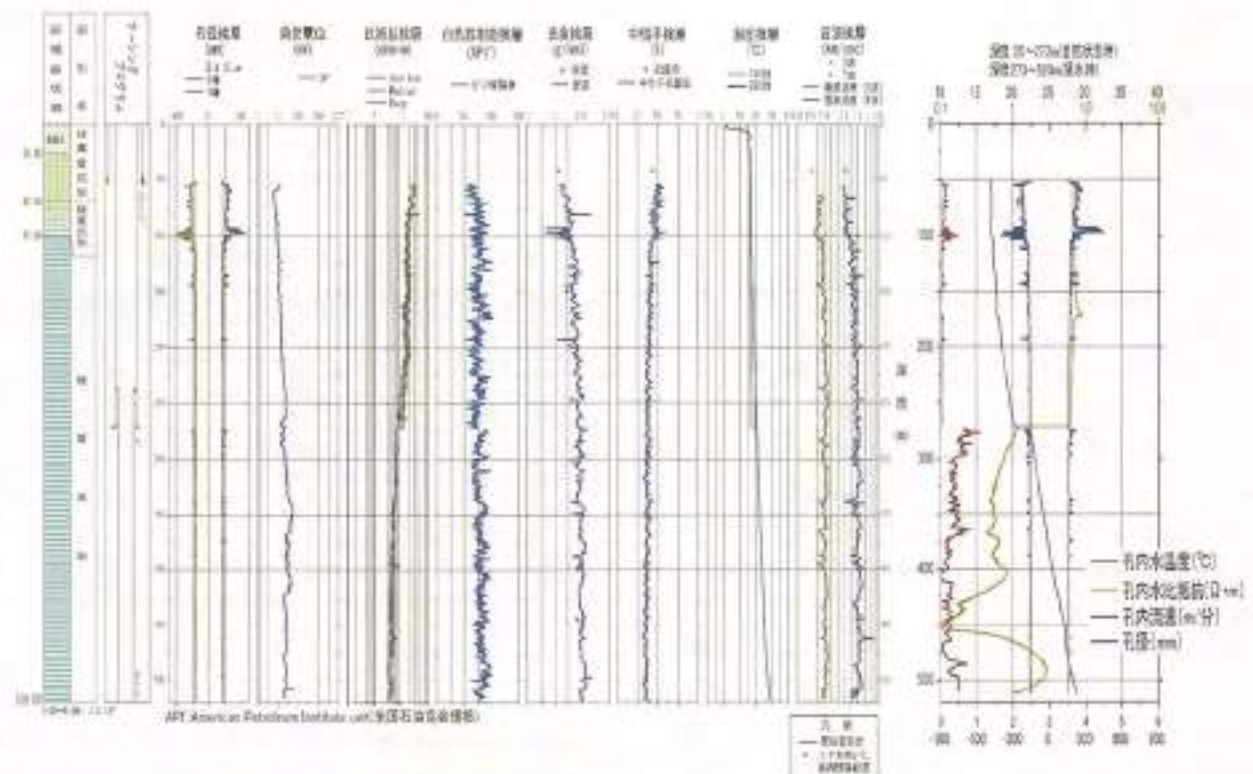


图 3.6-23 HDB-5 孔 物理檢層柱状图

iii) 水理試験

平成 13 年度および平成 14 年度の水理試験は、断層帯および堆積層の透水性、間隙水圧の把握および、地下水・ガスの採取を目的として実施した。

(a) 試験方法

各試験孔において、ベントナイト配水を用いて掘削された区間については、ベントナイト配材の透水性への影響を低減するためおよび装置配管の目詰まりによる不具合の可能性を低減するために、湧水による孔内洗浄の後に試験を実施した。

平成 13 年度は、貯存ガスが存在する条件下での揚水が困難であったため、HDB-1 孔ではパルス法、スラグ法による水理試験を実施した。また、地下水およびガスの採取は、エアリフト方式の揚水により行った。

平成 14 年度は、HDB 1, 2 孔の調査での課題を踏まえて、定流量揚水試験を行う機能の付加などの水理試験装置の改良を行った。試験区間の透水性に応じて、パルス法、スラグ法、定流量揚水試験を組み合わせて実施した。また、定流量揚水試験時には地下水およびガスの採取を実施した。改良した試験装置および試験条件設定の考え方については、「3.6.2.3) 調査技術・調査機器開発」に従述する。

(b) 試験区間の選定

HDB-1, 2 孔の掘削中には、大きな逸水や湧水が確認されておらず、フローメータ検層結果からも明瞭な地下水の流入出点が認められなかったことから、顕著な水みちは存在しないと考えられた。平成 14 年度試験調査では、低透水性岩盤の存在を念頭に置き、コア観察、物理検層結果を基に地質的に代表性を有すると考えられる区間を選定した。一方、地下水採水のためにフローメータ検層および温度検層結果に小さな変化が認められる地点を選定した。さらに、キャリバー検層の結果からバツカーの設置が可能と考えられる区間を選定した。以上の選定結果を総合的に考慮して、水理試験区間を選定した。

HDB-3, 5 孔については、フローメータ検層でのフローメータカウントで明確な異常値が確認されなかったことから顕著な水みちはないと判断し、温度検層およびフローメータ検層時の温度・孔内水比抵抗から変化が認められる地点を選定した。

HDB-4 孔では、掘削中（深度 218.45～236.53m）

に大量の逸水が確認されたことから、顕著な水みちとして選定した区間である。また、その他の区間については、フローメータ検層時のフローメータカウントに明確な異常値が確認できなかったため、HDB-3, 5 孔と同様の考え方で選定した。

(c) 試験結果

試験結果の解析については、試験区間内の圧力観測結果から、ガス抽出の影響が小さいと考え、単相（液相）状態として解析を行っている。

HDB-1, 3, 4, 5 孔の水理試験から得られた透水係数、間隙水圧、ガス・水比、地下水の電気伝導度を図 3.6-24 に示す。

HDB-3 孔の試験から得られた透水係数は、 $10^{-9} \sim 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ のオーダーであった。掘削時に大量の逸水を抽出した HDB-4 孔の深度 218.45～236.53m の試験区間では、透水係数 $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーの高透水性を有することを確認した。また、同孔の深度 281.45～299.53m はフローメータ検層のフローメータカウントには明確な異常値は確認されなかったが、深度 218.45～236.53m と同様に透水係数 $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーの高透水性を確認した。各孔の試験から得られた透水係数値と累積割れ日本数には、現在までのところ、明瞭な相関関係は認められない。

データ数は少ないものの、概ね各孔とも深度が深くなるにつれ透水係数が小さくなる傾向を示している。また、表 3.6-1 に示す岩芯を用いた室内透水試験結果においても、深度が深くなるにつれて透水係数が小さくなる傾向が認められた。

表 3.6-1 室内透水試験結果 (HDB-1, 2 孔)

試験孔名	供試体採取深度 (GL - m)	透水係数 (m ² /s)
HDB-1 孔	376.89～375.99	1.60E-11
HDB-1 孔	392.06～392.16	3.80E-12
HDB-1 孔	552.50～552.60	9.60E-13
HDB-1 孔	562.87～562.97	6.90E-12
HDB-2 孔	345.90～346.00	3.00E-12
HDB-2 孔	389.06～389.16	5.40E-12
HDB-2 孔	679.00～679.10	4.70E-12
HDB-2 孔	694.76～694.86	7.30E-13

間隙水圧分布は、各孔とも静水圧に近い分布を示すものの、GL-200m 以深では、静水圧より幾分高い傾向がある。透水係数と同様に、HDB-3 孔の間隙水圧分布は HDB-1 孔で実施した水圧連続観測結果の GL-500m 付近までの水圧分布と概ね一致している。

HDB-1, 3 孔と HDB-4, 5 孔の間隙水圧を比較すると、同一深度では HDB-4, 5 孔の間隙水圧の方が幾分高い傾向を示している。これら間隙水圧は、試験孔掘削直後に測定されたものであり、試験掘削時の掘削水の周辺岩盤への注水などによる影響が残っている可能性がある。そのため、各孔の間隙水圧分布は長期モニタリングにより確認する必要がある。

揚水試験中の揚水流量とガス流量の比については、HDB-3 孔は深度によらず概ね同じ値となっているのに対し、HDB-4, 5 孔は深度 300m 以浅と以深でその値が異なっており、HDB-5 孔の深度 150~250m 間では、ガスはほとんど確認されなかった。

(d) まとめ

今後は、水理試験により取得されたデータとガス/水 2 相流を取り扱える数値解析コードを用いたシミュレーション結果との比較により今回の試験結果の妥当性を確認する。さらに、透水性と地質・地質構造、割れ目の傾度および、地下水の水質との関係について考察を行う予定である。

今後も試験調査を通して幌延深地層研究計画での対象地層の地下水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水理試験手法の体系化を図る。

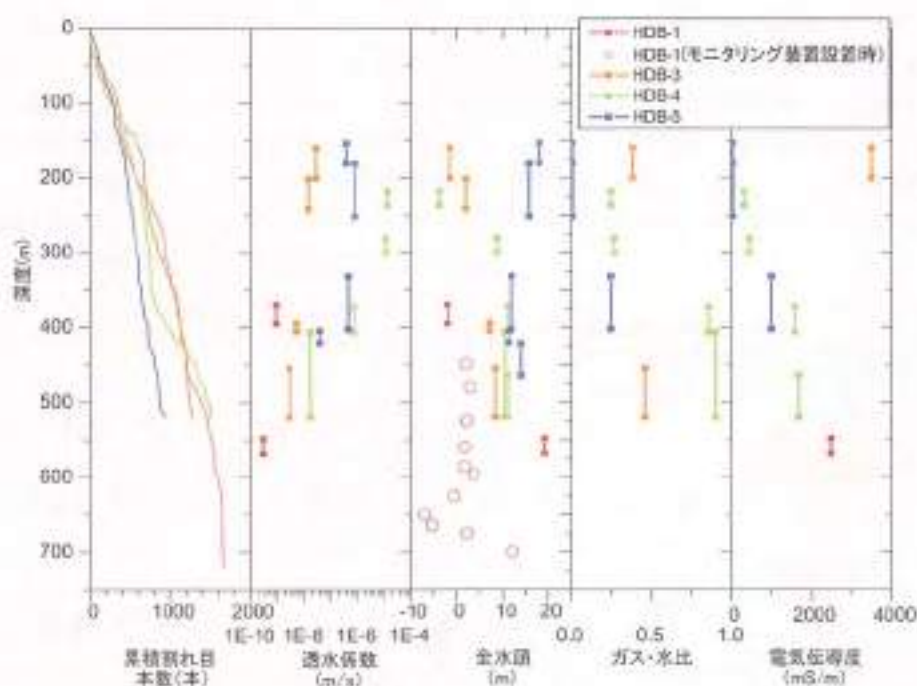


図 3.6-24 水理試験結果(速報)

iv) 地球化学的調査

平成 13 年度に実施した試験調査(HDB-1, 2 孔)では、各孔 1 点において地下水採水を実施した。それらの分析結果では、掘削時に使用した掘削水の影響が 10%以上残っているものの、Na-Cl 型の地下水の存在を確認した(図 3.6-25)。また、岩芯から抽出した間隙水の化学分析を行った結果、Na-Cl 型の間隙水が認められ、深度方向に電気伝導度が高くなる結果が得られた。さらに、間隙水中の酸素・水素同位体比組成からは、HDB-1 孔は、HDB-2 孔に比べると涵養されている場にあると考えられている。

平成 14 年度は、研究所設置地区における地下水の地球化学的特徴を把握し、本地域の地下水流動場との関係を検討することを目的として調査を実施した。平成 13 年度の試験調査(HDB-1 孔)の結果から、難透水性岩盤であることが想定され、時間の限られた水理試験中に、掘削水による汚染を基準(1%)以下となるまで連続揚水を継続することが困難であると予想されたことから、岩芯からの間隙水の抽出、分析についても継続して実施することとした。

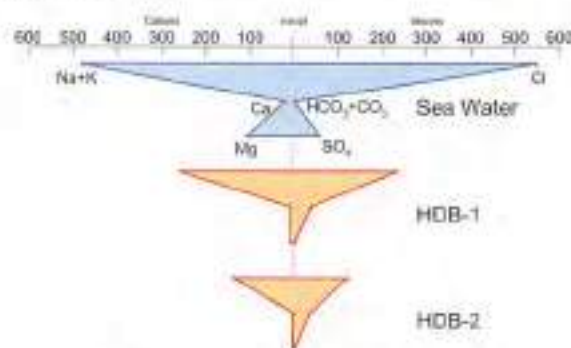


図 3.6-25 ヘキサダイアグラム

(a) 地下水採水時の物理化学パラメータのモニタリングについて

HDB-1, 2 孔で実施した水理試験では、透水性が非常に低く、ポンプを使用した連続揚水が困難であったことから、エアリフト(図 3.6-26)方式で揚水を行った。本方式は、定流量揚水が不可能であるため、揚水中の地下水の物理化学パラメータモニタリングについては、大気の混入や脱ガスによる影響の可能性があり、測定値の品質が十分ではなかった。

HDB-3, 4, 5 孔で実施した水理試験では、HDB-1, 2 孔のように難透水性かつ、水とガスの 2 相状態においても連続的に揚水が可能なポンプを使用した。



図 3.6-26 エアリフト法の概念

また、物理化学パラメータモニタリング装置については、揚水流量が少なく溶存ガスが存在する条件下においても、物理化学パラメータモニタリングが実施できるように、簡易型の気液分離槽を付加するとともに、水理試験装置からの配管を可能な限り短くするなど改善を行った。この物理化学パラメータモニタリング装置を用いて、地下水の pH、電気伝導度、酸化還元電位、溶存酸素濃度を地上において測定した。このモニタリング方法では、試験孔内の原位置でのモニタリングと比較すると、測定項目によっては、溶存ガスの逸脱による水質変化や大気中の酸素混入の影響を完全に排除できない欠点がある。これは、地上フローセル式測定では避けられない課題であると考えられる(図 3.6-27)。

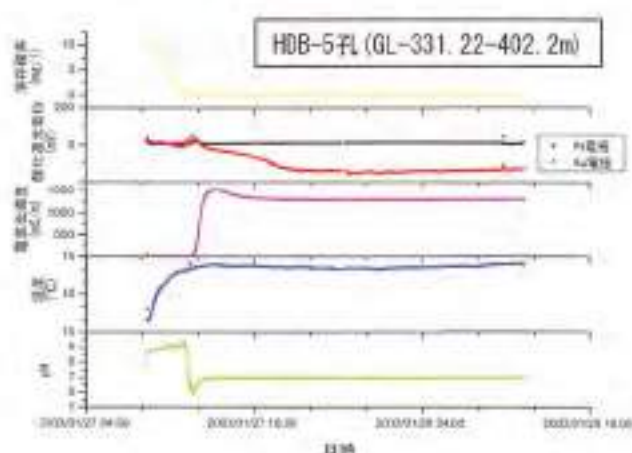


図 3.6-27 連続モニタリング結果の一例

(b) 地下水水質の特徴

これまでに得られている地下水の採水深度と pH、電気伝導度、地下水採水時の蛍光染料濃度および、

^{14}C の測定結果を表3.6-2に示す。試験孔掘削用水には、蛍光染料（ナフチオン酸ナトリウム）を10mg/lの濃度で添加しており、蛍光染料濃度から掘削水の残留割合を評価している。

HDB-1, 2, 3孔から得られた地下水は、掘削水の影響が10～20%程度含まれている。これは、HDB-1, 2, 3孔が、全体的に難透水性であり、試験調査工程の制約から、掘削水の影響を十分排除できるまで揚水時間を確保できなかったためである。HDB-4, 5孔では、HDB-1, 2, 3孔に比べ透水性が高い区間を対象に採水を実施したため、短時間の揚水でも掘削水の残留が少ない地下水を採取することができた。

HDB-3孔ではHDB-1孔の地下水と同様に電気伝導度が高いNa-Cl型の地下水が確認された。一方、HDB-4, 5孔では、HDB-1, 2, 3孔に比べ電気伝導度が1～2桁低いNa-HCO₃型の水質の地下水が存在していることが確認された(図3.6-28)。

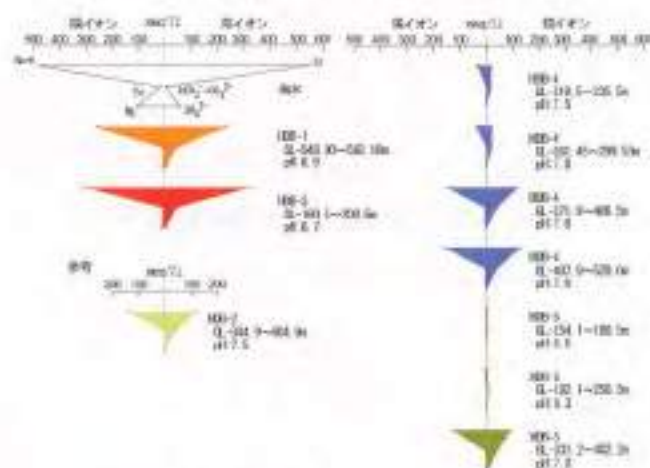


図3.6-28 地下水化学分析結果

表3.6-2 地下水採水深度およびpH、電気伝導度、トレーサー濃度、 ^{14}C (速報値)

試錐孔	採水区間(m)	pH	電気伝導度 (mS/m)	トレーサー濃度 (mg/l)	^{14}C (pMC)
掘削水	—	—	—	—	48.38
HDB-1	548.00～568.18	7.9	2560	1.4	1.7
HDB-2	344.90～404.90	7.9	1490	0.9	3.87
HDB-3	160.50～200.45	6.7	3490	2.08	4.53
HDB-4	218.45～236.53	7.5	313	1.14	4.4
HDB-4	281.45～299.53	7.8	430	0.43	2.0
HDB-4	371.90～406.50	7.0	1582	0.55	測定中
HDB-4	407.90～520.00	7.0	1681	0.70 ^{*)}	測定中
HDB-5	154.05～180.46	8.5	40	0.15	22.1
HDB-5	331.22～402.23	7.0	1301	0.51	2.0

*:トレーサーを添加しない掘削水を循環したため希釈された可能性がある

(c) 地下水中の同位体比の特徴

酸素・水素同位体および炭素同位体比から推定される地下水の起源・滞留時間に関する知見は、地下水流動解析結果との比較によりその結果の妥当性の確認に活用できる。

^{14}C 測定結果(表3.6-2)からは、HDB-5孔(154.05～180.46m)の試料を除けば、 ^{14}C 濃度が数pMC(percent modern carbon)であり、滞留時間の長い地下水であると推定される。しかし、HDB-5孔の深度154.05～180.46mにおいて、 ^{14}C を約22pMCの濃度で含む地下水が確認され、他の地下水に比べると滞留時間が短い地下水の存在が示唆された。

(d) まとめ

大曲断層の西側に位置するHDB-1, 3孔では、Na-Cl型の塩水系地下水が確認された。一方、大曲断層の東側に位置する試験孔では、Na-HCO₃型の地下水の存在が確認された。地下水間隙水圧の深度分布から、大曲断層が地下水流動に影響を与えている可能性が考えられており、今回観測された地下水水質の差が、その結果を反映している可能性が考えられる。

今後は、原位置における地球化学的特徴を把握する調査手法を確立することを目標とするとともに、地下水の地球化学的特徴、透水性および地質・地質構造との関係についての検討を進める予定である。

v) 岩盤力学調査

平成14年度の調査は、主として大曲断層を挟んだ東西領域において、岩盤力学的な観点から見た諸特性や応力場がどのような状態になっているかを概略的に把握する目的で各種の調査を実施した。その結果を以下に示す。

(a) 室内試験

図3.6-29にHDB-3、4.5孔の岩芯室内試験のうち、現在までに得られたHDB-3およびHDB-4孔の物理試験・力学試験結果を示す。HDB-3孔では深度381m程度まで珪藻質泥岩、HDB-4孔については深度128m程度までが珪藻質泥岩であり、それ以深が硬質頁岩である。

大曲断層（推定）の西側に位置するHDB-3孔の珪藻質泥岩は、単位体積重量は14~16kN/m³、空隙率は60~65%、弾性波速度はP波が1.8km/sec、S波が0.5km/sec程度の物理特性を有している。力学特性は、静弾性係数(E50)が2GPa以下、一軸圧縮強度は5MPa程度、静ポアソン比は0.1~0.2の範囲に分布する。稚内層では単位体積重量が16~18kN/m³、空隙率が40~50%、弾性波速度はP波が2.0~2.5km/sec、S波が0.7~1.0km/sec程度まで、深度増加とともに急激に増加する。力学特性についても静弾性係数が1~4GPa、一軸圧縮強度が5~25MPaと急激な変化を示す。この変化は急激ではあるが連続的である。

大曲断層の東側に位置するHDB-4孔は、珪藻質泥岩の物理・力学特性はHDB-3孔のそれと大きく変わらない。硬質頁岩でも、静弾性係数の測定結果の一部が大きいものの、物理・力学特性値の分布範囲はHDB-3孔の硬質頁岩のそれと大きく異なる。したがって、岩石の物理・力学特性に関しては断層の西側・東側の領域という観点での違いはなく、地層の違いで分けることが可能と考えられる。この際、岩相が変化する遷移帯では急激な物性の変化が生じている可能性が高い。

図3.6-30には、HDB-3孔のコアを用いて実施したスレーキング試験および吸水膨張率試験の結果を示す。この結果から、HDB-3孔地点の岩石は平成13年度の結果と同様、耐スレーキング性が高く膨張性は小さい。

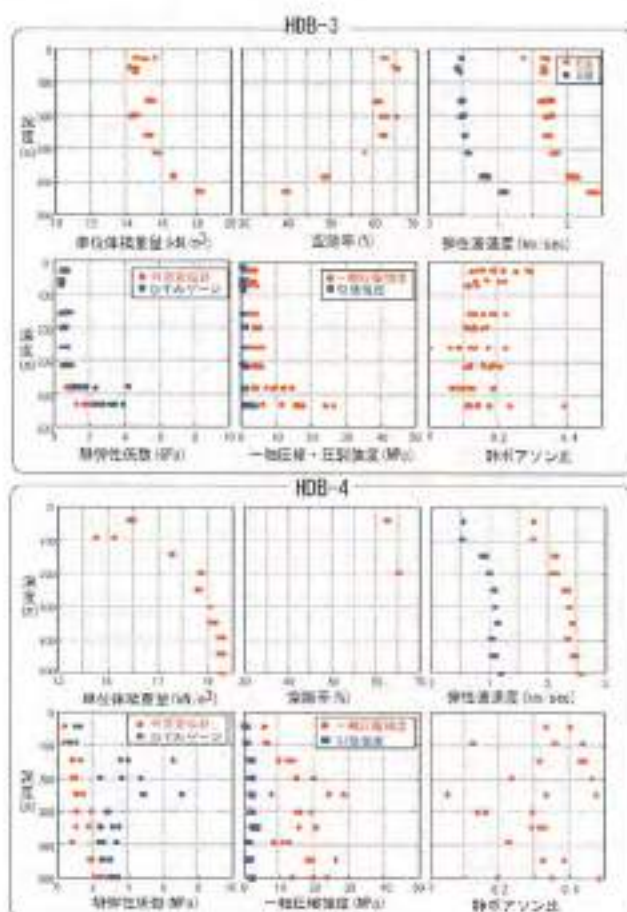


図3.6-29 室内物理・力学試験結果

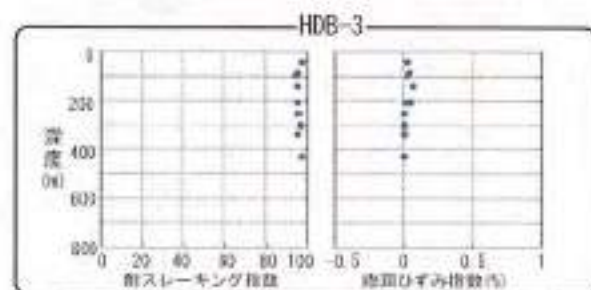


図3.6-30 スレーキング・吸水膨張試験結果

また、平成13年度のAE法による応力測定時に得られた岩石物性の異方性についても検討した。図3.6-31に、HDB-3孔のコアを用いて実施した岩石物性の異方性に関する試験結果を示す。

弾性波速度に関しては鉛直方向と水平面内での各方向にほとんど異方性はない。静弾性係数と一軸圧縮強度で見ると、深度257m付近の結果を除けば、水平方向の力学特性は鉛直方向に比べ同等かあるいは大きくなっている。試験掘削時に定方位で採取したコアよりサンプリングし、方位の同定されている結果を比較すると、データ数は必ずしも十分ではないが水平面内の異方性の主軸は東西および南北方向であると思われる。

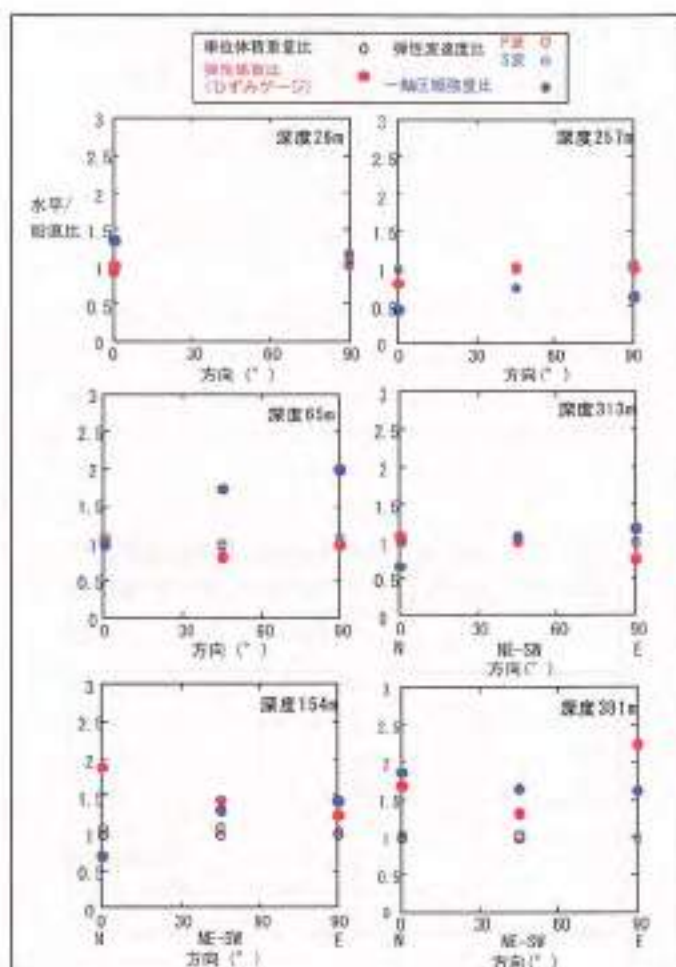


図 3.6-31 岩石物性の異方性に関する試験結果

以上の結果から、岩石物性については、地層により区分できる可能性が高いと考えられる。ただし、珪藻質泥岩と硬質頁岩の間で岩石物性が急激かつ連続的に変化する遷移帯の存在は本地域の特徴の一つと考えられる。大曲断層の有無による岩石物性への影響（断層の形成に伴う岩石物性の劣化等）は、認められなかった。

(b) AE 法による応力測定

本測定手法の適用性の検討および鉛直方向の応力成分についての情報を取得するために実施した。図 3.6-32 に平成 13 年度の測定結果を示すが、鉛直応力成分は単位体積重量から推定される土被り圧と比較してかなり小さく評価された。この要因としては、①岩石供試体の飽和状態、②カイザー効果の時間依存性、③水圧成分の影響（有効応力での評価）が考えられたため、平成 14 年度の試験では、平成 13 年度の試験方法の改善（AE 測定時に影響が大きい周辺のノイズ除去）とともに、②のカイザー効果時間依存性に関する予備試験を実施

した上で本試験を実施することとした。

予備試験では繰り返し荷重によって人工的に先行応力を与え（6.6MPa、一軸圧縮強度の 40%）、除荷後の時間をパラメータとして再度先行応力が正しく評価できるかの確認を行っている。なお、対象岩石は非常に有効空隙率が大きく、乾燥しやすい性質があるため、その影響を除去するため水槽に供試体を浸水させて試験を実施した。その結果、人工応力荷重後 1 時間は応力が正しく評価できるものの、それ以降では測定結果は低めの値を示した。この理由は検討中であるが、カイザー効果時間依存性に関する明確な結論が得られなかったため、平成 13 年度と同様、本試験は試験掘削後 3 日以内に試験を完了する仕様で実施することとした。

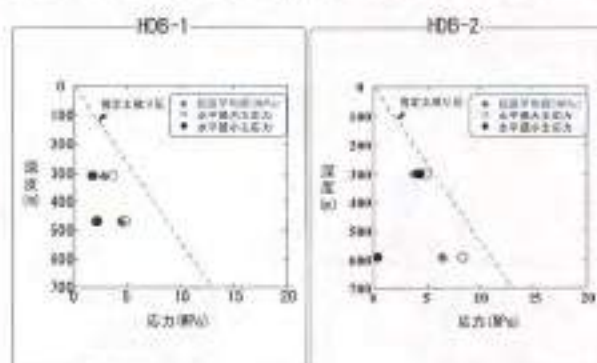


図 3.6-32 AE 法による応力測定結果 (HDB-1,2)

表 3.6-3 に測定結果を示す。HDB-3 孔の深度 439.1m と、HDB-5 孔の深度 381.3m 地点から採取した定方位コアを用いた試験を実施した。なお、HDB-3 孔においては、EW および NE-SW 方向より採取したコアで明瞭なカイザー効果が認められず水平面内主応力の算定はできていない。

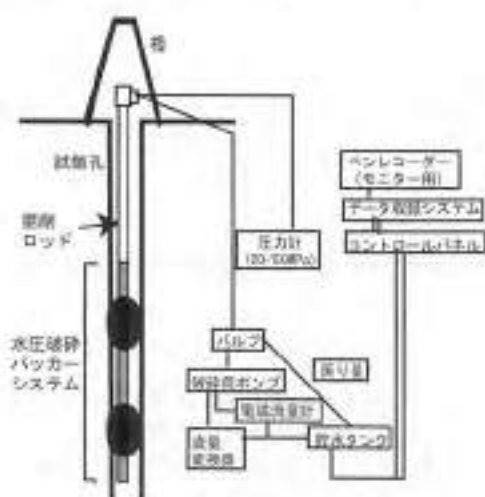
表 3.6-3 AE 法による応力測定結果

試験孔	鉛直応力 平均値 (MPa)	水平方向応力 平均値(MPa)			
		NS	NW-SE	EW	NE-SW
HDB-3孔 (深度439.1m)	7.9	6.1	13.5	-	-
HDB-5孔 (深度381.3m)	4.8	3.2	9.6	11.7	13
		主応力値(MPa)		方向(°)	
		水平面内最大主応力 (MPa)	水平面内最小主応力 (MPa)		
HDB-3孔 (深度439.1m)	-	-	-		
HDB-5孔 (深度381.3m)	13.1	3.9	44.3		

両孔のそれぞれの測定深度における推定土被り圧は、HDB-3孔で6.7MPa、HDB-5孔で7.0MPa程度である。鉛直応力の測定結果の平均値は、HDB-3孔で7.9MPa、HDB-5孔で4.8MPa、水平面内の主応力値は最大主応力が12.1MPa、最小主応力が2.8MPaとなり最大主応力方向はN69.3Eとなった。

(c) 水圧破砕法による初期応力測定

HDB-3, 4, 5孔において各孔2深度において水圧破砕法による初期応力測定を実施した。試験システムは、平成13年度と異なりロッドによる測定システム(TAM社製)を使用した。本システムを模式的に図3.6-33に示すが、平成13年度のシステムと異なる点は、掘削ロッドの先端に型取りバックカーシステムおよび水圧破砕バックカーシステムを装着し、ロッドを通じての注排水を行うとともにすべての圧力・流量測定を孔口で実施する点である。



*型取り時には掘削ロッド先端にインプレッションバックカーを装着する

図 3.6-33 水圧破砕時の測定配置

測定深度は、平成13年度と14年度の測定システムが異なること、試験点数が少ないながらも横並びでの比較が行えることおよび声間層中のデータ取得を行うことを念頭に置き、HDB-3, 4, 5孔とも深度250m(HDB-3孔では声間層中)および380m付近(HDB-1孔における水圧破砕深度)で試験を実施した。

表3.6-4に測定結果(速報値)を示す。平成13年度のHDB-1孔の測定結果とHDB-3孔の同程度の深度での測定結果を比較すると最大・最小主応力値とも半分程度の値となっている。この差の要因については測定システムの違いもあり現在検討中

である。HDB-3, 4, 5孔の測定結果からは、いずれの地点も最小主応力は単位体積重量から推定される土被り圧とほぼ等しい。測定された最大主応力と最小主応力の比も各孔ともほとんど変化はない。しかし、相対的にはHDB-3孔の値は、250m付近では他孔に比べ小さく、380m付近では大きいように思われる。

水圧破砕法による測定から得られた最大主応力方向は、いずれの測定地点においてもほぼ東西方向と判断される。HDB-3, 4, 5孔は大曲断層の西側、東側に位置しているが、最大主応力方向に関してはその影響は見られていない。

表 3.6-4 水圧破砕法による測定結果(速報値)

試験孔名	深度(m)	水平面内最大主応力(MPa)	水平面内最小主応力(MPa)	推定土被り圧(MPa)	最大主応力方位
HDB-3	303.3	4.4	3.0	4.0	181EE-W
	392.3	7.1	5.7	6.0	WSW-ESE
HDB-1	381	11.8	7.2	6.3	N83E
HDB-4	254.2	5.1	4	4.6	N83W
	399	6.5	5	6.5	181EE-W
HDB-5	249.9	5.1	4	4.5	181EE-W
	377.5	6.1	5.2	6.0	181EE-W

また、HDB-3孔では声間層中(深度400m付近)でほぼ連続的にボアホールブレイクアウトが生じている(図3.6-34)。HDB-1孔で見られたものと同様、これらのボアホールブレイクアウトの方向は深度方向にほとんど変化せずほぼNS方向である。したがって、水平面内最大主応力方向はほぼ東西方向にあることが推定される。これは、水圧破砕法から得られた最大主応力方向と調和的である。

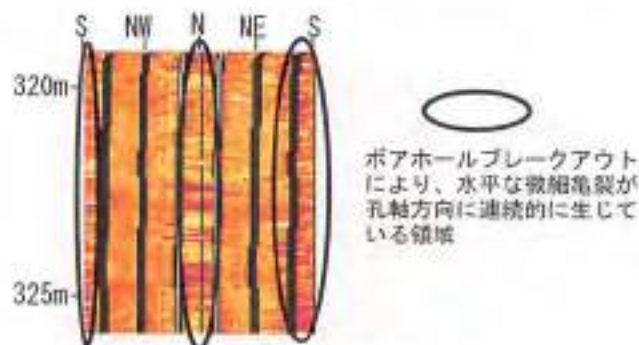


図 3.6-34 孔壁画像検層結果(HDB-3孔)

以上のように、研究所設置地区内の初期応力場は、大曲断層東西領域で明瞭な差異は認められていない。

④ まとめ

研究所設置地区およびその周辺における地質環境を把握するために、3本の試錐調査(HDB-3, 4, 5 孔)を実施した。室内試験を継続実施中であるため、最終的な解釈は全ての試験の終了を待たなければならないが、観測の地質環境に関するデータを蓄積することができた。

今後は、複数本の試錐掘削および各種試験を実施し、地質学的・水理学的・地球化学的・力学的データを蓄積し、地質環境の理解を進めるとともに、調査手法の体系化を目指して調査を実施していく予定である。

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、地下水の水理モデル、地下水の地球化学モデル、岩盤力学モデル）を構築する。調査の進展によるデータ数の増加に合わせて、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、各モデルを個々に構築あるいは、複数のモデルを統合しながら構築する手法の検討を実施してきた(古添・高瀬, 1998; 山田ほか, 2002)。平成14年度は、これらモデル化手法の検討結果や平成14年度までに実施した試錐調査等のデータに基づき、各モデルの構築・更新を試みた。

2-1) 地質構造モデル

① 実施内容

岩盤の水理モデル、地下水の地球化学モデルおよび岩盤の力学モデルの基礎となる地質構造モデルを構築し、地質構造等の可視化を行う。

平成13年度は、空中物理探査、地上物理探査、試錐調査結果(HDB-1, HDB-2 孔)を反映し、鉛直5断面の地質構造モデルを構築した。平成14年度は、研究所設置地区に重点を置き、平成14年度に実施したHDB-3, 4, 5 孔の試錐調査結果を用いてモデルの更新を行った。

② これまでの成果

平成14年度は、大曲断層（推定）の両側にHDB-3, 4, 5 孔を配置し調査を実施した。この試錐調査時に実施したコア観察等の結果に基づき修正した地質断面図を図3.6-35に示す。HDB-4, 5 孔の試錐調査結果において大曲断層の東側に声間層が確認できたためそれを考慮している。

さらに、地質構造に含まれる不確実性（本調査地域では、断層の位置やその分布など）を考慮し、客観性を保ちつつモデルの更新を行う手法としてELS(Evidential Support Logic)法（須山ほか, 2002）を適用した地質構造モデルの更新も行った。その一例を図3.6-36に示す。更新したモデルでは、大曲断層周辺に逆断層による地層のズレ方と整合しない部分も見られる。しかし、大曲断層の位置や空間分布にも大きな不確実性が存在することから、平成15年度の地質調査等の結果も踏まえて、断層の幾何学的特性も含めたモデルの更新を継続し、その信頼性向上をはかる必要があると考えられる。

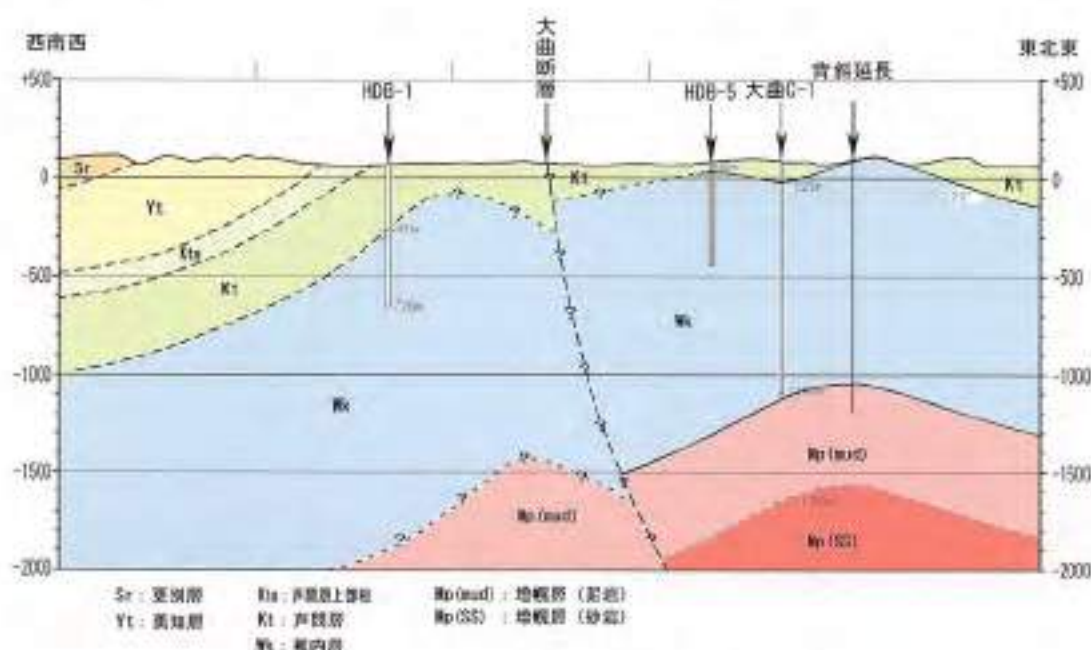


図3.6-35 研究所設置地区周辺の地質断面図

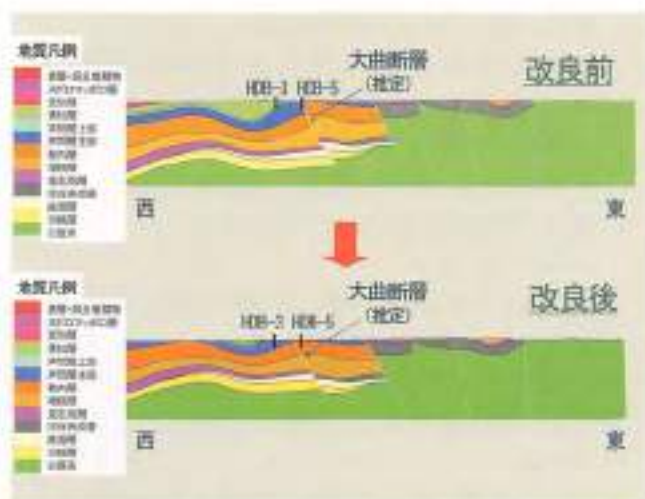


図 3.6-36 ESL 法を適用した地質断面図更新の例

③ まとめ

平成 13 年度に構築した地質構造モデルをベースとして、平成 14 年度に実施した試錐調査等のデータを用いて、研究所設置地区を対象とした地質構造モデルを検討した。

今後は、このような繰り返しによるモデルの構築・更新を試みていく予定である。

参考文献

- 須山泰宏，戸井田克，高瀬博康(2002)：不完全な情報に基づく判断の不確実性を考慮した意思決定用評価ツールの開発，日本原子力学会 2003 年春の年会講演要旨集，p. 666.
- 山田 守，中西繁隆，戸高法文，赤坂千寿，星野延夫，新井 隆，百嶋 輝，杉山弘泰，五月女敦(2002)：軽延深地層研究計画における地質環境モデルの構築・統合手法の検討，サイクル機構技術資料（研究委託報告書；電源開発株式会社），JNC TJ1400 2002-008.
- 吉添 誠，高瀬博康(1998)：深地層の研究における地質環境モデルの構築のための数学・統計学的手法に関する調査，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 TJ1420 1998-032.

2-2) 地下水の水理モデル

① 課題の計画と概要

平成13年度に構築した水理地質構造モデルについて、新たな地質情報を加えた水理地質構造モデルを作成した。また、密度の異なる地下水が広域的な地下水流動に与える影響についての検討を実施した。

② これまでの成果

i) 水理地質構造モデルの更新

平成13年度に作成した水理地質構造モデルに、新たな地質情報を加えた水理地質構造モデルを作成した。鳥瞰図を図3.6-37に示す。

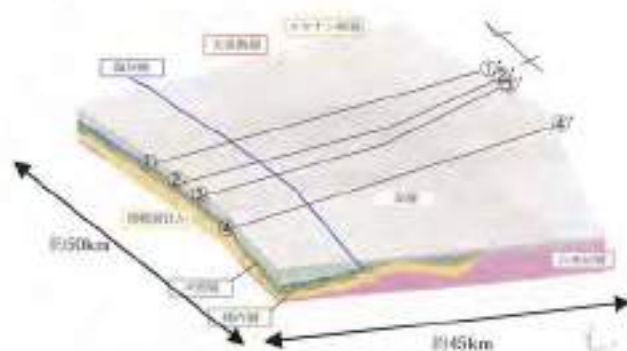
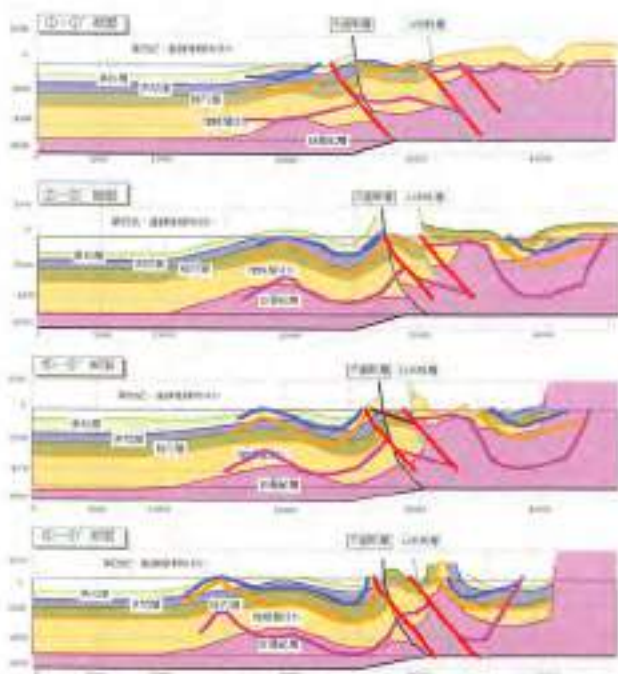


図 3.6-37 水理地質構造モデル鳥瞰図



太線：平成13年度水理地質構造モデルでの地質区分線
着色区分：新たな地質情報に基づき作成した地質区分

図 3.6-38 断面比較図

また、両モデルの比較図を図3.6-38に示す。新たに作成したモデルは、平成13年度の水理地質構造モデルと比較すると以下の特徴を有している。

- ・断層の傾斜は深部ほど小さくなる
- ・白亜紀層の深度が東部でより浅くなる
- ・大曲断層西側の褶曲構造は緩やかなうねりとなっている

上記モデルの更新が解析結果に与える影響を把握するため、各層の透水係数等の入力パラメータを平成13年度同様に設定した地下水流動解析を実施した。解析結果から、ポテンシャルや流速はモデルの違いによらず地形を反映した分布傾向を示すが、全水頭の値は新たな水理地質構造モデルによる解析結果の方が高い傾向が示された。このことから、新たに追加した地質情報は、大域的な流動傾向を変えるものではないものの、解析結果に与える影響は小さくないと言える。

ii) 感度解析

更新した水理地質構造モデルを用いて感度解析を実施し、各地層および断層の透水係数、貯留量が解析結果に与える影響について検討した。感度解析における標準ケースを表3.6-5に示す。各層の透水係数は既存の文献(梅田ほか, 1995)を参考にその幅を設定した。

表 3.6-5 感度解析で用いた透水係数

地層	標準ケース (m/sec)	標準偏差 (透水係数の対数)
表層	2.00×10^{-6}	1.5
沖積層、奥北層、更別層	1.00×10^{-6}	1.5
勇知層	1.0×10^{-7}	1.5
声間層	1.0×10^{-8}	1.0
種内層	1.0×10^{-10}	1.0
増尾層～先第三紀層	5.0×10^{-10}	0.8
白亜紀層	1.0×10^{-11}	—
大曲断層(側部)	1.0×10^{-4}	2.0
大曲断層(中央部)	1.0×10^{-10}	2.0
2かマ断層(側部)	1.00×10^{-8}	—
2かマ断層(中央部)	1.0×10^{-10}	—

感度の比較を行った深度は500mおよび1,000m、比較パラメータは全水頭、動水勾配、流動経路および流動時間である。

・全水頭、動水勾配について

表層、勇知層の透水係数、涵養量は、全水頭について感度が高い。その他の地層については分布深度が浅い地域で感度が高い傾向がある。断層側部の透水係数は、断層近傍の地域で感度が高いものの、その範囲は断層近傍にとどまっている。

・粒子追跡到達時間について

第四紀・更別層の透水係数および涵養量は全体的に感度が高い傾向にある。また、経路に該当する地層の透水係数の影響は大きい。

iii) 密度流を考慮した地下水流動解析

HDB-1孔での調査において研究所設置地区周辺には塩濃度の高い地下水の存在が確認されている。そこで密度の異なる地下水が大局的な地下水流動に与える影響を把握するための事前検討として、本地域で確認されている塩濃度の高い地下水の起源に関して、

- 海岸から塩分侵入する場合（海水浸入条件）
- 堆積時に取り込まれた海水が地表からの淡水により洗い出される場合（洗い出し条件）

について、D-1孔（動燃事業団、1987）を通る2次元断面モデルでの解析を実施した。

解析は表 3.6-6 に示す 9 ケースを設定した。また、その他解析に用いた物性値を表 3.6-7、各解析の初期条件を図 3.6-39、水理境界条件を図 3.6-40、濃度境界条件を図 3.6-41 に示す。なお、初期水位は、海面下にある節点については密度を考慮した海底部水頭、陸上部は地表標高の水位（全水頭）とし、解析時間は 300 万年とした。

表 3.6-6 解析ケース

解析タイプ	透水係数 (m/s)	水理境界条件
海水浸入	1.0×10^{-8} (均質)	表面水位固定
海水浸入	1.0×10^{-8} (均質)	表面水位固定
海水浸入	1.0×10^{-7} (均質)	表面水位固定
洗い出し	1.0×10^{-8} (均質)	表面水位固定
洗い出し	1.0×10^{-8} (均質)	表面水位固定
洗い出し	1.0×10^{-7} (均質)	表面水位固定
海水浸入	表 3.6-5 標準ケース	表面水位固定
海水浸入	表 3.6-5 標準ケース	涵養量 0.01m/day
洗い出し	表 3.6-5 標準ケース	表面水位固定

表 3.6-7 解析に用いた諸物性

物性	値	備考
縦方向分散長	100m	解析規模から想定
横方向分散長	20m	縦方向分散の 1/5 を仮定
遅延係数	1.0	塩分の吸着は無いと仮定
空隙率	0.38	HDB-1, 2 孔の試験結果から想定

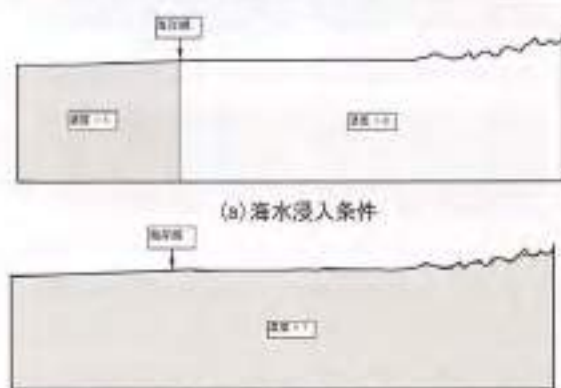


図 3.6-39 初期条件

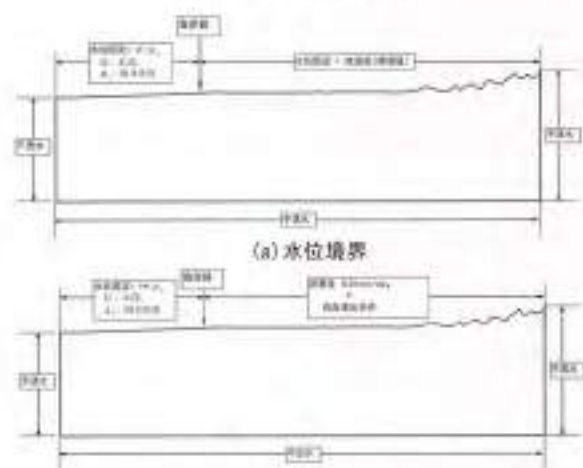


図 3.6-40 境界条件

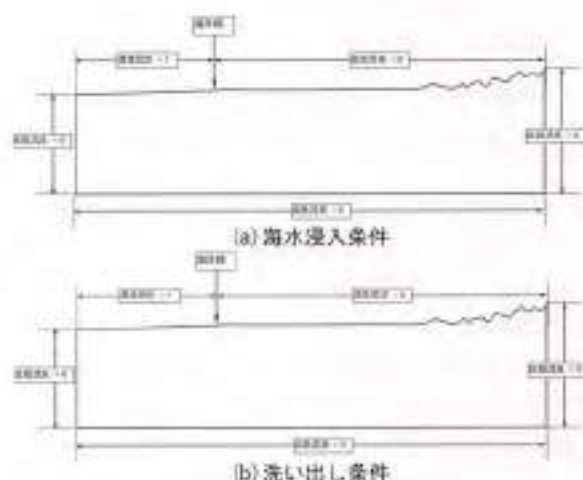


図 3.6-41 濃度境界条件

解析の結果の一例を図3.6-42に示す。塩素イオン濃度は、現在の海水の塩素イオン濃度19,000ppmを正規化した濃度1.0に相当するものとして濃度コンターを作成している。

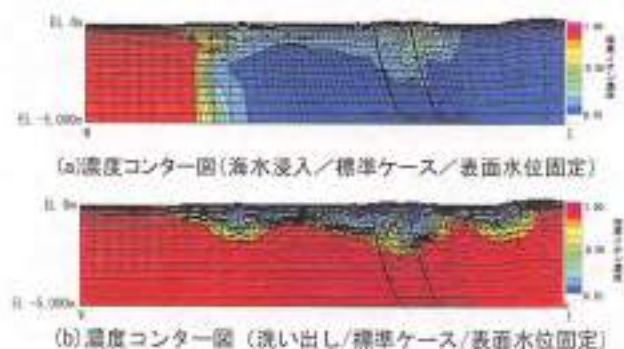
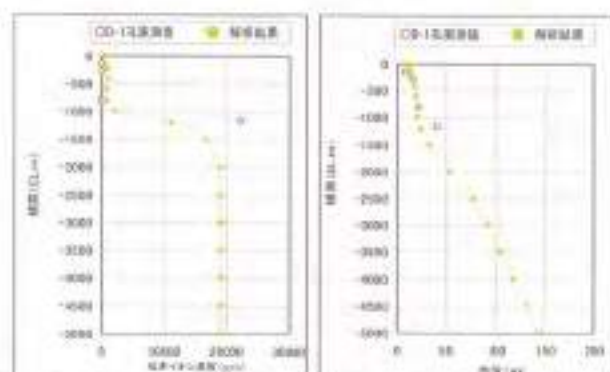


図3.6-42 密度流を考慮した断面2次元解析例

解析結果の一例を図3.6-43に示す。ポテンシャル分布については、解析結果と実測値は概ね一致している。しかし、D-1孔において観測されている高塩素イオン濃度（約22,000 ppm、現海水の塩素イオン濃度は約19,000 ppm）の地下水については、その地下水の起源などの地球化学的な解釈を行い、地下水流動解析結果と比較を行う必要があると考えられる。



(a) 塩素イオン濃度分布 (b) ポテンシャル分布

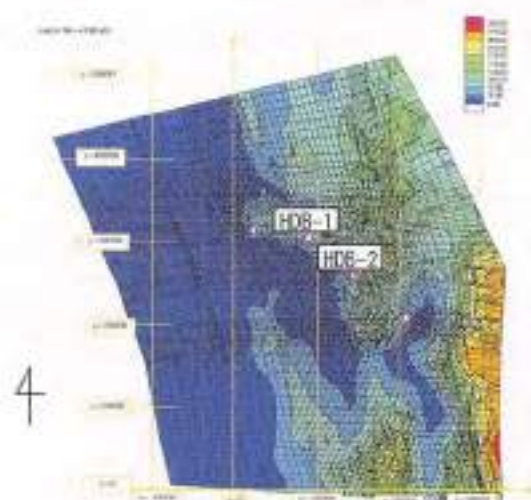
図3.6-43 D-1孔実測値と解析値の比較

(洗い出し、標準ケース、表面水位固定条件との比較)

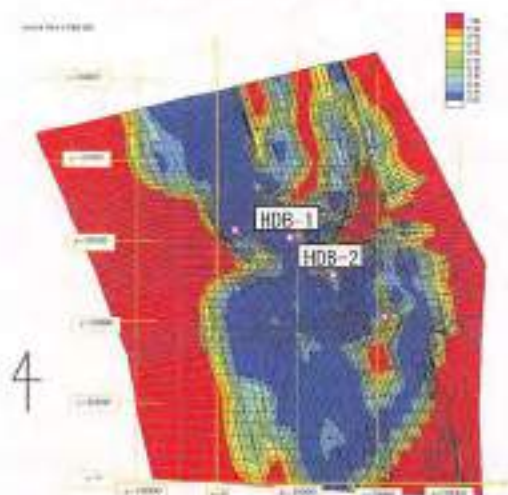
iv) 密度流を考慮した3次元モデルによる解析

D-1孔で確認された塩分濃度の高い地下水の3次元的な分布に関する検討を行った。解析には多相流解析コードGETFLOWS(3次元差分コード)を使用した。解析に用いたモデルは、新たな水理地質構造モデル(図3.6-37)のメッシュ形状を基に作成した。解析条件は、2次元解析の結果から洗い出し条件とし、解析に用いた透水係数は 10^{-8} m/sと

した。その他諸物性については表3.6-7と同様である。初期条件は図3.6-39(b)、境界条件は図3.6-40(b)、濃度初期条件は図3.6-41(b)と同様である。また、初期水位についても上記の2次元解析同様に設定した。解析結果の一例を図3.6-44に示す。



(a) ポテンシャルコンタ/流速ベクトル



(b) 濃度分布

図3.6-44 標高500m断面の解析例

密度流を考慮した場合においても地形形状を反映したポテンシャル分布を示している。鉛直方向のポテンシャル分布は、深度1,000mまで変化が少ないが、深度1,000m以深についてはポテンシャル値が増加傾向を示している。よって、深度1,000mまでは洗い出しによる淡水化が進んでいるが、深度1,000m以深ではほとんど洗い出しが行われていないと考えられる。

以上のことから、当地域で広域を対象とした地下水流動を評価する上では、密度流を考慮した地下水流動解析が有効であると考えられる。

③ まとめ

今後は、物理探査や試掘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、立坑掘削が研究所敷地地区周辺の地下水流動に与える影響等の予測解析を実施する。また、その過程を通して、密度の異なる地下水が存在する条件での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流動解析手法の開発・改良を進める。

参考文献

- 動力炉・核燃料開発事業団(1987)：貯蔵工学センター立地環境調査報告書、動力事業団技術資料、PNC-TJ1027-98-012。
- 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性係数データベースの作成、地下水学会誌、第37巻、第1号、pp.69-77。

2-3) 地下水の地球化学モデル

① 課題と計画の概要

地下水の地球化学モデルに関しては、

1. pH
2. 酸化還元電位
3. 主要イオン濃度
4. 微生物および有機物濃度

などの空間的な分布を表現する場のモデルと、そのような水質形成の背景となる混合、岩石-水反応などのプロセスを表現するプロセスモデルについて、それらのモデルを構築するための概念を表現した概念モデルを構築し、調査の進展に伴い逐次モデルを更新する方針で進めてきている。

平成 14 年度は、これまでの地球化学モデル構築に関する検討結果を基に、以下の項目を実施した。

- ・地球化学モデル構築のために有効な数学・統計学的手法について、国内外の事例の調査を行った。
- ・調査した事例のうち、幌延において有効と考えられるツールをまず選択し (PHREEQC (Parkhurst and Appelo, 1999), NETPATH (Plummer et al., 1994))、地下水水質形成機構の解析を試みた。
- ・上記の解析試行の結果を基に、現在の調査において不足しているデータを抽出した。

② これまでの成果

i) 使用したデータ

今回の解析に使用した地下水水質データは HDB-2 号孔 (深度 344.90-404.90m: 稚内層) で採取した地下水のものである (サイクル機構, 2002)。主な特徴は、Na-Cl 型であり、地下水中の塩分濃度は現海水の塩分濃度の 1/2~1/3 であった。HDB-2 号孔で採取した岩芯から抽出した間隙水水質データも参考のために使用した。

ii) モデル化の概念の構築

研究所設置地区周辺における地下水の水質形成機構としては、海水と地下水の混合および水-岩石反応の両者を考慮する必要があると仮定した。この仮定が正しいことを確認するために、上述の HDB-2 号孔の地下水水質データを用いて主要化学成分濃度相関を検討した結果 (図 3.6-45)、混合および水-岩石反応の両者を考慮する必要があることがわかった。すなわち、混合のみが生じている場合には、図中の海水 (現海水) と原点を結ぶ

線 (混合線) 上にプロットされるが、図 3.6-45 の Na-Cl 相関図では、ほとんどのデータが混合線より上側にプロットされている。このことは、過去の海水と現在の海水の化学組成が一定であると仮定した場合、混合以外のプロセスにより Na イオンが供給されている可能性を示していると考えられる。他の主要化学成分についても、同様の処理を行い、岩石中に認められる鉱物を考慮した結果、以下の可能性が考えられた。

- ・Mg イオンはイオン交換反応あるいは Mg 含有鉱物の沈殿により濃度が減少している。
- ・Na イオンはイオン交換および Na 含有鉱物の溶解により濃度が増加している。
- ・SO₄ イオンは硫化物への還元により濃度が減少している。
- ・Ca イオンはイオン交換反応あるいはカルシウム鉱物の沈殿により濃度が減少している。

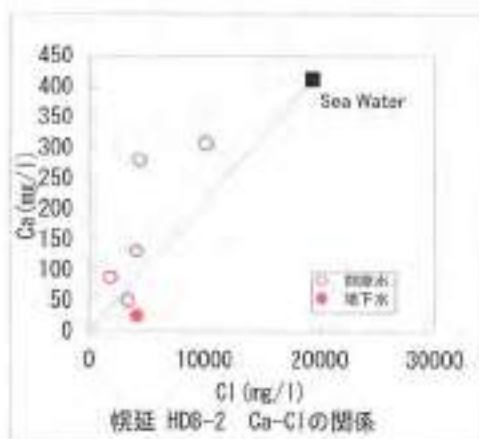
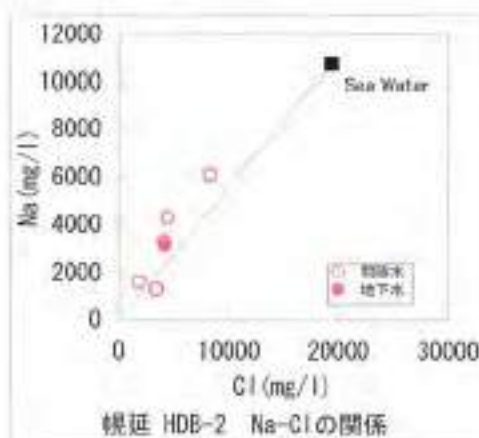


図 3.6-45 HDB-2 孔における地下水・間隙水的主要成分濃度相関図

III) モデル化の試行結果

今回は以下の処理を行った。

a) 初期水の化学種組成の計算

初期水として、現海水および HDB-2 孔周辺の沢水を使用した。海水および上記の沢水は、空気中の酸素と平衡であると仮定した。

b) 初期水の混合計算

NETPATH を用いた計算により、海水と沢水の混合率を算出した（海水：沢水 20:80）。

c) 混合地下水の鉱物などとの反応

NETPATH を用いた計算から推定される鉱物の溶解量およびイオン交換量を水-岩石反応系に加えた。

d) PHREEQC によって求められた地下水と実際の地下水の比較

上記の c) で求められた地下水から沈殿する鉱物の量を求め、最終的に得られた地下水の各化学成分濃度などについて、実測値との比較を行った。

HDB-2 号孔の地下水化学データは、地上に揚水した試料の分析から得られたものである。そのため、解析に必要な地下水中のガス（二酸化炭素、メタン）濃度の定数値の信頼性が乏しい問題点がある。今回の解析では、二酸化炭素については方解石の溶解平衡を仮定して推定し、メタンについては採水深度での飽和量を仮定することとした。また、酸化還元電位については、実測値が地上揚水試料の測定値であることから、計算値との比較には使用していない。

今回の解析試行結果(表 3.6-8)から、主要化学成分濃度については実測値と計算値に著しい差を認めないことから、ここで採用したモデル化手法については、今後のモデル化戦略の策定や、試錐調査などにおけるデータ取得計画の策定に活用できる手法の一つになると考えられる。一方、今回は推定値を使用した地下水中のガス濃度および検討に含めなかった酸化還元電位については、試錐孔内の原位置におけるデータ取得などを行い、地下水水質形成プロセスの推定など、より現実的なモデル化を進めていく予定である。

表 3.6-8 混合・マスバランスおよび水-岩石反応を考慮したモデル化結果の例

項目	実測値	計算値
pH	7.9	6.6
Eh (mV)	-	-238
Na (mmol/kg)	135.7	141
K (mmol/kg)	1.307	1.317
Ca (mmol/kg)	0.6	0.6
Mg (mmol/kg)	1.481	1.497
Cl (mmol/kg)	117.9	119.1

③ まとめ

HDB-2 号孔において取得した地下水化学データを利用して、混合・マスバランスおよび水-岩石反応を考慮したモデル化を試行した。その結果、今回用いた手法は、今後の地球化学のモデル化において有効となる可能性が示唆された。

今後は、データ取得とモデル化を繰り返すアプローチを継続することにより、地質環境モデル化手法の確立を目指す。

参考文献

- 核燃料サイクル開発機構(2002): 幌延深地層研究計画平成 13 年度調査研究成果報告, サイクル機構技術資料, JNC TR1400-2002-004.
- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J. (1999). User's guide to PHREEQC (Version 2) - A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Water-Resources Investigations Report 99-4259, USGS, p.312.
- Plummer, L.N., Prestemon, E.C. and Parkhurst, D.L. (1994): An interactive code (NETPATH) for modeling NET geochemical reactions along a flow PATH-Version 2.0. USGS, Water-Resources Investigation Report 94-4169, p.130.

2-4) 岩盤力学モデル

① 課題と計画の概要

地質構造モデルおよび試錐調査の結果に基づき、岩盤力学モデルの逐次更新および地下施設建設による割削影響の予測を行う。

平成 14 年度は、平成 13、14 年度の調査結果に基づき現時点で想定しうる岩盤力学的概念モデルを示した。なお、本モデルは、地下施設建設時の影響範囲を考慮し、研究所設置地区内を対象として検討している。

② これまでの成果

i) 対象地域の岩石および原位置岩盤物性

岩石および岩盤物性からの概念モデルの検討を行うため、平成 13 年度と 14 年度の試錐孔をグループ化(大曲断層西側領域：HDB-1, 3 孔、大曲断層東側領域：HDB-2 孔および HDB-4, 5 孔)し、比較した結果を図 3.6-46 に示す。

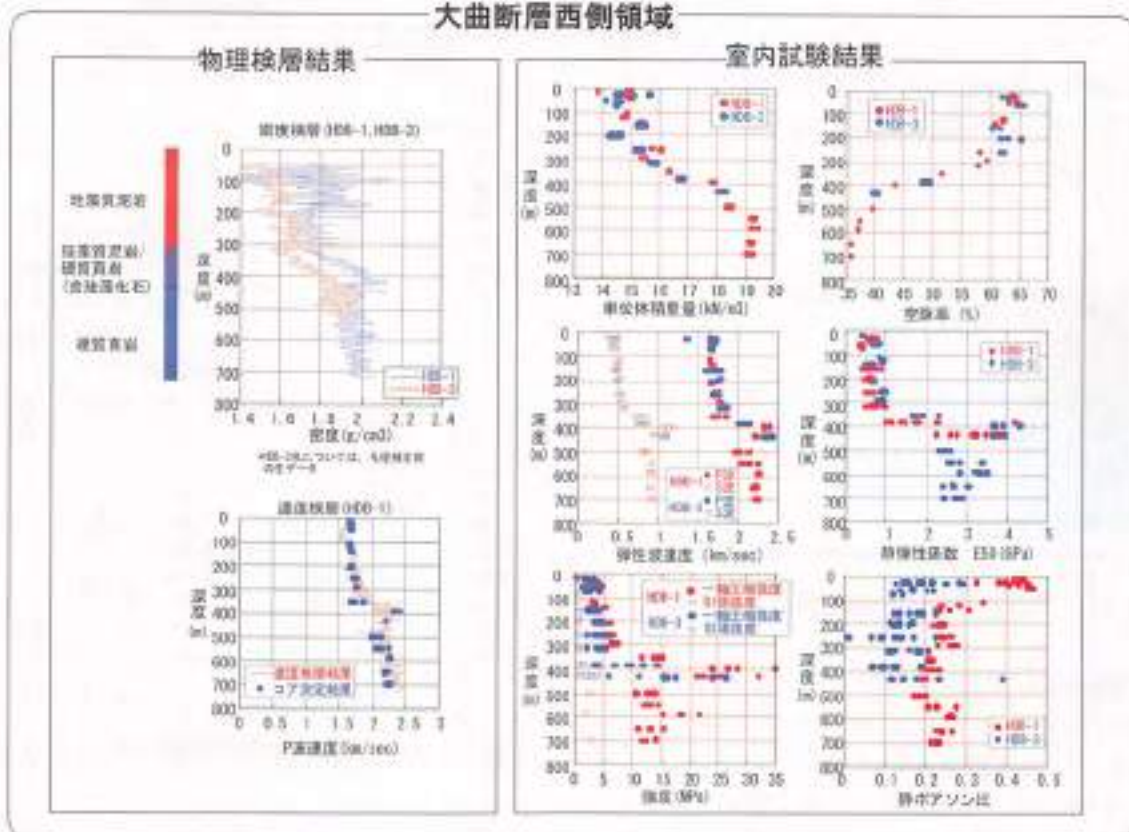
まず、大曲断層(推定)の西側領域に位置する HDB-1, 3 孔の物性分布を述べる。

- ・ 岩石物性値の深度方向の変化は、地質的な区分(珪藻質泥岩、珪藻質泥岩/硬質頁岩、硬質頁岩)と良く対応する。また、その変化は連続的である。
- ・ 物性値の深度方向の変化には、程度の大小はあるものの深度依存性が認められる。深度方向の物性値変化が最も大きいのは遷移帯の部分であり、次いで珪藻質泥岩、硬質頁岩の順となっている。
- ・ 原位置の音波検層結果とコアの弾性波速度測定結果を比較すると、両者の値は良く一致している。いずれの場合も鉛直方向の弾性波速度を例れていることから、少なくとも HDB-1, 3 孔が位置する地点では割れ目が原位置岩盤の变形特性に与える影響は少ないと思われる。
- ・ HDB-1 と HDB-3 孔は、水平距離にして 500m 程度離れているが、静ポアソン比を除く室内試験の物性値の深度方向の変化およびその絶対値、物理検層結果で得られている密度等の深度分布と絶対値はいずれも非常に良く一致している。したがって、少なくとも HDB-1, 3 孔を含む領域において、同じ岩盤物性値を有する地層が水平的に分布していることが想定される。

一方、大曲断層東側の領域(HDB-2 および HDB-4, 5 孔)の物性分布の特徴を以下に述べる。

- ・ 大曲断層西側領域と同様に、物性値の深度変化は、地層の区分と良く対応する。
 - ・ 室内試験から得られた物性値は、HDB-2, 4 孔の深度 400m 付近と HDB-2 孔の最深部(600m 以深の部分)で深度方向の変化傾向が変わっている。これらの地点では、割れ目が急激に増加しており岩石物性もその影響を受けている可能性が高い。したがって、これらの領域を除くと、割れ目の少ない硬質頁岩の部分では深度方向の物性変化は小さいものと考えられる。
 - ・ 強度・変形特性については、西側領域に比べ局所的なばらつきが大きい。特に 200m 程度までの浅い部分で顕著である。
 - ・ 速度検層結果と室内の弾性波速度測定結果は、定性的な変化傾向は大曲断層西側領域と同様良く一致している。しかし、大曲断層西側領域と比べ、コアと原位置岩盤の速度差が大きい部分が深度 100~400m 程度の範囲で認められる。これは、硬質頁岩が硬いため相対的に岩盤中に存在する割れ目の影響が強く表れているものと思われる。
 - ・ 密度検層結果を見ると、少なくとも HDB-4 孔と HDB-5 孔は定性的・定量的に良く一致している(水平距離で約 600m 程度)。また、内試錐孔と 6km 程度離れた HDB-2 孔と比較した場合にも、静ポアソン比を除くと物性値の深度変化傾向並びにその定量的な値は類似している。
- なお、静ポアソン比の違いについては、平成 13 年度の試験と整理法が違う(ポアソン比算出の応力レベルが異なる)こともあり現在検討中である。
- 以上のような比較・検討結果に基づき、現時点で、研究所設置場所が含まれる大曲断層西側領域の岩盤物性に関する第 1 次モデルは以下のような特徴を有する。
- ・ 地表~深度 700m 程度の範囲においては、珪藻質泥岩、(珪藻質泥岩/硬質頁岩)、硬質頁岩で構成されると考えられ、各層の境界に断層や地質境界面等の不連続構造を想定する必要はない。
 - ・ 物性値の深度依存性の度合いは、遷移帯 > 珪藻質泥岩 > 硬質頁岩の順に大きい。
 - ・ 物性値については声間層が最も小さく、稚内層が最も大きい。

大曲断層西側領域



大曲断層東側領域

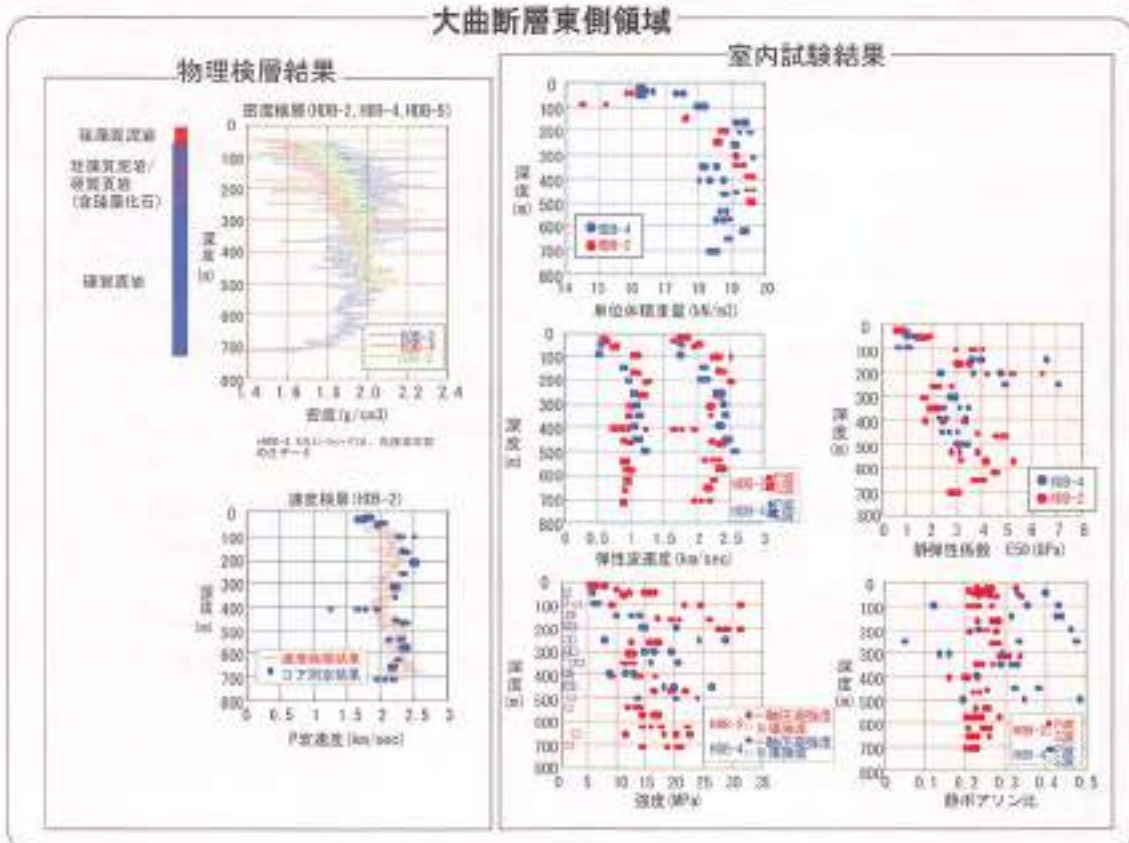


図 3.6-46 各種岩芯室内力学試験・物理検層結果

図 3.6-47 に上記の考え方に基づく概念的なモデルを示す。今後はこれまでに得られている不連続面の情報(EMI 検層結果等)分析, 多孔質媒体としての三軸応力下での短期・長期挙動の検討並びに平成 15 年度以降の試験調査結果を取り込んでモデルを更新していく。



図 3.6-47 大曲断層西側の岩盤力学的概念モデル

ii) 対象地域の初期応力場

物性評価と同様, 大曲断層(推定)の西側・東側領域に分けて比較検討を行う。

図 3.6-48 に水圧破碎法による測定結果とともに, ボアホールブレイクアウト(試験孔壁の破壊)が発生している事実から, 最小主応力値を土被り圧と等しいと仮定し破壊条件式を介して推定した水平面内主応力値の深度分布及び水平面内最大主応力の方向を示す。

大曲断層西側領域(HDB-1 孔と HDB-3 孔)については, 概ね以下のような傾向である。

- ・水圧破碎法で得られた最小主応力値は, 単位体積重量から推定される土被り圧とほぼ等しい。
- ・水圧破碎法による測定およびボアホールブレイクアウトの状況から, 水平面内最大主応力方向は深度 200m より深い領域ではほぼ東西方向である。

大曲断層東側の領域(HDB-2 および HDB-4, 5 孔)については, 以下のような傾向である。

- ・大曲断層西側領域と同様, 水圧破碎法で得られた最小主応力は土被り圧とほぼ等しい。
- ・HDB-4, 5 孔では深度 400m 程度までの範囲の水平面内最大主応力方向はほぼ東西である。HDB-2 孔では南北に近い方向であった。また, HDB-2 孔深部(500m 以深)で発生したボアホールブレイクアウトの方位は深度と共に回転している。ただし, その原因については特定できていない。



図 3.6-48 初期応力測定結果(HDB-1, 2, 3, 4, 5 孔)

以上のような HDB-1, HDB-3 孔の応力測定結果の比較・検討から, 研究所設置場所近傍の応力場については, 水圧破碎法の結果並びにボアホールブレイクアウトの発生状況から考えて, 水平面内主応力方向が深度 500m までほぼ東西方向で変わらないものと推定される。

初期応力場を考える上でもう一つ重要なことは, ボアホールブレイクアウトのような破壊現象が各試験孔で見られている点である。この検討に当たり, 図 3.6-49 に各孔で実施した X-Y キャリパーの結果を示す。ボアホールブレイクアウトが見られる領域は, 試験孔が異方的に変形している領域と一致している。これまでは, 測定データの品質保証の観点から水圧破碎法の前提条件(割れ目のない均質な場所)を考慮し試験区間を設定したが, 施設設計などの観点からは, このような破壊現象が生じている領域ではどの程度の応力が作用しているかを把握することが重要と考えられる。

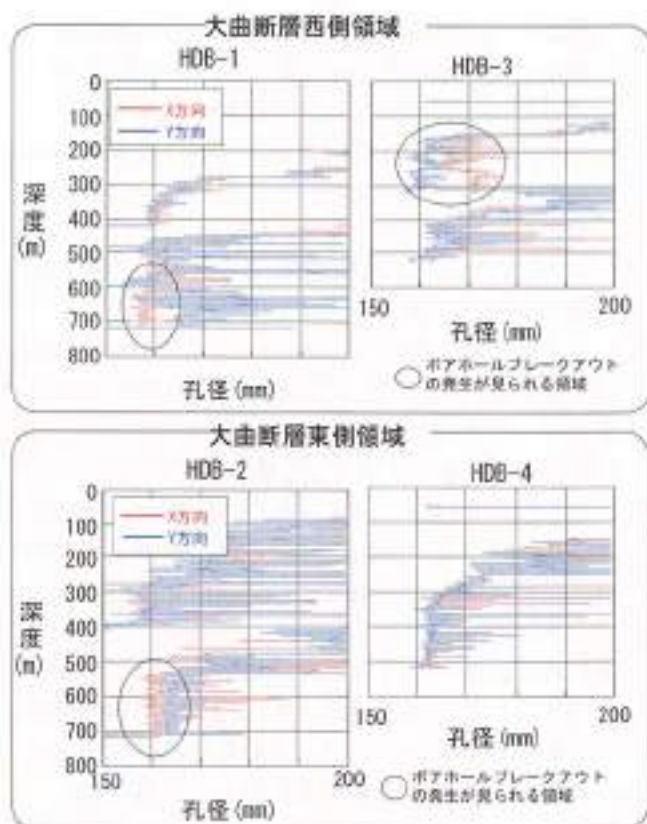


図 3.6-49 X-Y キャリパー検層結果
(HDB-1, 2, 3, 4 孔)

③ まとめ

平成 14 年度は、研究所設置地区を対象とした概念的な岩盤力学モデルを構築した。今後は、平成 15 年度の試錐調査結果等に基づき、平成 14 年度構築した概念モデルの更新を行う。

3) 調査技術・調査機器開発

3-1) 試験孔掘削のための技術

① 課題と計画の概要

平成13年度に実施したAE法による応力測定時の一軸圧縮強度測定の結果などから、試験孔に対して鉛直方向および水平面内の各方向において、岩石物性に関する力学的異方性が存在する可能性が示され、初期応力の方向とともに岩盤の力学的異方性に関する情報を取得することが課題の一つとなっている。

岩盤の力学的異方性に関して検討するためには、地層の方向や傾斜に関する情報が不可欠である。これらの情報を得るためには、定方位岩芯採取、ボアホールテレビ観察が用いられることが多い。平成13年度の試験調査の結果、試験孔の崩壊を防ぐためには適切な泥剤を使用する必要があり、この場合には鮮明なボアホールテレビ画像が得られないことがわかっている。そのため、平成14年度は採取した岩芯から地層の方向・傾斜に関する情報を取得する技術として、定方位岩芯採取を試みた。

また、試験孔が自立する結晶質岩と異なり、軟質な堆積岩でかつ、石油や天然ガスの賦存が考えられる地質状況下では、掘削流体として泥水の使用、掘削後も長期間試験孔を維持するためのケーシングパイプの設置など、掘削や試験孔の仕上げ手法に制約が生じる。しかし、試験孔掘削時に泥水を使用することは、泥剤が地下水の水理特性や地球化学的特性に大きく影響を与える。さらに、ケーシングパイプを固定するために使用するセメントやセメント添加剤も地下水の水理特性や地球化学的特性に大きく影響を与えることから、地下水の水理特性や地球化学特性に与える影響が小さくかつ、孔壁の崩壊防止やスライムの排除が良好に行われ、安全な掘削ができる掘削流体やセメントミルクに関する検討を行った。

② これまでの成果

i) 定方位岩芯採取

定方位岩芯の採取手順は以下の通りである。

- ・専用のアウトチューブ（非磁性体）を掘削深度まで降ろし、インナーチューブ上端に傾斜測定器をセットする。
- ・傾斜測定器を付けたインナーチューブが掘削深

度まで下りた段階で、タイマーセット時間まで掘削し傾斜測定終了後に岩芯を回収する。

- ・岩芯がインナーチューブに収納される際に、インナーチューブ先端の岩芯リフターに取り付けられているナイフでついた傷の方位を、測定した傾斜方位で確認し岩芯の方位を固定する。

実際に用いた定方位岩芯採取システムの概念図を図3.6-50に示す。

定方位岩芯の採取は、HDB-3, 4, 5孔において150m以深で50mおきを目安に、地質状況や試験孔の状況等から、できるだけ亀裂のない箇所において岩芯採取が可能と思われる数m程度の区間で実施した。

定方位岩芯採取の結果、岩芯採取率は、HDB-3孔は81%、HDB-4孔は96%、HDB-5孔は100%と良好であったが、採取した定方位岩芯には亀裂が存在し、岩芯方位を掘削長全体にわたって特定できない、室内物性試験に十分な長さの亀裂のない岩芯を採取できないなどの理由により室内物性試験やAE測定に必要な全てのサンプルを採取するには至らなかった。また、定方位岩芯採取を行う場合には、掘削ツールの人替に時間がかかるなど、試験調査全体の工程に影響を与えることが明らかとなった。

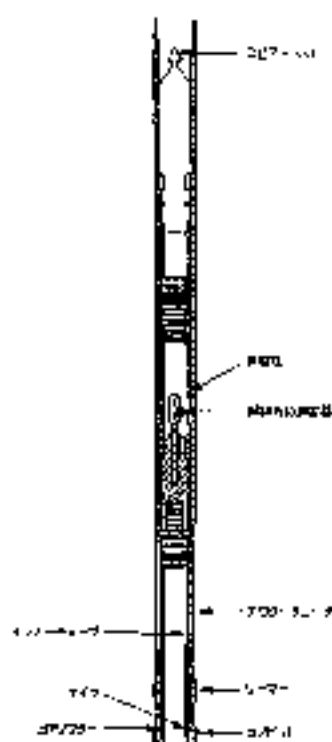


図3.6-50 定方位岩芯採取システムの概要

ii) 掘削流体に関する検討

観延地域における調査では、堆積軟岩を対象としていることから、堆積岩を対象とした試験掘削に関する検討を行い(池田ほか, 2000; 島田ほか, 2001)、数種類の泥水の適応性の確認を行った。その結果、シリケート泥水は、試験掘削時に孔壁の膨潤を抑制する効果が高いこと、掘削後の孔内洗浄により泥壁を除去できることから、試験孔を用いた調査試験への影響が少ないことが明らかとなった。しかしながら、シリケート泥水は保孔の性能を発揮するためには、高いpH環境下(pH11程度)で使用する必要があり、試験現場での取り扱いが困難である問題も指摘された。また、ベントナイト泥水は、石油探査や地熱掘削の分野で一般的に用いられており、取り扱いが容易である泥水の一種であるが、試験掘削後に泥壁を除去することが困難であるため、試験孔を用いた調査への影響の評価が必要であった。

平成13年度に掘削したHDB-1,2孔では、当初想定していたよりも粘土鉱物の含有量が少ない地質であったことから、膨潤の危険性は低く、シリケート泥水を用いなくても試験掘削は可能であると判断し、清水による掘削を試みた。しかしながら、試験孔の孔径拡大、岩芯ハールルの切断、仮ケーシング落下などの孔内トラブルが生じたため、ベントナイト泥水に代替掘削を実施した。そのため、掘削流体としての清水の適用性に関して十分な知見が得られなかった。このことから、HDB 3,4孔では、掘削流体としての清水の適用性を確認するため、50mおきに簡易キャリパーを実施し、孔径拡大の確認を行った。

その結果、両孔とも、約50mの掘進につき20mm程度の孔径拡大が生じることが確認されたことから、清水掘削では試験孔を用いた調査に必要な孔径の維持が難しいことが明らかとなった。

清水掘削による孔径拡大の影響を確認後は、岩壁の透水性や地下水の地球化学的特性に与える影響ができるだけ小さな泥水として希薄なベントナイト泥水(約6wt%)を選択し、掘削を継続した。希薄なベントナイト泥水により形成された泥壁は、水理試験時に与えるインパクトにより泥壁を剥離した事例が報告されている。ベントナイト泥水使用後は、掘進率も安定し、著しい孔径拡大も見られなかった。また、掘削中のトラブルも生じなかった。

iii) 試験孔仕上げに関する検討

HDB 3,4,5孔については、試験調査終了後に長期モニタリング装置を用いた地下水の水圧観測あるいは地下水の採水を計画していることから、試験孔の仕上げ方法は、ケーシングセメンチング方式を採用した。ここでケーシングセメンチング方式とは、各段階の掘削毎にケーシングを降下してフルホールセメンチングを行い、ジェットパーフォーレーター(火薬)を用いて穿孔し、この穿孔位置にMPシステムをセットして試験を行う工法である。

フルホールセメンチングを実施するためには、ケーシングを孔壁に固定するセメントやセメント添加剤が必要となるが、これらは地下水の水理特性や地球化学特性にできるだけ影響を与えないものになければならない。したがって、セメントへは添加剤を加えずに、セメントと水だけのセメントミルクを使用した。HDB-1,2孔では、セメントボンド検層の結果、セメントが十分固化していないと考えられる区間が認められた。これは、試験掘削時に孔壁が拡大した部分のベントナイト泥水を排出できなかったこと、セメントミルクの粘性が高く、7インチと4-1/2インチケーシングパイプの2重管の部分でクリアランスが狭くなることで、セメントミルクが十分に循環できなかったためと考えられ、セメントミルクの選定とともに、ケーシングプログラムについても検討する必要があった。この結果から、HDB-3,4,5孔では、ケーシングプログラムを検討し、最終ケーシングパイプにライナーハンガーを採用し2重管となる部分を短くした。さらに、セメンチングが不十分であった理由として、セメントミルクの比重が高く、セメントミルクの地層内の浸入が生じたためと考えられたことから、HDB 3,4,5孔では、セメント、水、ベントナイトを混入したベントナイトセメント(ベントナイトを混入することによりセメントミルクの比重をセメントと水だけのセメントミルクより低くしたもの)を用いた。

その結果、洗部の2重管部分以外については、ほぼセメンチングできたことがセメントボンド検層により確認された。

③ まとめ

定方位岩芯採取により室内物性試験用のサンプルを採取する方法を試行した結果、

- ・掘削する部分の地質状況を事前に把握できていないと室内試験に必要な岩芯を採取することが難しい
- ・調査を円滑に進めるという観点から使用する定方位岩芯採取システムの改良が必要

といった課題が明らかになった。

掘削配水については、ベントナイト泥水は孔径拡大を抑制し、かつ円滑な試験掘削を行う上で有効な配水であることが確認されたが、岩盤の透水性や地下水の地球化学特性に与える影響については、十分に評価できていない。今後は、各調査手法の開発・改良とともに、地質環境に与える影響をより低減できる配水に関する検討が必要である。

試験孔仕上げに関しては、ケーシングを固定するセメントミルクの組成に関する検討や設置するケーシングプログラムに関する検討に加えて、ケーシングを設置せずに地下水の水圧・水質長期モニタリング装置する方法に関する検討が必要である。

参考文献

- 池田剛生、永井保弘、荒屋智史、重野未来、大島和夫、阿部順之、徳崎成幸、三川 晃、齋藤茂幸(2000)：甲種岩地域における試験掘削に関する調査・試験、サイクル機構技術資料（契約業務報告書；三菱マテリアル資源開発株式会社）、JNC T31440-2000-003。
- 島田邦明、奥田 悟、安部隆一、菊池一男、大谷 次(2001)：地質岩地域における試験掘削に関する調査・試験（その2）、サイクル機構技術資料（契約業務報告書；帝石油井工業株式会社）、JNC T31440-2001-001。

3-2) 試験孔を用いた調査試験のための技術

① 課題と計画の概要

本地域の岩盤中には、これまでの石油や天然ガス調査において、メタンを主成分とするガスの存在が示されている。このことは、平成13年度に実施した試験孔調査においても確認されている。

溶存ガスを含む地下水が存在する堆積岩を対象とした試験掘削では、孔壁保護および掘削中におけるガス湧出の抑制の観点から泥水を使用するが、このような試験孔での過剰な注水あるいは加圧行為は、目詰まりによる岩盤の透水性の低下を促進すると考えられる。一方、過剰な減圧あるいは揚水行為は、試験孔内あるいは岩盤中での溶存ガスの気泡化をもたらすことにより、試験結果の解釈を困難とし(図3.6-51(a), (b))、最悪の場合はガスの湧出により試験の実施が不可能となる(図3.6-51(c))。そのため、水理試験データの品質低下を抑制するための試験方法に関する検討を行うとともに、水理試験装置の改良を実施した。

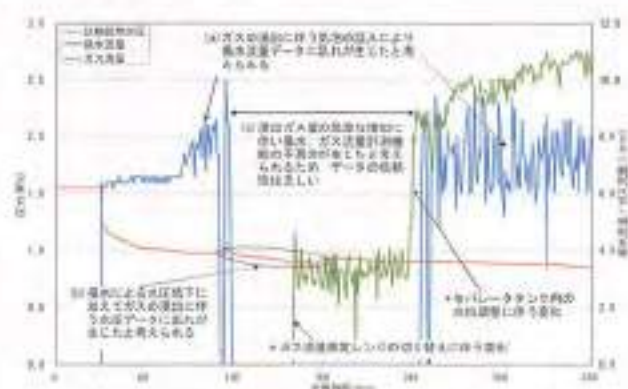


図 3.6-51 揚水試験時に試験区間で溶存ガスの遊離が生じた例

② これまでの成果

i) 溶存ガスを含む地下水環境下での試験方法に関する検討

加圧による透水性の低下と減圧による溶存ガスの遊離という2つの相反する課題に対して、揚水/減圧手法を基本とし、圧力低下の影響が小さな試験から大きな試験(例えばパルス試験からスラグ試験、スラグ試験から揚水試験)に移行する方法を採用した。これにより、試験区間の概略の透水性を把握するとともに、各試験での圧力低下に伴う溶存ガスの遊離の有無を確認することで、溶存ガスの遊離に伴う試験データの品質低下を極力

抑えた試験条件の設定が可能となる。この考えに基づき実施した試験結果の一例(HDB-3孔:深度454.50~520.00m)を図3.6-52、図3.6-53に示す。

図3.6-52に示すスラグ試験では試験開始後から水位が回復する際に溶存ガスの遊離による影響を示す乱れは認められない。このスラグ試験結果をもとに揚水流量600cc/min、水位低下量を10mと設定した揚水試験では、揚水開始後6時間経過してから500cc/min程度のガスが計測され、同時に電磁流量計のデータが不安定になってきた(図3.6-53)。しかしながら、容積式の流量測定装置ではほぼ安定した値が得られていることから、所定の流量による揚水が実施できていたものと考えられる。また、試験区間内の水圧データに図3.6-51に見られるような著しい圧力変化は確認されていないことから、試験区間内でのガスの遊離による影響は小さいと考えている。さらに、両試験を单相状態とみなして算定された透水係数はともに 10^{-9} m/sオーダーであり、両者の解析結果は整合的である(表3.6-9)。

以上のことから、今回の試験は、单相状態として扱えると考えられる。

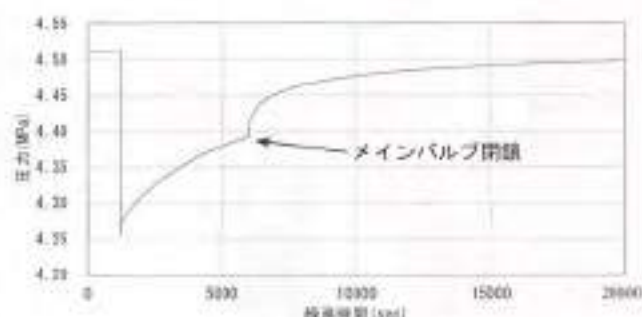


図 3.6-52 スラグ試験結果

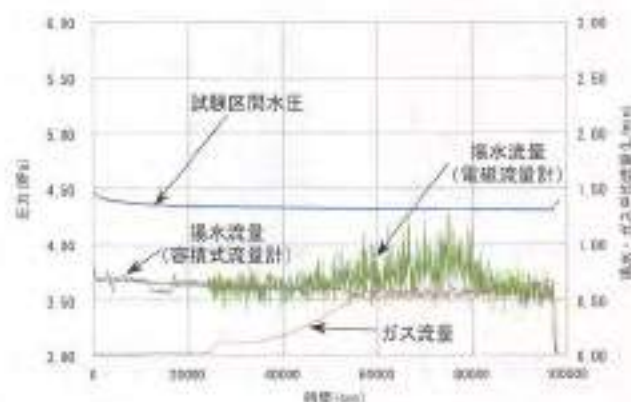


図 3.6-53 揚水試験結果

3.6.3 地質環境モニタリング技術の開発

1) 試験孔を用いたモニタリング技術開発

① 課題と計画の概要

地下施設建設前から試験孔を用いて、地下水の水圧、水質を観測し、その季節変動、降雨に対する応答等のいろいろな周期の自然変動を把握するとともに、試験調査や地下施設の建設による地下水の水圧や水質の変化を把握する。

平成12年度末から13年度にかけて幌延深地層研究計画において適用できるモニタリング装置を検討した。平成14年度にはその検討結果をもとにHDB-1孔へ長期モニタリング装置として、カナダWestbay社製のMulti Piezometric system(以下、MPシステム)を設置し、地下水の水圧の連続観測を平成14年12月から平成15年2月まで実施した。

② これまでの成果

i) HDB-1孔の現状

試験孔は掘削後、崩壊を防ぐためにケーシングパイプをセメントにより固定して保孔を行っている。そのため、試験調査終了時には、試験孔を用いた長期モニタリングを実施するために、ケーシングパイプにジェットパーフォレーションによる穿孔を実施し、長期モニタリングの観測区間を設定した(表3.6-10、図3.6-56)。

表 3.6-10 現状の観測区間

深度 (m)	区間 No.	区間長	穿孔数
447~449	1	2m	14
479~481	2	2m	14
524~526	3	2m	14
559~561	4	2m	14
595~597	5	2m	16
624~626	6	2m	10
649~651	7	2m	14
674~676	8	2m	10
699~701	9	2m	14

※網掛け部は、平成14年度に連続モニタリングを実施した区間

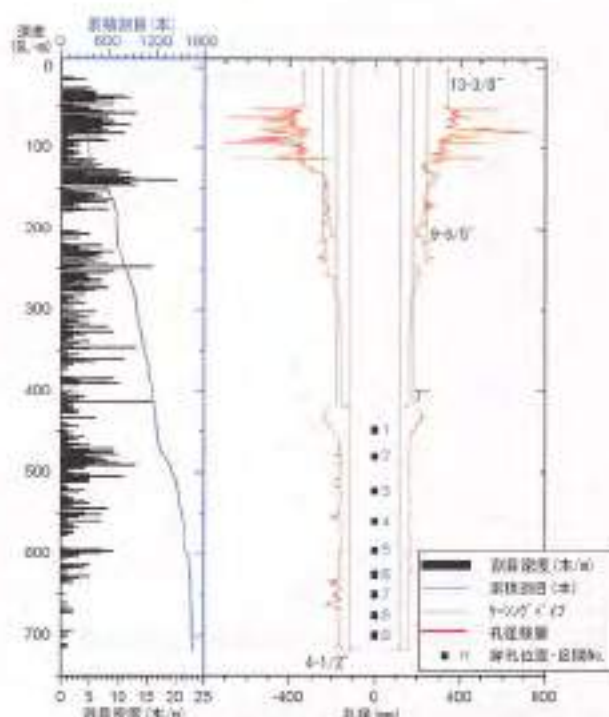


図 3.6-56 HDB-1孔の試験孔仕上り状況

ii) MPシステムの設置について

HDB-1孔は、研究所設置場所近傍に位置する試験孔であることから、地下施設建設の地下水水圧や地下水水質への影響を把握するためにMPシステムを設置した。平成14年度においては、HDB-3孔の試験孔掘削や試験孔内での調査による水圧変化を観測することを目的に、多区間での地下水水圧の連続観測を優先して実施することとした。

図3.6-57にMPシステム設置時に観測した水頭分布を示す。HDB-1孔の試験調査中に実施した水理試験結果では、全体として被圧状況下にあると推定していたが、MPシステム設置時に観測した水頭分布では、深度650m付近に低水頭(約GL-8m)の区間が観測された。

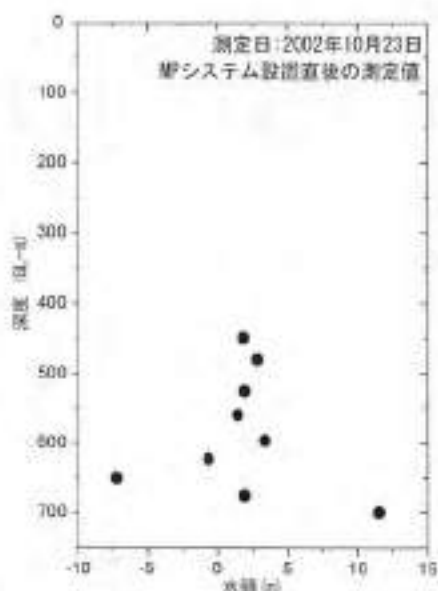


図 3.6-57 HDB-1 孔における間隙水圧の深度分布

iii) 連続モニタリングの区間設定について

連続モニタリングを実施した 4 区間は、深度約 400m 以深の 9 区間の中から地質学的特徴や水理試験結果、MP システム設置時の圧力測定の結果などをもとに選定した。以下に選定理由の概略を示す。カッコ内は MP システムの観測ポートの設置深度である。

・ 445.0～475.8 (448.85) m

本区間は、HDB-1 孔近傍で掘削された HDB-3 孔の試錐孔掘削や水理試験などの影響を観測することを主目的とした。HDB-3 孔は、地表から深度 520m まで掘削されたが、HDB-1 孔の調査結果では表層から 400m 付近までは均一な岩相が分布していること、水理試験結果においては難透水性であったことから HDB-1 孔の地表から 400m 付近までは、HDB-3 孔の掘削影響はおよばないと予想された。また、声間層と稚内層の遷移層(435m 付近)は連続性が良く、HDB-3 孔の掘削影響が伝播し得ると考え選定した。

・ 556.9～592.4 (560.80) m

HDB-1 孔で実施した水理試験位置を含む区間であり、水理試験結果の評価を行うことを主目的とし選定した。

・ 593.3～620.8 (597.15) m

HDB-1 孔の試錐調査において確認された深度 595m 付近の割れ目の多い区間での透水性を把握するために選定した。

・ 646.9～670.8 (650.85) m

MP システム設置時に観測された低水頭の区間

を対象とし、長期的に観測することで低水頭の場合であるのか、MP 設置時に生じた結果であるのかを確認することを目的として選定した。

iv) 連続モニタリング結果

上記の 4 区間において、実施した連続モニタリングの結果を図 3.6-58 に示す。図の通り、深度 650m 付近に設置したモニタリングの結果では、他の深度に比べ低水頭であり (MP システム設置時からでも約十数 m 程度の水頭低下が認められる)、被圧条件下にない間隙水圧の区間が存在することが確認された。また、連続モニタリング中に認められる、間隙水圧のバルス状の変動については、HDB-3 孔での掘削状況や調査状況、本地域の地震、大気圧の変動との比較を行ったが、現状では明確に相関を示す現象・事象は認められていない。

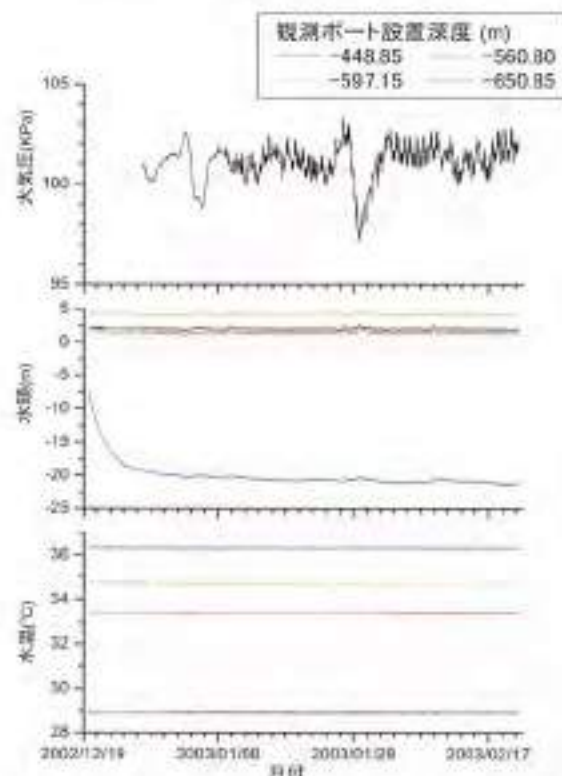


図 3.6-58 HDB-1 孔におけるモニタリング結果

③ まとめ

これまでの連続観測の結果では、HDB-3 孔での試錐調査の影響と考えられる間隙水圧の変化は認められていない。さらに、深度 650m 付近には、低水頭区間が存在しており、これまでの調査結果(全体として静水圧もしくは、やや被圧条件下にある)とは異なる結果が得られた。

今後は、地下施設設置場所周辺で掘削された試
錐孔を用い、地下施設建設前の地下水の水圧や水
質の変動の状況を把握できる観測体制を構築する。

さらに、地下水流動場を理解するためには、
HDB-2孔で確認された高圧層やHDB-1孔で確認され
た低水頭に関する情報取得が重要であることから、
それらの試錐孔においても連続モニタリングを実
施する予定である。

2) 遠隔監視システムの開発

① 課題と計画の概要

陸域変動による地質環境の変化に関する研究として技術開発が進められているアクロス(Across: Accurately Controlled Routinely Operated Signal System)(國友ほか, 1999; 熊澤ほか, 2000; 中島ほか, 2000; 横山ほか, 2000; 陸域地下構造フロンティア研究プロジェクト, 2001)を応用した遠隔監視システムを、地下施設の建設前から建設中、建設後まで稼働させ、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連続波信号と独自の解析手法を用いることにより、従来の手法より桁違いに精度良く地下の構造や状態の把握を実現させるシステムである(図3.6-59)。

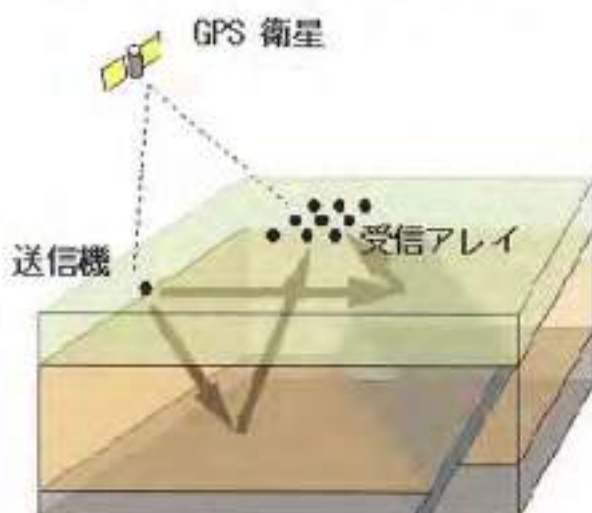


図 3.6-59 遠隔監視システムの例

本システムの開発においては、まず送信機から精度の高い信号を送信する技術の改良と、受信機が信号を精度良く受信できるように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。その後、モニタリングシステム全体の調整・設置を行い、データの連続取得を開始し、地下施設建設に対する感度の確認などのシステムの有効性の検証と改良を行う予定である。

アクロスでは、弾性波や電磁波の伝播の変化を受信することにより、岩盤や地下水の変化を遠隔監視する。どの程度の大きさの変化が検出できるかは観測データの S/N 比に依存している。このた

め、まず当地域の環境ノイズを把握し S/N 比を見積る必要がある。

② これまでの成果

平成14年度は弾性波アクロスおよび電磁アクロス観測装置の設置に適した場所を選定するために研究所設置地区およびその周辺において、環境ノイズデータの取得および解析を実施した。

弾性波アクロスについては、平成14年度に実施した反射法地震探査の測定記録を用い、電磁アクロスについては、平成13年度に実施した電磁法探査の測定記録および平成14年度に実施中の電磁法長期観測記録を用いて、ノイズの時間空間分布を調査すると同時に、観測される信号の種類(直接波、反射波、表面波等)を把握し、実際にアクロス信号を送信した場合の、信号強度の空間分布や時間変化検出に必要な観測時間の見積りのために、信号伝播の試算を行っているところである。

アクロス技術を活用した新しい校正方法(鶴我ほか, 2002)により、平成13年度に購入した弾性波アクロス用孔内地震計の校正を実施した。

現在までに得られている電磁アクロス関係の解析結果を以下に示す。

i) 長期観測点における時間帯によるノイズ強度の違い(図3.6-60)

全データを100秒ごとに区切り、各区間の標準偏差を算出した。観測期間中の同じ時間帯の平均標準偏差を図中のA(電場)とC(磁場)に示した。また、各100秒区間の標準偏差が、しきい値(ここでは、電場: $3E-8V/m$, 磁場: $1E-11T$)を超えるサンプルの割合と高ノイズ出現率として図中のB(電場)とD(磁場)に示した。ノイズレベルは、日中(7時~17時)が高く、夜間の3~4倍程度の強度となっている。高ノイズ出現率は、ノイズ強度とほぼ同じ傾向を示す。このように時間帯によってノイズレベルが異なる場合には、重み付スタッキング(長尾ほか, 2002)が有効である。

ii) ノイズの大きい日と小さい日のスペクトルの比較(図3.6-61)

ノイズの小さい日は、電場: $0.01 \sim 1 (nV/km/\sqrt{Hz})$, 磁場: $0.01 \sim 1 (nT/\sqrt{Hz})$ の範囲であった。ノイズが大きい日と小さい日では、全般的に1~2倍程度のスペクトル強度の差があり、特に大きい日は小さい日の5~10倍の強度があることが見られる。

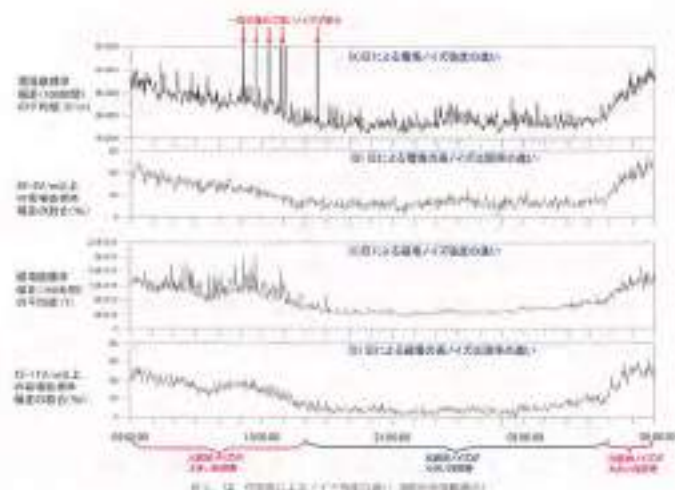


図 3.6-60 時間帯によるノイズ強度の違い
(電磁法長期観測点)

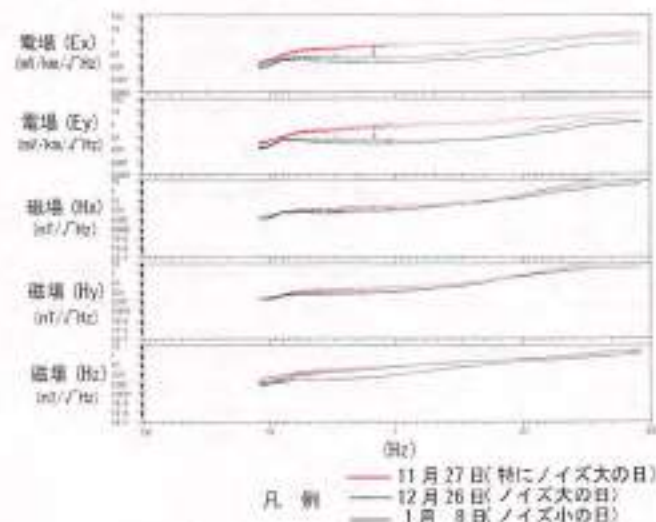


図 3.6-61 スペクトルの日による違い
(電磁法長期観測点)

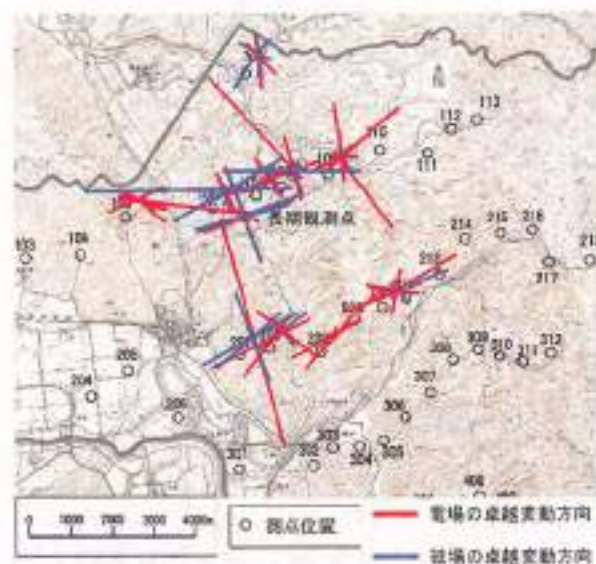


図 3.6-62 各解析点における電場・磁場の卓越変動方向

iii) 各解析点における電場および磁場の卓越変動方向図 (図 3.6-62)

電場・磁場の変動方向を確認するため、電場 2 成分・磁場 3 成分中の 2 成分について卓越変動方向を検討した結果、全般的に北東方向が卓越するが、一部で北北西方向に卓越するものも認められた。この卓越方向の違いは地下構造が異なることを示唆するものと考えられる。

③ まとめ

環境ノイズ測定に関しては現在解析を実施中であるが、平成 15 年度はそれらの結果を基に弾性波アクロス送信装置の移設の検討および受信装置の製作、電磁アクロス送信装置の製作等、遠隔監視システムの整備を行う。

参考文献

- 熊澤峰夫, 國友孝洋, 横山由紀子, 中島崇裕, 鶴我佳代子 (2000): アクロス: 理論と技術開発, および将来展望, サイクル機構技術, 9, pp. 115-129.
- 國友孝洋, 熊澤峰夫, 山岡新春 (1999): ACROSS における周波数変調の有効性と送信装置特性を考慮した変調波形の最適化, 日本地震学会講演予稿集, 1999 年度秋季大会, p. 171.
- 長尾大道, 中島崇裕, 熊澤峰夫, 國友孝洋 (2002): 観測時刻によってノイズレベルが異なる場合の最適スタッキング方法 - 電磁アクロスのテスト観測データを例にして, CA 研究会論文集, (印刷中)
- 中島崇裕, 國友孝洋, 熊澤峰夫, 横山由紀子 (2000): 電磁アクロスの開発と送信実験, 地震研究所彙報, 75, pp. 229-244.
- 陸域地下構造フロンティア研究プロジェクト (2001): 「陸域地下構造フロンティア研究」報告書, サイクル機構技術資料, JNC T87400 2001-008.
- 鶴我佳代子, 國友孝洋, 熊澤峰夫, 茂田直孝 (2002): ACROSS 送受信技術を用いた地震計二次校正新手法の提案 - 「簡単・正確・即実用」をめざして, 日本地震学会 2002 年秋季大会, p. 077.
- 横山由紀子, 熊澤峰夫, 國友孝洋, 中島崇裕 (2000): 精密に制御された電磁波を用いた 3 次元精密構造探査のためのデジタル信号波形の設計, 地震研究所彙報, 75, pp. 265-282.

3.6.4 深地層における工学的技術の基礎の開発

① 課題と計画の概要

幌延深地層研究計画における地下施設は、深度500mを目途に立坑を設置し、複数の深度に坑道を展開する計画である。

地下施設の設計・施工計画においては、施設を安全に建設でき、研究環境を確保できることが基本的な要件であり、地下施設における調査研究の内容のほか、地下施設の安全性を確保するために岩盤特性に応じた空洞の安定性を評価するとともに、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考慮して進めている。

② これまでの成果

1) 地下施設の配置計画

平成15年度の基本設計、平成16年度の実施設計に向けて、地下施設に求められている基本的な要件について検討し、アクセス方式を決定した。これに基づいて、坑道配置や断面・施工方法などについて概念案を提示した。

a) アクセス方式

地下施設のアクセス方式として、立坑案およびスパイラル坑道案について、工事量・用地面積・試験研究・見学施設・安全環境・工期・経済性の観点から比較検討した結果、工期・経済性の点で優れている立坑方式を採用する計画とした。

b) 立坑本数

幌延の地質環境を考慮して、地下施設の防災に関する基本的な考え方の整理・検討を行い、重大災害として火災が最も重要であるとの結果を得た。また、検討結果より防災基本コンセプトを「いかなる箇所でも火災等の災害が発生しても通気制御により安全区域を確保し、入坑者が安全に地表まで避難できる防災システムを構築すること」とした。これらを踏まえて、概略の防災対策を検討した結果、立坑方式では立坑3本が必要と判断した。

c) 坑道配置

深度500mを目途にアクセス立坑、換気立坑を設置し、中間部（GL-250m）、最深部（GL-500m）に周回する坑道を展開する。

立坑間の離間距離は、地上の工事用仮設備の配置等施工性を考慮して70m、その他の坑道間の離間距離は掘削径の3倍以上とした。

深度250m、500mには110m×180mの周回する坑道、深度125m、375mには立坑間を連絡する坑道を

配置した。周回する坑道の長辺方向は、最大主応力方向（東西方向）に配置する計画とした。また、周回する坑道の曲線半径は、掘削ブリの運搬方式をレール方式と想定し、半径30mとした。

換気立坑には、坑道換気時の風速0.5m/sを確保するために換気ファンを設置することとし、ガスの湧出が想定されることから安全性を考慮して、石炭鉱山等の事例を参考に換気立坑から分岐した専用坑道（L型）を設置する計画とした。地下施設のレイアウト案を図3.6-63に示す。

d) 坑道断面

アクセス立坑の断面寸法・形状は、研究内容・施工性・掘削機械等の搬出入を考慮し、内径6.5mの円形断面に、換気立坑は掘削時の最小施工可能寸法を検討し、内径4.5mの円形断面とした。

水平坑道の断面寸法は、坑道内からの試錐調査を考慮し内空幅4mとし、形状は岩盤強度が小さいことと施工性を考慮し、三心円馬蹄形断面とした。なお、坑道は試験内容により部分的に内空幅5mの三心円馬蹄形断面を設置する計画とした。

e) 施工方法

立坑の掘削工法は、機械掘削工法または発破工法によるショートステップ工法、水平坑道の掘削工法は、機械掘削工法（自由断面掘削機使用、レール方式によるブリ運搬）によるNATMを採用する計画とした。

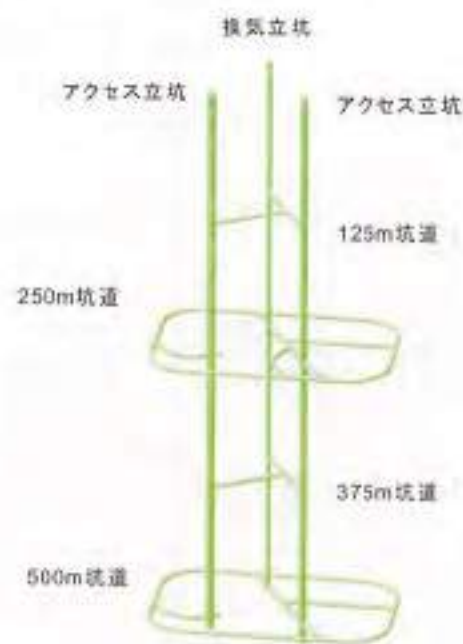


図3.6-63 地下施設のレイアウト（案）

ii) 空洞の安定性

平成13年度の試掘調査で得られたデータ等に基づいて、初期地圧の異方性を考慮した空洞の安定性評価を実施した。

a) 岩盤物性値の設定

解析に用いる岩盤物性値は、平成13年度の試掘調査で得られたデータ等に基づいて設定した。なお、粘着力については、モール・クーロンの破壊規準との整合性を図るため、一軸圧縮強度と内部摩擦角から算定した。また、引張強度については、一軸圧縮強度の1/10の値とした。初期地圧については、鉛直応力を上被り相当として水平応力を求めるための側圧係数を水圧破壊試験の結果(1.3~1.4)に安全率を考慮して1.5とした。設定した解析用物性値を表3.6-11に示す。

表 3.6-11 解析用岩盤物性値 (ND6-1 孔)

項目	単位	弾性係数		ポアソン比		せん断弾性係数		圧縮強度		引張強度	
		E (GPa)	ν	ν	G (GPa)	σ _c (MPa)	σ _t (MPa)	σ _c (MPa)	σ _t (MPa)		
1	0.1	15.0	0.2	0.15	5.6	11	3	91	9.1	13	
2	0.1	15.0	0.2	0.2	11	3	1	94	9.4	13	
3	0.1	10.0	0.2	0.2	4.0	3	1.5	14	1.4	15	

b) 支保仕様の設定

立坑の掘削コンクリートおよび坑道の吹付けコンクリートの設計基準強度は、一般的に用いられる普通コンクリートの強度(18~40MPa)に設定した。

立坑の掘削最小コンクリート厚は、既往の実績から40cmとした。また、坑道の吹付けコンクリート厚は、日本道路公団(1997)の地山区分および標準支保パターンに準拠して設定した。支保部材の解析用物性値を表3.6-12に示す。

表 3.6-12(1) 支保部材解析用物性値 (立坑)

物性値	ポアソン比	厚さ	設計基準強度	許容応力度
7.50	0.2	40 (D)	18	3
9.00			24	3
10.00			20	11
11.50			40	14

表 3.6-12(2) 支保部材解析用物性値 (坑道)

物性値	ポアソン比	厚さ	設計基準強度	許容応力度
1.00	0.2	15 (D1) 20 (D2)	18	3
1.30			14	3
1.50			28	11
4.00			48	14

c) 解析手法および解析モデル

解析手法として二次元の有限要素法(FEM)を採用した。有限要素法による掘削解析を実施するにあたり、岩盤の応力-ひずみ関係(構成則)には、完全弾塑性モデルを採用した。なお、切羽進行に伴う二次元効果を二次元に取り込む手法として、応力解放率を考慮する方法を採用した。この方法は、切羽の進行にあわせて掘削解放力を順次作用させるものである。

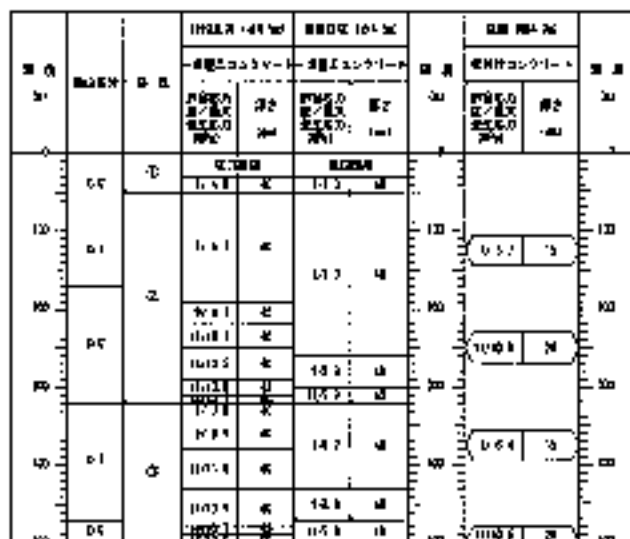
解析モデルの作成にあたり、断面形状の対称性から、立坑については断面形状の1/4を、水平坑道については断面形状の1/2をモデル化した。また、解析領域については、掘削壁面から境界までの距離を4D(D:掘削径あるいは掘削幅)とした。

岩盤および支保部材のモデル化については、岩盤を平面要素、支保部材をビーム要素にてモデル化し、岩盤は前述の通り完全弾塑性体、支保部材は線形弾性体としてモデル化した。なお、ここでの支保部材とは、立坑における一次掘削コンクリートおよび坑道における吹付けコンクリートのことである。

d) 解析結果およびまとめ

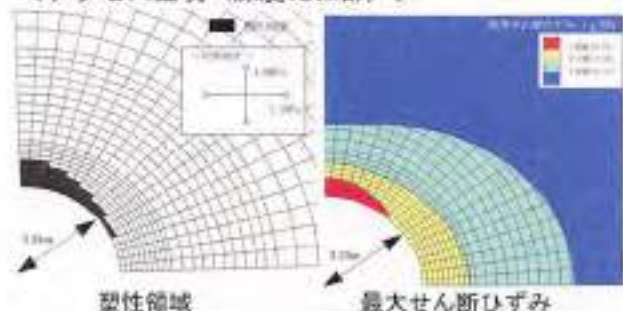
支保部材応力の詳細については、「第2次取りまとめ」同様、許容応力度法に基づくこととした。また、掘進長は立坑で2m、水平坑道で1mとした。各立坑および水平坑道における支保部材の発生応力は許容応力以下となるものの、一部の空洞周辺岩盤において認め領域(塑性領域もしくは限界せん断ひずみの上限値を越える領域)の発生が推定されたため、立坑・水平坑道ともロックボルトおよび鋼製支保上を設置することにより、岩盤の肌

表 3.6-13 解析結果



落ちや長期的な緩み領域の進展を防止する計画とした。支保仕様を決定するための解析結果を表3.6-13に、塑性領域分布図および最大せん断ひずみ分布図を図3.6-64に示す。

＜アクセス立坑（深度320m部）＞



＜坑道（深度250m部）＞

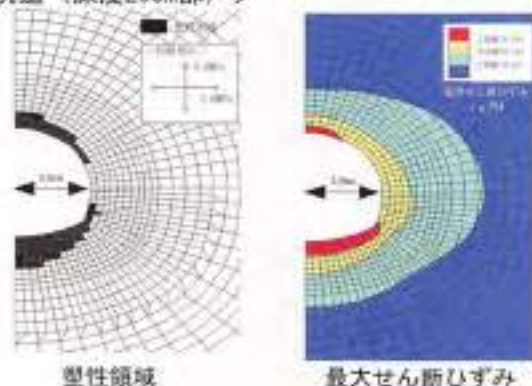


図3.6-64 塑性領域分布図および最大せん断ひずみ分布図

ii) 防災対策の検討

坑内の研究・作業環境や入坑者の安全を確保するために、防災を考慮した通気システムの検討を行い、通気網解析により検証を行った。

a) 通気システムの検討

坑内の環境を良好に保ち（発生するガスや粉塵等の有害物質を除去・希釈し、適切な温度や湿度を維持する）入坑者の安全を確保すること、および火災等の災害時にも地表までの安全な避難ルートを確認することを目的に、施工工程ごとの通気システムを検討した。

本地下施設ではガスの湧出が想定されるため、定常時はガス排出効果があり、非常時（ファン停止等）はガス発生抑制効果が期待される吸出換気方式を採用した。250m坑道貫通前は、各立坑の坑口に吸出用ファンを設置する各立坑単独の吸出換気方式を採用した。250m坑道貫通後は、各立坑坑口の吸出用ファンを撤去し、換気立坑から分岐し

た250m以深の坑道に吸出用ファンを設置する換気立坑による吸出方式（坑道換気システム）を採用した。なお、吸出換気方式では、切羽近傍の風速が小さくなるため小型の押込用ファンを併設し、切羽の作業環境を確保する計画とした。

図3.6-65に250m坑道貫通前の通気システムと250m坑道貫通後の通気システムを示す。



図3.6-65 地下施設掘削時の通気システムの段階的進展の例

b) 通気網解析

上記検討で設定した通気システムにより坑内環境が良好に保たれることを検証するために通気網解析を実施した。通気網解析は、風量解析、熱環境解析および火災時解析から構成される。図3.6-66に火災時解析の結果の一例を示す。解析の結果、以下のことが判明した。

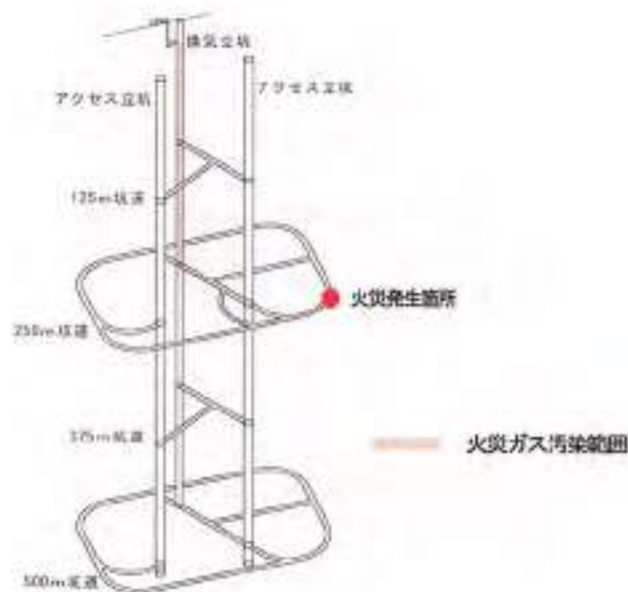


図3.6-66 火災時の解析例

- ・設定した通気システム（換気ファンの能力・風管径・風門の設置位置等）で適切な坑内環境を維持する風量（風速）を確保できる。
- ・火災時解析の結果、通気制御を行わない場合に坑内の気流は逆流の挙動を示すなど不安定になるが、適切な通気制御を行うことによって、火災ガスによる坑内汚染範囲を最小限に抑え、避難のための安全区域を確保できる。

③ まとめ

研究所設置場所を対象とした概略的な地下施設の配置計画・坑道内の調査研究・空洞の安定性評価・防災対策・施工方法等を検討し、基本的な施工計画案を提示した。

平成 15 年度は、平成 14 年度までの検討結果を踏まえ研究所設置場所を対象とした地下施設の基本設計を実施する計画である。

参考文献

日本道路公団(1997)：設計要領第三集 トンネル。

3.6.5 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

本研究では北海道北部地域の地震活動の特徴を捉え、地震の発生場としての幌延町周辺の地質構造等を把握するため、地震計を設置して地震の連続観測を実施する。平成14年度は幌延町内に地震観測用の機器を設置するための試錐孔(深度141m)を掘削し、孔底および孔口付近に地震計(東京測振社製NS、EW、UD方向3成分加速度計)を設置して観測を開始した(図3.6-67、表3.6-14)。

表 3.6-14 設置地震計仕様

地震計：東京測振社製サーボ型加速度計SA-355CTK
・水平2成分、上下1成分
・測定範囲0～±2048gal
・周波数特性0.1～100Hz
・感度15μA/gal
・固有振動数5Hz
アンプ：東京測振社製サーボ増幅器SAPR-303
データロガー：東京測振社製SAMTAC-801
・記録成分数6ch
・AD変換24bit
・時計部5同期
・データサンプリング200Hz

② これまでの成果

1) 地震計設置場所の検討

幌延町内に地震計を設置するにあたり、設置場所についての検討を行った。地震観測を実施するための地震計は軟弱な地盤を避け、地表のノイズの影響を低減させるため、可能な限り静かな環境の岩盤に設置することが必要である。また、今回は、震源決定等、解析時に他の研究機関の既存観測点(防災科学技術研究所 Hi-net)のデータ利用を考え、これらの観測点との相互の位置関係(表3.6-15、図3.6-68)を考慮して、幌延町の近傍に設置されているHi-netの観測点(豊富、幌延、天塩)からほぼ等距離の配置とした。これらを踏まえ、市街地を離れ、山間に位置する平成13年度の試錐調査(HDB-2孔)の敷地内を地震計設置用試錐孔の掘削位置とすることを検討した。HDB-2孔のコアの室内試験結果から、HDB-2孔付近の岩石の一軸圧縮強度は20～30MPa程度であり、その力学特性は国内に分布する一般的な新第三紀の堆積岩の強度を示すことから、HDB-2孔の敷地内を地震計設置用試錐孔の掘削位置とした(図3.6-68)。

表 3.6-15 幌延町近傍のHi-net観測点

観測点	緯度	経度	センサー深度
豊富	45.0997N	141.7872E	135m
幌延	45.0144N	142.0833E	100m
天塩	44.8925N	141.9288E	107m

*センサー深度は地表面からセンサーまでの深さを表す。
(防災科学技術研究所ホームページ Hi-net観測点情報より)

ii) 地震計の設置

地震計設置場所の検討結果に基づき選定したHDB-2孔の敷地内(44.9963°N, 141.9194°E)において、地表面から141.00mの試錐孔を掘削してケーシングを設置し、フルホールセメンティング仕上げとした。また、地震計の設置予定箇所の割れ目等の試錐孔内の状況を把握するためにアコースティックテレビュアー(ATV)を用いた超音波検層を実施し、コア観察およびATV検層の結果を参考に、比較的割れ目の少ない箇所を、地表のノイズの影響を十分に低減できることを考慮し、センサー深度を137.88mとした。試錐孔内のセンサーの傾きは、N方向に約1.9°、E方向に0.3°である。また、地上の地震計は地表面から1m掘り下げたセーラー内に設置した(図3.6-67)。

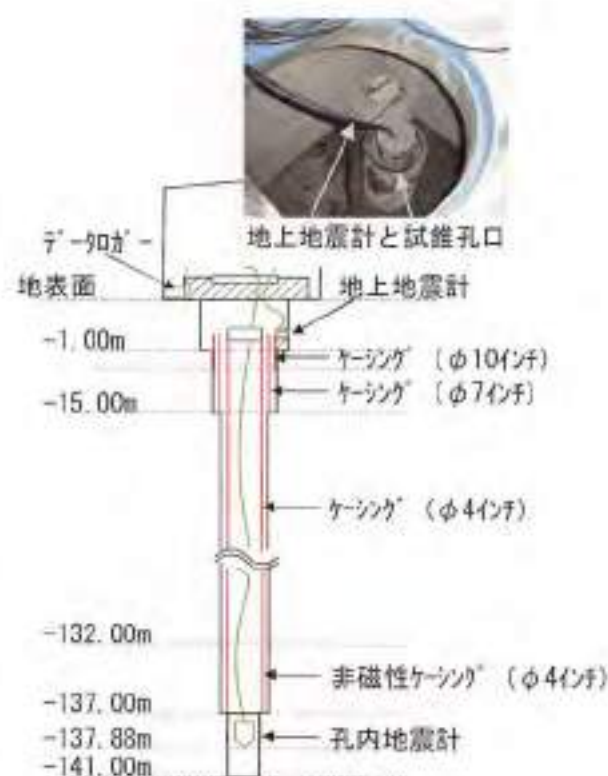


図 3.6-67 地震計設置の概念図

iii) 地震観測

試錐孔内および地上の地震計を用いて、平成 14 年 12 月下旬から地震の連続観測を開始した。図 3.6-68, 69 は平成 14 年 12 月 26 日に発生した観測点から約 29.5km 南東の北海道宗谷支庁中頓別町を震源とする非常に浅い地震を捉えた記録である。この記録からは、地表の加速度振幅に比べて地下での加速度振幅が低減していることが確認された。この結果は 1990 年 2 月～1998 年 3 月まで岩手県釜石鉱山において実施した地震観測から得られた結果（例えば、佐々木ほか、1999）と同様であった。



図 3.6-68 地震観測位置と平成 14 年 12 月 26 日に発生した地震の震央位置

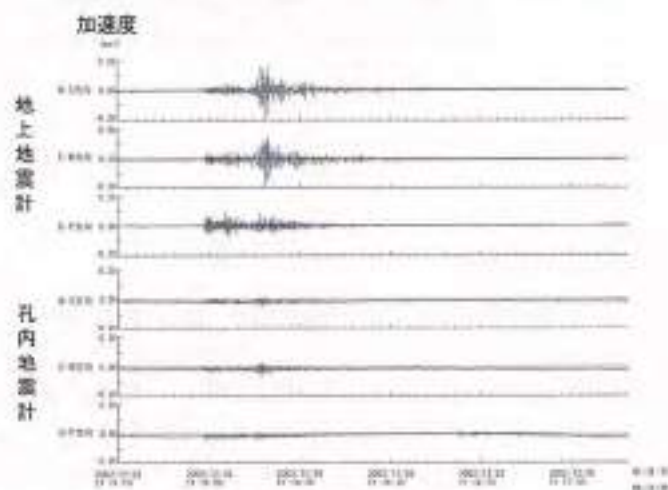


図 3.6-69 平成 14 年 12 月 26 日の地震観測結果

③ まとめ

幌延深地層研究計画における地震研究では、平成 14 年 12 月末より地震の連続観測を開始した。平成 15 年度は地震の観測を継続するとともに、得られたデータについて、大学などの他の研究機関のデータと併せて解析を行い、震源分布や地殻構造の検討などを実施する。また、新たに、幌延町の地下浅部で発生する地震の観測精度を向上させるための地表での地震観測計画の検討を行い、地震計を設置して地震観測を実施する。

参考文献

- 防災科学技術研究所ホームページ (<http://www.hinet.bosai.go.jp/>) 地震のページ 全国高感度地震観測 Hi-net【防災科学技術研究所】。
 佐々木俊二, 佐藤清隆, 川村 淳, 青木和弘, 阿部寛信 (1999) : 釜石鉱山における地震観測結果その 1 地下深部における地震動特性, 1999 年地球惑星関連学会合同大会予稿集, An-003.

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、南北系の拗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である可能性が考えられる勇知層が、深さ1,500m程度まで分布すると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考えられる。

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14年度は地殻の歪み等の観測を行うためのGPS観測装置と電磁探査機器を設置し、観測を開始した(図3.6-70)。

GPS観測機器は、天塩堆積盆内の地殻活動状況を把握するため、北進地区のHDB-1孔敷地内に設置し、現在観測中である。現在のアンテナの位置は、北緯45°2'24.134"、東経141°51'52.725" (座標系:WGS-84)である。

電磁探査機器は、地震が発生する場の比抵抗特性や地震発生時の比抵抗変化を把握するため、北進地区のHDB-1孔敷地と隣接する場所に設置し、地下20km程度までを対象に連続観測を実施中である。現在までのところ見掛比抵抗は安定しており、



図3.6-70 GPS観測機器及び電磁探査機器設置位置図

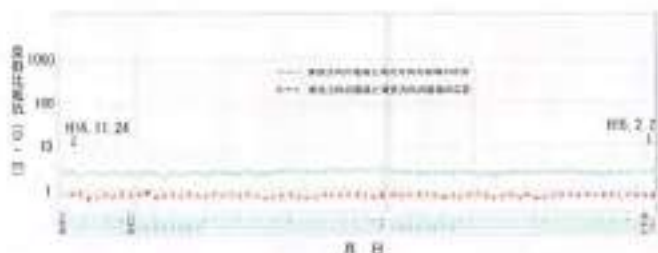


図3.6-71 深度方向の見掛比抵抗分布図 (平成15年1月26日)

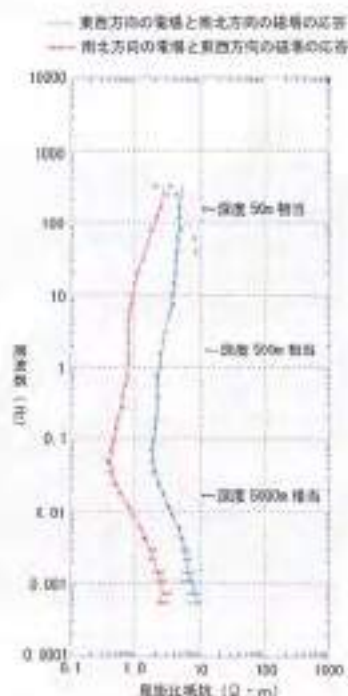


図3.6-72 深度約500mの見掛比抵抗時系列観測結果 (平成14年11月24日～平成15年2月2日)

現時点で明瞭な変化は認められていない。(図3.6-71, 72)

③ 今後の計画

GPS観測機器および電磁探査機器による連続観測を継続するとともに、1年間の地殻変動量や地下深部の電磁気的な性質の変化などについて解析を行う。また、GPS観測データについては、相対測位によるデータ解析システムを構築する予定である。

平成16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与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を実施する。

3.6.6 環境調査

① 課題と計画の概要

幌延深地層研究計画における開発規模は、環境影響評価法および北海道環境基本条例の対象となる規模より小さいが、調査研究や研究所設置に伴う環境への影響を最小限にすることを目的として自主的に環境調査を実施している。

平成14年度は、研究所設置地区が決定したことを受け、研究所設置地区内を対象に調査を実施した。騒音・振動および水質については、工事着手前の現状を把握した。動植物については、研究所設置地区における生息状況を把握し、重要種の有無を確認するとともに、必要に応じその対応を検討した。

調査位置は、研究所設置地区の環境区分（河川植生、防風林、低木樹林、湿地植生）を考慮し、各環境区分を代表する調査地点と各環境区分を網羅する調査ルートを設定した。また、動植物の生態に合わせ、これまでに夏季・秋季・冬季の調査を実施した。調査概要を表3.6-16に、調査位置を図3.6-73に示す。

表 3.6-16 調査概要

調査項目	調査時期	調査方法	
騒音	〔秋季〕H14/10/ 8～9	・特定建設作業に伴って発生する騒音の規制に関する基準	
振動	〔秋季〕H14/10/ 8～9	・特定工場等において発生する振動の規制に関する基準	
水質	〔夏季〕H14/ 8/29～30 〔秋季〕H14/10/ 3～4	・生活環境の保全に関する調査基準	
動植物	哺乳類	〔夏季〕H14/ 8/29～30	・直接観察法
		〔秋季〕H14/10/ 3～4	・直接観察法
		〔冬季〕H15/ 2/ 4～6	・フットプリント法
	鳥類	〔夏季〕H14/ 8/29～30	・フットプリント法
		〔秋季〕H14/ 9/20～10/4	・定点観察法
		〔冬季〕H15/ 2/ 4～6	
	両生・爬虫類	〔夏季〕H14/ 8/29～30	・直接観察法
	魚類	〔夏季〕H14/ 8/29～30 〔秋季〕H14/10/ 0～1	・直接観察 ・捕獲法
	昆虫類	〔夏季〕H14/ 8/29～30	・直接観察
		〔秋季〕H14/10/ 3～4	・採集法
底生動物	〔秋季〕H14/10/ 3～4	・直接観察 ・採集法	
植物類	〔夏季〕H14/ 8/27～30	・直接観察法	
植物群落		・フット調査	



図 3.6-73 調査位置図

② これまでの成果

i) 騒音・振動

研究所設置場所候補地付近の3箇所において、騒音・振動調査を実施した。調査の結果、騒音レベルは40～50dB程度、振動レベルは30～40dB程度であった。

ii) 水質

研究所設置地区内の清水沢川・一号川の2河川において、それぞれ上下流2地点、計4地点で、水素イオン濃度、生物化学的酸素要求量などについて調査を実施した。

iii) 動植物

調査の結果、哺乳類5科10種、鳥類7目18科42種、両生・爬虫類2科2種、昆虫類10目64科255種、魚類5科8種、底生動物11目21種、植物56科171種が確認された。このうち重要な動植物は19種（哺乳類なし、鳥類5種、両生・爬虫類1種、魚類5種、昆虫類2種、底生動物1種、植物5種）であった。確認された動植物のうち、法指定種や環境庁のレッドリストなどで絶滅のおそれのある動植物種を抽出したものを重要種として表3.6-17に示す。鳥類では、ハイタカ、チュウヒなどの通過を確認するとともに、両生・爬虫類では、エゾサンショウウオ、魚類では、ヤマメ、エゾトミヨなど、底生動物では、カワシンジュガイ、昆虫類では、トドマツアワフキ、ミズスマシの生息が確認された。植物では、ノダイオウ、ハイドジョウツナギなどが確認された。

表 3.6-17 確認された重要種

区分	和名	特定基準							
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
鳥類	ヒバリ	○			○	○			
鳥類	ヒヨドリ	○	○		○	○			
鳥類	ツバメ		○		○	○			
鳥類	スズメ				○	○			
鳥類	カラス				○	○			
両生類	ニホヒシガキ					○			
爬虫類	ヒメトビ					○			
昆虫類	クワガタ					○			
魚類	ウナギ					○	○		
植物	ツバキ				○	○			
植物	アサギ					○			○
植物	アサギ					○			○
植物	アサギ					○			○

① 国の天然記念物、国定公園、国定自然公園、国定原生自然公園、国定自然歩道、国定自然観察道、国定自然観察小径、国定自然観察ルート、国定自然観察ポイント、国定自然観察施設、国定自然観察施設等

- ② 国の天然記念物、国定公園、国定自然公園、国定原生自然公園、国定自然歩道、国定自然観察道、国定自然観察小径、国定自然観察ルート、国定自然観察ポイント、国定自然観察施設、国定自然観察施設等
- ③ 国の天然記念物、国定公園、国定自然公園、国定原生自然公園、国定自然歩道、国定自然観察道、国定自然観察小径、国定自然観察ルート、国定自然観察ポイント、国定自然観察施設、国定自然観察施設等
- ④ 国の天然記念物、国定公園、国定自然公園、国定原生自然公園、国定自然歩道、国定自然観察道、国定自然観察小径、国定自然観察ルート、国定自然観察ポイント、国定自然観察施設、国定自然観察施設等
- ⑤ 国の天然記念物、国定公園、国定自然公園、国定原生自然公園、国定自然歩道、国定自然観察道、国定自然観察小径、国定自然観察ルート、国定自然観察ポイント、国定自然観察施設、国定自然観察施設等
- ⑥ 国の天然記念物、国定公園、国定自然公園、国定原生自然公園、国定自然歩道、国定自然観察道、国定自然観察小径、国定自然観察ルート、国定自然観察ポイント、国定自然観察施設、国定自然観察施設等
- ⑦ 国の天然記念物、国定公園、国定自然公園、国定原生自然公園、国定自然歩道、国定自然観察道、国定自然観察小径、国定自然観察ルート、国定自然観察ポイント、国定自然観察施設、国定自然観察施設等
- ⑧ 国の天然記念物、国定公園、国定自然公園、国定原生自然公園、国定自然歩道、国定自然観察道、国定自然観察小径、国定自然観察ルート、国定自然観察ポイント、国定自然観察施設、国定自然観察施設等

③ まとめ

今後は、研究所設置場所を中心に春季調査を行うとともに、研究所設置に伴う環境への影響を最小限にするために、必要に応じて保全措置・モニタリング調査を実施する。

【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 入工バリアの基本特性データベースの整備

4.1.1 オーバーバックの基本特性

1) 炭素鋼オーバーバ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、水の還元による腐食量を腐食の不局一化を考慮して見積もった。

これらの評価の長期的な信頼性を確保するため、腐食生成物による腐食への影響など腐食メカニズムの検討ならびに長期腐食データの取得を進めている。また、腐食形態や腐食寿命に直接関わる因子として、堆積物系岩盤における処分を想定した支保工材料としてのセメントによる影響とオーバーバックの材料因子による影響（溶接による影響を含む）を明らかにするための研究などを実施している。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

平成13年度に炭素鋼の腐食速度、腐食電位、水素透過量など腐食に関わる情報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）。これらのうち、水素透過量については電気化学的水素透過法の適用を検討したが、圧縮ベントナイト中での測定実績がなく、適用の可能性について実験的な検証が必要であった。そこで平成14年度は、ベントナイト膨潤圧、温度などについて特定の試験条件を設定して透過水素量を測定できるモニタリングセルを設計した。また、この設計に基づき、小型で簡易な試験セルを試作した（和田ほか、2003）。

ii) 腐食生成物による炭素鋼の腐食への影響

模擬腐食生成物としてマグネタイトを炭素鋼表面に付与することにより、炭素鋼の腐食が加速される現象が報告されている（兒島・辻川、1996）。これまでに加速のメカニズム、オーバーバック寿

命への影響などの検討が行われているが、研究者によって必ずしも見解は一致していない。そこで、マグネタイト共存下での炭素鋼の腐食挙動に関するこれまでの研究を基に現状の知見の整理と課題の抽出を行った（柴田ほか、2003）。その結果として、現状での知見を以下のようにまとめた。

- ・水溶液環境で炭素鋼とマグネタイトを接触させた場合、マグネタイト中の3価鉄の還元反応の明らかな奇りが認められる。
- ・水素発生反応も促進される場合がある。
- ・マグネタイト中の3価鉄の還元反応と水素発生反応の比率は試験条件によって異なり、使用するマグネタイトの3価鉄/2価鉄比が大きいほど水素発生反応の奇り率は小さい（図4.1-1）。

また、現時点の課題として

- ・ベントナイトによる腐食機構への影響
- ・還元性環境下のベントナイト中におけるマグネタイト生成の可能性

などを挙げ、今後は特にベントナイト共存系での腐食機構、長期挙動を把握することを課題として示した。

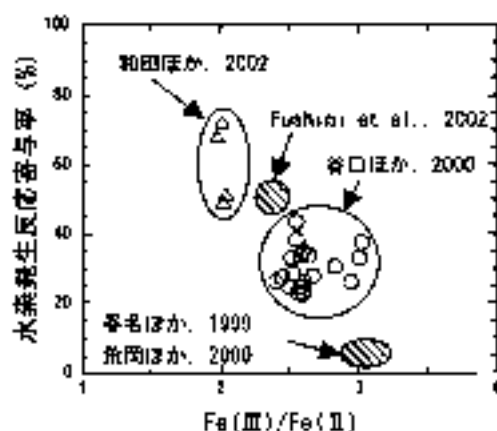


図 4.1-1 マグネタイト中 Fe(III)/Fe(II) 比と水素発生反応奇り率の関係

iii) セメントによる炭素鋼の腐食局在化への影響

堆積物系岩盤などにおける処分では、処分坑道など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 pH 化した地下水がオーバーバ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。

平成13年度に実施した試験では、ケイ砂混合率30%、乾燥密度1.6g/cm³の緩衝材中で炭素鋼が不動態

態化するのには緩衝材間隙水の pH が約 10.5 以上の場合であることが示された（谷口ほか，2002）。このような pH 条件がもたらされるのは緩衝材に浸潤する水の pH が約 13 以上の場合であり，セメント材料として普通ポルトランドセメントを用いた場合にその可能性がある。また，低アルカリ性セメントを用いた場合であっても地下水が緩衝材の継ぎ目などの経路からオーバーバックに直接接触すると一時的に不動態化する条件がもたらされる可能性がある。

このような，セメントによる地下水の高 pH 化を想定して局部腐食の進展挙動を実験的に検討した。セメント材料と接触した溶液および弱アルカリ性～アルカリ性の炭酸塩水溶液を用いた浸漬試験を行った（谷口ほか，2003）。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（大和田ほか，2000）を用い，粉砕したセメントペーストと 0.5M NaCl 水溶液を液固比 100 ml/g にて混合し，上澄み液中に炭素鋼試験片を浸漬した。炭酸塩溶液中の実験では炭酸水素ナトリウム，炭酸ナトリウムおよび NaOH を用いて炭酸塩濃度 0.1M 以下，pH 約 8.5～13 の水溶液を調製し，試験片を浸漬した。温度は 80℃，試験期間は最長 1 年間まで行った。炭素鋼試験片は直径 80mm，厚さ 2mm の円盤型とし，中央部には直径 20mm のポリサルフォン製すきま形成材を付与した。1 条件あたりの試験片数は 15 とし，各試験片の最大腐食深さについて Gumbel 分布関数を用いた極値統計解析を行い，オーバーバック表面積における最大腐食深さを推定した。

実験結果の一例として平均腐食深さと孔食係数の関係を図 4.1-2 に示す。ここで，孔食係数は極値統計解析により得られたオーバーバックの最大腐食深さ推定値（指定信頼率 99%）を試験片の重量減少量より算出された平均腐食深さで除した値である。図中には全面腐食の評価に用いたデータ（石川ほか，1992）もプロットした。また，「第 2 次取りまとめ」において pH 約 11 の条件での実験データおよび土壌中の腐食データ（Romanoff, 1989）に基づいて予察的に推定された局部腐食による孔食係数の上限の線も示した。この図に示すように，孔食係数は平均腐食深さが大きくなるにしたがって小さくなる傾向が確認され，概ね同一線上に分布していることがわかった。いずれも「第 2 次取りまとめ」において予察的に推定された上限の線を越えなかった。また，平均腐食深さ約 0.1mm 以

上の腐食量に対する孔食係数は全面腐食での値とほぼ同程度になることがわかった。

以上の結果から，セメント材料に起因する高 pH 環境によって炭素鋼が不動態化し，孔食，すきま腐食が発生しても腐食寿命に影響を及ぼすような顕著な腐食の局在化は生じないと考えられる。

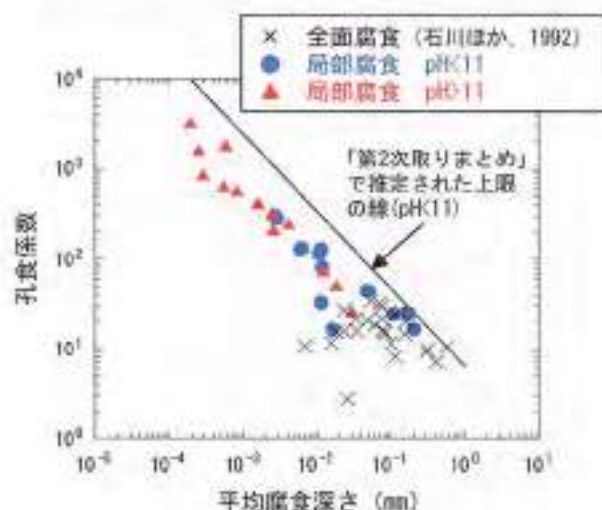


図 4.1-2 弱アルカリ性～アルカリ性環境における炭素鋼の孔食係数

iv) 緩衝材仕様による炭素鋼の腐食への影響

「第 2 次取りまとめ」ではケイ砂混合率 30%、乾燥密度 1.6g/cm³ の緩衝材がレファレンスとされている。しかし，緩衝材側の仕様を変更した場合の腐食挙動については十分な検討が行われていない。

平成 13 年度は，炭素鋼の腐食形態に及ぼす緩衝材の密度およびケイ砂混合率の影響を電気化学試験により検討した。平成 14 年度は，緩衝材中の腐食速度に及ぼす緩衝材仕様の影響を浸漬試験により確認した。なお，実験の一部では溶接部の付与された試験片を用いた実験も行った。溶接試験片については板厚 50mm の鍛鋼品 SFYCI を電子ビーム溶接 (EBW) により接合した供試材から切り出した。試験溶液として人工海水を用い，80℃の窒素雰囲気下で試験を行った。試験期間は 1 年間とした。

試験結果として緩衝材の乾燥密度と炭素鋼の平均腐食速度の関係を図 4.1-3 に示す。概ね，乾燥密度の高い条件ほど腐食速度は小さな値を示したが，1.0g/cm³ と 1.6g/cm³ では大きな差はなかった。1.6g/cm³ 以上になると，急激に腐食速度が小さな値となった。緩衝材の密度による腐食速度の違いの原因について詳細な検討は行っていないが，緩衝材間隙水特性の違いや物質移行特性の違いなどが考えられる。ただし，本試験の行われた低酸素

濃度雰囲気ではイオン濃度や pH による腐食速度への影響は小さいことが知られており（本田ほか，1997），緩衝材の密度による物質移行特性の違いによる影響がより支配的と考えられる。例えば低密度条件では溶解した鉄イオンが比較的緩衝材中へ拡散しやすく，炭素鋼表面への皮膜の形成が妨げられ，皮膜による腐食抑制効果の小さいことが可能性のひとつとして考えられる。

緩衝材中のケイ砂混合率による腐食速度への影響についても調査を行った。その結果，図 4.1-4 に示すように乾燥密度 1.6g/cm³ の場合，ケイ砂混合率 70% までは腐食速度への顕著な影響は認められなかった。ただし，70% の条件では腐食速度のばらつきが大きく，試験片の表面の凹凸も比較的大きかった。これは試験片によって緩衝材の接触状態が異なっていたことや，同一の試験片でも接触状態が不均一であったために腐食の局在化が生じたことなどが可能性として考えられる。

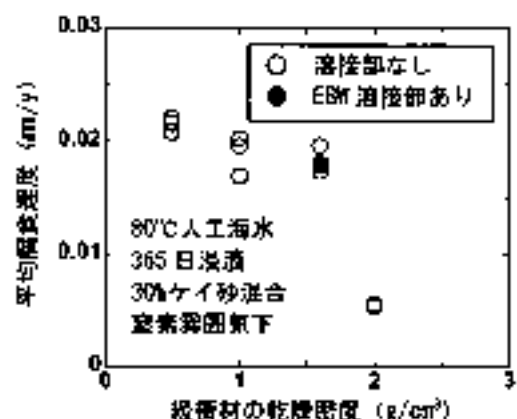


図 4.1-3 緩衝材の乾燥密度と炭素鋼の平均腐食速度の関係

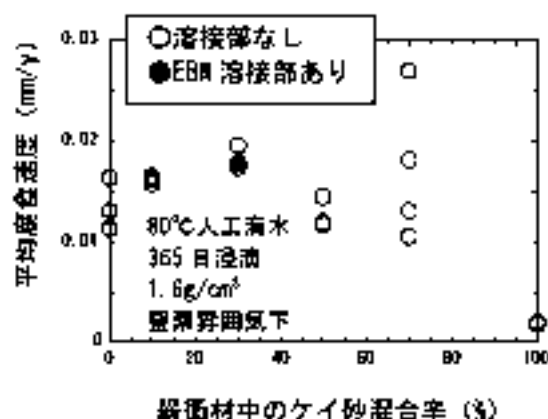


図 4.1-4 緩衝材中のケイ砂混合率と炭素鋼の平均腐食速度の関係

③ まとめ

平成 14 年度の研究成果は以下のようにまとめられる。

- 水溶液環境でのマグネタイト共存下における炭素鋼の腐食において，マグネタイト中の 3 価鉄の還元反応が明確に腐食に寄与しており，3 価鉄の還元反応と水素発生反応の比率はマグネタイト中の 3 価鉄/2 価鉄比に依存することが示唆された。
- 高 pH 環境での局部腐食における炭素鋼の孔食係数は弱アルカリ性環境での孔食係数と同程度であった。
- 還元性環境では緩衝材の乾燥密度が大きいほど，腐食速度は小さな値となった。また，ケイ砂混合率については 70% までは腐食速度への明確な影響は認められず，50% まではほぼ均一な全面腐食が観察された。
- 還元性環境において電子ビーム溶接部付き炭素鋼試料の腐食速度は溶接部のない試料の値と同程度であった。

今後は以下の事項を実施する予定である。

- ベントナイト中でのマグネタイト共存下における炭素鋼の腐食機構を検討するとともに，マグネタイトの生成可能性，腐食生成物としての安定性について検討する。
- 腐食生成物による腐食抑制効果の確認，長期腐食データの取得などにより，長期的な腐食速度，腐食速度増加の可能性を検討する。
- セメントによる高 pH 環境での炭素鋼の応力腐食割れ感受性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試験方法について検討する。

参考文献

- 荒岡 礼，渡辺安和，西方 繁，水崎 隆（2000）：地質処分環境における炭素鋼の腐食加速機構，電気化学会秋季大会講演要集，1906，p. 191.
- Fushimi, K., Yamazuro, T. and Seo, N. (2002): Hydrogen generation from a single crystal magnetite coupled galvanically with a carbon steel in sulfate solution. Corrosion Science, 44, pp 611-623.
- 森名 匠，村上 貞，柴田健夫（1999）：重炭酸塩水溶液中における炭素鋼の腐食に伴う水素発生，腐食防食

- 協会第46回材料と環境討論会講演集, p. 271.
- 本田 明, 谷口直樹, 石川博久, 藤原和雄 (1997): 低酸素濃度条件下における炭素鋼の腐食挙動の実験的検討, 動燃技報 No. 104, pp. 125-134.
- 石川博久, 本田 明, 鶴岡浩二, 井上祐博, 小島政道, 佐々木嘉明 (1992): オーバーバック鉄橋材料選定と炭素鋼オーバーバックの寿命評価, 動燃事業団技術資料, JNC TJS410 92-139.
- 兒島洋一, 正川茂男 (1996): ベントナイト覆膜中における腐食生成物堆積下の炭素鋼の腐食挙動, 腐食防食協会腐食防食'96 講演集, p. 129.
- 大和田仁, 三原守弘, 入矢雅史郎, 松井 誠 (2000): フライアッシュ高含シリカフェームセメントの実用性の検討, サイクル機構技報 No. 6, pp. 43-52.
- Kunhardt, W. (1969): Underground Corrosion, Originally Issued by NBS in 1957, Reprinted by NACE, p. 80.
- 柴田康夫, 瀧尾眞浩, 杉本克久, 水鏡 徹, 藤本慎司, 井上博之 (2003): マグネタイト共存下における炭素鋼の腐食挙動に関する研究の現状と課題, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書: 社団法人腐食防食協会), JNC TJS400 2003-080.
- 谷口直樹, 本田 明, 川崎 学, 舛形 剛, 建石 明, 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バックの腐食への影響, サイクル機構技術資料, JNC TJS400 2001 001.
- 谷口直樹, 川上 進, 森田光男 (2002): ベントナイト/ケイ酸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 TJS400 2001 025.
- 谷口直樹, 川崎 学, 川上 進, 鈴木浩雄 (2003): 弱アルカリ性〜アルカリ性環境における炭素鋼オーバーバックの局部腐食進展挙動, サイクル機構技術資料 (登録特許中)
- 和田隆太郎, 山口憲治, 西村 務, 藤原和雄, 建石 明 (2003): 炭素鋼オーバーバックの超長期試験研究, 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 TJS400 2003-007.
- 和田隆太郎, 山口憲治, 西村 務, 栗本宜孝, 中西智明, 竹内昭哉, 藤原和雄, 建石 明 (2002): 地層処分環境下におけるオーバーバ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 TJS400 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ついては、「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いて水素脆化の可能性を検討した。

すきま腐食の発生条件については種々のチタン合金の実験データが整備されつつあり、環境条件に応じて適切な合金を選択することによってすきま腐食を避けることができるとの見通しが得られている。しかし、還元性環境におけるチタンの耐食性については知見が十分とは言えないため、不動態皮膜の安定性、水素吸収挙動などの検討を進めるとともに水素脆化の評価手法を検討している。

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。しかし、現時点では日本における地下水化学条件を想定した実験データが少なく、電気化学特性、局部腐食の発生条件、腐食速度など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

1) 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の純チタンおよびチタン-パラジウム(0.06%)合金の長期浸漬試験を実施している(最長5年間の予定)。平成14年度は、試験期間1年までの試験データを取りまとめた(鈴木ほか, 2003)。

試験溶液として人工海水、0.1M NaHCO₃水溶液、0.1M NaHCO₃+0.5M NaCl水溶液を用い、水溶液中および圧縮ベントナイト中80℃で浸漬試験を行った。浸漬後の試料について、SIMSにより表面から深さ方向の水素および酸素の分布を測定し、水素吸収挙動、皮膜成長挙動を調査した。

試験結果の一例として、純チタンにおける成長皮膜厚さの時間依存性(鈴木ほか, 2003)を、Mattsson and Olafjord(1990)(以下、Mattssonら)

の結果(90℃)と合わせて図4.1-5に示す。水溶液単独系では 10^{-2} ~ $10^1 \mu\text{m}$ のオーダーの皮膜成長が観察されており、表面が干渉模様を呈している試料もあったことから、比較的皮膜成長が大きかったものと考えられる。圧縮ベントナイト中では水溶液系よりも約1桁程度小さく、 $10^2 \mu\text{m}$ のオーダーの皮膜成長であり、これはMattssonらの結果と同程度~数倍程度の値であった。水素の侵入深さ、最外面水素濃度についても圧縮ベントナイトの方が水溶液単独系よりも小さく、皮膜の成長挙動の傾向と矛盾しない結果が得られた。

「第2次取りまとめ」では、皮膜厚さの60%が腐食深さに対応すると仮定してMattssonらの皮膜成長のデータに基づき、チタンの腐食速度を $2.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}/\text{y}$ と設定している。ここでも同様に皮膜厚さの60%が腐食深さに対応するという仮定を置くと、圧縮ベントナイト中ではMattssonらと同程度~数倍の皮膜成長であったことから $10^{-3} \mu\text{m}/\text{y}$ ~ $10^{-2} \mu\text{m}/\text{y}$ のオーダーの腐食速度と考えられる。一方、溶液単独系ではMattssonらの結果に比較して数十倍以上の皮膜成長が観察されていることから、 10^{-2} ~ $10^1 \mu\text{m}/\text{y}$ の腐食速度が推定される。この値は、平成13年度報告した密閉ガラス容器中での水素発生量測定結果から見積もられた腐食速度(和田ほか, 2002)とほぼ同程度である。

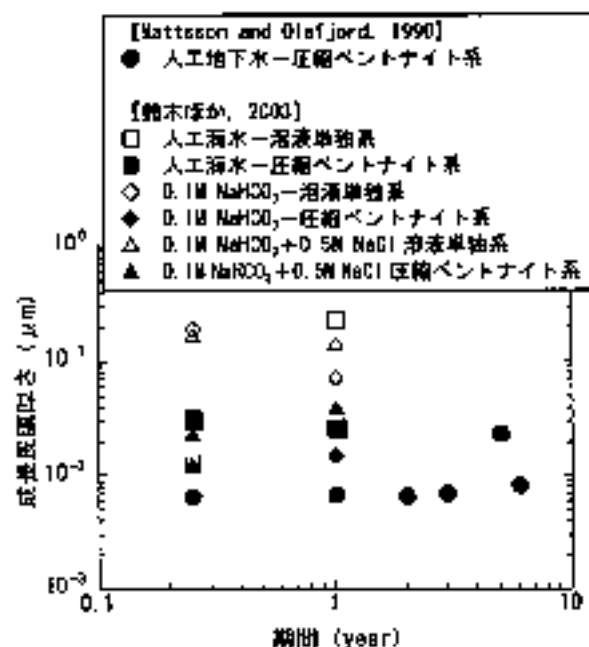


図 4.1-5 還元性環境における純チタンの皮膜成長挙動

次に長期経過後の水素吸収量を実験的に評価することを目的として電気化学的な加速試験を行った(鈴木ほか, 2003)。試験では、人工海水中で1000年間分に相当するカソード電流を一定の電流密度にてチタン試験片に印加したのち、試験片中に吸収された水素量を不活性ガス融解ガスクロマトグラフ法により測定した。チタン試験片として ASTM Grade2 相当の純チタン(以下、G2と記す)および ASTM Grade17 相当のチタン-パラジウム合金(以下、G17と記す)を用いた。印加する電荷量は「第2次取りまとめ」におけるチタンの腐食速度設定値である $2.8 \times 10^{-3} \mu\text{m/y}$ の速度での1000年間分に相当する $1.02 \times 10\text{C/cm}^2$ とした。また、還元性環境ではその数十倍以上大きな腐食速度を示唆するデータもあることから、100倍の電荷量 $1.02 \times 10^2 \text{C/cm}^2$ を付与した試験も行った。

試験結果として、電流密度と水素吸収率の関係を図4.1-6に示す。図中に示す水素吸収率は試験片に吸収された水素量を、印加した電荷量相当の水素量で除した値である。データのばらつきは大きいものの、印加する電荷量が同じ条件では概ね電流密度が小さいほど、すなわち加速の度合いが小さいほど水素吸収率は大きな値を示す傾向が観察された。また、印加する電荷量の大きい条件のほうが水素吸収率は小さくなる傾向も示唆された。このデータを基に自然状態での1000年間の水素吸収率を推定すると、 $1.02 \times 10\text{C/cm}^2$ ($2.8 \times 10^{-3} \mu\text{m/y}$) の場合が数十%以上、 $1.02 \times 10^2 \text{C/cm}^2$ ($2.8 \times 10^{-1} \mu\text{m/y}$) の場合が数%~数十%程度と見積もられる。

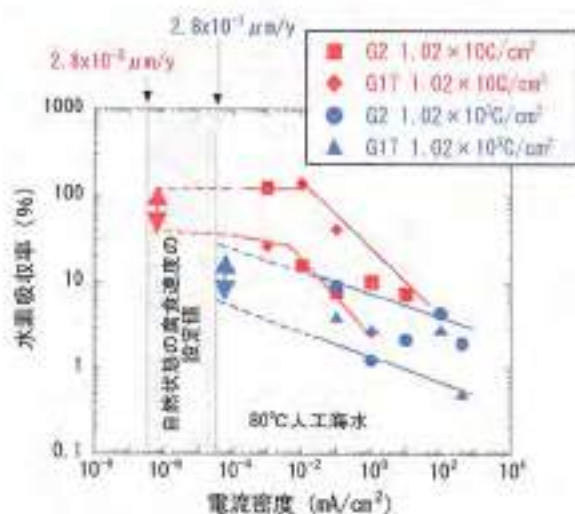


図 4.1-6 チタン中への水素吸収率の電流密度依存性

ここで、チタン層の厚さ 6mm のオーバーバックにおける1000年間の水素吸収量は腐食速度が $2.8 \times 10^{-3} \mu\text{m/y}$ の場合、平均水素濃度に換算して約40ppm以下である。一方 $2.8 \times 10^{-1} \mu\text{m/y}$ の腐食速度の場合、図4.1-6に示した範囲の水素吸収率を想定すると約200ppm~1000ppm以上の水素吸収量が算出される。「第2次取りまとめ」において設定された脆化の起こる水素濃度は500ppmであり、前者の腐食速度程度であれば水素吸収量は十分これを下回る。前述のとおり圧縮ペントナイト中で推定された腐食速度は、前者と同程度か数倍大きい程度である。腐食速度を10倍の $2.8 \times 10^{-2} \mu\text{m/y}$ 、水素吸収率を100%としても水素吸収量は400ppmであり、脆化の生じる臨界水素濃度を下回る。

II) 純銅の皮膜破壊電位の検討

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、オーバーバ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。特に処分開始初期の比較的湿度が高い条件における酸化皮膜の局所的破壊に起因する局部腐食の生起可能性を評価する必要がある。そこで80℃の水溶液中における条件で純銅のアノード分極曲線測定を行い、不動態型に分極挙動を示す条件の分極曲線より電流値が急激に上昇を開始する電位を皮膜破壊電位(Eb)として求め、Ebに及ぼす陰イオンの種類と濃度の影響を調査した(川崎ほか, 2002)。

実験の結果、炭酸水素イオンは皮膜破壊電位を貴化させ、塩化物イオンおよび硫酸イオンは皮膜破壊電位を卑化させる傾向が観察された。このことから、炭酸水素イオンは不動態域における皮膜の破壊を抑制し、塩化物イオンおよび硫酸イオンは皮膜の破壊を促進する作用を有すると考えられる。これは30℃での従来の報告例(中村・今井, 1995)と同様である。

ここで、炭素鋼における孔食電位の場合と同様に、塩化物イオン濃度と炭酸水素イオン濃度の比および硫酸イオン濃度と炭酸水素イオン濃度の比に対してEbを整理した。その結果を図4.1-7および図4.1-8に示す。硫酸イオン濃度と炭酸水素イオン濃度の比が大きくなるとEbは卑化する傾向が確認された。同様に、塩化物イオン濃度と炭酸水素イオン濃度の比が大きくなるとEbは卑化する傾

向が確認された。図中には30℃におけるデータ(中村・今井, 1995)も示したが、温度の違いによるEbへの影響は認められなかった。

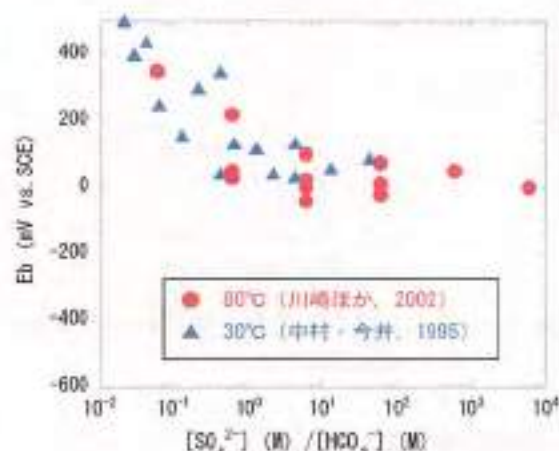


図 4.1-7 皮膜破壊電位 (Eb) の硫酸イオン濃度と炭酸水素イオン濃度の比に対する依存性

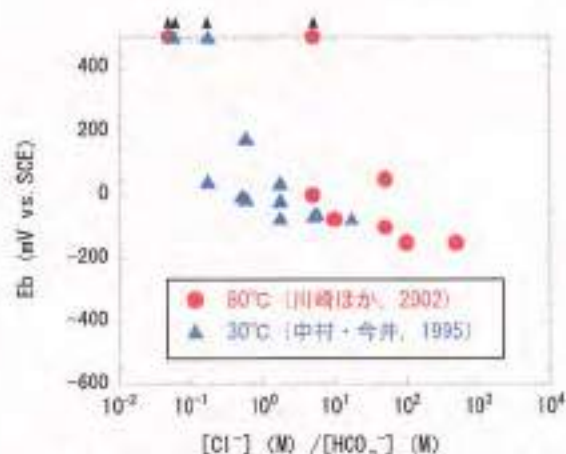


図 4.1-8 皮膜破壊電位 (Eb) の塩化物イオン濃度と炭酸水素イオン濃度の比に対する依存性

③ まとめ

平成14年度の研究成果は以下のようにまとめられる。

- ・1年間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圧縮ベントナイト中では $10^{-3} \sim 10^{-2} \mu\text{m}/\text{y}$ のオーダー、水溶液単独系では $10^{-2} \sim 10^{-1} \mu\text{m}/\text{y}$ のオーダーと見積もられた。
- ・電気化学的な加速試験により、1000年間分に相当するカソード電荷を印加し、水素吸収量を測定した。その結果、電流密度が小さいほど水素吸収量が大きくなる傾向であった。この実験結果によれば、「第2次取りまとめ」で設定された

腐食速度における1000年間の水素吸収率は、数十%以上と見積もられる。

- ・純銅のアノード分極曲線より、皮膜破壊電位を求めた。その結果、炭酸水素イオンは皮膜破壊電位を貴化させ、硫酸イオン、塩化物イオンは卑化させる傾向が観察された。
- ・皮膜破壊電位への温度の影響を既往のデータとの比較により検討した結果、30℃と80℃では大きな違いは認められなかった。

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、水素吸収率などの経時変化を調査する。また、チタンオーバーバ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。
- ・チタンの水素飽和生成条件に関するデータを取得する。
- ・処分環境における純銅の腐食形態、腐食局在化を実験的に評価する。
- ・炭化物共存下での還元性環境における純銅の腐食挙動を実験的に評価する。
- ・セメントによってもたらされる高pH化によるチタンの腐食速度、水素吸収挙動への影響および純銅の腐食形態、腐食速度への影響など基礎データを取得する。

参考文献

- 川崎 学, 谷口直樹, 川上 進 (2002): 炭酸塩水溶液およびケイ砂混合ベントナイト中における純銅のアノード分極挙動, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2002-016.
- Mattsson, H. and Olefjord, I. (1990): Analysis of oxide formed on Ti during exposure in bentonite clay. I. The oxide growth, *Verstoffe und Korrosion*, 41, pp.383-390.
- 中村法弘, 今井八郎 (1995): 銅のアルカリ水溶液中における分極挙動に及ぼすアニオンの影響, 腐食防食協会第42回腐食防食討論会講演集, pp.343-346.
- 鈴木宏幸, 谷口直樹, 川上 進 (2003): 還元性環境下におけるチタンの腐食速度と水素吸収挙動, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-003.
- 和田隆太郎, 栗本寛孝, 藤原和雄, 安倍 隆, 鎌石 剛, 舩形 剛 (2002): チタンオーバーバックの水素飽和に関する研究, 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.

4.1.2 緩衝材の基本特性

① 課題と計画の概要

緩衝材の基本特性においては、「第2次取りまとめ」までに降水系地下水条件下でのデータを主に取得してきたが、実際の地質環境を考慮した場合、熱や水質の違いによる影響などを把握しておくことが必要である。また、国による安全基準・指針の策定への反映として、関係式の一般化や測定手法の標準化に関する基礎情報の整備も重要と考えられる。

このため、これらの影響に関するデータの拡充や、評価並びに測定手法などに関する基礎情報の整備を進める。

② これまでの成果

i) 膨潤特性

・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、平成13年度までにベントナイト供試体の縦横比の関係を定めることによって、膨潤応力の値が増減することがわかった(サイクル機構, 2002)。

平成14年度は、これらの成果を踏まえ、その影響因子の一つとして考えられる供試体圧縮成型時の残留応力を考慮し、供試体成型後、拘束状態から一旦抜き出した圧縮ベントナイトを対象に、膨潤応力データの測定を実施した。この結果を「第2次取りまとめ」に示した結果と合わせて図4.1-9、図4.1-10に示す。なお、図4.1-10は図4.1-9の有効粘土密度1.2~1.6Mg/m³における拡大図である。これらの図からわかるように、膨潤応力は、「第2次取りまとめ」までに取得されたデータと比較すると4割程度低い値を示した。

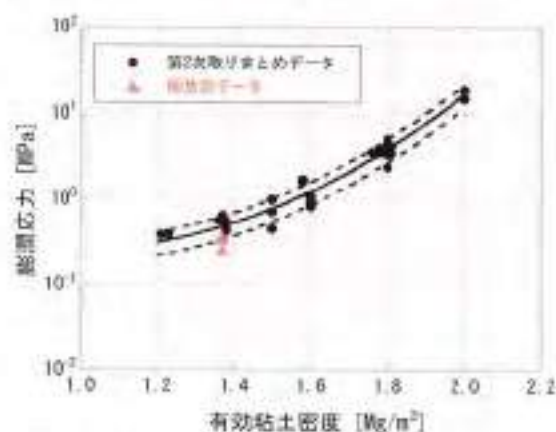


図4.1-9 有効粘土密度と膨潤応力の関係

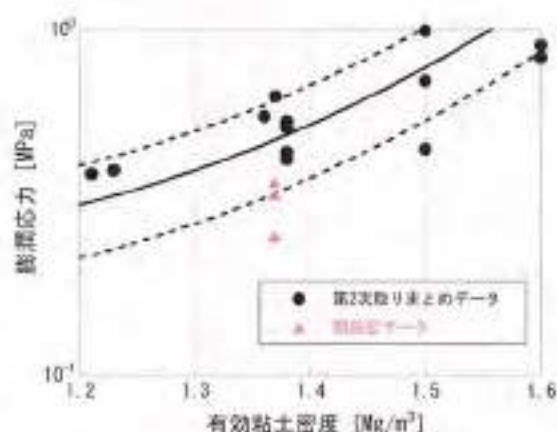


図4.1-10 有効粘土密度と膨潤応力の関係 (拡大図)

ii) 飽和水理特性

・人工海水を用いた透水試験の成果

平成13年度までに海水系地下水の影響に関するデータの拡充を行い、降水系地下水の値より、ベントナイトの透水係数は1桁程度大きくなることがわかっている(サイクル機構, 2002)。

平成14年度は、温度をパラメータとした海水系地下水の影響に関する飽和水理特性データを充足するとともに、関係式の一般化を図った。一例として、図4.1-11に示す飽和水理特性データの充足結果から、試験温度25℃、乾燥密度1.2~1.6Mg/m³の範囲における有効粘土密度 ρ_b [Mg/m³]と透水係数 k [m/s]の関係式として、

$$k = \exp(-25.64 + 8.29\rho_b - 5.689\rho_b^2) \quad (4.1-1)$$

が得られた(柴池・棚井, 2002; 菊池ほか, 2003a)。

また、図4.1-12に温度と透水係数の関係を示す。図から昇温過程と降温過程における同一温度での透水係数はほぼ同程度の値を示し、透水係数は温度の上昇に伴い大きくなることがわかる。さらに、透水係数の温度依存性に関して有効粘土密度と固有透過度の関係を図4.1-13に示す。なお、透水係数にみられる温度依存性は、透過する流体の密度及び粘性係数の温度変化によるものである。温度によってベントナイト成型体の構造特性に由来する透過抵抗は変化しないことから、固有透過度は温度によらず一定値を示すことがわかっており、次式で求められる(松本ほか, 1997)。

$$k = \kappa \rho g / \mu \quad (4.1-2)$$

ここで k [m/s]は透水係数、 κ [m²]は固有透過度、 ρ [kg/m³]は人工海水の密度、 g [m/s²]は重力加速度、 μ [Pa·s]は人工海水の粘性係数である。

この結果から、試験温度 25~90℃、乾燥密度 1.2 ~ 1.8Mg/m³ の範囲における有効粘土密度 ρ_b [Mg/m³] と固有透過度 κ [m²] の関係式として、

$$\kappa = \exp(-47.155 + 15.138\rho_b - 7.878\rho_b^2) \quad (4.1-3)$$

が得られた (菊池ほか, 2003b)。

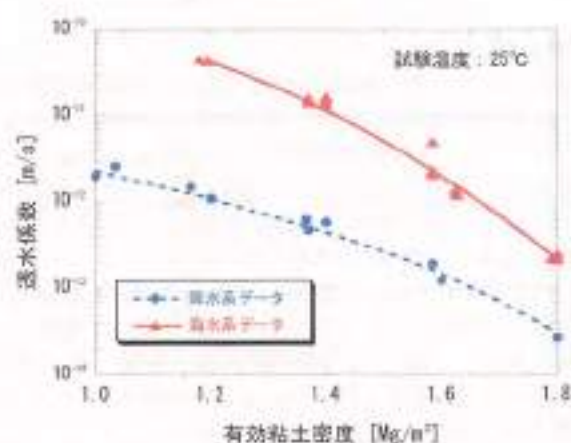


図 4.1-11 人工海水および蒸留水における有効粘土密度と透水係数の関係

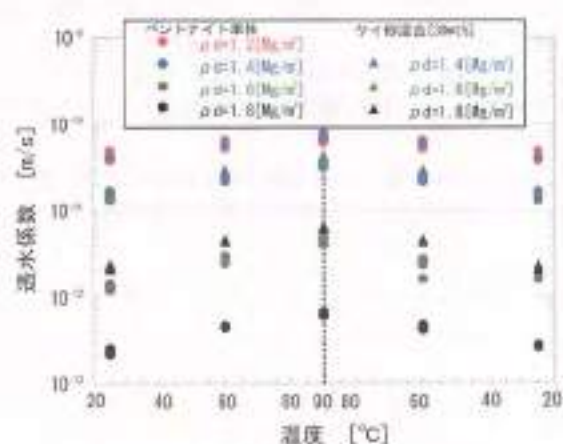


図 4.1-12 温度と透水係数の関係

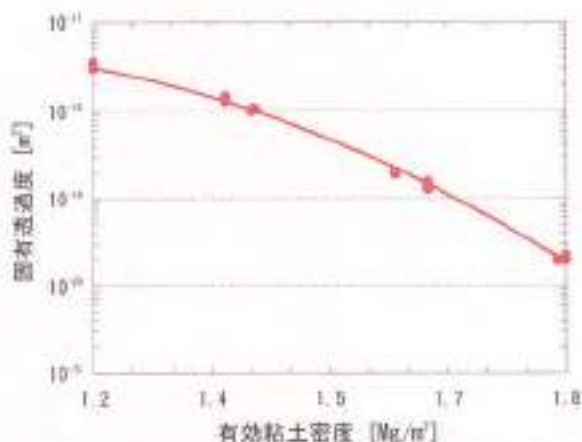


図 4.1-13 有効粘土密度と固有透過度の関係

なお、これらの関係式は、ベントナイト単体およびケイ砂混合体の双方に適用可能となるものである。

iii) 熱特性

・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、平成 13 年度までに測定データの信頼性の確認を目的に、異なる測定手法によるデータの比較に着手し、これまでの結果から測定手法の違いによるデータの差は認められていない (サイクル機構, 2002)。

平成 14 年度においては、面熱源法 (ホットディスク試験装置) により降水系地下水、ベントナイト単体試料を対象とした熱物性データの拡充を行い、熱伝導率に関しては、線熱源法との比較を、熱拡散率においては、点熱源法との比較をそれぞれ行った。以前取得された熱伝導率および熱拡散率 (鈴木・藤田, 1999) との比較を図 4.1-14, 図 4.1-15 に示す。熱伝導率に関しては、線熱源法と比べ、各乾燥密度および含水比において、同等の値であることが分かった。また、熱拡散率に関しては、点熱源法に比べ若干低い値であることがわかった。

一方、一部の条件について人工海水浸潤試料を対象とした熱物性データの取得も行った。ここで得られた結果のうち熱伝導率について降水系地下水 (蒸留水) と比較したものを図 4.1-16 に示す。人工海水浸潤後の熱伝導率に関しても、降水系地下水と同等の値であることがわかった。

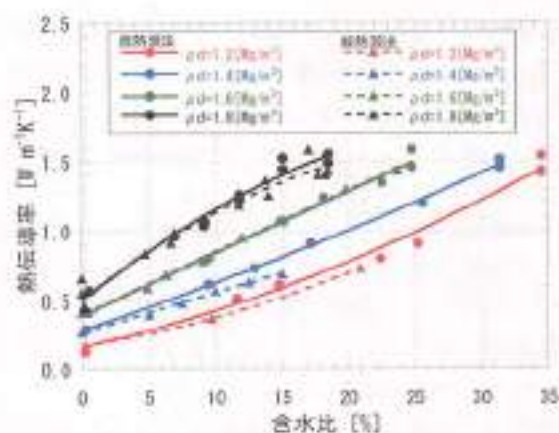


図 4.1-14 熱伝導率の測定結果の比較

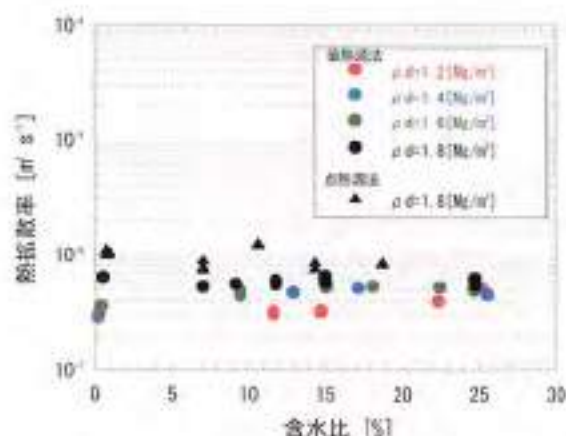


図 4.1-15 熱拡散率の測定結果の比較

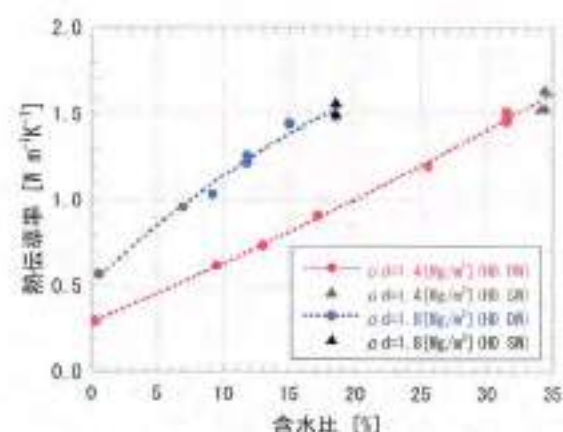


図 4.1-16 人工海水および蒸留水の浸潤後の熱伝導率

(HD:ホットディスク、DW:蒸留水、SW:人工海水)

③ まとめ

膨潤特性としては、供試体スケール効果による膨潤応力への影響を考慮するため、圧縮成型時に発生する残留応力を除荷した供試体を用いて一部スケール効果による膨潤応力への影響確認試験を行った。

飽和水理特性については、海水系地下水条件下および温度依存性に関する透水特性データの拡充を行うとともに、関係式の一般化を図った。

熱特性に関しては、異なった測定手法により得られたデータの比較検討を実施した。

今後は、温度や水質を考慮したデータの拡充や各特性における測定手法の標準化に関わる基盤情報の整備を継続する。一方、高レベル放射性廃棄物処分の事業化に向けては、幅広い仕様のベントナイトにも対応できるように、これらの基盤情報の汎用性を高めていくことも必要であると考えられる。そのため、海外産ベントナイト(MX-80など)

に係るデータを文献などより収集し、例えばモンモリロナイト含有率などによる関係式の一般化、あるいは、海外産ベントナイトと国産ベントナイト(クニゲル VI)との性能比較を通じた適用性評価など、いくつかの評価手法について検討していく。

参考文献

- 核燃料サイクル開発機構(2002):高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発 一平成13年度報告一, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2002-003.
- 菊池広人, 榎井憲治(2002):圧縮ベントナイトの膨潤応力測定手法の標準化及び海水条件下における透水性に関する一考察, 日本原子力学会バックエンド部会第18回バックエンド夏期セミナー資料集, p.2, 19-1.
- 菊池広人, 榎井憲治, 松本一浩, 佐藤治夫, 上野健一, 鎌 剛志(2003):緩衝材の飽和透水特性-II-海水性地下水が緩衝材の透水性に及ぼす影響一, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-002.
- 菊池広人, 榎井憲治, 佐藤治夫, 上野健一(2003):海水条件下における圧縮ベントナイトの透水特性, 北海道大学大学院工学研究科第5回放射性廃棄物地層処分に関する情報交換会(Sapporo Conference 2003)報告書, pp.11-21.
- 松本一浩, 菅野 毅, 藤田朝雄, 鈴木英明(1997):緩衝材の飽和透水特性, 動燃事業団技術資料, PNC TN8410 97-269.
- 鈴木英明, 藤田朝雄(1999):緩衝材の熱物性試験(II), サイクル機構技術資料, JNC TN8430 99-006.

4.1.3 人工バリアの性能保証に関する基盤情報整備

① 課題と計画の概要

サイクル機構においては、国による安全基準・指針等の策定および実施主体が進める処分事業へ資することを目的として、人工バリアの性能保証に関する基盤情報の整備を進めている。

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性能/性能保証項目の整理を行うとともに、サイクル機構における研究開発の実進状況を踏まえつつ、課題の抽出を行っている。

また、人工バリアに関わる基盤情報の内、幌延の深地層の研究施設における原位層試験計画に資するものとして、人工バリア性能のモニタリングに関わる検討および人工バリアの搬送・定置に関わる検討を行う。モニタリングの検討では、原位層試験計画の人工バリア試験などにおける測定項目や計測技術の選定のために必要な情報の収集および技術の開発を行う。搬送・定置に関わる検討は、同計画の定置精度確認試験における具体化のために、人工バリアの搬送定置装置に求められる精度を検討する観点から、緩衝材・オーバーバック間に生じる隙間の人工バリア機能への影響に関する検討を行っている。これらは、処分場管理における人工バリア性能の検証に関する考え方等の整理や人工バリアの搬送・定置装置の要求性能を策定するための基盤情報となるものである。

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

平成13年度には、オーバーバックおよび緩衝材について、処分場の長期的安全性を確保する観点から性能保証に関わる項目(案)を抽出し、その項目を保証するための具体的評価内容を示した。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して、信頼性向上のための課題を抽出するとともに、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(川上ほか、2003)。

平成14年度は、オーバーバック、緩衝材以外の処分施設の構成要素である、埋め戻し材、プラグ、アクセス・連絡・主要・処分の各坑道および処分孔を対象として前述と同様の整理・検討を行った(杉田ほか、2003)。表4.1-1に、例としてプラグに対する検証結果(一部内容省略化)を示す。「何を保証するのか」に関す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適宜変化することを十分考慮した。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な評価内容として示した。さらに、この評価内容と「第2次取りまとめ」における内容を比較して、性能保証すべき項目に対する課題を抽出した。

ii) 人工バリア性能確認に関わる検討

平成13年度は、人工バリア性能確認モニタリングに関する調査として、同施設機関や諸外国の調

表 4.1-1 プラグの性能保証項目の整理(一部内容省略化)

時期	何を保証するか(其の目的)		どう保証するか(方法、計画)		現時点での取り組み	今後の課題(計画)
	背景	具体のポイント	設計の要件	評価内容 (評価方法、アークベース)等		
早期段階	埋め戻し材、固液材の選定を伴った(緩衝プラグ)	埋め戻し材、緩衝材の放射性による損傷を発生しないこと。	マップにかかると力や変位、浸透計等を考慮する点には、評価の便宜から、後述を併記すること。	マップは集約的評価項目にも、主要要素(物等)に基づくプラグの放射性・物理・化学的安定性を評価・適合性のための安定性を評価コード化し評価	コンクリートプラグの放射性・物理・化学的安定性を評価	・評価: 放射性・物理・化学的安定性を評価し、評価を行う。 ・検証: 現場での試験によって放射性データを取得し、評価を行う。
埋め戻し材	人工バリアの性能向上に影響を及ぼさない(緩衝プラグ)	プラグが坑道の壁面に付着しないこと。	コンクリートと坑道の接触は、プラグ材(緩衝材)のコンクリート、緩衝材(緩衝材)との影響を評価すること。	プラグ自体の放射性・物理・化学的安定性を評価し、適合性を評価すること。	・緩衝材の放射性・物理・化学的安定性を評価し、評価を行う。 ・坑道の放射性・物理・化学的安定性を評価し、評価を行う。 ・坑道の放射性・物理・化学的安定性を評価し、評価を行う。	・コンクリート、緩衝材の性能向上への影響を評価し、評価を行う。 ・坑道の放射性・物理・化学的安定性を評価し、評価を行う。 ・坑道の放射性・物理・化学的安定性を評価し、評価を行う。
	掘削作業の進行に伴って発生する(掘削プラグ)	掘削作業の進行に伴って発生する(掘削プラグ)	掘削作業の進行に伴って発生する(掘削プラグ)	掘削作業の進行に伴って発生する(掘削プラグ)	掘削作業の進行に伴って発生する(掘削プラグ)	掘削作業の進行に伴って発生する(掘削プラグ)

査を行い、最新の情報を整理した（長谷川ほか、2002）。

平成14年度は、サイクル機構が国際共同研究として参加している原位置試験であるトンネルシーリング試験（AECL；カナダ、4.3.1閉鎖技術の検証試験参照）およびプロトタイプ処分場試験（SKB；スウェーデン、4.2.2熱-水-応力-化学連成挙動に関する研究参照）における計測技術に関する情報の整理を継続した。

iii) 人工バリア搬送・定置に係る検討

平成13年度は、人工バリア定置初期においてオーバーバック表面における緩衝材ブロック間の隙間の腐食挙動への影響を把握するための腐食試験を実施した。腐食試験より得られた平均腐食深さと孔食係数の関係を、図4.1-17に示す（谷口ほか、2003）。短期の試験結果では、これらの隙間付与（図中ではスリットあり、なし）による顕著な腐食の局在化は認められなかった（谷口ほか、2003；鈴木ほか、2003）。

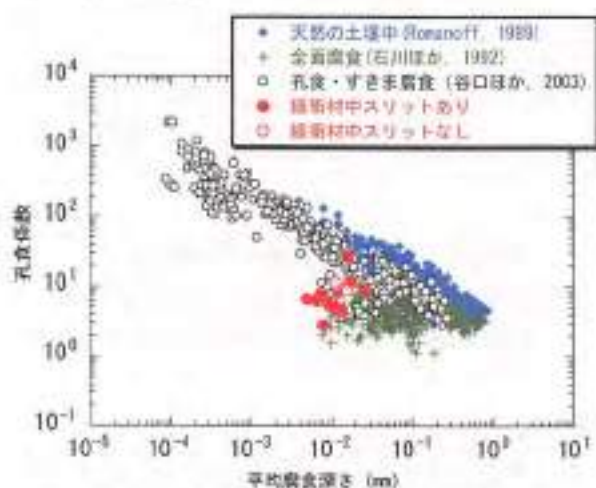


図4.1-17 平均腐食深さと孔食係数の関係

平成14年度は、緩衝材定置後初期にみられる緩衝材と岩盤の隙間における、緩衝材の隙間膨潤に関する基礎試験を行った（杉田・菊池、2002）。試験は、密度変化の挙動を観察しやすいように、図4.1-18に示す隙間を大きくした試験セルを用い、試験水を満たしたデシケータに入れ、緩衝材を密着させて経時的な密度分布の変化を観察した。

所定の期間を経過した供試体は、図4.1-19に示す位置より密度測定試料を切り出し、飽和含水比から乾燥密度を算出した。図中には、乾燥密度の測定結果もあわせて示した。また、供試体の中央には重量を無視できる軽量の模擬廃棄体を目印と

して入れ、その位置も測定した。図から、隙間部では時間の経過とともに乾燥密度が増加し、初期に緩衝材がおかれていた部分では乾燥密度が低下している。図4.1-20(a)は図4.1-19の密度の分布をプロットしたもので、密度の最大値と最小値の

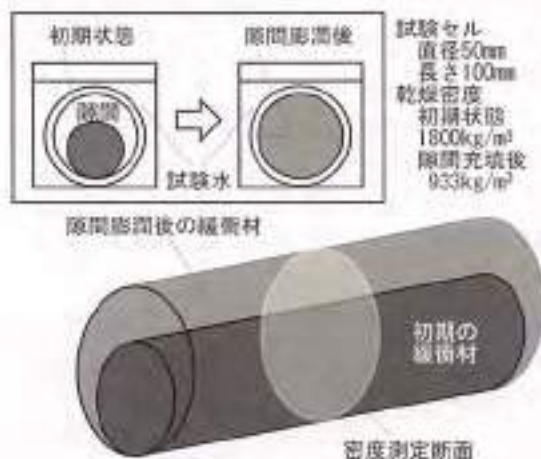


図4.1-18 膨潤試験の模式図

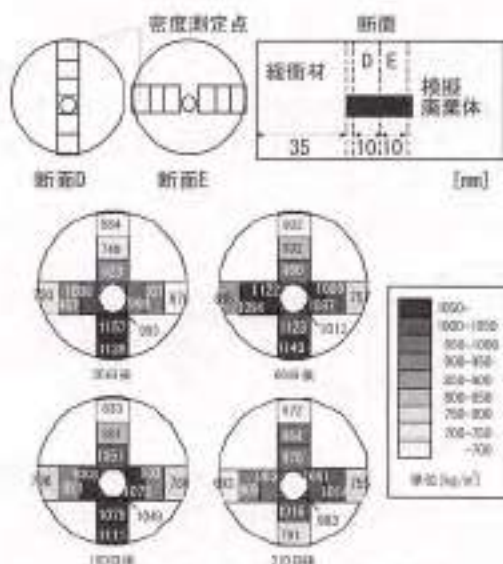


図4.1-19 密度分布の測定位置および経時変化

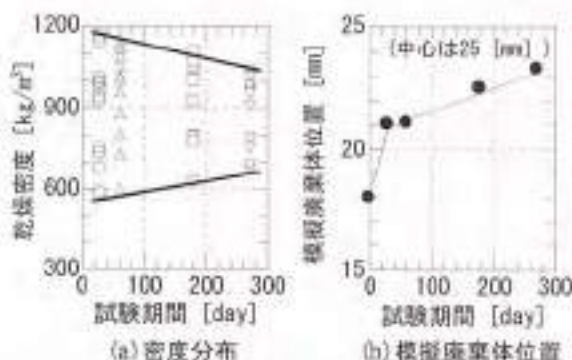


図4.1-20 密度分布および模擬廃棄体位置の経時変化

経時変化を直線で示した。時間の経過とともにバラツキの幅が小さくなり、密度が均一になる方向に変化していることがわかった。

また、初期の緩衝材の中心に挿入した模擬廃棄体の変位(図4.1-20(b))および周囲の密度分布の経時変化から、隙間充填の際には初期の位置関係のまま均一に膨潤するのではなく、廃棄体を中心とした緩衝材の回りこみが起こっていることが示唆された。

さらに、実際に緩衝材ブロックの施工において生ずる緩衝材周囲の隙間が、設計時の予想通りに緩衝材の膨潤により埋められるかどうかを実規模の工学試験により確認することは困難なため、膨潤挙動に関する解析評価手法の検討を開始し、簡易的に本試験セルでの膨潤過程を模擬した解析を実施した。解析では、試験セル内側の1/4を対象領域とし、汎用の有限要素法解析コードであるABAQUSを用いた。解析結果の例として、初期状態と試験セル内壁まで膨潤した様子を図4.1-21に示す。膨潤解析結果から、膨潤前(赤線のメッシュ)の緩衝材が、セルの隙間を埋めるように膨潤している(黒のメッシュ)がわかる。

本解析では、隙間膨潤に関する基礎試験で確認された緩衝材の回りこみまでは十分表現できていない。今後、試験の状況をより表現可能とするためのモデルの改良が必要である。

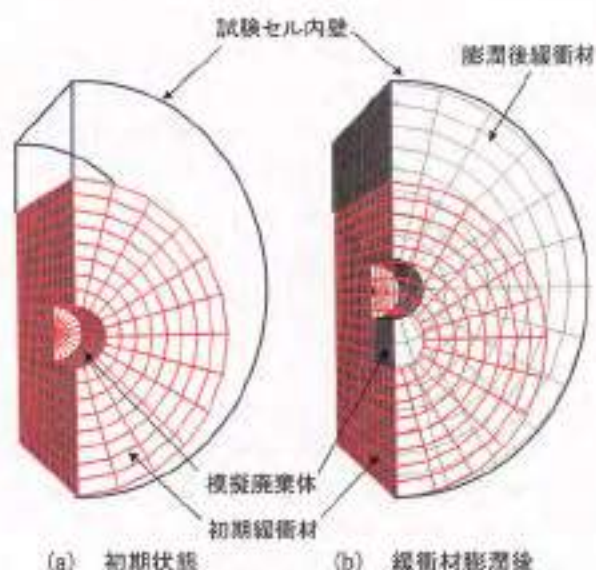


図4.1-21 膨潤解析結果

③ まとめ

処分場の長期的安全性の確保に関する検討では、処分場を構成する要素として、埋め戻し材、プラ

グ、アクセス・連絡・主要・処分各坑道および処分孔等に関する性能保証項目の整理を実施した。今後は、整理により抽出した課題に対して、サイクル機構における取り組み状況を整理し、処分事業の推進、安全基準・指針の策定への反映を念頭においた技術的根拠の整理を行う。

オーバーバックおよび緩衝材の位置に係る検討では、人工バリア設置後の緩衝材の膨潤挙動を再現した試験を継続して実施し、また、平成14年度に検討を開始した解析手法についても、コードの適用性の確認、必要に応じてその改良および膨潤試験による検証を行っていく。これらの成果は、幌延の深地層の研究施設における設置精度確認試験での緩衝材膨潤挙動の評価へ反映する予定である。

参考文献

- 長谷川 宏, 納多 勝, 木田ゆう子 (2002): 人工バリア性能確認モニタリングに関する研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 株式会社大林組), JNC TJ8400 2002-048.
- 石川博久, 本田 明, 鶴留浩二, 井上邦博, 小畑政道, 佐々木憲明 (1992): オーバーバック候補材料選定と炭素鋼オーバーバックの寿命評価, 動燃事業団技術資料, PNC TN8410 92-139.
- 川上 進, 杉田 裕, 栗原雄二, 神徳 敏, 油井三和, 谷口直樹, 榎井憲治, 柴田雅博, 本間信之 (2003): 高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア等の性能保証に関わる研究の進め方と反映先, サイクル機構技術資料, JNC TN 8409 2002-026.
- Romanoff, E. (1989): Underground Corrosion, Originally Issued by NBS in 1957, Reprinted by NACE, p. 80.
- 杉田 裕, 菊池広人 (2002): 人工バリアにおける緩衝材の隙間膨潤挙動に関する基礎研究, サイクル機構技術資料, JNC TN8430 2002-003.
- 杉田 裕, 栗原雄二, 川上 進, 神徳 敏, 油井三和, 柴田雅博 (2003): 高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア等の性能保証に関わる研究の進め方と反映先(その2), サイクル機構技術資料. (登録準備中)
- 鈴木治雄, 杉田 裕, 谷口直樹, 川上 進, 藤島 敏 (2003): 隙間の存在する緩衝材中における炭素鋼の腐食挙動, 日本原子力学会 2003 年「春の年会」要旨集, P15, p. 935.
- 谷口直樹, 川崎 学, 川上 進, 鈴木治雄 (2003): 弱アルカリ性～アルカリ性環境における炭素鋼オーバーバックの局部腐食進展挙動, サイクル機構技術資料. (登録準備中)

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) 緩衝材の長期力学挙動に関する研究

① 課題と計画の概要

「第2次取りまとめ」においては、オーバーバックの自重による沈下解析を一般の粘性土で実績がある関口-太田モデルを用いて行った。しかし、緩衝材は一般の粘性土に比べ膨潤性が高いことや既往の評価期間に比べて長期の評価を行う必要があることから、評価の信頼性向上のために評価モデルの適用性をさらに検討することが必要である。また、緩衝材のオーバーバック支持力の長期安定性に対する安全裕度確認のために、クリープ破壊試験などを実施し長期挙動における限界状態を把握することも重要である。このため、適用可能な既往の構成モデルの抽出ならびにそれらモデルと室内試験結果との比較検討、さらにはクリープ破壊試験によるデータの取得などを通して、緩衝材の長期力学挙動に係る基本的評価モデルの構築に向けた検討を進めている。

② これまでの成果

平成13年度には、クリープ破壊試験の実施過程において明らかとなった、載荷ピストンの軸摩擦の影響を改善するため、試験装置の改良を実施した。平成14年度は当該装置を用いたクリープ破壊試験を進めてきたが、圧密過程に長時間を要し、現在も継続実施中である。

一方、既往評価モデルの妥当性に関する検討については、i) これまでに行った三軸圧縮試験の結果(高治・鈴木, 1999)から、緩衝材の非排水せん断に伴う応力経路や応力とひずみの関係が一般の粘性土と同様に有効応力で統一的に表されること、ii) 緩衝材の長期力学挙動に対しても有効応力に基づくCam-Clay系の構成則が成立する可能性が高いことなどから、粘弾塑性挙動を評価可能なCam-Clay系の構成則が緩衝材の長期力学挙動の評価に適用可能であると考えられる。そこで、Cam-Clay系の構成則を体系的に整理し、それらから最も適用可能と考えられるモデルの抽出を行った。Cam-Clay系構成則の系統図を図4.2-1に示す。

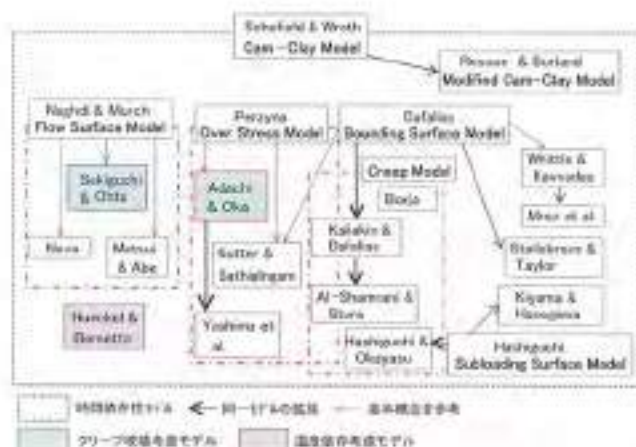


図 4.2-1 Cam-Clay 系構成モデル系統図

図は降伏条件の取扱いなどによって系統を分類しており、時間依存性を評価可能なものとして Flow Surface モデル、Over Stress モデル、Creep モデルやこれらの複合モデルがある。この中で実績がありかつクリープ破壊も評価可能なモデルとして関口-太田モデルと足立-岡モデルを抽出した。

これらを受け、抽出されたモデルの適用性をより詳細に評価するために室内試験結果との比較を実施した。

図 4.2-2 にクリープ試験とモデル評価の比較結果を示す。モデル評価においては、二次圧縮係数 α と初期体積ひずみ速度 \dot{v}_0 を圧密試験結果より定め、ポアソン比 ν を変化させた。図よりポアソン比を一般の粘性土に比べて小さく設定すれば長期挙動をある程度精度良く評価できることや、足立-岡モデルと関口-太田モデルの評価結果に有意な差が認められないことがわかった(重野ほか, 2002)。ポアソン比が小さい設定となる理由としては、緩衝材の体積変形挙動には吸水膨潤の影響が大きいこと、せん断弾性率と体積弾性率の関係などが一般の粘性土と異なるためと考えられる。

図 4.2-3 は、緩衝材の圧密試験結果より得られる $e-\log p'$ 特性(空隙比と圧密応力の関係)を示したものであるが、除荷-再載荷過程での吸水膨潤の影響と考えられる非線形性がみられる。吸水膨潤の影響を適切に評価する方法としては、ポアソン比の設定による方法とは別に、足立-岡モデルや関口-太田モデルの降伏関数として用いられる Cam-Clay モデルを改良する方法が考えられる。そこで、従来のモデルでは圧密試験の降荷過程から唯一のものとして決定される膨脹指数 κ を、その導入過程におけるパラメータのひずみレベルの

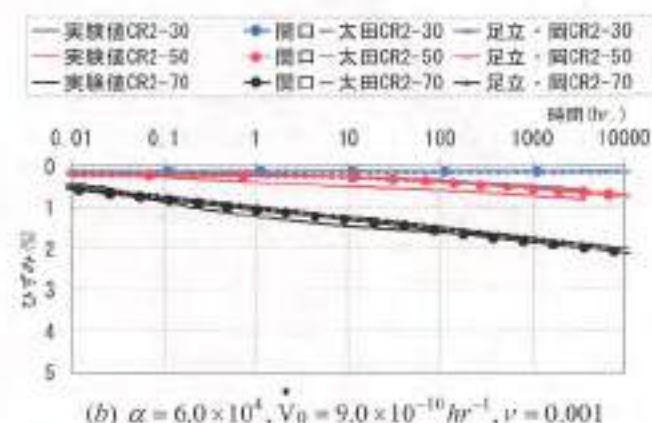
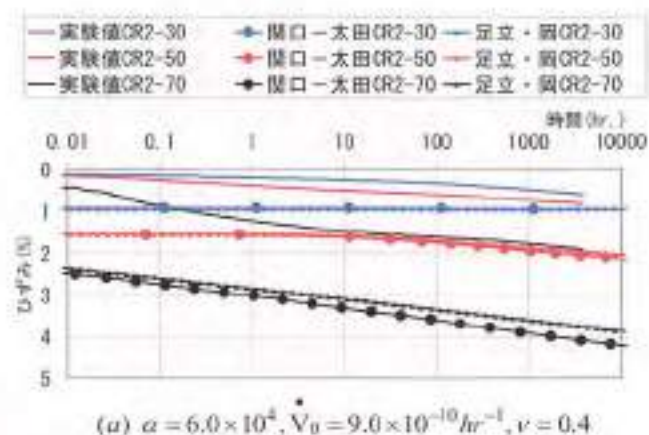


図 4.2-2 クリープ試験結果と解析結果の比較

違いから 3 種類設定するようなモデルの改良を試みた(平井・棚井, 2003)。すなわち, せん断初期剛性を決定するための κ_1 , 体積弾性係数に用いる κ_2 , 硬化則に用いる κ_3 であり, 同図に圧密曲線と合わせて示した。このような改良モデルにより求めた, 応力比-軸ひずみ曲線を過去に取得した三軸圧縮試験結果, ポアソン比 $\nu = 0.001$ とした従来の Cam-Clay モデルによる評価とともに図 4.2-4 に示す。従来型 Cam-Clay モデルでは微小ひずみの範囲での弾塑性挙動の評価は, ポアソン比を小さく設定しても精度が低い, 改良モデルでは精度が高くなることわかる。このような結果が様々な応力過程で成立するかどうかは今後検討の必要があるが, 膨潤挙動の非線形性を適切にモデル化することが長期挙動の信頼性を高めるために必要であると考えられる。

③ まとめ

既往の評価モデルのパラメータの設定によって, 緩衝材の長期力学特性を概略評価可能である。しかし, パラメータの選定やパラメータの非線形性の考慮方法には検討の余地があり, 引き続き検討

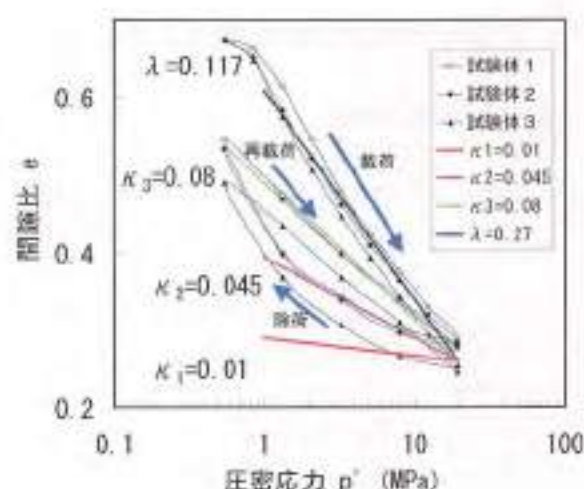


図 4.2-3 緩衝材の $e-\log p'$ 特性

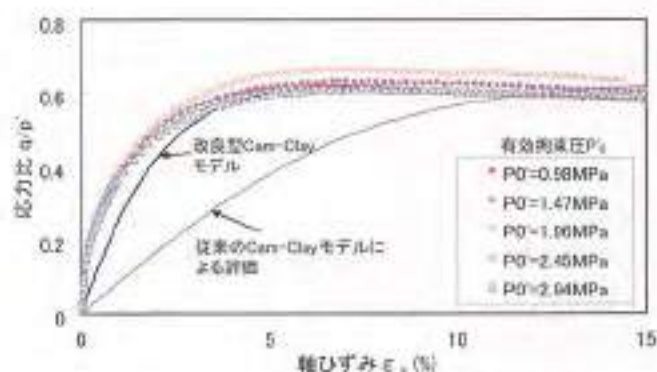


図 4.2-4 緩衝材の応力ひずみ関係

を継続する必要がある。また, クリープ破壊試験の継続により選定された評価モデルで破壊まで評価可能かどうかや海水系地下水環境での評価, さらにはオーバーバックや岩盤との相互作用評価なども課題としてあげられる。したがって, 今後以下の検討を進める予定である。

- ・クリープ破壊が評価可能な評価モデルの選定
- ・海水系地下水環境での室内試験の実施と適切な挙動評価モデルとパラメータの選定
- ・岩盤, オーバーバック, 緩衝材の力学相互作用を考慮した解析評価

参考文献

- 平井 卓, 棚井 憲治 (2003) : 緩衝材の弾塑性挙動評価モデルに関する検討, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, P9, p. 929.
- 重野 喜政, 並河 努, 高治 一彦 (2002) : 緩衝材長期挙動構成モデルの検討, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 株式会社竹中工務店), JNC TJ8440 2002-004.
- 高治 一彦, 鈴木 英明 (1999) : 緩衝材の静的力学特性, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-041.

1-2) 岩盤の力学的変形挙動に関する研究

① 課題と計画の概要

人工バリアの境界条件であるニアフィールド岩盤の長期力学的変形挙動について、「第2次取りまとめ」では大久保ら(1987)により提案されたモデルによる解析的評価を行った。

今後、評価の信頼性向上のために、岩盤の変形特性に関わる環境(熱の作用や含水状態の変化)依存性(宮野前ほか, 2002)や、拘束圧(支保や人工バリアからの反力)依存性を考慮した、ニアフィールドで想定される事象に即した評価が必要である。

② これまでの成果

平成14年度には、主に岩盤の変形特性の拘束圧依存性について基礎データを取得し(岩石スケール)、模型実験(岩盤スケール)により実挙動を把握した後、それらの結果を踏まえた人工バリア-岩盤の連成解析(ニアフィールドスケール)を行った。基礎データ取得にあたっては、幌延の深地層の研究施設における原位置試験計画に資する目的で、幌延HDB-1孔の深度520m付近で採取された岩石を用いた。

1) 基礎データ取得

常温下、排水状態において一軸圧縮試験(拘束圧 0MPa)および三軸圧縮試験(拘束圧 5MPa, 10MPa)を行った(大久保, 2003)。試験中の載荷速度を増減(ひずみ速度を $3 \mu\text{st/s}$ と $30 \mu\text{st/s}$ で繰り返し)させ、そのときの応力の増減から拘束圧が岩石の粘弾性的性質に与える影響を把握することを試みた(大久保ほか, 2002)。試験より得られた応力-ひずみ曲線を図4.2-5に、試験結果の平均値を表4.2-1に示す。結果より、強度については拘束圧が作用すると増加すること(0MPa から 5MPa へ増加すると顕著に増加)、粘弾性的性質については拘束圧が作用すると顕著でなくなっていく(n が大きくなる)ことがわかった。

これらを踏まえ、圧縮試験と同条件において多段階クリープ試験を行った(大久保, 2003)。クリープ応力は、各拘束圧における圧縮試験より得られた強度(表4.2-1)の約20, 40, 60, 80, 100%で1時間ずつ載荷した。試験より得られたクリープひずみ-時間曲線を図4.2-6に、圧縮試験より得られた強度と破壊時のクリープ応力との関係を表4.2-2に示す。一軸クリープ状態(拘束圧 0MPa)で

は強度の約100%でクリープ破壊が起こったが、拘束圧が作用する三軸圧縮状態では強度の約100%でも破壊が起こらなかった。よって、クリープ試験の結果からも、粘弾性的性質については拘束圧が作用すると顕著でなくなっていく(拘束圧が作用すると、クリープ破壊しにくくなる)ことがわかった。

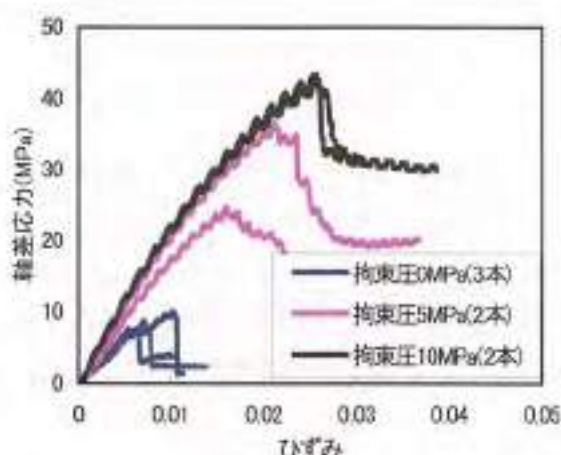


図 4.2-5 応力-ひずみ曲線

表 4.2-1 試験結果

拘束圧 (MPa)	軸差強度 (MPa)	強度増加率 ¹⁾ (%)	n	m	ヤング率 (GPa)	試験数 (本)
0	8.3	8	30	30	1.3	3
5	30	4	60	30	1.7	2
10	43	3	80	30	2.0	2

1) 載荷速度が10倍になったときの強度増加率

2) コンプライアンス可変型モデル(大久保ほか, 1987)の定数

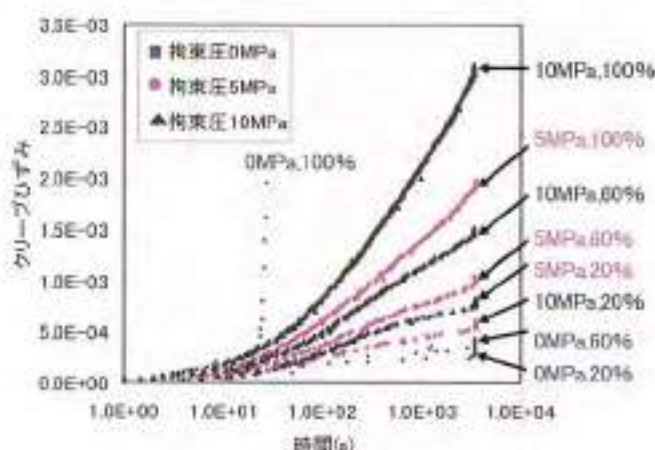


図 4.2-6 クリープひずみ-時間曲線

表 4.2-2 強度と破壊時クリープ応力との関係

拘束圧 (MPa)	軸差強度 (MPa)	クリープ軸差応力 (MPa)	クリープ応力度 ¹⁾ (%)
0	8.3	8.7	105
5	30	36	119
10	43	48	112

1) クリープ軸差応力を軸差強度で除した値

ii) 模型実験

坑道掘削後のニアフィールド岩盤の応力、変形に関する実挙動を把握する目的で、模型実験を実施した(井上・南, 2003)。模型岩盤は縦幅 1.0m、横幅 1.0m、厚さ 0.5m の人工岩盤(シルト、粘土、およびセメントの混合体とし、28 日強度の目標を 1.0MPa とした)であり、孔掘削後の岩盤の応力状態を計測する目的で、地圧計を埋設した。クリープ応力は図 4.2-7 に示す装置(油圧ジャッキ)で岩盤側面に載荷し、岩盤に初期応力が発生した状態で直径 15cm の孔を掘削した後、約 1 ヶ月クリープ状態を保持した。クリープ応力は、地山強度比が 1.0 となるよう設定した。また、拘束圧が孔壁面の安定性に及ぼす影響について検討する目的で、孔掘削の 1 週間後にゴムバルーンにより約 1.0MPa の内圧を負荷した。

実験結果より、掘削時および内圧負荷時の岩盤の応力状態は弾塑性理論解析結果と概ね整合がとれていること、定性的ではあるが内圧が小さい場合(井上・野田, 2002)に比較し孔壁面の安定性が保たれていること(図 4.2-8)がわかった。これらの結果は実験終了後、岩盤を解体し実施したエコーチップや針貫入試験結果と概ね整合がとれていた。以上の結果は、ニアフィールド岩盤の長期安定性は拘束圧(支保や人工バリアからの反力)作用の程度に依存することを示唆している。実験結果の例として孔半径方向応力 σ_r の経時変化を図 4.2-9 に、孔周方向応力 σ_θ の経時変化を図 4.2-10 に示す。図中凡例の数値は坑道壁面からの距離(cm)を示す。

今後は、実岩盤を用いたより長期にわたる試験や、坑道内部に緩衝材を設置した試験を実施する予定である。また、適度な拘束圧が岩盤に作用すれば、掘削影響領域の強度が回復する可能性があることが示唆されており(大久保ほか, 2002)、このような観点も踏まえて研究を進める。



図 4.2-7 模型実験装置



図 4.2-8 試験後の掘削孔壁面

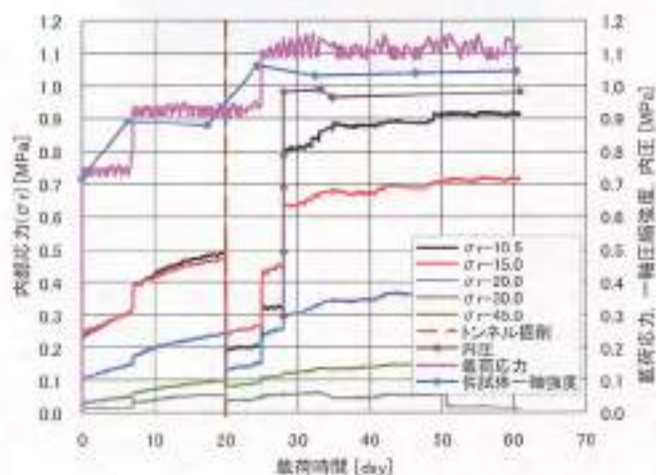


図 4.2-9 孔半径方向応力の経時変化

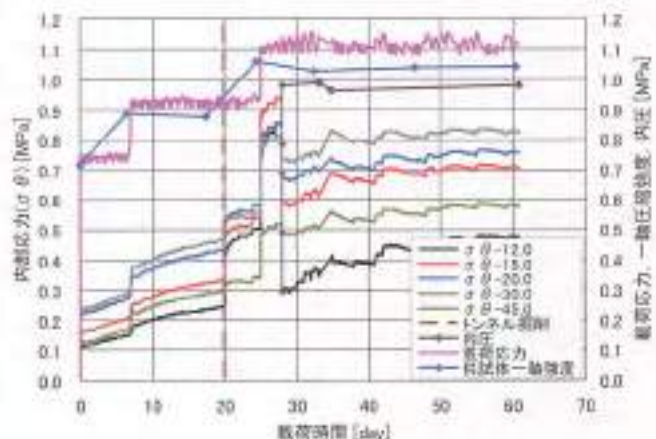


図 4.2-10 孔周方向応力の経時変化

iii) 人工バリアー岩盤の連成解析

前述の岩石試験、模型実験結果を踏まえ、ニアフィールドの長期構造力学安定性について検討する目的で例示的に人工バリアー岩盤の連成解析を行った。解析モデルは「第2次取りまとめ」における空洞安定性解析モデル（軟岩系岩盤、処分孔堅置き方式）とし、処分坑道掘削（支保工設置）、処分孔掘削後に人工バリアーを処分孔内に埋設した場合を想定し解析を行った（図4.2-11）。

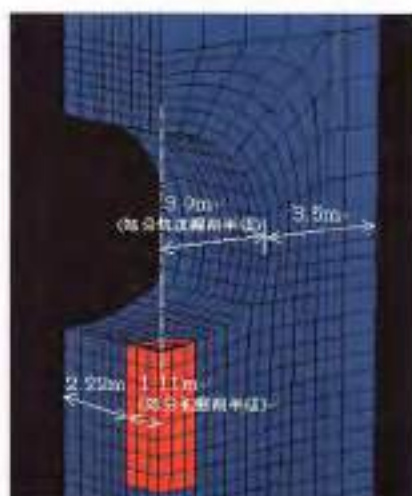


図4.2-11 人工バリアー岩盤の連成解析モデル

解析の対象とする時間については、人工バリアー埋設後、100年間のオーバーバックの腐食膨張変形による影響は小さいと考え、それ以前までとした。モデルを簡略化するため、人工バリアーは緩衝材のみをモデル化した。モデル化にあたっては、有効応力則等(重野ほか、2002)に従うモデルがより現実に近いものであるが、今回は岩盤が対象であることから、モデルを簡略化するため線形弾性体とし、物性値は高治・鈴木(1999)を参考にパラメータ(ヤング率50MPa、3MPaの2ケース)とした。また、岩盤に作用する拘束圧(内圧)の影響について検討する目的で、緩衝材に膨潤圧(熱膨張で模擬)が発生するケース(0.5MPa)も考慮した。岩盤はコンプライアンス可変型モデル(大久保ほか、1987)を例にとり、物性値は「第2次取りまとめ」と同様(軟岩系岩盤SR-C相当、初期ヤング率3.5GPa、初期ポアソン比0.3、 $n=20$ 、 $m=5$)とした。また、「第2次取りまとめ」と比較し、岩盤がより脆性的となるケース($m=10$)についても考慮した。解析ケースを表4.2-3に示す。解析は、汎用有限要素法解析コードABAQUSで行った。

結果の一例として、緩衝材埋設100年後におけ

るニアフィールド岩盤のヤング率低下領域の分布例(解析ケース:m10e3exp0,m10e3exp05)を図4.2-12に、緩衝材(要素分割数240個)の応力状態をMohr-Coulombの破壊基準に従う限界状態線とともに図4.2-13に示す。限界状態線を定義するにあたり、緩衝材の粘着力、内部摩擦角、および引張強度は高治・鈴木(1999)の試験結果を参考に設定した。図4.2-12より、緩衝材の膨潤圧が作用した場合(図右)は、作用しない場合(図左)と比較して岩盤のヤング率低下領域が狭いことがわかる。また、図4.2-13より、解析ケース(岩盤の長期変形特性を示す物性)によって緩衝材の応力状態が異なることがわかる。これらの結果より、岩盤と緩衝材が、互いの安定性に影響を及ぼし合っていることがわかり、今回は簡単のため考慮しなかった水理学的影響も含め、今後より詳細な連成挙動評価が必要であることが示唆された。

表4.2-3 解析ケース

ケース名 ^{a)}	緩衝材 (線形弾性体)		岩盤 (粘弾性体)			
	ヤング率 ^{b)} (MPa)	ポアソン比 ^{c)}	初期ヤング率 ^{d)} (GPa)	初期 ポアソン比 ^{e)}	n ^{f)}	m ^{g)}
m5e3exp0	3.0	0.4	3.5	0.3	20	5
m5e50exp0	50					
m5e3exp05	3.0					
m10e3exp0	3.0					
m10e50exp0	50					
m10e3exp05	3.0					

1) m は岩盤の脆性、 n は岩盤のヤング率、 m は緩衝材の膨潤圧を示す
2) 埋設から100年後まで一定と仮定
3) 埋設時に埋設から30年後に発生する膨潤圧
4) サブルーチンにより随時変化する
5) コンプライアンス可変型モデル(大久保ほか、1987)の定数

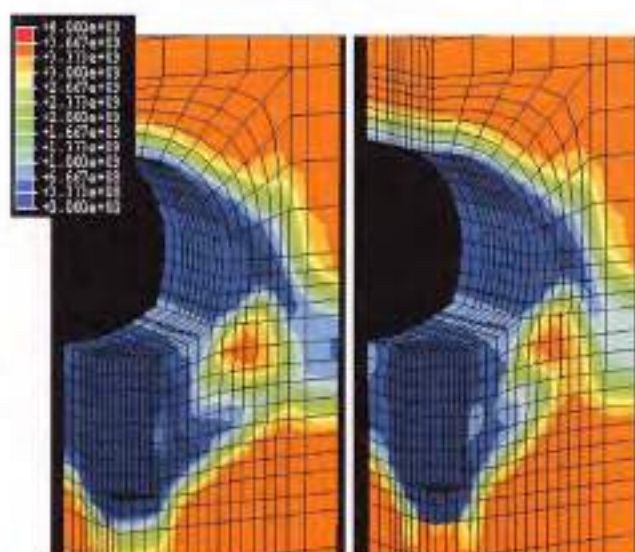


図4.2-12 ヤング率低下領域
【ケース m5e3exp0(左)、m5e3exp05(右)】
(赤以外の領域が影響を受けた部分)

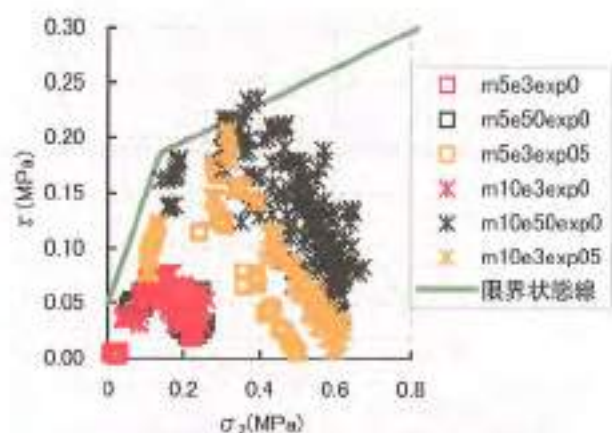


図 4.2-13 緩衝材の応力状態

③ まとめ

平成 14 年度は主に岩盤の変形特性の拘束圧依存性について検討を行った。

岩石圧縮試験では、試験中の载荷速度を増減させ、その時の応力増減から拘束圧が岩石の粘弾性的性質に与える影響を把握することを試みた。その結果より、拘束圧が作用すると岩石の強度が増加するとともに、粘弾性的性質が顕著でなくなっていくことがわかった。クリープ試験でも同様の結果が得られた。

また、坑道掘削後のニアフィールド岩盤の実挙動を把握する目的で内圧を負荷した模型実験を行った。その結果、ニアフィールド岩盤の長期安定性は拘束圧(支保や人工バリアからの反力)作用の程度に依存することが示唆された。

これら岩石試験、模型実験結果を踏まえ、単純化した条件において人工バリア-岩盤の連成解析を行った。その結果、緩衝材からの反力や膨潤圧の作用に依存してニアフィールド岩盤の長期変形挙動が異なること、逆にニアフィールド岩盤の長期変形特性に依存して緩衝材の応力状態が異なること、すなわちニアフィールドの長期構造力学安定性を評価するに際し、これら互いの影響を適切に評価する重要性が示唆された。

今後、より信頼性のある評価を行う目的でこれら基礎的な研究を継続し、岩盤の長期変形挙動評価の体系化を図る。研究の遂行に際しては、室内試験や数値解析、および原位置試験のみではなくナチュラルアナログ的な考え(大久保ほか、1999)なども考慮しつつ研究を進めていく。

参考文献

井上博之、南 浩輔 (2003) : 軟岩の長期力学的変形挙

動研究。サイクル機構技術資料(研究委託報告書; 前田建設工業株式会社), JNC TJ8400 2002-061。
井上博之、野田兼司(2002) : 軟岩を対象とした長期岩盤挙動研究。サイクル機構技術資料(研究委託報告書; 前田建設工業株式会社), JNC TJ8400 2002-011。
宮野前俊一、小川豊和、井上博之、柴本 裕 (2002) : 軟岩の長期力学的変形挙動に関する研究。サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2002-015。
大久保誠介 (2003) : 軟岩の長期挙動に関する研究。サイクル機構技術資料(研究委託報告書; 東京大学), JNC TJ8400 2002-062。
大久保誠介、福井勝則、新 孝一(1999) : 岩盤の破壊基準と長期挙動に関する一考察。資源と素材, Vol. 115, No. 4, pp. 213-218。
大久保誠介、福井勝則、木村有仁(2002) : 土丹の力学的特性と構成方程式。トンネルと地下, Vol. 32, No. 1, pp. 45-50。
大久保誠介、西松裕一、緒方義弘(1987) : 非線形粘弾性モデルによる坑道変形のシミュレーション。日本鉱業会誌, Vol. 103, pp. 293-296。
重野喜政、並河 努、高治一彦(2002) : 緩衝材長期挙動構成モデルの検討。サイクル機構技術資料(研究委託報告書; 株式会社竹中工務店), JNC TJ8440 2002-004。
高治一彦、鈴木英明(1999) : 緩衝材の静的力学特性。サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-041。

2) 緩衝材の流出・侵入挙動に関する研究

① 課題と計画の概要

緩衝材の流出・侵入挙動に関しては、岩盤亀裂中へのベントナイトの侵入および侵入したベントナイトゲルの浸食によって、緩衝材の密度の低下やベントナイトコロイドの生成が生じる。これらの挙動により、緩衝材自体の諸機能の低下や物質移行などを促進することが考えられることから、これら 2 つの現象を定量的に把握し、緩衝材の諸機能へ及ぼす影響を評価する必要がある。

このため、「第 2 次取りまとめ」までに把握された降水系地下水条件における基本的な挙動を踏まえ、より信頼性のある流出・侵入挙動評価を行うために、実際の地質環境条件を考慮した侵入・浸食現象に関するデータの拡充や侵入現象モデルの構築を進めている。

② これまでの成果

i) 侵入現象試験

平成 13 年度までに、降水系地下水条件における単一模擬亀裂中への侵入現象に関する基本的なデータの取得を行い、時間 t と侵入距離 y の関係により、亀裂幅 d とベントナイト含有比 Bc に依存する比例係数 A を整理した。侵入距離は、時間の平方根に比例して大きくなり、次式に示す関係がある。

$$y = A(d, Bc)\sqrt{t} \quad (4.2-1)$$

これら亀裂中への侵入速さの指標となる成果を踏まえ、海水系地下水条件が緩衝材の侵入挙動に及ぼす影響に関して、時間と侵入距離に係るデータの拡充を行った。用いた供試体は、乾燥密度 $1.60\text{g}/\text{cm}^3$ ケイ砂混合体および $1.80\text{g}/\text{cm}^3$ ベントナイト単体である。なお、亀裂幅は 1.5mm で行った。図 4.2-14 に降水系地下水（蒸留水）と海水系地下水（人工海水）における経過時間と侵入距離の関係を比較して示す。

図からわかるように、海水系地下水では亀裂への侵入距離が降水系地下水よりも小さく、比例係数は降水系の $1/10$ 程度となった。ベントナイトの侵入挙動は、主に膨潤によるものと考えられる。したがって、比例係数が小さくなる要因としては、ベントナイトの膨潤性の低下が考えられる。

今後は、塩水や凝延で得られる地下水などを用い、データの拡充を行う。

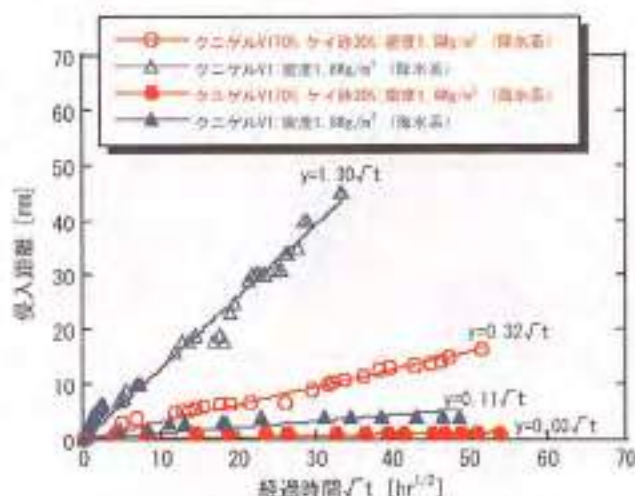


図 4.2-14 経過時間と侵入距離の関係

ii) 侵入現象のモデル化に関する検討

緩衝材の侵入現象に関しては、これまでに拡散モデル（杉野・菅野，1999）を適用したモデル化を試みている。しかしながら、モデル化に必要な固相拡散係数の導出においては、入力データである緩衝材の粘性係数が取得されていないため推定値を用いており、低密度領域の膨潤応力や透水係数を外挿による仮定をもとに評価している。これらを踏まえ、ここではモデルの精度向上および妥当性を検討するために、緩衝材の粘性係数について、含水比をパラメータにデータの取得を試み、ベントナイトの粘性に関する基本的な特性を把握した。測定結果を図 4.2-15 に示す。

測定は、粘度計（ドイツ・ハーケ社製：レオストレ ス RS300）を用い、動的粘弾性法によって、ベントナイトの含水比 $10\sim 1200\%$ の範囲で行った。比較的液状である含水比 1200% のベントナイト試料では、角速度（日本規格協会，1991）によらず、ほぼ一定の粘性を示したことから、ニュートン流動として取り扱うことができる。しかし、これ以下の含水比での粘性は、角速度に影響されており、角速度が小さくなるほど、粘性が大きくなる非ニュートン流動としての傾向がみられた。

緩衝材の侵入現象試験において、最も侵入が大きい一部の試験結果を用い、亀裂中への移動速度を角速度に置き換えた場合、 $10^3\text{rad}/\text{s}$ 程度と推定できる。したがって、ここで得られた粘性データ（図 4.2-15）は、実現象よりも 4 桁以上大きい角速度を用いて測定したものとなっている。粘性データの測定では、実際の侵入現象に対応した角速度による測定が必要であるが、現状の測定技術では不可能である。そのため、緩衝材の侵入現象に

におけるベントナイトの粘性を推察した場合、角速度 10^{-1} rad/s の粘性よりも大きくなることが考えられる。

今後は、本測定結果を基に外挿するなどして、ベントナイトの粘性がモデル評価へ与える影響について検討していく。また、これらの物性値のほか、モデルの適用性や妥当性を評価するためには、亀裂内侵入域における密度分布の把握も必要であり、今後、X線CTの技術を利用した非破壊での測定を計画している。

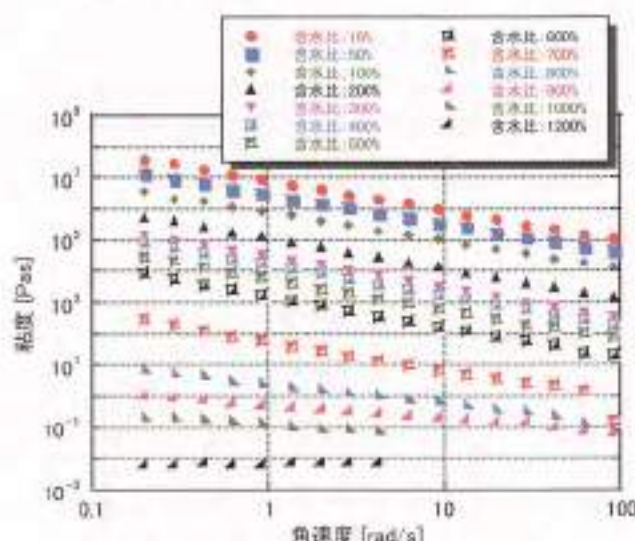


図 4.2-15 ベントナイトの粘性

iii) 浸食現象試験における予測的解析

平成 13 年度までの浸食現象試験では、亀裂内の水流速に関して、流路断面積と流量から算出した流路全体の平均流速により浸食現象が発生する臨界流速値を評価した。一方で、トレーサー液を用いた可視化による実流速測定では、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 倍程度であった（菅野・松本，1997）。浸食現象を評価するためには、コロイド粒子の移行に直接的に影響する水流速を把握しておくことが必要である。これまでの概略的な亀裂内流速の評価では、平均流速を用いた場合に、臨界流速値を過小に見積もってしまう可能性があること、また、トレーサー液による流速測定では、トレーサー液がベントナイトの膨潤特性に影響を与えてしまうことから、測定が試験終了直前での期間に限られてしまうなどの問題がある。

これらを踏まえ、流速と浸食量の関係の定量化という観点から、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（内田・澤田，1994）を用いた亀裂内流速の予測的解析を実施し、亀裂内流速の概略的な把握を試みた。図 4.2-16 に、試験容器図を示す。図は、試験容器の上部よりベントナイトの侵入形状を観察しているものであり、給水口から排水口に向かって単一平板亀裂内に水流を与えている。本解析では、この試験容器および亀裂内の侵入ベントナイトを図 4.2-17 に示す解析モデルで表現した。解析条件は、給水口および排水口から一定流量の給排水境界とし、亀裂外周および亀裂内に侵入したベントナイトの領域は不透水境界とした。



図 4.2-16 浸食現象試験容器

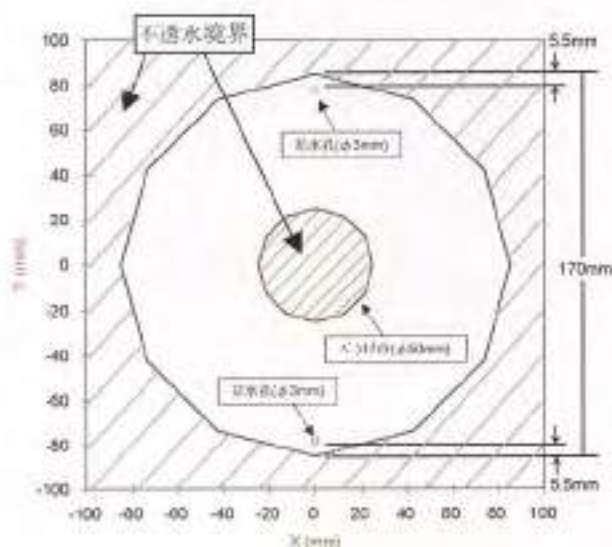


図 4.2-17 解析モデル

図 4.2-18 に、パーティクルトラッキング法（粒子追跡法）による物質移動解析結果の一例を示す（松本・棚井，2003）。図は、浸食現象試験における試験容器を多角形モデルで表現し、上部の給水

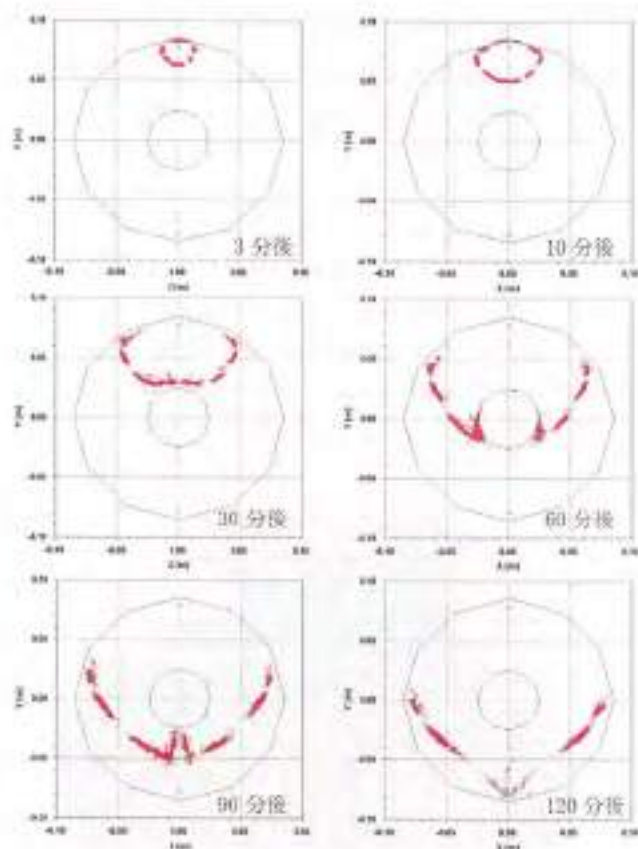


図 4.2-18 パーティクルトラッキング解析結果

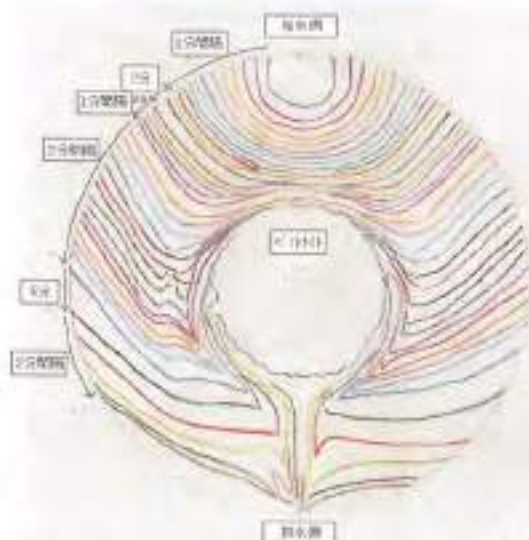


図 4.2-19 亀裂内におけるトレーサー液の移動

口から下部の排水口までの亀裂を流れる水の動きをパーティクルの移動によって経時的に示している。亀裂内における水の移行過程は、トレーサー液を用いた流速測定結果(図 4.2-19)の傾向とよく一致していることが分かる。しかしながら、ベントナイト近傍(侵入ベントナイトのフロント付

近)の流速について、解析値と実験値を比較した場合には、解析値よりも実験値による亀裂内流速が約 1.5 倍程度大きい流速となった。

図 4.2-20 は、解析と実験におけるベントナイト近傍および亀裂外壁の水流の移行経路を抽出し、比較したものである。ベントナイト近傍の水流は、解析結果で侵入ベントナイトの側壁を通過するのに対し、実験結果では解析結果よりも外側に位置していることが分かる。したがって、この水流の移行経路の差が解析結果と実験結果との流速の差異に影響しているものと考えられる。

今後は、亀裂内流速を予想的に把握する一つの手法として測定精度の向上や解析手法の確立を進め、より詳細な臨界流速値の評価および流速と浸食されるコロイド粒径や浸食量の間係などを定量的に把握する。

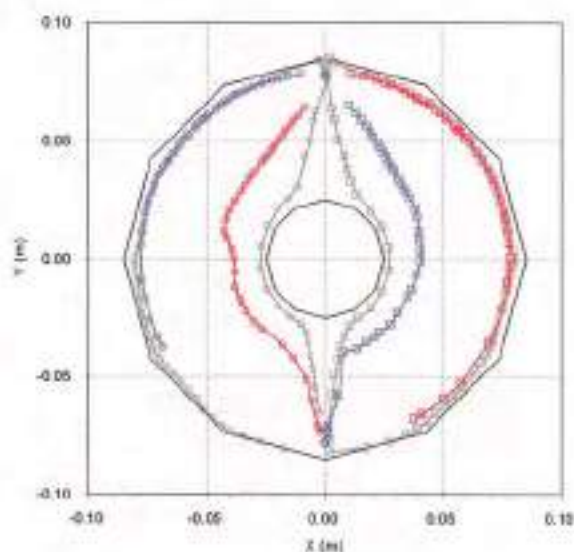


図 4.2-20 水流の移行経路の比較
(赤、青、実験結果、グレー、解析結果)

③ まとめ

緩衝材の流出挙動について、平成 13 年度以降、次のような知見が得られた。

- ・侵入現象：処分環境で想定される水質のうち、海水系地下水(人工海水)を用いて、時間と侵入距離の関係について、データの拡充を行った。その結果、海水系地下水では亀裂への侵入が降水系地下水よりも小さくなり、比例係数は降水系地下水の 1/10 程度となった。
- ・侵入現象のモデル化：モデルの精度向上および妥当性を検討するために、含水比をパラメータにベントナイトの粘性係数の取得を行った。そ

の結果、測定した角速度の範囲では、ベントナイトの粘性が角速度に依存することがわかった。

- ・浸食現象：流速と緩衝材の浸食量の関係を定量的に評価するために、解析による亀裂内流速の把握を試みた。その結果、ベントナイト近傍での亀裂内流速は、解析値よりも実験値の方が約1.5倍程度大きい流速となった。

今後は、より信頼性のある長期的な侵入挙動に関する評価を行うために、地質環境を考慮したデータの拡充を進め、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臨界流速値をより詳細に把握するとともに、掃流力と浸食量の関係を定量的に評価し、人工バリアの長期安定性評価に反映させる予定である。当面の計画とし、侵入現象モデルの信頼性向上を念頭におき、X線CTを利用した非破壊検査によって、侵入に伴う緩衝材の密度分布などの把握を行う。また、浸食現象に関しても引続き試験を実施し、流速と浸食されるコロイド粒子の粒径や浸食量の関係を定量的に把握する。

参考文献

- 菅野 巖、松本一浩（1997）：ベントナイト緩衝材の流出特性の評価（Ⅰ）、動燃事業団技術資料、JNC TN8410 97-313.
- 松本 一浩、観井嘉治（2003）：ベントナイト緩衝材の流出特性の評価（Ⅱ）、サイクル機構技術資料、JNC TN8400 2003-006.
- 日本規格協会（1991）：液体の粘度－測定方法、JIS Z 8803.
- 杉野弘幸、菅野 巖（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.
- 内田雅大、澤田 淳（1994）：亀裂ネットワーク水理物質移行モデルの開発、動燃事業団技術資料、JNC TN8410 94-091.

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」における緩衝材の長期安定性評価では、緩衝材温度を100℃以下とすること、および低アルカリ性セメントを利用し高アルカリ環境を回避することにより、緩衝材の顕著な変質を避けることができ、所期の緩衝材性能が長期にわたり維持されると推定している。その一方、腐食生成物との相互作用については長期の挙動を推定するデータが必ずしも十分ではないことや、アルカリ性環境での緩衝材変質に関するデータの充実が必要であることを指摘している。

このような状況を考慮し、鉄腐食生成物との相互作用に関しては、鉄共存系での水熱実験や天然現象の調査などから処分環境で発生する変質プロセスの同定を行う。アルカリ性環境での変質については、普通セメントの利用も考慮して、pH等の溶液条件をパラメータとしたスメクタイト溶解試験を実施し、溶解速度データを整備する。さらに、二次鉱物の生成や、緩衝材中での物質移行との連成を考慮した緩衝材変質・劣化モデルを構築し、長期の評価を試みる。これらの研究の実施により、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。

なお、最先端の知見を取り込みつつ、研究をより体系的に効率良く進めていくことを目的に、国内の粘土科学の専門家からなる評価委員会を設立し、緩衝材の長期安定性評価に関する課題の抽出・整理を行い、適宜研究計画に反映していくとともに、評価方法の妥当性の確認を行っていく。

② これまでの成果

1) 腐食生成物と緩衝材の相互作用

銅製支保と5年半にわたり接触していたベントナイト鉄床の研究 (Kamei et al., 1999) や、炭素鋼試験片と圧縮ベントナイトを低酸素の海水条件で4年間接触させていた室内試験の評価 (Shibata et al., 2002) から、これらの環境条件では、交換性陽イオンのFe²⁺との交換（鉄型化）以外の変質は認められず、鉄と接触していた緩衝材部分も含水による亀裂修復能力を有していたことを例示してきた。

平成14年度は、接触表面積を増加させ、鉄とベントナイトとの反応を加速する目的で、鉄粉と粉末ベントナイトを蒸留水と混合し、約6年間にわたり低酸素条件に静置しておいた試料の取り出しを行い、評価を開始した。また、これまでの研究においてスメクタイト鉄型化の発生が認められていることから、低酸素雰囲気下で鉄型スメクタイトを調整し、これを出発物質とする水熱変質試験に着手した。さらに、高温での変質加速試験として、ベントナイト（クニピアF）と磁鉄鉱および蒸留水を混合し、約8ヵ月間の水熱試験を実施した。試験条件として、ベントナイト/磁鉄鉱重量比(1:1~4:1)および温度(250℃~400℃)を変化させた。図4.2-21に結果の一部を示す。ベントナイト/磁鉄鉱比が1:1の条件では、スメクタイトは残存しているものの、250℃からわずかな緑泥石/スメクタイト混合層の生成が認められた (大場, 2003)。しかしながら、処分環境条件での温度とは異なることから、今後より低温側での試験について検討する必要がある。

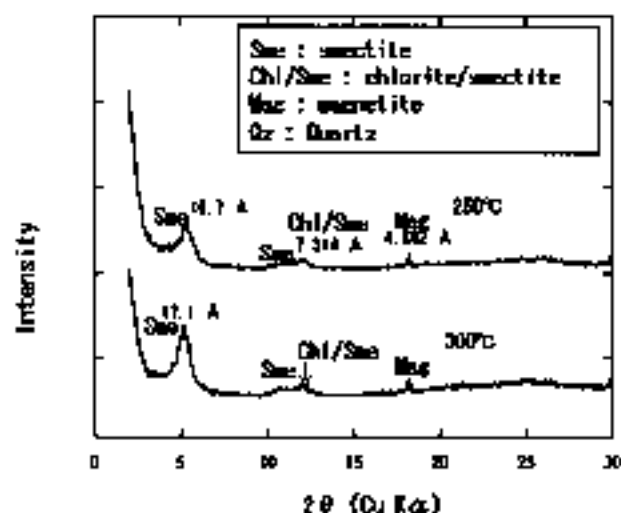


図4.2-21 水熱試験後試料のX線回折パターン (エチレングリコール処理)

堆積岩（新潟県内に分布する第二系）中に認められる、スメクタイトおよび緑泥石/スメクタイト混合層について、化学組成分析、透過型電子顕微鏡（TEM）観察および産状の調査を実施した。図4.2-22にコレンサイト（緑泥石/スメクタイト規則型混合層）のTEM写真を示す。天然における緑泥石化の調査、分析から、スメクタイトの緑泥石化機構に関する考察を実施した。その結果、評価対象とした堆積岩中での緑泥石化は、スメクタイト

層間への水酸化物層の侵入ではなく、溶解再結晶により生成したと考える方が適切であることがわかった（大場，2003）。

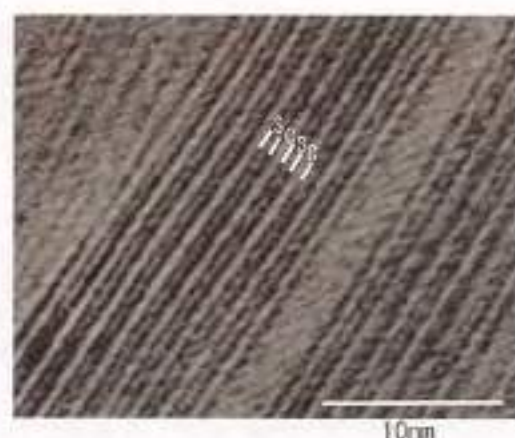


図 4.2-22 堆積岩中での続成作用により生成した緑泥石/スメクタイト規則型混合層の透過型電子顕微鏡写真
(C:緑泥石層, S:スメクタイト層)

ii) 高アルカリ条件でのスメクタイトの溶解挙動

処分システムにおけるセメント系材料の利用により発生することが予想される高アルカリ条件での緩衝材の長期安定性評価を行うために、スメクタイトのバッチ溶解試験を実施した。試験は、pH (12, 13, 13.5)、温度 (25, 50, 75℃) および溶液中の Si 濃度 (最大 500ppm) をパラメータとし、溶液中の Si および Al 濃度を測定することで溶解速度を導出した。その結果、スメクタイト溶解速度は、pH、温度および溶液中 Si 濃度の上昇に伴って、増加することがわかった。今後、より広い pH 条件で、溶解試験を継続するとともに、溶解速度の定式化を実施する。

また、緩衝材および周辺岩盤のアルカリ変質の予測に資するため、スメクタイト以外の鉱物についても、高アルカリ条件下での溶解、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た。

③ まとめ

- ・腐食生成物と緩衝材の相互作用に関する知見を充実させるため、ベントナイトと鉄あるいは磁鉄鉱を接触させる変質加速試験を継続した。鉄が十分に供給される条件では 250℃において緑泥石/スメクタイト混合層の生成が確認された。
- ・堆積岩中に認められる、緑泥石/スメクタイト混

合層の化学組成の変化等から、緑泥石化は溶解再結晶により起こる可能性が高いことを示した。

- ・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い、溶解速度が、pH、温度および溶液中 Si 濃度の増加とともに上昇することを明らかにした。

今後、腐食生成物と緩衝材との相互作用に関しては、発生する変質過程と、その程度を推定するための変質加速試験や長期接触試験を継続する。また、アルカリ環境での変質評価のために、スメクタイト溶解速度の定式化を行うとともに、コンクリートからのアルカリ供給の境界条件等を考慮した、緩衝材設置環境での変質速度の推定を行う。

参考文献

- Kamei, G., Oda, C., Mitsui, S., Shibata, M. and Shirozaki, T. (1999): Fe(II)-Na Ion Exchange at Interlayers of Smectite: Adsorption-Desorption Experiments and a Natural Analogue, *Engineering Geology*, 54, pp. 15-20.
- 大場孝信 (2003) : スメクタイトの緑泥石化に関する研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 上越教育大学), JNC TJ8400 2003-004
- Shibata, M., Kubota, M., Nemoto, K., Kim, S.-Y., Fujishima, A. and Sato, T. (2002): Analysis of Compacted Bentonite Contacted with Carbon Steel under Anaerobic Conditions, *International Meeting on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Abstracts*, pp. 151-152.

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4.2-23)。



図4.2-23 熱-水-応力-化学連成場の概念

現実の地層処分システムにおける緩衝材/間隙水組成の時間的/空間的変遷を把握することは、人工バリア設計評価(オーバーバック腐食など)や性能評価(核種移行など)の信頼性向上のためにニアフィールド環境条件のリアリティを向上する上で重要である。また、海水系地下水環境や軟岩系岩盤におけるコンクリート支保を想定した場合、ニアフィールドの健全性を長期に渡って評価するためには、人工バリアを中心とした化学的変遷がニアフィールドの水理場や力学的安定性に与える影響を考慮し、ニアフィールドの全体挙動を定量的に捉えることが肝要である。

「第2次取りまとめ」以降、開発に着手した熱-水-応力-化学連成モデル/解析コード(伊藤ほか、2002a)を用いたニアフィールドの将来挙動に関する数値実験は、室内/原位置試験で得られる短期の情報とナチュラルアナログで得られる長期の情報の間を結ぶ重要な基盤技術である。本研究の成果は、①人工バリア設計評価や性能評価の信頼性向上のためのニアフィールド環境条件(緩衝材間隙水化学等)のリアリティ向上、②実際の地質環境におけるニアフィールドの時間的/空間的変遷の理解・予測、③予測結果の可視化などによる長

期的かつ複雑な現象に対する異なる専門家間での理解共有に反映が可能である。

なお、本研究では、国際共同研究 DECOVALEX, Prototype Repository Project を活用し、原位置人工バリア試験の予測・再現解析や他国の連成モデル/解析コードとのベンチマークテスト解析を通じて、連成モデル/解析コードの検証・確証を進めている。

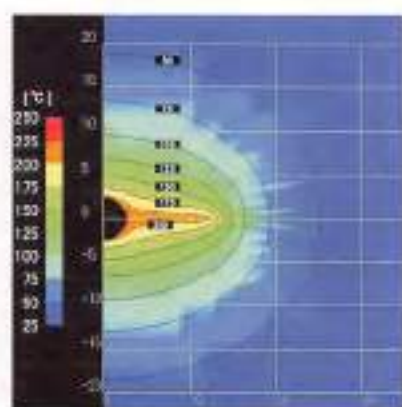
② これまでの成果

1) 国際共同研究 DECOVALEX における取り組み

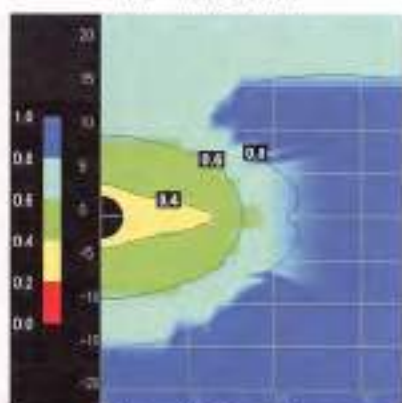
国際共同研究 DECOVALEX (大西ほか、2002)は、地層処分を対象とした連成挙動のモデル/解析コードの開発、検証・確証をテーマとし、現在はフェーズⅢ(99年7月~03年10月)の段階にあり、9カ国14参画機関の下に各リサーチチームが構成され、4つのタスクに取り組んでいる。

タスク1は、スイスのグリムゼル地下研究施設(花崗岩)で実施されている横置き実規模人工バリア試験 FEBEX (Full-scale Engineered Barriers Experiment) をテーマとしている。これまでに、人工バリア定置後の熱-水-応力連成挙動について予測解析を実施しており、今後は実測データとの比較を行う予定である。

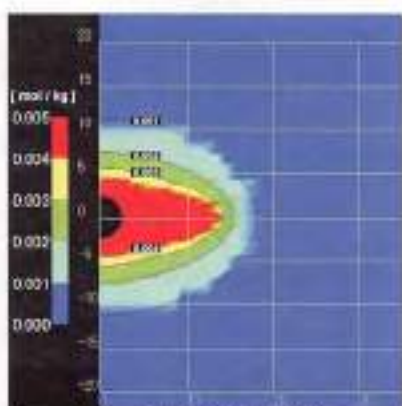
タスク2は、アメリカ・ユッカマウンテンの深度約250mの地下坑道で実施されている坑道規模加熱試験(Drift Scale Test)をテーマとしている。サイクル機構は、熱-水-化学連成挙動に関するサブタスクに参加しており、平成13年度に開発した熱-水-応力-化学連成解析プロトタイプコードにて、原位置試験の予測解析を実施した(伊藤ほか、2003)。解析領域は直径5mの坑道と直角に交わる鉛直対称2次元断面(水平方向:坑道中心~坑道中心+90m, 鉛直方向:坑道中心-156.76m~坑道中心+99.39m)とし、坑道及びボーリング孔に設置されたヒーターには発熱量を与え、解析期間は4年間とした(図4.2-24)。解析領域の初期温度は25℃で、試験開始4年後で200℃程度となっており、実測値とも良好な一致を示す結果が得られている。坑道周辺の初期飽和度は0.92であり、試験開始後は加熱による水分蒸発により乾燥領域が拡大している。なお、飽和度分布の解析結果が坑道中心に対して上下非対称となっているのは、原位置の地層(岩種が上下で異なる)を考慮した飽和度分布の初期条件に起因している。本サブタスクでは飽和度の実測値は与えられていないため原位置試験



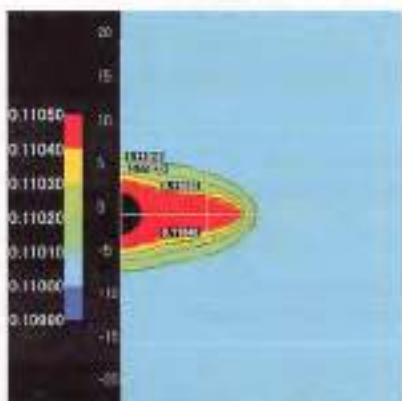
(a) 温度分布



(b) 飽和度分布



(c) Si 溶解濃度分布



(d) 間隙率

図 4.2-24 Drift Scale Test の熱-水-化学連成解析結果 (試験開始 4 年後)

との比較はできないものの、他のリサーチチームの解析結果の傾向と概ね一致する結果が得られている。なお、本解析は地球化学反応について、石英の溶解/沈殿のみを考慮したものとなっており、坑道周辺の Si 溶解濃度は時間の経過と共に上昇している。これは温度の上昇と共に、石英の溶解度が上昇することに起因している。また、坑道周辺の初期間隙率は 0.11 であり、試験開始後 4 年間では石英の溶解/沈殿による間隙率の変化は微小との結果が得られた。今後は、原位置試験で確認されている支配的な鉱物であるアモルファスシリカ、方解石、石膏などの溶解/沈殿を考慮した熱-水-化学連成解析に取り組む予定である。

タスク 3 は、連成挙動に関する仮想問題を取り扱うベンチマークテスト解析として、3つのテーマが設定されており、サイクル機構はこのうち2つに取り組んでいる。1つは、緩衝材再冠水挙動をテーマとして、母岩としてカナダの花崗岩を、人工バリアとして「第2次取りまとめ」の硬岩系堅置き方式を想定した熱-水-応力連成解析である。これまでに、均質岩盤を想定した連成解析を終了しており、現在事務局が中心となって各国の解析結果の比較を行っている。もう1つは、広域問題における亀裂性岩盤物性の取り扱いをテーマとして、イギリスのセラフィールドで取得された亀裂情報、透水試験データ等を対象とした検討である。これまでに、亀裂性岩盤物性のスケール効果に関する検討を終了し、現在は広域連成場での物質移行問題に取り組んでいる。

タスク 4 は、性能評価・安全評価における連成挙動の取り扱いをテーマとしており、各タスクで得られた科学的知見についてワークショップ (カナダ・トロント: 2002 年 6 月, ドイツ・ベルリン: 2003 年 1 月) で議論を行った。

ii) 国際共同研究 Prototype Repository Project における取り組み

国際共同研究 Prototype Repository Project (PRP) は、スウェーデン SKB の地下研究施設 (花崗岩) 深度約 450m の試験坑道で実施されている実規模の堅置き人工バリア試験である (Svenar and Pusch, 2000; 杉田ほか, 2003)。試験の模式図を図 4.2-25 に示す。

サイクル機構は、現在、「第2次取りまとめ」の再冠水時の人工バリア挙動評価で使用した熱-水-応力連成モデル/解析コードにて、PRP で使用され

ているベントナイト(米国産 MX-80)の水分移動特性評価,および本試験の予解析に取り組んでいる。今後,既にヒーターの加熱が開始され試験坑道の埋め戻しを完了している区画エリア1の人工バリア試験について実測データ(温度,間隙水圧,飽和度,応力等)が提供されることとなっており,本試験の予解析との比較に取り組む計画である。

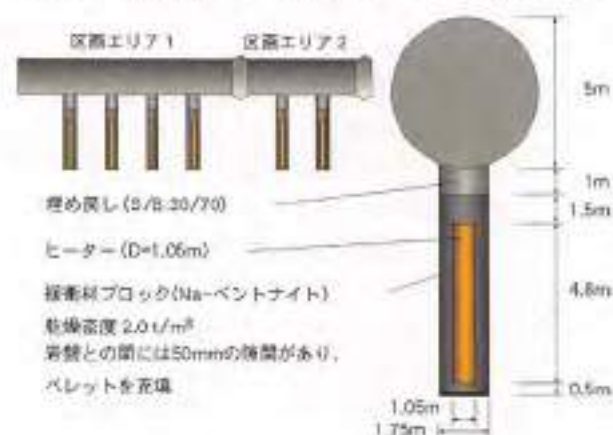


図 4.2-25 PRP 模式図

iii) 熱-水-応力-化学連成モデル/解析コードの開発(プロトタイプの高高度化)

現実の地層処分システムにおける緩衝材/間隙水組成の時間的/空間的変遷を捉えるためには,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-化学連成モデル/解析コードの開発は,検証・確認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-化学連成モデル/解析コードのプロトタイプを開発した(伊藤ほか,2002b)。

平成14年度は,プロトタイプへの地球化学モデル導入として,地球化学反応を考慮した連成モデル/解析コードの開発,連成挙動に係わる物性値の相互依存性を整理した。また,開発コードによる解析を例示すべく,ニアフィールド連成挙動の事例解析を行った。

・ 連成モデルの構築および連成挙動に係わる物性値の相互依存性の整理

熱-水-応力連成モデル,物質移行モデル,地球化学モデルの構成方程式,支配方程式を基に,個別現象間の相互作用について整理を行い,地球化学反応を考慮した熱-水-応力-化学連成モデルを

構築した(表4.2-4,表4.2-5)。本連成モデルは,熱移動,水分移動,応力変形,化学現象(物質移行,地球化学反応)について,温度 T ,圧力水頭(水分ポテンシャル) ψ ,変位 u_i ,親化学種の総溶解濃度 C_{tot} ,親化学種の総濃度 T_{tot} を未知数とした支配方程式系である。なお,鉱物相の溶解/沈殿および水溶性化学種の詳細組成は,地球化学反応の支配方程式群から導出可能となっている。また,連成モデルの支配方程式系から,熱-水-応力-化学連成挙動に係わる物性値の相互依存性について,緩衝材に関する既存の知見およびデータを取りまとめた(伊藤ほか,2003)。熱移動特性として熱伝導率,比熱,水分移動特性として固有透過度,水分特性曲線,水分勾配水分拡散係数,温度勾配水分拡散係数,応力変形特性として弾性係

表 4.2-4 熱-水-応力-化学連成モデルの支配方程式系

1) 熱移動の支配方程式
$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s C_s T) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho_w C_w T) = 0$
2) 水分移動の支配方程式
$\frac{\partial}{\partial t} \left[\omega_s D_s \frac{\partial \psi}{\partial x} + (1-\omega) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho_w g K}{\mu} \frac{\partial (\psi+z)}{\partial x} \right) + \rho_w D_p \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial t}(\rho_w n S) = 0$
3) 応力変形の支配方程式
$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{2} C_{sw} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) - \pi \delta_r - \frac{E}{1-2\nu} \delta_r \alpha_r (T - T_0) + \lambda \delta_r \rho_w g \psi \right] + \rho_w \delta_r = 0$
4) 化学現象(物質移行,地球化学反応)の支配方程式
4-1) 物質移行の支配方程式 (n 番目親化学種の質量保存の式)
$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_w n C_i) - \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho_w n S D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial t}(\rho_w n T_i) = 0$
4-2) 地球化学反応の支配方程式(平衡モデル)
4-2-1) 電気的中性の式
$\sum_{i=1}^N (z_i m_i) = 0$
4-2-2) 電子保存の式
$\sum_{i=1}^N (v_i m_i) - \alpha r v + \sum_{j=1}^M (h_j \mu_j v_j)$
4-2-3) 質量保存の式 (n 番目親化学種の質量保存の式)
$C_{i,tot} = \sum_{j=1}^N (k_{i,j} m_j) - C_{i,tot} - r_{i,tot} + \sum_{j=1}^M (h_j \mu_j v_j)$
4-2-4) 固相の質量作用の式 (p 番目鉱物相の質量作用の式)
$\sum_{i=1}^N (h_{i,p} \log(a_i)) = \log(K_p)$
4-2-5) 水溶性化学種の質量作用の式 (親化学種を除く n 番目水溶性化学種の質量作用の式)
$\log(a_i) = \log(K_i) + \sum_{j=1}^N (k_{i,j} \log(a_j))$

表 4.2-5 支配方程式中の記号一覧表

ρ	流体密度	ν	ポアソン比
C_p	比熱	α_c	部材の熱膨張係数
q_i	各相ダルシー流速	T_c	充填比
T	温度	T	有効応力に関するパラメータ
λ	熱伝導率	h	物性力
ρ_w	流体密度	C_{w0}	α 相初期と平衡の飽和度
C_w	流体比熱	D_p	分散テンソル
ϵ	平衡化パラメータ (飽和領域で $\epsilon=0$, 非飽和領域で $\epsilon=1$)	T_{w0}	α 相初期と平衡の温度
D_p	水分と配水分散係数	A	水溶性化学種の初期
θ	体積含水率	C_w	α 相の水溶性化学種の初期
R	異方性係数	α_w	α 相の水溶性化学種の質量モル濃度
K	固有透過率 (絶対透過率)	ν_p	α 相の水溶性化学種の有効ポアソン比
μ	浸透率係数	GPF	石の結晶格子定数
ν	ポアソン比 (水分が膨張率)	P	鉱物の圧数
α	孔隙率	μ_p	β 相の鉱物の実格子定数
D_p	温度と配水分散係数	MGN_p	β 相の鉱物の摩滅率
μ	浸透率	C_{w0}	α 相の水溶性化学種に対する β 相の水溶性化学種の化学量論係数
X	物質量	b_{w0}	β 相の鉱物に対する α 相の水溶性化学種の化学量論係数
C_{w0}	流体モル濃度	N	親化学種の総数
μ	浸透率	α_c	α 相初期と平衡の温度
σ'	有効応力に関するパラメータ	K_p	β 相の鉱物の質量条件の式に対する化学反応の平衡定数
α_w	水分飽和度	α_w	α 相の水溶性化学種の質量
K	ヤング率	K_p	α 相の水溶性化学種の質量条件の式に対する化学反応の平衡定数

数、膨潤応力、化学現象特性として化学反応の平衡定数、化学種の拡散係数を取り上げ、各々の温度依存性、含水比依存性、乾燥密度依存性、化学条件依存性の整理を実施した。今後も、国内外の研究成果を取り込みながら、これらの整理を継続し、ニアフィールド連成挙動の事例解析に反映していく予定である。

・連成解析コードの開発

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った。地球化学反応を考慮した熱-水-応力-化学連成解析コード開発に際しては、①地球化学モデル導入に伴う複雑な連成解析に対応可能な解析体系の構築、②地質環境条件や人工バリア仕様に応じた連成挙動に柔軟に対応可能な解析体系の構築が肝要と考え、平成 13 年度に概念検討を実施した連成解析コード開発基盤を活用し、既存コードをベースとした熱-水-応力-化学連成解析コードを開発した(石原ほか, 2003)。

本連成解析コードは、熱-水-応力連成解析コード THAMES、物質移行解析コード Dtransu、地球化

学解析コード PHREEQE の 3 つの解析コードを制御するプロセス管理プログラムと、各解析コード間で連成対象変数の授受を行う共有メモリ管理プログラムを用いて、熱-水-応力-化学連成解析を行うものである(図 4.2-26)。連成解析を実現するために必要な手続きは、各解析コード中の連成解析用コマンド記述、連成挙動に係わる物性値の相互依存性等を定義する物性・連成モジュール作成、連成対象変数を定義する共有メモリ管理プログラムの入力データ作成、連成解析のプロセス(シーケンス)を定義するプロセス管理プログラムの入力データ作成となっており、連成解析コード開発の作業効率を大きく向上させるものである。



図 4.2-26 熱-水-応力-化学連成解析コードの概要

・ニアフィールド連成挙動の事例解析

平成 14 年度に開発した熱-水-応力-化学連成解析コードによる解析を例示すべく、ニアフィールド連成挙動の事例解析を実施した。

解析領域はニアフィールドをイメージした一次元媒体とし(図 4.2-27)、緩衝材は長さ 0.7m でベントナイト/ケイ砂混合体(30wt%, 乾燥密度 1.6Mg/m³)、岩盤は長さ 10.0m で硬岩系を想定した(熱伝導率 2.8W/m/K, 比熱 1.0kJ/kg/K, 固有透過率 $1.0 \times 10^{-15}m^2$, 間隙率 0.005)。初期条件は、緩衝材飽和度 40%、岩盤全水頭 50m、温度は全域 45℃とし、間隙水組成は純水と構成鉱物の平衡溶液とした。境界条件は、緩衝材内側を、熱移動について 80℃の規定境界、水分移動、物質移行について閉境界(流入出なし)、岩盤外側を、熱移動について閉境界(断熱)、水分移動、物質移行について初期値の規定境界とした。なお、本解析では試行として、緩衝材中で方解石、玉髄、スメクタイト、岩盤中で方解石、玉髄を考慮し、これら構成鉱物の溶解/沈殿のみを地球化学反応として取り扱っている。

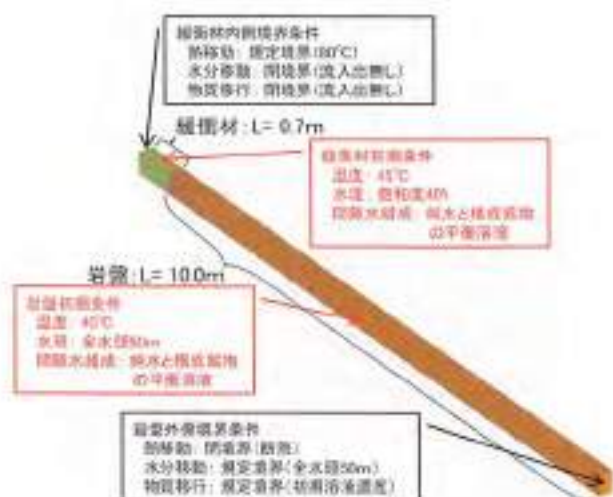


図 4.2-27 事例解析条件

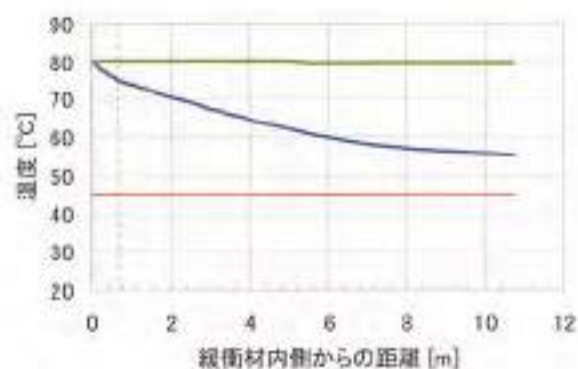
事例解析の結果を図 4.2-28 に示す。1 年後の結果は、緩衝材内側から岩盤外側に向けた熱伝導、緩衝材への地下水浸潤の段階にあり、Ca 溶液濃度と pH は温度の影響を強く受けて、空間的な変化を示している。解析に使用した境界条件や岩盤物性により、10 年後の結果は、温度の伝播、緩衝材の飽和を終了した段階にあり、Ca 溶液濃度と pH は温度が均一になったことに伴い、空間的に一定の値を示す結果が得られた。

今回の事例解析は簡易な境界条件の下で実施したが、今後は廃棄体の発熱量を考慮した解析や岩盤物性を変えた解析等に取り組み、ニアフィールド連成挙動の解析事例を拡充していく予定である。

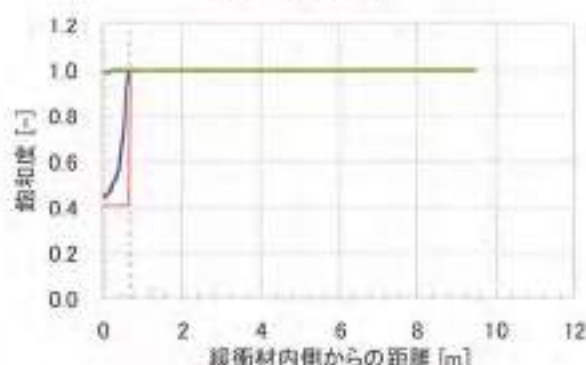
③ まとめ

国際共同研究の DECOVALEX および Prototype Repository Project では、原位置人工バリア試験の子調解析等を実施した。今後は、実測データや参加各機関の解析結果との比較を通じて、連成モデル／解析コードの高度化、検証・確認を行っていく。

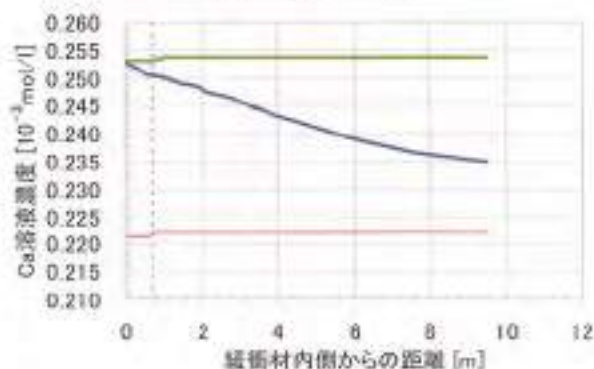
熱-水-応力-化学連成モデル／解析コードに関しては、平成 13 年度に開発したプロトタイプへの地球化学モデル導入として、地球化学反応を考慮した連成モデル／解析コードの開発、連成挙動に係わる物性値の相互依存性の整理に取り組んだ。また、開発コードによる解析を例示すべく、ニアフィールド連成挙動の事例解析を実施した。今後は、不飽和状態における CO₂ 等の脱ガス、およびスメクタイトのイオン型の変化について、地球化学モデル等の拡張に取り組む、仮想地質環境（「第 2



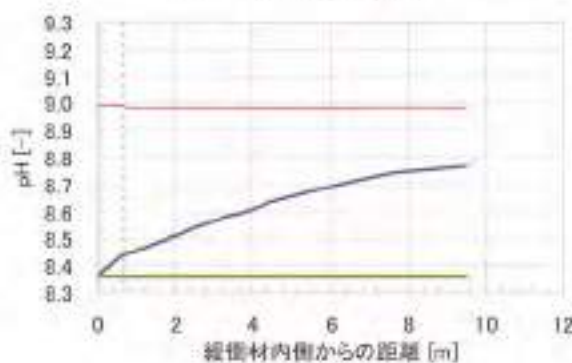
(a) 温度分布



(b) 飽和度分布



(c) Ca 溶液濃度分布



(d) pH 分布

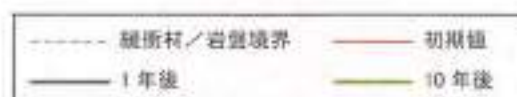


図 4.2-28 事例解析結果

灰取りまとめ」のモデル地下水など)に対するニアフィールド連成挙動の数値実験を執行していく。また、エントリーの連成試験設備 COUPLE にてニアフィールド連成試験を開始し、予測・再現解析を通じた連成モデル/解析コードの検証に取り組む。

参考文献

- 石原親尚, 千々松正和, 横山敏史, 田中山美子, 雨宮 浩, 嶋崎 功, 伊藤隆哉 (2003): 熱-水-応力-化学連成挙動に関する研究 (Ⅱ), サイクル機構技術資料 1 研究委託報告書;三菱重工業株式会社, 株式会社開組。(登録準備中)
- 伊藤 彰, 川上 進, 油井三和 (2002a): 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 TR6300 2001-028
- 伊藤 彰, 川上 進, 油井三和, 千々松正和 (2002b): 温度勾配下における緩衝材浸潤時の物質移行に関する数値解析, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, CS10-052, pp. 485-486.
- 伊藤 彰, 川上 進, 油井三和 (2003): 熱-水-応力-化学連成挙動に関する数値解析コードの開発, サイクル機構技術資料, JNC TR6400 2002-022
- 大西有子, 杉田 裕, 伊藤 彰, 川上 進, 油井三和, 小林 晃, 横上広志, 千々松正和, 雨宮 浩 (2002): 大規模リアおよび周辺岩盤における連成モデルの開発プロジェクト「国際共同研究 (DECORALEX)」。土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, CS10-051, pp. 483-484.
- 杉田 裕, 伊藤 彰, 川上 進 (2002): プロトタイプ処分場プロジェクトにおける試験環境条件および引測項目, サイクル機構技術資料, JNC TR6400 2002-027.
- Svenner, C. and Pasch, R. (2000): Äspö Hard Rock Laboratory - Prototype Repository - Project description. SRB 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

炭素鋼オーバーバックの腐食により発生する水素ガスは、緩衝材自体が低透気性であるため、緩衝材とオーバーバックの界面にある程度蓄積される。また、水素ガスが緩衝材中を移行する際、緩衝材中の間隙水を押し出すことも考えられる。これらの現象は、緩衝材の長期力学的安定性や核種移行に影響を及ぼすことが考えられることから、その影響の度合いを定量的に評価することが重要となる。このため、「第2次取りまとめ」までの評価の信頼性を確認するため、降水系地下水条件下におけるデータの充足を進めるとともに、現象のより詳細な把握に基づいた基本的なガス移行モデルの開発を目指してガス移行可視化研究を進めている。また、今後、実際の地質環境条件（温度や水質）を考慮したデータの拡充を進める予定である。

② これまでの成果

i) 可視化研究

平成13年度には、X線CT装置の導入を行うとともに、X線CT法による現象の可視化に関する概略的な検討を実施し、飽和度や乾燥密度を調整した試料のCT値の変化を概略把握可能であることがわかった。これらの成果を踏まえ、a) 今後の試験研究上の基礎データとなる飽和度および乾燥密度とCT値の詳細な関係、b) 緩衝材中への水の浸潤ならびに飽和浸潤後のガスの移行それぞれの現象の可視化の可否、を検討するための試験を行った。

a) 飽和度および乾燥密度とCT値の関係

試験試料としては、ベントナイト単一材料を用い、水分調整したベントナイト粉末を所定の乾燥密度に圧縮成型（直径50mm、厚さ10mm）した。X線CTによるスキャン条件は、管電圧：135kV、管電流：200mAである。試験結果を図4.2-29に示す（棚井ほか、2003）。なお、同図の凡例に示してある括弧内の数字は、試験試料の乾燥密度（ Mg/m^3 ）を表す。同図には、実測値から算定した近似直線を併記した。この図から一部の乾燥密度においてはCT値のばらつきはあるものの、CT値とは正の相

関関係にある。なお、データのばらつきは、装置自体のノイズの他に、試料の不均一性や測定時の環境条件などに起因するノイズなど、種々の要因が考えられる。なお、乾燥密度 $1.2\text{Mg}/\text{m}^3$ における高飽和度領域（80%及び100%近傍）のデータに関しては、 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ や $1.4\text{Mg}/\text{m}^3$ の値に近い結果となっていること、ならびに乾燥密度 $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$ のデータが少ないことなどから、当該試験で得られた実験式を検証する観点より、これらのデータを充足する必要がある。なお、本試験の結果から、同一乾燥密度試料の飽和度の変化に伴うCT値の推定が可能となる。

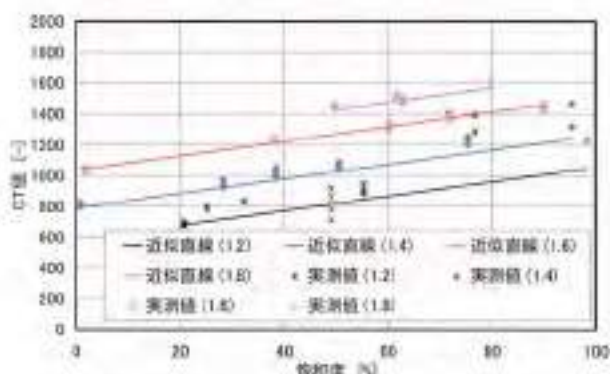


図4.2-29 飽和度および乾燥密度とCT値の関係
(凡例括弧内の値は乾燥密度 $[\text{Mg}/\text{m}^3]$)

b) ガス移行可視化試験

平成13年度に導入したアルミ容器を用いてガス移行試験を行い、水の浸潤過程とガスの移行過程を対象にX線CTによる可視化の可否について検討を行った（棚井ほか、2003）。試験試料としては、ベントナイト単一材料を用い、乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ 、試料の厚さを20mmとした。なお、本試験で単一ベントナイト試料を用いた理由は、ケイ砂の混合によるCT値のばらつきを防ぐためである。また、水の浸潤過程をより詳細に観察するため、容器封入時の試料は乾燥状態（含水比=0%）とした。

以下に水の浸潤過程とガス移行過程それぞれの観察結果を述べる。

・ 水の浸潤過程の観察

水の浸潤過程の観察に際しては、初期状態となる乾燥状態試料をCTスキャンした後、給水を開始するとともに、任意の時間経過毎にCTスキャンを行い、浸潤過程のCT値の変化を観察した。試験により得られたCT値の変化を図4.2-30に示す。また、乾燥状態（初期状態）におけるCT値をゼロと

し、徐々に水が浸潤することによるCT値の増加分を水の浸潤フロントとして画像処理した一例を図4.2-31に示す。図4.2-30から、初期状態におけるCT値が約1000程度で均一にあったものが、給水後約4時間では給水面のCT値が約1350程度まで上昇しているのがわかる。また、給水面と試料下面間のCT値勾配が徐々に均一に向かって変動しており、最終的には約237時間でCT値が約1400近傍で一定となっている。図4.2-31から水の浸潤面が徐々に試料下流側に向かって広がっており、試料中心面に比して、若干ではあるが試料外側の浸潤が早いようである。これらの結果から、緩衝材中への水の浸潤過程がX線CT法により十分観察可能であることがわかった。なお、同図は簡略的に示した画像であり、色の違いに定量的な意味はない。

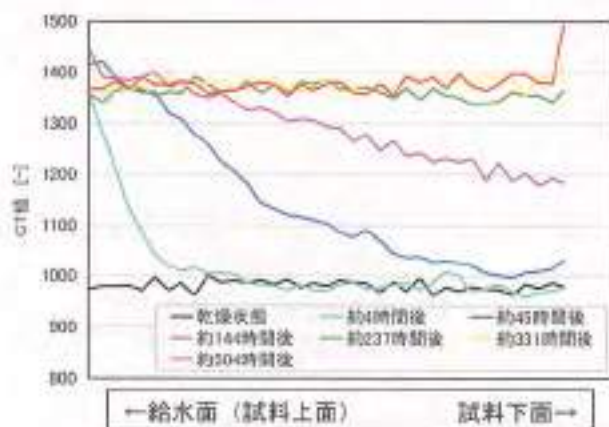


図 4.2-30 時間経過毎のCT値の変化

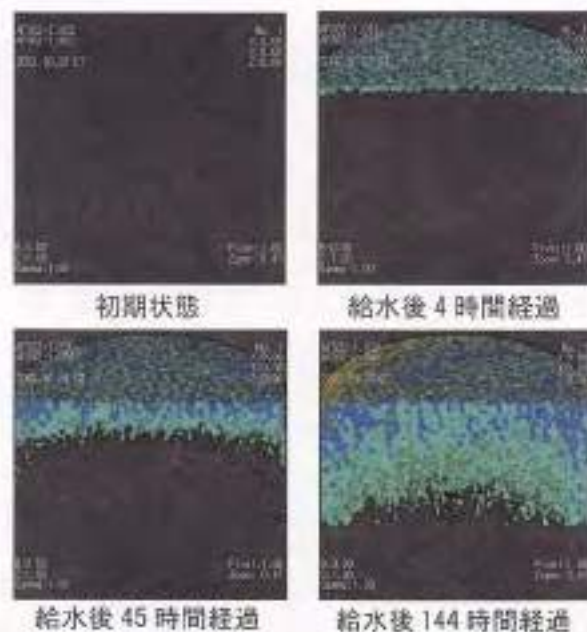


図 4.2-31 時間経過毎の三次元画像

・ ガス移行過程の観察

先に述べた試料の水の浸潤過程に関する観察終了後、同一試料を用いたガス移行試験を行い、水の場合と同様に任意の時間経過毎にCTスキャンを実施した。図4.2-32はガス圧力と透気流量の関係を示したものであり、約23日程度でガス流量計の値が急激に上昇していることがわかる。なお、この図からは破過時点の状態が読み取りにくいことから、破過ポイントを見やすくしたものを図4.2-33に示す。この図から、ガス圧力が約2.6MPa（膨潤応力：1MPa）で破過し、その時点でのガス有効浸透率は $6 \times 10^{-20} \text{m}^2$ である。なお、今回の試験では、ガス圧力が1.7MPaまで下降した時点で再度破過が見られるという現象が観察された。また、ガス移行試験の状態観察により得られたCT値をもとに作成した画像を図4.2-34に示す。この図から、緩衝材中におけるガス移行現象の把握に資するような変化を捉えることはできなかった。今回の結果に関しては、前述したように通常とは異なるガスの挙動、すなわち透気後のガス圧力低下にも係わらずダイナミックフローが発生するなど、試験そのものの問題も考えられることから、再度実験を行い確認していくことが必要である。なお、緩衝材中におけるガス移行挙動の観察に関しては、試料内部の液相や気相飽和度の変化に伴うCT値の変化を捉えることで対応可能であると考えられるが、血管造影剤やキセノンガスの利用など、よりコントラストを明確にするための副次的な手法の検討なども行う必要がある。

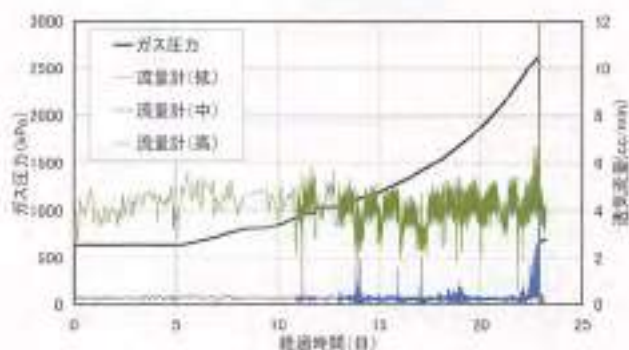


図 4.2-32 ガス圧力と透気流量の測定結果

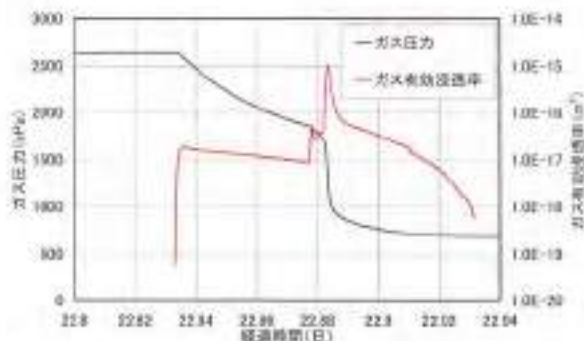
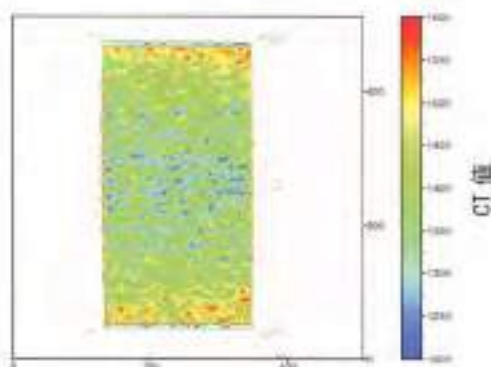
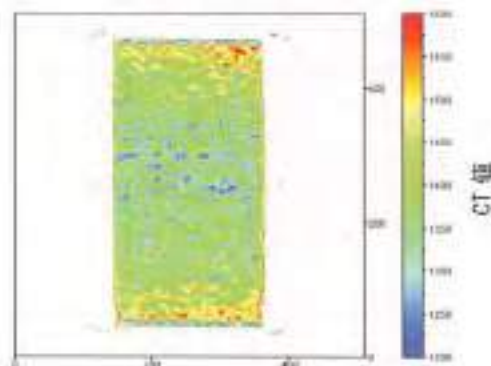


図 4.2-33 ガス圧力とガス有効浸透率の結果
(22.80日~22.94日)



(a) 初期状態 (ガス供給前)



(b) 2回目の破過発生時点の画像
(図 4.2-30 における 22.88 日以降のピーク時の画像)

図 4.2-34 ガス移行試験による CT 画像

ii) 緩衝材の基本的な透気特性の把握

平成 13 年度までに、降水系地下水条件における有効粘土密度や膨潤応力と破過圧力それぞれの関係についてデータを取得し、それらの関係を整理した。

平成 14 年度には、降水系地下水条件でのデータの拡充および可視化研究という両者の観点でガス移行試験を行った。図 4.2-35 に平成 14 年度に取得したガス移行試験データとこれまでに取得され

た結果を合わせて示す。なお、同図には「第 2 次取りまとめ」で得られた膨潤応力と有効粘土密度の関係曲線を併記した。平成 14 年度は、温度環境やガス圧力の昇圧速度などをより詳細に管理した実験を行ったが、ダイナミックフローの発生が生じるなど、これまでにデータのばらつきが見られた一部の試験結果と同様の傾向であった。このような一部試験データのばらつきはあるものの、図 4.2-35 の結果から、「第 2 次取りまとめ」において述べたように、図中に示した青の実線で示す膨潤応力がガス破過圧力の一つの閾値になっていることは明らかである。

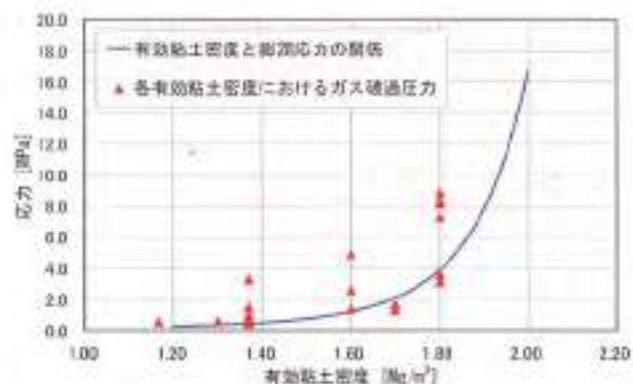


図 4.2-35 有効粘土密度と破過圧力
および膨潤応力の関係

iii) 緩衝材中ガス移行モデルの開発

緩衝材中のガス移行モデルの開発については、SKB (スウェーデン)、NAGRA (スイス)、POSIVA (フィンランド)、ANDRA (フランス)、ENRESA (スペイン)、JNC (日本) の 6 カ国による GAMBIT 国際共同研究として進めてきた。これまで、諸外国におけるガス移行試験の結果やガス移行モデルの概念等に関するレビューを進めるとともに、イギリス地質調査所 (BGS) における実験結果を基にモデル化の検討を行った。これらの成果を踏まえ、粘土中のガス移行挙動が粘土の応力状態に影響されること (Rodwell et al., 1999; OECD/NEA, 2001) や実際に適用していくためのアップスケールの問題などからガス移行モデルの有限要素法応力解析プログラムへの組み込みについて検討を行った。また、応力場を適切に取り扱えるよう、粘土構造をよりリアリスティックに表現するための二重空隙モデルの採用の可否や、ガス圧力の変化に伴うガス移行経路拡張の応答性に係る時間依存について検討した。

③ まとめ

X線CT装置を用いた可視化研究の結果、本手法による緩衝材中への水の浸潤挙動の把握は可能であるものの、ガス移行試験に関しては従来の試験結果を補うための指標を得るには至らなかった。これについては、医療分野で使用されている顕微鏡的な手法を参考に試験手法の見直しを進める必要がある。

緩衝材の基本的透気特性については、降水系地下水条件下におけるデータ取得を継続した。今後は、実際の地質環境条件を踏まえた海水系地下水条件下における試験を開始する。

ガス移行モデルの開発に関しては、これまでGANBIT 国際共同研究において進めてきたモデル開発の考え方などに関わるチェック・アンド・レビューを行うとともに、各国における最新の知見を報告し、今後のガス移行モデル開発の方向性について議論を行うため国際ワークショップを開催する。

参考文献

- OECD/NEA (2001) : Proceedings of an MEA/EC workshop on gas generation and migration in radioactive waste disposal : Safety relevant issues, 26-28 June 2001, Reims, France.
- Radwell, V. K., Harris, A. W., Horsman, S. T., Laloux, P., Müller, A., Ortiz, L., Amaya, L. and Ptacek, R. (1999) . Gas migration and two-phase flow through engineered and geological barriers for a deep repository for radioactive waste, A joint EC/NEA status report published by the EC, European commission report EUR 19122 EN.
- 堀井源治、松本一浩、菊池広人 (2003) : X線CT法の適用性に関する検討、サイクル機構技術資料, JNC TNE430 2003-001.

2) 人工バリアせん断応答挙動に関する研究

① 課題と計画の概要

「第2次取りまとめ」におけるわが国の地層処分概念では、地層処分システムに著しい影響を及ぼす可能性のある断層活動などの天然現象については、サイト選定によってその影響を避けることを基本としている。しかし、断層帯以外でのC級断層（変位速度0.01m/1000年オーダー）など、未確認のものが多数存在している可能性もある（池田ほか、2000）。このため、人工バリアの頑健性を明らかにし、安全機能の裕度を示す観点から、断層を模擬した模型試験と、シミュレーション解析により、人工バリアの挙動把握を試みている（平井ほか、2003）。

② これまでの成果

人工バリアの周辺岩盤にC級断層に伴う食い違いが生じ、人工バリアを横断するせん断が発生した場合を想定し、図4.2-36に示す実規模の約1/20に相当する断層模擬試験装置を用いた模型試験を実施した。平成12年度に実施した1回目の試験（CASE-1）を解析した結果、境界条件によって作用する応力の変化が大きいことがわかった。そこで、解析条件を明らかにするために平成13年度にオーバーバックに土圧計を設置する改良を実施し、平成14年度に2回目の試験（CASE-2）を実施した。

試験における荷重条件は、最大せん断変位40mm、せん断速度100mm/secであり、これはC級断層に相当する条件である（松田、1975）。図4.2-37は、せん断荷重時のせん断荷重の時間変化を、図4.2-38は、その時のオーバーバックの作用土圧の時間変化を示したものである。図4.2-37より、せん断荷重はせん断が開始してまもなく最大値を示し、その後一定となるが、オーバーバックの下面（O/P-1、O/P-2）の土圧はせん断が終了する0.4秒付近で最大値を迎えている。これは、せん断面が限界状態に至った後も、オーバーバックの回転にともない応力の再配分が行われているためと考えられる。図4.2-39はせん断の終了した緩衝材のせん断面付近のX線CT測定より得られるCT値を立体的に表示したものであり、青から赤になるに従いCT値が上昇し、密度の増加を示している（棚井ほか、2003）。オーバーバックと岩盤が接近する受動側は反対側の主働側と比べ平均的なCT値が高く密度も高いと判定される。これは、前述の応力再

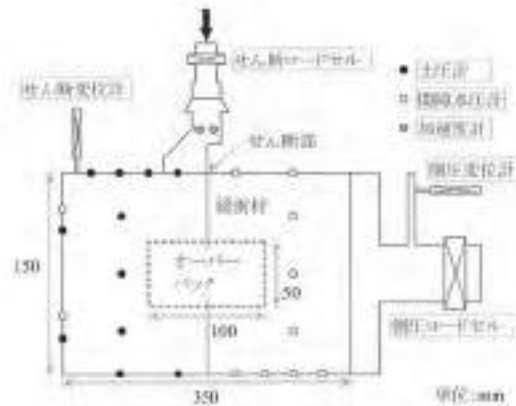


図 4.2-36 断層模擬試験装置

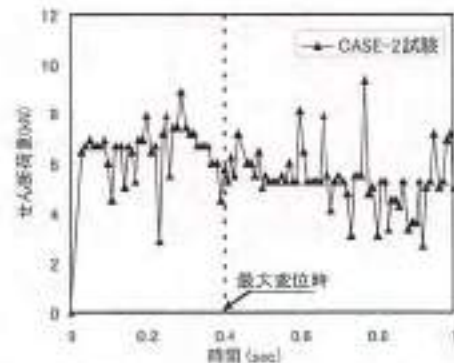


図 4.2-37 せん断荷重の時間変化

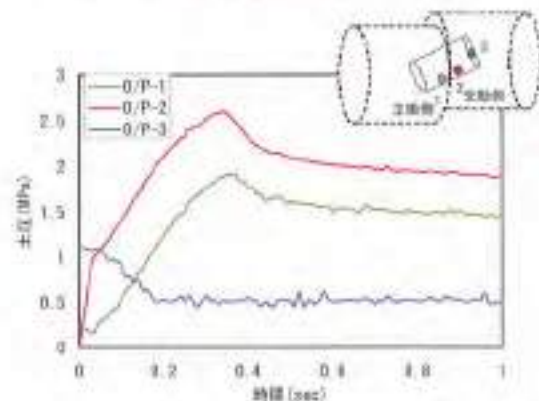


図 4.2-38 オーバーバック作用土圧の時間の変化

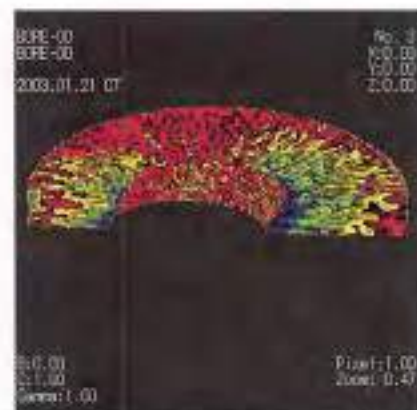


図 4.2-39 せん断面付近の X 線 CT 測定結果

配分を裏付ける結果と考えられる。

一方、模型試験のシミュレーション解析は、構成則として Tresca モデル (山田, 1988) を用いて FEM 弾塑性解析汎用コード ABAQUS により実施した。図 4.2-40 は解析結果より得られる最大鉛直応力のコンターである。図で青く示される部分は、鉛直応力が大きく土圧の集中する部分であり、オーバーバックの回転とせん断面のせん断の両者の効果によるものと考えられる。また、図 4.2-41 はせん断荷重とせん断変位の関係を過去 2 回の模型試験結果とともに示したものであり、図 4.2-42 はオーバーバックの受動側の土圧とせん断変位の関係を同様に示したものである。図より、せん断荷重とせん断変位の関係については解析と試験結果はほぼ一致しているが、土圧については挙動が一致していない。試験結果では外力のせん断荷重が一定となった後も土圧が増加しており、オーバーバックの回転に伴う応力分布の変化の影響と考えられる。これに対し、解析結果における土圧が増加しないのは、オーバーバック周辺の塑性領域での応力分布の変化を十分に評価できていないことによると考えられる。

③ まとめ

緩衝材厚さの 80% に相当する断層変位に対する人工バリアの挙動を断層模擬試験装置を用いた模型試験とシミュレーション解析により検討した結果、せん断荷重はわずかな変位で一定となるが、オーバーバック回転に伴う応力再配分などにより、オーバーバックに作用する土圧がせん断変位に伴い増加することがわかった。

今後、人工バリアの安全裕度の幅を明らかにするために、断層挙動に対する情報を収集し、対象とする断層変位量と変位速度を把握するとともに、これに対する人工バリアの力学的安定性を検討する必要がある。そこで、模型試験においては、試験可能な最大変位に対する試験を行うとともに、試験のシミュレーション解析を実施し、設定された断層挙動に対する評価を実施する予定である。今回の解析に用いた構成モデルでは、大変位時に挙動評価精度が悪かったため、間隙水の挙動との連成や粘弾塑性挙動などが評価可能な Cam-Clay 系モデルなどを用いて解析の精度向上をめざす予定である。また、より信頼性の高い評価モデルを用いて、実規模の人工バリアでの挙動を予測し、断層挙動に対する人工バリアの力学的安定性と安定

限界の裕度を検討する予定である。



図 4.2-40 解析による鉛直応力分布

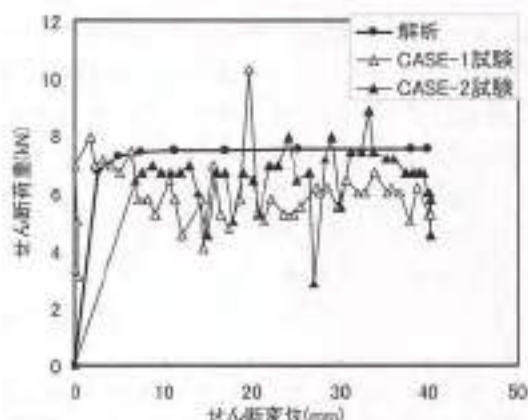


図 4.2-41 せん断荷重とせん断変位の関係

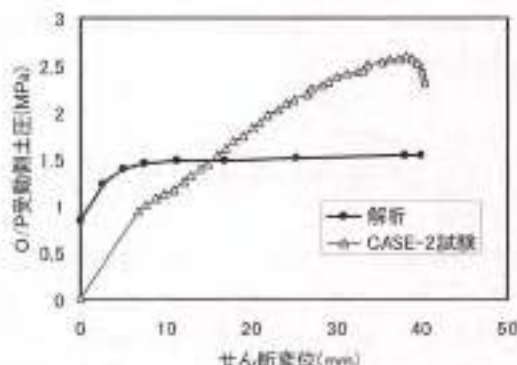


図 4.2-42 オーバーバック受動側土圧

参考文献

- 平井 卓, 榎井憲治, 菊池広人, 鈴木英明, 高治一彦, 大沼 敏 (2003) : 断層ずれに伴う人工バリアの力学的挙動評価, サイクル機構技術資料, JNC TN8400-2003-009.
- 池田俊雄, 岡田勝也, 池田研一, 長谷川達也 (2000) : 活断層調査から耐震設計まで, 鹿島出版会, pp. 56-57.
- 松田時彦 (1975) : 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震, 第 2 輯, 28, pp. 269-283.
- 榎井憲治, 松本一浩, 菊池広人 (2003) : X 線 CT 法の適用性に関する検討, サイクル機構技術資料, JNC TN8430-2003-001.
- 山田嘉昭 (1988) : 塑性の有限要素法, 科学技術出版社, pp. 225-226.

4.2.4 人工バリア等のナチュラルアナログ研究

① 課題と計画の概要

天然における処分場環境に類似した現象を研究するナチュラルアナログ研究により、人工バリア材の長期耐久性評価に資するデータ取得を行っている(亀井, 1999)。「第2次取りまとめ」においても、地下に100万年間埋没していたガラスの変質調査や、数十年間埋設された鉄管の調査により長期健全性の見通しは得られている。

現在、より深部のデータ、またはこれまで入手困難であった埋没環境データが入手可能な新たな事例調査など、データの蓄積による長期耐久性評価の更なる信頼性向上を目指して研究を進めている。具体的には、土中に長期間埋没していた天然ガラスや鉄製遺物の変質・腐食、ペントナイトの変質や粘土中の核種移行に関する研究、およびそれらを補完する室内実験である。

以下では、ガラスの溶解変質、金属腐食、粘土中の核種移行に関する研究の成果を述べる。なお、ペントナイトの変質に関しては、スイス Nagra などが進めている国際共同プロジェクトに参加し、天然におけるアルカリ性地下水湧出地点周辺(ヨルダン・マカーリンサイト)の粘土鉱物の変質に関する調査を実施している。

② これまでの成果

1) ガラスの溶解変質に関するナチュラルアナログ研究

平成13年度までは、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の成果として、地表露頭で得られた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(例えば, Kamei et al., 2000; Arai et al., 1989; 湯佐ほか, 1991)を行った。表面変質層については観察されず、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を明らかにした(Kamei et al., 2000)。このような天然事例では、長期間の試料環境の温度履歴や周囲の地下水環境の推定が重要である。

平成13年度から上記のような観点のデータが取得しやすい天然事例として、南関東における深度2,000m程度のボーリングコアを選定し調査を継続している。このボーリングコアは、防災科学技術研究所が1994~1997年にかけて掘削した、地殻活動観測井から得られたもの(鈴木・小村, 1999)

であり、凝灰岩層中に含まれる火山ガラス(軽石)を調査対象とした。15孔のボーリングコアのうち、横浜市で採取されたコアについては、目視により凝灰岩層が認められている。平成13年度の調査では、コア中の埋設条件で最高温度約70℃と推定された火山ガラスがモンモリロナイトおよび斜方沸石に変質していたため、引き続き変質について調査を継続すると共に、埋没環境の推定を行った。

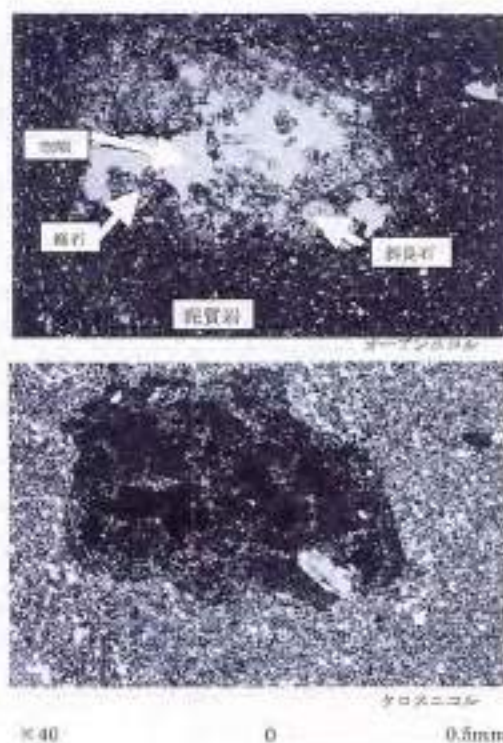


図 4.2-43 横浜孔の軽石の火山ガラス薄片写真(400倍)

平成14年度は、試料の薄片観察、微化石分析、希釈法による間隙水の成分分析、採取地点近傍の深部地下水の水質分析を実施した(図4.2-43)。薄片観察結果では、火山ガラスは全て鉱物に変質していることが確認された。また微化石分析より、火山ガラスは海底で堆積し、石灰質ナンノ化石と浮遊性有孔虫の観察の結果から火山ガラスは3.65~4.20×10⁹年の堆積年代であることが判明した。また、希釈法による分析の結果、間隙水の組成はClイオンに富むことが判明した。このことは変質に関与していた地下水は塩分濃度の高い地下水であったことが推定される。試料採取地点近傍の深部地下水組成も化石海水と天水起源の地下水の混合であることが水素・酸素同位体分析から判明した。本試料は、現在の埋没深度条件での温度約70℃

が最高温度であると考えられ、本温度になった最近の約 50 万年間にわたって化石地下水と反応し、ガラス組成がモンモリロナイトおよび斜方石英に变质した事例であると推定される（二口ほか、2003）。性能評価の観点からは、ガラスの变质鉱物に対しての核種の収着挙動等、それらのデータ取得が必要である。

ii) 金属の腐食に関するナチュラルアナログ研究

人バリア材料のオーバーバックには約 1000 年にわたる健全性が期待され、炭素鋼がその候補材料の一つである。平成 13 年度までの室内試験や数十年間の埋設期間を経た水道管などを用いたナチュラルアナログ研究の成果から、処分場埋設環境における 1000 年間の最大腐食深さは保守的に見積もっても 32mm 程度（軟岩系岩盤/堅置き）と推定されている。

この評価に関連した天然事例として、例えば炭山ほか（1999）により、圧縮ベントナイト環境に類似した粘土質土壤中に埋設されていた鑄鉄製水道管の腐食調査結果から、約 70 年間の最大腐食深さは 2mm 程度という報告値がある。このように、埋設環境における地下水の化学的状態や粘土等鉱物組成の情報を加味できる事例を多く集めることによって、より長期の腐食挙動について信頼性を高める必要がある。本研究では、数百年間地中に埋まっていた考古学的鉄製品の腐食量調査を進め、既存の室内試験データ（数年以内）、数十年の土壤埋設鉄管のデータと合わせることで、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とを目的としている。

平成 13 年度までに、土壤中の考古学的金属製品の腐食に関する調査において、X 線 CT を用いて鉄器の鉄質、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を明らかとした（本田・山口、2000）。また、平成 13 年度に、天然事例として、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 による調査を実施した。約 500 年前の遺跡であるイヨマイ 7 遺跡から出土した太刀、刀子および鉄製やじりのうち太刀には鉄が残っており、この期間の腐食量は 2~5mm であることがわかった。約 750 年前の出雲大社境内遺跡から出土した古代神殿の柱に使用された鉄帯や釘などの調査の結果、鉄帯と釘の各 1 点に鉄残存が認められた試料があり、腐食量は 3~

5mm と推定された。埋設環境はいずれも酸化性で、錆の外層はゲーサイトと土壤の混成物であった（本田・山口、2002）。

平成 14 年度には、出雲大社境内跡から粘土層で覆われ出土した鉄製斧について X 線 CT による調査を行った。図 4.2-44 に X 線 CT 画像の一例を示す。CT 像の白色部が鉄、わずかではあるが周囲の灰色部が錆層である。腐食量は最大でも 2mm 程度であり、試料によってはほとんど腐食していない状態が確認された。周囲の地質が堆積層であり粘土質の場所から出土したこと、接触した地下水が弱酸化性から還元性の水質であったことから、このように腐食量が低かったと推定される（本田・山口、2003）。



図 4.2-44 出土斧の写真と X 線 CT 画像
(右側写真で、大部分の残存鉄部分は白色、周囲の錆部分はわずかに灰色となっている。)

図 4.2-45 は炭山ほか（1999）が作成した最大腐食深さと期間との関係に、これまで実施した調査結果（本田・山口、2000、2002、2003；本田ほか、2002）をプロットしたものである。

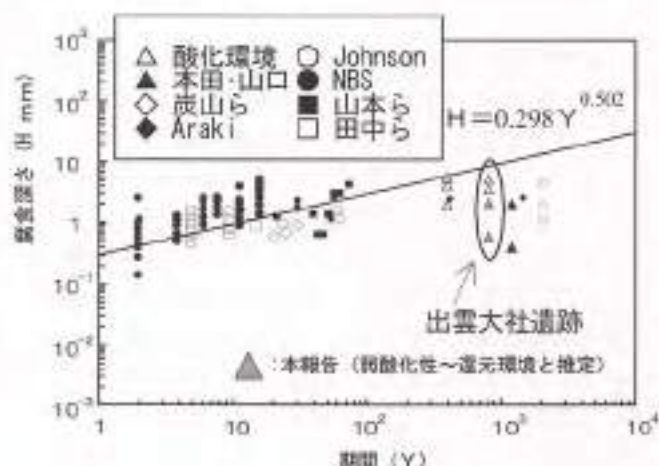


図 4.2-45 最大腐食深さの経年変化
(直線は数十年のデータをフィットさせ外挿した線)

千年に近いデータはいずれも、「第2次取りまとめ」で評価に用いられた数十年間のデータを外挿した値を超えていないことが確認された（吉川ほか、2002；上野ほか、2002）。

III) 粘土中での核種移行に関するナチュラルアナログ研究

平成14年度は、平成13年度に引き続き、シガーレイク（カナダ）のウラン鉱床をとりまく粘土質岩石中の核種の存在状況について（図4.2-46）、希土類元素、放射性元素の移行挙動に関するナチュラルアナログ研究を実施した。シガーレイク鉱床は、ウラン鉱床周囲を粘土（イライト）層が覆っている事例であり、この構造が処分システムに類似している。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される。

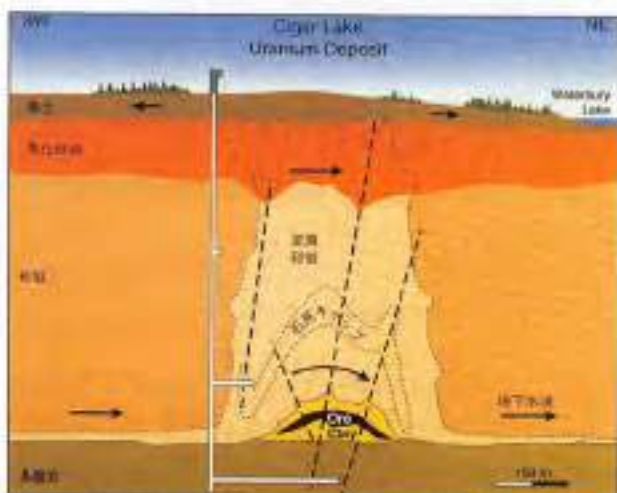


図4.2-46 シガーレイクウラン鉱床概念図

試験で用いた試料は、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の一部（ウランの高濃度部分と低濃度部分）から採取した。試料を連続抽出法により前処理し分析すると共に、含有する同位体分析をフランスのストラスブルグ大学にて実施した。また、光学顕微鏡および電子顕微鏡を用いて観察を実施した。同位体分析用に開発された高分解能 SIMS (SHRIMP) により、ウランおよび希土類元素の同位体分析を行った結果、ウランが二次鉱物化した（コフィナイト化した）、粘土周辺に留まっていることが確認された（Bros et al., 2003；レジス・ブロスほか、2003）。

③ まとめ

ガラスの溶解変質に関して、南関東における凝灰岩層中に含まれる火山ガラス（凝灰岩類）を調査対象試料として選定し、ガラスの変質について調査した。埋没環境条件が温度約70℃で化石海水と推定される地下水と約50万年間にわたって接触していた環境で、ガラス組成がモンモリロナイト及び斜ブチロル沸石に変質した事例であることがわかった。

金属の腐食に関しては、地中に埋没していた鉄器の腐食について X線 CT による調査を実施した。約750年前の出雲大社遺跡から発掘された粘土層で覆われた鉄製斧について、X線 CT による調査をすることができた。腐食量は最大でも2mm程度であることがわかり、試料によってはほとんど腐食していない状態の出土品が確認された。これは、100年以内のデータを外挿した値を超えておらず、性能評価の検証として重要な結果である。今後は、埋没地下環境をより精度よく推定し、オーバーパックの長期腐食量予測の検証に活用していく観点から、腐食環境因子が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、Nagraなどが進めている国際共同プロジェクトに参画し、これまでの調査結果についてのレビューを行っていく予定である。

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、性能評価における瞬時・可逆的な収着の取扱いが保守的であることが示された。今後、これらのデータを用いて長期的な核種移行挙動の理解を進めるとともに、性能評価の保守性を示す傍証として役立つ。

参考文献

- Arai, T., Yusa, Y., Sasaki, N., Tsunoda, N. and Takano, H. (1995): 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., Gauthier-Lafaye F., Stelle P., Ueno K., Yoshikawa H. and Yui M. (2003): Mechanisms of transport and retardation in clays enclosing the Cigar Lake uranium deposit (Canada), Uranium Geochemistry 2003, Nancy France. (in press)
- 二口克人、坂本勇治、廣木峰也 (2003): 処分環境下でのガラス変質に関するナチュラルアナログ研究、サイ

- ケル機構技術資料(研究委託報告書;株式会社ダイキ
コンサルタンツ), JNC TJ8400 2003-006.
- 本田 卓, 山口伸吾 (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 2001 045.
- 本田 卓, 山口新吾 (2003): 土壌中の考古学的金属製
品の腐食に関する調査(III), 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 2003-0012.
- 本田 卓, 山口新吾, 上野健一, 吉川英樹, 亀井玄人
(2002): 遺跡で出土した鉄器のX線CTによる腐食計
測, 腐食防食協会第 49 回材料と環境討論会講演集,
pp. 201-204.
- 亀井玄人 (1999): 人工バリア材の耐久性を示す天然類
似現象, 電気評論 9, pp. 34-39.
- Kamet, G., Yusa, Y. and Arzi, T. (2000): A natural
analogue of radioactive waste glass in a compacted
bentonite, *Applied geochemistry*, 15, pp. 141-155.
- レジス・ブロス, 久保田満, 上野健一, 吉川英樹, 亀井
玄人 (2003): A natural analogue study of transport
and retardation in clays enclosing the Cigar Lake
high-grade uranium ore (Canada), 日本原子力学会
2003 年春の年会要旨集, P33, p. 953.
- 辰山守男, 正田明宏, 三ツ井巖一郎, 本田 卓 (1999):
バントナイト中の銀葉銅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.
- 鈴木宏方, 小村健太郎 (1990): 関東地層の孔井データ
資料集, 防災科学技術研究所資料集, 第 191 号.
- 上野健一, 吉川英樹, 亀井玄人, 本田 卓, 山口新吾
(2002): 考古学的金属製品を用いた土壌中金属腐食
のナチュラルアナログ研究, 日本原子力学会 2002 年
秋の大会予集, F59, p. 659.
- 吉川英樹, 上野健一, 本田 卓, 山口新吾, 亀井玄人
(2002): 考古学的試料を用いた放射性廃棄物研究(金
属ナチュラルアナログ), 日本アイソトープ協会第 39
回理工学における同位体元素・放射線研究発表会要旨
集, p. 125.
- 高佐繁久, 新井 隆, 亀井玄人, 高野 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-富士および伊豆火成岩の火口ガラスの酸化変
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

4.3.1 閉鎖技術の検証試験

① 課題と計画の概要

閉鎖技術の開発に関して、「第2次取りまとめ」では、「人工バリアの性能に有意な影響を与えないように適切に処置するもの」として概念を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）、グラウトなど）のうち、プラグに着目した検証試験を行い、閉鎖性能に関するデータを取得する。また、閉鎖要素に求められる要件を明確にするため、坑道周囲に発生する掘削影響領域の評価について調査を行う。さらに、これまでに明らかとなってきた閉鎖に関わる構成要素の情報を考慮した閉鎖シナリオの検討を行う。

② これまでの成果

1) 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 AECL の地下研究施設（URL）で行っている（Martino et al., 2003；杉田ほか, 2003a）。

試験は、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・丹元, 2002）、両プラグ間の圧力チャンバーから水压を作用させ、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。コンクリートプラグは、AECL において開発された低アルカリ性コンクリートを用いている。粘土プラグは、国産のベントナイト（クニゲル VI）にケイ砂を 30% 混合し、この粘土材料を平均乾燥密度 1933kg/m^3 、大きさ $0.1\text{m} \times 0.36\text{m} \times 0.17\text{m}$ の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材料を吹付けた。吹付け層の密度は 1300kg/m^3 である。膨潤後に平均乾燥密度 1800kg/m^3 の粘土プラグとなる設計である。また、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）、トレーサー試験を実施してきた。現在は、注水圧を 4000kPa に維持し、圧力チャンバーの温度を 50℃、80℃ に加熱する試験を実施している。

図 4.3-1 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側からの湧水量の変化を示している。現在、チャンバー圧力は 4000kPa で維持されている。粘土プラグ側の湧水量は加圧チャンバーの圧力の増加に伴い増加の傾向にある。一方、コンクリートプラグ側からの湧水量は、2000kPa までは圧力の増加に伴って増加するが、その後は減少傾向にあり、4000kPa に圧力が増加してもその傾向は継続している。これは、加圧チャンバーの圧力がコンクリートプラグに作用し、切り欠き部において岩盤との密着がより強固になったため、湧水量が減少したものと考えられる。

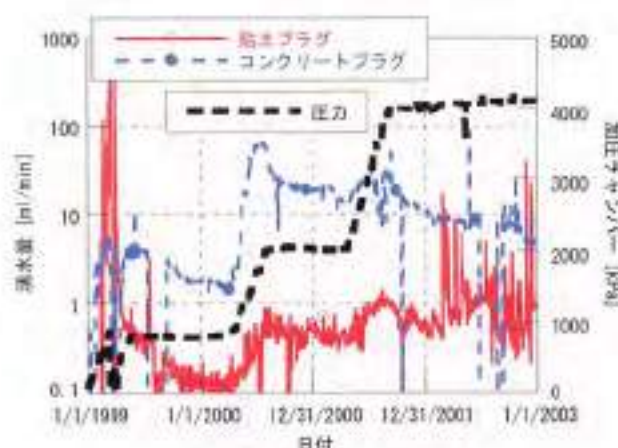


図 4.3-1 湧水量の経時変化

湧水量から粘土プラグ全体（プラグ周囲の掘削影響領域も含む）としての透水係数は、 10^{-11} m/s と評価できる。湧水の分布からそのほとんどは粘土プラグ周囲の掘削影響領域を通過しており、粘土プラグそのものの止水性能は十分に確保されていると考えられる。ここで、止水性能の確保として、掘削影響領域の適切な把握、プラグ設置場所における施工技術（掘削影響領域を軽減させる施工方法）が重要であると考えられる。

図 4.3-2 は粘土プラグの中心断面における飽和状況を示したものである。サクションが 1MPa 以下で（図で青緑色の部分）は飽和であると考えられる。この結果、2002 年 8 月の時点で粘土プラグは飽和になったと考えられる。

図 4.3-3 にトレーサー試験の状況を示す。トレーサー（NaBr）は、試験開始時に規定量を加圧室

に投入した。両プラグの下流側からの湧水を分析し、トレーサーの濃度変化を計測した。トレーサー解析は粘土プラグ側のみ実施した。図 4.3-4 にトレーサー解析の入力条件を示す。ここでは、透水係数の設定値を示した。解析は二次元の軸対象モデル、移流分散解析である。図 4.3-5 に粘土プラグが飽和になったことを確認した後に実施したトレーサー試験の結果および図 4.3-4 の条件での解析結果を示す。粘土プラグの下流側では 34 日目に岩盤との境界部にあるサンプリングポートにトレーサーが到達し、その後、そのポートでの濃度が増加した。これまでの試験結果から妥当と判断された透水係数(図 4.3-4)を適用した解析においては、粘土プラグ下流側の評価点でのトレーサーの到達時間は約 40 日であった。トレーサー試験ではコンクリートプラグ側への流量が大きく、トレーサーを投入した圧力チャンパー内のトレーサー濃度が試験中に著しく低下したため、トレーサー濃度は解析結果と比較できないが、トレーサーの到達時間に関しては試験結果をほぼ表現できた。

これまでの湧水量の計測、トレーサー試験結果から、プラグの浸潤経路はそれぞれのプラグの周囲に存在する岩盤の掘削影響領域と考えられる。

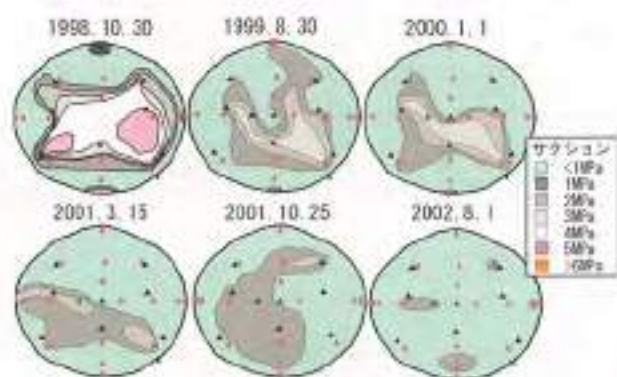


図 4.3-2 粘土プラグの飽和状況の経時変化 (坑道方向粘土プラグ中心断面)

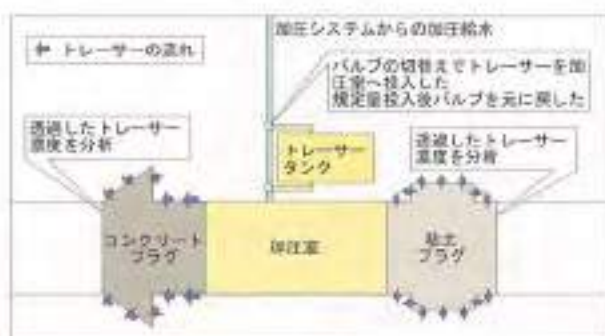


図 4.3-3 トレーサー試験の状況



図 4.3-4 トレーサー解析の入力条件

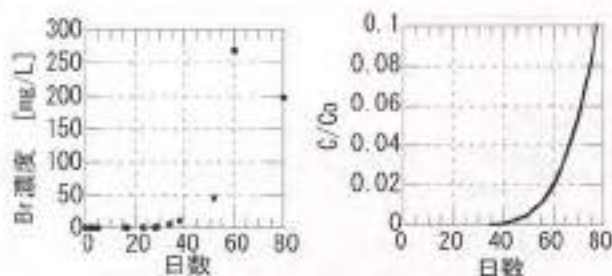


図 4.3-5 トレーサー試験の解析評価 (左:実測値, 右:解析結果)

ii) 閉鎖要件の明確化

閉鎖要素の要件を明確にするため、坑道の周囲に発生する掘削影響領域の評価について、文献調査を行った(戸井田ほか、2003)。掘削影響領域が坑道周囲の浸潤経路で支配的であることは、カナダの実規模原位置試験の結果からも明らかになってきている。調査対象は結晶質岩および堆積岩である。調査の結果、これまでの掘削影響領域の調査に関するものは、そのほとんどがある断面における点での計測にとどまっており、坑道沿いの連続性に関するものはなかった。閉鎖の観点からは掘削影響領域の水理的な連続性の確認(評価上、どう取り扱うのが保守的なのか)が今後必要になるものと考えられる。

iii) 閉鎖シナリオの検討

「第2次取りまとめ」以降、プラグや埋め戻しなどの閉鎖要素の地下環境での機能に関するデータが取得されてきたことを受け、具体的な閉鎖要素の機能を考慮した処分技術と安全評価の両者の観点より、閉鎖性能の評価が必要であると考えた。そこで、該種の地表への移行経路として考えられるケースの一例として、「連絡坑道からそれを横切る破砕帯を経由するケース(図 4.3-6 参照)」について、検討を行った。まず、閉鎖性能に影響を与える因子として、

- ・坑道周辺岩盤（掘削影響領域を含む）における連続的な移行経路の発生
- ・破砕帯と連絡坑道の交差
- ・コンクリート支保工が設置された坑道における支保工の劣化による連続的な移行経路の発生
- ・埋め戻し材の止水性能
- ・止水プラグの止水性能

について、それぞれの時間的推移に関わる理解度を整理した。次に、破砕帯と処分パネル間の水理解析、fault ツリー解析等に基づいて第1次案としての閉鎖性能シナリオを構築した（杉田ほか、2003b）。

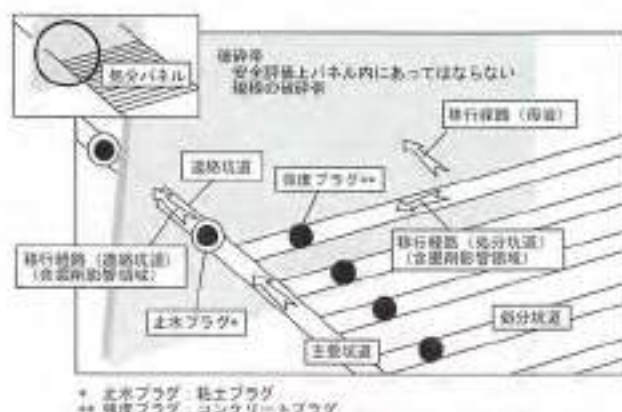


図 4.3-6 移行経路の検討

図 4.3-7 は閉鎖シナリオ構築のための fault ツリーの分析結果である。今回のケースでは、埋め戻し材そのものの移行経路としての可能性および止水プラグの止水性能により両項目（図中右下の2つのダイアグラム）は、上述の理解度の整理結果

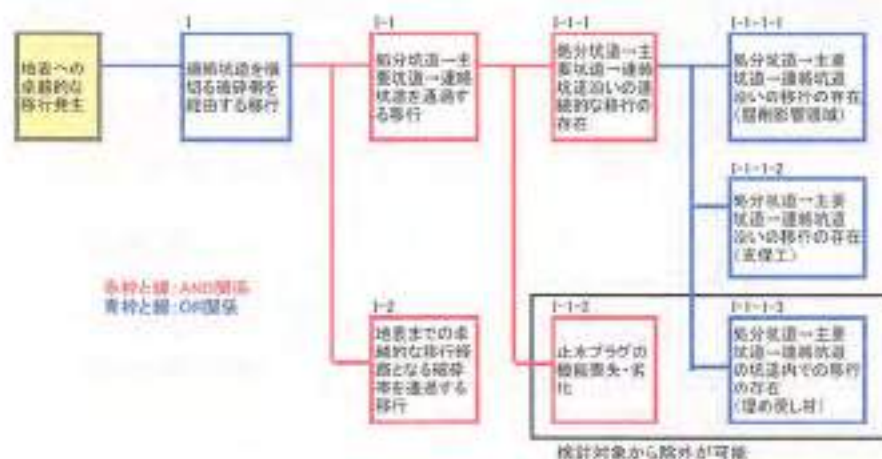


図 4.3-7 閉鎖シナリオ構築のための fault ツリー分析結果
（連絡坑道からそれを横切る破砕帯を経由するケース）

から検討対象から除外できるとしたが、それ以外のものに関しては、現段階ではデータに基づき検討対象から除外できないもの、あるいはデータそのものがないために検討対象から除外できないものである。AND/OR の関係から止水プラグが機能することでこのケースでの移行経路は発生しない結果となる。ただし、ほかのダイアグラムに関しても移行経路となるためには破砕帯内における移行の存在および坑道沿いの連続的な移行の存在が条件であり、その可能性は低いものと考えられる。

以上のことから、支保の劣化の影響が定量的に評価できるとすれば、安全評価上も連絡坑道を移行経路としないというシナリオが現在の知見では最も現実的であると結論付けた。

③ まとめ

閉鎖要素の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、設計に基づき設置した実規模プラグが止水性能を発揮しているデータを取得してきている。一方、閉鎖要素の要件に関しては、掘削影響領域の評価に関する情報を収集し、分析評価を行った。また、上記閉鎖構成要素の地下環境での機能に関するデータを基に、「第2次取りまとめ」では埋め戻し、プラグの施工不良を想定した保守的な検討にとどめていた閉鎖シナリオについて、より現実的なシナリオの第1次案を構築した。

今後は、閉鎖シナリオを具体的に検討するとともに、閉鎖性能に関する検証データの蓄積を継続していく。

参考文献

- Vartino, J., Chandler, N., Dixon, D., Sugita, Y., Vignal, B. and Hansen, P. (2003) "The Tunnel Sealing Experiment and Application to Repository Seal Design, Proceedings of the 10th International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas, 2003, pp.602-609.
- 杉田 裕, 升元一彦 (2002) : トンネルシーリング性能試験におけるプラグの設計・施工技術, サイクル機構技術資料, JNC TR8400 2002-005.
- 杉田 裕, 川上 進, 戸井田克 (2003a) : トンネルシーリング性能試験における試験環境条件および計測項目, サイクル機構技術資料, JNC TR8400 2003-002.
- 杉田 裕, 川上 進, 池井三和, 牧野仁史, 澤田 淳, 栗原謙二, 三原守也 (2003b) : 高レベル放射性廃棄物地層処分における閉鎖性能に関する検討 (平成 14 年度), サイクル機構技術資料, JNC TR8400 2003-010.
- 戸井田克, 塩巻幸弘, 深谷博行, 須山泰宏, 川端啓一, 伊藤堂二郎, 奥津一夫, 高村 尚 (2003) : 実規模シーリングシステムの研究開発 (Ⅲ), 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), (登録準備中)

4.3.2 人工材料の開発

① 課題と計画の概要

「第2次取りまとめ」では、セメント系材料に起因する高 pH 溶液の緩衝材や岩盤への影響を考慮し、坑道の支保工の代替材料として低アルカリ性コンクリートを推奨している。pH11 以下で緩衝材は顕著な変質は避け得ると考えられているため（久保ほか、1996）、サイクル機構では pH11 以下を目標として普通ポルトランドセメント（OPC）にシリカフューム（SF）とフライアッシュ（FA）を高含有させた低アルカリ性セメント HIFSC（Highly Fly ash contained Silicafume Cement）を用いたコンクリートを開発している。この低アルカリ性コンクリート HIFSC（Highly Fly-ash contained Silicafume Concrete）の品質特性についてはある程度把握されているが、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。

サイクル機構では平成 13 年度までの成果（久保ほか、2001；久保ほか、2002）も踏まえ、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における課題を以下の 4 項目とした。

- ・施工性の確認：吹付けコンクリート、場所打ちコンクリート、グラウトとしての施工性を確認する。
- ・目標品質の達成：要求される圧縮強度を確保し、pH が 11 以下になることを確認する。
- ・品質変動の把握：FA の品質に起因するコンクリート品質の変動を把握する。
- ・耐久性の評価：鉄筋の腐食挙動を把握し、供用期間における耐久性を評価する。

今後は上記の課題に対し室内実験などによる開発を進め、幌延の深地層の研究施設において原位置での施工性確認を行う予定である。

② これまでの成果

1) 施工性の確認

平成 13 年度までに、屋外吹付け実験と実規模セグメント製作を行い、低アルカリ性コンクリートが吹付け施工および場所打ち施工に対して基本的な施工性を有することを確認した。また、グラウト施工では、微粒子材料の組合せにより早期に低アルカリ性を実現できる材料候補を得た（久保ほか、2002）。

平成 14 年度は、吹付け施工の材料適用性を確認

するために、異なるセメント配合、複数種類の FA について吹付け実験を行い、いずれも十分な施工性を有することを確認した。

ii) 目標品質の達成

平成 13 年度は圧縮強度の目標として場所打ちコンクリートで 30N/mm²、吹付けコンクリートで 18N/mm²という標準的な値を採用した。これに対しセメント配合 OPC:SF:FA=2:2:6 は低 pH 確保の面では有利であるが、圧縮強度の目標達成が困難であるとの結論を得た。よって、平成 14 年度は OPC:SF:FA=4:2:4 および OPC:SF:FA=3:2:5 のセメント配合を対象として開発を行った。平成 14 年度の圧縮強度目標値は平成 14 年度に設定された幌延の深地層の研究施設の支保工コンクリート強度の最大値（場所打ちコンクリート 40N/mm²、吹付けコンクリート 30N/mm²）とした。また、FA は幌延への材料供給を考慮し平成 13 年度と異なる JIS Ⅱ 種相当品を採用するとともに、比較のため規格品である JIS Ⅰ 種の FA を合わせて採用した。このため強度発現状況は平成 13 年度の結果と多少異なるものとなっている。平成 14 年度研究対象としたケースを表 4.3-1 に示す。3 カテゴリーについて各 2 ケースとし、全 8 ケースを対象とした。

表 4.3-1 平成 14 年度研究対象ケース

コンクリート配合・用途		セメント配合		FA 種類	
W/C=30%	W/C=50%	OPC:SF:FA=	OPC:SF:FA=	JIS Ⅰ 種	JIS Ⅱ 種
場所打ち用	吹付け用	3:2:5	4:2:4		相当品*

*水と OPC-SF+FA の重量比
**JIS Ⅱ 種とほぼ同等の品質を持つ製品

圧縮強度試験結果を図 4.3-8 および図 4.3-9 に示す。場所打ちコンクリートは 1 ケースを除き目標強度を達成しているが、吹付けコンクリートでは逆に 1 ケースを除き目標に達していない。この吹付けコンクリートの強度改善については、改善の余地の可能性および幌延における原位置試験での必要性を考慮して判断する。

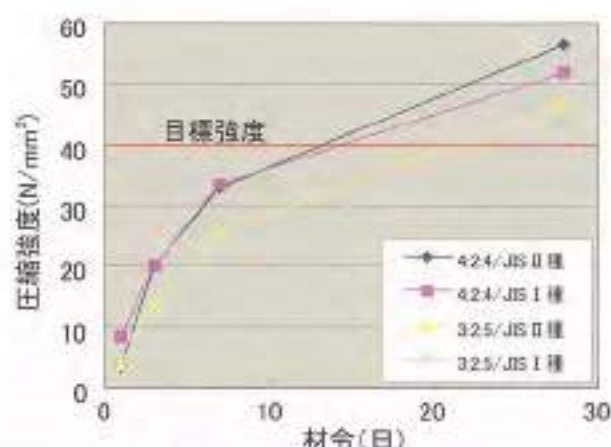


図 4.3-8 場所打ちコンクリート圧縮強度

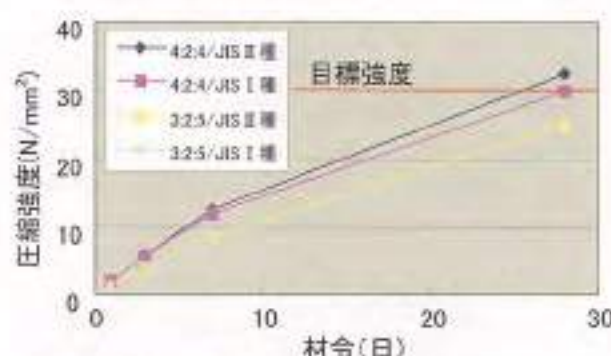


図 4.3-9 吹付けコンクリート圧縮強度

また、pHについては11以下となるまでの期間の目標として暫定的に5年間（「第2次取りまとめ」において処分坑道が建設されてから廃棄体が定置されるまでの概略の期間）を設定している。これに対して平成14年の観測では平成13年度と同程度の低下傾向が認められるが、目標達成の確証まで至っておらず、引き続き長期の観測が必要である。今後は圧縮強度とpHの低下状況を考慮して観測に適用する配合を選定する。

iii) 品質変動の把握

品質変動の把握は平成14年度より開始した。FAは工業副産物であり、これを大量に混入する場合コンクリートとしての品質変動の把握が必要となることから、異なる時期に4回サンプリングされたFAを用いたコンクリート品質変動の把握を行う。

対象とする品質は、硬化前のコンクリート性状、初期圧縮強度、28日圧縮強度とした。

硬化前のコンクリート性状について、場所打ちコンクリートの配合では4回の繰り返し試験において流動性を表す指標であるスランプフローに変動が見られた。これに対して吹付けコンクリート

配合ではスランプに目立った変動は認められていない。

初期圧縮強度の変動では、場所打ちコンクリートの4回の繰り返しによる変動幅は1.1~3.6N/mm²であるのに対し、吹付けコンクリートでは0.2~0.6N/mm²と場所打ちコンクリートに比べて小さい。

28日圧縮強度の変動についても、場所打ちコンクリートでは4回の繰り返しによる変動幅は1.1~13.5N/mm²であり、吹付けコンクリートでは1.9~6.9N/mm²となっている。図4.3-10に今回最大の変動幅を示した場所打ちコンクリート4:2:4/II種相当のケースについて、繰り返しによる圧縮強度の変動状況を示す。

品質変動に関しては、全体的に場所打ちコンクリートの変動が大きい値を示したが、この変動状況から直ちに施工管理上大きな問題となることはないと判断される。ただし、この判断は限られたサンプリング回数から得られたものであり、今後データ蓄積を行う必要がある。

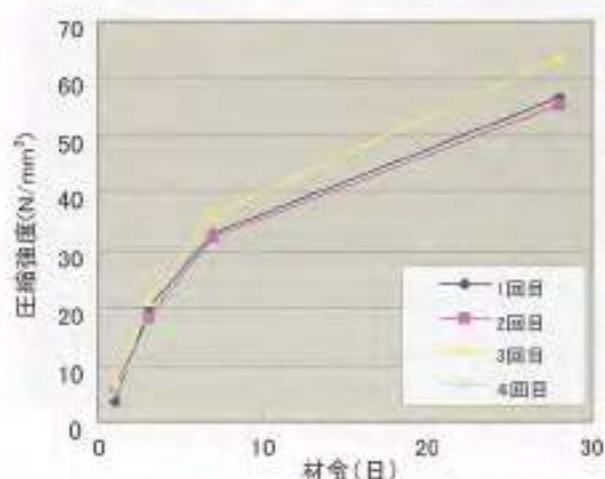


図 4.3-10 場所打ちコンクリート圧縮強度の変動(4:2:4/II種)

iv) 耐久性の評価

耐久性の評価では、屋外に暴露した鉄筋コンクリートの特性評価を実施した。地層処分における坑道支保工は鉄筋コンクリートであるセグメントとなる可能性があり、また無筋コンクリートの場合でもコンクリート中に鋼材が設置されるため、HFSC中の鉄筋の腐食挙動評価は構造物の健全性確保の点から必要である。

コンクリート中の鉄筋腐食についてHFSCとOPCを比較した場合、HFSCはpHが低いことによる不動態皮膜形成の面で不利であるが、一方、塩分などの拡散透過性、電気抵抗、水分率などHFSCが有利と考え

られる面もある。そのため、HFSCとOPCの双方の腐食挙動を比較評価することとし、セメント配合比OPC:SF:FA=2:2:6のHFSCとOPC100%の試験体を対象に評価を行った。暴露試験体の鉄筋のかぶりは2cmとし、暴露環境は海面の潮位変動により乾湿が繰り返される飛沫帯と海中とした。平成14年度は暴露期間6ヶ月と1年の試験体について調査を実施した。調査項目は、圧縮強度、腐食面積率、腐食減量、全塩化物イオン含有量、可溶性塩化物イオン含有量、自然電位、コンクリート抵抗および分極抵抗である。以下に腐食面積率と塩化物イオン含有量の結果を示す。

暴露後6ヶ月でHFSC中の鉄筋に錆の発生が認められ、1年後で腐食面積率は海中暴露で0.8~5.2% (平均2.4%)、飛沫帯暴露で4.1~7.7% (平均6.1%)であった。これに対してOPC100%の鉄筋に錆の発生は認められていない。両者の錆の発生状況を図4.3-11および図4.3-12に示す。

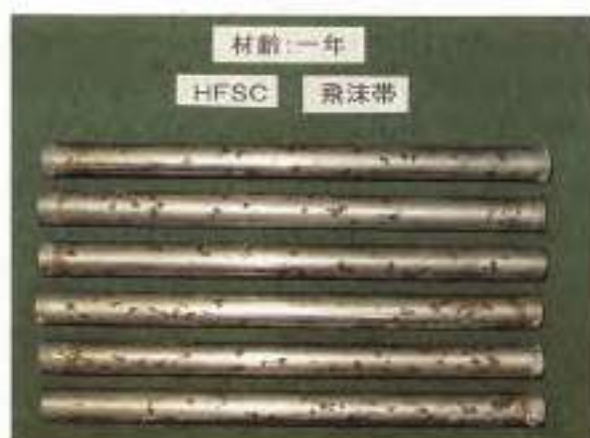


図4.3-11 HFSC飛沫帯1年暴露鉄筋の状況

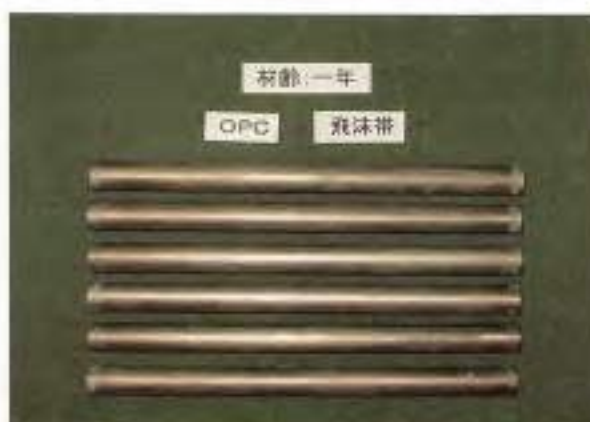


図4.3-12 OPC飛沫帯1年暴露鉄筋の状況

また、1年暴露後の全塩化物イオン含有量の調査結果を図4.3-13に示す。OPCとHFSCに塩化物イオンの透過性に顕著な差は見られない。図4.3-13に示した赤のライン(1.2kg/m³)は、コンクリート標準示方書においてOPC中の鉄筋が腐食し始める塩化物イオン量としているものである。本実験における鉄筋のかぶりは2cmであり、その鉄筋位置ではHFSCの塩化物イオン量は1.2kg/m³以下であるにもかかわらず免錆している。

以上のことから、HFSCはOPCより鉄筋が錆びやすく特に気中で錆びが顕著となることを確認するとともに、OPCのようにかぶり厚さで塩分の浸透に対処して鉄筋の健全性を確保するという考え方がHFSCに対しては適用できない可能性のあることが示唆された。なお、この傾向を確認するためにはより長期の腐食挙動調査が必要と考えられる。以上から、HFSCを鉄筋コンクリートとして使用する場合は、構造物としての耐久性をどのように確保するかが今後の課題となる。

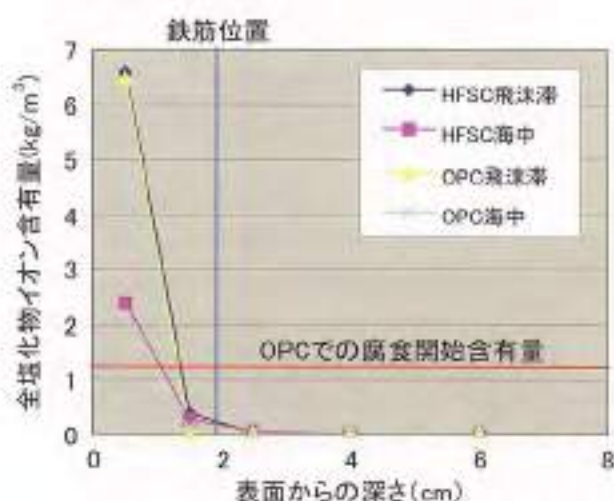


図4.3-13 1年暴露全塩化物イオン含有量

③ まとめ

施工性の確認では、材料や配合を変化させた場合でも吹付け施工が可能であることを確認した。今後は、軽延での実工事に向けてセメント材料の運搬・保管や練混ぜの実証を通じて材料供給の問題点抽出や解決を図るとともに、グラウトの注入実験による施工性の確認や注入効果の確認を実施する。

目標品質の達成では、場所打ちコンクリートの圧縮強度目標はほぼ達成できたが、吹付けコンクリートについては目標値の設定を含めて今後の課題である。pH低下についてはなお長期計測が必要

であり、また低下挙動のモデル化検討が必要である。

品質変動の把握では、吹付けコンクリートに比べて場所打ちコンクリートの変動幅が大きいという結果が得られたが、施工管理上直ちに問題になるものではないと判断される。しかし、まだ繰り返し回数が十分でないため、今後この拡充を図る。

耐久性の評価では、HPSCはOPCより鉄筋が錆びやすく、発錆条件も異なる可能性が示唆された。鉄筋腐食への対処方法としては、鉄筋の発錆を許容した上で構造物としての耐久性を評価する方法や鉄筋の代替材料の採用が考えられる。代替材料の例として経済性の問題はありますがスランレス製鉄筋がすでに製品化されていることから、対処は可能と考えられる。

上記開発は今後数年で完結させ、平成17年度に着手が予定されている規程の深地層の研究施設の一部にHPSCを適用することにより原位置における適用性の確認を行う予定である。

参考文献

- 久保 博，黒木泰貴，三原守弘（1998）：ヘントナイト系繊維材のコンクリート間隙水による長期変質の基礎研究，地盤工学会誌，第46巻，第10号，pp.31-34。
- 人矢桂史郎，三上哲司，保岡哲治，上垣義明（2001）：保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；株式会社大林組），JNC-TJ1400-2001-004。
- 人矢桂史郎，三上哲司，秋好賢治，上垣義明（2002）：保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；株式会社大林組），JNC-TJ1400-2002-013。

4.4 設計手法の適用性確認

① 課題と計画の概要

地層処分における設計は図 4.4-1 に示すように人工バリアの設計と地下施設の設計に大別される。「第2次取りまとめ」では、わが国の幅広い地質環境を想定して設計を行い、技術的実現性の提示を行った。



図 4.4-1 「第2次取りまとめ」における設計の流れ

図 4.4-1 に示された事項を技術的特性から分類し、実際の地質環境への適用に関わるそれぞれの課題とその解決のための方策をまとめると、図 4.4-2 のようになる。このうち、本項で対象とするのは人工バリア設計の部分と適用性確認のための原位置試験計画の部分（ハッチの部分）である。なお、施設設計では坑道の空洞安定性評価が課題の中心であり、これについては処分施設と研究施設に本質的な差異はないことから、研究施設の設

計を対象として適用性確認を行う。この研究施設設計については 3.3.2 5) および 3.6.4 に示した通りであり、その適用性確認については平成 14 年度に具体的な検討を実施していない。ただし、処分施設と研究施設ではゆるみ領域や支保工材料などに対する考え方が異なることから、処分施設設計として適用性を確認すべき項目を今後検討していく。



図 4.4-2 処分技術の課題とその解決方策

人工バリア設計では、「第2次取りまとめ」に示された設計手法が具体的地質環境においてどの程度有効であるかを、幌延深地層研究計画における地表からの調査に基づく地質環境を対象に検討する。

人工バリアの長期挙動評価と、建設・廃業・閉鎖の工学技術に関しては、幌延の深地層の研究施設における原位置試験を通じて適用性の評価を行う予定であり、このための原位置試験計画の検討を行う（サイクル機構，2002）。この原位置試験計画の検討結果は、今後の幌延深地層研究計画における試験坑道配置検討や工程計画に反映される。今後、原位置試験計画の具体化を図り、実施に向けた準備を行う。なお、原位置試験そのものは原則として幌延深地層研究計画の第3段階で実施する。

② これまでの成果

人工バリアの設計では、検討の出発点として「第2次取りまとめ」に示された設計の内容をフローとして書き下した。この結果、処分深度は前提条件であり設計の対象となっていないこと、オーバ

ーバック設計と緩衝材設計および人工バリア設計と地下施設設計の相互関連が明確でないなどがわかった。これを踏まえて、オーバーバックと緩衝材について、特に入出力情報に着目して設計フローの作成に着手した。

設計に必要な地質データの内、オーバーバック設計の初期段階から pH や Eh などの地下水化学の原位置状態に関する情報が重要な位置を占めることが改めて確認された。

原位置試験計画では「第2次取りまとめ」で人工バリアの埋設後の長期健全性評価として取り上げられた事項を基に人工バリアの長期挙動評価に関する以下の原位置試験5項目を選定した。

- ・人工バリア試験（熱-水-応力-化学連成試験）
- ・緩衝材／岩盤クリープ試験
- ・ガス移行挙動試験
- ・オーバーバック腐食試験
- ・セメント影響試験

また、建設・操業・閉鎖の工学技術に関する原位置試験ではそれぞれに対して以下の3項目を選定した。

- ・低アルカリ性コンクリート施工性確認試験
- ・定置精度確認試験
- ・坑道閉鎖試験

なお、定置精度確認試験では緩衝材の膨潤挙動の評価、坑道閉鎖試験では核種移行の場として掘削影響領域や支保工部分を含む坑道全体の長期挙動評価という、工学技術検証以外の目的も加えて実施することが考えられる。

原位置試験の選定・計画にあたっては、関連する研究テーマの中での原位置試験の位置付けを明確にし、その必要性を確認した。研究テーマと原位置試験の対応を以下に示す。

- ・人工バリア試験：熱-水-応力-化学連成挙動に関する研究(4.2.2)（この対応関係を例として図4.4-3に示す。）
- ・緩衝材／岩盤クリープ試験：緩衝材／岩盤の力学変形挙動に関する研究(4.2.1.1)
- ・ガス移行挙動試験：緩衝材ガス透気回復挙動に関する研究(4.2.3.1)
- ・オーバーバック腐食試験：炭素鋼オーバーバックの腐食挙動に関する研究(4.1.1.1)
- ・セメント影響試験：人工バリアの変質・劣化挙動に関する研究(4.2.1.3)
- ・低アルカリ性コンクリート施工性確認試験：人工材料の開発(4.3.2)

- ・定置精度確認試験：人工バリアの性能保証に関する基礎情報整備(4.3.3)
- ・坑道閉鎖試験：閉鎖技術の確証試験(4.3.1)

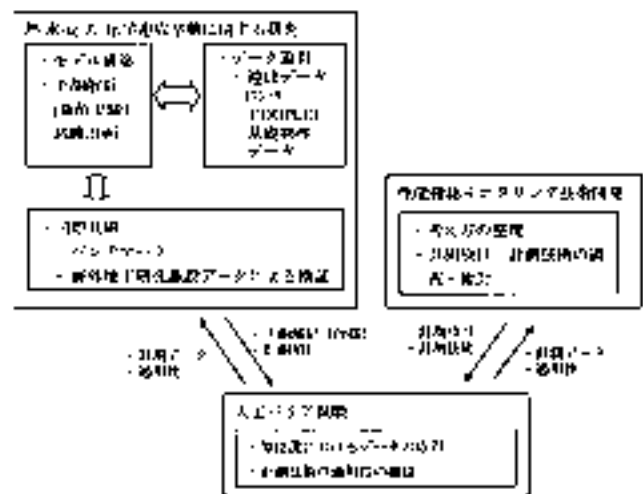


図 4.4-3 原位置試験の位置付け（人工バリア試験の例）

原位置試験の位置付けの検討に基づき、各試験について試験概念の検討を行った。ここで試験概念として検討対象としたのは試験規模（実規模または縮小規模）、支保工コンクリートの有無、試験環境の地下水水質、定置方式、試験深度である。それぞれの試験概念がどうあるべきかを、モデル検証の観点、実現意把握の観点、「第2次取りまとめ」との整合の観点、作業性・安全性・費用面での実現性の観点から検討を行い、現時点で妥当と考えられる試験概念を設定した。人工バリア試験を例にとると、設定した試験概念は以下のようである。

- ・試験規模：実規模を基本とする
 - ・支保工：なしを基本とする
 - ・水質：地下水または排水
 - ・定置方式：堅固さを基本とする
 - ・試験深度：最深部での実施を基本とする
- 上記の試験概念に基づく人工バリア試験の概念(案)を図4.4-4に示す。

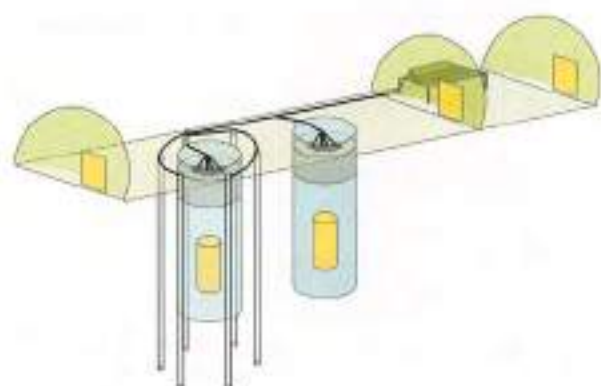


図 4.4-4 人工バリア試験の概念 (案)

③ まとめ

人工バリア設計手法の適用性確認については、オーバーバックと緩衝材の設計フローの作成に着手したところである。今後はこのフローをとりまとめ、人工バリア設計に必要な地質情報やデータを抽出する。現状で取得されている地質環境情報やデータで不足するものについては、これを補充するための地質環境の推定や、データ取得のための室内実験を実施する予定である。

原位置試験計画については、定性的な検討に基づき試験概念を構築した。今後は地表からの調査結果に基づく定量的な検討を行い、試験概念の具体化など原位置試験実施に向けた準備を行う。

参考文献

核燃料サイクル開発機構 (2002)：転延深地層研究計画
平成 14 年度調査研究計画，サイクル機構技術資料，
JNC TN1410 2001-004.

【個別報告】

5. 安全評価手法の高度化

5. 安全評価手法の高度化

5.1 核種移行データベースの整備

5.1.1 放射性核種の熱力学データベースの整備

① 課題と計画の概要

これまでサイクル機構において構築してきた熱力学データベース(JNC-TDB)では、セレンやアクチニド元素などの酸化還元に敏感な元素の熱力学データの信頼性向上、幅広い地下水条件を対象に評価を行うための高イオン強度に対応できる活量係数モデルの整備などが重要な課題となっている。そのため、サイクル機構では熱力学データ取得とデータベース改良の両面から取り組んでおり、より信頼性の高いデータベースの構築を目指している。

このうち、熱力学データ取得については、評価対象元素のうち、特にセレンと4価のアクチニドに重点を置いて取り組んでいる。これらの元素は、還元条件における熱力学データについては限られた情報しか存在せず、熱力学データの信頼性向上のためのデータの拡充を進めている。

一方、データベース構築については、たとえば海水系地下水のような高イオン強度(約0.6M)における溶解度評価を適切に行うための活量係数モデルの導入や、最新の情報に基づく熱力学データの再評価が必要である。そのため、これらのモデルや新規データの導入と地球化学計算コードへの適用を課題として取り組んでいる。

② これまでの成果

1) 炭酸共存下におけるネプツニウム(IV)の溶解度測定

平成13年度までに、還元条件・炭酸共存下・アルカリ性水溶液中におけるネプツニウム(Np)の溶解度測定を実施してきている。この中で、Np(IV)溶解度のpH(= -log [H⁺])および全炭酸濃度(C_T)の依存性から2種のヒドロキソ炭酸錯体(Np(CO₃)₂(OH)₂²⁻、Np(CO₃)₂(OH)₄⁴⁻)の存在を推定し、その熱力学データを取得した(Kitamura and Kohara, 2002)。平成14年度は、溶解度データの充実と熱力学データの信頼性向上を目的として、高アルカリ性水溶液中におけるNp(IV)の溶解度測定を行ったほか、既報の溶解度データの考察についても見直しを行った。

溶解度測定は、過飽和法で実施した。高アルカリ性水溶液中における溶解度測定では、初期Np-237濃度を1×10⁻⁷Mに設定し、イオン強度はNaClO₄を用いて2.9Mに、pHはNaOHを用いて約12.9に、C_TはNa₂CO₃を用いて0.2~0.7Mに調整した。還元剤としてNa₂S₂O₄(重二チオン酸ナトリウム)を用い、初期濃度が0.05Mとなるように調整した。一定期間振とう後、溶液の一部を孔径0.45μmのメンブランフィルターもしくは分画分子量10⁴の限外ろ過フィルターを用いてろ過し、Np-237のα線を半導体検出器で測定することにより、溶存Np濃度の定量を行った。酸素および炭酸ガスの影響を排除するため、α線測定を除くすべての作業はアルゴン雰囲気(O₂<1ppm)のグローブボックス中で実施した。

得られた試験結果の例を、図5.1-1に示す(北村・小原, 2002)。全Np濃度([Np]_T)測定における検出限界が約10⁻⁸Mであることもあり、実験値にはばらつきが見られるが、全体的にはC_Tの増加によりNp濃度が増加していることがわかる。この両対数グラフにおいて、Np濃度のC_T依存性が傾き2の直線を示したことから、この条件におけるNp溶存化学種のCO₃²⁻の配位数が2であることがわかる。したがって、これまでに取得したpH依存性の結果と併せることにより、炭酸共存下、pH:12~13におけるNp(IV)の溶存化学種は、Np(CO₃)₂(OH)₂²⁻であることが明らかとなった。また、弱アルカリ性条件(pH_c≤10)においては、高C_T条件(0.1M以上)に

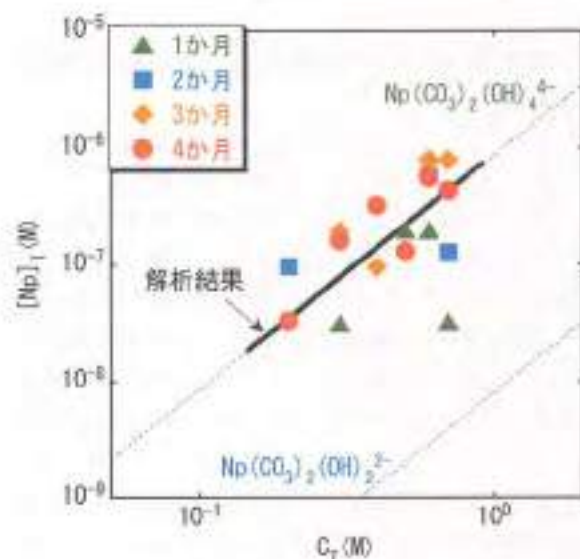
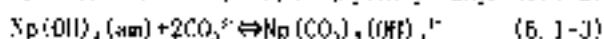
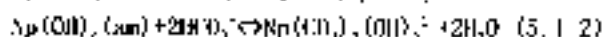
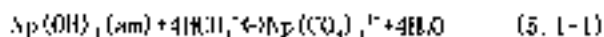


図5.1-1 イオン強度2.9M、pH_c=12.9における溶存Np濃度の全炭酸濃度(C_T)依存性

における Np(IV) 溶解度の pH 依存性をよりよく説明するため、既報の 2 種のヒドロキソ炭酸結体に $\text{Np}(\text{CO}_3)_4^{4-}$ を加えて再解析を実施した。解析によって得られた、イオン強度 0 における熱力学データを表 5.1-1 に示す。これらの値は、いずれも以下の各式における平衡定数を示す。



得られた熱力学データは前報 (Kitamura and Kohara, 2002) とはあまり変わらないものの、化学種の決定やイオン強度依存性のデータ充実などにより、熱力学データの信頼性がより高められている (北村・小原, 2002)。

表 5.1-1 SIT 法によって得られた 1 (イオン強度)=0 における平衡定数 ($\log K^\circ$)

化学種	$\log K^\circ$	文献
$\text{Np}(\text{CO}_3)_4^{4-}$	-2.70 ± 0.30	本研究 ¹⁾
	-3.11 ± 0.22	NEA-TDB ²⁾
$\text{Np}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2^{2-}$	-2.90 ± 0.20	本研究 ¹⁾
	-2.78 ± 0.18	前報 ³⁾
$\text{Np}(\text{OH})_2(\text{OH})_2^{2-}$	-6.60 ± 0.20	本研究 ¹⁾
	-7.15 ± 0.41	前報 ³⁾

誤差は 95% 信頼区間を示す。

¹⁾ 本研究: 北村・小原, 2002

²⁾ NEA-TDB: Lemire et al., 2001

³⁾ 前報: Kitamura and Kohara, 2002

ii) 還元条件下における鉄セレン化合物の溶解度測定

セレン (Se) 79 は、安全評価上重要な核種のひとつであり、「第 2 次取りまとめ」レファレンスケースにおける解析結果では、地層処分開始後約 10⁶ 年までの段階で、濃度評価上最も重要な核種となる結果が得られている。また、地下水中で陰イオンの形態を取り、緩衝材や母岩への吸着が期待できないことから溶解度の信頼性向上が極めて重要である。「第 2 次取りまとめ」における Se の溶解度は、オーバパックの腐食由来する Fe(II) と接触することから、溶解度制限固相を $\text{FeSe}_2(\text{cr})$ 、溶解化学種を HSe^- として溶解度が評価されている。しかしながら、 $\text{FeSe}_2(\text{cr})$ の熱力学データは、異なる化学組成の鉄セレン化合物に対する高温での合成反応熱等から推定されたものであり (Mills,

1974)、溶解度測定による熱力学データの議論は行われていないことから、 $\text{FeSe}_2(\text{cr})$ の熱力学データの取得を目的とした溶解度試験を実施した。

溶解度測定は不飽和法により行った。湿式法および乾式法により調整した 2 種類の FeSe_2 試薬を投入したが、それらの試薬には不純物として $\text{Se}(\text{cr})$ および $\text{Fe}_3\text{Se}_2(\text{cr})$ が含まれていることがわかった。 HCl および NaOH により洗浄した試薬も準備したが、不純物の存在は、ほぼ同様であった。

溶解度試験は、処分環境条件で期待されるような強い還元条件ではなく、 FeSe_2 と SeO_3^{2-} の溶解平衡による熱力学データの検出を行うことを目的として、測定可能な Se 濃度が期待される試験条件 ($\text{pH}: 11 \sim 13$, $\text{Eh}: -0.4 \sim 0\text{V}$ (vs. SHE)) を選定した。また、 Fe(II) の安定供給を目的として、 Fe(II) 溶解度に対し過剰量の FeCl_2 を添加した。試験期間は 7 日間とし、溶解 Fe および Se 濃度を定めた。また、液相を除去した試料には同じ条件の溶液を新たに加え、再度 7 日間静置した。この操作を、合計 4 回繰り返した。溶解度試験はアルゴン雰囲気 ($\text{O}_2 < 1\text{ppm}$) のグローブボックス中で実施した。

得られた Se 溶解度の pH 依存性を、図 5.1-2 に示す (北村ほか, 2003a)。Se 溶解度が pH の増加に伴って増大しているが、全体的に既往の熱力学データにより予測される $\text{FeSe}_2(\text{cr})$ の溶解度よりも高いものとなった。これらの結果は、 FeSe_2 試薬の種類や処理の有無によらず同じ傾向であったほか、溶液を新しいものに入れ替えても同様であった。

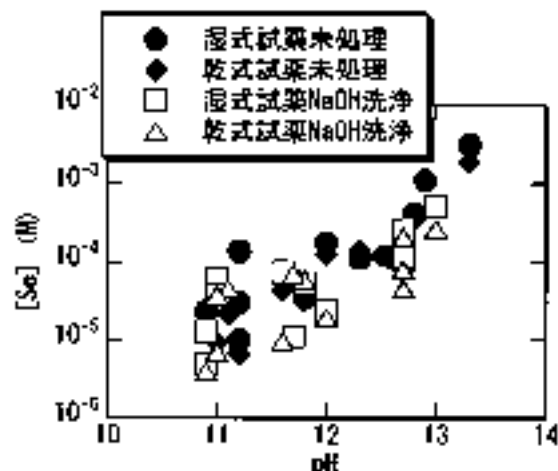


図 5.1-2 還元条件・アルカリ性水溶液中における Se 溶解度の pH 依存性

このようにして得られた結果を検討したところ、溶解度制限固相は $\text{FeSe}_2(\text{cr})$ ではなく $\text{Se}(\text{cr})$ であり、溶解化学種が SeO_3^{2-} であると仮定した際に、実

験結果が最もよく説明されることがわかった。このときの解析結果を、図 5.1-3 に示す。

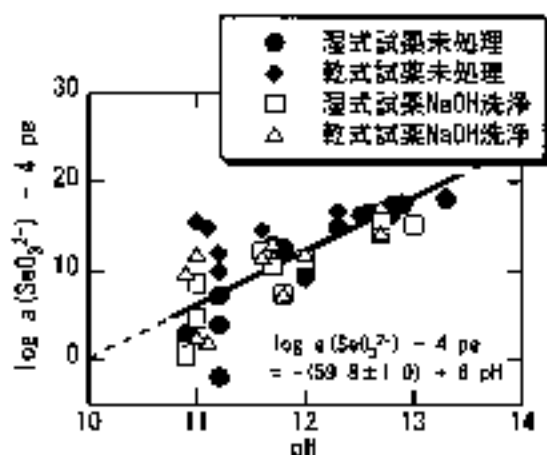
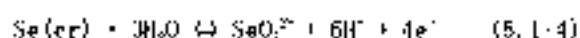


図 5.1-3 溶解度制限固相を $\text{Se}(\text{cr})$ 、溶存化学種を SeO_3^{2-} としたときの固液の平衡定数の決定のための最小二乗フィッティング

このとき、

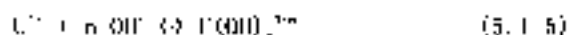


の平衡定数は $10^{59.8 \pm 1.0}$ と得られた。この値は、既存の熱力学データベースにおける採用値 ($10^{61.2}$) (Yui et al., 1999) に比べてやや高い結果となった (北村ほか, 2003b)。

本試験条件は、結果として $\text{Se}(\text{cr})$ による溶解度支配領域であったと推定されたが、このことから、地分環境条件での溶解度制限固相として期待される数-セレン化合物の溶解度データの取得と、熱力学データの信頼性確認の重要性が再認識された。

iii) ウラン(IV)の加水分解種の熱力学データ取得

アクチニド(IV)イオンの加水分解種の熱力学データ (加水分解定数: β_n) 取得を目的として、ウラン(IV)を用いた実験を行った。第 n 加水分解定数は次式で定義される。



本研究では、 β_1 、 β_2 、 β_3 を溶媒抽出法にて、 β_4 および β_5 を溶解度法にて決定した。溶媒抽出法では、テノイルトリフルオロアセトン (TTA) を用いて U(IV) を抽出する際、分配比の pH や TTA 濃度の依存性から見かけの加水分解定数を決定し、さら

にそのイオン強度依存性から外挿によりイオン強度ゼロの加水分解定数 (β_1^0 、 β_2^0 、 β_3^0) を決定した (Fujiwara et al., 2002; 森山, 2003)。また、溶解度法では、pH: 13~14 という高アルカリ性水溶液において U(IV) の溶解度を測定し、その pH 依存性から見かけの加水分解定数を、さらにそのイオン強度依存性からイオン強度ゼロの加水分解定数 (β_4^0 、 β_5^0) を決定した (森山, 2003)。いずれの値も、これまで文献による報告値が少なかったことから、その信頼性を高めることができたといえる。さらに、アクチニドイオンの加水分解定数および炭酸などの錯生成定数の系統性について、モデルによる解析とあわせた考察を継続している (Moriyama et al., 2002; 森山, 2003)。

v) 熱力学データベース利用環境の整備

溶液中の核種の溶解度や化学状態を求める方法の一つとして、地球化学計算コードを用いた計算が挙げられる。地球化学計算コードは、系のトータルマスバランスと反応に関する熱力学データを用いた連立方程式を解くことにより平衡状態における溶液中の化学状態を求めるプログラムである。利用頻度の高い地球化学計算コードは複数種類存在し、サイクル機構では PIRREEQ (Parkhurst et al., 1980)、PIRREEQ (Parkhurst, 1995)、EQ3/6 (Wolery, 1992) 及び Geochemist's Workbench (GWB) (Bethke, 1996) を主に用いている。これらの計算コードにはそれぞれ特徴的な計算機能があり、機能の一部が異なっていることから、対象の系に適した計算コードを選択する必要がある。また、これらの計算コードを利用するためには、熱力学データベースを格納した、独自のフォーマットのデータファイルを準備する必要がある。したがって、解析対象の系に最適な計算を行うには、任意の地球化学計算コードと熱力学データベースの組み合わせに対して計算が行える環境が必要である。平成 13 年度までに、異種コード間で熱力学データベースを共有できるシステムの基本構造の構築を行った。これは、熱力学データベースのフォーマットを変換するプログラムを作成し、このプログラムにより、上記の各種地球化学計算コードに対して読み込み可能な熱力学データベースを整備するというものである。平成 14 年度は、このデータベースフォーマット変換プログラムの変換機能についての高質確認を行いプログラムの整備が終了した (吉田・油井, 2003a)。また、このプログラムを用いて、

現在までに整備を進めてきた以下の熱力学データベースや個別元素の熱力学データについて、各種計算コード用データベースファイルを作成し、公開した(古田・油井, 2003b)。

- ・放射性元素の JNC 熱力学データベース(1999版)(Yui et al., 1999)
- ・第2次取りまとめの溶解度計算用熱力学データベース(Yui et al., 1999)
- ・第1次取りまとめにおける熱力学データベース(油井ほか, 1992)
- ・Sm 熱力学データベース(澁谷, 1996; 澁谷・油井, 1998)
- ・地球化学計算用 JNC 熱力学データベース(Arthur et al., 1999)
- ・OECD/NEA により整備された U, Am, Tc の熱力学データベース(Grenthe et al., 1992; Silva et al., 1995; Rard et al., 1999)

③ まとめ

アクチノイド(IV)の熱力学データについては、クオリティなどを利用したデータ取得を継続し、データの拡充を行うとともに、他の研究者による値とも比較検討することにより、その信頼性が向上してきているといえる。今後も、U(IV)、Np(IV)、Pu(IV)を用いて溶解、加水分解、錯生成に関する熱力学データの取得を継続するほか、モデルを用いた熱力学データの系統性から予測される推定値の信頼性向上に向けて、さらに検討を進めていく予定である。

セレンの熱力学データについては、本研究の結果から $Se(cr)$ の熱力学データの導出を行ったが、鉄-セレン系固相の熱力学データの信頼性向上には至らなかった。今後、さらに試験研究を継続する。その際、適切な酸化還元条件の設定や鉄とセレンの初期濃度の設定など、試験条件を十分に検討する必要がある。

熱力学データベースの整備としては、今後、上述のアクチノイド(IV)の熱力学データに関する情報の充足などを踏まえ、最新の知見に基づくデータの再評価と、データベース更新作業に着手する。また、活量補正に関するパラメータの整備を実施する。

参考文献

- Arthur, H.C., Sasamoto, H., Shibata, M., Yui, H. and Neyama, A. (1999): Development of Thermodynamic Databases for Geochemical Calculations, JNC Technical report, JNC TR8400 99-079.
- Bethke, C. (1996): Geochemical Reaction Modeling, Oxford Univ. Press, New York
- Fujimura, K., Yamana, H., Fujii, T. and Moriyama, H. (2002): Solubility Product of Uranium(IV) Hydroxide. J. Nucl. Sci. Technol., Suppl. 3, pp. 290-293.
- Grenthe, J., Fuger, J., Kontogeorgos, R. J. W., Lemire, R. J., Muller, A. B., Nguyen-Trung, C. and Wanner, H. (1992): The Chemical Thermodynamics of Uranium, OECD Nuclear Energy Agency, North-Holland, Amsterdam
- Kitamura, A. and Kohara, Y. (2002): Solubility of Np(IV) in Carbonate Media. J. Nucl. Sci. Technol., Suppl. 3, pp. 294-297
- 北村 暁, 小原春利(2002): アルカリ性水溶液中における Np(IV) の炭酸錯体生成. サイクル機構技術報, No. 37, JNC TR1340 2002-003, pp. 87-95
- 北村 暁, 柴田雅博, 北尾秀夫(2003a): 還元条件下における鉄セレン化合物の溶解度測定. サイクル機構技術資料, JNC TR8400 2003-004.
- 北村 暁, 柴田雅博, 北尾秀夫(2003b): 還元条件下における鉄セレン化合物の溶解度測定. 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, D6, p. 85f.
- Lemire, R. J., Fuger, J., Nitsche, H., Potter, P., Rand, M. H., Rydberg, J., Spahn, K., Sullivan, J. C., Ullman, M. J., Vitorge, P. and Wanner, H. (2001): Chemical Thermodynamics of Neptunium and Plutonium, OECD Nuclear Energy Agency, North-Holland, Amsterdam
- Mills, K. C. (1974): Thermodynamic Data for Inorganic Sulphides, Selenides and Tellurides, Butterworth, London.
- Moriyama, H., Fujimura, K. and Yamana, H. (2002): Systematics of Complexation Constants of Actinide Ions with Inorganic Ligands. J. Nucl. Sci. Technol., Suppl. 3, p. 246.
- 森山裕夫(2003): 超ウラン元素の加水分解及び錯生成に関する研究 II. サイクル機構技術資料(研究委託報告書; 京都大学), JNC TR8400 2002-054.
- 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 95-1227.
- Parkhurst, D.L., Thorstensen, D.C. and Plummer, L. H. (1980): PHREEQC - A Computer Program for Geochemical Calculations. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations 80-96.

- Hard, J. A., Rand, M. H., Anderog, G. and Wanner, H. (1999): Chemical Thermodynamics of Technetium. OECD Nuclear Energy Agency, North Holland, Amsterdam.
- 徳谷早苗(1996): 三価ランタニドの溶解度測定, 動燃技術 No. 97, INU TN8410 96-011, pp. 57-75.
- 徳谷早苗, 油井三和(1998): 核種移行挙動評価のための熱力学データベースの整備とその状況, 動燃技術 No. 105, INU TN1340 98-001, pp. 57-66.
- Silva, R. J., Bidoglio, G., Rand, M. H., Robouch, P. R., Wanner, H. and Puigdomenech, I. (1995): Chemical Thermodynamics of Americium. OECD Nuclear Energy Agency, North-Holland, Amsterdam.
- Koller, T. J. (1992). EQ3/6, A Software Package for Geochemical Modeling of Aqueous Systems: Package Overview and Installation Guide (version 7.0). Lawrence Livermore National Laboratory, UCHL-MA-110662PT3.
- 古田 暲, 油井三和(2003a). 熱力学データベースフォーマット変換プログラムの作成, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2002-024.
- 古田 暲, 油井三和(2003b). 地球化学計算コードで利用可能なJNC熱力学データベース, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-005.
- 油井三和, 牧野仁史, 古田 暲, 梅本博之, 石黒勝彦, 報力数史(1992): ガラス固化体からの元素の溶出挙動と人工バリア空堀水中の溶解度評価, 動燃事業所技術資料, INU TN8400 92-165.
- Yui, H., Azuma, J. and Shuuta, 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、バッチ収着試験や拡散試験から得られる実験値に基づき設定した。このために、網羅的なデータ調査を行い、バッチ収着試験データと国内の岩石に対する拡散データについてはデータベースとして整備した（渡谷ほか、1999；Sato, 1999）。ベントナイト中の拡散データについては関連データの整理を行ったものの、データベース化には至っていない。収着、拡散の既存データをデータベースとしてまとめることは、核種移行挙動の把握や安全評価における核種移行パラメータの妥当性評価の検閲に必須であることから、今後とも更新、整備作業を継続する。また、データベース整備の結果として、安全評価の観点からデータが不足している（主に海水系地下水条件）、あるいは信頼性の向上が求められる課題を抽出し、クオリティなどの施設において、データの拡充を行っていく。さらに、データベース整備・取扱を通じて得られた各種の実験方法の長所短所や、実験上留意すべき点などに関する知見を整理し、データ取得方法の標準化に資する基礎情報を整備する。

② これまでの成果

データの拡充あるいは信頼性向上の観点から必要と判断されたデータの取得を進めてきており、平成13年度は、ベントナイト材料に対する拡散実験を、Po (Sato and Miyamoto, 2001) および Sc (Sato and Miyamoto, 2002) について実施した。なお、「現象論的核種移行モデルの開発」(5.2.3項参照) で得られた試験データも、適宜データベースの整備に反映している。また、「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。

1) ベントナイト及び堆積岩に対する海水系地下水でのCsの収着に関する研究

「第2次取りまとめ」において、地質環境変遷ケースとして取り上げられている海水系地下水（海水を起源として、鉱物との平衡反応、有機物による遊離反応を考慮したモデル地下水(Yajima et al., 1999)）は、シフレンスケースである降水系

地下水に比べてイオン強度が高い（降水系地下水：約0.02M、海水系地下水：約0.6M）。イオン強度が高くなると、Csなどのイオン交換によって収着する元素については、競合イオンの増加により、収着分配係数(K_d)が低くなる傾向がある。そのため海水系地下水における K_d の評価値については、評価対象の環境条件と収着試験条件の差異について十分検討する必要がある。そこで、平成14年度は評価上重要な核種であるCsの海水系地下水におけるベントナイト及び堆積岩に対する K_d 取得を目的として実験を行った。

実験は、ベントナイト(クニゲルV)、標準試料として市販されている新第三紀の細粒砂岩(和歌山県白浜町産)および標準試料(JSI-1またはJSI-2)として選定されている泥岩(宮城県登米町産)に対してバッチ法で行った。液相として、「第2次取りまとめ」で設定した、海水系地下水および間隙水組成に基づき、 10^{-3} M以上の濃度を持つ5元素(Na, Ca, K, C, Cl)を用いて調整した模擬溶液(表5.1-2)を用いた。なお、還元剤として $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ を添加した。トレーサーとして放射性的Cs-137を用い、液固比は20ml/gとした。放射能測定を除くすべての実験は N_2 雰囲気グローブボックス中(酸素濃度<1ppm)、室温で行った。また、海水系地下水組成を単純化した溶液としてNaClを用い、NaCl濃度を0.02, 0.1および0.7Mと変化させた実験も行った。

表 5.1-2 海水系地下水を模擬した溶液の組成 (単位M)

	海水系模擬間隙水 (対ベントナイト)	海水系模擬地下水 (対砂岩・泥岩)
NaCl	5.6×10^{-1}	5.8×10^{-1}
CaCl ₂	1.4×10^{-2}	-
KCl	-	1.1×10^{-2}
NaHCO ₃	-	1.5×10^{-2}
Na ₂ S ₂ O ₄	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}
イオン強度/M	0.6	0.64

実験の結果、海水系地下水を模擬した溶液中でのベントナイト、砂岩および泥岩に対するCsの収着は14日間ではほぼ平衡に達していること、実験を行ったpH範囲(7.8~9.3)においては、 K_d はpHに対する依存性を示さないことが明らかとなった。また、 K_d の値は $10^1 \sim 10^3 \text{ ml}^2/\text{kg}$ であり、固相によって顕著な違いは現れなかった。海水系模擬地下

水での K_d と、ほぼ同じイオン強度で成分を単純化した 0.7M NaCl 溶液での K_d を比較すると、ベントナイトに対しては、ほぼ等しい値が得られているが、砂岩および泥岩では、海水系模擬地下水では NaCl 溶液より小さな K_d を示している(図 5.1-4)。この原因を明らかにするため、共存陽イオンの種類に着目することとし、同じイオン強度となる 0.7M KCl 溶液での試験を実施した。図 5.1-4 中に結果をあわせて示す。ベントナイトに対しては、共存イオンの種類によらず、ほぼ等しい値が得られたが、砂岩および泥岩に対しては KCl 溶液では、海水系模擬地下水の場合よりもさらに小さな K_d が得られている。すなわち、同じイオン強度の溶液であっても K_d は液中の K 濃度に強く依存すること示している。このことから、砂岩および泥岩中で Cs 吸着を支配している鉱物はベントナイト中のそれとは異なり、Cs の吸着サイトが K に対して高い選択性を持っている鉱物であると推定される。

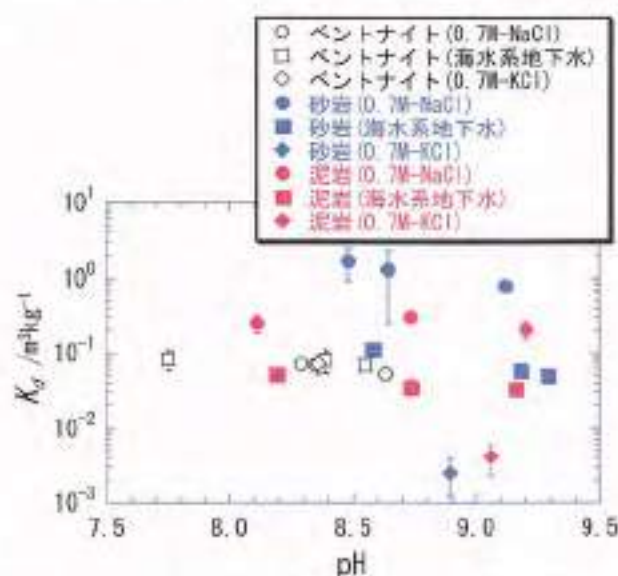


図 5.1-4 海水系地下水、NaCl および KCl 溶液での Cs の K_d の比較

図 5.1-5 には、 K_d の NaCl 濃度に対する依存性を示す。ベントナイトに対しては Na イオン濃度の増加と共に K_d が減少する傾向が観測されたが、砂岩および泥岩については Na イオン濃度に依存せず、ほぼ一定の値を示した。このことは、砂岩および泥岩中の Cs 吸着サイトは、Na に比べ Cs に対して高い選択性を有しており、Na 濃度の影響を受けにくいことによると考えられる。今後、岩石の鉱物組成を調べるとともに、鉱物のイオン交換選択性を考慮した現象解析を進める。

本試験結果から、地質媒体と水質条件が与えられた際の吸着特性の推定に、既存の吸着データベースを利用するにあたっては、イオン強度という尺度で環境条件を一般化し、溶液中のイオンの種類を単純化した溶液中のデータを直接的に用いることは適切ではない場合があり、溶液中のイオン種とその濃度、および岩石構成鉱物のイオンの選択性などに留意する必要があることが示された。

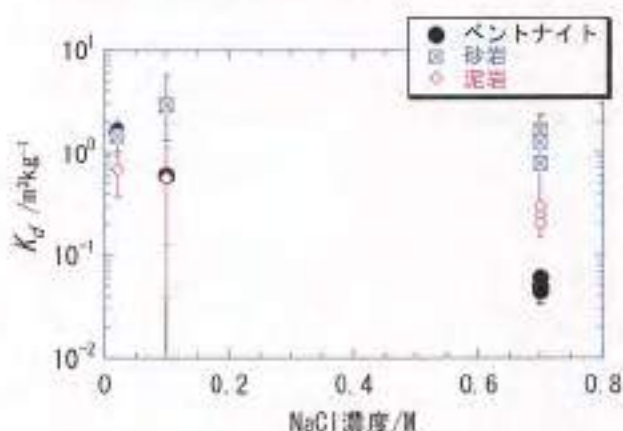


図 5.1-5 NaCl 濃度に対する Cs の K_d の変化

ii) 砂岩中のセシウム及びヨウ素の拡散移行に関する研究

「第 2 次取りまとめ」における天然バリア中での核種移行解析のための入力データの設定に際して、国内岩石を対象として、岩石マトリクスに対する拡散係数データベースを整備した (Sato, 1999)。その結果、堆積岩系岩石、特に砂質系岩石に対するデータがほとんど報告されていないことなどが明らかとなった。そこで、代表的な堆積岩の 1 つであり、物理化学的基礎データや知見の少ない砂岩の基本特性を測定し、次に代表的な陽イオンのセシウム (Cs) と陰イオンのヨウ素 (I) に対する見掛けの拡散係数 (D_a) に及ぼすイオン強度とトレーサー濃度の影響を調べた。また、得られた基本特性データと拡散濃度分布に基づいて、岩石中での遅延挙動を考察した (Sato and Muraoka, 2003; 佐藤, 2003)。

岩石試料は、吸着実験と同一の細粒砂岩を使用した。基本特性の測定では、ピクノメータによる真密度の測定、水中飽和法による間隙率、乾燥嵩密度及び真密度の測定、水銀圧入法による間隙率、乾燥嵩密度、真密度、細孔径分布及び細孔内比表面積の測定に加えて、X 線回折法 (XRD) による鉱物組成分析及び偏光顕微鏡によるモード分析、全岩分析、さらにはレーザー共焦点顕微鏡 (LCM) に

よる微細間隙構造の観察、飽和含水試料の水分自然蒸発特性の測定、過マンガン酸カリウムによる岩石の均一性を測定評価した。また、拡散実験は、In-diffusion法 (Eriksen et al., 1981) により、イオン強度 ($[NaCl]=0.01, 0.5M$) 及びトレーサー濃度 ($[Cs]=7.5 \times 10^{-5}, 1.5 \times 10^{-2}M$) をパラメータとして行った。

砂岩の間隙率は、平均 15.6%、平均細孔直径は 88.8nm であった。また、細孔内比表面積は、 $4.09m^2/g$ であった。さらに、岩石の均一性測定、モード分析、LCMによる微細間隙構造観察、水分自然蒸発曲線の測定結果を総合的に判断して、砂岩試料は、主要構成粒子径が $100\mu m$ 程度のほぼ均一な多孔質媒体と評価した。

砂岩中の Cs の D_a は、イオン強度の影響を余り受けないが、トレーサー濃度の増加に伴い上昇した (図 5.1-6)。また、溶液との接触面での岩石の単位体積当たりのトレーサー量と、接触している溶液中のトレーサー濃度との比から求められる収着容量 (α) もイオン強度の影響は小さかった。これらのパラメータの傾向は、 α と比例関係にある収着分配係数、および実効拡散係数 (D_e) がイオン強度に余り依存しないことを示唆している。

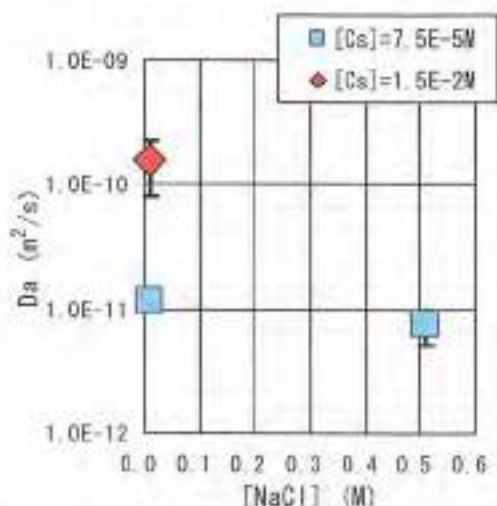


図 5.1-6 砂岩中の Cs の D_a のイオン強度およびトレーサー濃度依存性

なお、I については、分析結果から一部の I が酸化されて揮発していたことなどが推定されたため、再試験を実施している。

③ まとめ

パッチ法により海水系地下水および NaCl, KCl 溶液中における Cs の収着分配係数をベントナイト、

砂岩および泥岩に対して取得し、Cs の収着に及ぼす共存イオン濃度の影響に関する知見を得ることができた。また、砂岩に対するセシウムとヨウ素の見掛けの拡散係数をイオン強度及びトレーサー濃度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蓄積が図られた。

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、文献情報の調査によるデータの抽出と、データベースの更新作業などを実施していく。また、5.2.3 項で議論する現象論的核種移行モデルの開発の成果を考慮しつつ、具体的な地質環境に対する収着・拡散パラメータの設定や不確実性の議論への収着・拡散データベース利用方法について検討を進める。さらに、データ取得方法の標準化に資する基盤情報の整備と、日本原子力学会標準化委員会への情報の提供などを行っていく。

参考文献

- Eriksen, T., Jacobsson, A. and Pusch, R. (1981): Ion Diffusion through Highly Compacted Bentonite, SKB/KBS TR 81-16.
- Sato, H. (1999): Diffusivity Database (DDB) for Major Rocks: Database for the Second Progress Report, JNC Technical Report, JNC TN8400 99-065.
- 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, NUCEF 2001, JAERI Conf 2002-004, pp. 675-682.
- Sato, H. and Muraoka, T. (2003): Diffusion and Migration of Ions in Sedimentary Rock Matrix: Behaviour of Cesium and Iodide in Micropores of Sandstone, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. (in press)
- 佐藤治夫 (2003): 堆積岩系岩石マトリクス中のイオンの拡散移行過程に関する研究: 砂岩微細間隙中での Cs 及び I の拡散移行挙動と固液界面モデル, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2002-022.
- 渋谷朝紀, 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.
- Yui, M., Sasamoto, H. and Arthur, R.C. (1999): Groundwater Evolution Modeling for the 2nd Progress Performance Assessment (PA) Report, JNC Technical Report, JNC TN8400 99-030.

5.2 安全評価モデルの高度化

5.2.1 岩盤中水理・物質移行モデルの高度化

1) 結晶質岩中における亀裂ネットワークモデルの改良・高度化研究

① 課題と計画の概要

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）。「第2次取りまとめ」における天然バリア中核種移行解析においては、亀裂ネットワークを一次元チャンネルのネットワークで近似したモデルを用いた。チャンネルネットワークモデルへの変換には種々の仮定に基づく近似を行い、その近似の妥当性については様々な観点から検討した（澤田・坂本，2001）。

したがって、モデルの改良・高度化の観点から、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ことを目的として、一次元チャンネルを対象とした核種移行解析コード LTG を二次元平面から構成されるネットワークモデルへ拡張した LTG PLATE コードを開発したのでその成果について以下に述べる。

② これまでの成果

1) 核種移行解析コード LTG PLATE の開発

二次元半面内における核種移行支配方程式は次式で示される。

a) 亀裂内

$$d_t \left[R_0(t) \frac{\partial C_i}{\partial t} + q(t) \frac{\partial C_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (D_{ij}(t) \frac{\partial C_i}{\partial x_j}) + R_0(t) (R_0 C_0 - R_{01}(t) C_{01}) \right] + \sum_j \dot{M}_j(t) + \sum_j (C_0 - C_{01}) \dot{M}_j - \sum_{n=1}^{N_j} \dot{M}_n \frac{\partial C_n}{\partial x_n} \Big|_{x_n=0} = 0 \quad (5.2-1)$$

ここで、

- n : 核種 [-]
- i : 要素番号 [-]
- x_j : 二次元平面内における座標 ($i, j = x, y$) [L]
- im : 拡散領域番号 [-]
- $IM(t)$: 三角形要素に接する拡散領域の総数 [-]
- $q(t)$: 三角形要素内における流速ベクトルに直交

する断面積(単位幅幅当たり) = 亀裂開口幅 [L]

- $R_0(t)$: 遅延係数 [-]
- $q(t)$: 流速 [L/T]
- D_{ij} : 分散係数 [L²/T]
 $= \alpha_{ij} q |\delta_{ij} + (\alpha_{iz} - \alpha_{iz}) q_i q_j / |q| + D_{ij}^0$
 $|q| = (q_1^2 + q_2^2)^{0.5}$
- α_{iz} : 縦方向分散長 [L]
- α_{iy} : 横方向分散長 [L]
- δ_0 : クロネッカーデルタ
- D_{ij}^0 : 自由水中の拡散係数 [L²/T]
- λ_n : 崩壊定数 [1/T]
- \dot{M}_n : 核種ソース/シンク(単位幅あたり) [M/LT]
- Q : 流体ソース/シンク(単位幅あたり) [L³/LT = L²/T]
- $\delta(t-t^*), \delta(t-t^*)$: ダイラックデルタ [1/L]
- D_{im} : 拡散領域 im の実効拡散係数 [L²/T]
- θ_{im} : 拡散領域 im の空隙率 [-]
- C_{in} : 亀裂中の核種の濃度 [M/L³]
- C_{in}^0 : 流体ソースの核種濃度 [M/L³]
- C_{in}^{im} : 拡散領域 im の核種濃度 [M/L³]
- l^* : 核種ソース/シンクからの距離 [L]
- l : 流体ソース/シンクからの距離 [L]
- w : 亀裂面からの鉛直距離 [L]
- t : 時間 [T]

b) 拡散領域 im 中

$$d_t (im, t) \theta_{im}^{im} (im, t) \frac{\partial C_{in}^{im}}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial w} (D_{im} \theta_{im} (im, t)) \theta_{im} \frac{\partial C_{in}^{im}}{\partial w} + \theta_{im} (im, t) R_{in}^{im} (im, t) C_{in}^{im} - \theta_{im} (im, t) R_{in}^{im} (im, t) C_{in}^{im} = 0 \quad (5.2-2)$$

ここで、

- $\theta_{im}(im, t)$: 拡散領域 im の空隙率 [-]
- $R_{in}^{im}(im, t)$: 拡散領域 im の遅延係数 [-]
- C_{in}^{im} : 拡散領域 im の核種濃度 [M/L³]
- D_{im} : 拡散領域 im の実効拡散係数 [L²/T] = D_{ij}^0 / r
- r : 半径 [-]

c) 初期条件

$$C_{in}(i, 0) = 0 \quad (5.2-3)$$

$$C_{in}^{im}(i, 0) = 0$$

d) 境界条件

ディリクレ型

$$C_{in} = C_{in}^{im}(t) \quad (5.2-4)$$

コーシー型

$$A(t)q(t)C_n^s(t) = A(t) \left[q(t)C_n^s(t) - D_n(t) \frac{\partial C_n^s}{\partial t} \right] \quad (5.2-5)$$

ここで、 $C_n^s(t)$ は核種 n の濃度を示す。

拡散領域 im の最大深度 d における境界条件

$$\left. \frac{\partial C_n^s}{\partial w} \right|_{w=d} = 0 \quad (5.2-6)$$

(5.2-1)～(5.2-6)に示す亀裂内および拡散領域中の支配方程式および境界条件に対してラプラス変換有限要素法を適用することによりコード化を行った。

ii) LTG PLATE による解析

開発した LTG PLATE コードの検証ならびに均質二次元平面内における核種移行の検証を目的とした解析を実施した。LTG PLATE を用いた核種移行解析のフローを図5.2-1に示す。LTG PLATE では次式で示されるペクレ数 Pe を2より小さくなるように三角形要素の大きさを調整する必要がある。図5.2-1のようにMAFICによる流速ベクトル算定とEdMeshによる各要素の大きさ確認、再分割を行う必要がある。



図 5.2-1 LTG PLATE を用いた核種移行解析フロー

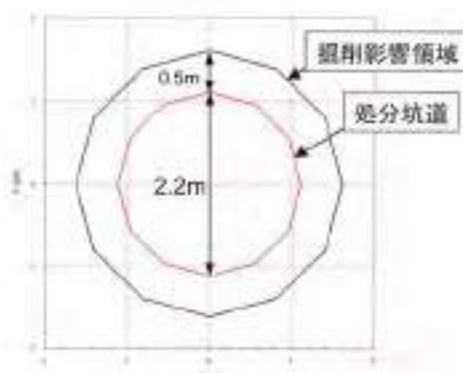
$$Pe = \frac{L}{\alpha_i} \quad (5.2-7)$$

ここで、 L は流速ベクトルに沿った方向の三角形要素の長さを示す。

本検討においては、「第2次取りまとめ」で実施した亀裂ネットワークモデルによる解析と同様のスケール、解析条件を用いた。図5.2-2に示す200m×200mの鉛直二次元断面を対象領域とし、均質な一枚の亀裂でモデル化して核種移行解析を行った。解析対象領域の中央に処分坑道（直径2.2m）を設定するとともに、坑道周辺には厚さ0.5mの掘削影響領域をモデル化した。亀裂の透水量係数は、「第2次取りまとめ」のレファレンスケースで採用された透水量係数分布の対数平均値とほぼ同様の値として $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ とし、掘削影響領域の透水量係数は亀裂部の10倍とした。外側境界条件としては図5.2-2の上下方向を不透水、左右方向に0.01の動水勾配を設定した。解析の対象核種は Cs-135



(a) 解析対象領域



(b) 処分坑道周辺モデル

図 5.2-2 核種移行解析対象領域

とした。表 5.2-1 に核種移行解析に用いたパラメータ値の一覧を示す。

表 5.2-1 核種移行解析に用いたパラメータ値

パラメータ	値
透水量係数	亀裂部 $\alpha \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 掘削影響領域 $=1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$
動水勾配	0.01
開口幅	$2 \times (\text{透水量係数})^{0.5}$
分散長	縦方向 $\alpha_L = 2 \text{ m}$ 横方向 $\alpha_T = 0, 2, 5, 10, 20 \text{ m}$
マトリクス拡散率と面積率	50 %
マトリクス拡散深さ	0.1
有効間隙率	2 %
乾燥密度	$2.64 \text{ Mg}/\text{m}^3$
実効拡散係数	$3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
分配係数	$0.05 \text{ m}^3/\text{kg}$

*：横方向分散長を変えたケース

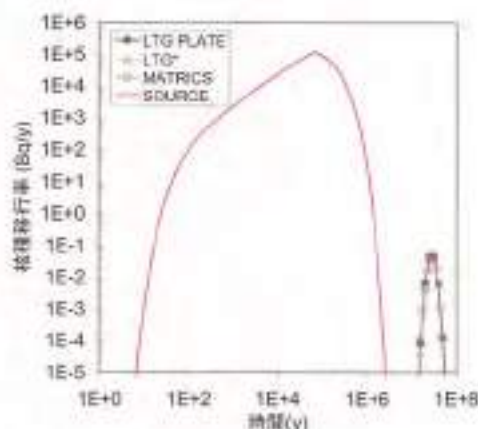


図 5.2-3 横方向分散無視ケースの解析結果
(*：チャンネルネットワーク版 LTG)

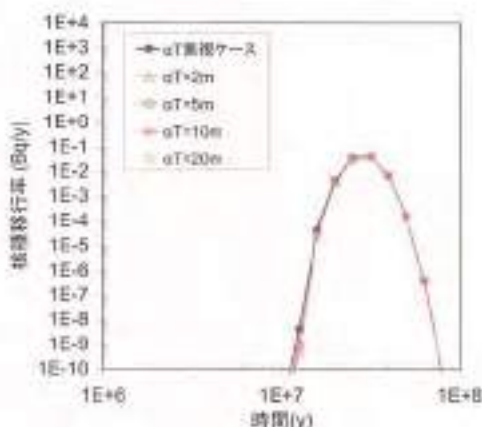


図 5.2-4 横方向分散長変化ケースの解析結果

なお、解析にあたっては、一次元均質モデル（例えば「第2次取りまとめ」で使用した MATRICS コードやチャンネルネットワーク版 LTG コード）との比較、および横方向分散長の違いの影響について検討した。

図 5.2-3 に横方向分散を無視したケース ($\alpha_T=0$) の解析結果を示す。同図には MATRICS、チャンネルネットワーク版 LTG の結果を合わせて示す。LTG PLATE の解析結果は、移行距離 100m の均質な一次元モデルと同じ結果となった。このことは、LTG PLATE は横方向分散を無視した場合には既存コードと同じ結果が得られ、プログラムが正しくコード化されていることを示す。

図 5.2-4 に横方向分散長を変化させたケースの核種移行解析結果を示す。図 5.2-5 には各ケースについて 2×10^7 年後の濃度分布を示す。これらの図から、横方向分散長の影響により核種は移行方向に対して横方向へ分散するが、下流側断面における核種移行率に影響を与えないことがわかる。この理由としては、①評価対象が下流側断面全体における核種移行率であるため、ならびに②主要な遅延効果であるマトリクス部における収着モデルとして瞬時、線形、可逆を仮定していることから核種ブルームの広がりやマトリクス拡散による収着遅延に影響を与えないため、の2点が考えられる。したがって、均質場を仮定した場合には横方向の分散は下流側断面の核種移行率に影響を与えず、「第2次取りまとめ」のレファレンスケースで採用した MATRICS コードのように一次元均質モデルで評価が可能である。

③ まとめ

亀裂ネットワークモデルの改良・高度化の一環として、核種移行解析コード LTG の二次元化を行い、そのコード検証ならびに横方向分散長の違いが核種移行解析結果に与える影響についての検討として均質場を仮定した解析を実施した。今後は、不均質な場における各パラメータ値が核種移行解析結果に与える影響や、亀裂のネットワーク構造が核種移行解析結果に与える影響などについて感度解析的に検討する予定である。

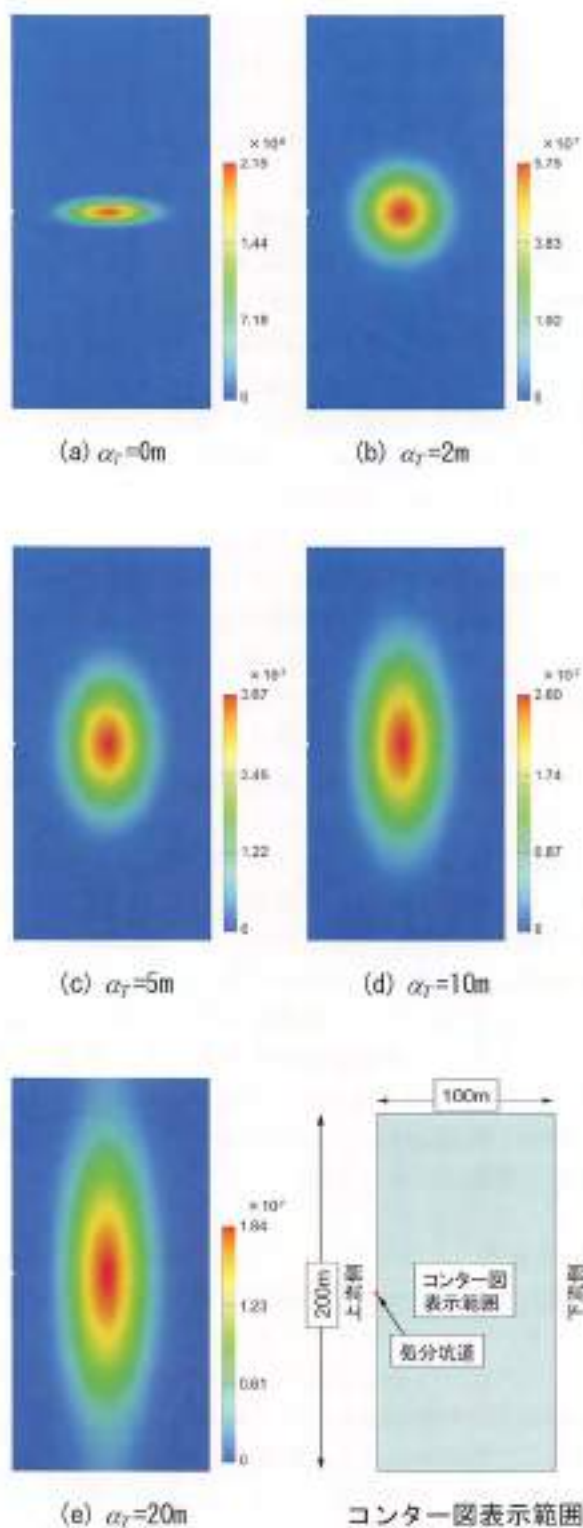


図 5.2-5 2×10^7 年後の横方向分散長 α_T を変化させたケースでの核種 (Cs-135) 濃度分布 (単位: mol/m^2 , 縦方向分散長 α_L は一定)

参考文献

澤田 淳, 板本和彦 (2001): チャンネルネットワークモデル近似に伴う不確定性の検討, 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」では、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。「第2次取りまとめ」以降の課題としては、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である。一般に実際のデータに基づいた地質環境モデル構築には、取得データの制限などによるモデルやパラメータ値の不確実性が発生することから、それらの不確実性をできるだけ定量的に評価する必要がある。

このような観点から、本研究では原位置試験データから求められる核種移行に関するパラメータ値の不確実性を定量化することを目的に、結晶質岩を対象とした核種移行モデルに逆解析手法を適用し、同定したパラメータの信頼区間を評価するプログラムを開発してきた（井尻ほか、2001）。なお、パラメータ値を求めるための最適モデルの定量的検討として情報基準（Akaiko, 1974）を採用している。平成13年度以降、これらのプログラムを用いて既存の原位置トレーサー試験データから、核種移行に関するパラメータ値の同定ならびに同定したパラメータの不確実性の評価を実施している。

② これまでの成果

上述のプログラムは、逆解析による移行パラメータ値同定およびパラメータ値の不確実性評価ができるプログラム（以下、逆解析プログラム）である。逆解析プログラムは、核種移行解析コードLTO（一次元平行平板核種移行モデル）に適用している。LTOでは、パラメータとして、移行経路長、移行経路長、流速、亀裂断面積（亀裂幅×開口幅）、縦方向分散長、拡散係数、屈曲率、有効空隙率、滞留辺長、マトリクス拡散長さ、亀裂表面への遅延係数、岩基质質中の遅延係数が入力可能である。逆解析では、同時刻におけるトレーサー試験によって得られた観測値とLTOで算出した計算値の残差二乗和が最小になるようにして各パラメータ値を同定する。

平成13年度までに、開発した逆解析プログラムの適用性確認のため、境界条件を正確に制御できる室内トレーサー試験結果を使用した検討を行った（吉野・澤田、2002）。また、スウェーデンSKBのÅspö Hard Rock Laboratoryで実施した、トレーサー注入による水理場の変化が生じないように注入流量を極めて小さくしたRadially Convergent式原位置トレーサー試験結果（Winberg et al., 2000）を使用した検討を行った（畑ほか、2002a, 2002b；細野ほか、2002）。その結果、上記トレーサー試験結果で逆解析プログラムにより各パラメータ値を同定でき、同定パラメータ値の不確実性を評価できることを確認した。

平成14年度はDipole式トレーサー試験結果に対する逆解析プログラムの適用性確認のため、スイスNAGRAのGrimsel Test Siteで実施したDipole式原位置トレーサー試験結果（Smith et al., 2001）を使用して検討を行った。Dipole式トレーサー試験はトレーサー注入量が大きく、トレーサー注入が試験結果に大きく影響する試験であり、Dipole比の違い、孔間距離の違い、トレーサー特性（収着特性）の違いが解析結果にどのような影響を与えるかについて検討した。ここでは、これらの検討の中の一例として、Dipole比の違いが解析結果に及ぼす影響について一次元の均質な移行経路での検討について記述する。同定パラメータは流速と縦方向分散長であり、その他のパラメータは文献等から推定した値を採用した。使用したデータの概要を表5.2-2に示す。

表 5.2-2 トレーサー試験データの概要

試験名	注入量 ml/min	排出量 ml/min	Dipole比	孔間距離 m
#62	48	148	3.1	1.7
#61	10	148	14.8	1.7
#47	51	150	2.9	4.9
#51	10	160	16.0	4.9

なお、#47と#51、#61と#62はそれぞれ同一の注入・排出孔を使用している。また、使用トレーサーは非収着性のUranineである。Dipole比と同定した流速値の関係を図5.2-6に示す。#62と#61の同定結果を比較すると注入量だけを5倍大きくすることで流速は約2倍になっている。一方、#47と#51の比較でも注入量だけを5倍すると流速が約2倍になっている。このことから、数メートルスケ

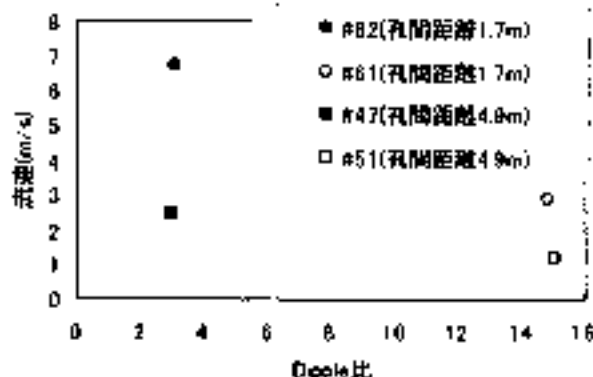


図 5.2-6 Dipole 比と流速の同定結果

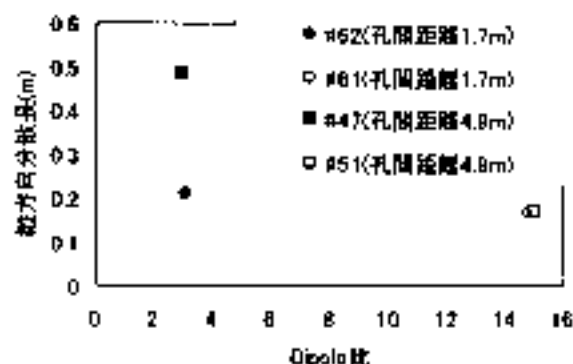


図 5.2-7 Dipole 比と縦方向分散長の同定結果

ールでは注入量の変化による流速の変化は孔間距離によらず同程度の割合であると推測できる。なお、ここで同定した流速の95%信頼区間は最大で同定値±0.03m/sであった。このことより、流速の同定精度は高いと考えられる。図 5.2-7 には Dipole 比と同定した縦方向分散長の関係を示す。Dipole 比が小さくなる（注入量が大きくなる）と孔間距離 4.9m では縦方向分散長が大きくなるが、孔間距離 1.7m ではほとんど変化していない。試験データ数が少ないため断定はできないが、数メートルスケールの試験結果から縦方向分散長を同定する際には孔間距離によって Dipole 比と同定値の関係が変化する可能性があると考えられる。また、同定値の95%信頼区間は最大で同定値±0.05m程度であった。このことより、縦方向分散長の同定精度は高いと考えられる。

③ まとめ

Dipole 式原位置トレーサー試験結果を使用して逆解析プログラムの適用性を確認し、同定値の不確かさを定量的に評価した。

このような手法により定量的に示された不確か

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. An Automatic Control, vol. AC-19, No. 6, pp. 716-723.
- 加 明仁, 細野賢一, 井尻裕二, 澤田 淳 (2002a): 原位置トレーサー試験の逆解析による不確か率評価 (その2) モデルの不確か率の評価, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演要録集, CS10-018, pp. 417-418.
- 加 明仁, 井尻裕二, 鈴木俊一, 大石雅也, 杉原 豊 (2002b): 原位置トレーサー試験の逆解析による核種移行と特性の不確か率評価, 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 TJ8440 2002-002.
- 細野賢一, 加 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か率評価 (その1) データの不確か率の評価, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演要録集, CS10-017, pp. 415-416.
- 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.
- Smith, P. A., Alexander, K. A., Beer, W., Fierz, T., Meter, P. M., Baeyens, H., Bradbury, M. H., Nazarek, M. and McKinley, L. G. (2001): The Nagra-JRC in situ study of safety relevant radionuclide retardation in fractured crystalline rock, 1: Radionuclide Migration Experiment-Overview 1990-1996, Nagra Technical Report 00-09.
- Kirberg, A., Andersson, P., Hermanson, J., Byegård, J., Coekovic, V. and Bergström, L. (2000): Final report of final stage of the tracer retention understanding experiments, SKB Technical Report, TR-00-07.
- 古野尚人, 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, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演要録集, CS10-027, pp. 435-436.

3) 岩盤中の水理・物質移行モデルの信頼性向上 研究

3-1) 単一亀裂／亀裂交差部室内試験(移流・分散)

① 課題と計画の概要

亀裂性岩盤を対象とした核種移行評価に関して、「第2次取りまとめ」の母岩に対するレファレンスケースでは、亀裂の透水量係数の不均質性に着目して均質一次元平行平板モデルを重ね合わせた手法を採用している。しかしながら、「第2次取りまとめ」以降の核種移行評価に関する課題として、上記評価手法の信頼性を高めていくことが重要である。実際の岩盤では、1)巨視的には岩盤中の移行経路として亀裂のネットワーク構造の不均質性が、2)微視的には個々の亀裂の亀裂表面形状、亀裂内充填物、他の亀裂との相互作用(亀裂の分岐や交差等に起因する亀裂内空隙構造の不均質性)が、地下水の流れや核種の移行現象に影響を与えることとなる。したがって、「第2次取りまとめ」で使用した核種移行解析モデルの妥当性や信頼性を示すためには、上記1)や2)が地下水の流れや核種の移行現象に与える影響を把握する必要がある。ここでは、上記2)の項目に着目して、単一亀裂および亀裂交差部を対象とした検討を行っている。

単一亀裂を対象とした検討では、単一亀裂内の開口端等の不均質性が核種移行評価にどのような影響を与えるかについて検討する必要がある。そのため、単一亀裂を対象とした室内透水・トレーサー試験を実施するとともに単一亀裂内空隙構造を評価する手法に関する知見を深め、流体・物質移動解析コードを開発し、亀裂内空隙構造の不均質性、亀裂面の表面形状、亀裂内充填物などが地下水の流れや物質移行現象に与える影響について検討している。一方、亀裂交差部を対象とした検討では、亀裂交差部に沿った方向の透水特性の把握を目的とした透水試験を実施し、亀裂交差部に沿った方向とその周辺の亀裂部との透水特性を比較検討している。

② これまでの成果

1) 単一亀裂を対象とした室内試験

平成13年度までの単一亀裂を対象とした室内試験では、50cmスケールの岩盤を対象とした亀裂性岩体水理試験設備(LABROCK)による透水・トレーサー試験を実施し、開口端分布が不均質で亀裂内

に充填物を含む試験体の平均的な水理学的開口幅と物質移行開口幅の関係、チャンネル構造(Neretnieks, 1983)の有無、亀裂面に作用する垂直応力と透水・物質移行現象の関係を例示的に示した(吉野・内田, 2001; 吉野・佐藤, 2002; 佐藤・吉野, 2002; 吉野ほか, 2003b)。また、せん断応力と透水・物質移行現象の関係についても検討し、せん断破壊の局所性や透水異方性との関係についても示した(江崎ほか, 2002)。

平成14年度は核種移行モデル信頼性向上のための研究として亀裂内空隙構造の不均質性に関する知見を深めるために、10cmスケールの単一亀裂を対象として亀裂開口幅評価技術に関する検討を行った(吉野ほか, 2003a, b)。また、微細かつ複雑な形状を持つ亀裂内空隙構造が亀裂内を流れる地下水に与える影響を検討するための解析手法として、セルオートマトン法(Neumann, 1958)による流体・物質移動解析コードを開発した。ここでは、平成14年度の主要な成果として、セルオートマトン法による流体・物質移動解析コードの開発と単一亀裂における流体解析への適用について記述する。

流体解析は一般にNavier-Stokesなどの微分方程式の形で記述された支配方程式を、有限要素法や差分法を用いて、離散化したマトリクス方程式を解くことによって行われる。しかし、微細かつ複雑な表面形状を持つ亀裂を対象とした流体・物質移動解析をする場合、ダルシー則などが成立しなくなることから有限要素法などにより数値的に厳密に解くことが困難となる場合がある。そこで、微細かつ複雑な表面形状を持つ亀裂内の流体粒子および溶質の挙動を計算することのできるセルオートマトン法により、単一亀裂内における流体・物質移動のモデル化を行った。セルオートマトン法は計算格子上に配置した流体粒子間で質量と運動量を保存する局所的な衝突を繰り返させることにより、マクロ的に複雑な現象を再現する手法であり、Navier-Stokesの支配方程式を解いた場合と同等な流れが再現できる(Wolfram, 1986)。また、物質移動解析についても流体解析と同様に解くことが可能である。セルオートマトン法には、格子ガスオートマトン法(Hardy et al., 1976)、格子ボルツマン法(Frisch et al., 1986; Wolfram 1986; MacNamara and Zanetti, 1988)、実数格子ガスオートマトン法(Malevanets, 1997; 田原ほか, 2000; 大橋ほか, 2001; 大谷ほか, 2002)がある。本解析コードの開発は、LABROCKの試験結

果を再現することを目的としており、50cm スケールの岩盤においてメッシュ間隔 1mm 程度の解析メッシュを比較的短時間で計算可能な解析手法として、最も計算負荷の小さい格子ガスオートマトン法を用いることとした。

格子ガスオートマトン法の流体解析では初期状態として等間隔格子の上に単位質量の粒子を配置し、粒子の移動、衝突、散乱のプロセスを繰り返すことによってミクロな粒子運動からマクロな流体挙動を再現する。粒子の移動・衝突・散乱に関する処理が整数演算に限られ計算効率が高い。しかし、計算結果は各粒子のベクトルの方向と大きさであるため、実際の物理量と比較する際には、それらを単位領域内で平均化する計算が必要である。また、三次元問題に適用する際には FCHC (Face Centered Hyper Cubic) モデル (d'Humieres, 1986) と呼ばれる四次元空間上の面心立方格子を三次元空間に射影した格子を用いる必要がある。なお、格子ガスオートマトン法では、圧力は亀裂単位面積あたりに衝突する粒子数の総和、流速はある領域にある粒子の運動量の総和が示す方向の大きさと与えられる。そのため、圧力と流速の大きさは物理量ではなく、モデル全体の中での相対的な大きさと表現される。流体解析では、圧力、流速は、最大値を 1、最小値を 0 として規格化した値で出力した。物質移動解析では通常の粒子を注入して平衡に達した後、トレーサー粒子の注入を開始した。トレーサー粒子と通常の粒子が衝突した場合、衝突はすべて通常の粒子が衝突した場合と同じ処理を行い、衝突後の粒子の中から衝突したトレーサー粒子数と同じ粒子数を乱数により選択して、衝突後のトレーサー粒子とし、単位体積あたりに存在するトレーサー粒子数をトレーサー濃度として出力した。なお、本解析コードは、理想的な平行平板を対象とした流体・物質移動解析により、その適用性について検討している。その結果、流体解析においては、ほぼ三乗則を再現でき、物質移動解析では、トレーサー試験でのブレイクスルーカーブを再現できることを確認している。

本研究において実際の亀裂として使用した試験体は 1 辺が 10cm の立方体の花崗岩であり、高さ方向のほぼ中央に人工割裂一面亀裂を有する。亀裂開口幅測定では、まず亀裂上部と亀裂下部を引き離し、三次元測定装置によりそれぞれの亀裂表面の高さを 1mm 間隔で計測した。その後、亀裂上下面を元の状態に重ね合わせて試験体全体の高さを

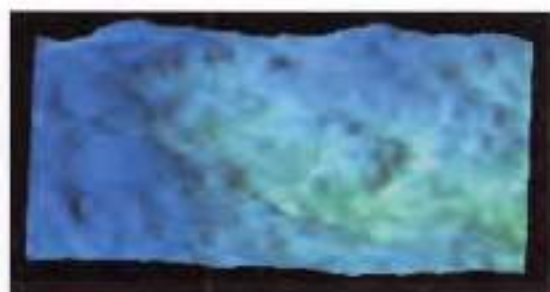


図 5.2-8 亀裂表面形状 (亀裂下面)

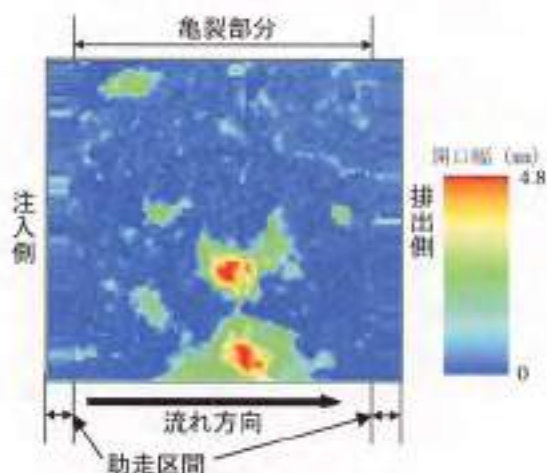


図 5.2-9 亀裂開口幅分布

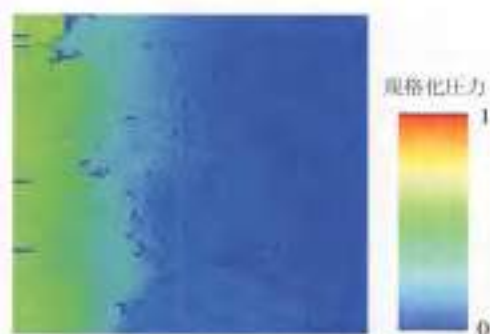


図 5.2-10 流体解析結果 (圧力分布)



図 5.2-11 流体解析結果 (流速分布)

計測し、亀裂全体の高さから亀裂上下部の高さを引くことで亀裂開口幅を算出した（吉野ほか、2003a, b）。図 5.2-8、図 5.2-9 には、それぞれ対象とした試験体の亀裂面の表面形状（亀裂下面）と亀裂開口幅分布を示す。解析に使用した亀裂開口幅は 0mm～4mm 程度に分布していた。FCHC モデルでは、メッシュ形状が立方体に限定され、高さ方向に解析上有意なメッシュ数を確保するために、解析メッシュは測定間隔 1mm の間を線形補間して 0.2mm とし、これを 1メッシュの長さとした。また、亀裂の注入・排出区間には注入・排出部の圧力値を得るために助走区間（注入・排出ともに 25メッシュ）を設けた。流体解析結果を図 5.2-10、図 5.2-11 に示す。圧力分布は注入側から排出側にかけて漸減しており、流速分布は亀裂開口幅分布の影響を受けて流速の不均質性を表現できていることがわかる。このことから、実際の亀裂を対象とした流体解析が可能であることがわかった。

ii) 亀裂交差部を対象とした室内試験

亀裂交差部を対象とした室内試験では、亀裂ネットワーク岩体水理物質移行試験設備（NETBLOCK）を使用して亀裂交差部に沿った方向とその周辺の透水特性の違いを把握することを目的とした室内試験を実施した（山田ほか、2001；鎌・澤田、2001）。本研究では、複数の亀裂が相互に交差している部分および一枚の亀裂から複数の亀裂へ分岐している部分の連続的なつながりという意味で亀裂交差部という用語を使用している。試験体としては図 5.2-12 に示すような縦 50cm、横 50cm、高さ 47cm のほぼ立方体で複数の亀裂を有し、亀裂が交差あるいは分岐している可能性のある花崗岩を使用した。なお、図は試験体を展開して示しており、4つの側面名として N、E、S、W 面を設定した。図中には主要な亀裂のトレース結果を示している。亀裂の観察結果より、試験体の主要な亀裂は 2 枚で構成されており、亀裂交差部は E 面及び S 面それぞれの亀裂分岐点を通る線であると推定した。試験体の亀裂がある側面は 6×6 に分割して注排水用のセルを設け、任意のセルを組み合わせて透水試験を行った。事前の予備透水試験でセル間の水頭差と単位時間流量の関係を調べたところ、制御可能な水頭差（約 1cm）以上では動水勾配と単位時間流量の関係が完全な比例関係にならず、試験体内の水の流れは乱流状態である可能性があり、透水量係数を過小評価する可能性があった。その

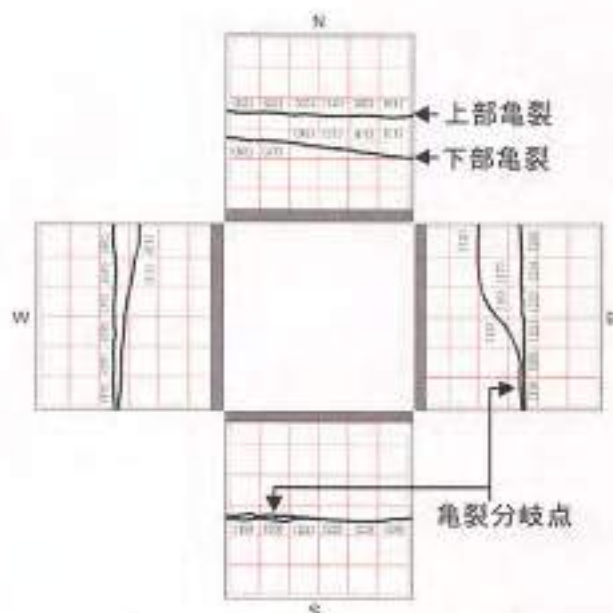


図 5.2-12 NETBLOCK 用試験体の概要

ため、水に重量比 0.2% 濃度のメチルセルロース系増粘剤（テルポリマー 30L）を添加した高粘性流体による透水試験を実施した。ここでは、透水特性として 5.2-8 式を用いて算出した水の粘性を考慮した場合の透水量係数 Tr (m^2/s) を使用した。

$$Tr = \frac{Q}{W \cdot \frac{\Delta h}{L}} \cdot \frac{\mu}{\mu_w} \quad (5.2-8)$$

ただし、 Q は単位時間流量 (m^3/s)、 W は亀裂幅 (m)、 Δh は水頭差 (m)、 L は測定間距離 (m)、 μ_w は水の粘性係数 ($Pa \cdot s$)、 μ は使用した高粘性流体の粘性係数 ($Pa \cdot s$) である。

透水試験は上部亀裂と下部亀裂それぞれに対して N-S 方向と E-W 方向で任意のセル間で行った。透水量係数を算出する際の測定間距離はセルの中心点間を結んだ直線とし、亀裂幅はセルの横方向の長さ 8cm を採用した。

透水量係数の概略的な値は表 5.2-3 に示すように、推定した亀裂交差部に沿った方向が最も大きく、亀裂交差部に沿った透水性がその周辺の亀裂部の透水性と比較して大きくなることが明らかとなった。

表 5. 2-3 透水試験結果 (NETBLOCK)

対象部	組み合わせたセル	透水係数 ($\times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$)
上部亀裂 N-S 方向	S24-E16, N19-S24, N15-S22, N18-W22	0.1~0.6
上部亀裂 E-W 方向	N16-E12, E12-W19	0.1~0.2
下部亀裂 N-S 方向	S24-E22, N19-E21, N16-S24, W21-S22	0.1~0.6
下部亀裂 E-W 方向	W22-E24, E24-W19, E21-W22, E20-W23, E19-W24, S22-W24	0.6~1.1
亀裂交差部	S21-E19	2.3~2.8

③ まとめ

単一亀裂を対象とした検討では、亀裂内空隙構造の不均質性と水理学的開口幅および物質移行開口幅の関係把握するために、10cm スケールの単一亀裂を対象とした亀裂開口幅計測技術に関する検討を行った。また、微細かつ複雑な形状をもつ亀裂内空隙構造が亀裂内を流れる地下水に与える影響を検討するための流体解析手法として、セルオートマトン法による流体解析コードを開発した。一方、亀裂交差部を対象とした検討では、亀裂交差部に沿った部分の透水性が他の亀裂部の透水性に比べて卓越しており、亀裂交差部は優先的な物質移行経路となり得ることが示された。

今後は、単一亀裂および亀裂交差部の検討で使用した試験体の詳細な亀裂開口幅測定をレジジン注入法により行い、単一亀裂の検討ではセルオートマトン法による流体・物質移動解析を実施し、亀裂交差部の検討では今回の試験結果の妥当性について確認する予定である。

これらの検討により、「第2次取りまとめ」で使用した保守的仮定に基づく核種移行モデルの妥当性等について、その信頼性向上を図っていく。

参考文献

d'Humières, D., Lallemand, P. and Frisch, U. (1986): Euro physics Letter, 2, pp.291-297.
 江崎信郎, 神野隆一, 三谷泰浩, 荷 守浩, 内田雅大, 吉野尚人 (2002): 岩盤不連続面の力学・透水メカニズムの基礎的研究 - 先行基礎工学分野に関する平成 13 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 TR8400 2002-006
 Frisch, U., Hasselbacher, B. and Pomeau, Y. (1986): Physical Review Letter, 56, pp.1505-1508.

Harcy, J., de Pazis, O. and Pomeau, Y. (1976): Physical Review A, 13, pp.1946-1961.
 MacKenzie, G. and Zanetti, G. (1988): Physical Review Letter, 61, pp.2332-2335.
 Melvoinen, A. (1997): Statistical mechanics of hydrodynamic lattice gases, Ph.D. thesis, University of Toronto.
 Neretnieks, I. (1983): A Note on Fracture Flow Mechanisms in the Ground, Water Resources Res., 19, pp.364-370.
 Neumann, J. (1968): The Computer and the Brain, New Haven, Yale Univ. Press.
 大崎弘志, 津 晃, 橋本康弘, 大谷 祐 (2001): 放射性廃棄物地層処分における天然バリア中の物質輸送予測 (2) 実数格子ガス法による不規則体系流れの解析, 日本原子力学会「2001 年秋の大会」予稿集, pp.987.
 大谷 祐, 津 晃, 大崎弘志 (2002): 地下水中のコロイド輸送モデルの開発, 日本原子力学会「2002 年春の大会」予稿集第 III 分冊, p.677.
 佐藤 久, 吉野尚人 (2002): 応力依存性を考慮した透水・トレーサー試験, 第 57 回土木学会年次学術講演会講演要集, CS10-021, pp.423-424.
 田原和彦, 堀 知則, 津 晃, 大崎弘志 (2000): 実数格子ガス法を用いた界面活性剤による構造形成の数値解析, 日本物理学会第 13 回計算力学講演会講演要集.
 藤 井一, 澤田 淳 (2001): 高粘性流体を用いた天然亀裂岩体の透水試験 - NETBLOCK 試験報告 -, サイクル機構技術資料, JNC TR8430 2001-006.
 Holzman, S. (1986): Theory and Applications of Cellular Automata, World Scientific.
 山田直之, 藤 井一, 澤田 淳 (2001): 実岩体を用いた透水試験 - NETBLOCK 試験報告 -, サイクル機構技術資料, JNC TR8430 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要集, 共通セッション, pp.42-43.
 吉野尚人, 佐藤 久 (2002): 亀裂状媒体水理試験設備 (LABROCK) による透水・トレーサー試験 - 2001 年度までの成果 -, サイクル機構技術資料, JNC TR8400 2002-001.
 吉野尚人, 澤田 淳, 佐藤 久 (2003a): 岩盤亀裂開口幅評価に関する検討, 土木学会第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム掲載論文集, pp.347-352.
 吉野尚人, 佐藤 久, 内田雅大 (2003b): 亀裂状媒体水理試験設備 (LABROCK) による天然亀裂内の透水・物質移行特性評価, サイクル機構技術資料, JNC TR8440 2002-004, pp.51-58.

3-2) 単一亀裂・モデル開発 (LBNL 共同研究)

① 課題と計画の概要

単一亀裂中の地下水の流れと物質移動については、わが国及び諸外国において数多くの研究実績がある。これらのほとんどの研究においては、単一亀裂を開口幅一定あるいは開口幅が空間的に変化するオープンスペースとして仮定することにより、亀裂内部の地下水流れと物質移動のモデル化が行われてきた。この場合、亀裂内のオープンスペースは岩体のマトリクス部と亀裂表面を介して直接接しており、マトリクス部は亀裂表面から供給される溶質に起因するマトリクス拡散や吸着等のプロセスが生じる場として亀裂中の物質移動における重要な役割を有している。「第2次取りまとめ」のレファレンスケースにおける母岩中の核種移行解析では、開口幅一定の一次元平行平板モデルを用いて、平行平板間のオープンスペースはすべて移流・分散に寄与し、平行平板亀裂上下面から健岩部への拡散はマトリクス拡散寄与面積率に依存すると仮定して、天然バリア性能の評価を行った。

しかしながら、Osawa et al. (1995)や Ota et al. (1998)が釜石鉱山に存在する亀裂を3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の内部は、鉱物等の充填物質が確認されており、オープンスペースは比較的小さい。また、亀裂周辺には変質帯が形成されることが多いことから、オープンスペース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。Bossart and Mazurek (1991)や Mazurek et al. (2001)はせん断亀裂の地質構造を調査することにより、せん断亀裂は数 cm オーダーの厚さを有しており、その内部にはガウジが部分的に充填しているサブ亀裂が存在すること、およびサブ亀裂がさらに小さい亀裂によって相互に連結することにより地下水が流れることを示した。

以上のことから、複雑な内部構造を有する天然の亀裂中の地下水流れと物質移動については、複雑な内部構造中で生じる種々のプロセスを考慮に入れてモデル化を行うことが必要であり、それらのプロセスのモデル化を通して各プロセスの影響評価を行うことは、安全評価モデルの構築や選定を行う上で重要な課題である。

本研究では、亀裂平面内の透水係数の変化や亀裂平面の厚さ方向の地質構造を考慮することによ

り複雑な内部構造を有する単一亀裂(破砕帯)中の地下水流れと物質移動をモデル化する手法について検討した。亀裂の厚さ方向についてはガウジが部分的に充填された微小亀裂、周辺の変質帯および健全なマトリクス部を考慮に入れてモデル化した。また、複雑な内部構造を有する亀裂中の地下水流れと物質移動を解析するためのツール、およびそれを用いて実施した原位置トレーサー試験を対象としたモデルキャリブレーションの解析例を示した。本報告は、亀裂性媒体中の物質移行モデル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(LBNL)との間で実施している共同研究の成果(Tsang and Karasaki, 2002)の一部である。

② これまでの成果

Mazurek et al. (2001)は、スウェーデン SKB のエスポ島地下研究施設サイトに存在する破砕帯を調査・観察することにより、破砕帯を図5.2-13に示すように概念モデル化した。

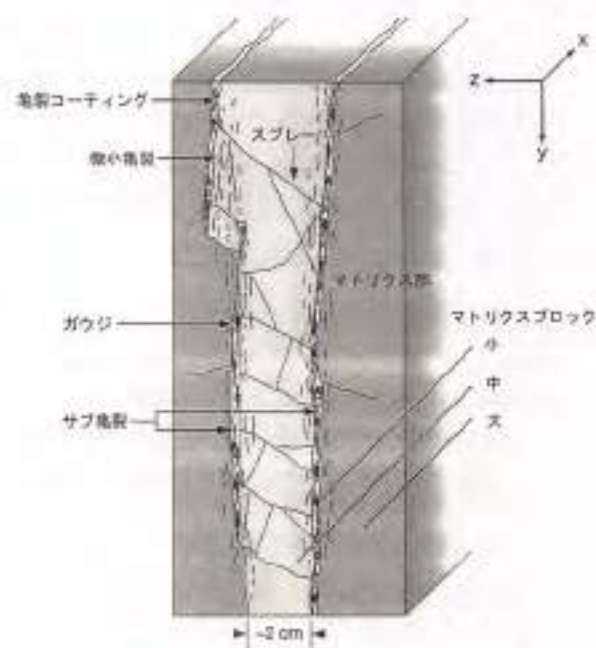


図5.2-13 破砕帯の内部構造の概念モデル
(Mazurek et al. (2001)より)

破砕帯内部にはいくつかのサブ亀裂が存在し、それぞれのサブ亀裂の内部は部分的にガウジで充填されている。また、サブ亀裂の片面はコーティングで覆われており、内側には微小亀裂が存在する。サブ亀裂どうしはスプレーと呼ばれる多くのより小さい亀裂により連結されている。

本研究では、スウェーデン SKB のエスポ島地下研究施設サイトに存在する破砕帯を対象として実施された原位置トレーサー試験をモデル解析で再現するために、図 5.2-13 で示した Mazurek et al. (2001)により提案された複雑な内部構造をもつ破砕帯の概念モデルに基づき、数学モデルの構築およびモデルキャリブレーションを実施した。

モデル構築にあたっては、まず、サブ亀裂の内部は不均質な透水量係数分布を有する二次元平面で表現できると仮定した。また、3番目の次元方向すなわち亀裂平面と垂直の方向については階段構造を仮定した。ここで、2つのサブ亀裂中を流れる流量の比を α とする。サブ亀裂周辺部分への拡散と収着については、小(サブ亀裂中のガウジ)、中(階段構造亀裂内のマトリクスブロック)、大(階段構造亀裂外側部の半無限マトリクス部)の3つの異なるサイズのマトリクスブロック中で生じることを考えた。

本研究における破砕帯中の地下水流れと物質移動の解析の手順を次に示す。

- 破砕帯面における透水量係数データに基づき、地質統計法による不均質場発生コード SISIM (Deutsch and Journé, 1998) を用いて不均質透水量係数場のリアライゼーションを発生させる。
- 発生させた透水量係数場を用いて流れ場を計算する。
- 2つのサブ亀裂を考慮した場合の、2つのサブ亀裂内の流量比 α を仮定する。
- 算出した流れ場に対して粒子追跡法コード THEM (Tsang and Tsang, 2000)を適用する。
- 粒子追跡法を流れ場へ適用することにより、各サブ亀裂内における粒子の滞留時間とトラベルタイムを算出する。
- 小、中、大の3つのサイズのマトリクスブロックを仮定し、マトリクス拡散と収着に関するパラメータを実測データに基づき割り当てる。
- THEM コードを用いた物質移行解析では、粒子追跡の各ステップにおいて、粒子は3つのサイズの異なるマトリクスブロックに事前に設定した重み付き確率で遭遇する。各ステップでは、これらのマトリクスブロックへの拡散や収着により生じた時間遅れを計算することにより、事前に算出した移流のみによる滞留時間を修正する。
- 時間の間数として個々の粒子の位置を破砕帯

内部で追跡し、破砕帯出口において流出粒子を加え合わせることで破過曲線を算出する。

エスポ島地下研究施設サイトに存在する破砕帯を対象とした一連の孔井試験により取得された透水量係数の傾度分布に基づき、地質統計法による不均質場発生コード SISIM を用いて不均質な透水量係数分布を発生させた。図 5.2-14 と図 5.2-15 はそれぞれ透水量係数の平均値を同じとし、標準偏差を変化させた場合の透水量係数分布と流線(図中の白線)を示している。

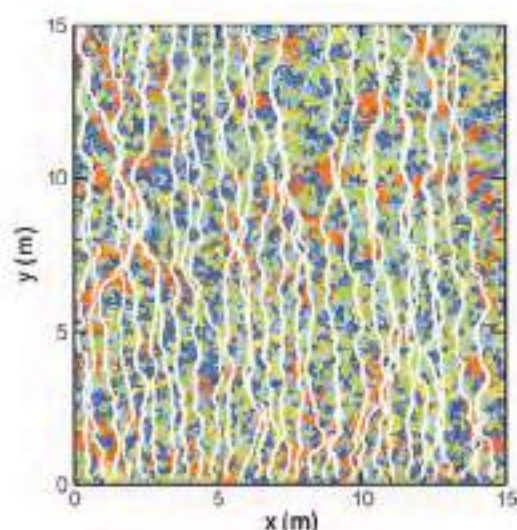


図 5.2-14 発生させた透水量係数分布と流線 (対数平均値: -7.5, 対数標準偏差: 0.58) (赤色は高透水性部、青色は低透水性部を示す)

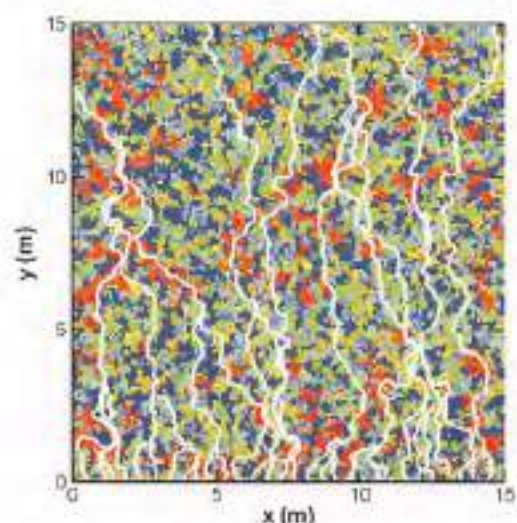


図 5.2-15 発生させた透水量係数分布と流線 (対数平均値: -7.5, 対数標準偏差: 1.38) (赤色は高透水性部、青色は低透水性部を示す)

図 5.2-14 中の不均質透水量係数場は対数平均値 -7.5, 対数標準偏差 0.58 を有し, 図 5.2-15 中の不均質性は対数平均値 -7.5, 対数標準偏差 1.38 を有している。モデル化領域の大きさは 15m x 15m の二次元領域である。図 5.2-14 と図 5.2-15 中には, 上下方向全体に一定の動水勾配が作用するように水頭値を与え, 左右境界部を不透水としたときの定常状態における流線の状態も併せて示している。流線形状からもわかるように操縦偏差が大きくなると流線形状は複雑になり, 流線の長さも増加する。

トレーサー試験結果を使用したモデルキャリブレーションでは, 初期モデルとして, 図 5.2-15 に示される不均質場を使用した。また, 汲敵と収着については, 小(サブ亀裂中のガウジ), 中(階段構造亀裂内のマトリクスブロック), 大(階段構造亀裂外側部の半無限マトリクス部)の 3 つの異なるサイズのマトリクスブロック中で生じることを想定しているが, それらの割合は小 10%, 中 30%, 大 60%とした。表 5.2-4 に原位値トレーサー試験を対象としたモデルキャリブレーションにおけるパラメータの初期値とキャリブレーション後のパラメータ値を示す。

表 5.2-4 モデルキャリブレーション前後のパラメータ値

パラメータ	初期値	キャリブレーションに使用したデータ	キャリブレーション後の値
透水量係数の平均値 (m^2/d)	3.50×10^{-6}	地下水位低下	1.50×10^{-7}
透水量係数場の標準偏差 (対数値)	0.58	HTO 透過曲線	1.38
亀裂中の空隙率 (%)	0.001	HTO 透過曲線	0.01
マトリクス塊のブロック割合 (小/中/大)	10/30/60	HTO 透過曲線	25/30/45
亀裂構造パラメータ α (%)	0.01	HTO 透過曲線	0.03
マトリクスブロックにおける K_d (l/kg)			
Sr	4.70×10^2	Sr 透過曲線	1.50×10^2
Co	9.0×10^2	Co 透過曲線	4.00×10^2
Tc	0.2	未抽出	1
Am	0.5	未抽出	2.5

トレーサー試験が実施された破砕帯には 5 本の孔が細割されており, 透水量係数が測定されている。これらの対数平均値は 7.5 ($T=3.50 \times 10^{-6} m^2/s$) であるが, 測定値をそのまま使用して解析を行うと測定値に比べて非常に大きな地下水位低下を生じる。このことからキャリブレーションを実施し, 透水量係数の平均値を 10 倍 ($T=3.50 \times 10^{-7} m^2/s$) に, 対数標準偏差を 1.38 に設定することに

より計算値と観測値の比較的良好な一致を得た。このため, 対数平均値 -6.5, 対数標準偏差 1.38 を有する不均質透水量係数場を以降で実施するトレーサー試験の解析に使用することとした。

表 5.2-4 中の亀裂中の空隙率とは複雑な亀裂破砕帯中の空隙スペースの割合のことである。本理モデルのキャリブレーションに対して良好な値を与える透水量係数 T の平均値 $3.50 \times 10^{-7} m^2/s$ を三乗則に代入することにより代表的亀裂開口幅を求め, 亀裂破砕帯の幅で割り戻すことにより亀裂中の空隙率 0.011 を求めた。

3 つのマトリクスブロックの構成割合に関しては, 中ブロック(階段構造亀裂内のマトリクスブロック)の割合を 30% で固定し, 小ブロック(サブ亀裂中のガウジ)の割合を変化させた。大ブロック(階段構造亀裂外側部の半無限マトリクス部)の割合は小ブロックの割合に依存して変化する。亀裂のガウジをモデル化した小ブロックが 25% のときに HTO 透過曲線の観測値に最も近づく。

亀裂構造パラメータ α を 0 から 1 まで変化させ, HTO 透過曲線の観測値と比較した。 α が増加するにつれてピークの到着が遅れ, ピーク値は若干減少することがわかった。 $\alpha=0.03$ のとき観測値と計算値は最も良好な一致を示した。

収着性トレーサーとしては, Sr, Co, Tc, Am がトレーサー試験に使用されている。Tc, Am については試験の時間範囲内において透過曲線は観測されなかった。そのため, キャリブレーションは透過曲線が観測された Sr と Co に対して実施した。その結果, Sr については良好に一致する分配係数値が見つけた。一方, En についてはピークの出現時間に一致する K_d 値を推定することはできなかったが, 全体的に良好な一致を与える K_d 値を推定することはできなかった。また, Tc と Am については, Co のピークの出現時間に一致する K_d の推定値と初期値の比を用いてそれぞれの核種の K_d 値に換算することにより, 予割解析のみを行った。

図 5.2-16 は, 非収着性トレーサー-HTO とし, 収着性トレーサー-Sr と Co のキャリブレーション結果, および収着性トレーサー-Tc と Am の予割結果を合わせて示している。図 5.2-16 中に示されるモデルキャリブレーション結果からわかるように, 非収着性トレーサー-HTO とし, および収着性が小さいトレーサー-Sr については観測値と計算値は良好な一致を示しておりキャリブレーションは成功していることがわかる。しかしながら, Sr よりも強い収着

性を有するCoについてはピークの到達時間までは合わせることができるが、ピーク位置、破過曲線の立ち上がり部およびテール部を全体的に一致させることは困難であり、キャリブレーションは成功しなかった。このことから、Coの場合には、線形・瞬時・可逆を仮定した収着モデルが成立せず、非線形的あるいは不可逆的な収着現象やコロイドの影響などを考慮する必要性が示唆された。

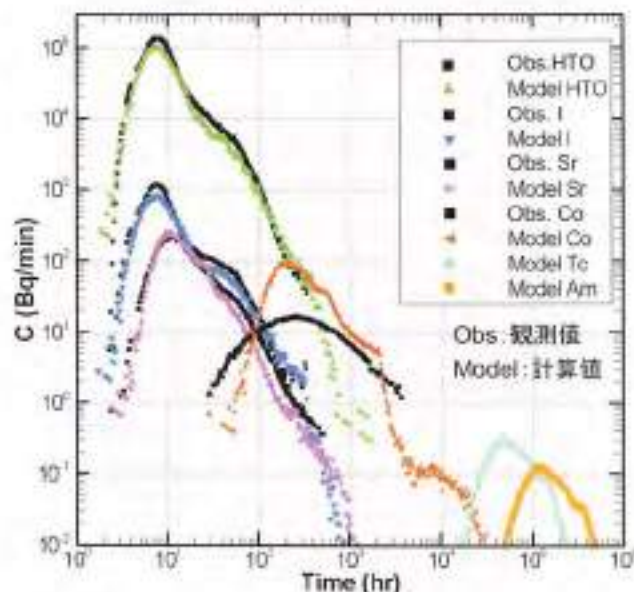


図 5.2-16 モデルキャリブレーションの結果

③ まとめ

本研究で検討したような複雑な内部構造を有する亀裂については、地質学的な観点から詳細に観察され概念的にモデル化された研究例はこれまでも見られたが、それらを物理的なプロセスと対応させて数学的にモデル化した研究例はあまり見られなかった。本研究では、破砕帯のような複雑な内部構造を有する亀裂中の地下水流れと物質移動を解析するための手法を提案し、原位置試験に適用できることを示した。具体的には、破砕帯の複雑な内部構造を移流が生じている 2 つのサブ亀裂、拡散が支配的な眼み域、サブ亀裂内部に充填されているガウジ、サブ亀裂周辺部の微小亀裂及び破砕帯周辺の健岩部に分類し、それぞれの領域でのプロセスをモデル化し、それらの影響を原位置試験に適用することにより評価した。その結果、非収着性および弱収着性のトレーサーの移行挙動については本研究で提案したモデルで現象を再現できることがわかった。しかしながら、収着性がある程度大きくなると再現性が低下することも確

認された。今後、収着性が大きいトレーサーに対しても移行挙動の再現性を向上させるための改良を行うとともに、改良した手法を多くの原位置試験サイトで実施されているトレーサー試験等に適用し、その信頼性の確認や機能改良を進めていく予定である。

参考文献

- Bossart, P. and Mazurek, M. (1991) : Grimsel Test Site - Structural Geology and Water Flow-Paths in the Migration Shear Zone, Nagra Technical Report, NTB91-12.
- Deutsch, C.V. and Journel, A.G. (1998) : GSLIB - Geostatistical Software Library and User's Guide, Oxford Univ. Press, New York, Second Edition.
- Mazurek, M., Bossart, P. and Hermanson, J. (2001) : Classification and Characterization of Water Conducting Features at Äspö, Proc. Intern. Seminar First True Stage, Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden, September 11-13, Stockholm, Sweden.
- 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 Kamiishi In-Situ Test Site, Japan -, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 353, pp.1267-1273.
- Ota, K., Amuro, K. and Ando, T. (1998) : In situ Nuclide Retardation in a Fractured Crystalline Rock, the Kamiishi In situ Test Site, in Proceedings of an International Workshop for the Kamiishi In Situ Experiments, Japan Nuclear Fuel Cycle Development Institute, August.
- Tsang, C.F. and Karasaki, K. (2002) : JNC-DOE Collaborative Program on Mass Transport : Characterization and Predictive Technologies, 2001-2002 Annual Report, JNC Technical Report, JNC TA8400 2002-001.
- Tsang, Y.W. and Tsang, C.F. (2000) : A Particle Tracking Method for Advective Transport in Fractures with Diffusion into Finite Matrix Blocks, Water Resources Research, 37(3), pp.831-835, LBNL-42634.

3-3) 亀裂を有する堆積軟岩の水理特性

① 課題と計画の概要

天然バリアである地層を構成する岩盤の水理特性や物質移行特性を地質環境調査データに基づき適切に評価し、評価した水理特性に応じて、モデルの構築・選定やパラメータ値の設定を行うことは地層処分システムの性能評価における重要な課題のひとつである。「第1次取りまとめ」においては、わが国の岩盤を亀裂内の流れが支配的な亀裂性岩盤と粒子間隙中の流れが支配的な多孔質岩盤に分類した。しかしながら、わが国の多くの岩盤は、亀裂内の流れが支配的となる可能性が確認されるとともに、新第三紀堆積岩においては粒子間隙以外にも亀裂中の流れも有意であることが観察されたことから（井尻ほか、1999a）、「第2次取りまとめ」においては、わが国の岩盤を亀裂性岩盤および、亀裂性岩盤と多孔質岩盤の特性をあわせ持つ岩盤の2つに分類した。

亀裂性岩盤と多孔質岩盤の特性を合わせ持つ岩盤については、亀裂中を流れる核種に対して亀裂ネットワークモデルを用いた核種移行解析を行い、岩石基質中を流れる核種に対して亀裂中の流れを無視した連続体モデルを用いた核種移行解析を行い、両者の解析結果を単純に重ね合わせるにより評価が実施された（井尻ほか、1999b）。しかしながら、亀裂性岩盤と多孔質岩盤の特性をあわせ持つ岩盤中に存在する核種は、本来、亀裂部と基質部双方の影響を受けながら移行すると考えられることから、上述した亀裂部と基質部の解析結果を単純に重ね合わせる方法がもつ信頼性を定量的に明らかにすることは重要である。そのためには、亀裂性岩盤と多孔質岩盤の特性をあわせ持つ実際の岩盤を用いた実証的研究を実施することにより現象理解に基づく数学モデルの構築が必要となる。

本研究は、亀裂性岩盤と多孔質岩盤の特性をあわせ持つ岩盤の代表として亀裂を有する堆積軟岩に着目し、その一般的な水理および物質移動に関する特性とメカニズムを文献調査や幌延地域の堆積岩を一例として実施する室内実験を通して理解するとともに、亀裂を有する堆積軟岩中の地下水流れおよび物質移動現象を記述するモデルを構築することを目的として平成14年度より実施している。平成14年度は、文献調査によるわが国の堆積軟岩の基本物性の収集・整理、堆積軟岩コア試料

を用いた室内透水試験とトレーサ試験、軟岩コア試料の分析およびモデル化に関する検討を行った（上茂ほか、2003）。室内試験や分析に使用したコア試料については、サイクル機構が幌延深地層研究計画の一環として幌延地域の堆積軟岩を対象として実施している地表からの調査において、平成14年度に掘削された試錐孔3本のうちの1本（HDB-4孔）から得られたボーリングコアから採取した。HDB-4孔については、掘削深度が約500mと深く、深部岩盤内の試料を採取可能なこと、新鮮なコアが採取可能なこと、続成作用の違いが深度方向に確認されており深度毎に特性が異なることが考えられることから、コア試料採取を行なう試錐孔として選定した。本報告では、平成14年度の研究成果のうち文献調査によるわが国の堆積軟岩の分類とコア試料を用いた透水試験について述べる。

② これまでの成果

1) 堆積軟岩の分類

堆積軟岩における亀裂の支配要因として、岩石強度が考えられるが、岩石強度は必ずしも測定されていない場合が多い。そこで、岩石強度と間隙率の関係の調査に加えて、岩石強度と相関性を有することが想定され、より広くわが国の堆積軟岩を比較可能な指標である弾性波速度 V_p と空隙率 n の関係についても検討を行った。

堆積軟岩に普遍的に観察される地質学的現象として続成作用が挙げられる。続成作用は堆積物が堆積後に化学的、物理的变化を受けて固結する過程で生じるものであり、その主要な作用として、圧密作用とセメンテーションが挙げられる。いずれの作用も、空隙の縮小あるいはセメント物質による充填を生じ、岩石の空隙率を減少させ、岩石の密度を増加させるとともに透水係数を減少させると考えられる。星野・井波（1975）は、大草および北九州地区の白堊紀～始新世の堆積岩について空隙率と岩石強度の関係を調べ、両者間に式(5.2-9)で示される強い相関があることを示した。

$$n = A_0 e^{-b\sigma} \quad (5.2-9)$$

ここに、 n ：空隙率、 σ ：岩石強度、 b ：強度定数、 A_0 ：定数、である。ここで、 b は n と σ を片対数グラフにプロットしたときの傾きであり、造構運動があまり激しくない条件の下で、地層や年代の異なる堆積岩が同程度の b をとること、すなわち、

圧密の最終段階においては、通常の堆積盆地環境下での一般的な b 値が存在する可能性を示唆している。また、石油の岩石物理学の分野においては、弾性波速度 V_p と間隙率 n の関係について、

$$n = A_1 e^{-cV_p} \quad (5.2-10)$$

が知られている。ここに、 c 、 A_1 は定数である。圧密やセメンテーションの進行により、同じ間隙率でも弾性波速度 V_p が増加すると考えられている。

本研究では、星野・井波 (1975) により示された天草および北西九州地区の白亜紀～始新世の堆積岩における一軸圧縮強度ならびに弾性波速度と間隙率の相関式(5.2-9)および(5.2-10)が、わが国のその他の地域の堆積岩についても成立するか否かを確認するために文献調査(星野・加藤, 2001; 佐藤ほか, 1999)を行ない、堆積軟岩に関する物性データを収集・整理することにより一軸圧縮強度と間隙率の関係(図5.2-17)およびP波速度と間隙率の関係(図5.2-18)についてまとめた。

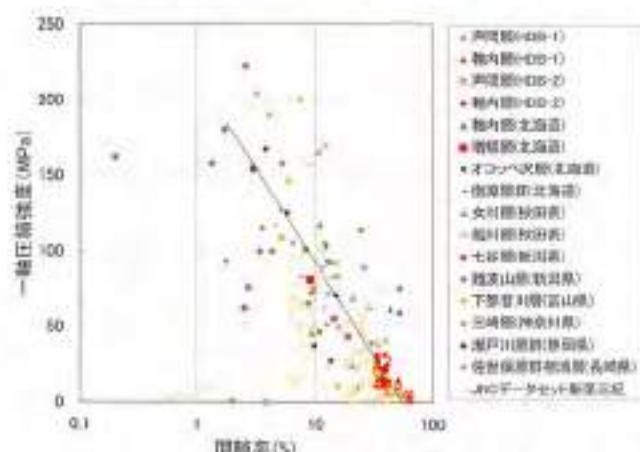


図 5.2-17 一軸圧縮強度と間隙率の関係

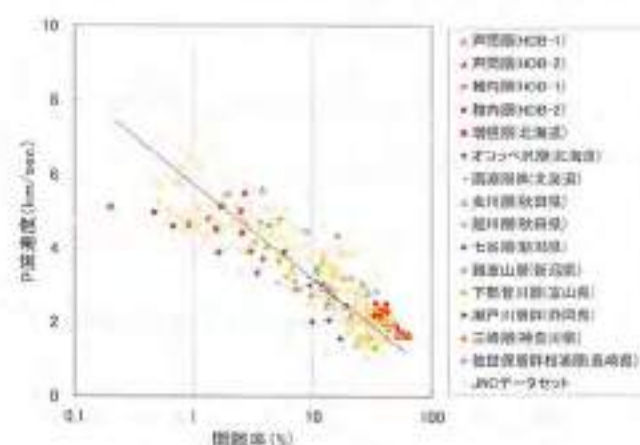


図 5.2-18 弾性波速度と間隙率の関係

図 5.2-17 と図 5.2-18 からわかるように一軸圧縮強度および弾性波速度それぞれと間隙率の関係において、一部のデータを除き、片対数グラフ上で概ね良好な相関性を示していることが確認できた。また、これらの図には、平成 13 年度に実施された横延深地層研究計画の試錐調査(山本ほか, 2002a; 山本ほか, 2002b)における試錐孔 HDB-1 および HDB-2 で取得されたデータもあわせてプロットしている。これらのデータについても他の地域の堆積軟岩に関するデータと比較して整合的であることがわかった。

ii) 堆積軟岩コア試料を用いた透水試験

横延地域で採取した堆積軟岩コア試料を用いた透水試験については、事前に実施した予備試験において、亀裂の有無によって試料の透水性に大きな相違があることがわかったため、亀裂の有無に応じて試験方法を変更した。亀裂のない試料については、透水係数が非常に小さいことが考えられるため、低透水性岩石の透水試験手法として実績のあるトランジェントパルス法を用いた。一方、亀裂を有する試料については、透水係数が比較的大きいことが考えられるため、通常の設定水位透水試験を実施した。

トランジェントパルス法

トランジェントパルス法による透水試験は、図 5.2-19 に示すように、一定封圧条件下にあるコア試料に対して上流側貯留層に瞬時に水压をパルス幅 H だけ作用させることにより、上流側および下流側の貯留層の圧力の時間変化を計測し、透水係数を求める方法である。

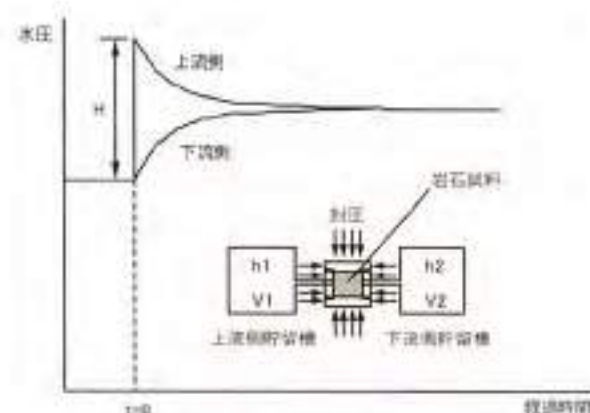


図 5.2-19 トランジェントパルス法の測定原理

透水係数の算定にあたっては、Brace et al. (1968)により提唱された直接近似法（ここでは、「Brace 法」という）と Hsieh et al. (1981)により誘導された上流側滞留層と下流側滞留層における圧力に関する微分式の差をとることにより解析誤差を生じにくくした方法（ここでは、「改良 Hsieh 法」という）（下茂ほか, 2003）を採用した。

定水位透水試験

定水位透水試験では、一定封圧条件下にあるコア試料に対して上流側から一定水圧を付加し、下流側で流量を測定し、定常状態の流量と水圧の差から透水係数を算出した。

表 5.2-5 と表 5.2-6 にそれぞれトランジェントパルス法と定水位透水試験による試験結果の一例を示す。表中の採取深度については正確な採取位置ではなく範囲で示してある。トランジェントパルス法には、これらの採取深度の範囲毎に亀裂を有しない部分から 1 試料ずつ合計 3 試料採取した。また定水位透水試験には、同一採取深度範囲内における単一亀裂を有する 2 つのコア試料を採取した。

試験結果をみると、トランジェントパルス法による透水試験結果については、Brace 法と改良 Hsieh 法で算出した透水係数がほぼ一致している。深度方向で透水係数に大きな変化はみられない。また、亀裂を有していない堆積岩の健岩部のコア試料は難透水性であることがわかる。

一方、定水位透水試験結果については、試験に亀裂を有する堆積岩のコア試料を使用したことから健岩部に比べて透水性が大きいことがわかる。また、同一深度範囲内のコア試料を使用していることから透水試験結果は 2 ケースとも同程度の値を示している。

表 5.2-5 トランジェントパルス法による透水試験結果

試料採取孔名	採取深度 [mbl]	透水係数 [m/s]	
		Brace 法	改良 Hsieh 法
HDB-4	195.0~195.7	4.83×10^{-12}	5.49×10^{-12}
	314.0~314.4	4.83×10^{-12}	4.88×10^{-12}
	441.5~442.0	1.69×10^{-12}	1.82×10^{-12}

表 5.2-6 定水位透水試験結果

試料採取孔名	採取深度 [mbl]	透水係数 [m/s]
HDB-4	195.0~195.7	1.87×10^{-9}
	195.0~195.7	8.88×10^{-9}

③ まとめ

平成 14 年度はわが国の堆積岩が一般的に有する水理特性と力学特性の関係を把握することを目的として、文献調査により堆積岩の物性データを収集、整理し、一軸圧縮強度および弾性波速度それぞれと空隙率の関係について調べた。その結果、天草地方の堆積岩について星野・井波 (1975) が示した相関式がわが国のそのほかの地域の堆積岩についても適用できることが確認できた。また、これらの相関式に対して幌延地域で取得されたデータも整合的であることが示された。幌延地域で採取したコア試料を用いた透水試験については、健岩部のみのコア試料と亀裂を有するコア試料で試験方法（トランジェントパルス法と定水位透水試験）を変えて行うことにより試料の特性に応じて適切に透水係数を算出することができた。

今後、幌延地域における地層の傾斜や深度の異なるコア試料を使用した透水試験やトレーサ試験を行い、データ集積に努めるとともに、亀裂を有する堆積岩中の地下水流れと物質移動を記述する評価モデルの確立をめざし、取得した試験データに基づきモデル化の検討を進める予定である。

参考文献

- Brace, R.F., Walsh, J.B. and Franigos, W.T. (1968) : Permeability of granite under high pressure, *Journal of Geophysical Research*, Vol.73, No.6, pp.2225-2236.
- Hsieh, P.A., Tracy, J.C., Neuzil, C.E., Brodeur, J.D. and Sullivan, S.E. (1981) : A Transient Laboratory Method for Determining the Hydraulic Properties of 'Tight' Rocks - I. Theory, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.19, pp.245-252.
- 井波 二, 澤田 均, 赤堀 邦晃 (1999a) : 我が国の岩盤の水理特性について, サイクル機構技術資料, JNC TN9400 99-010.
- 井波 二, 澤田 均, 坂本 和彦, 山崎 賢, Erik K. Hobbs, 中島 研介, 長坂 和佳, 野邊 潤 (1999b) : 多孔質岩盤を対象とした天然バリア中の核種移行解析, サイクル機構技術資料, JNC TN9400 99-092.
- 星野 一男, 井波 和男 (1975) : 天草及び北内九州におけ

- る岩石の圧縮物性とその石造地質学的意義, 石油技術協会誌, 40, pp. 236-245
- 北野一男, 丸藤 敏 (2001) : 本州産岩石の深部物性データ集, 地質調査総合センター速報 no. 23, 深部物性データ編集委員会, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 佐藤 敏, 谷口 航, 藤田朝雄, 長谷川次 (1999) : 文献調査によるわが国の岩石の物理的特性に関するデータの収集 (その 2), サイクル機構技術資料, JNC TN7400 99-011.
- 下茂道人, 山本 肇, 熊本 創 (2003) : 亀裂を有する採石中の流れと移行現象に関する研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 大成建設株式会社), (登録準備中)
- 山本卓也, 下茂道人, 藤原 翔, 服部弘道, 田所照夫, 岩間孝衛, 名合敦人, 熊本 創 (2002a) : 観望研究センターにおける試験調査 (H00-1 孔), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 大成建設株式会社), JNC TJ1400 2002-010.
- 山本卓也, 下茂道人, 藤原 翔, 服部弘道, 田所照夫, 岩間孝衛, 名合敦人, 熊本 創 (2002b) : 観望研究センターにおける試験調査 (H00-2 孔), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 大成建設株式会社), JNC TJ1400 2002-011.

5.2.2 地下水・間隙水水質形成モデルの高度化

① 課題と計画の概要

地下水に関しては、「第2次取りまとめ」において、既存地下水水質データの統計解析と地球化学的解釈に基づき地下水水質の分類を行うとともに、安全評価の観点から重要となる因子（pH、Eh、イオン濃度）について、それらを支配する地球化学プロセスを整理し、化学平衡に基づくモデルにより、安全評価に用いるべき一般化した地下水水質の設定を行った。今後は具体的な地質環境を対象にした地下水水質形成過程の理解とそれに基づく将来の変動の可能性に関する推定が重要な課題である。そこで、幌延深地層研究計画で得られた深部地下水データを一例に、「第2次取りまとめ」で用いられた地下水水質形成モデルの妥当性を検証する。また、人工バリアの設計や核種移行評価上重要となるパラメータ（pH、Eh など）の実測値の信頼性について地球化学モデルをもとに検討し、信頼性が低いと判断された場合、地球化学モデルをもとに実測値の補正を行う。なお、信頼性の高い実測地下水に対しては、地球化学反応や地下水流動にともなう混合といった現象を考慮した地下水水質形成モデルによる解釈も行い、このようなモデル化の試みを通じて、限られたボーリングにより得られた地質環境情報から、地下水水質の空間分布を推定する手法についての検討も実施する。

緩衝材中の間隙水水質に関しては、「第2次取りまとめ」においては、緩衝材構成鉱物の表面反応や溶解沈殿平衡反応を取り込んだモデル開発を行い、同モデルによる推定を行ったが、腐食生成物の取り扱いや、初期の不飽和条件を含む時間空間変化の取り扱い等について信頼性向上のための課題がある。また、圧縮ベントナイトの微細間隙構造内の水について、「第2次取りまとめ」では、保守的に通常の水溶液として取り扱っているが、緻密には、一部の水分子が構造化し、熱力学的性質も自由水とは異なるとされており、このような現象を取り込むことにより性能評価へどのような影響を与えるか把握しておくことも重要である。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

幌延深地層研究計画における試験調査(HDB-1, 2 孔：山本ほか、2002a, 2002b)で得られたデータを中心とし、既存のデータ（例えば、青山ほか、1991）も一部含め、「第2次取りまとめ」で用いられた地下水水質形成モデルの妥当性を検証するための予察的解析を行った（古田・油井、2003）。予察的解析では、地下水の pH や地下水中の Si 濃度等に影響を与える鉱物の安定線図を基に反応に寄りかかっていると考えられる鉱物を推定した。また、青山ほか（1991）で報じられた原位置および地表での pH 測定結果を基に炭酸分圧を算出し、HDB-1, 2 孔における pH 測定結果とあわせて、原位置地下水中の炭酸濃度を推定した。なお、酸化還元に敏感な元素である Fe や S を含むイオンの濃度については、地表での分析値は原位置での地下水濃度と異なると予想されるため、コアの顕微鏡観察や粉末 X 線回折結果を基に、これらの地下水中の濃度を支配していると考えられる鉱物を推定し、地球化学モデルにより原位置での地下水中の濃度を推定した。さらに、地下水の電気伝導度の値や水素・酸素同位体測定結果を基に、海水起源の地下水と降水起源の地下水の混合領域を推測した。

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、緩衝材中の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 40mm、直径 40mm）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、陽イオン交換サイトに吸着しているイオン濃度分析、pH 試験紙および含水パッドを挟みこみでの圧搾による間隙水の pH およびイオン濃度の測定を実施した。図 5.2-20 に、スライス試料の化学分析値から得られた、圧縮ベントナイト中のイ

オン分布の一例を示す。図の縦軸は、間隙水の中のイオン濃度に換算した値である。外側溶液を蒸留水とした試験では、溶液接触面に近い部分で、硫酸イオン濃度が低下する傾向が認められ、試料中の可溶性塩の散逸を暗示している。この結果は、硫酸イオンの実効拡散係数を $1.0 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ と仮定した地球化学-物質移行連成解析結果とほぼ一致した。一方、圧搾による間隙水の pH 測定結果では、セル外側の浸漬液と比較し、ベントナイト間隙水の pH が低いことが確認されたが、間隙水組成分析については、十分な分析精度を得るだけのパッドへの吸水が得られなかった。今後、ベントナイト中の元素分析、陽イオン交換サイトに吸着しているイオン濃度分析結果をまとめ、pH、間隙水水质データの解析などを行う予定である。

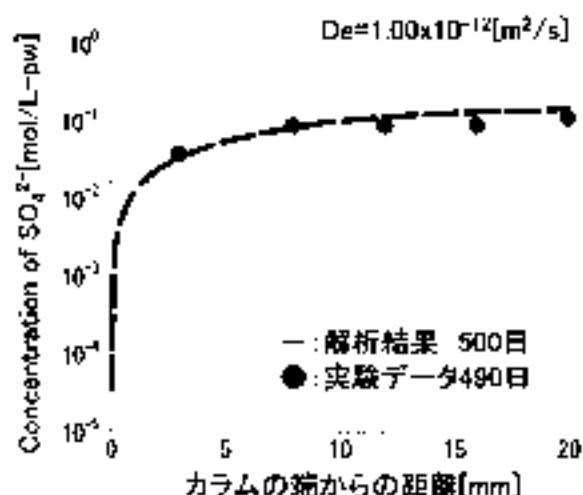


図 5.2-20 圧縮ベントナイト中の SO_4^{2-} 濃度の空間分布（外側溶液：蒸留水）

③ まとめ

地下水に関しては、幌延深地層研究計画におけるボーリング調査から得られた実測値をもとに、水质形成に寄与していると考えられる鉱物の推定や実測値の補正方法に関する予想的解析を行った。今後は、予想的解析結果を参考に、鉱物-水反応に基づく地下水水质形成モデルを構築し、「第2次取りまとめ」で用いられた地下水水质形成モデルの妥当性を検討する。

間隙水に関しては、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。

参考文献

- 青山成夫、石井 卓、堀江芳博、安達達男、井伊博行（1991）：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：清水建設株式会社）、JNC TJ1400 39-00。
- 山本卓也、下茂道人、藤原 研、服部弘道、田所照夫、岩間彦衛、名合敦人、熊本 創（2002）：幌延深地層研究センターにおける試験調査（HDB-1 孔）、サイクル機構技術資料（契約業務報告書：大成建設株式会社）、JNC TJ1400 2002-010。
- 山本卓也、下茂道人、藤原 研、服部弘道、田所照夫、岩間彦衛、名合敦人、熊本 創（2002）：幌延深地層研究センターにおける試験調査（HDB 2 孔）、サイクル機構技術資料（契約業務報告書：大成建設株式会社）、JNC TJ1400 2002-011。
- 吉田 泰、加井二和（2003）：幌延地域における地卜水水质形成モデル構築のための予想的検討、サイクル機構技術資料、JNC TN8400 2002-025。

5.2.3 現象論的核種移行モデルの開発

1) ガラスの長期溶解挙動及び核種の溶解現象に関する研究

① 課題と計画の概要

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実施している。

[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
- 表面変質層の形成・鉱物化現象と、浸出挙動へ与える影響の把握
- α 放射性核種含有ガラス固化体を用いた原位試験 (CORALIS プロジェクト) における核種移行解析の実施

[核種の溶解現象]

- 結晶化や共沈現象が核種溶解挙動に与える影響の把握

② これまでの成果

1) ガラスの長期溶解現象

平成 13 年度以前から、ガラス固化体からの元素の浸出拡散複合試験として、大気中、蒸留水系における長期試験を継続中である。また、平成 13 年度より、より処分場に近い環境を模擬した系での模擬ガラス変質試験として、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を開始した。

平成 14 年度は、九州大学との共同研究として、表面変質層の形成・鉱物化現象と、表面変質層が核種の浸出挙動に与える影響を、実験的、解析的に明らかにすることを目的とする試験を実施している。模擬ガラス固化体 (P0798 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 (福岡, 2003)。本試験結果から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。さらに、pH や Na 濃度をパラメータとした変質試験を実施するとともに、約 200 日間の変質試験を実施した。Na 濃度条件によってはガラス表面の変質層として Na ハイドライトの生成が確認された。また、 ^{137}Cs の浸出挙動に Na 濃度依存性があることが分かった。これらのことから、ガラス表面の変質層への ^{137}Cs の吸着がガラス

からの ^{137}Cs の浸出挙動に密接な関係があると推測される。

ii) 核種の溶解挙動

「第 2 次取りまとめ」において溶解度制限固相の重要性を示したが、固相は長期的には非晶質から結晶性固相へ変遷し、溶液中の核種濃度がより低減することが期待される。この固相変遷現象を明らかにするために、溶解度制限固相の変遷に関する研究を、米国 DOE (PNNL) との共同研究として進めている。平成 14 年度は、これまで実施してきた酸化還元条件に鋭敏でない $\text{ThO}_2(\text{am})$ から $\text{ThO}_2(\text{cr})$ への固相の変化の研究に引き続き、還元条件、高温での加圧条件 (90°C) で、酸化還元条件に鋭敏なウランの研究を行い、 $\text{UO}_2(\text{am})$ から $\text{UO}_2(\text{cr})$ への固相の変化と、それに伴う溶解度の変化を確認した (Rai et al., 2002)。その結果、図 5.2-21 に示す溶解度挙動とともに、固相の X 線回折から $\text{pH} < \sim 1.2$ で支配固相は $\text{UO}_2(\text{cr})$ 、 $\text{pH} > \sim 1.2$ で支配固相は $\text{UO}_2(\text{am})$ と同定された。また、液相の UV-Vis-NIR スペクトル分析から、水溶性ウランは 4 価であることを確認している。これまで実証し

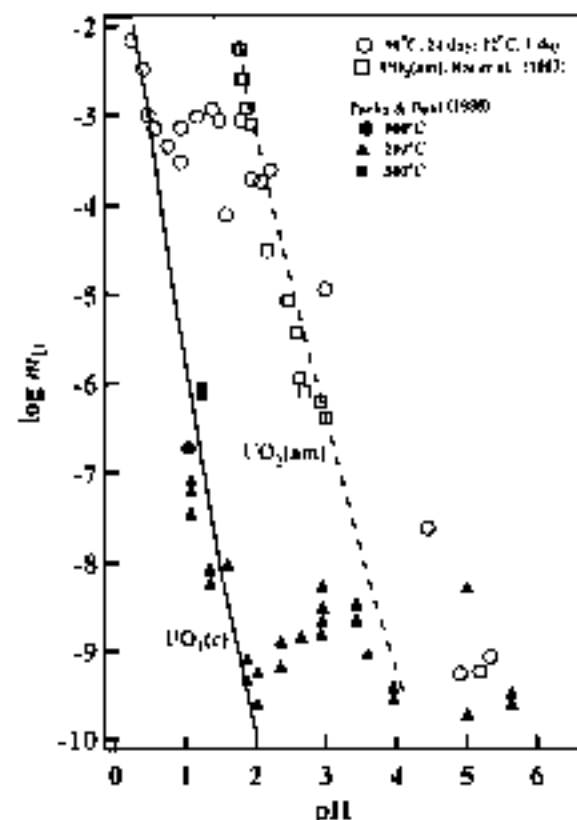


図 5.2-21 90°Cにおける $\text{UO}_2(\text{am})$ の溶解挙動

てきた ThO_2 の固相変遷に関する試験結果 (Rai et al., 2000) をあわせて考えると、同じ 4 価のアクチニド元素である UO_2 についても、より長期の試験では、より高い pH 条件においても $\text{UO}_2(\text{am})$ が $\text{UO}_2(\text{cr})$ に変化し、それに伴いウラン濃度も低下する可能性が示されたといえる。

さらに、東北大学との共同研究により、Fe, Ce 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を実施した (栢山ほか, 2002)。本研究では、Fe に関しては、非晶質水酸化鉄からゲーサイトへの変化、Ce については 3 価、4 価のセリウム沈殿生成とその熟成時の化学形の変化について検討を行った。特に Ce の場合は沈殿生成時の化学的環境 (pH, Eh, 温度) が結晶化に影響することが示されている。

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を参考にして、Ra-Ca- CO_3 系の共沈試験を行っている。

iii) α 放射性核種含有ガラス固化体を用いた原位置試験 (CORALUS プロジェクト)

ベルギーモルの HADES 地下研究施設において Np, Pu, Am, Cs を含む放射性ガラスとベントナイトを用いた系での原位置試験 (通称、CORALUS プロジェクト) (Van Iseghem et al., 1998) が実施されている (図 5.2-22)。



図 5.2-22 ブームクレイ (粘土層) 中における原位置テストチューブ

サイクル機構では、この国際プロジェクトに参加し、ガラス溶解及び核種移行挙動に関する解析を行っている。平成 14 年度は、試験系 (ガラスサンプル: $25\text{mm}\Phi \times 25\text{mm} \times 3\text{mm}$; ベントナイト厚み: $34 \sim 52.5\text{mm}$) での試験体取り出し前の事前解析を行った。ガラスの溶解挙動は、初期溶解速度に粘土中での溶存シリカ成分の収着、拡散を考慮

したモデルを採用した。これらの結果、1) ベントナイトへのシリカの収着やガラスの溶解速度は本実験系及び条件ではその影響が大きいこと、2) 埋設から 2.5 年経過した緩衝材の核種分布について、Cs は破過していること、アクチニド元素はガラス表面から 5-10mm 程度しか移動しないこと、またその濃度が非常に低いことなどが予測された。

③ まとめ

ガラスの溶解現象に関して、模擬ガラス固化体 (P0798 ガラス) の蒸留水やアルカリ性溶液による約 200 日間の変質試験を実施した。Na 濃度条件によっては Na-バイドライトの生成や、Cs の浸出挙動へ変化を及ぼすことが分かった。今後、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、鉱物化研究については、ガラス変質層における、変質層の形態 (morphology) に関するデータ取得を進める。

溶解度制限固相の変遷に関する研究として実施した、米国 DOE との共同研究を通じ、還元条件、高温での加速条件 (90°C) で、 $\text{UO}_2(\text{am})$ から $\text{UO}_2(\text{cr})$ への固相の変化と、それに伴いウラン濃度も低下する可能性が示された。東北大学との共同研究では、Fe, Ce 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を実施し、Ce の場合は沈殿生成時の化学的環境 (pH, Eh, 温度) が結晶化に影響することが分かった。

核種の共沈現象に関する研究では、今後さらに炭酸塩、硫酸塩やアクチニド間での水酸化物についてデータ取得を予定している。

CORALUS プロジェクトに参加し、ガラス溶解及び核種移行挙動に関する事前解析作業を行った。今後、試験系取り出し後の解析を行うための核種移行解析等必要なモデル化を実施する予定である。

参考文献

- 結垣八穂広 (2003): ガラス固化体の長期鉱物化に関する研究 (II), サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 九州大学), JNC TJ8400 2003-014.
- Parks, G. A. and Pohl, D. C. (1988): Hydrothermal solubility of Uraninite, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, pp. 863-871.
- Rai, D., Felmy, A. R., Sternor, S. W., Moore, B. A., Mason, M. J. and Novak, C. F. (1997): The solubility of Th(IV) and U(IV) hydrous oxides in concentrated

- NaCl and MgCl₂ solutions, *Radiochimica Acta*, 79, pp.239-247.
- Raf, D., Moore, D. A., Dakes, C. S. and Yui, M. (2000) :Thermodynamic model for the solubility of chlorium dioxide in the Na⁺-Cl⁻-OH-H₂O system at 23°C and 90°C, *Radiochimica Acta*, 68, pp 297-306.
- Kaf, D., Yui, M. and Moore, D. A. (2002) : Solubility and solubility product at 22 °C of UO₂(cr) precipitated from aqueous U(IV) solutions, *J. Solution Chemistry*, 32, pp.1-17.
- 初山 隆, 新堀雄一, 田中祐一, 守屋由介, 御井三和, 柴田雅博, 櫻 剛志(2002) : 固液-水相互作用の下での金属含水酸化物の沈殿・結晶化の速度機構, サイクル技術資料(共同研究報告書; 東北大学), JMC TY8400 2002-014.
- Van Iseghem, P., Yaluku, E. and Jackwer, N. (1998) : CORALUS: an integrated in situ corrosion test on α-active glass, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.606*, pp. 961-967.

2) 核種の吸着・拡散現象に関する研究

① 課題と計画の概要

人工バリアおよび天然バリアに対する放射性核種の吸着・遅延現象は安全評価に非常に重要であり、より現象理解を進め、さらに信頼性を高めることが重要である。固相への吸着の程度を示す指標として分配係数が用いられているが、分配係数は溶液の pH やイオン強度等に依存する値である。したがって、処分環境における分配係数の設定にあたっては、分配係数をより基本的な吸着反応に基づいて説明することが必要であるとともに、環境条件の変化が、分配係数に与える影響を予測可能とすることが重要な課題となっている。この課題への取り組みとして、評価上重要な元素に着目して、溶液条件を変化させた吸着試験を実施し、それにとりあう分配係数の変化を説明するモデルの構築を試みている。また、国際共同プロジェクトである OECD/NEA における吸着プロジェクトに参加し、性能評価の観点からの吸着モデル適用可能性などについての国際的な議論を行った。なお、これらのモデル化の試みは、比較的単純かつ可逆的な平衡反応を取り扱ったものであるが、実際の天然の環境では、固相表面での酸化還元反応に伴う吸着現象や非可逆な吸着など、現象理解を進めるべき課題がある。

さらに、処分環境における核種の遅延現象は、バッチ吸着試験で観察される吸着現象のみならず、物質の拡散挙動とあわせた現象理解と評価が重要である。特に、緩衝材のような微細空隙を有する媒体中の移行では、空隙構造やそでの溶質の存在状態などの理解が必要となる。また、拡散試験から導出される分配係数が、バッチ吸着試験で得られるそれと必ずしも一致しないことから、この原因の究明や相互補完の手法の確立も重要な課題となっている。これらの課題への取り組みとして、環境条件を適切に変化させた条件での拡散試験を実施することを通じて、拡散メカニズムを理解するとともに、分子シミュレーション等の手法を用いた補足的なモデルの検討を実施している。

② これまでの成果

1) 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吸着挙動

地層処分環境では、ウラン、ネプツニウム、プルトニウムなどはイオン状態で存在するとされている。

アクチノイド(IV)は、炭酸共存の中性～アルカリ性水溶液中では、ヒドロキソ炭酸錯体あるいは炭酸錯体を形成することから、これらの溶存化学種の変化が吸着に及ぼす影響を明らかにすることが求められている。本研究では、還元条件・炭酸共存下におけるネプツニウムの分配係数を求め、その全炭酸濃度依存性等から吸着挙動の考察を行っている。これまでは比較的全炭酸濃度の高い(0.09M 以上)条件での結果を公開してきている(Kitanura et al., 2002)が、これまでの結果の信頼性向上およびより広い全炭酸濃度への外挿を目的として新試験を実施した。

吸着試験は、窒素雰囲気中 ($O_2 < 1ppm$) で、バッチ法で行った。pH ($= -\log[H^+]$) は約 8、全炭酸濃度 (C_T) を 0.04 ~ 1.0M とし、NaCl 添加量を調整することで、全ての試験をイオン強度 1.0M の条件で行った。調整した水溶液に、精製したスメクタイトと $Np-237$ 溶液を導入した。初期ネプツニウム濃度は約 $10^{-10}M$ とした。還元剤としては 0.01M の亜硫酸ナトリウム ($Na_2S_2O_4$) を用いたが、比較のために $Na_2S_2O_4$ を添加しない非還元条件での試験も実施した。一定期間振とう後、水溶液中のネプツニウム濃度の定量を行い、分配係数 (K_d) を決定した。

得られた K_d の C_T 依存性結果の例を、図 5.2-23 に示す。これらはいずれも振とう期間が約 2 週間のおきの結果であるが、2 週間～3 か月の間では K_d の大きな変化は見られなかった。図 5.2-23 から、還元条件 ($E_h < -0.2V$) では低 C_T では K_d が大きく、 C_T の増加に伴って K_d が減少していく一方、非還元条件 ($E_h \sim 0.1V$) では K_d が C_T に依存せず低い値にとどまっていることがわかる。したがって、 $C_T < 0.5M$ においては、還元条件と非還元条件で K_d に有意な差のあることがわかる。

この結果から、最小二乗法により $Np(IV, V)$ の溶存化学種ごとの分配係数 (K_{di}) を決定した。試験で得られた K_d は、加減則を用いて次式で表される。

$$K_d = \sum_i K_{di} X_i \quad (5.2-11)$$

ここで、 X_i は化学種 i のモル分率を表す。 K_{di} の算出にあたり、溶液中の化学種分配は、各実験点の pH、 E_h 測定値および C_T と、OECD/NEA により提供された熱力学データベース (Lemire et al., 2001) により算出した。ただし、 $Np(IV)$ と $Np(V)$ の分配に関しては、試験条件において平衡に到達していない可能性を否定できなかったため、フィッティング

パラメータとした。最小二乗法によって得られた K_d を表 5.2-7 に、各実験点に対する計算値を図 5.2-23 中に示す。

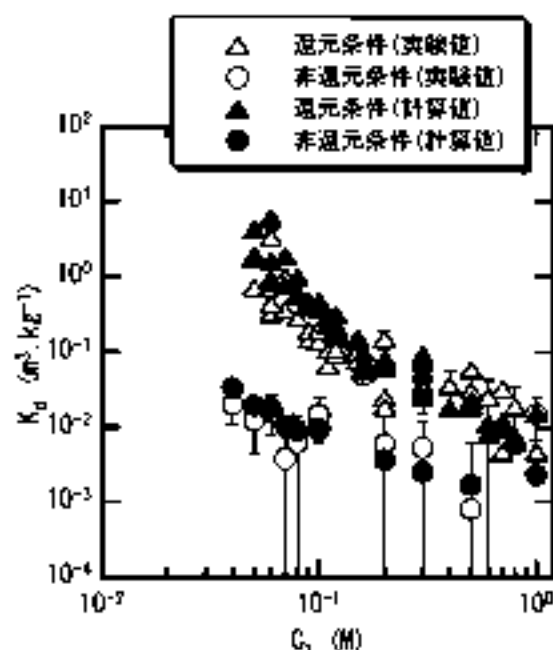


図 5.2-23 還元条件・炭酸共存下におけるスメクタイトに対するネプツニウムの分配係数の全炭酸濃度 (G_1) 依存性とその解析結果

表 5.2-7 最小二乗法によって得られた溶解化学種ごとの分配係数 (K_d)

化学種	$K_d (m^2 kg^{-1})$
NpO_2^+	6.74×10^{-1}
$NpO_2CO_3^-$	4.07×10^{-4}
$NpO_2(CO_3)_2^{2-}$	6.48×10^{-1}
$Np(OH)_4(aq)$	4.88×10^1
$Np(CO_3)_4^{4-}$	2.25×10^1
$Np(CO_3)_5^{5-}$	4.28×10^{-1}
$Np(CO_3)_2(OH)_2^{2-}$	1.91×10^{-1}

この表から、 $Np(OH)_4(aq)$ や NpO_2^+ の K_d が大きいことがわかる。また、 $K_d(NpO_2^+)$ の値は、既往の研究における類似の試験条件において $10^{-1} m^2 kg^{-1}$ オーダーの値が報告されており (Ages et al., 1981; Gargean, 1994)、本研究での導出結果と比較的近い値であることから、妥当な結果であると考えられる。

以上の結果から、溶解化学種ごとの分配係数を与えることにより、溶液条件の変化にともなう K_d の変化を適切に説明することができた (戸村・北

村, 2003)。

ii) OECD/NEA 収着プロジェクトへの参加による熱力学的収着モデルの性能評価への適用性検討

性能評価における分配係数設定を補完し、設定の信頼性を向上させることを目的として、収着現象を溶液中の化学種と固相表面の吸着サイトとの結合反応として、質量保存則に基づいて記述する熱力学的収着モデル (Thermodynamic sorption model (TSM)) の検討が世界的に行なわれている。OECD/NEA では、2000 年 9 月から、収着プロジェクトフェーズ 2 を実施しており、様々なモデル化手法の得失や、モデルの適用限界等を明らかにすることを目的として、バッチ収着試験データを設定問題として、モデル化のベンチマークが行なわれた。設定されたテストケースは 7 ケースで、人工バリアおよび天然バリアの両方を対象とし、粘土 (スメクタイト)、岩石 (風化片岩)、地質媒体中で収着に寄与すると考えられる代表的な鉱物 (ゲーサイト、石英 等)、および土壌が選ばれた。これらの中からモデリングチームが任意にテストケースを選択してモデル化に取り組んだ。モデリングチームは 11 カ国 21 チームで、サイクル機構もモデリングチームとして参加し、3 つのテストケースについてモデル化を実施した (神徳ほか, 2003)。

サイクル機構におけるモデル化作業では、単純なモデルの適用限界を調べる観点から、いずれのモデル化においても表面-OH サイトを 1 種類とする Diffuse Layer Model でのモデル化を行った。その結果、モデル化作業を通じて、吸着等温線をより良く説明するためには、必要に応じて複数サイトの設定が必要なことや、精製されたスメクタイトの表面-OH サイトへのイオン吸着のイオン強度依存性を適切に表すためには、表面錯体モデルにおける静電項を与えないモデルの方が好ましいことなどの知見を得た。なお、プロジェクトとしての報告書は 2003 年中に OECD/NEA より発行される予定である。

iii) 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

$Ac(III)$ など酸化還元に敏感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敏感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。そこで、サイクル機構では東京大学と共同で、固液界面の酸化還元反応メカニズムを明らかにしていくことを目的とした研究を進めてきた。研究開始時はクロムを用いた予備的な試験を実施していた(中田ほか, 2001)が、平成 13~14 年度はネプツニウムを用いた試験を実施した。

試験はバッチ法を用いて、酸素雰囲気中で行った。2 価鉄含有鉱物であるマグネタイト(Fe_3O_4) 0.3~1.0g と Np(V) (Np-237) を含む 0.1M NaCl 水溶液 15~20ml を混合して pH を 7~8 に調整し、一定期間振とうしながら水溶液中の Np 濃度の定量化を行った。この際、温度による反応速度変化を調べるために、室温(25℃)と 45℃において試験を実施した。比較のために、 FeCl_2 試薬により Fe^{2+} 濃度を $3 \times 10^{-4}\text{M}$ に調整した 0.1M NaCl 水溶液中に Np(V) を添加する同様の試験を行い、酸化還元挙動の差異を調べた。

試験結果の一例を、図 5.2-24 に示す。溶存 Np 濃度が経過時間とともに減少していくが、 Np 濃度の減少は、25℃より 45℃の方が速く、また、液固比の小さい(すなわち、相対的に固相が多い)方が速い傾向が認められた。

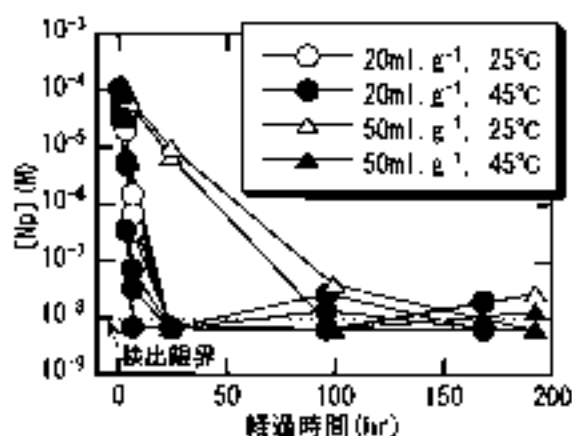


図 5.2-24 マグネタイトに対する Np(V) の反応試験における溶存 Np 濃度の時間変化

本試験条件では、 Np(V) が還元されて Np(IV) になると、 $\text{NpO}_2(\text{am})$ の溶解度が低い (10^{-10}M 以下) ことから溶存 Np 濃度が低下する。本研究ではマグネタイトに収着した Np(IV/V) と $\text{NpO}_2(\text{am})$ として沈殿したものを区別することはできないが、一般に Np(V) の収着はそれほど大きくないこと、反応が液固比の低い(すなわち固相が多い)試料ほど早く進ん

でいることから、マグネタイト表面での Np(IV) の沈殿あるいは還元された Np(IV) の収着が生じたものと考えられる。

今後は、以上の結果をもとに、マグネタイトに対するネプツニウムの酸化還元反応の速度定数を求めるとともに、量子化学計算を併用しながらその反応メカニズムについて考察を進めていく予定である。

iv) 圧縮ベントナイト中の陰イオンの拡散挙動に及ぼすケイ砂混合率及び間隙水中塩濃度の影響

地層処分安全評価において、ベントナイト中の放射性核種の実効拡散係数 (D_e) 及び見かけの拡散係数 (D_a) は、その移行挙動を把握する上で重要なパラメータである。 D_e 及び D_a は間隙水中の塩濃度に影響されることが考えられ、その影響を定量的に把握することが必要となる。また、緩衝材仕様の決定や緩衝材中の微視的移行経路の考察のためには、ケイ砂混合率が及ぼす影響を評価しておくことも重要である。そのためケイ砂混合率及び塩濃度をパラメータとした、陰イオンの透過拡散試験を行い、 D_e 及び D_a を取得するとともに、拡散挙動に及ぼすケイ砂混合率及び塩濃度の影響を評価した。

セレンをはじめとして、安全評価上重要な元素のいくつかは想定される処分環境条件下で陰イオンの形態を取る。アクチニド元素も炭酸錯体やヒドロキソ炭酸錯体として陰イオンとして存在することを考慮すると、陰イオンの移行挙動を理解することは重要である。しかしながら、セレンなどの評価対象元素は酸化還元の影響を受けるなど実験的な困難さを伴うことから、本試験では、TRU 廃棄物処分の安全評価への適用をも考え、取扱が比較的容易で、TRU 廃棄物処分の評価における重要元素である、炭素(C)、塩素(Cl)、ヨウ素(I) (それぞれ、 CO_3^{2-} , Cl^- , I^-) を用いることとした。また、塩濃度の調整は NaNO_3 で行い、処分場でのセメント系材料の利用も考慮し、高 pH 条件下における試験を実施した(石寺ほか, 2003)。

試料はベントナイト(クニグル Y1)、乾燥密度 1.6Mg/m^3 、 $\text{pH} 2.5$ を基本とし、パラメータとしてケイ砂混合率: 0, 30, 50wt%, NaNO_3 濃度: 0.01~5mol/L の条件で試験を行った。ベントナイトは拡散セルに圧縮充填し、蒸留水を加えてベントナイトを含水飽和させた後、試験溶液(NaNO_3 溶液: 濃

度は試験条件による)に交換し静置することにより、ベントナイトを試験溶液で飽和させた。高濃度側試験溶液にトレーサを添加し拡散試験を開始した後、適当な期間毎に低濃度側試験溶液中のトレーサ濃度を測定し経過曲線より実効拡散係数 D_e を求めた。また、試験終了後、ベントナイトをスライスし、ベントナイト中のトレーサの濃度分布を調べることにより見かけの拡散係数 D_a を求めた。試験の結果、得られた C, Cl, I の D_e の値は $10^{-11} \sim 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 程度であり、 D_a は $10^{-12} \sim 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ 程度であった。いずれの試験条件においても、 D_e は C<Cl<I の順で大きくなる傾向が見られた。

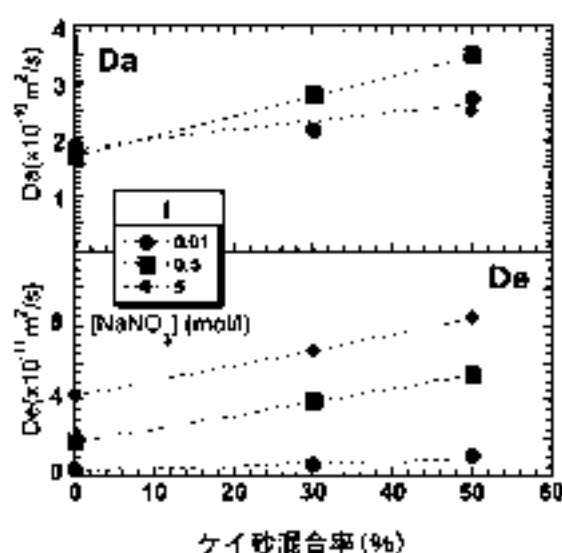


図 5.2-25 I の D_e 、 D_a のケイ砂混合率依存性

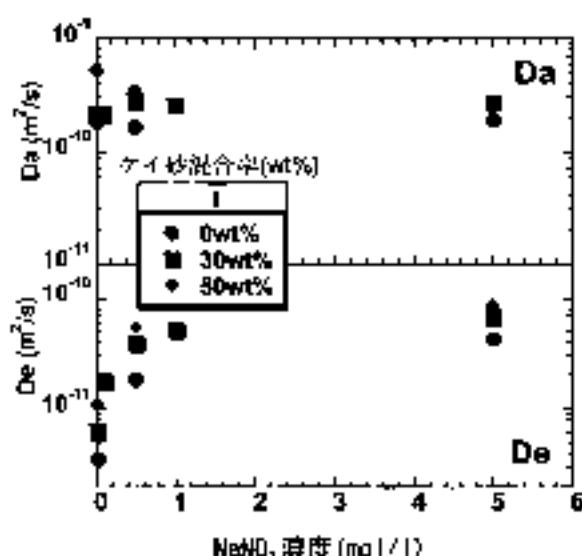


図 5.2-26 I の D_e 、 D_a の NaNO_3 濃度依存性

図 5.2-25 に I の D_e 及び D_a のケイ砂混合率依存性を示す。それぞれの NaNO_3 濃度において、ケイ砂混合率の増加とともに D_e 及び D_a が増加する傾向が見られた。この傾向は C, Cl においても同様であった。図 5.2-26 には I の D_e 及び D_a の NaNO_3 濃度依存性を示す。それぞれのケイ砂混合率において、 D_a には顕著な NaNO_3 濃度依存性は見られなかった。一方、 D_e は NaNO_3 濃度が増加するにつれて高くなる傾向が見られ、この理由として、塩濃度が高い条件ではベントナイト中の電気二重層の厚さの減少により、陰イオン排除効果が低下し、陰イオンの有効拡散間感率が増大したためと考えられる。

v) 緩衝材中の鉄イオン及びネプツニウムイオンの拡散挙動に関する研究

「第 2 次取りまとめ」における緩衝材中の核種移行評価では、緩衝材中に拡散するオーバーパック腐食生成物の影響を保守的に考慮せずに評価を行った。しかし、実際の処分環境においては、腐食生成物が拡散した後、ガラス固化体中の放射性核種が拡散することが想定される。そのため、安全評価の信頼性向上のためには、腐食生成物が拡散に及ぼす影響を評価することが必要となる。そこで、腐食生成物が緩衝材性能に及ぼす影響を定量的に評価すると共に、還元条件下でのネプツニウムの信頼性のあるデータ取得を目的として九州大学との共同研究を進めている。

本研究では、腐食生成物共存下及び非共存下でのネプツニウム拡散試験を行うことにより、ネプツニウムの見かけの拡散係数の取得と共に、その拡散挙動に及ぼす腐食生成物の影響について調べた。

試験は In-diffusion 法で行った。ベントナイトを拡散カラムに圧縮充填し、還元条件を維持するために $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ を加えた水溶液でベントナイトを含水飽和させた。その後、腐食生成物非共存下の試験では、ネプツニウムをベントナイト試料片面にそのまま塗布し拡散させた。腐食生成物共存下の試験では、腐食炭素鋼をベントナイト試料片面に密着させてあらかじめ腐食生成物を拡散させておいた後、ネプツニウムを塗布し、再び腐食炭素鋼を試料に密着させ、腐食生成物存在下でネプツニウムを拡散させた。一定時間拡散させた後にベントナイト試料をスライスし、ベントナイト中のネプツニウムの濃度分布を調べることにより、見か

けの拡散係数 (D_0) を求めた。

その結果、いずれの試験条件においてもベントナイト中のネプツニウムの濃度プロファイルには、速い移行挙動を示す部分と、遅い移行挙動を示す部分が存在することが確認された。腐食生成物共存系におけるネプツニウムの拡散挙動は、非共存系に比べて、遅い移行挙動を示すネプツニウムの割合が増加していた。ネプツニウムの D_0 は、速い移行挙動を示す部分では $10^{-11} \sim 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ 程度であり、遅い移行挙動を示す部分では $10^{-13} \sim 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 程度となった。速い移行挙動を示す部分は 5 倍のネプツニウムの拡散によるもの、遅い部分は 4 倍のネプツニウムの拡散によるものと推測される。このことは、試験後のトレーサ線布面におけるネプツニウムのテノイルトリフルオロアセトン (TTA) による溶媒抽出により判定された、 Np(IV) の存在割合が、腐食生成物共存系において高いこととも調和的である。緩衝材中の酸化還元条件に及ぼす腐食生成物の影響や、ネプツニウム等の核種の緩衝材中での存在形態、さらにそれが拡散挙動に及ぼす影響に関する理解を深めるために、鉄-ネプツニウム系に着目したデータ取得を継続する。

vi) 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

ベントナイトの微細構造は拡散挙動に影響を及ぼす因子の一つと考えられている。そこで本研究では、粒径の異なるモンモリロナイト試料を調製し、比表面積測定、表面観察、粒度分布測定、二次元微細構造観察といった特性評価を行うとともに、トリチウム水 (HTO)、塩素 (Cl^-) およびセシウム (Cs^+) の拡散試験を実施した。その結果、モンモリロナイト試料は、粒径が異なっても、その粒子を形成するモンモリロナイトの単位シートには顕著な差がないこと、 HTO 及び Cl^- では細粒試料が、 Cs^+ では粗粒試料が高い拡散係数の値を示すことなどを見出した (小崎, 2003)。

また、モンモリロナイト/ケイ砂混合試料を用いて Na^+ および Sr^{2+} の拡散試験を行い、タイ砂及びイオン強度が拡散の活性化エネルギーに影響を及ぼすことが確認された。これら活性化エネルギーの特徴的な変化により、圧縮モンモリロナイト中の放射性核種の拡散プロセスは、細孔拡散のような単一の機構だけでなく、複数のプロセスが関与していることが示唆された (小崎, 2003)。

vii) 分子動力学法によるスメクタイト近傍でのイオンの存在状態と移行に関する考察

緩衝材中の核種移行現象を支配するスメクタイト結晶近傍での水やイオンの微視的なふるまいを、分子シミュレーション法のひとつである分子動力学法を用いた解析により明らかにしようという研究を進めている。

平成 14 年度は、シミュレーションの基本となる H_2O の分子モデルの改善を行うとともに、新しいモデルを用いて、層間陽イオンを Na 、 Ca 、 Cs と変化させたスメクタイト (バイデライト) について、水分子の塩を変化させて分子動力学計算を実施した。その結果、層間陽イオンの種類によって、層間水分子の増加に伴う水の内部エネルギー変化の挙動が異なることがわかった。また、計算の結果得られた層間陽イオンの水和構造のちがいは、イオン半径や電荷の差が影響していると考えられる。さらに、スメクタイト結晶の層間と結晶端の特性を評価することを目的として、結晶端を含むスメクタイト結晶の大規模計算を開始し、計算条件や計算時間に関する問題点を整理した。

③ まとめ

還元条件および非還元条件での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吸着試験を実施し、溶存化学種ごとに分配係数を与えることで、溶液条件の変化にともなう分配係数の変化を説明することができた。また、OECD/NEA における吸着プロジェクトに参加し、熱力学的吸着モデルの検討を行った。今後、これらのモデル化によって、環境条件の変化にともなう分配係数の変化の予測手法を確立し、性能評価における吸着パラメータの値や不確実性の幅の設定に反映していく。また、マグネタイトに対するネプツニウムの酸化還元反応試験を実施することにより、酸化還元反応を伴う吸着現象についての知見を増やすことができた。今後は、現在の評価において十分に取られていない吸着現象の理解と評価上の取扱について検討を継続する。

拡散挙動については、緩衝材中の陰イオンの拡散に対する塩濃度の影響、ネプツニウムの拡散に及ぼす腐食生成物の影響などに関するデータ取得を行うとともに、観察された現象に基づき、拡散メカニズムの考察を行った。継続して、系統的なデータ取得を行うとともに、移行遅延パラメータ設定の信頼性向上のために拡散メカニズムを明ら

かにする予定である。

参考文献

- Ames, L.L., McGarrath, J.E. and Walker, H.A. (1981): Basalt-Radionuclide Reactions: 1971-1981 Annual Report - Prepared For Beckwell Hanford Operations, RI80-BV-CR-127-P/PSL-3992.
- Gorgeon, L. (1994): Contribution a la Modelisation Physico-Chimique de La Retention de Radionuclides a Vie Longue par des Matériaux Argileux, PhD. Thesis, l'Université Paris 6.
- 石寺孝亮, 宮本真哉, 佐藤治夫(2003): 圧縮ベントナイト中の U, Cl の拡散挙動に及ぼすタイ砂混合率および NaNO_3 の影響, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, P29, p. 949.
- 神徳 敏, 柴田雅博, 吉田 森, 鶴山忠宏(2003): 取替試験結果に対するモデル適用性検討, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, 015, p. 860
- Kitanura, A., Tomura, T. and Shibutani, T. (2002): Sorption Behavior of Septimium onto Smectite under Reducing Conditions in Carbonate Media, Proc. 3rd. NUCEF International Symposium, JABRI-Conf 2002-004, p. 659.
- 小崎 完(2003): 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(III), サイクル機関技術資料 (研究委託報告書; 北海道大学), JSC T34100 2002-053.
- 中田弘太郎, 佐藤留美, 山中 知, 北村 暁, 齋 幸男, 戸村 努, 佐藤治夫(2001): マグネタイト/液液界面における Cr(VI) の還元, 日本原子力学会 2001 年秋の大会予稿集, 034, p. 916.
- Lewrie, K.J., Fuger, J., Mische, H., Potter, P., Rand, M.H., Rydberg, J., Spahn, K., Sullivan, J.C., Ullrich, M.J., Vitorge, P. and Mamer, H. (2001): Chemical Thermodynamics of Septimium and Plutonium, OECD Nuclear Energy Agency, North-Holland, Amsterdam.
- 戸村 努, 北村 暁(2003): 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吸着挙動, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, 013, p. 858

5.2.4 コロイド等の影響評価モデルの開発

1) コロイドの影響評価モデルの開発

① 課題と計画の概要

天然の地下水中には種々のコロイドが存在する。また、地層処分システムではベントナイト系緩衝材が用いられることが考えられるが、長期的には地下水との接触等によりそれらの材料を起源とするコロイドが地下水中に分散する可能性がある。コロイドは比表面積が大きくその表面は化学的に活性であることから、表面錯体反応やイオン交換反応により核種を収着しやすいと考えられる。核種がコロイドに収着して擬似コロイドを形成した場合、核種は地下水をコロイドの移行に伴って移行することから、核種の移行が促進されることが観測された例もある。したがって、地下水中の物質移行には地下水中のコロイドが大きく関与すると考えられ、「第2次取りまとめ」でも地層処分システムにおける核種移行評価に関して、天然バリアについてのモデル変更ケースとしてその評価を行った。

コロイドが放射性核種の移行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、以下のような課題に取り組んでいる。

- ・地下水中のコロイド特性の事例調査
- ・ベントナイト系緩衝材を起源とするコロイド生成の検討
- ・放射性核種-コロイドの収着性に関する検討
- ・岩石等地質媒体を充填したカラムを用いたコロイド共存系の放射性核種の移行評価
- ・結晶質岩中の透水性亀裂を対象としたコロイド共存系の放射性核種の移行挙動に関する原位置試験(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に関する検討
- ・コロイド・フィルトレーション効果に関する現象確認とモデル化

以下に、これらの各課題について、平成14年度に実施した主な成果を示す。

② これまでの成果

1) 地下水中のコロイド特性の事例調査

天然の地下水中には種々のコロイドが存在し、これらは放射性核種を容易に収着すると考えられ

る。このため、地下水中のコロイド特性に関する調査を実施している。地下水中のコロイド特性に関する事例調査としては、「第2次取りまとめ」では岐阜県東濃鉱山の堆積岩層での地下水を対象に調査を実施し、コロイドの濃度は約1~5 ppmであったことを報告した。

「第2次取りまとめ」以降は、既存坑道を利用して地下水を採取し、地下水中のコロイドの特性評価等を実施している。図5.2-27には、平成14年度に整理した結果の一例として、坑道周辺の地質が古期堆積岩系(主に砂岩、頁岩、チャート)である地下水を採取してコロイドの特性評価を行った結果を示す。地下水中には無機物および有機物から成るコロイドが存在することが確認された。また、この場合、有機物から成るコロイドは数十ppmの濃度で存在することが認められた(黒澤ほか、2002a)。

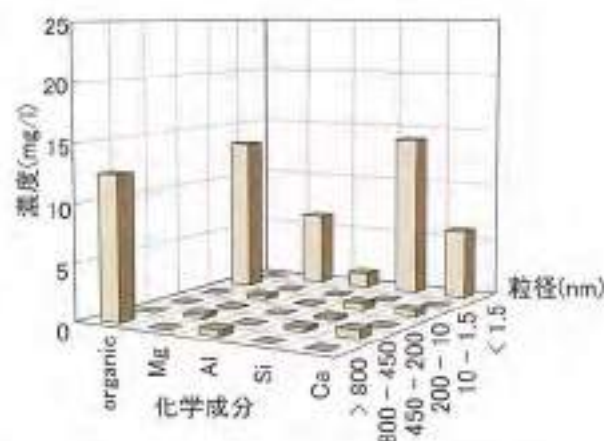


図 5.2-27 地下水中のコロイド成分濃度の測定結果の一例

ii) 放射性核種-コロイドの収着性に関する検討

コロイドは比表面積が大きくその表面は化学的に活性であることから、表面錯体反応やイオン交換反応により核種を収着しやすいと考えられるが、とくに地下水中のコロイドを対象に核種の収着性を評価した例は少ない。本研究では、上記1)項で記述したように、既存坑道から採取した地下水を用いて、地下水中のコロイドと放射性核種 Am-241 のバッチ式収着実験を、初期 Am 濃度をパラメータとして実施した。図5.2-28には平成14年度に整理した結果の一例を示すが、得られた分配係数は $10^1 \sim 10^4$ ml/g のオーダーであり、Am-241 は地下水中のコロイドに有意に収着することが認められた

(黒澤ほか, 2002b)。また、本試験結果において、分配係数は、比較的低いトレーサ濃度においても、明らかに濃度依存性を示している。今後は、放射性核種-コロイドの収着性に関するデータの補充が必要であるとともに、原位置における地下水中のコロイドの特性を維持した状態で放射性核種の収着性をどのように評価するか、その技術開発が必要であると考えられる。

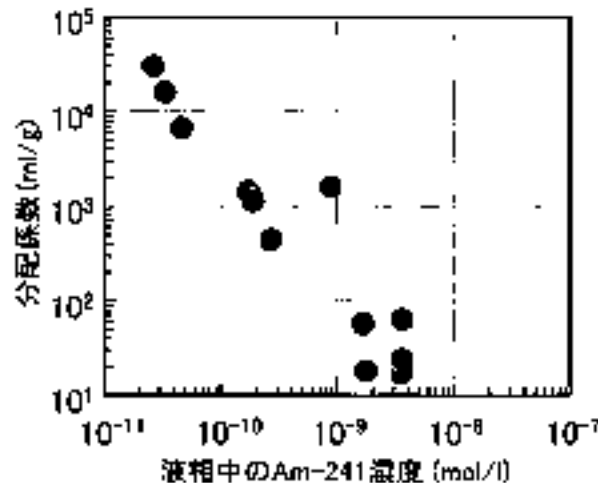


図 5.2-28 地下水中コロイドと Am-241 の収着試験の結果の一例

iii) 岩石等地質媒体を充填したカラムを用いたコロイド共存系の放射性核種の移行評価

「第2次取りまとめ」では、コロイドの影響を考慮した放射性核種の移行モデルとして、核種-コロイド-岩盤間の分配平衡を仮定し、それぞれの分配係数を設定したモデルを用いた。「第2次取りまとめ」以降、分配平衡モデルの適用可能性を確認するとともに、さまざまな環境条件に対応可能な、より適切なコロイド影響を考慮した核種移行モデルの開発を目的として、岩石等地質媒体を充填したカラムを用いて、コロイド共存系での放射性核種の移行試験を行っている。

本試験の結果から、コロイドへの収着が可逆的であり、亀裂表面および液相への再分配性を有する放射性核種に関して、長期的な移行評価を行う場合には、核種-コロイド-岩盤間の分配平衡を仮定したモデルによる核種移行評価が可能であるが、亀裂内流速が大きく、比較的速やかに放射性核種およびコロイドが評価距離を透過する系を対象とする場合には、核種-コロイド-岩盤間の分配平衡を仮定したモデルは、核種の遅延を過大に評価する可能性があることが実験的に示された。

このような評価対象に対しては、核種の収着、脱離性について地下水流速とのバランスを適切に考慮した分配比を、収着パラメータとして設定することで、核種の移行挙動を表現可能であることを示した(黒澤ほか, 2003)。与えられた環境条件に対するモデルの適用において、地下水流速と、収着速度、脱着速度をいかに適切に取り扱うかが今後の検討課題である。

iv) 結晶質岩中の透水性亀裂を対象としたコロイド共存系の放射性核種の移行挙動の評価

スイス Nagra の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の透水性亀裂を対象に、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 CRR 原位置試験プロジェクト(CRR: Colloid and Radionuclide Retardation)が 1998 年から国際共同研究プロジェクトとして展開されている (Ita et al., 2000; Møri et al., 2001)。

この試験では、試験対象亀裂に直交する 2 本の試験孔を設け、一方から放射性核種およびコロイドを注入し、他方の試験孔で亀裂を透過してきた放射性核種の濃度を測定して、その結果をもとに移行挙動が評価された。その結果、放射性核種の種類によっては、コロイドが共存する場合に移行遅延が認められないものもあり、現在、後述するようにコロイド影響評価モデルを用いてその原因について検討を行っている。

v) コロイド影響評価モデルの高次元化と適用性に関する検討

岩石等地質媒体を充填したカラムを用いたコロイド共存系の放射性核種の移行試験を通して、比較的速やかに放射性核種およびコロイドが評価距離を透過する試験系を対象とする場合、その移行挙動をモデルにより解析するにあたっては、核種の収着、脱離性について反応速度を考慮する必要があることが認められている。そこで、放射性核種のコロイドおよび岩盤への収着、脱離反応に関して速度論を取り扱うモデル (Ibaraki and Sudicky, 1995) の適用性に関する検討を目的として、上記結晶質岩中の透水性亀裂を対象としたコロイド共存系の放射性核種の移行試験(CRR 原位置試験)の結果について解析を実施している。図 5.2-29 に、解析結果の一例を示すが、CRR 原位置試験におけるコロイド共存系での Am-241 の移行挙動をモデルにより評価するにあたっては、コロイドか

らの脱離速度を考慮することの必要性が示唆された。

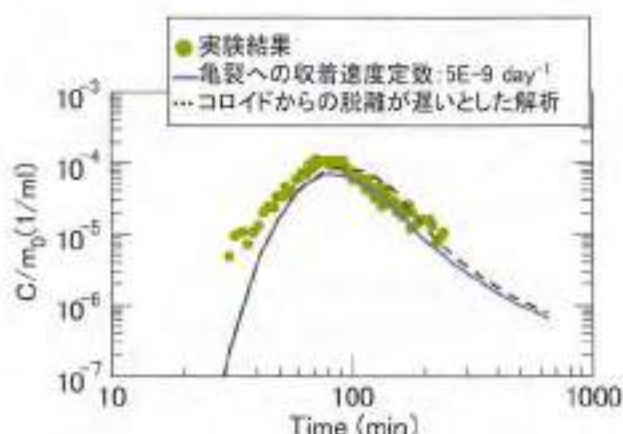


図 5.2-29 放射性核種のコロイドおよび岩盤への収着、脱離反応の速度論を考慮したモデルによる Am-241 の解析結果の一例

v) コロイド・フィルトレーション効果に関する現象確認とモデル化

核種がコロイドに収着して擬似コロイドを形成した場合、核種の移行はコロイドの移行に支配されて促進される可能性がある一方、コロイドが地層中の移行経路の表面に付着され、移行が抑制される可能性がある。この移行抑制の現象はコロイド・フィルトレーションと呼ばれている。「第2次取りまとめ」以降、ラテックスコロイドを用いて亀裂性および多孔質性媒体を模擬した移行経路でのコロイド・フィルトレーションについて直接可視化する試験を実施している（一部、米国サンディア国立研究所との共同研究にて実施）。その結果、ラテックスコロイドは移行経路の表面にフィルトレーションされることを確認した。現在、コロイド・フィルトレーション効果を核種移行評価において考慮することを目的として、そのモデル化について検討を実施している（鎮守・油井、2003）。

③ まとめ

天然バリア中でのコロイドの影響を考慮した放射性核種の移行評価モデルの開発とその信頼性向上を目的として、平成14年度に実施した主な成果をまとめる。

- ・地下水中には無機物および有機物から成るコロイドが存在し、放射性核種を有意に収着することを確認した。
- ・岩石充填カラムを用いたコロイド共存系の放射性核種の移行試験結果などから、核種-コロイ

ド-岩盤間の収着性に基づいた核種移行モデルの利用にあたっては、収着平衡に基づく評価だけではなく、地下水流速とのバランスも考慮して、核種の収着速度、脱離速度を考慮した評価が必要であることが示唆された。このため、放射性核種のコロイドおよび岩盤への収着、脱離反応に関して速度論を取り扱うモデルの整備を行った。

- ・コロイド・フィルトレーション効果について直接可視化する試験を実施し、その効果を確認するとともに、モデル化に関する検討を実施している。

今後は、放射性核種-コロイド-岩盤の各相互作用を考慮して、結晶質岩中の透水性亀裂を対象としたコロイド共存系の放射性核種の移行試験（CRR 原位置試験）の結果について詳細な解析を実施し、モデルの適用性に関する検討を行う予定である。

参考文献

- 鎮守浩史, 油井三和(2003):コロイドの移行過程における付着係数の評価方法, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, p.927.
- Ibaraki, M. and Sudicky, E. A. (1995): Colloid-facilitated contaminant transport in discretely fractured porous media - I. Numerical formulation and sensitivity analysis, *Water Resources Research*, 31, pp. 2945-2960.
- 黒澤 進, 油井三和, 久野義夫, 上田真三(2002a): 地下水中の天然コロイドの特性評価, 日本原子力学会 2002 年秋の大会予稿集, p.668.
- 黒澤 進, 吉川英樹, 油井三和(2002b): 放射性廃棄物地層処分核種移行評価におけるコロイドの影響, サイクル機構技術資料, JNC TN8410 2002-010.
- 黒澤 進, 上田真三, 加藤博康, 林 賢一, 久野義夫, 吉川英樹, 油井三和(2003): 核種-コロイド-岩盤間の分配収着平衡に基づく核種移行モデルの適用性に関する検討, 日本原子力学会和文論文誌, (投稿中)
- Wöri, A., Geckeis, H., Missana, T., Guimera, J., Degoultre, C., Meyer, P., Ota, K., Papengeth, H., Alexander, V. E. and Bernan, 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・微生物の影響評価モデルの開発

2-1) 天然有機物の影響評価モデルの開発

① 課題と計画の概要

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」での安全評価においては、その影響は概略的に考慮されたレベルにとどまっている。今後は、地質環境が特定された段階において、天然有機物の核種移行への影響が定量的に評価できるようにしておくことが重要である。このために、天然での有機物の存在形態や性質について幅広く情報を集めるとともに、当面は、代表的な天然有機物を用いて、実験的な影響評価方法と、核種との相互作用に関するモデルの検討を進める。

② これまでの成果

i) 実地下水中の天然有機物の調査

地下環境における天然有機物の性質や存在量は一定ではなく、地質環境に強く依存する。したがって、地下水について溶存有機物の情報を収集し、整理することが重要である。

平成14年度までに、千葉県茂原地域での地下水に関して、溶存する天然有機物の定性及び定量分析を行った。同地域はこれまでガラスのナチュラルアナログ研究の対象としてきた火山ガラスを産出する地域で、同地域の地下水は海水系地下水である。全有機炭素計(TOC)による有機炭素量の測定の結果、揮発性の有機物を含めた有機炭素量は $90\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ であり、そのうち腐食物質の存在量は $2\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 未満であった(表5.2-8)。

表 5.2-8 地下水中の全有機炭素量および検出された有機物の濃度

全炭素量から無機炭素量を差し引き後の全有機炭素量	$90\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
揮発成分及び無機炭素除去後の全有機炭素量	$59\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
ギ酸 [HCOOH]	$0.08\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
シュウ酸 [(COOH) ₂]	$0.6\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
コハク酸 [(OH) ₂ (COOH) ₂]	$<1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (N.D.)

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

放射性核種の溶解度に及ぼす有機物影響評価の一つとして、処分環境を模擬した還元条件における、Np の溶解度に対するフミン酸の影響評価を継続して実施した。フミン酸は地中に存在する代表的な天然有機物である腐植物質の一種である。

平成13年度までの試験から、フミン酸濃度の増加に伴い Np(IV)濃度も増加する傾向が見られ、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(飛塚ほか, 2001, 2002)。しかしながら、これまでに報告されている深さ 800m までの地下水中の腐植物質濃度 ($0.04\sim 8.6\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) (長尾, 1995)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た。

平成14年度は、Np(IV)を定量するための抽出条件を変更して、実験結果を再確認するとともに、腐植物質の分子量によって核種の分配傾向が異なることがいくつかの核種について報告されているので(例えば, Sakamoto et al., 2000)、複数のフィルター孔径に対しフミン酸と共存する Np(IV)濃度の依存性を調査した。なお、これまでは分画分子量(MWC0) 10,000 の限外ろ過を使用してきた。試験は pH8、イオン強度 0.1 の条件で過飽和法により行った。フミン酸は Aldrich 社製フミン酸ナトリウムを精製したものを、濃度を最大 $500\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ まで変化させた。分析以外の全操作はアルゴン雰囲気 ($\text{O}_2 < 1\text{ppm}$) のグローブボックス内で行い、深部地下環境を模擬した還元条件(還元剤: $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$)において、約 22°C の室温で実施した。

結果の一例を図 5.2-30 に示す。MWC03,000 で分離した場合、フミン酸濃度の上昇に伴う Np(IV)濃度の上昇はわずかにしか認められなかった。一方、MWC010,000 および 50,000 では、添加したフミン酸濃度の増加に伴い Np(IV)濃度もフィルター孔径によらず増加し、フミン酸濃度 $100\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ まではその傾向が顕著であった。ただし、フミン酸濃度 $500\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ の場合、 $100\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ の場合よりも Np(IV)濃度は減少した。本試験に用いたフミン酸単独での分子量分布を同様の限外ろ過と TOC による測定によって調べたところ、添加したフミン酸のうち約 40~60% が分子量 10,000 以下に、約 20~40% が分子量 10,000~50,000 以下に分布していた。Tipping(2002)や長尾(1995)によれば、Aldrich 社製フミン酸も含め、自然環境中に存在する腐植物

質の分子量は数千~2万程度であり、本試験におけるフミン酸の分子量分布も概ね同じ傾向を示している。今後、試験に利用したフミン酸中の低分子量部分の存在割合について定量を行うとともに、Np(IV)の分配とフミン酸の分子量分布との相関について考察を行う。

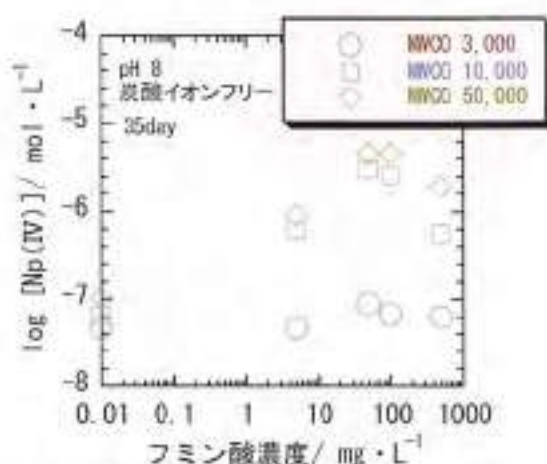


図 5.2-30 分子量に対する Np(IV) 濃度の依存性 (Np 初期濃度 $1.08E-5$ mol · L⁻¹)

Ⅲ) 圧縮ベントナイトに対する有機物透過性評価

淡水系地下水のような高イオン強度の環境ではベントナイトの微細間隙構造が変化する可能性がある (例えば Pusch et al., 1990)。降水系地下水条件では、概ね分子量 10 万を超える有機物は「第 2 次取りまとめ」におけるレファレンスケースの圧縮ベントナイトを透過できない、との報告があるが (金持ほか, 1999)、海水系地下水条件での報告例はない。平成 14 年度より、圧縮ベントナイトの有機物に対するフィルター効果について海水系地下水条件における検討を開始した。

対象有機物は実地下水条件を模擬する観点から腐植物質が有効であると考えられた。天然有機物が圧縮ベントナイトを透過しない要因が分子量 (或いは分子サイズ) であることを確認する為には、ベントナイト内部または層間と天然有機物との化学的、電気的相互作用をできるだけ排除できる条件が望ましい。しかし腐植物質の構造は不均質であるため、そのような影響を定量的に評価することは難しいのが現状である。そこで腐植物質の模擬物質として既知の分子量と均一な官能基を持つポリアクリル酸を用い、圧縮ベントナイトに対する透過試験を行った。

試験装置の概念図を図 5.2-31 に示す。試料溶液

として Aldrich 社製ポリアクリル酸 Na (平均分子量 15,000) 及びポリアクリル酸 (平均分子量 45 万) を、蒸留水、ASTM 法により調製した人工海水、及び 0.01M NaOH にそれぞれ溶解させた。ベントナイト (クニゲル V1) を乾燥密度 1.2 Mg · m⁻³ でステンレスカラム (NAS64 製) に充填し、蒸留水または人工海水に対するクニゲル V1 の膨潤圧と同等の圧力をかけ、ポリアクリル酸溶液を送液した。

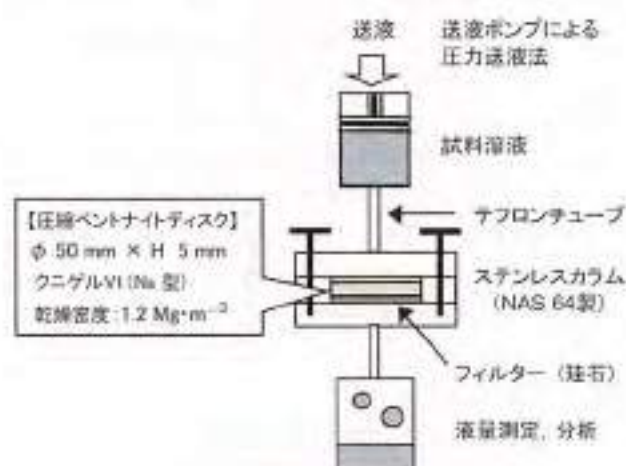


図 5.2-31 圧縮ベントナイトに対するポリアクリル酸の透過試験装置

透過した溶液を 7~14 日ごとに分取し、溶液中のポリアクリル酸の分子量分布や濃度をサイズ排除クロマトグラフィーの一種であるゲル浸透クロマトグラフィー (GPC) によって測定した。本試験は長期間のデータを取得するため継続中であるが、これまでのところ、人工海水系試料の単位時間当たりの透過流量は蒸留水系試料の約 2~3 倍である。また蒸留水系、人工海水系のいずれにおいても透過溶液中のポリアクリル酸濃度は透過前と比べて非常に低く、有意な分子量分布は得られていない。ベントナイト内部におけるポリアクリル酸の収着性は蒸留水系の試験条件において無視できる程度であることが示されており (金持ほか, 1999)、ポリアクリル酸の分子サイズが原因となって透過が阻害されていることが期待できる。今後溶液条件等についてより詳細な検討を実施する。

③ まとめ

Np(IV) の溶解度に対するフミン酸の分子量の影響は、共存するフミン酸の分子量分布に依存する傾向があった。今後は天然有機物の分子量に着目しつつ、有機物と競合する炭酸や Ca イオンなどが

共存する条件や海水系地下水条件を模擬して試験を行う予定である。

また圧縮ベントナイトに対する有機物透過試験において、蒸留水系試料よりも人工海水系試料における透過溶分量が多いものの、含まれるポリアクリル酸濃度は透過前と比べて非常に低かった。

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、腐植物質とアクチノイド価の相互作用を中心として、更なるデータの充実を進めていく。また、人工バリア中および天然バリア中の核種移行の遅延に及ぼす影響については、腐植物質とベントナイトとの相互作用について、試験や情報収集を行い、安全評価に資する基礎的な知見の整備を図っていく。

参考文献

- 金持真理子, 久野義夫, 加藤三和 (1999) : 圧縮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, JMC-TN8400-99-080.
- 飛塚早智子, 小原幸利, 佐藤浩夫(2001) : 還元条件での Np の溶解度およびフミン酸の影響, 日本原子力学会2001年秋の大会予稿集, 059, p.937.
- 飛塚早智子, 小原幸利, 佐藤浩夫(2002) : 核種移行に及ぼす天然有機物の影響評価～サイクル機構における取り組み～, 日本原子力学会バックエンド部会第16回バックエンド夏季セミナー資料集, p.2-30-1～2-30-5
- 長尾誠也 (1996) : 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 Hekmark, H. (1990) : GEM - A General Microstructural Model for Qualitative and Quantitative Studies of Smectite Clays, SKB Technical Report 90-43.
- Sakanoto, Y., Nagao, S., Ogawa, H., and Koo, Kyoung, R. (2000) : The migration behavior of $np(IV)$ in sandy soil and granite media in the presence of humic substances. *Radiochimica Acta*, 88, pp.651-656
- Tipping, E. (2002) : *Cation binding by humic substances*. Cambridge University Press.

2-2) 核種移行評価モデルにおける微生物の取扱いに関する検討

① 課題と計画の概要

天然に存在する微生物は多種多様であり、それらの核種との相互作用も未知なところが多い。「第2次取りまとめ」における微生物の影響評価は、人工バリアに対する性能評価を行う上で浸透材が健全である期間はそのフィルトレーション効果を期待し、人工バリアに対する影響はないとしている。しかし、特定の地質環境に対する評価が求められるときには、核種移行に及ぼす微生物の影響を評価するモデルが必要になる場合もあると考えられる。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ので、微生物影響基本評価モデルの構築のため、コロイド移行モデルを参考にした微生物の移行についての検討を実施した。微生物の影響を考慮した核種移行評価は、移流、分散に加えて固相(岩壁)－液相(地下水)－微生物の3相間の相互作用をどのように取り扱うかであり、コロイドの影響を考慮した核種移行評価のモデルに類似すると考えられる(Ibaraki and Sudicky, 1995)。そこでモデル開発の観点から、微生物による核種移行への影響についてコロイド的挙動としての扱いの可否を検討した。

② これまでの成果

表 5.2-9 に、性能評価の観点から微生物影響をモデル化する考え方を検討し、上記の放射性情種とコロイドおよび岩壁への収着、脱離反応に関して速度論を取り扱う現行のコロイド影響評価モデルによる解析の可能性を整理した。なお、微生物活動を直接考慮した核種移行評価モデルの構築のためには、温度、水分量、光の影響、酸素量、水素量、その他の栄養素の存在量等を考慮する必要があるが、ここでは、簡易な反応モデルや化学モデルの取扱いを想定した。

③ まとめ

以上の結果から、現行のコロイド影響評価モデルを用いて、微生物の核種移行への影響に関する計算を予想的に実施するとともに、微生物による地下水化学の変化や核種移行挙動の変化を現行モデルのモジュールとして取り込む適切な方法の検討を図っていく。

表 5.2-9 微生物影響評価モデルの考え方

微生物の扱い	核種移行への影響	モデル化の考え方	現行コロイド影響評価モデルでの扱い可能性
核種の取り込み	・コロイドコロイドが形成(微生物の死骸、有機物コロイドを形成)微生物の成長として核種を移動する。	・固相－液相－コロイド相間の核種の分配係数を設定する。	○
	・核種を収着し、ラングミュア型吸着モデル、フランク-ラングミュア型に追加して水中の核種濃度を減少させる。	・核種を収着する付着物のコロイドとして評価する。	○
バイオフィームの形成	・岩壁面に微生物が収着することにより核種－岩壁間の相互作用が低下する。	・核種を収着する付着物のコロイドとして評価する。	○
酸化還元反応	・核種の化学形態が変化することにより、溶解度や分配係数が変化する。	・微生物の作用による地下水化学の変化に組み込む。	△
その他の生物学的現象	・コアの発生により浸透材のバリア機能が変化し、	・バリア機能として下に地下水の浸透を減少させる。	△
	・孔隙の詰まりにより核種が滞留され、人工バリアの機能が低下する。	・バリア機能として下に地下水の浸透を減少させる。	×
	・代謝作用により有機物を生成し、浸透材で分配係数が変化する。	・有機物生成物の存在と地下水化学の計算を組み込む。	×

参考文献

Ibaraki, M. and Sudicky, E.A. (1995) : Colloid facilitated contaminant transport in discretely fractured porous media - I. Numerical simulation and sensitivity analysis, Water Resources Research, 31, pp. 2915-2930.

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」以降、平成13年度までに、地表環境中の物質移行評価モデルの高度化に関する検討として、海域を複数の領域に分割し、その領域の一部を核種放出域とした場合の生物圏モデルを構築した。また、データベースの整備に関連する検討事項として、国際共同研究 BIOMASS の成果を踏まえた生物圏評価データの設定手順を開発した。さらに、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として、地質環境と生物圏とのインターフェース（Geosphere-biosphere interface；以下、「GBI」という）を適切にモデル化するために必要となる予想的な FEP データベースを作成した（サイクル機構、2002）。

上記の成果を踏まえて、平成14年度は、地表環境中の核種移行モデルの高度化として、飽和度が変化する表面下部の土壌領域（以下、「下部土壌」という）を GBI とする生物圏モデルの構築および気候変動を考慮した生物圏評価に関する検討を実施した。また、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の一環として、GBI を適切にモデル化するための設定フローを構築した。さらに、パラメータの感度解析を実施することによって評価結果に大きな影響を与えるパラメータを抽出した。

一方、天然に存在する放射性核種または化学元素の濃度あるいは移行量（以下、「フラックス」という）など（以下、「天然安全指標」という）を補完的安全指標のひとつとして用いる可能性について検討するために、わが国での天然放射性核種または化学元素の濃度データおよび地質学的プロセスによる固相または液相のフラックスデータを収集し、IAEA の国際共同研究プロジェクトへの情報提供を行ってきた（サイクル機構、2002）。平成14年度は、放射性核種または化学元素の濃度データおよびフラックスデータの収集を継続するとともに、天然の放射性核種または化学元素のフラックス（以下、「ナチュラルフラックス」という）の試算方法を検討した。さらに、放射性廃棄物に含まれる物質の化学毒性影響に関する検討に着手した。

② これまでの成果

i) 下部土壌を GBI とする生物圏モデルの構築

平成13年度までは、地層処分起因する放射性

核種が地下水により地表環境に流入することを想定し、河川や深井戸、海洋を GBI とした生物圏モデルを構築してきた（サイクル機構、2002）。すなわち、液相を媒体として放射性核種が生物圏に放出され、生物圏内を移行する場合を想定した評価モデルの整備を中心に行ってきた。しかしながら、実際には、固相を媒体として、放射性核種が隆起・侵食といった物質移動プロセスにより地表付近に放出される場合も想定される。また、このようなプロセスを経て地表付近に放出された核種は、固相を媒体とする物質移動プロセスはもとより、固相中に存在する液相に分配され、液相を媒体とする物質移動プロセスによっても生物圏内に広がり、食物摂取などを通じて人間に影響を与える。

そこで、本検討においては、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、下部土壌を GBI とする生物圏モデル（以下、「下部土壌モデル」という）を構築し、天然バリアからの核種移行率を放射線量に変換する係数（以下、「線量への換算係数」という）を被ばくグループごとに算出した（図 5.2-32）。

各被ばくグループに対する線量への換算係数のうち、農作業従事者グループに対する線量への換算係数が最も大きくなった。また、農作業従事者グループにおけるほとんどの核種で、土壌コンパートメントに関連する被ばく経路である「ダストの吸入」、「土壌からの外部被ばく」、「土壌の摂取」が支配的になることがわかった。

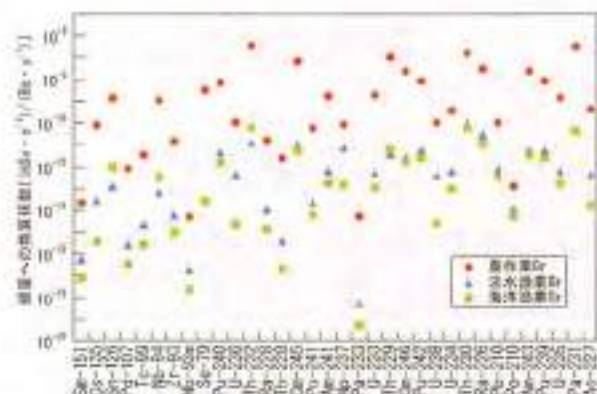


図 5.2-32 下部土壌モデルを用いて算出した被ばくグループごとの線量への換算係数

ii) 気候変動を考慮した生物圏評価に関する検討

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、諸外国における生物圏評価に係る安全要件や、欧州を中心に行われている気候変動を考

慮した生物圏評価手法に関する IBC の共同研究プログラム BIOCLIM について調査し、わが国において気候変動を考慮するとした場合の生物圏評価のアプローチ方法について検討した。フィンランドやフランス、スウェーデンなどの諸外国においては、安全要件として長期的な気候変動を考慮した生物圏評価が求められている。わが国においては、地層処分に対する明確な安全要件は提示されていないものの、将来的に諸外国と同様に気候変動を考慮した評価が必要となる可能性もある。平成 13 年度までに、ツンドラ気候および冷帯気候を想定した生物圏モデルを構築したが、これらは気候状態を離散的に取扱ったものである（サイクル機構、2002）。わが国においても、氷期サイクルなどのダイナミックな気候変動を取り扱った生物圏評価が要求される可能性を考慮して、BIOCLIM などの検討結果を参考に、図 5.2-33 に示すような生物圏評価において気候変動の影響を考慮していくためのアプローチ方法を検討した。

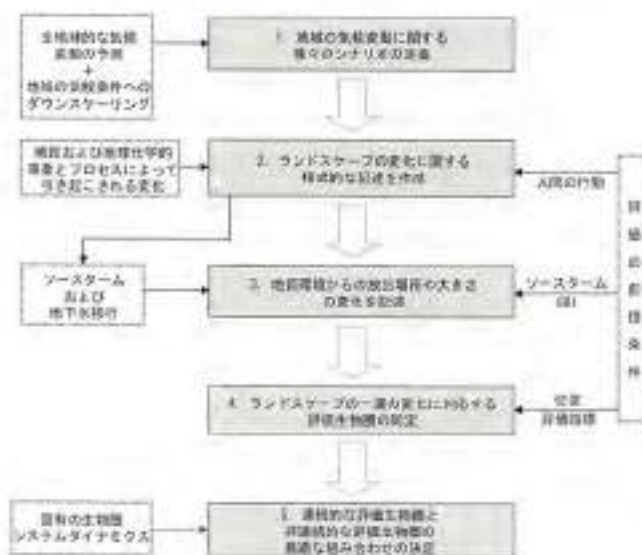


図 5.2-33 わが国における地層処分生物圏評価において気候変動の影響を考慮していくためのアプローチ方法（三木・池田、2003）

気候変動の影響によって生物圏で起こる変化は、地下水流動などにも影響を与えることから、気候変動の影響については、生物圏とそれ以外の領域を切り離さずに地層処分システム全体としての整合を取りつつ考慮する必要がある。したがって、今回検討したような生物圏システムでの環境変化を表すためのアプローチを適用する場合には、そ

の他の領域での性能評価で用いられるであろうアプローチとの一貫性に配慮する必要がある（三木・池田、2003）。

iii) 生物圏評価データ設定のためのパラメータ感度解析の実施

平成 13 年度までに、IAEA の国際共同研究プロジェクト BIOMASS での検討に基づき、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設定手法を開発してきた（サイクル機構、2002）。生物圏評価で取り扱うパラメータの数は非常に多い（100 種類以上）ことから、この手法を生物圏評価パラメータのデータ選定に適用するにあたっては、まず、評価結果に対して重要度の高いパラメータを把握しておく必要がある。そこで、平成 14 年度は、既存の生物圏モデルにおける評価結果（線量への換算係数）に大きな影響を与えるパラメータを抽出するため、パラメータの感度解析を実施し、パラメータの重要度について検討した。平成 13 年度までに実施した感度解析においては、各パラメータ値の変動について個別に取り扱っていたが（サイクル機構、2002）、平成 14 年度は生物圏評価で使用するすべてのパラメータについて組み合わせを考慮した解析を実施した。これまでに、河川を GBI とした生物圏モデルについて、河川流量、土壌の分配係数、灌漑水量、侵食速度などのパラメータの感度が高いことがわかっている。

iv) GBI を適切にモデル化するための設定手順の検討

生物圏評価において GBI を適切にモデル化するための検討の一環として、平成 13 年度は、地表近傍での特性、事象およびプロセス（Feature, Event, Process の頭文字をとって FEP という）に着目した予察的な FEP データベースを作成した（サイクル機構、2002）。平成 14 年度は、この中でも特に地下水の流れに着目し、諸外国における GBI 設定手法に関する調査を参考に、GBI を適切にモデル化するための設定手順のフローを作成した（図 5.2-34）。さらに、GBI 設定に必要な深部地下水流動および地表付近の水収支を把握するための調査項目および調査手法について整理した（三木・池田、2003）。

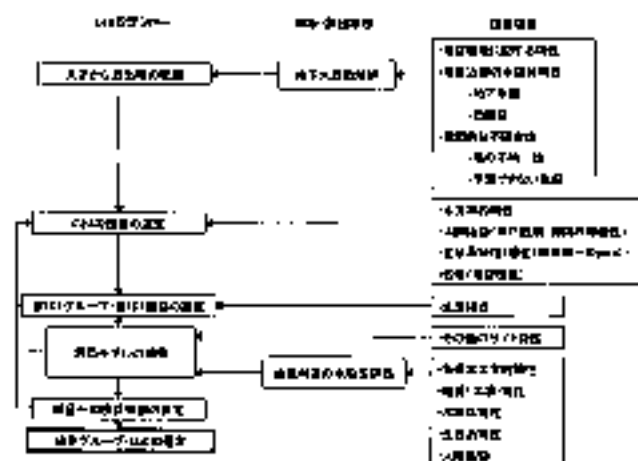


図 5.2-34 図1 を適切にモデル化するための設定手順のフロー（三木・池田，2003）

v) 天然安全指標に関わるデータベースの更新と天然安全指標を用いた評価の方法論の検討

補完的安全評価技術開発の一環として、平成13年度までに整備してきた天然安全指標に関わるデータベースの更新を行うとともに、天然安全指標を用いた評価の方法論の検討を実施した。

天然安全指標に関わるデータベースの更新については、既存の地球化学関連の研究および環境放射能研究に関する文献調査を引き続き行い、わが国における岩石・土壌、地下水などの天然放射性核種または化学元素の濃度データおよび風成塵の降下、河川流などの地質学的プロセスに関するフラックスデータを収集し、わが国で測定されているデータ範囲を示した。

一方、天然安全指標を用いた評価の方法論の検討の一環として、ナチュラルフラックスの試算方法を検討した。方法論については、わが国の地質環境特性を反映することに留意したうえで、基本的な考え方を以下のように整理した。

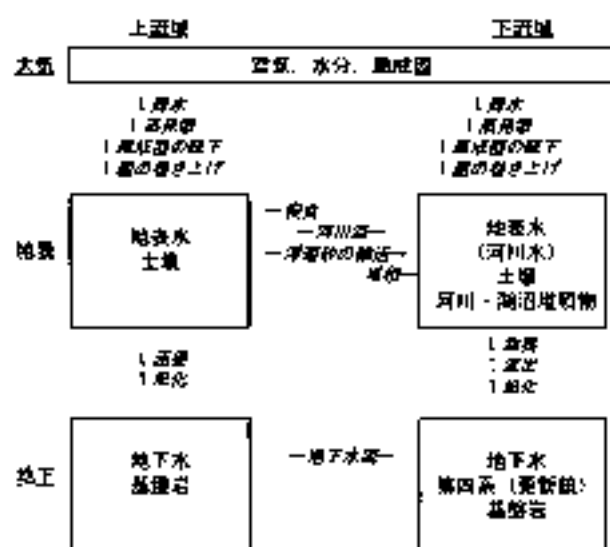
- ・ 水循環を物質循環の基本とし、その観点から集水域を物質循環の場として考慮すること
- ・ 地表（あるいは地下）に仮想的な評価点を設け、その評価点を通るフラックスを評価の対象とすること
- ・ 現在起っている物質循環を構成する場とプロセスを定めること
- ・ 物質循環には、着目する放射性核種および元素を含み、移行しうる媒体（液相・固相）を取り扱うこと

これらの考え方を踏まえて行ったモデル化の検討においては、天然環境の構成要素を、大気、地

表環境、地下環境に分類し、地表環境と地下環境についてはさらに上流域（涵養域）と下流域（流出域）に分割したうえで、これら3つの場に存在する物質と物質移動プロセスを設定した（図5.2-35）。図5.2-35に示す物質移動プロセスごとのナチュラルフラックスについては、地表環境中の核種または元素濃度と河川流や風成塵の降下などによるフラックスを乗じることによって算出した。評価点を集水域下流の河川沿いに定め、物質移動プロセスごとに、上記の収集データを用いたナチュラルフラックスの試算を行った。以上の検討を踏まえて、実際の地質環境に適用する際の課題を以下のように抽出した（齋藤ほか，2003）。

- ・ サイトスペシフィックな特性を踏まえた、集水域・評価領域・物質移動プロセスなどをより適切に定めること
- ・ 時間的、空間的変動性を踏まえて、関連するデータの収集を適切に実施すること
- ・ また、検討における一般的な課題としては、以下のようなことが挙げられる。
- ・ 安全評価の結果との適切な比較評価がなされるように対比のあり方に注意が払われるべきこと
- ・ 諸外国におけるナチュラルフラックス評価研究の成果や動向を把握し、評価手法や概念の向上に反映させること

これらの検討結果については、平成13年度に引き続き、IAEAの国際共同研究プロジェクト「放射性廃棄物処分安全評価における安全指標（濃度、フラックス）の使用」においてわが国の研究状況として情報提供した。プロジェクトの成果については、IAEAのTECDOCとして取りまとめられる予定である。



注 ボックスは物質存在の場、矢印はボックス間で動くプロセスとその方向を示す。マトリックスはプロセスを示す。

図 5.2-35 ナチュラルフラックスを用いた評価におけるプロセス、物質および場の体系 (齋藤ほか, 2003)

vi) 放射性廃棄物に含有される物質の化学毒性影響に関する検討

放射性廃棄物に含有される物質の化学毒性影響に関する予想的な検討として、国内の規制基準や元素の毒性情報などに基づいて、ガラス固化体などの人工バリア材料に含まれる化学元素に対して、評価対象元素の選定および影響解析を実施した。

評価対象元素の選定については、各元素の存在量を「第2次取りまとめ」における河川濃度 (10^3 mg/L) で換した暫定的な水中濃度を国内の規制基準（例えば、水質汚濁に係る環境基準や水道水の水質基準）や化学毒性情報に基づく毒性ランクといった判定基準と比較し、暫定的な水中濃度が判定基準を上回る 26 元素 (B, P, S, Cr, Mn など) について、評価対象とすることとした。評価対象元素に対しては、「第2次取りまとめ」のレファレンスケースと同じモデル体系での移行解析を実施し、生物圏の構成要素（河川水や土壌）中の元素濃度を国内の規制基準などと比較した。その結果、どの元素についても、評価結果は基準を大きく下回る結果となった（三木・池田, 2003）。

③ まとめ

平成 14 年度の成果は以下のとおりである。

- ・ 地表環境中の物質移行評価モデルの高度化の一端として、下層土壌モデルを構築し、各被ば

くグループに対する線荷への換算係数を算出した。また、BIODIEM などにおける検討結果を参考に、わが国において気候変動を考慮とした場合の生物圏評価のアプローチ方法について検討した。

- ・ 既存の生物圏モデルにおいて評価結果に大きな影響を与えるパラメータを抽出するため、パラメータの感度解析を実施し、パラメータの重要度について検討した。
- ・ 諸外国における GBI 設定手法に関する調査を参考に、わが国における GBI の設定手順のフローを作成した。
- ・ 平成 13 年度までに整備してきた天然安全指標に関わるデータベースの更新を行うとともに、ナチュラルフラックスの試算方法を検討した。
- ・ 放射性廃棄物に含有される物質の化学毒性影響に関する検討として、国内の規制基準や元素の毒性情報などに基づいて、ガラス固化体などの人工バリア材料に含まれる化学元素に対して、予想的な評価対象物質の選定および影響解析を実施した。

今後は、より具体的な仮想的環境条件に対する GBI 設定を試行することで、GBI 設定手順のフローの具体化を図るとともに、感度解析による生物圏評価パラメータの重要度に関する検討を継続する。また、諸外国における生物圏評価研究の動向（例えば、気候変動などの地表環境の時間的変動や補充的評価指標に対する考え方など）を参考にしながら、今後検討すべき生物圏評価技術の課題を整理する。

参考文献

- 核燃料サイクル開発機構 (2002)：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発—平成 13 年度報告—、サイクル機構技術資料、JNC TR1400 2002-003。
- 三木崇史、池田孝夫 (2003)：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（研究委託報告書：日揮株式会社）。（登録準備中）
- 齋藤茂幸、佐々木良一、石黒勝彦、加藤智子 (2003)：ナチュラルフラックス評価の方法論、日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集、p.943。

5.2.6 天然現象影響評価モデル

① 課題と計画の概要

適切なサイト選定と工学的対策により、天然現象によって地層処分システムに重大な影響が及ぶ可能性は十分に低くできると考えられるものの、超長期の安全性を論ずる際には、天然現象の影響を評価する技術を整備し、総合的な安全性の議論に供することが必要である。

「第2次取りまとめ」においては、陸地・浸食、気候・海水準変動、火山・火成活動、地震・断層活動などの天然現象を対象に、シナリオの検討および例示的な影響評価を行った。このとき、それぞれの事象の発生の時期や頻度および地層処分システムに及ぼす影響の程度や時間的変遷等を現実的な条件として与えるのではなく、わが国における事例研究成果および諸外国での取り扱い例なども適宜参照しつつ、システムへの特徴的な影響に焦点をあて、その影響を安全評価上十分と見込める程度に想定することにより取り扱うこととした。このような考え方に基づくシナリオの検討および影響評価の例示のために、各天然現象の発生による地層処分システムへの影響のパターンを複数想定し、その中から、厳しい想定を中心に例示的な影響評価を行った。ただし、影響パターンの想定では、影響の発生の仕方の違いなどよりも影響評価における取り扱いの違いに着目しており、また、影響評価においても、現実性よりも保守性を重視し、簡便で保守的なモデルとデータを用いた感度解析的な検討を行った。

平成14年度までに、「第2次取りまとめ」での検討結果を踏まえつつ、天然現象が発生し地層処分システムに影響を及ぼすとの想定およびその想定に対する影響評価において考慮する影響の特徴などを、過度に保守的とならないように、より現象に則した合理的なものとしていくための考え方および評価技術の開発・整備を進めている。

② これまでの成果

天然現象が発生し地層処分システムに影響を及ぼすとの想定および影響評価において考慮する影響の特徴などを検討する場合、対象となる地質環境での過去の履歴あるいは現在の状況などが重要な情報となる（例えば、DOE, 2001；SKB, 1999）。しかしながら、処分場を設置する場所あるいはその候補が特定されていない現段階では、わが国に

おける様々な地質環境とそこでの天然現象の履歴および将来の可能性を対象に、それらについての情報を可能な範囲で収集・集約しつつ、事象の発生様式、影響のパターンおよびその影響の程度を主要な特徴を中心に分類・整理し、それらの影響を定量的に評価するための考え方および評価技術の開発・整備を進めておくことが適切であると考えた。また、このような検討を行うておくことは、特定の場所を対象とする検討において必要となる技術に対して基盤を与えるものとして有用であると考えた。

そこで、天然現象影響評価に関わる検討を進めるために、まず、その取り組みの方針を以下のように設定した：

・全体的な整合性の向上

影響評価における取り扱いの違いに着目した「第2次取りまとめ」での検討に対して、「事象の発生様式（活動様式、規模、処分場との位置関係など）の分類」・「影響発生のパターン（影響様式、規模など）の分類」・「システムへの影響の種類や影響の程度の設定」・「影響評価における取り扱いの設定」という検討の全体的な流れをより明確にするとともに、特に、影響の主要な特徴に関する検討や設定に関して全体の整合性を向上させる。

・包含性と合理性

考慮すべき事象の発生様式、影響発生のパターンおよびシステムへの影響の程度などを正しく推定し一つに決めることは本質的に不可能であり、一方、全ての組み合わせを設定することも不可能であり非現実的である。そこで、事例研究成果や専門家の意見などを積極的に取り入れることにより、可能性のある影響の主要な特徴を抜けなく考慮するとともに、それらの合理的な組み合わせを考えていく。これにより、包含性と合理性のバランスを確保し、かつ過度な保守性を排除した、影響評価のテンプレートを整理していく。

上記の取り組み方針に従い、それを具体的に進めていくための以下の作業手順を設定した：

- (a) 事象の発生様式の分類と整理（イベントツリー等による整理）
- (b) 影響発生パターン（事象の発生様式と影響発生のパターン）の対応付け

- (c) 事例研究成果や専門家の意見などに基づき、事象の発生様式と影響発生のパターンとの組み合わせが生ずる可能性やその発生条件およびシステムへの影響を定量化するために活用できる知見などを関連づけた整理（含む、影響の主要な特徴などの絞り込み）
- (d) 上記知見に基づく天然現象影響評価のための概念モデルの例示
- (e) 概念モデルに基づく影響評価の例示
- (f) 上記作業内容や結果についての専門家のレビューおよび見直し。

平成14年度までに、火山・火成活動および地震・断層活動を対象として、上記の作業(a)～(c)を進めてきた。作業(a)と(b)のイメージを図5.2-36に示す。

このような作業を進めるためには、天然現象に関わる研究者と影響評価に関わる研究者の密接な連携のもとに作業を進めることが重要であり、これまでの検討においても両者の連携に努めてきた。この中で、上記のような作業手順を設定し、それに従った作業を行うことにより、連携の要所を明確にし、さらに知見の現状や課題を明確化・共有化することの重要性を再確認した。また、このような作業の実績を積むことによって、天然現象影響評価において優先的に取り扱うべき評価内容や評価における留意点などを明らかにしていけると考える。

③ まとめ

天然現象の影響評価についての検討を進めるにあたって、まず取り組み方針と作業手順を設定した。取り組み方針では、事象の発生様式、影響のパターンおよびその影響の程度などを、影響の主要な特徴を中心に整理して影響評価につなげていくことを重視することとした。また、作業手順においては、天然現象に関わる研究者と影響評価に関わる研究者の連携、および連携の要所の明確化と知見の現状や課題の明確化・共有化に配慮することとした。

今後当面は、作業(a)～(c)を継続するとともに、その結果を踏まえて(d)での概念モデルの構築を進めていく。

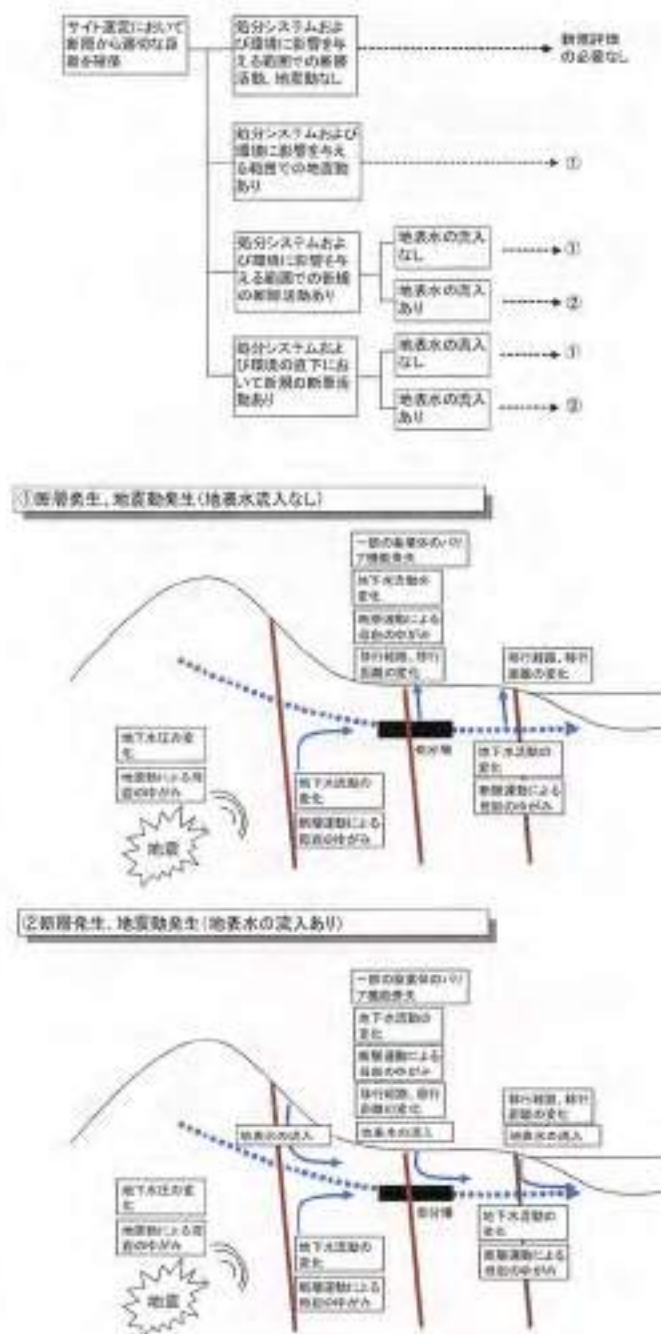


図 5.2-36 地震・断層活動を対象とした作業のイメージ

上段：事象の発生様式の種類例
 中下段：影響発生のパターンの分類例

参考文献

DOE (2001) : Yucca Mountain Preliminary Site Suitability Evaluation, DOE/R7-0540.
 SKB (1999) : SR97 - Post-closure safety, Main Report Summary, SKB Technical Report TR-99-06.

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

本課題においては、安全規制に係る指針や基準等の策定に資する基盤的な情報を整備することを目的として、安全評価の基本的考え方に則する検討を進めている。平成 13 年度までに、「第 2 次取りまとめ」に基づき安全評価の時間スケールに関する論点の整理を行うとともに、天然安全指標を用いた補完的安全評価技術に関する方法論やデータベースの整備を進めてきた（サイクル機構、2002）。

地層処分の安全性は、処分事業の段階に応じて安全評価の結果などを踏まえ、安全規制などと照らして判断されていくことから、安全評価の基本的考え方を検討する上では、どのように段階的な意思決定が進められるべきか、その中で安全評価に基づくサーフェイケースの構築はどのような役割を果たすのかについて概念的な考え方を整理しておくことが重要である。国際的にも処分事業における段階的な意思決定のあり方について検討が進められており、関連する報告書が国際機関等から公表されているところである。また、わが国においても、「安全規制の基本的考え方」において、処分事業の段階的な進め方に対応した安全確保方策を講じることが必要であるとし、安全確保方策の検討に際して、わが国における安全規制の内容だけでなく、国際機関、諸外国等における立地要件、安全確保の内容等を参考とすることとしている。平成 14 年度の補完的安全評価技術の成果については、5.2.5 で述べることとし、ここでは、安全評価の基本事項を検討する上で重要となる段階的意意思決定の進め方及び意思決定に際してのサーフェイケースの役割について、国際的な検討状況を整理する。

② これまでの成果（国際的な考え方等のまとめ）

i) 論理的な観点を踏まえた段階的な意思決定のあり方

わが国では、高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の最終処分として地層処分を行うことを基本方針としている（通商産業省告示第 591 号「新

定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」）。原子力発電により恩恵を受ける現世代は、廃棄物を安全に処分し、後世代に廃棄物の管理に関わる負担を残さないようにすべきである（OECD/NEA、1995）とする倫理的な視点がある。その一方で、現世代の行為によって将来世代の意思決定の自由を妨げるべきではないとする見方（SKN、1988）がある。すなわち、世代間の公平を重視する観点からは、将来世代に最少の負担と最大の選択枝を残すことが同時に求められることになる。

地層処分は、多重の安全機能を有し人間の関与を必要としない受動的システムにより、処分事業終了後の長期安全性を確保する。一方、処分場の閉鎖後も一定期間は廃棄物の回収が可能であり、地層処分は将来世代による選択の余地を狭める処分方法ではない（OECD/NEA、1995）。

安全評価の目的は、処分システムの将来挙動を予測し、将来の人間への影響を言い当てるものではなく、地層処分システムの性能を現在適用できる安全指標と対比して、地層処分の技術的信頼性を判断するための材料を提供することである（「第 2 次取りまとめ」）。安全評価において取り扱う不確実性には、知識・情報を帯えることによりある程度減らすことのできるものと、知見の蓄積とは無関係に存在するものがある。前者の例として地質環境の不均質性があり、これはある程度の定量化は可能であるものの、過剰な調査による安全性への影響を考慮すれば必ずと限界があり不確実性をなくすることはできない。後者の例としては天然現象の時間的推移や将来の人間活動に関する予測の不確実性がある。これらの不確実性を安全評価において適切に取扱うことなどを判断材料として意思決定を進めていくこととなる。

安全評価上、有為な問題点を残したまま処分事業を性急に進めることは避けなければならない。世代内の公平の観点からは、原子力発電による恩恵は国民全てが受けるのに対し、処分場の負担は限られた地域の自治体や住民が負うものであるため、現世代における恩恵を有効に活用しつつ、社会の意見を取り入れつつ公開正大に意思決定を進めていくことが極めて重要となる（NRC、2001）。

ii) 意思決定における判断と最適化

地層処分に関わる不確実性の存在により、処分システムの長期性能を完全に理解し、安全性を裏面することは不可能であり、安全性の提示や判断

は、合理的な保証 (reasonable assurance) の範囲内で行われるべきとする国際認識がある (IAEA, 1997)。

国際放射線防護委員会 (ICRP) が示した放射線防護の最適化の考え方 (ICRP, 2000) は、地層処分に対し社会的な正当性が得られるよう、経済的、社会的要因も考慮して、達成可能な範囲で、線量を低減するために資源を投入し、対策を講じていくことが適切であるというものである。これは地層処分に関わる上記の倫理的な原則や合理的な保証の考え方とも整合するものである。

最適化のための対策としては、安全確保の考え方 (「安定な地質環境に性能に余裕をもたせた人工バリアを構築する」など) に基づき、サイト選定、処分場の設計などが講じられる。これらの対策は、処分場構築の進展に応じて段階的に講じられるため、最適化は段階を踏んで進められる意思決定のプロセスと考えられている (JAEA, 2003)。このような進め方では、将来世代が計画を完了するために多大な資源を投入する必要のないようなやり方が選ばれるべきと考えられる。

最適化に関する意思決定においては、安全評価の結果が所定の線量やリスクの値を超えないこと、あるいは、超えるような事象の発生可能性が対策により合理的に達成可能な範囲で低減されていることを確認するだけでなく、対策そのものの信頼性についても確認することが考えられる (IAEA, 2003)。

対策の信頼性確認については、対策により所期のシステム性能を確保したり、システム性能の評価に関し、不確実性を低減できること、あるいは不確実性の影響を減りやすくすることができることを、性能評価解析などにより示すことが考えられる。また、それぞれの対策の品質について保証することも、対策の信頼性確認にとって重要となる (OECD/NEA, 1999)。

III) 段階的な意思決定におけるセーフティケースの役割

段階を進めるにつれてサイトや設計に固有な情報に基づいて繰り返しセーフティケースを作成することが考えられる (OECD/NEA, 2001)。セーフティケースは、処分事業のある段階において、処分場が長期におたって安全であるということを支持する論拠を集めたものである。セーフティケースは、安全評価の結論やそれに対する技術的信頼の表明

などで構成される。さらに、ある段階において安全評価上重要な未解決の問題がある場合、後の段階でその問題を合理的に取り扱うことができるとの見通しを示しておくことが求められる (OECD/NEA, 1999)。

放射線防護原則の遵守の評価は、セーフティケースに基づくと考えられている (ICRP, 2000)。セーフティケースは、実施側における事業の推進に関わる意思決定、あるいはそれに対する規制側の判断において中心的な役割を果たす (NRC, 2002)。セーフティケースの構築において信頼性を高めるための鍵となる論点は、地層処分システムが本来的に有する頑健な性能と安全評価に関わる信頼性向上の観点に基づき、表 5.3-1 のとおり整理されている (OECD/NEA, 2002)。

表 5.3-1 安全性に関する信頼性を高めるために鍵となる論点 (OECD/NEA, 2002 より)

項目	論点
地層処分システム概念に関する信頼性	<ul style="list-style-type: none"> - 多量バリエーションに固有の頑健さ - 起こりそうにない (low) かつシナリオの決定と検証 - 天然の放射性物質や日常の事例との比較
アーキタイプシステムの開発に関する信頼性	<ul style="list-style-type: none"> - 研究プロトタイプやサイト調査の例 - 品質保証の手法 - データのソースと取得手段 - データの信頼性を裏付ける手法の適用
評価アプローチに関する信頼性	<ul style="list-style-type: none"> - 論理的、理解し体系的な評価アプローチ - 理解し検証できる程度に基づく評価の実施 - 繰り返しのアプローチによる特殊の検証 - 独立の専門家に依頼するレビュー
性能評価モデルに関する信頼性	<ul style="list-style-type: none"> - 評価結果が直感的に適切であることの説明 - 代替の概念モデルとモデル評価アプローチの検討 - 物理的なものと概念的なもの - 室内試験や野外での調査に基づくモデルの信頼性評価 - モデル間の比較評価 - マニュアルアプローチとの比較 - 高度地理学的分析ツールなどの独立した検証
セーフティケースと性能評価解析に関する信頼性	<ul style="list-style-type: none"> - 信頼性に関する明確な説明と仮定の信頼性の根拠 - 仮定が代表的であるか保守的であるかの評価 - 感度解析による検証 - 不確実性の影響に備える明確な考え方 - 現実の安全裕度 - 現実の観点からの安全性に関する検証結果
設計とサイト特性評価へのフィードバックに関する信頼性	<ul style="list-style-type: none"> - 処分施設設計の進捗に対する適切な情報 - 処分システムの総合的な品質と安全化

段階的な意思決定プロセスでは、段階を踏んで継続的にセーフティケースに関する信頼性を高めることによって、次の段階での意思決定の負担を軽減していくことができると考えられており (OECD/NEA, 1995)、国民や地域住民、国、関係地方自治体、規制側などの意見を取り込みつつ、透明性を確保し、注意深く、慎重な意思決定を行うこ

とが適切とされている (NRC, 2002)。

地層処分事業は各段階において、前の段階に邁ることができる可逆性を確保しつつ進めるという考え方がある (OECD/NEA, 2001)。可逆性を確保するためには、前の段階における意思決定の再評価や、段階を後戻りするための技術面や資金面などの保証が求められ、意思決定後の状況によっては後戻りできる姿勢が処分の原則に組み込まれているということを示すこととなる (OECD/NEA, 2001)。

段階的意思決定においては、前の段階のセーフティケース（安全に関する判断の拠り所）をくつがえす可能性のある新たな知見が得られた場合、前の段階に遡ってセーフティケースを再評価し、必要に応じてそれまでに講じられた対策を見直すことが考えられる (例えば、OECD/NEA, 2001)。処分場の開鎖に至るまで、可逆性や回収可能性などの選択肢を残しつつ地層処分システムの構築を進めることが求められる。

なお、段階を踏まえるごとに根拠や論理構築が充実してくることから、プロジェクトの進展につれて後戻りする必要性が生じる可能性は小さくなり、選択肢も限られたものとなっていくと考えられる (NRC, 2002)。また、セーフティケースは、廃棄体の定置後においては、新たな情報によりくつがえされることのないよう十分に頑健であることとされている (OECD/NEA, 2001)。

iv) 具体的な段階的意決定のアプローチ

段階的な意思決定について、米国科学アカデミーは、必要に応じて適りを保証しつつ段階的かつ柔軟に計画を進めることが「より成功を導きやすいアプローチである」との考え方 (adaptive staging) を提案している (NRC, 2003)。これは、「地層処分事業」と「地層処分」の違い、すなわち処分事業の期間（少なくとも数十年）において地層処分全体としての影響が有意かどうか（数十万年先）を直接確認することはできない。このため、処分事業の期間において将来の地層処分システムの性能について社会の信頼を得つつ意思決定を行う必要があると考え、処分事業の達成目標をおおまかに定めておき、それを達成するための1つの標準的な段階的進め方を設定しつつも、安全規制の変更も視野にいれつつ段階の進展に応じて柔軟に意思決定を進めることが望ましいアプローチであると考えているものである (NRC, 2003)。

具体的な段階的進め方としては、相当期間の可

逆性を保証することにより処分事業の開始に関する意思決定の負担を軽減するため、米国では、まず処分場建設段階において、処分場全体の内から限られた割合（10%）の処分坑道を先行的に建設して問題のないことを確認したのち、操業段階において、残りの処分坑道を建設するような段階的な進め方が提案されている (NRC, 2002)。また、スウェーデンでは、同様に全廃棄体のうちの10%を先行的に埋設してモニタリングにより問題のないことを確認したのち残りの全数を処分する進め方としている (SKB, 2001)。さらにスイスでは、処分施設とは別に長期間モニタリングを行うパイロット施設を設け、パイロット施設での数十年のモニタリングにより安全確認がなされた後、処分施設を開始するとの進め方が政府の諮問機関により提唱されている (EKRA, 2000)。

③ まとめ

地層処分システムの構築における段階的な意思決定を行うプロセスにおいて、透明性を確保し、安全性や倫理的な観点から地層処分に対する国民からの理解を得つつ、合理的な保証が得られるように進めることが重要となる。意思決定の判断材料として、セーフティケースが中心的な役割を果たすと考えられるため、セーフティケースの信頼性を段階的に高めていくことが重要である。

参考文献

- EKRA (2000): Disposal Concepts for Radioactive Wastes. Final Report, Experten-gruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle.
- IAEA (1997): Regulatory Decision Making in the Presence of Uncertainty in the Context of the Disposal of Long Lived Radioactive Wastes, IAEA-TECDOC-975.
- IAEA (2003): Geologien: Disposal of Radioactive Waste, Draft Safety Requirements, DS154, IAEA Safety Standards Series, International Atomic Energy Agency Vienna.
- ICRP (2000): Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long Lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publication 81, Pergamon Press, Oxford and New York.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002): 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発 平成13年度報告一、サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2002-003.
- OECD/NEA (1995): The Environmental and Ethical Risks of Geological Disposal: A Collective Opinion of the NEA Radioactive Waste Management Committee,

- OECD/NEA, Paris.
- OECD/NEA (1999): Confidence in the Long Term Safety of Deep Geological Repositories: Its Development and Communication, OECD/NEA, Paris.
- OECD/NEA (2001): Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste. Reflections at the International Level. OECD/NEA, Paris.
- OECD/NEA (2002) Establishing and Communicating Confidence in the Safety of Deep Geologic Disposal. OECD/NEA, Paris.
- NRC (2001): Disposition of High-level Waste and Spent Nuclear Fuel: The Continuing Societal and Technical Challenges, National Research Council
- NRC (2002): Progress Report: Principles and Operating Strategies for Staged Repository Systems, Attachment A of a letter report to Dr. Margaret Chu from Board on Radioactive Waste Management . National Research Council].
- NRC (2003): One Step at a Time: The Staged Development of Geologic Repositories for High-Level Radioactive Waste, National Research Council
- SKB (2001): ROAD-Programme 2001. Programme for Research, Development and Demonstration of Methods for the Management and Disposal of Nuclear Waste, SKB Technical Report. TR-01-30.
- SKN (1988): Ethical Aspects of Nuclear Waste. Some Salient Points Discussed at a Seminar on Ethical Action in the Face of Uncertainty in Stockholm, Sweden: September 8-9, 1987, SKN Report 29.

2) シナリオ開発技術の高度化

① 課題と計画の概要

「第2次取りまとめ」におけるシナリオ開発では、サイトを特定せずに幅広い地質環境を対象として、国際的なコンセンサスの得られている体系的なアプローチ(OECD/NEA, 1991)を踏襲しながらシナリオの作成を行った。この「第2次取りまとめ」におけるシナリオ開発を出発点に、シナリオ開発技術の高度化として、実際の地質環境への適用を念頭におきながら、十分性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。

平成13年度までに、シナリオ開発に関する国際的な動向を整理し、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、シナリオ開発技術の高度化に向けて今後重点的に取り組むべき課題を設定した(サイクル機構, 2002)。

平成14年度は、課題として設定したシナリオ開発プロセスの透明性と追跡性を確保するための手法について、その概念検討を行った。

② これまでの成果

シナリオ開発プロセスの透明性と追跡性を確保することは、諸外国の安全評価においても継続的に検討が続けられている課題である(例えば、OECD/NEA, 2001)。ここでは、諸外国の検討事例も参考とし、シナリオ開発プロセスの透明性と追跡性を確保しながら、かつ、FEPリスト、シナリオおよび解析ケースの設定の十分性や網羅性も確保する、という命題に対してどのようなアプローチを取り得るかを検討した。また、そのアプローチを、シナリオ開発の実務的な方法論として具体化していくための手段を検討した。

i) アプローチの検討

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は、シナリオ開発において完全に排除することはできない専門家等の判断をプロセスの中で明示し、かつ適切に記録していくことが重要である。

一方、FEPリスト、シナリオおよび解析ケースの設定の十分性や網羅性を確保するためには、シナリオ開発プロセスが、

(a) FEPリスト→シナリオ

(b) シナリオ→モデル

(c) モデル→解析ケース

といった複数の処理を必要とし、また各処理が情報の変換を含むことから、これらの処理を体系的かつスムーズにつなぎ、情報の抜け落ちなどを極力抑えるための工夫が必要である。ここで、情報の抜け落ちについては、専門家等の判断がプロセス中で分散していることも原因の一つになると考えられる。

以上のことを勘案し、シナリオ開発手法の検討のために、以下のアプローチを策定した。

- ・ 上記の複数の処理に共通的に適用できるフレームの構築
- ・ 専門家等の判断をプロセス中の特定の段階に集約
- ・ 既存のシナリオ開発あるいは情報処理分野で利便性のある技術の応用

ii) アプローチを具体化する手段の検討

まず、(a)～(c)の処理のための共通的なフレームを検討するにあたり、最初の(a)の処理において特に重要となるFEPの相関関係の表示の仕方に着目した。ここで、FEPの相関関係の表示のためには、従来、プロセス・インフルエンス・ダイアグラム(PID: 図5.3-1の左上参照)あるいは相互作用マトリクス(例えば、Rock Engineering System: RES)を用い、その中ではFeatures, Events およびProcessesを同等なものとして配置してきた(例えば、RESでは、これらを全て対角要素に配置し、これら対角要素間の相関関係を非対角要素にて表現した)。これらFEPの相関関係に基づきシナリオを構築すること、さらにはモデルや解析ケースを構築することを考えた場合、FEPの相関関係をシナリオおよびモデルの表現に近い形で整理できれば、(a)と(b)の処理のつながりがスムーズになると考えられる。また、基本的に、モデルに対してパラメータを付与することにより解析ケースが設定されることを考えると、(a)と(b)の処理のつながりがスムーズになることが、(b)と(c)の処理のスムーズなつながりにも波及すると考えられる。

これらのことから、例えばRESにおけるFeatures, Events およびProcessesの配置について、対角要素に特性や状態量を表すFeaturesを、対角要素のFeaturesを入出力とするProcessesやEventsを非対角要素に配置することにより、RESの中でのFeaturesとProcesses/Eventsのまとまりをシナリ

オの一部と対応づけたりあるいはモデルと対応づけることが容易になると期待される（図 5.3-1 の右上参照）。この考え方は、SKB での THMC ダイアグラムにおける整理の考え方と一部共通している（SKB, 1999）。

さらに、このような FEP の相関関係の表現の工夫に加えて、各 FEP に importance level などのインデックスを与えることにより、インデックス値によるスクリーニングの機能を持たせることが考えられる。このとき、インデックスとして複数のものが与えられるようにしておくことにより、インデックスの種類とインデックス値の与え方の組み合わせで、様々なスクリーニングが可能になる。このようなインデックスの導入は、スクリーニングのみではなく、専門家の判断等を必要とする箇所を集約するという観点からも有効になる可能性がある。さらに、このような RES の形での FEP の相関関係の表現は、既存の情報処理技術の適用により計算機上に展開しやすいことから、専門家の判断等を含む種々の情報の記録においても有効である。

以上の概念を、従来の方法論と比較しつつ図 5.3-1 にまとめる。



図5.3-1 シナリオ開発に関わる方法論の概念
(従来の方論との比較)

なお、FEPの総数が100を超えることを考えると、上記のような工夫をしたとしても FEP のハンドリングが煩雑で複雑になる可能性がある。その場合には、例えば、全 FEP の相関関係を 1 枚の RES で表現するのではなく、一旦、地層処分システムに関わる安全機能などと複数の FEP の相関関係を対応付けることにより、それ以降は安全機能等を中心にした機能相関図と言えるものを中心に (a) ~ (c) の処理を行うことも考えられる。

③ まとめ

シナリオ開発プロセスの透明性と追跡性を確保するための手法について、その概念検討を行った。その結果、FEP の相関関係の表現を工夫することにより、シナリオ開発プロセスでの複数の処理をスムーズにつなげることができる可能性を見出した。

今後当面は、このような工夫が、シナリオ開発の実務的な方法論として有効であることを確認するために、方法論としての具体化を進めるとともに、例題を用いた試運用を行う予定である。

参考文献

- OECD/NEA (1991) : Review of Safety Assessment Methods, A Report of the Performance Assessment Advisory Group of the Radioactive Waste Management Committee, OECD Nuclear Energy Agency.
- OECD/NEA (2001) : Scenario Development Methods and Practice, An Evaluation Based on the NEA Workshop on Scenario Development, Madrid, Spain, May 1999, OECD Nuclear Energy Agency.
- SKB (1999) : SR97 - Post-closure safety, Main Report Summary, SKB Technical Report TR-99-05.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発 - 平成 13 年度報告一, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2002-003.

5.3.2 不確実性評価技術

① 課題と計画の概要

地層処分地の安全評価では、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、種々の不確実性の影響を個別に評価し安全評価上重要な要因を整理した。さらに、平成13年度までに、特にデータの不確実性に着目し、データの不確実性の影響を網羅的に考慮することが可能な解析コードを構築するとともに、データの不確実性が安全評価結果に及ぼす影響を定量化するための手法の検討を進めてきた(例えば、Kakusugi et al., 2000)。また、このコードを用いた評価結果に基づき、結果に対する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進めてきた(若杉ほか, 2002; 牧野ほか, 2003)。

今後はデータの不確実性のみならず、モデルやシナリオの不確実性に関しても、不確実性要因を整理し、それらの影響評価を実施するとともに、安全評価結果に対する重要度を定量的に把握する必要がある。このため、平成14年度は、まずモデルの不確実性に着目し、「第2次取りまとめ」の安全評価において、保守的な観点から考慮されなかったプロセスや簡略化されて取り扱われたプロセスを整理するとともに、特に重要と考えられる不確実性要因に関して影響評価を実施するための技術開発を進めた(若杉ほか, 2003)。

② これまでの成果

「第2次取りまとめ」では、安全評価上の重要なプロセスの一つとして掘削影響領域(以下「EDZ」)内での地下水流れが挙げられている。そこで、ここではEDZ中の核種移行に着目し、「第2次取りまとめ」の安全評価において簡略化して取り扱ったEDZ中の核種移行プロセスをモデルの不確実性因子とし、これが評価結果に及ぼす影響について検討した。

「第2次取りまとめ」のモデルでは、緩衝材外側に達した核種はEDZを通過する地下水と瞬時に混合し、その全量が周辺の母岩中の亀裂に移行するモデルを設定した(図5.3-2参照)。すなわち、EDZ内での核種の移行遅延効果については保守的に考慮しなかった。しかしながら、EDZは処分坑道掘削の影響を受けた岩盤として想定された領域であり、緩衝材外側に達した核種は、そこに接するEDZ内の亀裂部のみならずEDZ内の基質部(以下「マトリクス」)にも移行し、取着により遅延されることが期待される。この時、緩衝材外側からEDZ内のマトリクスへ移行した分、少ない核種量が緩衝材外側からEDZ内の亀裂へ流入する。さらに、緩衝材から直接マトリクス内へ移行した核種は、マトリクス内での移行遅延効果も期待できる。しかしながら、一方で、緩衝材外側からマトリクスへの移行により、マトリクス中の核種濃度が増加し、亀裂からマトリクスへの拡散(通常、「マトリクス拡散」として亀裂媒体での主な移行遅延効果として考えられている)が抑制されるなど亀裂内での核種移行を促進させる影響も考えられる。

本検討では、これらの移行プロセスを考慮し、EDZのバリア性能を定量的に把握することを目的として、人工バリア及びEDZを対象に核種移行モデルを構築し、EDZの移行遅延効果について検討した。以下に、その結果をまとめる。

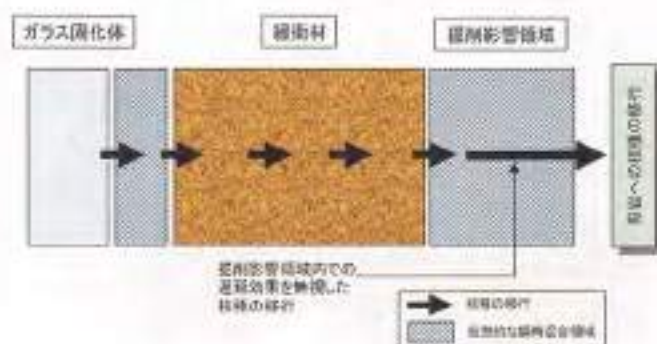


図5.3-2 「第2次取りまとめ」における人工バリア中核種移行モデルの概念図

1) 人工バリア及びEDZ中核種移行モデルの開発

本検討では、人工バリア及びEDZの移行遅延効果を評価するための核種移行モデルを構築するために、以下のことを仮定した。

- ・処分坑道横置き方式を仮定し、廃棄体1本あたりの緩衝材及びEDZを評価対象とする(図5.3-3参照)。

・EDZ 中に、以下の2つの領域を考慮する。

－ 亀裂

緩衝材外側に到達した核種は、そこに接する亀裂へ移行する。亀裂内へ移行した核種は、マトリクス拡散をともない移流により移行する。なお、亀裂表面への収着は考慮しない。

－ マトリクス

緩衝材外側に到達した核種は、そこに接するマトリクスへ移行する。マトリクス内へ移行した核種は、収着をともない拡散により移行する。なお、マトリクス中での核種濃度は、周方向の勾配はなく、軸方向及び半径方向（図 5.3-3 参照）にのみ勾配を持つと仮定する。

- ・EDZ 中に単一の平行平板亀裂が半径方向（図 5.3-3）に存在すると仮定する。なお、亀裂は EDZ の中心に位置する。
- ・評価上考える最も早い亀裂内流速として、廃棄体 1 本に対して算出された EDZ を通過する流量が EDZ 内の 1 本の亀裂に流れると仮定する。
- ・亀裂内の流れは、保守的評価かつモデルの簡単化の観点から、緩衝材を中心に放射状に流れると仮定する。
- ・全評価領域において、複数の崩壊連鎖を同時に考慮する。
- ・亀裂外側に達した核種は母岩へ移行すると仮定し、その移行率を EDZ からの核種移行率とする。

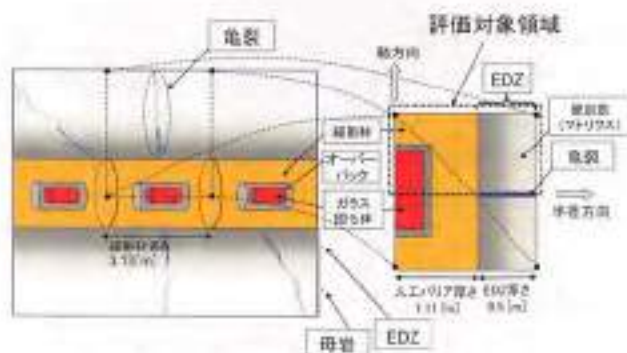


図 5.3-3 人工バリア及び EDZ の幾何形状

以上の仮定に基づき、人工バリア及び EDZ 中の核種移行挙動を表現する概念モデルを構築する（図 5.3-4 参照）。なお、本モデルでは、緩衝材及び EDZ の境界において、緩衝材からマトリクスへの核種の移行、及び緩衝材から亀裂への核種の移行の双方を同時に解く必要があるため、核種の

移行挙動を二次元以上で考慮する必要がある。このため、本検討では、二次元円筒座標系を用いて数学モデルを構築し、さらに、この数学モデルに基づき、GUI 環境で容易にモデル構築が行えるシミュレーションプラットフォーム GoldSin (Golder Associates, 2001) を用いて、人工バリア及び EDZ 中核種移行解析モデル（以下「二次元 EBS/EDZ モデル」）を構築した。

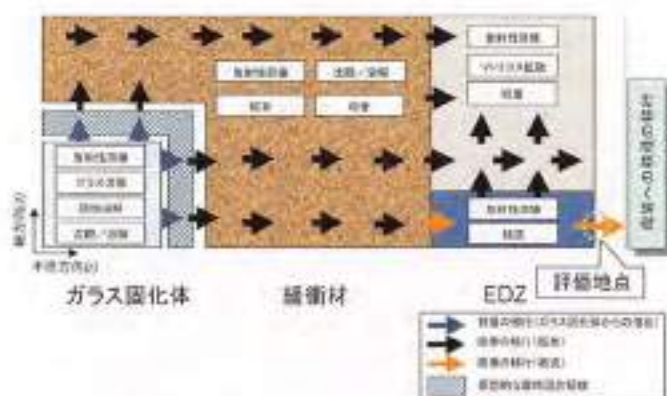


図 5.3-4 二次元人工バリア及び EDZ 中核種移行モデルの概念図

ii) EDZ の核種移行遅延効果の検討

i) に示した二次元 EBS/EDZ モデルを用いて、EDZ からの核種移行率を評価した。なお、解析に用いた人工バリアの幾何形状、EDZ の幾何形状及び核種移行データは、「第 2 次取りまとめ」のレファレンスケースに準拠し設定した。結果については、二次元 EBS/EDZ モデルと同じ幅を持つ EDZ の移行遅延を無視した「第 2 次取りまとめ」での一次元のモデル（以下「一次元 EBS モデル」）の結果と比較した。比較的半減期が短く、収着性の高い Pu-239、及び安全評価上重要な核種の一つである Cs-135 の EDZ からの移行率の経時変化を図 5.3-5 及び図 5.3-6 に示す。二次元 EBS/EDZ モデルにおける EDZ からの移行率は、緩衝材と亀裂の断面積が小さいことに起因する少ない核種量の亀裂への流入及びマトリクス中での収着による移行遅延効果により、その最大値（以下「最大移行率」）が、一次元 EBS モデルと比較して、Pu-239 で 3 桁低減、Cs-135 で 1 桁低減した。

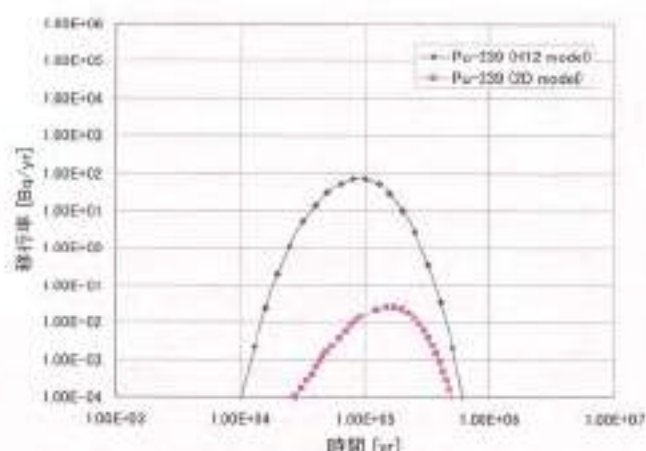


図 5.3-5 EDZ からの移行率の経時変化 (Pu-239)

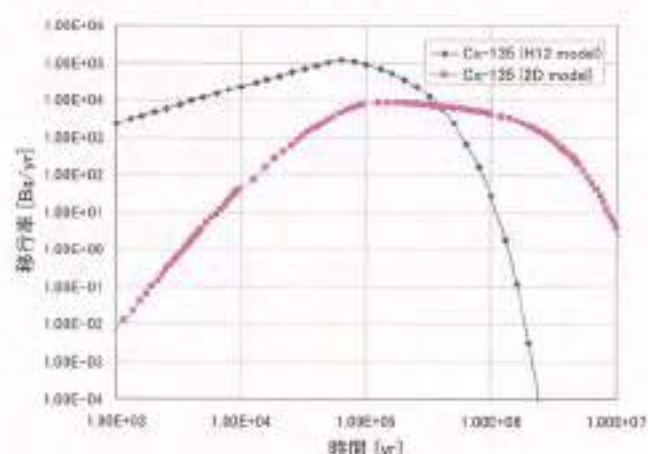


図 5.3-6 EDZ からの移行率の経時変化 (Cs-135)

次に、Cs-135 の最大移行率が緩衝材及び EDZ 中のどのような移行メカニズムにより規定されているのかを詳細に把握するために、各地点における単位時間当たり、単位断面積あたりを通過する核種量（以下「フラックス」）を評価した（図 5.3-7 参照）。亀裂とマトリクスの境界では、EDZ 外側近傍を除き、マトリクスから亀裂へ核種が移行し、亀裂内のフラックスが増加する要因となっている。なお、EDZ 外側近傍における亀裂とマトリクスの境界では、マトリクス拡散が生じているが、フラックスが小さいことから、EDZ からの移行率への影響は小さいと考えられる。

以上のことから、Cs-135 の最大移行率は、核種が緩衝材から直接亀裂へ流入するプロセスに加え、緩衝材からマトリクスを通過して間接的に亀裂へ移行するプロセスにより規定されていることが明らかとなった。



図 5.3-7 Cs-135 の最大移行率時における緩衝材及び EDZ 中のフラックス
（図中の矢印の色はフラックスの大きさ（赤：大⇨小、青）を、矢印の向きは移行の向きを表す）

次に、Cs-135 を対象として、二次元 EBS/EDZ モデルにおける EDZ の移行遅延効果を各バリア中の存在量という観点で検討した（図 5.3-8 参照）。

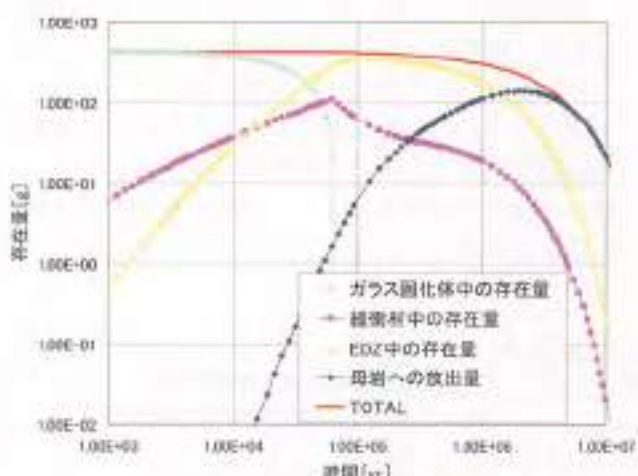


図 5.3-8 各バリアでの Cs-135 の存在量
（二次元 EBS/EDZ モデル）

緩衝材中での収着性の低い Cs-135 は、ガラスの全量が溶解する約 7 万年時点で、初期インベントリの 1/4 が緩衝材中で保持され、残りの多くが EDZ 内に保持される。さらに、数百万年の間、初期インベントリの約 70% の量が、人工バリア及び EDZ 内に保持される。このことから、人工バリア周辺に掘削の影響を受け、透水性の高い岩盤が存在する場合でも、人工バリアから母岩への核種の放出を抑制するバリアとして、安全性に大きく貢献する可能性があると考えられる。

iii) EDZ 中核種移行パラメータを対象とした感度解析

EDZ 中での核種移行解析において、どのパラメータが EDZ からの移行率に重要な影響を及ぼしているのかを把握するために、Cs-135 を対象に感度解析を実施した。感度解析の解析ケース及びデータを表 5.3-2 に示す。なお、ここでは i) 及び ii) に示した解析ケースをベースケースと呼ぶ。

表 5.3-2 感度解析ケースの一覧

パラメータ	単位	ベースケース	感度解析		備考
			最小値	最大値	
分配係数 (マトリクス)	m ² /kg	0.05	0.001	10	第2次取りまとめのデータ不確実性ケースより引用
亀裂内流量	m ³ /yr	1.00E+03	1.00E+04	1.00E+02	第2次取りまとめのEDZ通過流量のデータ不確実性ケースより引用
拡散係数と面積率	-	0.5	0.1	1	第2次取りまとめのデータ不確実性ケースより引用
移行率	%	2	1	3	第2次取りまとめのデータ不確実性ケースより引用
放射密度	Mg/m ³	2.64	2.67	2.61	第2次取りまとめのデータ不確実性ケースより引用
実効拡散係数	m ² /s	3.00E-12	6.00E-14	1.00E-10	第2次取りまとめのデータ不確実性ケースより引用

感度解析では、EDZ からの移行率の最大値を指標とした。結果を、図 5.3-9 に示す。

EDZ からの最大移行率の変動が最も大きかったパラメータは、分配係数であり、その次が、亀裂内流量であった。特に分配係数の最大値のケースは、遅延効果の増加により、放射性崩壊による減衰効果が顕著化し、最大移行率も大きく低減したと考えられる。

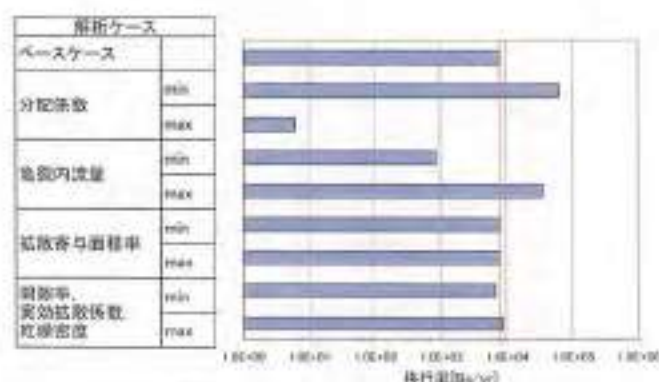


図 5.3-9 感度解析の結果

③ まとめ

モデルの不確実性に関する検討として、「第2次取りまとめ」の安全評価において簡略化して取り扱った EDZ 中の核種移行に着目し、二次元核種移行解析モデルにより EDZ の遅延効果を定量的に評価した。その結果、一次元 EBS モデルと比べて、比較的半減期が短く、取着性の高い Pu-239 の最大

移行率は 3 桁減少し、安全評価上重要な核種の一つである Cs-135 の最大移行率は、1 桁減少した。また、EDZ からの最大移行率を規定する主要な移行メカニズムとして、マトリクスから亀裂への移行が大きく関係している可能性が示された。

さらに、EDZ 中の重要なパラメータを明らかにするために、Cs-135 を対象に感度解析を実施した。この結果、分配係数と亀裂内流量が EDZ からの最大移行率への感度が高いことがわかった。

今後は、引き続き安全評価結果への影響が高いと考えられる核種移行プロセスについてのモデルの不確実性要素やシナリオの不確実性要素を評価するための基盤技術、さらには、それらの不確実性要素の影響度を定量的に評価するための基盤技術の構築を実施していく予定である。また、パラメータの不確実性についても、その影響を網羅的かつ効率的に評価するための技術開発や多変量解析を活用した感度分析の適用性の検討を継続していく。

以上の課題を進めることにより、合理的かつ戦略的な地層処分研究開発を支援するための技術として活用していく。

参考文献

- Goldier Associates (2001) : GoldSim Contaminant Transport Module, User's Guide, Goldier Associates Inc.
- 牧野仁史, 若杉圭一郎, 小尾 繁 (2003) : 核種移行解析結果に対する感度分析の方法論の検討, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, p.942.
- 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.
- 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, サイクル機構技術, No14, JNC TN1340 2001-010, pp.149-160.
- 若杉圭一郎, 牧野仁史, 小尾 繁 (2003) : 2 次元核種移行解析モデルによる範囲影響領域の遅延効果に関する検討, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, p.872.
- Wakasugi, K., Webb, E.K., Makino, H., Ishihara, Y., Ijiri, Y., Sawada, A., Baba, T., Ishiguro, K. and Umeki, 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, PSAM5 Vol.4, pp.1469-1475.

5.3.3 技術情報統合システムの整備

① 課題と計画の概要

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は、「深地層の科学的研究」、「処分技術の信頼性向上」および「安全評価手法の高度化」の3分野で構成されている。これら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、さらには研究開発分野内において、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、ノウハウなど）のやりとりが必要となる。今後の深地層の研究施設やエントリー、クオリティなどの施設を活用した基盤的な研究開発においては、繰り返しアプローチなどにより段階的に詳細化あるいは更新される地質環境情報、および、それに応じて増大・多様化していく各分野の技術情報を体系的に取扱いながら、総合的かつ効率的に実施していくことが重要となる。これら技術情報を円滑にやりとりし、総合的かつ効率的に利用していくためには、各分野間および分野内でのような技術情報のやりとりが必要であるかの分析を行う必要がある。この分析に基づき体系化された技術情報およびその流れを一元的に管理するシステムを構築し、各研究者が分野を越えて技術情報を共有・利用可能な環境を整備することは、研究開発の連携支援の一つの有効な手段であると考えられる。また、地層処分技術の研究開発は長期にわたるプロジェクトであり、得られていく知見を体系的に集約・記録していくことは、技術伝承の観点からも重要である。以上のことから、研究開発分野間・分野内での技術情報の共有・利用環境を提供し、連携の支援を行うことを目的として、「技術情報統合システム」の開発に取り組むこととした。

技術情報統合システム（本システムについては、サイクル機構(2002)では「統合解析システム」として紹介）については、平成13年度より、3分野における技術情報とその流れの体系化についての検討を開始し（サイクル機構、2002）、平成14年度には、「第2次取りまとめ」を中心とする技術情報の体系の整理、およびシステム化に向けた製作設計とプロトタイプング（システムの機能などの部分的な試作）を行った。

② これまでの成果

1) 技術情報の体系化

3分野の連携において重要となる技術情報の体

系化にあたっては、サイクル機構内の各コーザの立場および使用の目的などから、下記の3つの視点から利用可能となるように留意した。

a) 「個別研究での技術情報の管理・活用」

主に調査・実験・モデル化を行う個別研究作業を担当するユーザの視点。例えば、以下の作業の支援に利用することが考えられる：

- ・個別研究に関わる地質環境調査や室内試験あるいは解析などから得られる技術情報の蓄積・活用
- ・情報の品質保証(トレーサビリティ確保)
- ・自分の担当作業の上流下流の把握（例えば：データ取得者が下流のモデル化作業内容を把握。あるいは、モデル化作業者が上流のデータ取得状況を把握）
- ・自分の研究が設計や安全評価のどこに反映されるかの把握

b) 「評価・取りまとめでの技術情報の管理・活用」

主に設計や安全評価およびそれらの取りまとめ作業を担当するユーザの視点。例えば、以下の作業の支援に利用することが考えられる：

- ・個別研究で得られたデータなどを利用した設計や安全評価の実施
- ・設計や安全評価から得られる技術情報の蓄積・活用
- ・自分の担当作業の上流下流の把握（例えば、自分の担当作業のデータ入力項目からワークフローへのリンクを張っておき、ワークフロー表示画面で該当ワーク項目を点滅表示させる）
- ・利用データの整合性やトレーサビリティの確認

c) 「プロジェクトマネジメントでの技術情報の管理・活用」

主にプロジェクトマネージャの視点。例えば以下の作業の支援に利用することが考えられる：

- ・研究全体の進捗状況の把握
- ・問題点・課題の抽出
- ・優先度の判断。

このような視点の違いに対応するため、a)の目的には主に作業の流れをシーケンシャルに記述するワークフローによる整理が、b)の目的には主にFDIベースの現象・特性の相関関係を記述する現象・特性フローによる整理が適しているものと考えられる。また、c)においては、ワークフローに沿ったプロジェクトの進行状況、あるいは現象・特性フローによる評価体系の整備状況を示す両面

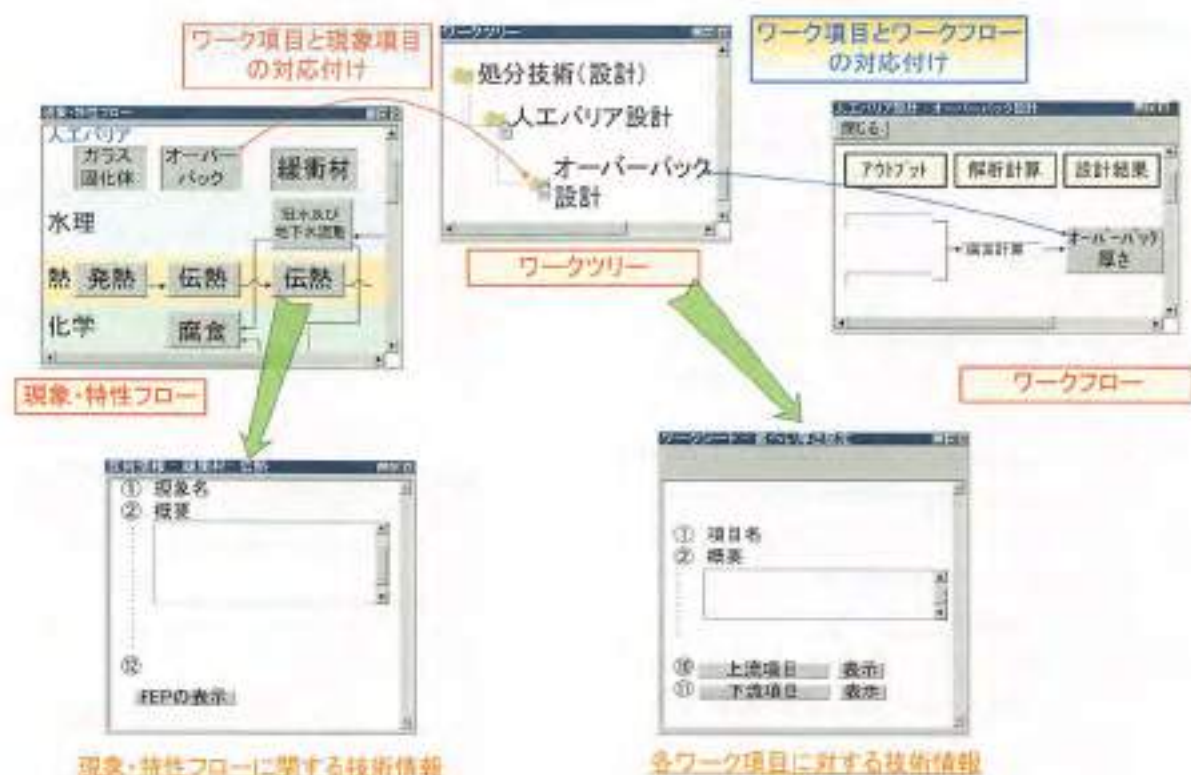


図 5.3-10 システム上の技術情報

を見ることなどで、よりきめ細かな管理が可能となる(伊藤ほか, 2003)。

以上より、技術情報の体系化には、ワークフローのような「個別研究作業の視点」と現象・特性フローのような「評価・取りまとめ作業の視点」を両立させるアプローチをとることが望ましいと考えた。

技術情報およびその流れをフロー形式で整理する試みは、平成13年度から3分野について実施しており、平成14年度には「第2次取りまとめ」をベースとした技術情報の流れのワークフロー化は一通り終了した(石原ほか, 2003a; 辻本ほか, 2003)。あわせて現象・特性の項目に基づく技術情報のフロー化を行った。また、ワークフローの実作業への適用性確認のため、瑞浪越深地層研究所周辺の地質環境モデル構築作業の一部についてワークフローの適用を試行した。

ii) システムの製作設計

システムの製作設計については、技術情報の体系化(ワークフロー、現象・特性フローによる情報整理)の成果を反映しつつ、システムの全体構成、データベースおよびシステムの基本機能について検討を行った。

ここでは、技術情報の体系化の成果を具体的にシステム上に展開するアプローチについて説明する。まず、技術情報の単位としてワーク項目(一般的な作業の単位)を使用することとし、ワーク項目をその内容に応じて階層構造「ワークツリー」の形に分類・整理する。ツリー構造とすることでワーク項目に対応する技術情報の登録や検索などの操作を容易に行える。また、将来の研究の進展に伴って見込まれる、ワーク項目や技術情報の追加・削除・再分類のような操作も容易に実現可能である。次に、ワークツリーのワーク項目をキーとしてワークフロー、現象・特性フローのそれぞれに関連付ける。この機能によって、i)で述べたような視点の切り替えを可能としている。技術情報の体系化の成果をシステム上に展開したイメージを図5.3-10に示す。

また、システムの基本的な機能(データベース管理機能、可視化機能、解析支援機能)について、それらの実現性を確認するためのプロトタイプ試作を行った(石原ほか, 2003b)。

本システムでは、従来のクライアント・サーバ形式とは異なり、クライアント側は特別なソフトウェアのインストール作業を必要とせず、Webブラウザのみでシステムの機能を利用することを可能

とする。従って、各ユーザの作業用パソコンから本システムの利用が可能である。

iii) 技術情報統合システムによる研究開発の連携支援

技術情報統合システムは、研究開発の連携を支援するツールであり、サイクル機構内の研究、特に速機に直接・間接的に関わる研究との統合を取りつつ、開発を進める必要がある。

本システムの支援による連携のイメージとしては、例えば深地層の研究施設での研究と安全評価の連携について以下のようなものが考えられる。まず、汎用的な視点での技術情報の構造や相関関係を体系的に整備し、設計や安全評価で用いる技術情報の項目と体系、構造を技術情報統合システム上に示す。これらを参考にすることにより、例えば、深地層の研究施設でのモデル構築や水理解析の作業フローとその内容について、設計や安全評価への反映の視点を取り込んだ連携を支援する。具体的には、処分技術（設計）・安全評価で使用する技術情報を整理する視点で、調査におけるアウトプット（解釈・概念化・モデル化）の流れを採用するかを決定する。また、水理解析の業務からは、その内容や解析結果などを、技術情報統合システムに体系的かつトレーサビリティを確保しつつ記録していく。さらに、安全評価などの業務の立場からは、技術情報統合システムに格納されたデータや知識を活用した評価を行い、そこから得られた知見などをシステムを介して、モデルや水理解析作業フローへフィードバックすることにより、モデル構築や水理解析の作業フローおよび内容などの更新に反映し水理解析業務が改善されていく。また、そうしたフィードバックの内容を参考にしながら、技術情報の依存関係などの構造をさらに合理化して、技術情報統合システム内の技術情報の利便性を高めていくことが考えられる。

上記に示した通り、深地層の研究施設計画と設計・安全評価の連携を考えていく中で、技術情報統合システムを支援ツールとして活用しつつ、重要な連携ポイントを抽出し、フィードバックを繰り返し実施することにより、安全評価手法の高度化および処分技術の情報性向上を支援・促進していくことができると考える。

③ まとめ

地質環境調査、処分技術（設計）、安全評価の各分野における技術情報を、個別研究作業の視点、評価・取りまとめ作業の視点、プロジェクトマネジメントの視点から活用可能とするため、「ワークフロー」及び「現象・特性フロー」による「第2次取りまとめ」を中心とした技術情報及びその流れの体系化を実施した。

また、体系化した技術情報及びその流れを共有・活用するために、データベースを中心としたシステムの設計とプロトタイプ試作を行い、システム製作に向けた準備を進めてきた。

平成15年度には、基本システムを製作し、平成16年度からサイクル機構内での試験的な運用を開始する計画である。

参考文献

- 核燃料サイクル開発機構（2002）：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成13年度報告－，サイクル機構技術資料，JNC TR1400 2002-003。
- 石原義尚，福井 裕，西川 寛，伊藤裕徳，松永健一，小原和信，桑山有紀（2003a）：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（Ⅱ），サイクル機構技術資料（研究委託報告書；三菱重工実業株式会社），（登録準備中）。
- 石原義尚，岩本 裕，小林茂樹，根山敦史，遠藤修司，遠藤裕徳（2003b）：地層処分統合解析システムの製作設計（Ⅱ），サイクル機構技術資料（契約業務報告書；三菱重工実業株式会社），（登録準備中）。
- 辻本憲一，福原方紀，野邊茂幸，上野真三，河村裕二，富山寛吉，大橋東洋（2003）：地質環境モデルの構築技術に関する研究（Ⅱ），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），（登録準備中）。
- 伊藤良司，牧野史，若杉圭一，内田雅夫，石原義尚，辻本憲一（2003）：地層処分研究の技術情報統合システムの構築（その1）－研究開発の連携支援への取り組み－，日本原子力学会2003年度の年会要旨集，p. 878。

5.4 安全評価手法の適用性確認

① 課題と計画の概要

処分事業においては、2000年代後半より応募地域における地表からの調査を行う概要調査が開始され、実際の地質環境から得られた情報に基づき予備的な設計や安全評価が行われることになると考えられる。この際に、データ取得から安全評価に至る連携のあり方を整備しておくことが重要となる。この連携については、SKBのサイト調査に関する報告書（SKB, 2001）や2003年6月に開催のOECD/NEAのAMIGOプロジェクト（Approaches and Methods for Integrating Geologic Information in the Safety Case）に関するワークショップなどでも重要な課題として取り上げられており、世界的にも共通の課題となっている。

このような背景の下、実際の地質環境において行われる地表からの調査より得られる情報に対して、「第2次取りまとめ」において適用した一般的地質環境を対象とした評価手法などの適用性を確認あるいは改良していくとともに、調査から安全評価に至る手順を整備することが重要になると考えられる。

本研究では、これらのニーズに応えるために、深地層の研究施設設計画において実際の地質環境に対して行われる地表からの調査の成果を活用して、調査の段階的な展開に応じた連携のあり方などについて検討し、その成果を処分事業および安全規制の基盤情報として提供することを目的とする。

以下では、地質環境調査と安全評価の連携を具体化していくにあたって必要となる研究の進め方を整理した結果を中心に報告する。なお、本課題では、全体安全評価というよりも、地質環境モデルを踏まえた個別のモデル評価や不確実性評価に焦点をあてて取り組んでいく。

② これまでの成果

連携の内容や形態は、調査の各段階で得られる情報の種類や量に大きく依存するため、得られた情報の処理の仕方や連携の進め方などをいくつかの部分に分けて考えることが合理的であると考えられる。そのためここでは連携のあり方などを、「連携の達成度」として「調査の進行に伴う連携の進展」という2つの視点から検討することとした（図5.4-1）。

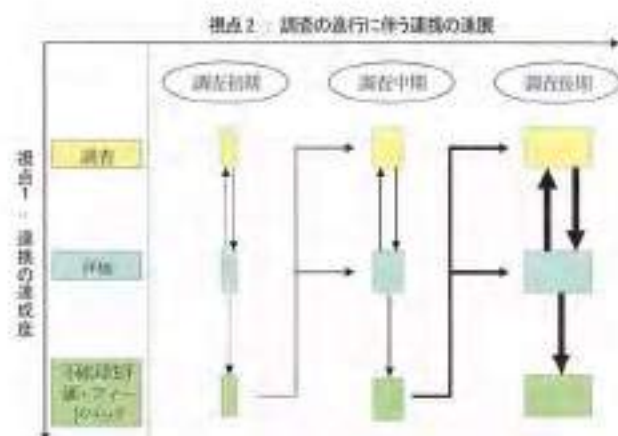


図 5.4-1 地表からの調査段階における連携のとりえ方

・視点1：連携の達成度

この視点では、まず、安全評価を、例えば調査地域の特性を表現するモデルが構築され、調査で得た情報を用いた水理解析や物質移行解析が可能になる「評価」のレベルと、さらに進んで不確実性の評価まで行えるレベルに分ける。その上で利用可能な情報の種類や量に依り調査から評価に至る手順、さらにはデータやモデルの不確実性評価とそれに基づくフィードバックまでを含む手順といった連携の深まり方向の手順と、それらの連携内容の達成度を、図の縦軸に沿って検討する。

・視点2：調査の進行に伴う連携の進展

この視点では、調査から得られる情報の種類や量の増加に伴いどのような連携が行えるようになるかの進展を、図の横軸に沿って検討する。特に地表からの調査の各段階でどのような情報が得られ、視点1の連携の達成度がどのように変化するかを明らかにする。

図5.4-1では、調査の進展に伴い、視点2の軸に沿って情報の種類や量および評価の詳細度が増加する様子（四角の大きさで例示）と、視点1の軸に沿った連携の達成度が、初期の限定的あるいは定性的なものから、より多くの定量的なものへと変化する様子（矢印の太さで例示）を二次元的なイメージとして表している。

図5.4-1のようなとりえ方をすることにより、連携の進め方を以下のような流れで検討することができると考える。まず調査から得られる情報を安全評価でどう利用できるか、その評価可能性や

評価範囲の増加、そして、それらの内容の詳細度の変化などを分析・整理していく。つまり、どの段階でどのような情報が得られ（視点2）、それに応じてどのような達成度の評価が可能か（視点1）、その際どのような情報の処理が必要なのかを明らかにする。さらに分析・整理に際しては、足りない情報があるか、改良の余地はあるか、何をすれば何処がどうよくなるかなどを整理する、そのような整理をすることにより、各段階で行うべき調査と安全評価をセットとして最適化することが可能となると考えられる。特に、調査の初期段階では情報量が限られるため、どのような達成度の評価が可能か、調査側に対してどのような（定性的・定量的）フィードバックが可能かを検討することが重要となる。

これら一連の分析・整理作業で得られた、各段階における調査と安全評価の連携のあり方（図5.4-1）における四角の箱の大きさや矢印の太さを横延深地層研究計画などで行われる調査と安全評価の連携の試行を通じて検証していくとともに、実際の地質環境を対象とした連携における留意事項の整理を行っていく。

上に示した2つの視点を踏まえた分析・整理作業の第一段階として、平成14年度までに以下の作業を進めてきている。

- (a) 横延深地層研究計画において調査を行う地質環境を対象とした安全評価の観点からの関心事や懸念事項などの幅広い収集・分析・整理
- (b) 横延深地層研究計画で対象とする地質環境の既存情報、あるいは得られる予定の情報などの収集・分析・整理（視点2）
- (c) (b)の情報に応じた評価の達成可能レベルおよび必要な評価ツールなどの収集・分析・整理（視点1）

(a)においては、図5.4-1のいずれかの調査段階で、検討が必要となる可能性のある課題などを幅広く抽出することを試みた。この中で重要性の低いものは机上検討のみにとどめ、重要性の高いものについては安全評価を通じた定量的評価を目指すことになる。

(b)においては、横延深地層研究計画で段階を追ってどのような情報が取得されるのかについて

視点2の軸に沿った考察的な分析を進めてきた。

(c)においては、(a)や(b)を踏まえ、視点1の軸に沿った各調査段階における調査→評価→不確実性評価・フィードバックの各レベルにおける検討内容の考察的な分析・整理を進めてきた。

平成14年度の検討を通じて、連携の全体像の中でまずは水理地質構造モデルと地下水化学が重要なポイントとなり、これらにおいて分析・整理の範囲をより明確に設定し、視点1および視点2の軸に沿った詳細な検討を行うことにより実現可能な連携のための実作業の内容や手順などを具体化していくことの必要性を確認した。例えば水理地質構造モデルについては、安全評価への影響が大きいとともに、水産特性の不均質性を把握する上での不確実性が高いこと、パネル配設の前提条件を提供する役割を果たす可能性があることから重要な検討要素である。また、地下水化学については、核種移行評価における溶解度などの核種移行パラメータ設定のベースになるとともに、人工バリアなどの設計のベースになり得るものであることから重要な検討要素である。

③ まとめ

- ・データ取得から安全評価に至る連携について、その検討を進めるための視点を設定し、地表からの調査段階における調査と安全評価の連携のあり方、そして不確実性評価のあり方についての検討に着手した。
- ・検討の過程で、水理地質構造モデルおよび地下水化学が不確実性の大きさや安全評価の多くの分野と関連することから、重要な連携のポイントとなることが確認できた。
- ・今後、優先して実施する事項を断定的に設定し、実際に調査から不確実性評価までの連携の作業を具体化するとともに、試行を通じて検証する。また、留意事項を整理していく。
- ・適用性の検討を進めるべき安全評価手法としては、シナリオ開発や生物圏評価などもあり、今後これらの課題について連携のあり方の検討を順次行っていく。

参考文献

- SKB (2001): Site investigations - Investigation methods and general execution programme, SKB Technical Report, TR-01-29.

6. おわりに

6 おわりに

サイクル機構は、わが国の地層処分計画が事業化に向けた新たな段階へと進展した状況を踏まえながら、平成13年度に策定した「全体計画」に沿って「地層処分技術に関する研究開発」を進めているところである。本報告書「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発—平成14年度報告—」は、「第2次取りまとめ」以降2年余りの成果をまとめた「平成13年度報告」に引き続き、平成14年度における研究開発の成果や進捗をまとめたものである。深地層の研究施設計画における地上からの調査研究の進展、および処分技術や安全評価に関わるデータの蓄積、モデルの高度化などが主な内容である。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からサイクル機構の研究開発の現状をご理解いただきつつ、各方面からのご意見を今後の研究開発に反映していく考えである。

サイクル機構では、今後とも中核的な役割を担った研究開発機関として、深地層の研究施設、エントリー、クオリティなどを活用し、また国内外の関係機関と効率的に協力しながら、基盤的な研究開発を進めていく。得られた成果については、技術資料や論文、年度毎の成果報告書等を通じて広く情報発信するほか、処分事業および安全規制の基盤となる技術や情報として取りまとめていく。当面は、概要調査地区の選定およびこれに引き続く概要調査や安全審査基本指針の策定等への反映を念頭において、平成17年度頃を目標に、深地層の研究施設計画における地上から調査研究と関連する研究開発の成果を取りまとめる予定である。

地層処分技術に関する研究開発を着実に進めていくためには、地域の方々をはじめ関連する学問分野の専門家など国民各層の理解を得ることが重要である。サイクル機構では、今後とも研究成果の積極的な公表と議論を通じて信頼性の向上をはかるとともに、各研究施設においては、安全確保を第一に、情報公開等を通じた透明性の確保や地域との共生に努めながら、開かれた研究開発を目指していく所存である。

本報告書に記載した研究成果は、付録等に示した通り、国内外の多くの研究機関や専門家との協力によるものである。ご協力いただいた関係者各位に感謝の意を表するとともに、今後ともより一層のご支援とご指導をお願い申し上げます。

【付録 A】

平成 14 年度の業務実施体制および
各研究課題の実施担当組織

付録A(1) 地層処分技術に関する研究開発に係る平成14年度の業務実施体制(事務管理部門除く)

組織	業務概要
本社	
バックエンド推進部	高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発全体の推進・管理、対外調整等
総括・調整グループ	部内関連業務の全体調整及び情報普及等
地層処分研究計画グループ	地層処分研究開発と地層科学研究に係わる計画立案・調整、成果取りまとめの推進等
深地層研究施設計画グループ	2つの深地層の研究施設に関する計画立案・調整
東濃地科学センター	東濃地科学センターで実施する地層科学研究の推進・管理等
研究調整グループ	センターで実施する研究開発に係る業務執行の調整、予算編成取りまとめ等
地層科学研究情報化グループ	地層科学研究に関する全体計画立案、情報収集・解析、地層科学研究取りまとめと情報発信等
地質環境研究グループ (陸域地下構造フロンティア研究プロジェクトを含む)	超深地層研究所計画を除く地層科学研究(広域地下水流動研究、地質環境の長期安定性に関する研究、東濃鉱山における調査試験研究)の実施等
瑞浪超深地層研究所	超深地層研究所計画の推進・管理等
総括グループ	研究所における研究及び施設建設の計画立案、工程管理、対外調整等
研究グループ	研究所における研究の実施等
施設建設グループ	研究所の建設施工計画の策定、各種許認可の申請と官庁との調整、建設の施工管理等
幌延深地層研究センター	幌延深地層研究計画の推進、管理等
研究調整グループ	幌延深地層研究計画の研究開発に係る業務執行の調整、業務品質保証活動の推進、予算編成取りまとめ等
深地層研究グループ	幌延深地層研究計画に係る地層科学研究および地層処分研究開発の実施等
東海事業所	
処分研究部	放射性廃棄物の処分に関する研究開発の推進、管理等
研究計画グループ	部内研究業務の全体調整、対外調整等
処分バリア性能研究グループ	人工バリア等の処分技術開発、地球化学や核種移行に関するモデル開発の実施等
放射化学研究グループ	放射性核種を用いた核種移行データの取得、データベース開発と個別現象モデル開発の実施等
システム解析グループ	岩盤中の水理・物質移行モデル開発、安全評価手法の開発とシステム性能解析・評価、分野間の連携に関する検討等

付録A(2) 各研究開発課題の実施担当組織(本報告書作成分担)

目次項目(研究開発課題)	実施(報告書作成)担当組織
1. はじめに	本社)地層処分研究計画Gr./深地層研究計画Gr.
2. 研究開発計画と成果の概要	—
2.1 地層処分技術に関する研究開発の全体概要	本社)地層処分研究計画Gr./深地層研究計画Gr.
2.2 各研究開発分野における成果概要	—
2.2.1 深地層の科学的研究	東濃)地層科学研究情報化Gr./幌延)研究調整Gr.
2.2.2 処分技術の信頼性向上	東海)処分バリア性能研究Gr./放射化学研究Gr./システム解析Gr.
2.2.3 安全評価手法の高度化	—
3. 深地層の科学的研究	—
3.1 広域地下水流動研究と超深地層研究所計画の役割と研究の進め方	東濃)地層科学研究情報化Gr.
3.2 広域地下水流動研究	—
3.2.1 研究の概要	東濃)地層科学研究情報化Gr.
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	東濃)地質環境研究Gr.
2) 岩盤の水理に関する調査研究	
3) 地下水の地球化学に関する調査研究	
3.3 超深地層研究所計画	—
3.3.1 計画の概要	東濃)地層科学研究情報化Gr.
3.3.2 各調査研究の成果	—
1) 地質・地質構造に関する調査研究	東濃)瑞浪超深地層研究所:研究Gr.
2) 岩盤の水理に関する調査研究	
3) 地下水の地球化学に関する調査研究	
4) 岩盤力学に関する調査研究	
5) 深地層の工学技術の基礎に関する研究	東濃)瑞浪超深地層研究所:施設建設Gr.
3.4 東濃鉱山における調査試験研究	—
3.4.1 調査試験研究の概要	—
3.4.2 各調査試験研究の成果	—
1) ナチュラルアナログ研究	東濃)地質環境研究Gr.
2) 岩盤の力学的安定性に関する試験研究	
3) 坑道周辺の地質環境に関する調査研究	
3.5 地質環境の長期安定性に関する研究	—
3.5.1 研究の概要	—
3.5.2 研究成果の概要	—
1) 隆起・侵食に関する研究	東濃)地質環境研究Gr.
2) 気候・海水準変動に関する研究	
3) 火山活動に関する研究	
4) 地震・断層活動に関する研究	
5) 地質環境の長期予測に関する研究	

目次項目(研究開発課題)	実施(報告書作成)担当組織
3.6 幌延深地層研究計画	—
3.6.1 計画の概要	幌延)研究調整Gr.
3.6.2 地質環境調査技術開発	
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	幌延)深地層研究Gr.
1-2) 地質調査	
1-3) 表層水理調査	
1-4) 試錐調査	
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	
2-1) 地質構造モデル	幌延)深地層研究Gr.
2-2) 地下水の水理モデル	
2-3) 地下水の地球化学モデル	
2-4) 岩盤力学モデル	
3) 調査技術・調査機器開発	
3-1) 試錐孔掘削のための技術	幌延)深地層研究Gr.
3-2) 試錐孔を用いた調査試験のための技術	
3.6.3 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	幌延)深地層研究Gr.
2) 遠隔監視システムの開発	
3.6.4 深地層における工学的技術の基礎の開発	幌延)研究調整Gr.
3.6.5 地質環境の長期安定性に関する研究	
1) 地震研究	幌延)深地層研究Gr.
2) 天然現象に関する研究	
3.6.6 環境調査	幌延)研究調整Gr.
4 処分技術の信頼性向上	—
4.1 人工バリアの基本特性データベースの整備	—
4.1.1 オーバーバックの基本特性	
1) 炭素鋼オーバーバックの腐食挙動に関する研究	東海)処分バリア性能研究Gr.
2) 代替オーバーバック材料の腐食挙動に関する研究	
4.1.2 緩衝材の基本特性	
4.1.3 人工バリアの性能保証に関する基盤情報整備	東海)処分バリア性能研究Gr./幌延)深地層研究Gr.
4.2 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究	—
4.2.1 人工バリア等の変形・変質等の長期挙動に関する研究	—
1) 緩衝材/岩盤の力学的変形挙動に関する研究	—
1-1) 緩衝材クリープ現象に関する研究	東海)処分バリア性能研究Gr.
1-2) 岩盤の力学的変形挙動に関する研究	東海)処分バリア性能研究Gr./システム解析Gr.
2) 緩衝材の流出・侵入挙動に関する研究	東海)処分バリア性能研究Gr.
3) 人工バリアの変質・劣化挙動に関する研究	東海)処分バリア性能研究Gr./放射化学研究Gr.
4.2.2 熱-水-応力-化学連成挙動に関する研究	東海)処分バリア性能研究Gr.
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	東海)処分バリア性能研究Gr.
2) 人工バリアせん断応答挙動に関する研究	
4.2.4 人工バリア等のナチュラルアナログ研究	東海)処分バリア性能研究Gr.

目次項目(研究開発課題)	実施(報告書作成)担当組織
4.3 人工バリア等の工学技術の検証	—
4.3.1 閉鎖技術の検証試験	東海)処分バリア性能研究Gr.
4.3.2 人工材料の開発	東海)処分バリア性能研究Gr./システム解析Gr./幌延)深地層研究Gr.
4.4 設計手法の適用性確認	東海)処分バリア性能研究Gr./システム解析Gr./幌延)深地層研究Gr.
5. 安全評価手法の高度化	—
5.1 核種移行データベースの整備	—
5.1.1 放射性核種の熱力学データベースの整備	東海)放射化学研究Gr./処分バリア性能研究Gr.
5.1.2 収着・拡散データベースの整備	東海)放射化学研究Gr./処分バリア性能研究Gr.
5.2 安全評価モデルの高度化	—
5.2.1 岩盤中水理・物質移行モデルの高度化	—
1) 結晶質岩中における亀裂ネットワークモデルの改良・高度化研究	—
2) 結晶質岩中の移行パラメータの信頼性評価手法の開発研究	東海)システム解析Gr.
3) 岩盤中の水理・物質移行モデルの信頼性向上研究	—
3-1) 単一亀裂/亀裂交差部室内試験(移流・分散)	—
3-2) 単一亀裂・モデル開発(LBNL共同研究)	—
3-3) 亀裂を有する堆積軟岩の水理特性	—
5.2.2 地下水・間隙水水質形成モデルの高度化	東海)処分バリア性能研究Gr./放射化学研究Gr.
5.2.3 現象論的核種移行モデルの開発	—
1) ガラスの長期溶解挙動及び核種の溶解現象に関する研究	東海)放射化学研究Gr./処分バリア性能研究Gr.
2) 核種の収着・拡散現象に関する研究	—
5.2.4 コロイド等の影響評価モデルの開発	—
1) コロイドの影響評価モデルの開発	東海)処分バリア性能研究Gr./放射化学研究Gr.
2) 天然有機物・微生物の影響評価モデルの開発	—
5.2.5 生物圏評価モデル	東海)システム解析Gr.
5.2.6 天然現象影響評価モデル	東海)システム解析Gr.
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	本社)地層処分研究計画Gr.
2) シナリオ開発技術の高度化	東海)システム解析Gr.
5.3.2 不確実性評価技術	東海)システム解析Gr.
5.3.3 技術情報統合システムの整備	東海)システム解析Gr.
5.4 安全評価手法の適用性確認	東海)システム解析Gr./幌延)深地層研究Gr.
6. おわりに	本社)地層処分研究計画Gr./深地層研究計画Gr.
付録	—
付録A 業務実施体制	—
付録B 業務実績	本社/東濃/幌延/東海
付録C 関係機関との協力状況	—
付録D 公開文献リスト	—

【付録 B】

平成 14 年度の主な業務実績

付録B(1) 地層処分技術に関する研究開発に係る本社・各事業所の平成14年度の主な業務実績

	本社（各事業所共通の項目を含む）	東濃地科学センター	幌延深地層研究センター	東海事業所処分研究部
主要イベント (報告会・関係自治体説明・計画の進捗等)	<ul style="list-style-type: none"> 第4回サイクル機構シンポジウム(10/11)^{1,11)} サイクル機構シンポジウム茨城(11/7)^{1,12)} 地層処分技術に関する研究開発報告会(2/28)^{1,13)} 韓国原子力研究所(KAERI)との地層処分研究開発分野における協力取り決めの締結(3月) 	<ul style="list-style-type: none"> 平成14年度地層科学研究情報・意見交換会(10/29,30)^{1,14)} 瑞浪市との土地賃貸借に係る協定書に基づく同市への説明(瑞浪超深地層研究所の平成14年度事業計画)(4月) 関係自治体等へのセンター事業計画説明(4~6月) 瑞浪超深地層研究所着工(7月) 瑞浪市との土地賃貸借変更契約の締結(10月) 東濃地科学センターにおいてISO14001認証取得(9月) 	<ul style="list-style-type: none"> 平成14年度調査研究計画を北海道、幌延町に説明(4月) 平成14年度調査研究計画説明会(4月) 平成13年度調査研究成果および研究所設置地区選定結果を北海道、幌延町へ説明(7月) 幌延深地層研究計画説明会(7月) 研究所設置場所の土地利用に係る許認可手続き(12月に申請、2月に決定通知) 幌延町及び幌延町農協との土地売買契約締結(3月) 	<ul style="list-style-type: none"> 日本粘土学会技術賞受賞「遠蔵・経路材としてのベントナイトの利用技術」(9月) 第35回日本原子力学会賞技術開発賞受賞「高レベル放射性廃棄物地層処分システムの性能評価における核種移行データベースの開発」(3月)
主要な計画・報告書等の公表	<ul style="list-style-type: none"> 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—(年度成果報告書)の公表(6月)^{1,15)} 	<ul style="list-style-type: none"> 広域地下水流動研究、超深地層研究所計画、東濃鉱山における調査試験研究および地質環境の長期安定性に関する研究の平成14年度計画書および平成13年度報告書の公表(4~10月)^{1,16),17)} 	<ul style="list-style-type: none"> 研究所設置地区選定結果の公表(7/12) 平成14年度調査研究計画の公表(4月)^{1,18)} 平成13年度調査研究成果報告の公表(7月)^{1,19)} 	
機構内の委員会・検討部会等	<ul style="list-style-type: none"> 深地層の研究施設における研究計画等検討部会(10月、3月) 地質環境の長期安定性研究検討部会(7月、3月) 	<ul style="list-style-type: none"> 地質環境の長期安定性研究検討部会WG(計6回) 	<ul style="list-style-type: none"> 深地層の研究施設における研究計画等検討部会(幌延現場視察：9月) 	<ul style="list-style-type: none"> 地層処分研究開発検討委員会(8月、3月)
国、関係機関との調整・協力等	<ul style="list-style-type: none"> 原子力発電所環境整備機構との協力協定に基づく運営会議等の情報交換(10回程度)と情報提供 原子力安全委員会特定放射性廃棄物処分安全調査会ワークショップへの参加をはじめ、原子力安全委員会や原子力安全・保安院の委員会活動への協力 電力中央研究所との研究協力会議の開催(数回) 	<ul style="list-style-type: none"> 資源エネルギー庁・瑞浪市主催「おもしろ科学館2002 in みずなみ」への参加(11月) 	<ul style="list-style-type: none"> 埼玉大学との研究協力に関する覚書締結(3月) 資源エネルギー庁・幌延町主催「おもしろ科学館2002 in ほろのべ」への参加(9月) 	<ul style="list-style-type: none"> 原子力学会標準委員会放射性廃棄物管理分科会への協力(委員としての参加など) 原子力学会原子力安全研究特別専門委員会放射性廃棄物WGへの協力(主査としての参加および執筆作業など) 土木学会処分技術WGへの協力(幹事としての参加および執筆作業など)
主な国際会議への参加・報告	<ul style="list-style-type: none"> OECD/NEA ニアフィールドワークショップでの報告(9月) 第13回環太平洋原子力会議での報告(10月)^{2,20)} 第10回高レベル放射性廃棄物管理に関する国際会議(ラスベガス会議)での報告(3月)^{1,21)} 	<ul style="list-style-type: none"> 第9回加速器質量分析計国際会議(AMS-9)にて発表(9月)^{2,22)-24)} 第29回廃棄物管理シンポジウム2003(WMP03)での報告(2月)^{2,25)} 第1回地下環境に関する京都国際シンポジウムでの報告(3月)^{2,26)} TRE Block Scale 国際セミナーへの参加(11月) その他、米国地球物理学会連合(AGU)秋季会議、日中地地形学会、米国地質学会などの会議にて8件発表 	<ul style="list-style-type: none"> 第9回加速器質量分析計国際会議(AMS-9)にて発表(9月)^{2,27)} 	<ul style="list-style-type: none"> GoldSim User Conferenceに参加(4月) OECD/NEA 取組に関するプロジェクト運営委員会(7月)およびワークショップ(12月)への参加 第1回アジア・オセアニア放射線防護会議(AORP-1)にて2件発表(10月)^{2,28),29)} TRE Block Scale 国際セミナーに参加(11月) 放射性廃棄物処分における粘土に関する国際会議にて3件発表(12月)^{2,30),31)} その他、ISRM BS 2002、米国材料学会シンポジウム、粘土の空隙構造に関するワークショップにて3件発表^{2,32),33)}
主な国内学会への参加・報告	<ul style="list-style-type: none"> 日本原子力学会「第18回バックエンド夏期セミナー」にて2件発表(8月) 日本機械学会「第8回動力エネルギー技術シンポジウム」(6月)、日本物理学会「シンポジウム：加速器駆動型水爆炉炉と原子核物理」(8月)等にて3件発表 	<ul style="list-style-type: none"> 地球惑星科学関連学会合同大会にて17件発表(8月) 日本原子力学会「第18回バックエンド夏期セミナー」にて2件発表(8月) 日本原子力学会「2003年春の年会」にて7件発表(3月) その他、日本地震学会、日本地質学会、日本応用地質学会、日本地球化学会などの学会にて53件発表 日本地下水学会誌、第四紀研究に各1件報告^{2,34),35)} 	<ul style="list-style-type: none"> 第19回岩盤システム工学セミナーにて幌延における計画を報告(7月)^{2,36)} その他、日本応用地質学会、物理探査学会、日本地下水学会などの学会にて6件発表 	<ul style="list-style-type: none"> 日本原子力学会「第18回バックエンド夏期セミナー」にて6件発表(8月) 土木学会第57回年次学術講演会にて10件発表(9月) 日本原子力学会「2002年秋の大会」にて4件発表(9月) 第32回岩盤力学に関するシンポジウムにて発表2件(1月) 日本原子力学会「2003年春の年会」にて16件発表(3月) その他、腐食防食協会、日本放射化学会、地盤工学会、日本粘土学会、日本応用地質学会、NOCEFセミナーなどで15件発表
その他の情報普及活動	<ul style="list-style-type: none"> 第2次取りまとめや年度成果報告書等の報告書や関連するビデオ、CD-ROM、パンフレット等について、希望者や関係機関への提供を継続 東海展示館の「ジオフューチャー21」については運用を継続(平成14年度の入場者数が4,474名、平成11年12月の運用開始からの累計のべ21,854名) ホームページによる情報提供を継続(情報の更新) 	<ul style="list-style-type: none"> 地球惑星科学関連学会合同大会に展示出展(5月) 東濃地科学セミナーの開催(11月) 東濃エネルギーセミナーの開催(2月) 地層研ニュースの発行(毎月) 東濃鉱山の見学(平成14年度見学者はのべ1,793名) ホームページによる情報提供を継続(情報の更新) 日本原子力学会誌へのセンター紹介記事掲載(9月) TV、新聞、雑誌等の取材対応と新聞などへの取材記事掲載 	<ul style="list-style-type: none"> 幌延フォーラム(12/17) 広報用パンフレット、CD-ROMの作成と、関係機関などへの提供 広報誌の発行(4回) 試運転場などの見学(平成14年度見学者はのべ219名) ホームページによる情報提供を継続(情報の更新) TV、新聞、雑誌等の取材対応と新聞などへの取材記事掲載 TVコマーシャルによる情報提供(11月) 	<ul style="list-style-type: none"> エントリー・クオリティ施設の見学(平成14年度見学者数はのべ2,525名) 日本原子力学会誌への地層処分説明模型紹介記事掲載(9月) ホームページによる情報提供を継続(情報の更新) TV、新聞、雑誌等の取材対応と新聞などへの取材記事掲載

付録B(2) 平成14年度の主な業績実績に関わる公開文献リスト

【本社(各事業所共通の項目を含む)】

- 1-1) 核燃料サイクル開発機構(2002)：第4回サイクル機構シンポジウム－サイクル機構の新たな展開－，平成14年10月31日，有楽町領日ホール。
- 1-2) 核燃料サイクル開発機構(2002)：サイクル機構シンポジウム茨城，サイクル機構技術資料，平成14年11月7日，水戸市民文化センター。
- 1-3) 核燃料サイクル開発機構(2003)：地質処分技術に関する研究開発報告会－処分技術の信頼性を支える基盤の強化に向けて－予稿集，平成15年2月28日，ヤクルトホール，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2002-019。
- 1-4) 核燃料サイクル開発機構(2002)：高レベル放射性廃棄物の地質処分技術に関する研究開発－平成13年度報告－，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2002-003。
- 1-5) Nakagami, Y. (2002)：Waste Management Program in JNC and its Contribution to National Program, PBC2002(The 13th Pacific Basin Nuclear Conference), The 13th Pacific Basin Nuclear Conference, Shenzhen, China.
- 1-6) Shitetsuki, M., Ishimaru, T., Igarashi, H., Shimizu, K., Ishiguro, K., Ishikawa, H., Takeda, S. and Yamazaki, S. (2003)：JNC's R&D on HLW Disposal to Enhance Technical Reliability and Confidence in the Implementation Phase, 10th IHLRAM 2003, Las Vegas, NV, pp.1025-1032.

【東濃地科学センター】

- 2-1) 核燃料サイクル開発機構(2002)：平成14年度地質科学研究動向・意見交換会－要旨集－，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2002-006。
- 2-2) 核燃料サイクル開発機構(2002)：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 2002-003。
- 2-3) 核燃料サイクル開発機構(2002)：超深地層研究所計画 年度報告書(平成13年度)，サイクル機構技術資料，JNC TN7400 2002-004。
- 2-4) 核燃料サイクル開発機構(2002)：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。
- 2-5) 核燃料サイクル開発機構(2002)：広域地下水流動研究 年度計画書(平成14年度)，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2002-004。
- 2-6) 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14年度)，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2002-005。
- 2-7) 核燃料サイクル開発機構(2002)：広域地下水流動研究 年度報告書(平成13年度)，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2002-007。
- 2-8) 核燃料サイクル開発機構(2002)：地質環境の長期安定性に関する研究 年度計画書(平成14年度)，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2002-001。
- 2-9) 核燃料サイクル開発機構(2002)：地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書(平成13年度)，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2002-003。
- 2-10) Fujiwara, O., Kanataki, T. and Haseida, F. (2002)：Significance of sedimentological time-averaging for estimation of depositional age by ^{14}C dating on molluscan shells, Abstracts of Ninth International Conference on Accelerator Mass Spectrometry, September 9-13, 2002, pp.204-205.
- 2-11) Hana, K., Benson, R. and Noda, S. (2002)：Possible uses of chlorine-36 for the study of groundwater flow system in a fresh groundwater environment in the Tono area, Gifu prefecture, central Japan, Abstracts of Ninth International Conference on Accelerator Mass Spectrometry, September 9-13, 2002, pp.201-202.
- 2-12) Itoh, S., Aie, H., Atonabe, H., Nakai, M., Takyama, H. and Xu, S. (2002)：Present status of the JNC Tono Geoscience Center AMS system, Abstracts of Ninth International Conference on Accelerator Mass Spectrometry, September 9-13, 2002, p.140.
- 2-13) Shigata, M., Matsui, H., Yamazaki, S. and Takeki, S. (2003)：Underground Research Laboratories for Crystalline Rock and Sedimentary Rock in Japan, 29th Annual Waste Management Symposium. (in press)
- 2-14) Stephansson, O., Shen, B., Rinne, U., Backers, T., Koide, K., Sakami, S., Ishida, T., Moro, T. and Sueniya, K.

(2003): Geomechanical evaluation and analysis of research shafts and galleries in MIL Project, Japan, Pre-print Proceedings of the 1st Kyoto International Symposium on Underground Environment - Role of Geo-technology to the Underground Environment, March 17-18, 2003, Kyoto, JAPAN, pp.39-49.

2-15) 植紫 敏, 三枝博光, Matthew J. White, Peter Robinson (2002): 地下水汚染の予測解析統合システム(GEOMASSシステム)の概要と東濃地域への適用事例, 地下水学会誌, 43, pp.105-123.

2-16) 鎌倉孝信, 増田益十郎, 藤原 浩 (2003): ^{14}C 年代測定による堆積年代の推定における堆積学的時間平均化の重要性, 第94号研究, 42, pp.27-40.

[観証深地層研究センター]

3-1) 核燃料サイクル開発機構(2002) 観証深地層研究計画平成14年度調査研究計画, サイクル機構技術資料, JNC-TN1410 2001-004.

3-2) 核燃料サイクル開発機構 (2002) - 観証深地層研究計画平成13年度調査研究成果報告, サイクル機構技術資料, JNC-TN1400 2002-004.

3-3) Kumamaru, T. and Iwatsuki, T. (2002): Isotopic study for the estimation of C-14 age of groundwater at the Horonobe, Hokkaido, Japan, ABSTRACTS Ninth International Conference on Accelerator Mass Spectrometry (AMS-9), pp.198-199.

3-4) 上崎 真 (2002): 観証深地層研究計画の概要と調査研究の現状, 放射性廃棄物の地層処分研究特集(その2)-第19回治癒システム上崎セミナー, pp.41-69.

[東海事業所処分研究部]

4-1) Kato, T., Suzuki, Y., Naito, M., Ishiguro, K., Ueda, T., Little, B. and Smith, G. (2002): Biosphere Modelling for the Safety Assessment of High-level Radioactive Waste Disposal in the Japanese IIIrd Assessment, The 1st Asian and Oceanic Congress for Radiation Protection (AOCRP-1), T-8B-2 (PARP0464), October 20-24, 2002, Seoul, Korea.

4-2) Kitamura, A. and Sato, H. (2002): Studies on Migration Behavior of Radionuclides under Reducing Conditions in JNC, The 1st Asian and Oceanic Congress for Radiation Protection (AOCRP-1), T-9B-4 (PARP0110), October 20-24, 2002, Seoul, Korea.

4-3) Sasamoto, H., Yui, M., and Arthur, R.C. (2002): Hydrochemical Characteristics and Groundwater Evolution Modeling in Sedimentary Rocks of the Tama Mine, Japan, International Meeting on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, December 9-12, 2002, Reims, France, Abstracts, pp.261-262.

4-4) Sato, H. and Miyamoto, S. (2002): Diffusion Behaviour of Selenite and Hydroselenide in Compacted Bentonite, International Meeting on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, December 9-12, 2002, Reims, France, Abstracts, pp.299-300.

4-5) Shibata, M., Kubota, M., Nemoto, K., Kim, S.-Y., Fujishima, A. and Sato, T. (2002): Analysis of Compacted Bentonite Contacted with Carbon Steel under Anaerobic Conditions, International Meeting on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, December 9-12, 2002, Reims, France, Abstracts, pp.151-152.

4-6) Sawada, A., Uchiishi, Y., Ohtsu, H., Ijiri, Y. and Nishiyama, S. (2002): Applicability of the concept of Fractal to Fracture Network Model in Rock Mass, Proceedings of 2002 ISRM Regional Symposium on Rock Engineering Problems and Approaches in Underground Construction, July 22-24, 2002, SEDOL, KOER, pp.203-210.

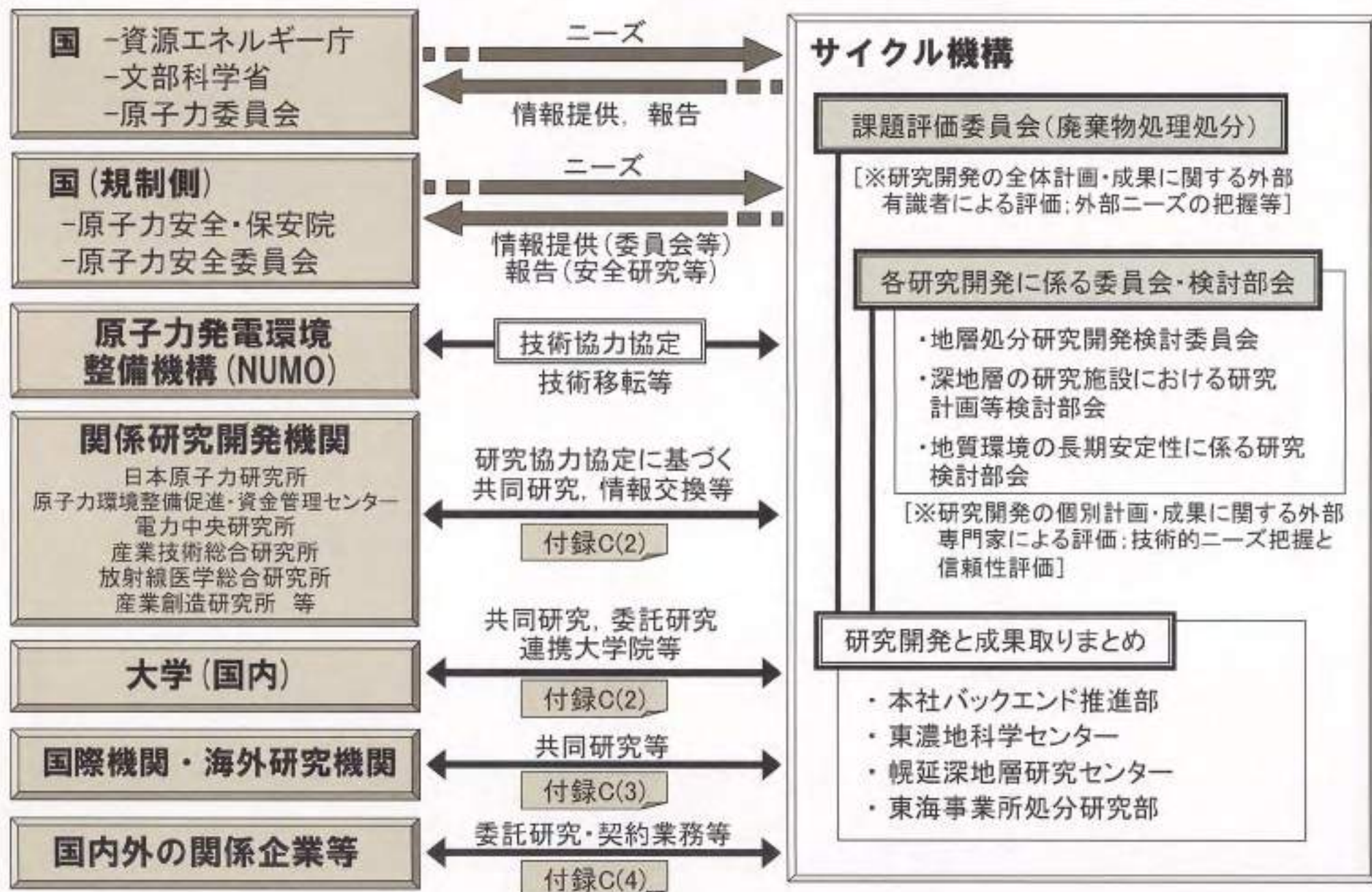
4-7) Sato, H. and Muraoka, T. (2002): Diffusion and Migration of Ions in Sedimentary Rock Matrix: Behaviour of Cesium and Iodide in Micropores of Sandstone, International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVI, Materials Research Society, Inc. 1-5, 2002, Boston, U.S.A., Abstracts, pp.722-723.

4-8) Sato, H. and Suzuki, S. (2002): Fundamental Study on the Effect of an Orientation of CCl₄ Particles on Diffusion Pathway in Compacted Bentonite, Preprints of Contributions to the Workshop on Clay Microstructure and Its Importance to Soil Behaviour, October 15-17, 2002, Lund, Sweden, pp.87-96.

【付録 C】

国内外の関係機関との研究協力体制と
平成 14 年度の協力状況

付録C(1) 地層処分技術に関する研究開発に係る国内外の関係機関との研究協力体制



付録C(2) 地層処分技術に関する研究開発に係る国内の大学・関係機関との協力状況(平成14年度の共同研究等の実施状況)

研究機関	組織・担当	共同研究等テーマ名	実施期間(予定)	JNC実施担当	備考(協力形態等)
【大学との共同研究】					
広島大学	大学院生物圏科学研究科:長沼毅助教授	深部地質環境に対する微生物の影響に関する研究:地下微生物群集の種組成と代謝の多様性に関する研究	平成12~14年度	東濃)地質環境研究Gr.	先行基礎工学研究(共同研究/研修生)
北海道大学	大学院工学研究科社会基盤工学専攻:石島洋二教授	軟弱な堆積地層における力学的な初期状態と施工性の評価システムの開発	平成13~15年度	東濃)地質環境研究Gr. 東海)深地層研究Gr.	公募型研究(共同研究)
北海道大学	大学院地球環境科学研究科:長尾誠也助教授	天然環境における有機物の化学特性に関する研究	平成14~16年度	東濃)地質環境研究Gr.	共同研究
京都大学	大学院農学研究科地域環境科学専攻:小林晃助教授	緩衝材およびその周辺岩盤の力学的安定基準の作成	平成14~16年度	東濃)地質環境研究Gr.	公募型研究(共同研究)
九州大学	大学院工学研究科附属環境システム科学研究センター:有馬立身助手	オーバーバック材腐食生成物が緩衝材性能に及ぼす影響に関する研究:緩衝材中の鉄イオン及びネプトニウムイオンの拡散挙動	平成13~15年度	東海)放射化学研究Gr.	先行基礎工学研究(共同研究/研修生)
岡山大学	環境理工学部環境デザイン工学科:西畑誠教授	長期モニタリングシステムの開発に関する研究:光ファイバーを用いた長期モニタリング装置の開発	平成14~16年度	東濃)地質環境研究Gr.	先行基礎工学研究(共同研究)
埼玉大学	地質科学研究センター:渡辺邦夫教授	地下水流動特性評価に関する研究:地下水総合モニタリング情報を用いた水理地質構造モデル化手法の開発に関する研究	平成12~14年度	東濃)地質環境研究Gr.	先行基礎工学研究(客員研究員)
東北大学	大学院工学研究科地球工学専攻:十原雅芳助教授	マグマの固結・定置プロセスにおけるき裂形成メカニズムと透水性き裂の評価	平成12~14年度	東濃)地質環境研究Gr.	公募型研究(共同研究)
東京大学	大学院工学研究科システム量子工学専攻:田中知教授	固液界面におけるアクチノイドイオンの酸化還元反応メカニズム	平成12~14年度	東海)放射化学研究Gr.	公募型研究(共同研究)
東京大学	大学院工学系研究科地球システム工学専攻:徳永朋博助教授	沿岸部及び沿岸海底地下水の水理・地球化学環境評価に関する研究	平成12~14年度	東濃)地質環境研究Gr.	公募型研究(共同研究)
筑波大学	地球科学系:黒澤正記講師	地球化学用マイクロPIXE測定システムの高高度化研究:PIXEによる鉱物と流体包有物の微量元素定量法の開発	平成12~14年度	東海)処分バリア性能研究Gr.	先行基礎工学研究(共同研究)
筑波大学	地球科学系:小室光世講師	おがほのウラン鉱床に関するナチュララノログ研究 - 特に東濃ウラン鉱床について -	平成13~15年度	東濃)地質環境研究Gr.	公募型研究(共同研究)
東京大学	大学院理学系研究科附属地球化学実験施設:長尾敏介教授	ストロンチウム同位体比及び希ガスをを用いた地球化学的研究手法の確立	平成13~15年度	東濃)地質環境研究Gr.	公募型研究(共同研究)
【大学・学協会への委託研究】					
愛媛大学	理学部生物圏科学科:小松正幸教授/地球深部ダイナミクス研究センター:植大輔助教授	花崗岩中の割れ目・断層系の形成メカニズムに関する基礎研究	平成13年度~	東濃)地質環境研究Gr.	
北海道大学	低温科学研究所:福田正己教授	永久凍土が地質環境に与える影響に関する研究		東濃)地質環境研究Gr.	
北海道大学	大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻:小崎宗助教授	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	平成12年度~	東海)放射化学研究Gr.	
上智大学	自然系 理科学部地学専攻:大場孝信助教授	メタタイトの結晶石化に関する研究	平成13年度~	東海)処分バリア性能研究Gr.	
京都大学	大学院工学研究科:森山裕太教授	超ウラン元素の加水分解及び錯生成に関する研究	平成13年度~	東海)放射化学研究Gr.	
九州大学	大学院工学研究科エネルギー量子工学部門:稲垣八穂広助教授	ガラス固化体の長期鉱物化に関する研究	平成13年度~	東海)処分バリア性能研究Gr.	
名古屋大学	大学院環境学研究科:市川康明助教授	長期岩盤挙動評価のための微視的観点による基礎的研究	平成6年度~	東濃)地質環境研究Gr.	
東京大学	大学院新領域創成科学研究科:大久保誠介教授	古地磁気学的手法を用いたテクトニクスの復元に関する基礎研究	平成13年度~	東濃)地質環境研究Gr.	
大阪府立大学	総合科学部自然環境科学科:伊藤康人教授	割れ目系岩盤を対象とした地質構造のモデル化に関する研究		東濃)地質環境研究Gr.	
埼玉大学	地質科学研究センター:長田昌彦助教授	長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究	平成6年度~	東濃)地質環境研究Gr.	
東京大学	大学院新領域創成科学研究科:大久保誠介教授	核種の有機系コロイドへの吸着挙動および多孔質媒体中での有機系コロイドの移行挙動に関する研究	平成13年度~	東海)処分バリア性能研究Gr.	
東京大学	大学院新領域創成科学研究科:大久保誠介教授	緩衝材の長期挙動に関する研究	平成14年度~	東海)システム解析Gr.	
東京工業大学	大学院理工学研究科地球惑星科学専攻:河村建行教授	ベントナイト中の物質移行モデルの高高度化研究	平成14年度~	東海)処分バリア性能研究Gr.	
(社)腐食防食協会	福井工業大学工学部機械工学科:柴田俊夫教授/北海道大学大学院工学研究科分子化学専攻:瀬尾信浩教授/東北大学大学院工学研究科金属工学専攻:杉本克久教授/東京工業大学大学院理工学研究科材料工学専攻:水波徹教授/大阪大学大学院工学研究科マテリアル応用工学専攻:藤本慎司教授/大阪府立大学大学院工学研究科物質系専攻:井上博之講師	オーバーバック緩衝材の腐食挙動モデルの高高度化研究	平成13年度~	東海)処分バリア性能研究Gr.	
(社)資源・素材学会	山口大学工学部社会建設工学科:水田義明教授/北海道大学大学院工学研究科環境資源工学専攻:金子勝比古教授/東北大学大学院工学研究科地球工学専攻:松本浩二教授/熊本大学大学院自然科学研究科:菅原勝彦教授	三次元応力場の同定手法に関する研究	平成13年度~	東濃)地質環境研究Gr.	
(社)システム総合研究所	地質空間研究所:小島圭二代表(東京大学名誉教授)/京都大学大学院工学研究科資源工学専攻:青木謙治教授/土木システム工学専攻:大西有三教授/東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻:柳山修教授/名古屋大学博物館:吉田英一助教授/岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科:西畑誠教授/埼玉大学地質科学研究センター:渡辺邦夫教授/熊本大学理学部地球科学科:嶋田純教授	深部地質の調査・解析技術の体系化に関する研究	平成11年度~	東濃)地質環境研究Gr.	
(財)原子力安全研究協会	千葉大学理学部地球化学科:井上厚行教授/鹿児島大学農学部土壌科学研究分野:河野元治助教授/九州大学比較社会文化研究院環境変動部門:桑原義博助手/北海道大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻:小崎宗助教授/茨城大学工学部都市システム工学科:小峯秀雄助教授/金沢大学自然計測応用研究センター:佐藤努助教授/独立行政法人産業技術総合研究所深部地質環境研究センター:月村勝宏副センター長	緩衝材の長期安定性評価に関する調査研究及び技術レビュー	平成14年度~	東海)処分バリア性能研究Gr.	
(財)原子力安全研究協会	東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻:柳山修教授/九州大学大学院工学研究科エネルギー量子工学専攻:出光一哉教授/東北大学大学院理学研究科化学専攻:関根勉助教授/東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻:長崎晋也助教授/東北大学金属材料研究所附属材料試験炉利用施設:三頭聡明助教授/京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻:森山裕太教授/北海道大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻:佐藤正知教授	核種移行評価の信頼性向上に関する調査及び技術的レビュー	平成11年度~	東海)放射化学研究Gr.	
【関係機関との共同研究】					
日本原子力研究所	燃料サイクル安全工学部処分安全研究室	深部地下環境下における核種移行データの取得及びデータベースの整備	平成14~15年度	東海)処分バリア性能研究Gr.	技術情報交換
産業技術総合研究所	燃料サイクル安全工学部廃棄物安全評価研究室	安全評価におけるシナリオ・モデルの不確実性に関する研究	平成13~17年度	東海)システム解析Gr.	技術情報交換
産業技術総合研究所	地質資源環境研究部門	岩盤の力学的特性に関する計測・評価手法の検討	平成元~15年度	東濃)地質環境研究Gr.	
産業技術総合研究所	地球科学情報研究部門/地質資源環境研究部門	地質環境の長期予測に関する研究	平成13~15年度	東濃)地質環境研究Gr.	
産業技術総合研究所	計測標準研究部門	地質計の高精度絶対校正に関する研究	平成14年度~	東濃)地質環境研究Gr.	

付録C(3) 地層処分技術に関する研究開発に係る国際共同研究の平成14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14年度の実施内容・進捗【本文関連箇所】
Nagra (スイス放射性廃棄物処分協同組合)	Nagra/JNC放射性廃棄物管理分野の研究開発に関する協力(2国間協力) [1988年より実施]	・グリムゼル原位置試験場での原位置試験 (HFV, CRX) ・深地層の研究施設設計書の立案支援(承認、概定) ・ナチュラアナログ研究(東濃鉱山、マカーリン) ・核種移行研究、インベントリデータ不確実性評価、研究者の交換、他	グリムゼル原位置試験場では、結晶質岩中の亀裂を対象に「高アルカリブームの影響評価(HBP)」および「コロイドと放射性核種の遅延評価(CRD)」(5.2.4.1)の二つのプロジェクトにおいて原位置試験やモデル解析を継続した。東濃ウラン鉱床でのナチュラアナログ研究(3.3.2-1)および2つの深地層研究施設設計書について、計画や成果などの技術的評価など、研究手法や調査技術の整備に向けた取り組みを行った。また、ヨルダンでの高圧地下水のナチュラアナログ研究(マカーリンプロジェクト)(4.2.4)、インベントリ解析について複数コード間のクロスチェックを実施している。さらに、ボールシェラー研究所の研究者との核種移行研究に関するQUALITY-PSIワークショップを開催し、具体的共同研究項目の抽出を行った。
AECL (カナダ原子力公社)	AECL/JNC放射性廃棄物管理分野の研究開発に関する協力(2国間協力) [1994年より実施]	・DRLでのトンネルシーリング試験(熱水環境試験) ・坑道周辺のゆるみ領域シーリング試験 ・坑道周辺の化学的性質の評価(特にセメント周辺)	シーリングに関する施工性や基礎データの取得を目的として、1995年より実現機(粘土、コンクリート)プラグの止水性能等に関する試験を実施している。現在は、4MPaまでの昇圧及び温水注水を行うことを中心としたフェーズ2試験段階に移行している。このフェーズ2においては、シーリングに関する工学技術の検証に加えて、サイクル機構からの提案に基づき、セメント材料を起源としたニアフィールドにおける化学的影響等についても評価項目に加えている。[4.3.1]
ANDRA (フランス放射性廃棄物管理機関)	ANDRA/JNC放射性廃棄物処分分野における協力(2国間協力)[1999年より実施]	・岩盤クリーブに関するモデルの検証、ベンチマーク(予定) ・地下水地球化学モデルの検証、ベンチマーク(予定)	岩盤クリーブに関するモデルのベンチマークについて、共同研究を進めるための準備を進めている。
CEA (フランス原子力庁)	CEA/JNC先端技術(廃棄物処理処分を含む)に関する協力(2国間協力)[1991年より実施]	・廃棄物パッケージの長期挙動に関する共同研究 ・コロイド移行、金属容器材料腐食、粘土中ガス移行等に関する情報交換	平成13年度の情報交換打合せに基づき、CEAが実施したセメント系材料の浸出試験結果に対し、それぞれの機関が有する解析モデルを用いた解析を実施し相互比較を行うことで、セメント浸出モデルの妥当性について議論を行った。
S&B (スウェーデン核燃料廃棄物管理会社)	スウェーデン地下研究施設(DRL)に関する国際共同研究(2国間協力)[1991年より実施;1999年より電力中央研究所と共同実施]	・原位置における核種移行試験(TRE Block Scale) ・水理・物質移動モデリングタスクフォース ・実規模処分技術の実証試験(Prototype Repository Project-PRP)	原位置での水理・物質移行試験(TRE Block Scale試験)および水理・物質移行モデリングタスクフォース(6月、3月に開催)、並びに実規模処分技術の実証試験(Prototype Repository Project-PRP)[4.2.2]に参加し、解析モデルの検証および室内試験において取得されたデータの検証に反映してきている。
US/DOE (米国エネルギー省)	DOE/JNC放射性廃棄物管理分野の研究開発に関する協力(2国間協力)[1986年より実施]		
ORNL (ローレンスバークレー国立研究所)	上記協力協定に基づく「岩盤中の水理・物質移動に関する共同研究」	・サイト特性調査手法及びモデル化手法の開発 ・亀裂性岩盤中の性能評価と特性調査の連携に係る方法論	観測地域で実施した試験調査で得られたデータ及び既存の文献データに基づいて構築した水理地質構造モデルを使用して、観測地域の地層中の特徴(ガス発生、高塩分濃度、高間隙水圧等)を再現するためのモデル解析に着手した。また、スウェーデンユネスク(DRL)で実施されているトレーサ試験データを使用して、亀裂性岩盤中の性能評価とサイト特性調査連携のための方法論について検討し、性能評価の時間スケールでの移行現象を評価した。
PNNL (パシフィックノースウェスト国立研究所)	上記協力協定に基づく「熱力学、吸着の基本データ取得に関する共同研究」	・アクチノイド元素の熱力学データの整備 ・核種の吸着モデル及び評価用データベース取得整備 ・核種の浸出モデル及び熱力学データの検証、他	アクチノイド元素の水溶液中での固相の結晶化に関する研究を共同で進め、Thに引き続き、U(IV)に対しても実験的検証を行った[5.2.3.1]。さらに、アクチノイド元素を対象とした共沈データの取得を開始した。
SNL (サンディア国立研究所)	上記協力協定に基づく「地層処分システムの性能評価と実験的研究」	・岩石中拡散及びコロイド移行挙動に関する試験、モデル化 ・性能評価、地質環境調査及び意思決定のための手法開発	性能評価研究の一環として地質媒体表面へのコロイド付着に関する実験的研究及び評価モデルの開発を行うとともに、二次元拡散試験に基づく拡散モデルの適用性研究、層超深地層研究所用地における水理解析モデルによる評価、線形論的モデルの適用性研究、性能評価における統合的モデル研究及び品質保証手法の開発を行っている。また、観測における水理解析結果を用いて、物質移行感度解析を進めている。
LLNL (ローレンスリバモア国立研究所)	上記協力協定に基づく「ニアフィールド現象と人工バリアの性能に関する共同研究」	・人工バリア材料の相互影響についてのTBC、TIMC連成モデリング ・Pitzerデータベースの拡張と適用	TBC・TIMCモデルの開発・組成方法の検討やPitzerアクチノイドデータベースに関する開発を共同研究として実施している。
KAERI (韓国原子力研究所)	KAERI/JNC地層処分研究開発分野における協力取り決め(2国間協力)[2003年3月締結]	調整中	協力取り決めに基づき具体的な協力テーマについて検討を実施している。
UCB (カリフォルニア大学バークレー校)	UCB/JNC国際共同研究「広域安全評価モデルの統合化に関する研究」	・亀裂中緩衝材浸透過程モデル化研究 ・ニアフィールド岩盤における亀裂ネットワークモデル開発・解析 ・処分場全体性能評価モデルの統合に関する研究	これまで開発してきた、亀裂中緩衝材浸透過程モデル、ニアフィールド岩盤における亀裂ネットワークモデル、処分場全体性能評価モデルについて信頼性を高めるための改良を行うとともに、これらの個別モデルを統合化し処分場全体領域の性能評価を行うための手法検討に着手した。
DECOVALEX-III (9カ国、14機関)	熱-水-応力連成モデルの開発検証に関する国際共同研究プロジェクト [1995年より実施;これまでPhase1,2を終了]	・グリムゼル原位置試験場(スイス)での人工バリア試験(PEREX)、ユッカマウンテン(アメリカ)でのヒーター試験に対する解析と解析結果比較検討 ・再冠水問題、スケール効果問題に関するベンチマークテスト ・性能評価における連成現象の取扱いに対する科学的見解の取りまとめ	PEREX試験に関する予解解析、ユッカマウンテンの坑道規模加熱試験に関するTBC解析および「第2次取りまとめ」の硬岩系設置方式に関する再冠水挙動のTBC解析等を実施し、各回機関による解析結果の比較検討によりモデルの検証、高度化を図っている。また、亀裂情報を用いた岩盤物性のスケール効果に関する解析・検討を行っている。性能評価における連成現象の取扱いに対する検討についてはワークショップが開催されている。[4.2.2]
Wt. Terriプロジェクト(スイス連邦水理・地質調査所主催、6カ国10機関)	Wt. Terri地下研究所(オバリナス粘土層を対象)における原位置試験研究に関する国際共同研究プロジェクト[1996年より実施]	・オバリナス粘土層中の間隙水の地球化学的評価試験	構造水非構造水における空隙水の化学的組成および水質形成プロセスのモデル化に関する共同研究を継続的に実施している。
GAMBIT Club (USA主催、6カ国6機関)	緩衝材粘土中のガス移行モデル開発に関する国際共同研究プロジェクト [1996年より実施;これまでにPhase1~2を終了し、現在Phase3を実施中]	・緩衝材中ガス移行モデルの開発及び検証 ・新規データのレビュー及び解析 ・フェーズ2代替モデルとPEATプログラムの統合 ・Dual-Permeabilityモデルの検討	諸外国におけるガス移行試験の結果やガス移行モデルの概念等に関するレビューを進めるとともに、イギリス地質調査所(BGS)における実験結果を基としたモデル化やガス移行モデルのPEATプログラムへの組み込みについて検討を行った。また、粘土構造に関するモデル検討やガス移行経路に係わる検討も行った。4月に開催されたGAMBITフェーズ3会議に参加した。[4.2.3.1]
NEA/TDB (12カ国17機関)	熱力学データベースプロジェクト(Phase2) [1998年より実施;Phase1には参加していない]	・U, Am, Tc, Np, Puの熱力学データベースの更新 ・Ni, Se, Znデータのレビュー ・単純有機物に対する錯生成定数のレビュー	U, Am, Tc, Np, PuのTDB更新やNi, Se, Zn, 有機物錯体の熱力学データベース開発を運営委員会の管理のもとに継続した。
NEA/Sorption WG (11カ国14機関)	吸着モデル開発プロジェクト(Phase2) [1997年のPhase1開始より実施]	・吸着現象解析モデルにおけるベンチマーク解析等	サイクル機構はモデリングチームの1つとして、ベンチマーク計算のためのモデル化作業を実施するとともに、10月行われたワークショップに参加し、性能評価の観点からの熱力学的吸着モデルの適用性について議論を行った[5.2.3.2]。
SKC-CEN (ベルギー原子力研究センター)	モル原位置試験場における「ORALIS-a放射性高レベルガラスの複合原位置試験」に関する国際共同研究[2000年より実施中]	・JNC核種移行モデルやデータベースの検証作業 ・ベントナイト中の間隙水化学のモデル化 ・核種移行パラメータ設定と核種移行解析、他	実稼中の原位置試験の体系を対象として、粘土中の間隙水化学、ガラス溶解、核種移行を考慮した予解解析を実施し、11月のワークショップで報告するとともに、モデルの妥当性に関する議論を行った。[5.2.3.1]
IAEA-CRP (13カ国15機関)	地質環境条件下における高レベル廃棄物の化学的耐久性と性能評価に関する国際共同研究プロジェクト[1999年より実施中]	・高レベル放射性廃棄物の化学的耐久性や性能評価手法に関する研究	ガラス固化体等の高レベル放射性廃棄物の化学的耐久性試験や性能評価手法等に関して、最新情報の共有や手法開発について共同研究を進めている。
IAEA-CRP (9カ国9機関)	補充的安全指標に関する国際共同研究プロジェクト[2000年より実施中]	・天然放射性物質・化学毒性物質の賦存状態等のデータベース作成 ・天然安全指標(核種フラックス、濃度)の放射性廃棄物処分の安全評価に於ける利用方法・適用性に関する検討	天然放射性物質・化学毒性物質の賦存状態等のデータベースを更新するとともに、天然核種のフラックスを算出する方法論の検討結果をまとめている。[5.2.5]

付録C(4) 地層処分技術に関する研究開発において委託研究や契約業務等でご協力頂いている
国内外の関係企業等一覧(平成14年度;付録C(1)～(3)に記載した関係機関等を除く)

アジア航測(株)	網音計画(株)
アサヒ地水探査(株)	(株)西社組
(株)物理計測コンサルタンツ	(株)クインテッサジャパン
(株)地球科学研究所	(株)京都フィッシュン・トラック
(株)地球科学総合研究所	前田建設工業(株)
地熱エンジニアリング(株)	(株)明電舎
地熱技術開発(株)	三菱重工業(株)
(株)地層科学研究所	三菱マテリアル(株)
(株)CRCソリューションズ	三菱マテリアル資源開発(株)
(株)ダイヤモンドコンサルタンツ	三菱商事(株)
(株)人和地質研究所	(株)三菱総合研究所
(株)ドーコン	三井建設(株)
向和工業(株)	三井鉱山エンジニアリング(株)
(財)エネルギー総合工学研究所	(財)日本分析センター
ENVIROSCO(英国)	(財)日本気象協会
(株)富士総合研究所	(株)日建設計
復地調査設計(株)	日楳(株)
Geo Solutions International(米国)	日鉱探測(株)
Golder Associates Inc.(米国)	日鉄鉱コンサルタンツ(株)
(株)八州	(株)大林組
(株)八洋ボーリング	応用地質(株)
(株)阪神コンサルタンツ	パリア・サ・ヴェイ(株)
(株)間組	(株)レアックス
日立エンジニアリング(株)	(株)三栄
(株)日立製作所	サンコーコンサルタンツ(株)
日立造船情報システム(株)	セントラル・コンピュータ・サービス(株)
北電興業(株)	(株)島津テクノリサーチ
北電総合設計(株)	清水建設(株)
石川島播磨重工業(株)	(株)シーテック
(有)イタガキ商事	(株)総合保衛センター
ジオスペースサイエンス(株)	住龍コンサルタンツ(株)
鹿島建設(株)	大成建設(株)
(株)加藤組	大成基礎設計(株)
河原ボーリング(有)	(株)竹中工務店
川崎地質(株)	東洋エンジニアリング(株)
(株)ケージーエンジニアリング	(株)東横ユルメス
(株)コベルコ科研	Westbay Instruments Inc.(カナダ)
(株)神戸製鋼所	
国際航業(株)	
コンピュータソフトウェア開発(株)	

【付録 D】

公開文献リスト（平成 14 年度）

付録D 公開文献リスト(平成14年度)

【本社】

- 五十嵐寛、宮原 要、堀川正雄、船 幸男、高木和弘(2002)：高レベル放射性廃棄物処分の実施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、第8回動力エネルギー技術シンポジウム「新世紀の動力エネルギー技術2002」資料集。
- 石黒勝彦(2002)：フィンランドのセーフティケースの特徴－各国の処分システム、性能評価との比較－、日本原子力情報センター特別講演会「フィンランドの使用済燃料最終処分場建設計画に学ぶ」資料集、2002年4月15日、pp.24-48。
- 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－実施段階を迎えた研究開発の新たな展開－(平成14年1月23日、東館ホール)発表資料/会場で寄せられたご意見・ご質問と回答、サイクル機構技術資料、JNC TR1200-2002-001。
- 核燃料サイクル開発機構(2002)：第4回サイクル機構シンポジウム－サイクル機構の新たな展開－、平成14年10月11日、有明町朝日ホール。
- 核燃料サイクル開発機構(2002)：サイクル機構シンポジウム茨城、サイクル機構技術資料、平成14年11月7日、水戸市民文化センター。
- 核燃料サイクル開発機構(2002)：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成13年度報告－、サイクル機構技術資料、JNC TR1400-2002-003。
- 核燃料サイクル開発機構(2003)：地層処分技術に関する研究開発報告会－処分技術の信頼性を支える基盤の強化に向けて－(編集、平成15年2月28日、ヤクフットホール、サイクル機構技術資料、JNC TR1400-2002-019)。
- 河内東海天(2002)：なぜ、地層処分なのか？地層処分の技術的・論理的背景、第18回「バックグラウンド夏期セミナー」資料集、日本原子力学会バックグラウンド部会、pp.2-12-1-2、12-8。
- 前川忠頼(2002)：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－(会議報告)、サイクル機構技術、No.15、pp.131-134。
- Miyahara, K., Nakano, H., Takasu, A., Naito, M., Umeta, H., Makasugi, K., Ishiguro, K. (2002): 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 19-22, 2001, JAEA TECDOC-1282, pp.116-125.
- Miyahara, K., Nakano, H., Kato, T., Makasugi, K., Sawada, S., Hirai, Y., Takasu, A., Naito, M., Umeta, H. (2001): An Overview of the H12 Performance Assessment in Perspective, Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXV, Mat. Res. Soc. Symp. Vol.713, pp. 177-187.
- Nakagami, Y. (2002): Waste Management Program in JNC and Its Contribution to National Program, PNEC2002(The 13th Pacific Basin Nuclear Conference), The 13th Pacific Basin Nuclear Conference, Shenzhen, China.
- 滝沢真之、葛藤信博、小橋元久(2003)：リスクコミュニケーションの手段としての「インターネットフォーラム」の活用－地層処分をテーマとした事例を通じて－、安全工学、Vol.42, No.1, pp.51-59。
- 清水和彦(2002)：第2次取りまとめから、安定な地層環境の選定に向けて、第3回安全調査ワークショップ－処分地選定段階における環境要件(地震・火山を中心として)－、2002年12月原子力安全委員会ホームページ(http://www.jst.go.jp/sannou/shidai/soukaiji_kensaku_f.htm)。
- 堀川正雄、宮原 要(2003)：地層処分－安全確保の考え方と研究開発の現状－「地層処分研究開発第2次取りまとめ」における安全評価を中心に、日本物理学会「原子核研究、研究会報告、Vol.47, No.8, pp.53-66。
- Shiozaki, M., Ishizuru, T., Igarashi, H., Shirizu, K., Ishiguro, K., Ishikawa, H., Takeda, S. and Yamasaki, S. (2002): JNC's R&D on HLW Disposal to Enhance Technical Reliability and Confidence in the Implementation Phase, Proceedings of the 10th International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas, pp.1025-1032.
- 船 幸男、宮原 要、清水和彦、五十嵐寛、石黒勝彦(2002)：サイクル機構における高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の現状－第2次取りまとめ以降の研究開発の計画と成果の概要－、第18回「バックグラウンド夏期セミナー」資料集、日本原子力学会バックグラウンド部会、pp.2-13-1-2、13-6。
- 船 幸男、宮原 要、清水和彦、五十嵐寛、石黒勝彦(2002)：サイクル機構における高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の現状－実施段階における研究開発と成果の概要－、日本原子力学会九州支部「第21回研究発表講演会」要旨集、pp.22-25。

【東濃地科学センター】

- Alexander, V.R., Ota, K., Wari, A. and Kicknaier, W. (2002) : In situ radionuclide retardation in groundwater conducting systems - overview of the research programme in the Grimsel Test Site, central Swiss Alps, Proceedings 9th International Symposium on Environmental Radiochemical Analysis (ERA2002), Maidstone, Kent, UK, September 18-20, 2002.
- 天野健治, 佐尾英嗣, 太田久生 様 (2003) : 東濃ウラン鉱床におけるナチュラルアナログ研究—ウラン鉱床分布域における陸昇現象について—, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, p. 950.
- Ando, M. (2002) : Overview and purpose of the active fault probe at the Aotsubawa Fault system - Observations inside and outside a 480 m tunnel throughout a subsidiary fault, Seismogenic Process Monitoring, A. A. Balkema Publishers, pp. 221-228.
- Arthur, R., Iwatsuki, T., Hama, K., Amano, K., Hitealfe, R. and Ota, K. (2002) : The redox environment of deep groundwaters associated with the Tono uranium deposit, Jpnno. Sci. Basis Nucl. Waste Manag. XXV, pp. 833-840.
- 渡井和泉, 加藤勇治 (2002) : 雨水・河川水の採取・分析 (平成 13 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 TJ7420 2002-026.
- 渡森浩一, 石丸恒存, 岩月輝希 (2002) : 日本列島における火山周辺の酸性地下水分布, サイクル機構技術, No. 15 (2002. 6), pp. 103-111.
- 渡森浩一, 梅田浩司, 石丸恒存, 小松 亮 (2003) : 温泉地化学データベースの作成, サイクル機構技術資料, JNC TN7450 2002-003.
- Boyke, M.A., McElbreen, M.A., Arthur, R.C., Ota, K. and Iwatsuki, T. (2002) : Mineralogical controls on uranium immobilization at Tono Uranium Deposit, Japan, Eng Trans. AIG, 83, Fall Meet. Suppl., Abstract, V22B-1226
- Dobski, W. (2002) : Seismic Tomography Software Package, Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Science, Monographic Volume B-30 (353), pp. 1-103.
- Dobski, W. (2002) : Source investigation of small events using pseudo spectral deconvolution technique, 地球惑星科学観測学会 2002 年合同大会予稿集, S044-003.
- Dobski, W. and Ando, M. (2002) : Bayesian approach to seismic tomography: Average vs. maximum likelihood solution, 日本地震学会講演予稿集 2002 年秋季大会, P100.
- Dobski, W. and Ando, M. (2002) : Monte Carlo sampling of solutions to velocity tomography problem: A quest for imaging accuracy, Eos Trans. AGU, 83, Fall Meet. Suppl., Abstract, p. P985.
- Dobski, W. and Ando, M. (2002) : Robust and accurate seismic (acoustic) ray tracer, EGS XXVII General Assembly, France, 21-26 April 2002, EGS02-A-02699.
- Dobski, W. and Domanski, B. (2002) : An application of the pseudo-spectral technique to retrieving source time function, EGS XXVII General Assembly, France, 21-26 April 2002, EGS02-A-02701.
- Dobski, W., Todorokov, K., Uryake, M., Sugimoto, S., Okuda, T. and Ando, M. (2002) : Ocean bottom crust deformation measurement: Indirect acoustic location algorithm, 日本地震学会講演予稿集 2002 年秋季大会, C99.
- 延藤 豊, 納多 勝, 戸井田克, 藤田 茂 (2003) : 居浪が深地層研究所における工学技術に関する検討, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書: 清水建設株式会社, 株式会社大林組, 西島建設株式会社, 大成建設株式会社), JNC TJ7400 2002-010.
- 藤枝忠広 (2002) : 地殻変動のシミュレーションに関する研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書: 株式会社富士総合研究所), JNC TJ7400 2002-005.
- 藤沢 泉, 村上欽也, 木野高志, 岡所敬一, 伊藤 潔, 和田博夫 (2002) : 鎌倉川断層の深部構造を探るための地震観測 (序報) —クリップ/ロック域の断層構造と地震発生特性—, 日本地震学会講演予稿集 2002 年秋季大会, P010.
- 藤原 治, 福田正己, 末吉哲雄, 五十嵐八枝子 (2002) : 北海道における最終氷期以降の永久凍土の厚み変化の推定, 日本第四紀学会 2002 年人会講演要旨集, 32, pp. 58-59.
- 藤原 治, 鎌倉孝信, 増田富士雄 (2003) : 内海における津波堆積シーケンスとフィリピン海プレート北東縁の沖波ポアンシャル, 北淡断層シンポジウム 2003 「21 世紀の海溝型巨大地震を探る」発表要旨集, pp. 38-41.
- Fujiwara, O., Kametaki, I. and Masuda, F. (2002) : Significance of sedimentological time-averaging for estimation of depositional age by ¹⁴C dating on molluscan shells, Abstracts of Ninth International Conference on Accelerator Mass Spectrometry, September 9-13, 2002, pp. 204-205.

- 藤原 治, 藤巻孝信, 酒井哲弥, 布指圭介, 増田高上雄, 田村 亨 (2002): 津波堆積物を識別する堆積シーケンスモデル - 南関東の内湾の例 -, 日本地質学会第 109 年学術大会講演要旨集, p. 100.
- 藤原 治, 橋田浩司, 野原 壯, 福島隆朗 (2003): 地層処分における地質環境の長期安定性に関する研究の重要性, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, p. 936.
- 藤原 治, 柳田 誠, 佐々木俊法, 三島智二 (2002): 日本列島の地滑り地形分布図 - 地形・地質との関連 -, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, Y028-P001.
- Goto, J., Ikeda, K., Kumazaki, M., Mukai, K., Iwatsuki, T. and Hara, K. (2002): Working Program for Shallow Borehole Investigations. JNC Tech. Rep., JNC TN7400 2002 005.
- Hara, K., Amano, K., Metcalfe, R., Yoshida, H., Iwatsuki, T., Wiltonowski, A.E. and Gillespie, H.R. (2002): Mineralogical and petrological evidence for the hydrogeological characteristics of the Tsukuyoshi fault, Japan, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 35, pp. 189-201.
- Hara, K., Metcalfe, R. and Noda, K. (2002): Possible uses of chlorine 36 for the study of groundwater flow system in a fresh groundwater environment in the Tono area, Gifu prefecture, central Japan. Abstracts of Ninth [International] Conference on Accelerator Mass Spectrometry, September 9-13, 2002, pp. 201-202.
- 花宮孝広 (2002): 東海地域での地層科学研究の現状 - 現場調査を中心として -, 第 18 回バックエンド夏期セミナー資料集, pp. 2-11-1-2 11-2.
- 花宮孝広, 大澤英昭, 茂田直孝 (2002): 経深地層研究所計画の現状, 原子力学会中部支部第 34 回研究発表会要旨集, p. 13.
- 村住由美子, 照澤峰夫 (2002): センサーアレイで取得される ACRSS データの存否イベント解析, 日本地質学会講演予稿集 2002 年秋季大会, P002.
- Hirahara, K., Doi, Y., Ando, H., Hoso, Y., Wada, Y. and Ohkura, T. (2002): Detailed displacement rate field around the Atsugawa fault located in the high strain rate zone, NKTZ, central Japan, 測地学国際シンポジウム金沢・日本測地学会第 98 回講演会要旨, pp. 13-14.
- 久田 司 (2002): WP システムによる地下水の採水・水圧計測 (平成 13 年度), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 株式会社ベスコ), JNC TJ7440 2002-005.
- 細田 宏, 松坂隆二, 下山昌宏, 永野修一 (2002): LH-13 号孔における地下水水圧・水質観測装置の導入・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 2002-002.
- 井尻裕二, 鈴木俊一, 杉原 豊, 下茂道人, 山本 肇, 文村賢一 (2002): 水源地管構造の不確実性を考慮した水理地質構造のモデル化及び地下水流動解析, 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 2002-003.
- 稲葉 誠, 三枝博光 (2003): 地下水流動の予測解析統合システム (GEOWASS システム) の概要と東海地域への適用事例, サイクル機構技術, No. 18 (2003. 3), pp. 71-82.
- 稲葉 誠, 三枝博光, Matthew J. White, Peter Robinson (2002): 地下水流動の予測解析統合システム (GEOWASS システム) の概要と東海地域への適用事例, 地下水学会誌, 44, pp. 105-123.
- 稲葉 誠, 三枝博光, 中野勝志, 小山 啓 (2002): 深部地下水の流動系を把握するためのモデル化領域とその境界条件の設定に関する検討, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 359-364.
- 石橋利久, 廣岡 知, 岩崎任伯 (2002): 正房操用地におけるマルチオフセット VSP 探査, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 日産探検株式会社), JNC TJ7420 2002-001.
- 石井英一, 水野 崇, 天野健治, 竹内真司 (2002): 脆性岩盤中の水みち認められる特徴 - 土佐花崗岩を対象とした研究事例 -, 応用地質学会中部支部平成 14 年度支部研究発表会・講演会予稿集, pp. 1-4.
- 石丸恒存, 角田地文, 朝顔充史 (2002): 崖成火山 (群) に関する文献調査, サイクル機構技術資料, JNC TN7420 2002-001.
- 石丸恒存, 那谷順英, 松村修治 (2002): 地殻変動特性に関するデータ解析, サイクル機構技術資料, JNC TN7420 2002-002.
- 石丸恒存, 小川原雄, 上原大二郎, 朝顔充史, 水谷幸次, ノノ宮淳, 巖山恒広 (2002): 紀伊半島南部地域における NT 法による深部比抵抗構造調査, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, J050-P002.
- 伊藤久男, 今井和俊, 桑原保人, 加納道之, 柳谷 俊, 伊藤 隆, 和田博夫, 水谷内修 (2002): 断層セグメント境界の理解に向けて - 勢津川断層帯帯地帯観測・ポアホール観測 -, 日本地震学会講演予稿集 2002 年秋季大会, P132.
- 伊藤 隆 (2002): 活断層と地殻上部地殻変形帯, 日本地質学会講演予稿集 2002 年秋季大会, 023.
- Ito, K. and Wada, H. (2002): Observation of microearthquakes in the Atsugawa fault region, central Honshu,

- Japan Seismicity in the creeping section of the fault). Seismogenic Process Monitoring, A.A. Balkema Publishers, pp. 229-243.
- 伊藤 茂, 阿部雅人, 渡辺雅人, 中井 博, 栗山久代 (2002): 東濃地科学センターにおけるベレトロンの現状, 第 15 回タンDEM加速器およびその周辺技術の研究会報告書, pp. 40-43.
- Itoh, S., Abe, H., Wainnabe, M., Nakai, M., Tachiyama, H. and Xu, S. (2002). Present status of the JNC Tono Geoscience Center AMS system, Abstracts of Ninth International Conference on Accelerator Mass Spectrometry, September 9-13, 2002, p. 140.
- 伊藤 康人 (2003): 古地磁気学的手法を用いたテクトニクスの復元に関する基礎研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 大阪府立大学), JNC-TT7400-2002-012.
- 岩月 輝希, 酒 克宏, 太田久仁雄, Arthur, R. (2003): 東濃ウラン鉱床におけるナチュラルアナログ研究 - ウランの長期的な溶解度変動幅の解析 -, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, p. 951.
- 岩月 輝希, 村上山記, 長沼 毅, 酒 克宏 (2002): 天然環境の水-鉱物-微生物システムの手探研究-ウラン鉱床の長期的保存に関わる岩盤の酸化還元傾向能力について -, 地球惑星科学国際学会 2002 年合同大会予稿集, B006-F001.
- 岩月 輝希, 太田久仁雄, Arthur, R., 酒 克宏, 天野健治 (2002): 東濃ウラン鉱床におけるナチュラルアナログ研究 - 地層中におけるウラン化学種の熱力学的解析 -, 日本地球化学会年會講演要旨集 (第 49 回), p. 72.
- Iwatsuki, T., Satake, H., Metcalfe, R., Yoshida, H. and Ifana, R. (2002): [Isotopic and morphological features of fracture calcite from granitic rocks of the Tono area, Japan: a promising palaeohydrogeological tool], Applied Geochemistry, 17, pp. 1241-1257.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002): 地質環境の長期安定性に関する研究年度報告書 (平成 13 年度), サイクル機構技術資料, JNC-TN7410-2002-003.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002): 地質環境の長期安定性に関する研究年度計画書 (平成 14 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 (2002): 超深地層研究所計画年度報告書 (平成 13 年度), サイクル機構技術資料, JNC-TN7400-2002-004.
- 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 14 年度), サイクル機構技術資料, JNC-TN7410-2002-005.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002): 平成 14 年度地質科学研究情報・意見交換会要旨集, サイクル機構技術資料, JNC-TN7410-2002-006.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002): 広域地下水流動研究年度報告書 (平成 13 年度), サイクル機構技術資料, JNC-TN7410-2002-007.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002): 広域地下水流動研究年度計画書 (平成 14 年度), サイクル機構技術資料, JNC-TN7410-2002-004.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002): 東濃地域における地質環境特性に関する研究-地表からの調査研究の考え方と進め方-, サイクル機構技術資料, JNC-TN7410-2002-008.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002): 東濃地科学センター地質科学研究公開文献リスト (2000 - 2001 年度), サイクル機構技術資料, JNC-TN7450-2002-001.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002): 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-TN7400-2002-003.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002): 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.
- 角田地文, 石丸和存, 鎌田浩哉, 松崎達二, 藤原 浩, 岩野文樹, 吉岡 哲 (2002): 大規模火砕流による基盤岩への熱影響, 地球惑星科学国際学会 2002 年合同大会予稿集, V026-P006.
- 角田地文, 梅田浩司, 石丸和存, 工藤 健, 藤原充史, 小松 亮 (2002): 紀伊半島南部における地殻構造について-非火山地域における高温異常域の地殻構造の検討例-, 応用地質学会中部支部平成 14 年度支部研究発表会・講演会予稿集, pp. 25-30.
- 鎌滝孝信, 藤原 浩 (2002): 完新統の貝殻密集層における時間平均化の一例, 日本第四紀学会 2002 年大会講演要旨集, 32, pp. 18-19.
- 鎌滝孝信, 梅田浩司, 藤原 浩 (2003): ^{14}C 年代測定による堆積年代の推定における堆積学的時間平均化の重要性, 第四紀研究, 42, pp. 27-40.
- Kano, Y., Kawakata, H. and Yamaguchi, T. (2002): Ultrasonic technique for probing the changes of contact on a

- discontinuity subjected to normal load, *Seismogenic Process Monitoring*, A.A. Balkema Publishers, pp.297-305.
- 加納輝之, 柳谷 俊, 山下 太, 石井 純, 山内常生, 浅井康広 (2002): 茂住調査坑道における間隙水圧測定とその間隙弾性論的な解釈, 日本地震学会講演予稿集 2002 年秋季大会, C91.
- Kano, Y., Yanagidani, T., Yamashita, F., Ishii, H., Yamauchi, Y. and Asai, Y. (2002): Poroelastic monitoring of stress buildup process at the Mozumi-Sukenobu Fault, *Eos Trans. AGU*, 83, Fall Meet. Suppl., Abstract, p.F1296.
- Karasaki, K. and Christin, D. (2003): Constraining Hydrologic Models Using Thermal Analysis. 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.377-382.
- 片岡達彦, 竹内真司, 松井裕哉, 向井 圭, 前村衛之 (2003): 坑道周辺における不飽和領域の原位貫透計測手法の研究, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, p. 873.
- 加藤春寛 (2002): 深部岩盤における初期応力測定プローブを用いた原位貫透試験, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 同和工業株式会社), JSC TJ7400 2002-008.
- 加藤春寛 (2002): 上坂花崗岩を対象とした断層の岩盤力学的影響に関する室内試験, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 同和工業株式会社), JSC TJ7400 2002-005.
- 河村秀紀, 納多 勝 (2002): 立坑及び坑道の掘削に伴う地質環境特性調査 - 非破壊技術の超深地層研究所計画への適用, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 株式会社大林組), JSC TJ7410 2002-002.
- 八村良一, 國清智之, 石丸恒存 (2002): 横田玄武岩類に見られる不均質なマントルダイアボルとその起源, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, G030-002.
- 大村直樹, 松本浩二, 坂口清敏, 中岡茂雄, 佐藤裕紀 (2003): 不均一岩体の広域応力場評価法に関する研究, 資源・素材学会春季大会講演集(1)要録編 (平成 15 年度), pp.93-94
- 小坂 寛, 梶田 純, 花家孝広, 徳 克宏 (2002): 第三紀堆積岩中の空洞配列に伴う間隙水の染動 (予察), 日本水文科学会学術大会発表要旨集, pp.51-52.
- 藤川悠一, 若松貴則, 小田川信哉 (2002): 平成 13 年度表層水理研究における熱気量測定手法の比較, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; アジア航測株式会社), JSC TJ7440 2002-006.
- Kuda, T. and Yamaoka, K. (2002). Pull-down basin in the central part of Japan due to subduction-induced mantle flow. *Eos Trans. AGU*, 83, Fall Meet. Suppl., Abstract, p.F1292
- Kunazaki, N., Ota, K., McCrann, G., Ikeda, K., Anano, K., Takeuchi, S., Hana, K., Nakano, E., and Osawa, H. (2003): An Overview of the NII-4 Borehole Investigations during Phase IV. *JNC Tech. Rep.*, JNC TN7400 2002-006.
- Kunazaki, N., Ota, K., Nakano, K., Ikeda, K., Anano, K., Takeuchi, S., and Hana, K. (2002): An Overview of the NII-4 Borehole Investigations during Phase III. *JNC Tech. Rep.*, JNC TN7400 2002-002.
- 熊澤峰元, 茂田直孝, 杉本裕史 (2002): 水田らの観測物性評価 地殻深部水の追跡観測 - 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, G007-007
- 岡友孝洋, 熊澤峰元 (2002): 回転型 ACROSS 観測装置の新制御方式, 日本地震学会講演予稿集 2002 年秋季大会, pp P076
- Kuwahara, Y. and Ito, H. (2002): Fault low velocity zones deduced by trapped waves and their relation to earthquake rupture processes, *Earth Planets Space*, 54, pp.1045-1048.
- Nanada, Y., Kuwahara, Y., Ito, H. and Takenaka, H. (2002): 3D finite-difference simulation of seismic fault zone waves -Application to the fault zone structure of the Mozumi-Sukenobu fault, central Japan-, *Earth Planets Space*, 54, pp.1055-1058.
- Nanada, Y., Kuwahara, Y., Ito, H. and Takenaka, H. (2002): Fault zone discontinuity of Mozumi-Sukenobu fault inferred from the 3D finite-difference simulation of the fault zone waves excited by explosive sources, *Eos Trans. AGU*, 83, Fall Meet. Suppl., Abstract, p.F990.
- Martin, A. J., Takahashi, M., Yusa, Y. and Ishimaru, T. (2002): Utilizing probability analyses to predict the long-term spatial patterns of monogenetic volcanoes in southwest Japan, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, G004-010.
- Martin, A. J., 高橋正樹, 湯佐泰久, 梅田浩司, 石丸恒存 (2002): 単成火山群の確率的将来予測 - 東伊豆および東山陽地方の単成火山を例にして -, 日本地質学会第 109 年学術大会講演集官集, p. 152.
- Martin, A. J., Takahashi, M., Yusa, Y., Ureda, K. and Tanomura, M. (2002): Probabilistic modeling of the long-term spatial patterns of eruptive centers: case studies from Higashi-Izu and Kannabe-Oginozen monogenetic

- volcano groups, Japan. *Eos Trans. AGU*, 83, Fall Meet. Suppl., Abstract, pp.F1501-F1502.
- Martin, A. J., Ueda, K. and Yusa, Y. (2003): Probabilistic Approaches for Predicting the Long-term Spatial and Temporal Characteristics of Monogenetic Volcanoes: Application to Two Monogenetic Volcano Fields in Japan, *JMC Technical Review*, No. 18 (2003.3), pp. 59-70.
- 井本 一彦, 竹内真司 (2003): 試錐掘削時の圧力応答による孔間における高透水ゾーンの連続性の評価, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, p. 874.
- 佐本裕史, 茂田直孝, 照澤峰夫, 中島崇裕 (2002): アクロス計測による複素誘電率スペクトル測定 I. 水の誘電分散, 日本地震学会講演予稿集 2002 年秋季大会, P016.
- 佐本裕史, 茂田直孝, 照澤峰夫, 中島崇裕 (2002): アクロス計測による複素誘電率スペクトル測定 II. 固体イオン伝導体の誘電分散, 日本地震学会講演予稿集 2002 年秋季大会, P035.
- 佐本裕史, 茂田直孝, 照澤峰夫, 中島崇裕 (2002): 水の電磁遠隔探査における物性推定の基礎研究 I. 石英等の誘電率測定, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, 6007-009.
- 岡野 幸, 上原大二郎, 藤内 聡, 中野務志, 太田陽一, 川中 卓 (2002): 花崗岩中の地質構造を対象とした反射法弾性波探査の適用, 日本地震学会講演予稿集 2002 年秋季大会, P003.
- 岡野 幸, 上原大二郎, 藤内 聡, 太田陽一, 川中 卓 (2002): 花崗岩地域を対象とした反射法弾性波探査の適用, 応用地質学会中部支部平成 14 年度支部研究発表会・講演会予稿集, pp. 31-36.
- McCrack, G. (2002): Summary of Activities for the Mizunami Underground Research Laboratory, International Fellowship 2000 to 2002, *JMC Tech. Rep.*, JMC TN7440 2002-004.
- Metcalf, R. (2002): Geochronal Methods for Interpreting Groundwater Flow around Toms and Their Generic Relevance to Site Selection, Site Characterization and Performance Assessment -A Final Report on a JMC International Fellowship, *JMC Tech. Rep.*, JMC TN7440 2002-002.
- Milodovskii, A. E., Gillespie, M. R., Barnes, B. P., Metcalf, R., Hays, K., Amann, K., Mizuno, T. and McCrack, G. E. (2002): Generic implications for engineered barriers from a study of the Tsukiyoshi fault, Toms, Gifu-ken, Japan, *DIA Edinburgh 2002, Programme with Abstracts*, p. 256.
- 宮原智哉, 稲葉 敏, 三枝博光, 竹内真司 (2002): 広域地下水流動研究実施領域における水収支観測結果と地下水流動スケールの検討, *サイクル機構技術*, No. 16 (2002.9), pp. 137-148.
- 宮原智哉, 片岡達彦, 竹内真司 (2002): 1989～2000 年度表層水理観測年報, *サイクル機構技術資料*, JMC TN7450 2002-002.
- 宮原智哉, 片岡達彦, 竹内真司 (2002): 水収支観測による水盤浸透性の算出と観測流域スケールの検討, 日本地下水学会 2002 年秋季講演会講演要旨, pp. 202-205.
- Mizuno, T. and Nishigami, R. (2002): Deep structure of active faults estimated from underground observation of fault-zone trapped waves -The Najima and the Mezumi-Sukenobu faults, Japan-, *Eos Trans. AGU*, 83, Fall Meet. Suppl., Abstract, p.F991.
- 木野 崇, 岩月輝希, 酒 克也, 古江良裕, 天野健治 (2002): 深部地下水の地球化学研究における採水手法と品質管理について, 応用地質学会中部支部平成 14 年度支部研究発表会・講演会予稿集, pp. 5-8.
- 水野高志, 西上鉄也, 伊藤久男, 桑原保人 (2002): 自然地震にみられる断層トップ部の解析による変化・粘結断層の深部構造, 日本地震学会講演予稿集 2002 年秋季大会, C23.
- 森 光啓, 山本弘英, 藤田孝夫, 岩尾英嗣 (2002): 地下坑道におけるラドン濃度変動の観測とそのシミュレーション -坑道内ラドン濃度と風量の相関結果および考察-, 原子力学会中部支部第 34 回研究発表会要旨集, p. 4.
- 森 孝之, 森川誠司, 田部井和人, 岩野正太 (2002): 研究坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤への力学的影響評価解析, *サイクル機構技術資料* (契約業務報告書, 耶島建設株式会社), JMC TJ7400 2002-007.
- 森田 豊, 渡辺邦夫 (2003): 断層の透水異方性に着目したフラクチャーネットワーク地下水流動解析, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 365-370.
- 森脇 茂, 松島義章, 町田 洋, 岩井雅夫, 新井勇夫, 藤原 浩 (2002): 鹿児島県北西陸半野における縄文海進最盛期以降の地形発達, 第四紀研究, 41, pp. 253-268.
- Murakami, Y., Fujita, Y., Isejima, T. and Ietsuki, I. (2002): Abundance and viability of the groundwater microbial communities from a borehole in the Toms uranium deposit area, central Japan, *Microbes and Environments*, 17, pp. 63-74.
- 村上尚紀, 岩月輝希, 酒 克也, 長前 敏 (2003): 東盛ウラン鉱床における地下微生物の酸化還元細菌能力に関する評価, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, p. 952.

- 村上由記, 谷本大輔, 渡辺史子, 濱 克宏, 岩月輝希, 天野健治, 長沼 毅 (2002): 東濃地下堆積岩および花崗岩に生息する微生物の現存状況および群集組成, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, U006-P002.
- 武藤進紀, 渡辺真徳, 小室光世, 歌山 賢, 岩月輝希 (2002): 東濃ウラン鉱床周辺の新第三紀瑞浪層群堆積岩類の地球化学, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, G004-P003.
- 長沼 毅, 宇立奈保美, 鎌田夕佳, 谷本大輔, 渡辺史子, 岡本拓上, 村上由記, 天野健治, 岩月輝希, 濱 克宏 (2002): 東濃地下の硫酸固定菌・硝化菌・脱窒菌: 地下微生物が窒素サイクルに関与する可能性, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, B006-011.
- Naganuma, T., Harihar, K., Sakaki, T. and Natsui, H. (2002): Moisture Migration, Growth of Biofilm and Solute Transport in Unsaturated Fractured Rock Masses, JSC Tech. Rep., JNC T97400 2002-002.
- 中島崇裕, 熊澤峰夫, 横山由紀子 (2002): 人工信号源を用いた電磁探査における送受信方式の評価と信号伝播の性質, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, E016 P034.
- Nakajima, T., Xunntong, T., Kunazawa, H. and Yokoyama, Y. (2002): Development of a new electromagnetic sounding system, EM-ACROSS, EGS XXVII General Assembly, France, 21-26 April 2002, EGS02-A-02033
- 中島崇裕, 前田村行, 杉原弘道, 佐藤徳紀, 金川 忠 (2002): 坑道掘削による応力状態の変化について—応力解放法による初期応力と 2 次応力測定結果の比較—, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, Vol. III, pp. 547-548.
- 中島崇裕, 横山由紀子, 熊澤峰夫 (2002): コントロールソースによる電磁探査技術開発の方向, 地球惑星科学学術計画シンポジウムブリーディングス, pp. 199-202.
- 中間茂雄, 佐藤徳紀, 加藤春寛, 菊地慎二 (2002): 応力解放法に基づく深度 1000m 対応 3 次元初期応力測定装置の開発, 資源・素材 2002 企画発表・一般発表, pp. 131-132.
- 中間茂雄, 高倉 望, 松井裕哉 (2002): 東濃鉱山における坑道周辺岩盤の長期変位計測, サイクル機構技術資料, JNC T97410 2002-002.
- 中村圭太, 川崎 了, 金子勝比古, 佐藤徳紀, 中間茂雄 (2003): 三次元広域応力場の解析手法に関する研究, 資源・素材学会春季大会講演集(1)資料編(平成 15 年度), pp. 189-190.
- Yakano, K., Anano, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Saegusa, H., Hama, K., Kunazaka, N., Iwatsuki, T., Yabuuchi, S. and Sato, T. (2003): Working Program for WJZ-1 Borehole Investigations, JNC Tech. Rep., JNC T97400 2002 008.
- 並木和人, 鈴木健一郎, 小田匡寛, 松井裕哉 (2002): 比抵抗計測を用いた大型岩石試体の相態の可視化, 第 37 回地盤工学研究発表会平成 14 年度発表講演集, pp. 87-89.
- 橋本竜太郎, 須貝俊彦, 山口正秋, 大森博樹, 栗田泰夫, 藤原 浩 (2002): ボーリングコアの解析からみた桑名断層の更新世活動史, 日本第四紀学会 2002 年大会講演要旨集, 32, pp. 48-49.
- 新里忠史, 濱 克宏, 岩月輝希, 太田久仁雄 (2002): 天然ウラン系同位体の放射平衡・非平衡を用いた岩石中のウラン移行挙動の解析—堆積岩中の割れ目近傍におけるウランの移行範囲—, 原子力学会中部支部第 34 回研究発表会要旨集, p. 12.
- Mishigami, K. (2002): Seismological investigation of deep structure of active faults using scattered waves and trapped waves, Seismogenic Process Monitoring, A A Balkema Publishers, pp. 245-256.
- 野原 壯, 田中秀夫, 古腰和夫, 児玉敏雄, 毛丸恒存 (2002): 水理地質構造概念モデルを用いた観測的な数値解析—断層運動時の水資源環境の変化の推定—, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, S039-P004.
- 大西有三, 大津宏康, 西山 哲, 小野 徹, 松井裕哉 (2002): 地下空洞変位計測用デジタル写真測量技術の開発, サイクル機構技術資料, JNC T97400 2002-001.
- 大久保誠介 (2003): 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 14 年度委託研究報告書—, サイクル機構技術資料(研究委託報告書; 東京大学), JNC T97400 2002 001.
- Onishi, C. T., Shimizu, I., Mizoguchi, K., Ichihara, S. and Shimamoto, T. (2002): Influence of fault on the anisotropy of pore structure and permeability in granite, Tama area, central Japan, Eos Trans. AGU, 83, Fall Meet. Suppl., Abstract, pp. F1371-F1372.
- Ooi, Y., Hirahara, K., Ando, K., Ito, Y., Wada, Y. and Ukura, T. (2002): Dense GPS Array observations across the Atotsugawa fault, central Japan, Eos Trans. AGU, 83, Fall Meet. Suppl., Abstract, pp. F368.
- 人井隆一, 平泉和朗, 安藤雅幸, 細 肇信, 和田安男, 大倉敏宏 (2002): ひずみ集中帯に位置する断層川断層系—調査 GPS 観測によるひずみ経度場の詳細解析—, 日本地質学会講演予稿集 2002 年秋季大会, P049.
- 長田昌彦, 渡辺邦夫 (2002): 割れ目系岩盤を対象とした地質構造のモデル化に関する研究, サイクル機構技術資料(研究委託報告書; 埼玉大学), JNC T97400 2002-004.
- 大澤英昭, 中野勝彦, 横山 淳 (2002): 不確定性を考慮した地質環境特性評価の基本的な考え方について, 土木学会第

57 回年次学術講演会講演要集, pp. 385-386.

大澤英昭, 渡田直幸 (2002): 超深地層研究所計画-地表からの調査予備研究段階の現状-, 第 19 回岩盤システム工学セミナー放射線廃棄物の地層処分研究要集 (その 2), pp. 109-129.

太田久仁雄, 若月雅希 (2003): 東濃ウラン鉱床におけるナチュラルアナログ研究-変換シナリオを考慮した古水理地質学的研究-, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, p. 949.

Ota, K., Mori, A., Alexander, V.R., Frigg, B. and Schild, M. (2003): Influence of the mode of matrix porosity determination on matrix diffusion calculations. Jour. Contam. Hydrol., 61, pp. 131-145.

三枝博光, 稲葉 直, 澤田 稔 (2003): 断層の透水異方向性に着目した水理地質構造のモデル化-地下水流動解析-東濃地域を例として-, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 371-376.

三枝博光, 澤田 稔 (2003): 地質環境特性調査における地下水流動の不確実性評価に対する取り組み, 第 18 回バックエンド夏期セミナー資料集, pp. 1.5-1-1.5-21.

斎藤和春, 三枝博光, 渡辺邦夫, Gouton, V.H. (2002): ニューラルネットワークモデルによる割れ目密度の予測に関する考察, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp. 195-198.

斎藤和春, 三枝博光, 渡辺邦夫, 栗 元泰 (2002): 推移移相行列と情報論的エントロピーを用いた岩盤割れ目系の解析-東濃地区大深度試験調査データを用いた検討-, 応用地質, 43, pp. 143-155.

坂井行郎, 萩原和夫, 佐藤達紀, 見掛信一郎 (2003): 深地層の地下研究施設における通気・防災上の検討, 資源・素材学会春季大会講演集(1)資源編 (平成 15 年度), pp. 114-115.

黒木謙一 (2003): 深部地質環境の調査-解析技術の体系化に関する研究 (平成 14 年度), 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 2002-013.

島田顕臣, 武田精悦, 清水和彦, 大澤英昭 (2002): 福島県福島市における超深地層研究所計画-概要とこれまでの成果-, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, 6004-006.

清水以知子, 大西セリア智恵美, 上原真一, 溝口一生, 梶木利彦 (2002): 花崗岩体中の断層帯の透水係数と間隙構造, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, 6007-009.

清水和彦 (2002): 地層処分にとって重要な地質環境条件, 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, 6004-004.

下茂通人, 山本 崇, 文村賢一 (2002): 長期帯水試験の実証, 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 TJ7440 2002-001.

此土高英, 狩野裕之 (2002): 水理試験により得られる実測データの解析手法の高度化と適用 (その 2), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書: 株式会社深地組), JNC TJ7410 2002-004.

Stenhouse, M. J., Arthur, R., Ota, K., Iwatsuki, T., Neevalte, R. and Takase, H. (2003): Application of the system analysis approach to a natural analogue project, Sci. Basis Nucl. Waste Manag., XXV, pp. 857-865.

Stephansson, O., Shen, B., Rinne, H., Ruckers, T., Koike, K., Nakano, S., Ishida, T., Noro, Y. and Anunija, X. (2003): Geomechanical evaluation and analysis of research shafts and galleries in HLU Project, Japan, Preprint Proceedings of the 1st Kyoto International Symposium on Underground Environment - Role of Geo-technology to the Underground Environment, March 17-18, 2003, Kyoto JAMAK, pp. 39-49.

杉原弘彦 (2002): 21 世紀の社会と環境に責任を持つ岩盤工学, 地層処分と地層環境の超長期予測, 資源と素材, 118, pp. 431-433.

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

Takahashi, Y., Yoshida, H., Sata, N., Hana, K., Yusa, Y. and Shimizu, H. (2002): K- and W-type tectonic effects in REE patterns for water-rock systems in the Tono uranium deposit, central Japan, Chemical Geology, 184, pp. 311-335.

高倉 直, 松井裕哉, 大久保展介 (2002): 堆積岩を対象とした仮応力シミュレーションにおける一種圧縮加重下のクリープ試験, 第 37 回地盤工学研究発表会平成 14 年度発表講演集, pp. 621-622.

高瀬剛郎, 渡辺俊樹, 森内 聡, 松岡俊文, 芦田 謙 (2002): 音響波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, 35, pp. 375-385.

竹内直司, 下茂通人, 山本 崇, 文村賢一 (2003): 1,400m 級ボーリング孔を用いた長期帯水試験, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 173-178.

川井田亮, 納多 勝, 石塚寿夫, 澤田 稔 (2002): 超深深度における研究坑道の掘削に関する検討, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書: 東濃地設株式会社, 株式会社大林組, 川本建設株式会社, 大成建設株式会社), JNC TJ7400 2002-001.

- 戸井田克, 須山泰宏, 塩釜幸弘, 井本一彦, 阿部泰典, 古市光昭 (2002). 地質調査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3), サイクル地機技術資料 (契約業務報告書; 鹿島建設株式会社), JNC TJ7440 2002-007.
- 島井原誠, 丸山 誠, 堀 浩二, 鈴木健一郎 (2002). 心方集中による偏頗現象のモデル化に関する研究 (その1), サイクル地機技術資料 (研究委託報告書, 株式会社大林組), JNC TJ7400 2002-009.
- 鶴佐代子, 岡友孝洋, 熊澤峰夫, 茂田直孝 (2002). ACF053 送受信技術を用いた地磁計二次校正新手法の提案〜「簡単・正確・即活用」をめざして〜, 日本地震学会講演予稿集 2002 年秋大会, P077.
- 山 晃, 亀井淳子, 後藤綾子, 長尾敬介, 徳 克宏, 川村 稔 (2002). 希ガス及び Sr 同位体組成を利用した地下水流動状態の非定の試みー岐阜県東濃地域における事例ー, 日本地球化学会年会講演要旨集 (第49回), p.144.
- 上野友彦, 伊藤 深, 松村一男, 和田博夫, 吉井弘治 (2002). 藤津川断層帯およびその周辺における地下構造と地震活動, 日本地震学会講演予稿集 2002 年秋大会, P069.
- 梅田浩司 (2002). 地層処分技術に関する研究開発における火山学の役割ー研究開発の現状と今後の課題ー, 日本火山学会 2002 年秋大会予稿集, p.106.
- 和田博夫, 伊藤 深, 大見士朗, 北野悠雄, 小泉 真 (2002). 飛騨地域における地震活動の線状配列, 京都大学防災研究所年報, 45B, pp.555-559.
- Yanashita, F. and Yanagidani, T. (2002). Development of a sensitive, robust earth-resistivity measurement system stable over long period to monitor subtle temporal change in stress in the Earth's crust, Seismogenic Process Monitoring, A. A. Balkema Publishers, pp.399-410.
- Yanagidani, T., Kano, Y. and Yanashita, F. (2002). Frequency response of the pore pressure wells -From tides to seismic frequency-, Eos Trans. AGU, 83, Fall Meet. Suppl., Abstract, pp.F1391.
- Yokoyama, Y., Kumazawa, M. and Nakajima, T. (2002). Transfer function measured by electromagnetic sounding with an accurately controlled signal, Earth Planets Space, 54, pp.459-472.
- 吉澤 誠, Bershowitz, R. (2002). 亀裂ネットワークモデルによる解析作業の突越および長期観水試験の計画策定に関する支援, サイクル地機技術資料 (契約業務報告書; 三菱商事株式会社), JNC TJ7400 2002-002.
- 湯佐繁久 (2002). 資源・エネルギー・廃棄物, 我々はどこに行くのか?ー過去に学びそして未来を考えようー, 原子力学会中部支部第34回研究発表会要旨集, p.18.
- 湯佐繁久 (2002). 自然から学ぶ放射性廃棄物処分の知恵ーナチュラルアナログのおしえー, 資源と素材 118, pp.631-630.
- Zhou, Q. Y. (2002). A Study on Groundwater Movement Around Cavity In Fractured Rocks Using Electrical Resistivity Tomography (A Final Report), JNC Tech. Rep., JNC TR7400 2002-001.

【幌延深地層研究センター】

- 谷 信博, 守屋俊文, 東 宏幸, 池田和彦, 岸本宗九 (2002) : 幌延深地層研究計画における堆積層を対象とした物理探査, 社団法人 物理探査学会第106期(平成14年度春季) 学術講演会講演論文集, pp. 137-140.
- 篠島 敦(2002) : 幌延深地層研究計画の概要と現状, 放射化学討論会 u 放射体・環境放射能分科会, カデル2・7 (札幌市中央区北2条西7丁目).
- 篠島 敦 (2002) : 隙間の存在する緩衝材中における炭素鋼の腐食挙動, 第五回 放射性廃棄物地層処分に関する情報交換会, 北海道大学.
- 原口 隆, 市原 孝彦, 小笠原洋(2002) : 研究所設置地区およびその周辺地区の地質層序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; 復建調査設計株式会社), (登録準備中)
- 加 浩二, 松井裕哉, 木山英郎, 木梨秀博 (2002) : 証法を利用した地下空間掘削の影響領域評価に関する研究, 土木学会論文集No. 715/III-60, pp. 251-262.
- 堀田政広, 室井達巳(2003) : 地下水の水質・水質長期観測システムの設置, サイクル機構技術資料(契約業務報告書; 清水建設株式会社), (登録準備中)
- 堀田政広, 室井達巳(2003) : 水理地質調査モデル構築のための地下水水圧データの収集, 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), (登録準備中)
- 入矢桂史郎, 三上哲司, 竹田宣典, 秋好賢治(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; 株式会社大林組), (登録準備中)
- 核燃料サイクル開発機構 (2002) : 幌延深地層研究計画平成14年度調査研究計画, サイクル機構技術資料, JNC TN1410 2002-004
- 核燃料サイクル開発機構 (2002) : 幌延深地層研究計画平成13年度調査研究結果と研究所設置地区選定, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2002-017.
- 核燃料サイクル開発機構 (2002) : 平成 13 年度までの成果と平成 14 年度以降の計画の概要 -幌延深地層研究計画-, 平成 14 年度地層科学調査情報・意見交換会 -要旨集-, サイクル機構技術資料, JNC TN7410 2002-006, pp. 19-22.
- 船山弘一(2002) : 地設観測機器の設置, サイクル機構技術資料(契約業務報告書; 株式会社ケイジーエンジニアリング), (登録準備中)
- 窪田 茂, 堀内秀行, 納多 勝, 古市光晴, 岩佐健吾(2003) : 幌延深地層研究計画 地下施設建設に関する基本計画の検討, サイクル機構技術資料(研究委託報告書; 大成地設株式会社, 株式会社大林組, 鹿島建設株式会社, 清水建設株式会社), JNC TJ1400 2002-003.
- Kunimaru, T. and Iwatsuki, T. (2002) : Isotopic study the estimation of C-14 age of groundwater at the Horonobe, Hokkaido, Japan, ABSTRACTS Ninth International Conference on Accelerator Mass Spectrometry (AMS-9), pp. 198-199.
- 原口 洋, 篠島 敦 (2002) : 幌延深地層研究計画—地質環境調査技術開発—, 日本原子力学会北海道支部 第20回研究発表要旨集, pp. 42-43
- 守屋俊文, 篠島 敦 (2002) : 幌延巡回ガイド (HORONOBE Excursion Guide), サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2002-014.
- 中野洋一, 小林利章(2003) : 表層水理定数取得のための河川流況調査, サイクル機構技術資料(契約業務報告書; 財団法人日本気象協会), JNC TJ1440 2002-001.
- 中司 昇, 篠島 敦(2002) : 幌延深地層研究計画の概要, 日本原子力学会北海道支部 第20回研究発表要旨集, pp. 40-41.
- 西村史郎, 瓦木 達(2002) : GPS 観測システムの設置, サイクル機構技術資料(契約業務報告書; 日立造船情報システム株式会社), JNC TJ1410 2002 003
- 尾方伸久, 中塚宏典, 松岡直基 (2002) : 積雪寒冷地の水収支に与える積雪面蒸発量の影響, 日本応用地質学会平成 14 年度研究発表会, pp. 407-410.
- 太田陽一, 東中基倫(2002) : 幌延深地層研究計画における放射法地層探査を用いた地質構造調査, サイクル機構技術資料(契約業務報告書; 株式会社地球科学総合研究所), JNC TJ1410 2002-002.
- 太田陽一, 東中基倫(2002) : 遠隔監視システムに関する蒸発データの解析, サイクル機構技術資料(契約業務報告書; 株式会社地球科学総合研究所), JNC TJ1410 2002-005.
- 大内啓郎, 志村和徳, 佐藤 栄(2003) : 表層水理調査における地表水・降水の水質分析(1), サイクル機構技術資料(契約業務報告書; ニオマテリアル資源開発株式会社), JNC TJ1440 2002-002.

- 坂井哲郎, 白戸伸明, 千葉博之 (2002) : 通氣的観点からの地下施設の防災検討の試み, 平成14年度資源・素材関係学協会合同秋季大会講演要旨集, pp. 205-206.
- 嶋田 純, 小原 寛, 園丸貴紀, 川村 淳 (2002) : 間隙水中の安定同位体比に基づく低透水性薄成堆積岩盤中の地下水運動の解釈, H本地下水学会2002年秋季講演会要旨集, pp. 206-209.
- 下茂道人, 山本 聡, 熊本 創 (2002) : 亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象に関する研究, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 大成建設株式会社), (登録準備中)
- 白戸伸明 (2002) : 観測における地下施設の検討状況, 平成 14 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 2002-006, pp. 35-42.
- 鈴木治雄, 杉田 裕, 谷口直樹, 川上 進, 藤島 敦 (2002) : 隙間の存在する緩衝材中における炭素鋼の腐食挙動, 日本原子力学会 2003年春の年会要旨集, p. 935.
- 戸井田 点, 須山嘉宏, 塩釜幸弘, 渡美博行, 阿部孝典, 吉直光昭 (2002) : 幌延深地層研究計画における地質環境モデルの体系化に関する検討, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 廣島建設株式会社), (登録準備中)
- 鶴沼晋雄, 荒川 仁, 牧瀬賢治, 前田苗彦 (2002) : 幌延深地層研究計画に係わる環境調査(平成14年度), サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 西原敬業株式会社), JNC T11400 2002-008.
- 山本卓也, 下茂道人, 藤原 翔, 田部弘通, 田所照夫, 名合牧人 (2003) : 幌延深地層研究センターにおける試掘調査 (H03-3, 4, 5), 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) (登録準備中)
- 山崎第一, 中司 昇, 裕 哲博, 守屋慶文, 竹内竜史, 園丸貴紀, 白戸伸明, 尾方和久 (2002) : 幌延深地層研究計画 平成13年度調査研究成果と研究所設置地区選定, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2002-017.
- 山崎真 (2002) 幌延深地層研究計画の概要と調査研究の現状, 放射性廃棄物の地層処分研究特集 (その2) -第 19 回岩盤システム工学セミナー-, pp. 41-69.
- 山崎第一 (2002) : 地層処分技術に関する研究開発報告会予稿集-幌延深地層研究計画の現状-, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2002-019, pp. 15-22.
- 横井浩一, 岸本宗丸 (2002) : MT 法による地下深部比抵抗の長期観測, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 日鉱鉱コンサルタント株式会社), JNC TJ1410 2002-004.

【東海事業所処分研究部】

- 青山裕司, 高瀬博康 (2003) : 亀裂内不均質性を考慮した液体解析コードの開発, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; クインテッサジャパン), JNC TJ8400 2003-001.
- Bruz, R., Gauthier-Lafaye F., Stalle P., Depo K., Yoshikawa H. and Yui M. (2003) : Mechanisms of transport and retardation in clays enclosing the Cigar Lake uranium deposit (Canada), Uranium Geochemistry 2003, Nancy France. (印刷中)
- Bruz, R., Kamei, G., and Onnuki, T., (2002) : Radionuclide transport in the bangombe nuclear reactor zone (Gabon) - Evidence from H and Sm isotopes, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol 713, pp 849-859.
- 佐 野 伸 (2002) : 割れ目充填物によるジョグ構造の三次元幾何形状や水理地質構造解析, 日本応用地質学会平成 14 年度研究発表会講演論文集, pp. 203-206.
- Chijimatsu, M., Amemiya, K. and Sugita, Y. (2002) : Comparison of TFM simulation by four finite element codes against large-scale field experiment, Rock Engineering Problems and Approaches in Underground Construction, 2002 KSRM, Vol. 2, pp. 669-676.
- T々松正和, 雨宮 浩 (2003) : DRACOVALRX における解析評価研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 株式会社 関組), JNC TJ8400 2003-010.
- T々松正和, 雨宮 浩 (2003) : 実規模人工バリア試験の解析評価研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 株式会社 関組), (登録準備中)
- 篠守浩史 (2002) : コロイドの付着における物質移動係数の新たな評価手法の適用, 日本原子力学会バックエンド部会第 18 回バックエンド暑期セミナー資料集, pp. 2. 7-1 - 2. 7-2.
- 篠守浩史, 須若三和 (2003) : コロイドの移行過程における付着係数の評価, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, P7, p. 927.
- 篠守浩史 (2003) : 多孔質媒体中のコロイドの移行過程における付着係数の評価手法, 日本原子力学会原子力バックエンド研究, Vol. 9, No. 2.
- Dixon, D., Hattimo, J., Chandler, M., Sugita, Y. and Vignal, B. (2002) : Water Uptake By A Clay Bulkhead Installed In The Tunnel Sealing Experiment At Atomic Energy of Canada's Underground Research Laboratory, International Meeting on Clays in Natural and Engineered Matrices for Radioactive Waste Confinement, Abstracts, p. 111.
- 二口克人, 桜木勇治, 藤本幹也 (2002) : 処分環境下でのガラス変質に関するナチュラアナログ研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 株式会社ダイセコンサルタント), JNC TJ8400 2003-006.
- 畑 明仁, 細野賢一, 井尻裕二, 深田 淳 (2002) : 原位置トレーサー試験の逆解析による不確か性評価 (その 2 モデルの不確か性の評価), 土木学会第 57 回年次学術講演会講演要録集, C510-018, pp. 417-418.
- 畑 明仁, 井尻裕二, 大石雅也, 小野 誠, 杉原 豊 (2003) : 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か性評価 (II), 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 2003-001.
- 畑中耕一郎 (2002) : 高レベル放射性廃棄物処分場内における複重同化体の影響を考慮した核種移行解析, サイクル機構技術, No. 15, JNC TN1340 2002-001, pp. 79-89.
- 平井 孝, 棚井進治 (2003) : 護面材の弾塑性挙動評価モデルに関する検討, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, P9, p. 929.
- 平井 孝, 棚井進治, 菊池広人, 鈴木英明, 高谷 一彦, 大沼 敏 (2003) : 断層ずれに伴う人工バリアの力学的挙動評価, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-009.
- 本田 卓, 山口新吾 (2003) : 土壌中の考古学的金属製品の腐食に関する調査(JIC), 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 2003-0012.
- 本田 卓, 山口新吾, 上野健一, 吉川英樹, 他井久人 (2002) : 遊離で出た鉄器の X 線 CT による腐食評価, 腐食防食協会第 49 回材料と環境討論会講演集, pp. 201-204.
- 本間信之, 谷口直樹, 川崎 学, 川上 進 (2002) : オーバーバック腐食生成物の弾性係数の測定, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2002 010.
- 藤野賢一, 畑 明仁, 井尻裕二, 深田 淳 (2002) : 原位置トレーサー試験の逆解析による不確か性評価 (その 1 データの不確か性の評価), 土木学会第 57 回年次学術講演会講演要録集, C510-017, pp. 415-416.
- Iijima, K. and Kamei, G. (2002) : The study on behavior of iodine in geological formation. The International Workshop 2002, ANDRA-IUR, Mobility in biosphere of iodine, technetium, selenium and uranium, 1-3 Nancy, France.

- 井尻裕二, 畑 明仁, 細野賢一, 澤田 淳 (2002) : 原位位置トレーサ試験より得られる核種移行パラメータ値の不確実性, 日本原子力学会 2002 年秋の大会予集, F64, p. 654.
- 藤原八穂 (2003) : ガラス固化体の長期鉱物化に関する研究 (I), サイクル機構技術資料 (研究委託報告書, 九州大学), JNC TJ8400 2003-0014.
- 井上博之, 南 浩輔 (2003) : 軟岩の長期力学的変形挙動研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 前田建設工業株式会社), JNC TJ8400 2002-051.
- 石寺孝充, 宮本真哉 (2002) : 圧縮ベントナイト中の I の拡散挙動に及ぼすケイ砂混合率及び NaNO₃ の影響に関する研究, 日本原子力学会バックエンド部会第 18 回バックエンド夏期セミナー資料集, pp. 2.21-1 - 2.21-5.
- 石寺孝充, 宮本真哉, 佐藤浩夫 (2003) : 圧縮ベントナイト中の I, Cl の拡散挙動に及ぼすケイ砂混合率および NaNO₃ の影響, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, P28, p. 94E.
- 石原義尚, 千々松正和, 植山敏史, 田中向美子, 西宮 浩, 塩崎 功, 伊藤隆哉 (2003) : 熱-水-応力-化学連成挙動に関する研究 (II), 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), (登録準備中)
- 石原義尚, 岩本 裕, 小林茂樹, 植山敏史, 遠藤修司, 遠藤智徳 (2003) : 地層処分統合解析システムの製作設計 (II), 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), (登録準備中)
- 石原義尚, 福井 裕, 佐川 真, 伊藤隆哉, 松木健一, 小林和浩, 桑山有紀 (2003) : 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 (II), 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), (登録準備中)
- 伊藤 彰, 川上 進, 油井三和 (2003) : 熱-水-応力-化学連成挙動に関する数値解析コードの開発, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2002-022.
- 伊藤 彰, 川上 進, 油井三和, 千々松正和 (2002) : 地層処分における緩衝材浸潤時の物質移行に関する数値解析, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, CS10-052, pp. 485-486.
- 伊藤由司, 牧野仁史, 若杉圭一郎, 内田雅大, 石原義尚, 辻木直一 (2003) : 地層処分研究の技術情報統合システムの構築 (その 1) - 研究開発の連携支援への取り組み -, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, 033, p. 87B.
- 仲徳 敏, 柴田雅博, 吉田 泰, 陶川忠宏 (2003) : 収容試験結果に対するモデル適合性検討, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, 015, p. 860.
- Kamei, G. (2002): The source and behavior of indium dissolving in groundwater in the Mobera gas field, Japan, JNC Technical Report, JNC T58400 2002-012.
- 竹野 敏, 若田裕美子 (2003) : 緩衝材浸潤現象モデルの検証, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 石川島播磨重工業株式会社), (登録準備中)
- Kato, T., Suzuki, Y., Naito, M., Isiguro, K., Ikeda, I., Little, R. and Smith, G. (2002): Biosphere Modelling for the Safety Assessment of High-level Radioactive Waste Disposal in the Japanese H12 Assessment, The First Asian and Oceanic Congress for Radiation Protection (AORCP-1), T-8B 2 (PARP0164), Asian and Oceanic Association for Radiation Protection.
- 川上 進, 杉田 裕, 栗原雄二, 仲徳 敏, 油井三和, 谷口直樹, 梶井浩祐, 柴田雅博, 本間信之 (2003) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア等の性能保証に関わる研究の進め方と反映先, サイクル機構技術資料, JNC TN 8400 2002-026.
- 河村雄行 (2003) : ベントナイト中の物質移行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; 東京工業大学), JNC TJ8400 2003-011.
- 河村雄行, 市川康明, 鈴木 寛, 柴田雅博, 佐藤浩夫, 上野健一 (2002) : 緩衝材特性評価モデルの高度化に関する基礎研究 - 分子動力学法による緩衝材のミクロ挙動解析および均質化法による緩衝材のミクロ・マクロ解析 -, サイクル機構技術資料 (共同研究報告書; 東京工業大学, 名古屋大学), JNC T58400 2002-015.
- 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, 腐食防食協会材料と環境 2002 講演集, pp. 339-342.
- 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 TN8400 2002-016.
- 菊池広人, 梶井浩祐 (2002) : 圧縮ベントナイトの飽和応力測定手法の標準化及び海水条件下における透水性に関する一考察, 日本原子力学会バックエンド部会第 18 回バックエンド夏期セミナー資料集, p. 2.19-1.
- 菊池広人, 梶井浩祐, 松本一浩, 佐藤浩夫, 上野健一, 堀 剛志 (2003) : 緩衝材の飽和透水特性 II 海水性地下水が緩衝材の透水性に及ぼす影響 -, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-002.
- 菊池広人, 梶井浩祐, 佐藤浩夫, 上野健一 (2003) : 海水条件下における圧縮ベントナイトの透水特性, 北海道大学大学

- 院工学研究科第5回放射性廃棄物地層処分に関する情報交流会 (Sapporo Conference 2003) 報告書, pp. 11-21.
- Kitahata, A. and Kohara, Y. (2002): Solubility of $Np(IV)$ in Carbonate Media, *J. Nucl. Sci. Technol., Suppl.* 3, p. 294.
- 北村 晃, 小原幸利 (2002): アルカリ性水溶液中における $Np(IV)$ の炭酸錯体生成, サイクル機構技術, No. 17, JNC TN1340 2002-003, pp. 87-95.
- 北村 晃, 小原幸利 (2002): アルカリ性水溶液中における $Np(IV)$ の炭酸錯体生成, 2002 日本放射化学年會・第46回放射化学討論会, 1036.
- 北村 晃, 柴田雅博, 北尾秀夫 (2003): 還元条件下における鉄セレン化合物の溶解度測定, 日本原子力学会 2003 年春の年會要旨集, 06, p. 851.
- 北村 晃, 柴田雅博, 北尾秀夫 (2003): 還元条件下における鉄セレン化合物の溶解度測定, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-034.
- Sttenarz, A. and Sato, H. (2002): Studies on Migration Behavior of Radionuclides under Reducing Conditions in JNC, The 1st Asian and Oceanic Congress for Radiation Protection (AOCRP-1), T. 8B 4 (PARP0110), October 20-24, 2002, Seoul, Korea.
- 小嶋 光 (2003): 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(Ⅲ), サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 北海道大学), JNC TJ6400 2002-053.
- Kuno, Y., Kamei, G. and Ohtani, H. (2002): Natural colloids in groundwater from a bentonite mine, *Met. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 713, pp. 841-848.
- 久野義夫, 上田真二 (2003): 地下水中に存在するコロイドの特性評価に関する研究(Ⅱ), 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), (登録準備中)
- 横山広志, 千々谷正和, 杉田 裕, 小林 晃, 大西有三 (2002): FEBEX 原位置試験における緩衝材の再冠水現象の解析, 地盤工学会第37回地盤工学研究発表会, pp. 1255-1256.
- 黒澤 進, 柴田雅博, 上田真二, 小毛 悟, 林 賢一, 油井三和 (2002): 高アルカリ性条件でのベントナイトの変質とコロイドの生成に及ぼす影響, 日本原子力学会論文誌, Vol. 1, No. 2, pp. 244-248.
- 黒澤 進, 上田真二, 加藤博敏, 林 賢一, 久野義夫, 古川英樹, 油井三和 (2003): 核種 コロイド-岩盤間の分配吸着平衡に基づく核種移行モデルの適用性に関する検討, 日本原子力学会論文誌, (印刷中)
- 黒澤 進, 上田真二, 久野義夫, 油井三和, 長崎晋也 (2002): 放射性廃棄物地層処分の核種移行評価におけるコロイドの影響, 日本原子力学会原子力バックエンド研究, Vol. 6, No. 2, pp. 195-203.
- 黒澤 進, 古川英樹, 油井三和 (2002): 放射性廃棄物地層処分の核種移行評価におけるコロイドの影響, サイクル機構技術資料, JNC TN8410 2002-010.
- 黒澤 進, 油井三和, 久野義夫, 上田真二 (2002): 地下水中の天然コロイドの特性評価, 日本原子力学会 2002 年秋の大会予稿集, F68, p. 668.
- Little, R.H., Kato, T., Miki, T., Smith, G.H., Nalke, R.C., Watkins, B.M. and Yoshida, H. (2002): The Practical Application of a Reference Biospheres Methodology to Derive Flux to Dose Conversion Factors for the Japanese H12 Performance Assessment, Proceedings of International Conference on Radioactivity in the Environment, The International Union of Ecology.
- 牧野仁史, 若杉圭一郎, 小尾 要 (2003): 核種移行解析結果に対する感度分析の方法論の検討, 日本原子力学会 2003 年春の年會要旨集, P22, p. 942.
- 牧野仁史, 若杉圭一郎, 小尾 要, 神島邦彦 (2003): 核種移行解析結果に対する感度分析の方法論の検討(その1), サイクル機構技術資料, JNC TN8410 2003-006.
- 牧野仁史 (2002): 高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価における放射性核種の挙動解析, 日本放射化学会 & 放射体・環境放射能分科会, Proceedings of the Third Workshop on Environmental Radioactivity, KEK Proceedings 2002-7, pp. 287-294.
- Martins, J., Chandler, K., Dixon, D., Sugita, Y., Vignal, B. and Hansen, F. (2002): The Tunnel Sealing Experiment and Application to Repository Seal Design, Proceedings of the 10th International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas, pp. 602-609.
- Nasutoto, K., Kawabata, J., Toida, M., Sugita, Y., Kozak, E. and Chandler, S. (2002): Modeling of Transport Properties of Excavation Damage Zone and Plug based on Tracer Experiment of Tunnel Sealing Experiment, Excavation Damage Zone Workshop in: NARMS-TAC 2002, Toronto.
- 升元一彦, 杉田 裕 (2002): カナダ URL における火災型プラグの性能確認試験, 土木学会第57回年次学術講演会要旨

- 集, CS-10-033, pp.443-444.
- 松本一浩, 朝井忠治 (2002) : 地層処分研究における X 線 CT 法の適用性に関する検討, 日本原子力学会バックエンド部会第 18 回バックエンド夏期セミナー資料集, p. 2, 20-U.
- 松本一浩, 朝井忠治 (2003) : ベントナイト緩衝材の洗出特性の評価 (II), サイクル機構技術資料, JNC TS8400 2003-006.
- 三木浩史, 池田孝夫 (2003) : 地層処分安全評価における生物圏計画法の高度化に関する検討 (III), サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; H 障株式会社), (登録準備中)
- 宮野前俊一, 小川良和, 井上博之, 梨本 裕 (2002) : 軟岩の長期力学的変形挙動に関する研究, サイクル機構技術資料, JNC TS8400 2002-015.
- 森山裕丈 (2003) : 超ウラン元素の加水分解及び錯生成に関する研究 II, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 京都大学), JNC TJ8400 2002-054.
- Neyama, A., Ishihara, Y., Ito, A. and Yui, M. (2002): Development of Process Coupling System for the Numerical Experiment of High Level Radioactive Waste, Proceedings of the 3rd WSEAS International Conference on Applied and Theoretical Mathematics, No. 206, pp. 2061-2066.
- Ochs, M., Lothenbach, B., Shibata, M. and Yui, M. (2002): Thermodynamic Modelling and Sensitivity Analysis of Porewater Chemistry in Compacted Bentonite, International Meeting on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, December 9-12, 2002, Reims, France, Abstracts, pp. 37-38
- 大島孝信 (2003) : スメクタイトの緑泥石化に関する研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書, 上越教育大学), JNC TJ8400 2003 004
- 大島孝信 (2002) : 斯島第三系における成成作用にともなう緑泥岩の組成変化, 日本粘土学会第 46 回粘土科学副読会講演要旨集, pp. 46-47.
- 大久保博生 (2003) : 地層処分の性能評価におけるシナリオ解析の高度化 (II), サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 株式会社三菱総合研究所), (登録準備中)
- 大久保誠介 (2003) : 軟岩の長期挙動に関する研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 東京大学), JNC TJ8400 2002-062.
- 大西有三, 杉田 裕, 伊藤 彰, 川上 達, 油井三和, 小林 晃, 藤上広志, 千々松正和, 雨宮 博 (2002) : 人工バリアおよび周辺岩盤における連成モデルの開発プロジェクト「国際共同研究「DECOVALEX」, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, CS10-051, pp. 483-484.
- Rai, D., Yui, M. and Moore, R. A. (2003): Solubility and Solubility Product at 22°C of $UO_2(cr)$ Precipitated from Aqueous $U(V)$ solutions, J. Solution Chemistry 32, pp. 1-17.
- レジス・ブロス, 久保山満, 上野健一, 吉田英樹, 油井三和 (2003) : A natural analogue study of transport and retardation in clays enclosing the Cigar Lake high-grade uranium ore (Canada), 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, P33, p. 953.
- 佐伯和利, 中川 啓, 和田信一郎, 柴田雅博, 広城吉成, 神野健二 (2002) : シリカ・キブサイトに対する 2 価鉄・2 価マンガンイオンの吸着, 日本土壌肥料学会講演要旨集, 第 48 巻, p. 10.
- 佐伯和利, 中川 啓, 和田信一郎, 柴田雅博, 広城吉成, 神野健二 (2002) : ベントナイトにおける 2 価鉄, マンガンイオンの関与するイオン交換平衡の選択係数, 粘土科学, 第 42 巻, 第 1 号, pp. 1-5.
- 齋藤康幸, 長々本良一, 石黒勝彦, 加藤哲了 (2003) : ナチュララックス評価の方法論, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, P23, p. 943.
- 齋藤康幸, 稲垣八穂広, 出光一哉, 有馬立身, 上野健一 (2002) : HLW ガラス固化体 (P0798 ガラス) の浸出/蒸発挙動, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, P47, p. 967.
- Sasamoto, H., Yui, M. and Arthur, R. C. (2002). Hydrochemical Characteristics and Groundwater Evolution Modeling in Sedimentary Rocks of the Tono Mine, Japan, International Meeting on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Abstracts, pp. 261-262.
- 佐藤治夫 (2002) : 圧縮ベントナイト中の拡散移行経路の異方性に関する基礎的研究, サイクル機構技術, No. 18, JNC TS1340 2002 002, pp. 125-136.
- 佐藤治夫 (2003) : 圧縮ベントナイト中の粘土粒子の配向特性および各種拡散移行経路に及ぼす粘土鉱物含有率および圧縮成型方向の影響に関する, 日本原子力学会原子力バックエンド研究, Vol. 9, No. 1, pp. 49-60.
- 佐藤治夫 (2002) : 放射性廃棄物処分における緩衝材及び岩石マトリクス中の孔隙拡散移行経路での固液界面現象と移行モデルの高度化に関する研究, サイクル機構技術資料, JNC TS1440 2002-001.
- 佐藤治夫 (2002) : 堆積岩系岩石マトリクス中のイオンの拡散移行挙動 - 砂岩の基本特性および詳細間隙中のイオンの拡

- 散移行解析-, 日本原子力学会 2002 年秋の大会予稿集, P75, p. 675.
- 佐藤治夫 (2003) : 堆積岩系岩マトリクス中のイオンの拡散移行過程に関する研究 - 砂岩微細孔隙中での Cs 及び I の拡散移行挙動と固液界面モデル, サイクル機構技術資料, JNC TN1400 2002-022.
- 佐藤治夫 (2003) : 圧縮ベントナイト中の拡散移行経路の異方性に関する基礎的研究, 北海道大学大学院工学研究科第 5 回放射性廃棄物地層処分に関する情報交換会 (Sapporo Conference 2003) 報告書, pp. 1-10.
- 佐藤治夫 (2003) : 堆積岩系岩マトリクス中のイオンの拡散移行挙動 - 砂岩微細孔隙中のセシウム及びヨウ素の挙動-, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, P27, p. 947.
- Sato, H. and Miyamoto, S. (2002): Effect of Redox Potential of Diffusion of Redox Sensitive Elements In Compacted Bentonite - Selenium (Se) -, TRPro2002 Workshop on Modelling of Coupled Transport Reaction Processes, March 20-21, 2002, Karlsruhe, Germany, pp. 88-93.
- Sato, H. and Miyamoto, S. (2002): Diffusion Behaviour of Selenite and Hydroselenite in Compacted Bentonite, International Meeting on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, December 9-12, 2002, Reims, France, Abstracts, pp. 299-300.
- Sato, H. and Muranka, T. (2002) : Diffusion and Migration of Ions in Sedimentary Rock Matrix: Behaviour of Cesium and Iodide in Micropores of Sandstone, International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Materials Research Society, Dec. 1-5, 2002, Boston, U.S.A., Abstracts, pp. 722-723.
- Sato, H. and Suzuki, S. (2002): Fundamental Study on the Effect of an Orientation of Clay Particles on Diffusion Pathway in Compacted Bentonite, Preprints of Contributions to the Workshop on Clay Microstructure and Its Importance to Soil Behaviour, October 15-17, 2002, Lund, Sweden, pp. 87-86.
- Sato, H. and Suzuki, S. (2003): Fundamental Study on the Effect of an Orientation of Clay Particles on Diffusion Pathway in Compacted Bentonite, Applied Clay Science 23, pp. 51-60
- 佐藤 久, 吉野尚人 (2002) : 応力依存性を考慮した透水・トレーサー試験, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演要旨集, CS10-021, pp. 423-424.
- 澤田 淳 (2002) : 地味からの調査段階における地下水流動評価について, 第 19 回岩盤システム工学セミナー放射性廃棄物の地層処分研究特集 (その 2), pp. 131-150.
- 澤田 淳, 井尻裕二, 畑 秀仁, 細野賢一, 吉野尚人 (2003) : 新位置トレーサー試験より得られる核種移行パラメータ値の不確実性評価, サイクル機構技術, No. 18, JNC TN1340 2002-004, pp. 39-49.
- 澤田 淳, 三枝博光, 中野勝志, 大澤英昭 (2003) : 数値のモデル化手法を用いた地下水流動評価の不確実性について, 土木学会第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演要旨集, pp. 161-166.
- Sawada, A., Ohnishi, Y., Ohtsu, H., Ujiri, Y. and Nishiyama, S. (2002): Applicability of the Concept of Fractal to Fracture Network Model in Rock Mass, Proceedings of 2002 ISRM Regional Symposium on Rock Engineering Problems and Approaches in Underground Construction/July 22-24, 2002, SF011, KOER, pp. 203-210
- Shibata, M., Kubota, M., Sano, K., Kim, S. Y., Fujishima, A. and Sato, T. (2002): Analysis of Compacted Bentonite Contacted with Carbon Steel under Anaerobic Conditions, International Meeting on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Abstracts, pp. 151-152.
- 柴田隆博, 陶山忠宏 (2003) : 緩衝材の縦型化に関する予察解析, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-007.
- 柴田隆夫, 瀬尾真彦, 杉本克久, 水流 徹, 藤本慎司, 井上博之 (2003) : オーバーバック焼結材料の腐食挙動モデルの高次元化研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 社団法人核食防食協会), JNC TJ8400 2002-059.
- 柴田隆夫, 瀬尾真彦, 杉本克久, 水流 徹, 藤本慎司, 井上博之 (2003) : マグネサイト共存下における炭素鋼の腐食挙動に関する研究の現状と課題, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 社団法人核食防食協会), JNC TJ8400 2002-060.
- 高橋信博, 和崎 博 (2003) : 亀裂ネットワークモデルによる物質移行計算の簡易サンプル, サイクル機構技術資料, JNC TN8450 2002-009.
- 八浦信博, 柏崎 博, 戸田 敏, 佐々木康雄, 堀引孝宣 (2002) : 地層処分放射化学研究施設 QUALITY `クオリティ` の視察覚書, サイクル機構技術資料, JNC TN8450 2002-003.
- 高橋信博, 吉川英樹, 柏崎 博, 堀引孝宣, 本間信之, 澤田 淳, 若杉圭 郎, 飯島和哉, 坂本信一, 牧野仁史, 川上 達, 藤井薫治, 杉田 裕, 谷口直樹, 伊藤 彰 (2003) - 地層処分研究の理解促進に資する可視化素材, サイクル機構技術資料, JNC TN8450 2002-010.
- 重野喜政, 並河 勇, 高谷一郎 (2003) : 緩衝材長期力学挙動構成モデルの検討 (II), サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 株式会社竹中工務店), (登録準備中)
- 下茂通人, 文村賢一, 菅原勝彦, 小原祐三, 佐藤 晃 (2003) : X 線 CT による亀裂開口幅評価, サイクル機構技術資料

(研究委託報告書；人成建設株式会社) (登録準備中)

- 下坂道人, 山本 暁, 熊本 創 (2003) : 亀裂を有する軟岩中の液れと移行現象に関する研究, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書；人成建設株式会社), (登録準備中)
- 杉田 裕 (2002) : プラグ周辺部の泥削形勢領域への粘土グラウト注入の適用性 (TSX プロジェクト), サイクル機構技術資料, No. 16, JNC TN1340 2002-002, pp. 13-26.
- 杉田 裕, 下松正和, 雨宮 博 (2002) : ベントナイトペレットによる隙間充填性および人工海水での性能確認, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, CS10-038, pp. 457-458.
- 杉田 裕, 伊藤 彰, 川上 進 (2002) : プロトタイプ処分場プロジェクトにおける試験環境条件および計画項目, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2002-027.
- 杉田 裕, 菊池広人 (2002) : 人工バリアにおける緩衝材の隙間形勢挙動に関する基礎研究, サイクル機構技術資料, JNC TN8430 2002-003.
- 杉田 裕, 川上 進, 戸井田克 (2003) : トンネルシーリング性能試験における試験環境条件および計画項目, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-002.
- Sugita, Y., Kawasumi, S. and Iui, M. (2002) : What are the Requirements of Sealing Performance?, Workshop on Backfill Requirements in KBS-type repository, SKB report IFR 02-05, pp. 49-57.
- 杉田 裕, 川上 進, 戸井田三和 (2002) : 原位置における実規模プラグのシーリング性能に関する研究, 日本原子力学会 2002 年秋の大会予集, P52, p. 652.
- 杉田 裕, 川上 進, 戸井田三和, 秋丹仁史, 澤田 淳, 栗原雄二, 三原守弘 (2003) : 高レベル放射性廃棄物地層処分における閉鎖性能に関する検討 (平成 14 年度), サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-010.
- 杉田 裕, 栗原雄二, 川上 進, 神徳 敬, 進井三和, 柴田雅博 (2003) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア等の性能保証に関わる研究の進め方と現状 (その 2), サイクル機構技術資料, (登録準備中)
- Sugita, Y., Suzuki, H. and Chujimatsu, M. (2002) : Thermal, hydraulic and swelling properties of bentonite pellet - Examine on calculating parameter assessment on PRP, JNC Technical Report, JNC TN8400 2002-023.
- 杉田 裕, 進井三和 (2002) : 粘土充填・熱負荷試験における緩衝材充填技術の検証 - 実規模室内試験結果データセット, サイクル機構技術資料, JNC TN8450 2002-005.
- 殿山忠宏, 越谷朝紀, 柴田雅博 (2003) : JNC 収容データベースシステムの開発, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, 016, p. 861.
- 鈴木治雄, 杉田 裕, 谷口直樹, 川上 進, 藤島 敬 (2003) : 期間の存在する緩衝材中における炭素鋼の腐食挙動, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, P15, p. 935.
- 鈴木英明, 伊藤 彰, 杉田 裕, 川上 進 (2002) : 水理学的ゆるみ域がおよぼす処分坑道周辺の不飽和領域形成に関する感度解析, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2002-005.
- 鈴木英明, 伊藤 彰, 杉田 裕, 川上 進 (2002) : 水理学的ゆるみ域がおよぼす処分坑道周辺の不飽和領域形成に関する感度解析, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, CS10-020, pp. 421-422.
- 鈴木宏幸, 谷口直樹, 川上 進 (2003) : 還元性環境下におけるチタンの腐食速度と水素吸収挙動, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-003.
- 鈴木宏幸, 谷口直樹, 川上 進 (2002) : 還元性環境下におけるチタンの腐食速度と水素吸収挙動, 腐食防食学会第 49 回材料と環境討論会講演集, pp. 197-200.
- 鈴木 寛, 佐藤治夫, 石寺幸充 (2003) : 圧縮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の異方性, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, P26, p. 946.
- 高須亜紀 (2003) : 緩衝材の長期安定性評価に関する調査及び技術レビュー, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書；財団法人原子力安全研究協会), JNC TN8400 2003-005.
- 柳井直治, 松本 浩, 菊池広人 (2003) : X 線 CT 法の適用性に関する検討, サイクル機構技術資料, JNC TN8430 2003-001.
- 立川博一 (2003) : 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；財団法人原子力安全研究協会), JNC TN8420 2003-007.
- 谷口直樹 (2002) : 高レベル放射性廃棄物地層処分におけるチタンオーバーパック腐食研究の現状と課題, 日本チタン協会 50 周年記念誌.
- 谷口直樹, 川崎 学, 川上 進, 鈴木治雄 (2003) : 弱アルカリ性～中アルカリ性環境における炭素鋼オーバーパックの局部腐食進展挙動, サイクル機構技術資料, (登録準備中)
- 難 村 一, 澤田 淳 (2003) : 高粘性流体を用いた天然亀裂岩体の透水試験 2 - FETBLOCK 試験報告書 -, サイクル機構技術資料, JNC TN8430 2003-004

- 飛塚早智了, 小原幸利, 佐藤浩夫 (2002) : 核種移行に及ぼす天然有機物の影響評価—サイクル機構における取り組み—, 日本原子力学会バックエンド部会第18回バックエンド夏期セミナー資料集, pp. 2. 30-1 - 2. 30-5.
- 折山 健, 新堀 博, 田中純一, 守屋由介, 油井三和, 矢田雅博, 滝 剛志 (2002) : 固体-水相互作用のFでの金属イオン水酸化物の沈殿・結晶化の制御機構, サイクル機構技術資料 (共同研究報告書; 東北大学), JNC-TN8400-2002-014.
- 戸井田克, 塩巻幸弘, 鈴木博行, 須山泰宏, 川端諒一, 伊藤正二郎, 奥池 一夫, 高村 尚 (2003) : 実規模シーリングシステムの研究開発 (Ⅳ), 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), (登録準備中)
- 戸村 努, 北村 暁 (2003) : 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吸着挙動, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, 013, p. 658.
- Tsang, C.F. and Karasaki, K. (2002). JNC-DOE Collaborative Program on Mass Transport : Characterization and Predictive Technologies. 2001-2002 Annual Report, JNC-TN8400-2002-001.
- 辻本恵一, 藤原芳紀, 齋藤茂幸, 上田真三, 河村幸二, 富田真吾, 大橋東洋 (2003) : 地盤環境モデルの構築技術に関する研究 (II), 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), (登録準備中)
- 上野健一, 吉川英樹, 亀井玄人, 本田 卓, 山口新吾 (2002) : 考古学的金属製品を用いた土壌中金属類のナチュラルアナログ研究, 日本原子力学会 2002 年秋の大会予稿集, F59, p. 659.
- 上野健一, 柏崎 博, 結城隆彦, 前原正明 (2002) : 地球科学試料用マイクロイオンビーム観察系の製作, 第15回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集, pp. 147-149.
- Van Luon, L.H., Muller, R., Ginni, T. and Jlyna, K. (2002): Activation Energy of the Self-Diffusion of Water in Compacted Clay System: A Case Study with Opalinus Clay. International Meeting on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, December 9-12, 2002, Reims, France, Abstracts, pp.327-328.
- 和田隆太郎, 西村 務, 中野智明, 藤原和雄, 井上隆夫, 畑石 剛, 舩形 剛 (2003) : ナタンオーバーバックの水分吸収に関する研究, 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), (登録準備中)
- 和田隆太郎, 山口浩治, 西村 務, 藤原和雄, 畑石 剛 (2003) : 炭素鋼オーバーバックの超長期試験研究, 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-TJ8400-2003-007.
- 若杉ま一郎, 小尾 繁, 牧野仁史 (2002) : 高レベル放射性廃棄物地処分地の安全評価における不確実性解析/感度分析の取り組み—データ不確実性の取り扱いを例として—, 日本原子力学会バックエンド部会第18回バックエンド夏期セミナー資料集, p. 2. 8-1.
- 若杉ま一郎, 牧野仁史, 小尾 繁 (2003) : 2次元核種移行解析モデルによる掘削影響領域の遅延効果に関する検討, 日本原子力学会 2003 年春の年会要旨集, 027, p. 872.
- 山本幹彦, 大場繁行 (2003) : ガス移行挙動モデルの検討, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 夏洋エンジニアリング株式会社), JNC-TJ8440-2003-004.
- 吉岡 泰, 油井三和 (2003) : 熱力学データベースフォーマット変換プログラムの作成, サイクル機構技術資料, JNC-TN8400-2003-024.
- 吉岡 泰, 油井三和 (2003) : 地球化学計算コードで利用可能な JNC 熱力学データベース, サイクル機構技術資料, JNC-TN8400-2003-005.
- 吉岡 泰, 油井三和 (2003) : 幌延地域における地下水水質形成モデル構築のための予想的検討, サイクル機構技術資料, JNC-TN8400-2002-025.
- 吉川英樹, 上野健一, 本田 卓, 山口新吾, 亀井玄人 (2002) : 考古学的試料を用いた放射性廃棄物研究 (金属ナチュラルアナログ), 日本アイソトープ協会第39回理工学における同位体元素・放射線研究発表会要旨集, p. 125.
- 吉野尚人, 佐藤 久, 内田雅夫 (2003) : 亀裂充填体水理試験設備 (LABROCK) による天然亀裂内の流水・物質移行特性評価, サイクル機構技報, No. 18, JNC-TY1340-2002-004, pp. 51-58.
- 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, 土木学会第57回年次学術講演会講演要旨集, CS10-027, pp. 435-436.
- 吉野尚人, 澤田 淳, 佐藤 久 (2003) : 岩盤亀裂開口率評価に関する検討, 土木学会第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 347-352.
- 吉原 謙, Willivans, R. (2003) : 亀裂ネットワークモデルおよび GoldSim による解析, サイクル機構技術資料 (契約業務報告書; 三菱商事株式会社), (登録準備中)