



平成16年度 地層処分技術に関する研究開発報告会

わが国の地層処分計画を支える技術基盤の継続的な強化

要旨・スライド・ポスター

核燃料サイクル開発機構

平成17年3月8日(火) 有楽町朝日ホール



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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

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

Japan

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

2005

平成 16 年度 地層処分技術に関する研究開発報告会
－わが国の地層処分計画を支える基盤技術の継続的な強化－
(平成 17 年 3 月 8 日(火), 13:00～17:00, 有楽町朝日ホール)

プログラム

1. 開会挨拶 理事長 殿塚 猷一 [13:00～13:10]

2. サイクル機構報告 [13:10～15:25]

[座 長] 田中 知 (東京大学)

1) 地層処分技術に関する研究開発の全体概要

バックエンド推進部 部長 石川 博久

2) 個別技術報告

① 東濃地科学センターにおける深地層の科学的研究の現状

－超深地層研究所計画を中心として－

東濃地科学センター 瑞浪超深地層研究所長 坂巻 昌工

② 幌延深地層研究計画(地上からの調査段階)の現状

幌延深地層研究センター 副所長 武田 精悦

③ 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取組みの現状

東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 次長 油井 三和

～ 休憩・ポスターセッション ～ [15:25～16:00]

3. 特別講演 [16:00～16:50]

「High-level radioactive waste management: R&D challenges for the 21st century (高レベル放射性廃棄物対策:21 世紀における研究開発の挑戦)」

[座 長] 吉田 英一 (名古屋大学)

[講 演] Dr. Ian G. McKinley (スイス放射性廃棄物管理協同組合(Nagra)上席相談役)

4. 閉会挨拶 理事 河田 東海夫 [16:50～17:00]

※ポスターセッション;開会前(12:00～13:00), 休憩中(15:25～16:00),
閉会后(17:00～17:30)にロビーにて開催

【全体概要報告】

地層処分技術に関する研究開発の全体概要

地層処分技術に関する研究開発の全体概要

核燃料サイクル開発機構
バックエンド推進部
部長 石川 博久

1. はじめに

わが国では、使用済燃料の再処理でウラン、プルトニウム等の有用物質を分離したのちに発生する高レベル放射性廃棄物は、安定な形態に固化したのち、30年から50年間冷却のための貯蔵を行い、その後地層処分することとしている（原子力委員会、2000）。核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）およびその前身である動力炉・核燃料開発事業団は、この基本方針に基づいて研究開発を進め、平成4年度に「第1次取りまとめ」（動力炉・核燃料開発事業団、1992）を、平成11年度に「第2次取りまとめ」（核燃料サイクル開発機構、1999）を公表し、地層処分の技術的な信頼性を示した。その後、処分事業や安全規制の枠組みが整備され、わが国の地層処分計画が事業段階へと進展した状況を踏まえ、サイクル機構では平成13年度に策定した「全体計画」（核燃料サイクル開発機構、2001）に沿って研究開発を進めている。この「全体計画」においては、研究開発成果を「処分事業・安全規制の主なマイルストーンに先行する形で段階的に取りまとめていく」こととしている。その第1段階として、「第2次取りまとめ」を公表してから約5年が経過し、深地層の研究施設計画における地上からの調査段階がほぼ完了する平成17年度に、研究開発成果の取りまとめを予定している。本報告では、「全体計画」で示した研究開発計画への取り組みの現状、平成17年度の成果取りまとめや今後の展開について、概要を報告する。

2. サイクル機構における研究開発計画

1) サイクル機構の役割

地層処分の実施に向けた今後の研究開発には、処分事業や安全規制の段階的な進展に合わせて、地層処分技術の信頼性をさらに高め、処分事業や安全規制の技術基盤をより堅固なものとしていくことが求められる。サイクル機構は、「第2次取りまとめ」までに蓄積した知見や経験をもとに基盤的な研究開発を推進し、処分事業や安全規制の基盤となる技術や情報を整備するとともに、科学的・技術的な側面から専門家を含む国民各層の地層処分に対する信頼感・安心感の醸成に寄与していく。

2) 研究開発目標・課題と進め方

「第2次取りまとめ」までの研究開発は、具体的な地質環境を特定せず、わが国の地層処分システム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。地層処分技術の信頼性をさらに向上させるためには、その技術を実際の地質環境に適用して実用性や信頼性を確認するとともに、地層処分システムへの理解を深め、長期にわたる評価の信頼性を高めていくことが重要である。そのため、サイクル機構では、以下の2つの目標を設定して研究開発を進めている。

- ・ 目標①「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」:

「第2次取りまとめ」までに整備してきた様々な要素技術を深地層の研究施設などにおいて実際の地質環境での調査研究に適用することを通じて、その技術の信頼性を確認しつつ、調査の進展に応じた段階的な地層処分技術として体系化していく。

- ・ 目標②「地層処分システムの長期挙動の理解」:

実際の地質環境での調査研究や地層処分基盤研究施設（エントリー）、地層処分放射化学研究施設（クオリティ）などでの試験研究を通じて、地層処分システムに関連する現象への理解をさらに深め、より現実に応じた評価手法へと改良、高度化をはかり、長期にわたる評価の信頼性を高めていく。

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

3. 研究開発の取り組みの現状と当面の計画・課題

1) 深地層の科学的研究

① 東濃地科学センターにおける研究開発

超深地層研究所計画では、結晶質岩を対象に、平成8年度から第1段階である地上からの調査研究を開始し、平成14年度からは現在の瑞浪超深地層研究所用地（市有地）において調査研究を実施している。平成15年3月からは、深層ボーリング調査（掘削長1,300m）を実施し、それまでの浅層ボーリング調査の結果などとあわせ、花崗岩中の割れ目の分布や地下水の水質・起源などを把握するとともに、地質環境モデルの構築・改良を行ってきた。平成16年度末には、第1段階の調査研究を終了する予定である。また、施設計画については、平成14年7月に用地造成に着手し、平成15年7月に研究坑道の掘削を開始した。平成16年9月には地表から50mまでの基礎部の掘削を終え、平成17年2月より槽（やぐら）を用いた本格掘削を開始した。

広域地下水流動研究では、平成4年度から超深地層研究所計画の実施場所を含む広いスケールにおける地下水流動系を対象に調査・解析を実施してきている。主要な現地作業は平成16年度に終了し、平成17年度以降はモニタリングを継続していく。

地質環境の長期安定性に関する研究については、地殻変動や火山活動などを調査する技術や長期予測・影響評価の手法の開発を進めているほか、それぞれの現象のプロセスに関わる最新の学術的知見など基盤情報の整備をはかっている。

② 幌延深地層研究センターにおける研究開発

幌延深地層研究計画では、堆積岩を対象に、平成12年度から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14年7月に主たる調査研究の展開場所として研究所設置地区を選定し、地上からの調査として、これまで、地質調査や物理探査、11孔の深層ボーリング調査を実施してきている。また、地層処分研究開発として、処分技術の信頼性向上（例えば、低アルカリ性セメントの開発）や安全評価手法の高度化を目的とした原位置試験のための事前検討を行っている。これまでの調査研究を通じて、研究所設置地区周辺の地質環境を把握するとともに、その結果に基づき地質環境モデルの詳細化や調査技術の適用性の確認などを行った。地上からの調査研究は、平成17年度に終了する予定である。また、施設計画については、平成15年7月に造成工事に着手しており、平成17年度からは地下施設の建設を開始する予定である。

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

東海事業所（処分研究部）では、「第2次取りまとめ」以降も幅広い地質環境条件を前提に、

「処分技術の信頼性向上」と「安全評価手法の高度化」に関する試験研究を進めている。特に「第2次取りまとめ」以降は、塩水環境とセメント水環境（高 pH 環境）に重点を置いて、データの拡充やモデルの高度化をはかってきている。また、深地層の研究施設計画などで得られた地質環境に関するデータやモデルを活用して、安全評価手法や地下施設の設計手法などの適用性確認を行っている。今後は、深地層の研究施設計画の進展にあわせ、実際の地質環境条件を対象とした研究に重点を置いていく予定である。

4. 研究成果の取りまとめについて

サイクル機構では、処分事業と安全規制のニーズやスケジュールを勘案しつつ、段階的に地層処分技術に関する研究開発成果を取りまとめることとしている。この取りまとめにおいては、個々の研究成果を体系化することで現状の技術・知見レベルを確認するとともに、重点課題を抽出して、以降の研究開発の方向性を明確化していく役割も期待されている。

その最初の取りまとめとして、「第2次取りまとめ」から5年間の経過し、また2つの深地層の研究施設計画における地上からの調査研究がほぼ完了することを踏まえ、概要調査地区の選定とそれに続く概要調査や安全審査基本指針の策定のための基盤技術を提示することを念頭において、平成17年度上期に地上からの調査研究と処分技術や安全評価に関する成果を報告書として取りまとめる。報告書は、分野レポートと知識化レポートから構成される。分野レポートでは、上述した3つの分野ごとに、第2次取りまとめ以降の個別の研究成果を体系的に整理する。一方、知識化レポートでは、個別の研究成果や一連の調査・解析・評価プロセスなどの分野間にまたがる研究の成果について、地質環境の調査から処分システムの設計・安全評価までを包含した地層処分技術全体に関わる知識として構造化することを目指す。

実際の地質環境情報に基づく設計手法や安全評価手法に関する検討については、調査が進展し得られる地質環境情報が詳細化されるのに応じて、繰り返し進めることが重要となる。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、また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。このような作業を体系的に進めるためにも、地層処分技術の知識基盤を構築するための枠組みが重要となる。

5. おわりに

平成17年10月には、サイクル機構と日本原子力研究所との統合によって、独立行政法人日本原子力研究開発機構が発足するが、地層処分技術に関する研究開発は、統合後の新法人においても主要業務として位置づけられている（原子力二法人統合準備会議、2003）。今後とも中核的な研究開発機関として、瑞浪および幌延の深地層の研究施設やクオリティなどを活用した基盤的な研究開発を進めるとともに、成果の公表、深地層の研究施設などの施設の公開、国内外の関係機関や大学との研究協力などを通じて、長期にわたる処分事業を支えていくための技術の継承や研究者の育成、国民各層の地層処分に対する理解の増進に寄与していく。

参考文献

- 動力炉・核燃料開発事業団(1992)：高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書－平成3年度－，動力炉・核燃料開発事業団技術資料，PNC TN 1410 92-081.
- 原子力委員会(2000)：原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画，平成12年11月24日.
- 原子力二法人統合準備会議(2003)：原子力二法人の統合に関する報告書，平成15年9月19日.
- 核燃料サイクル開発機構(1999)：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－，サイクル機構技術資料，JNC TN1410 99-020～024.
- 核燃料サイクル開発機構(2001)：平成13年度研究開発課題評価（中間評価）報告書 研究課題「高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の全体計画」，サイクル機構技術資料，JNC TN1440 2001-008.

【全体概要報告】 地層処分技術に関する 研究開発の全体概要

地層処分技術に関する研究開発報告会
—わが国の地層処分計画を支える技術基盤の継続的な強化—
平成17年3月8日 有楽町朝日ホール

核燃料サイクル開発機構 バックエンド推進部
石川 博久

核燃料サイクルとガラス固化体



地層処分技術に関する研究開発の進展

地層処分の概念



安定な地質環境



人工バリア

第1次取りまとめ
「地層処分の技術的可能性」

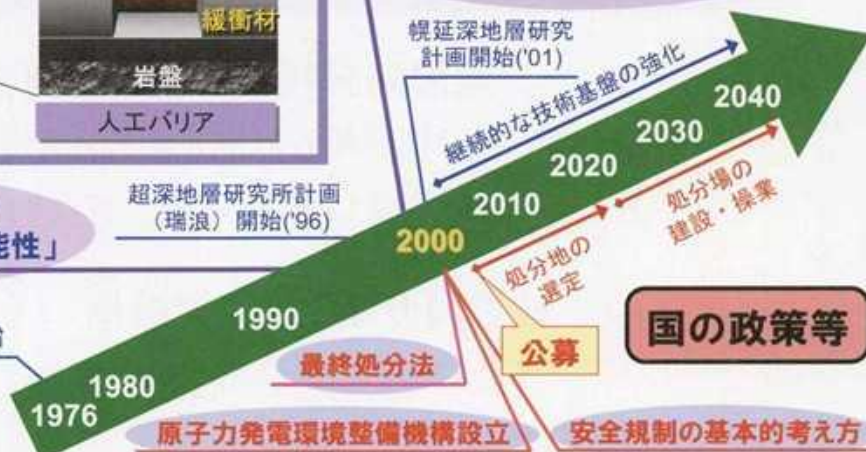
超深地層研究所計画
(瑞浪) 開始('96)

わが国の幅広い地質環境を
対象として、地層処分概念
の成立性を科学的根拠に基
づき提示

第2次取りまとめ
「地層処分の技術的信頼性」

地層処分研究開始

研究開発



国の研究開発の役割と研究開発目標

核燃料サイクル開発機構

科学的視点が中心

研究開発の目標

- ① 実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認
- ② 地層処分システムの長期挙動の理解

関係研究開発機関

工学的視点が中心

- ・ 技術情報の整備
- ・ 周辺基盤技術の研究開発

成果の反映

事業実施

安全規制

実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認

第1段階 地上からの調査研究段階

第2段階 坑道掘削時の 調査研究段階

第3段階 地下施設での 調査研究段階

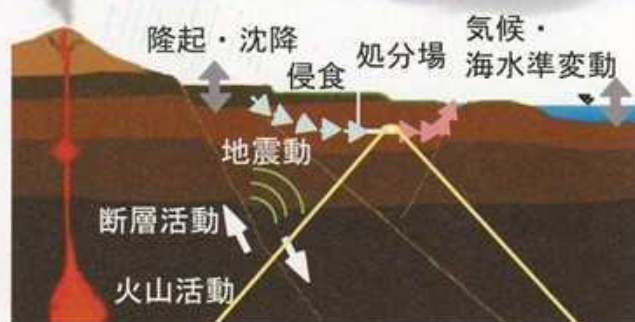


瑞浪:平成16年度終了, 幌延:平成17年度終了

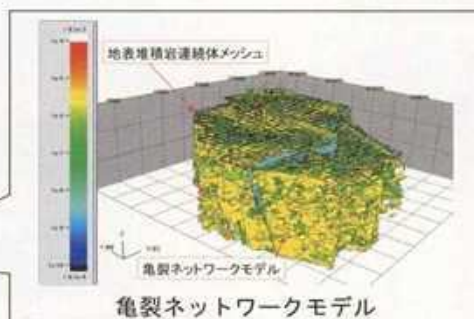
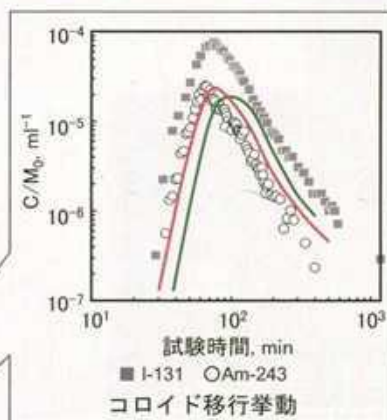
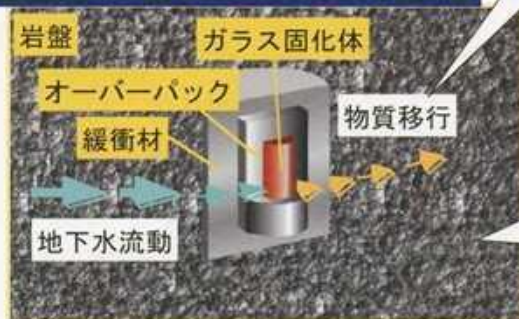
幌延深地層研究計画では、深地層の科学的研究に加えて、堆積岩における地層処分研究開発を行う。結晶質岩における地層処分研究開発は、海外の地下研究施設を活用して進めている。図はイメージ。

地層処分システムの長期挙動の理解

地質環境の長期的変遷の把握



現象理解に基づくモデルの高度化



研究開発分野と課題

JNC

7

目標

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

研究分野

深地層の
科学的研究

地質環境調査・評価技術の体系的な
適用による信頼性の確認
地下施設の設計、建設、安全管理、
閉鎖技術に関する開発

隆起・侵食、地震・断層活動、火山
活動などに関する研究
ナチュラアナログ等を利用した物質
移動現象の実例の整理

処分技術の
信頼性向上

人工バリア等の長期健全性・工学的
成立性に関する信頼性向上
人工バリア等の設計手法についての
実際の地質環境への適用性の確認

緩衝材の基本特性に関する
データベースの整備
人工バリア等の力学的変形や流出・
侵入挙動に関する研究

安全評価手
法の高度化

鍵となる安全機能など段階的な処分
システム構築のための検討

核種移行データベースの整備
岩盤中の水理・物質移行や現象論的
核種移行モデルに関する研究
シナリオ解析技術や不確実性評価な
どに関する研究

サイクル機構の研究開発施設と担当分野

JNC

8

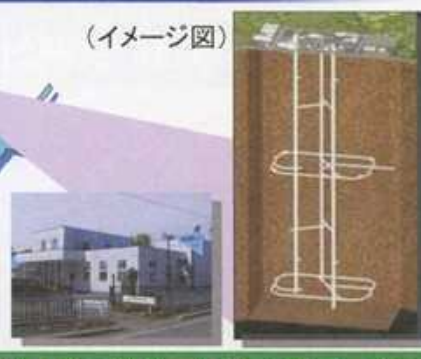


(イメージ図)

東濃地科学センター

● 超深地層研究所計画
(結晶質岩)

深地層の
科学的研究



(イメージ図)

幌延深地層研究センター

● 幌延深地層研究計画(堆積岩)

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



東海事業所

エントリー

クオリティ



処分技術の信頼性向上

安全評価手法の高度化

2つの深地層の研究施設計画

深地層の研究施設の役割

○地層処分技術が実際の地質環境で機能することを確認

地質環境を調査・評価する技術／地下施設や人工バリアに関する工学技術／安全評価のためのモデルや手法

○わが国固有の地質環境の理解

○深地層の環境を体験・理解

超深地層研究所計画 (岐阜県瑞浪市)

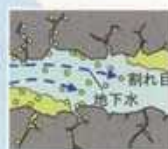
幌延深地層研究計画 (北海道幌延町)



花崗岩
(結晶質岩)

淡水系

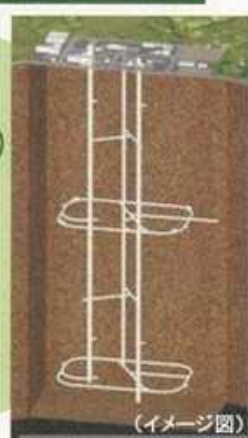
硬岩



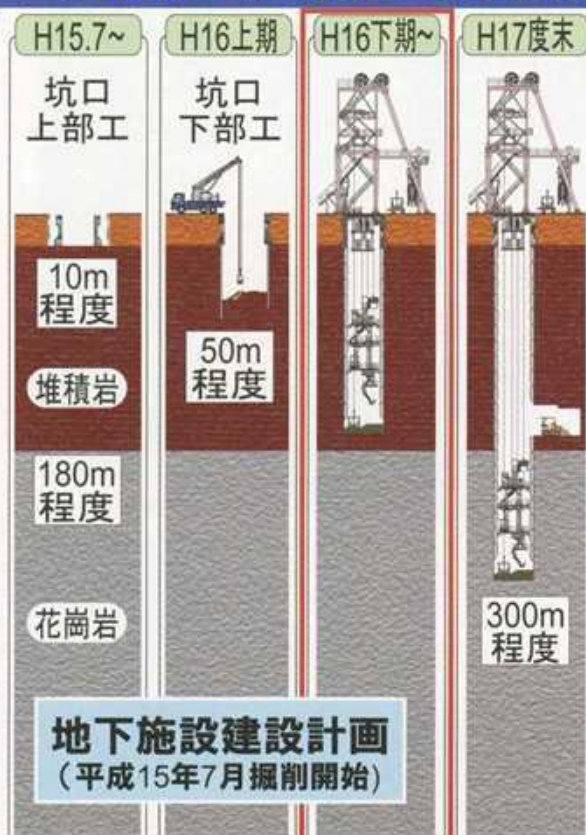
泥岩
(堆積岩)

塩水系

軟岩



【瑞浪】超深地層研究所計画

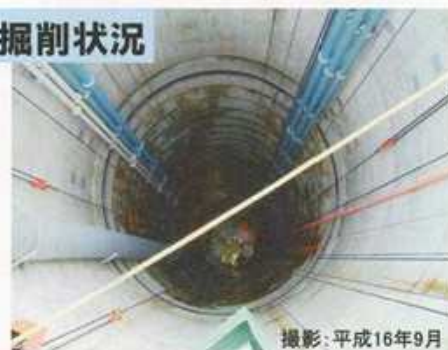


建設工事状況



撮影:平成16年12月

主立坑掘削状況

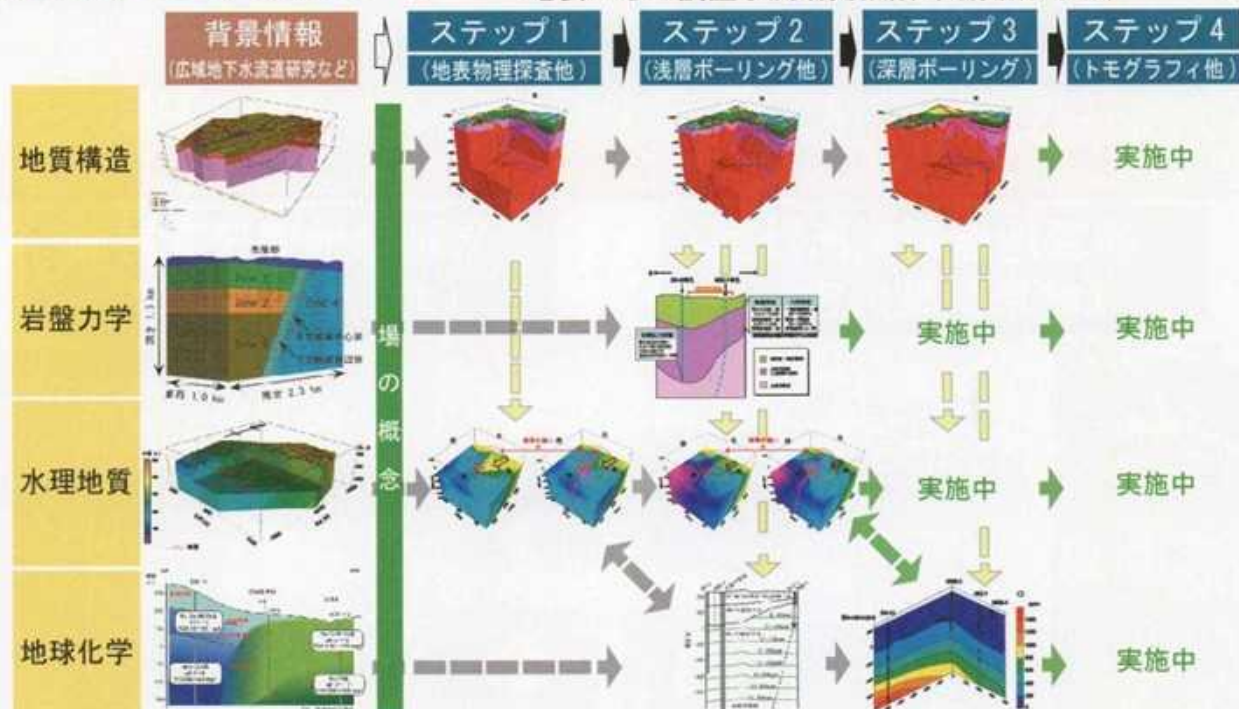


撮影:平成16年9月

【瑞浪】超深地層研究所計画の成果例

地質環境モデルの構築

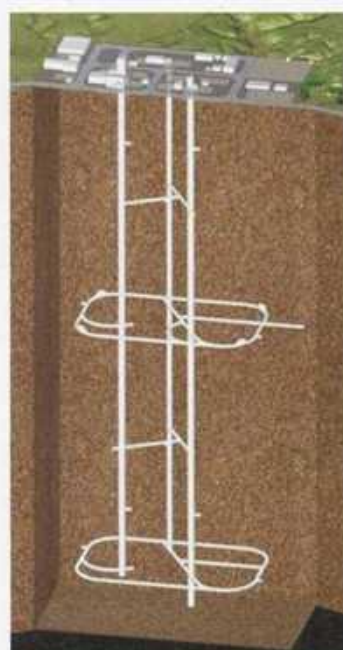
地表からの調査予測研究段階（研究用地）



黒字：作業の流れ（実施済み） 緑字：作業の流れ（進行中） 黄色：データ利用の流れ

【幌延】幌延深地層研究計画

●堆積岩 ●塩水系地下水



地下施設イメージ図

研究用地



撮影：平成16年11月

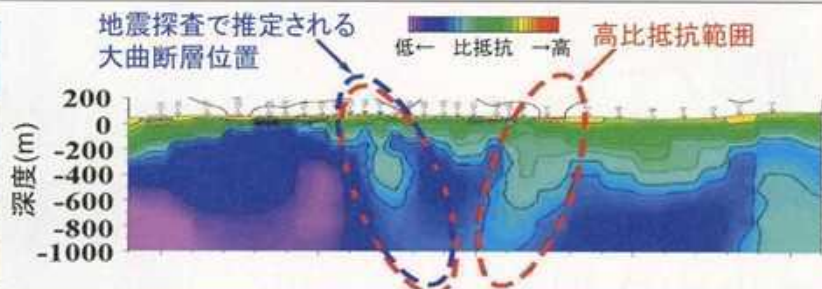
造成工事（平成15年7月着工）



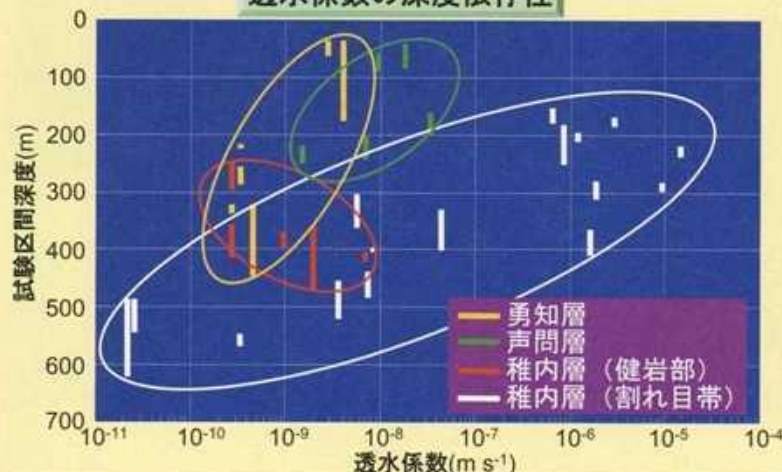
撮影：平成16年11月

【幌延】幌延深地層研究計画の成果例

地震調査



透水係数の深度依存性



電磁調査(AMT法)



地上からの調査段階
における各種調査
研究を実施中

深地層の研究施設で得られた諸物性値

施設名		瑞浪超深地層 研究所	幌延深地層研究センター	
地質	岩種	土岐花崗岩	珪藻質泥岩 (声問層)	珪藻質泥岩 / 硬質頁岩 (稚内層)
力学	有効空隙率 (%)	0.6~13.5	54~66	36~51
	一軸圧縮強度 (MPa)	64~212	1.4~7.4	3.3~22.9
水理	透水係数 (m s ⁻¹)	割れ目: 10 ⁻⁹ ~10 ⁻³ 母岩: 10 ⁻¹¹ ~10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹ ~10 ⁻⁷	割れ目: 10 ⁻¹¹ ~10 ⁻⁵ 母岩: 10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻⁸
水質	pH	8.2~8.7	6.7~8.0	6.9~8.5
	イオン強度 (mol dm ⁻³)	0.02~0.08	0.08~0.41	0.05~0.35

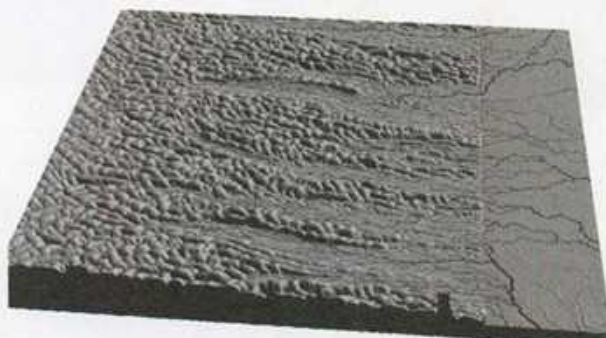
研究テーマ

- 隆起・侵食／
気候・海水準変動
- 火山活動
- 地震・断層活動

実施内容

- 調査技術の開発
- 長期予測・影響評価モデルの開発
- 研究情報基盤の整備

地形変化シミュレーションの結果例



12万年後（断層変位120m）

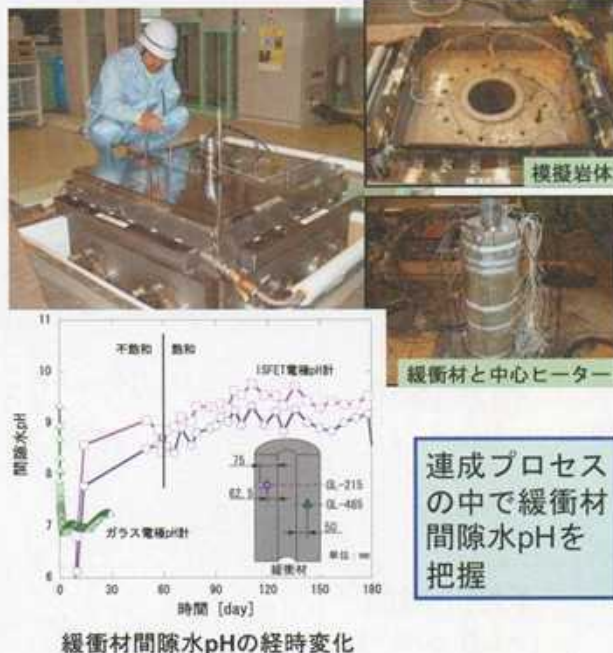
【東海】人工バリアの健全性評価に関する研究

緩衝材の健全性評価試験 (ガス移行)(エントリー)

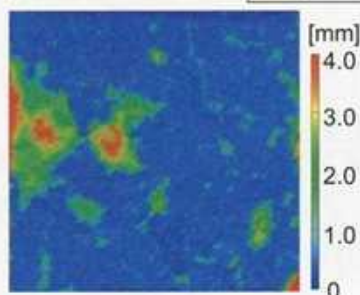
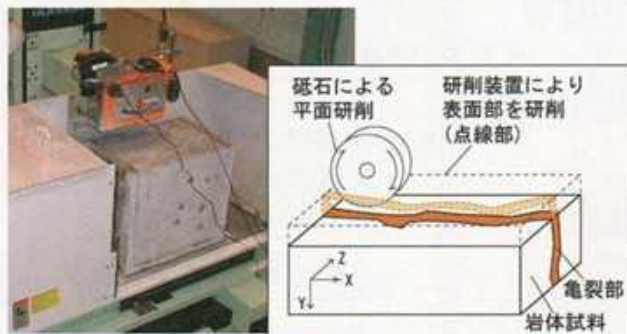


圧縮ベントナイト中のガス移行に伴う
相対的な変化領域を把握可能

緩衝材の健全性評価試験 (連成挙動)(エントリー)



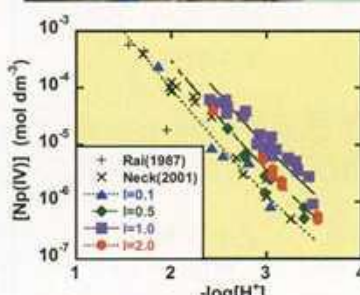
水理モデル高度化のための 亀裂測定試験(エントリー)



亀裂開口幅測定結果例(10cm×10cm)

デジタルカメラ
による撮影で、
精度のよい亀
裂開口幅測定
を実現

核種移行データ取得のため の溶解度試験(クオリティ)



Np(IV)水和酸化物の溶解度

Np(IV)の熱力学
データ(溶解度積、
加水分解定数)
を取得

国際協力の状況



エスポ地下研究施設における坑道掘削試験



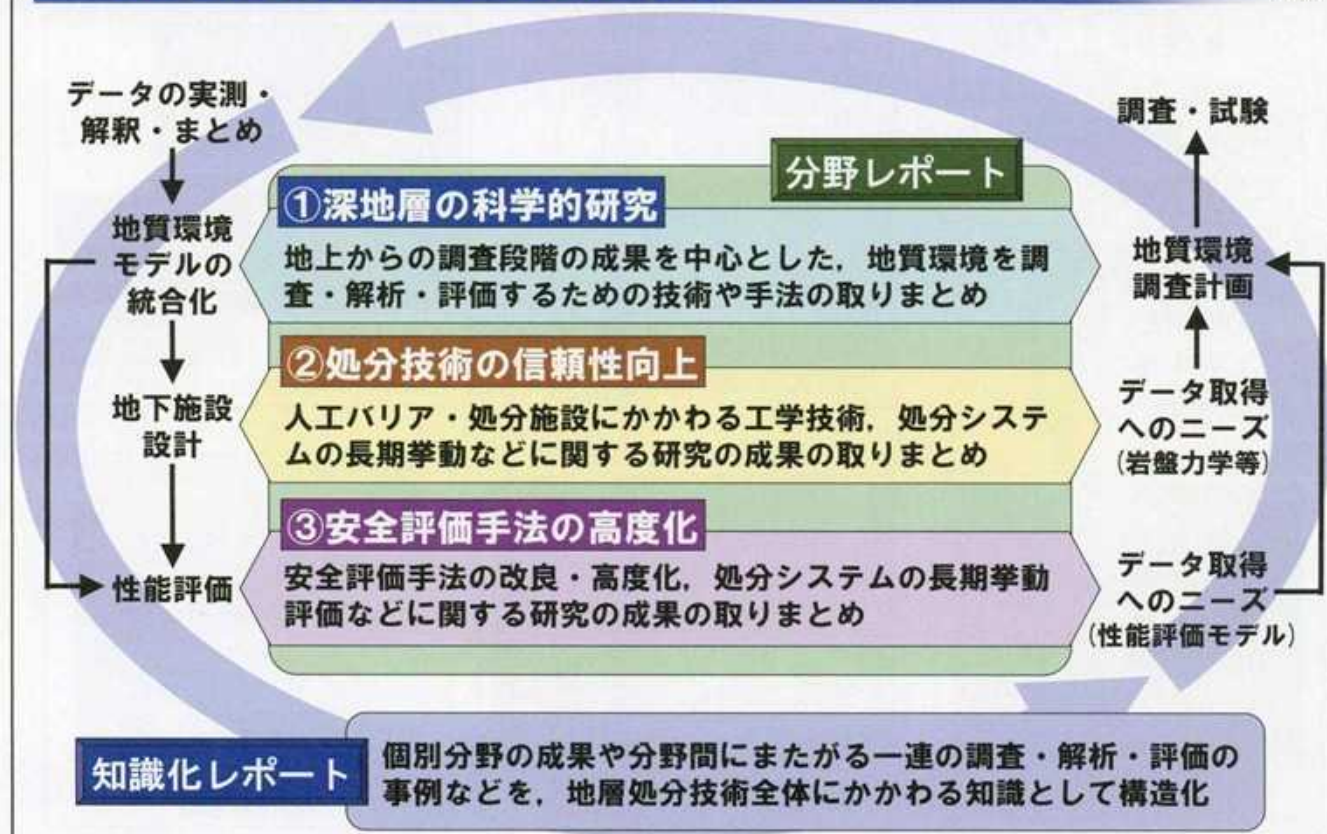
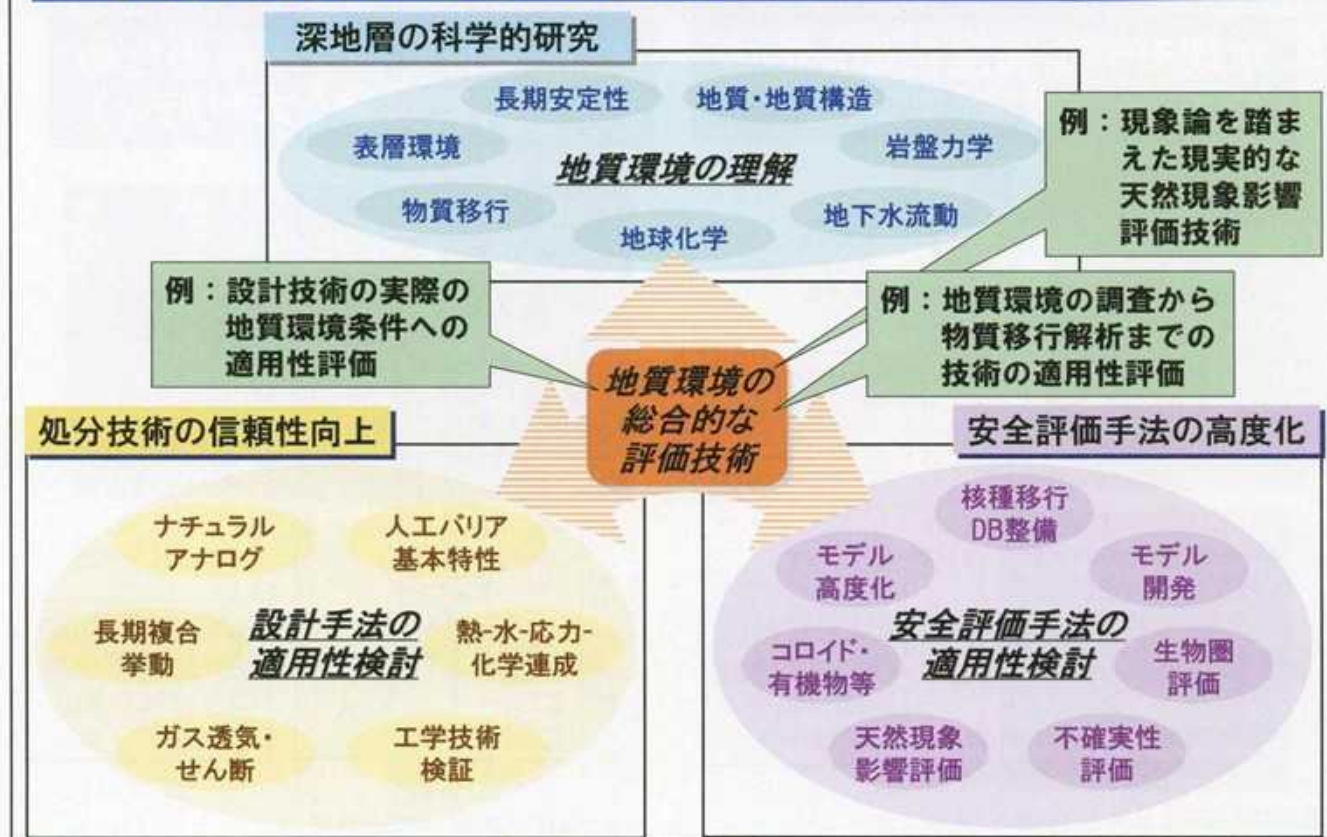
AECL地下研究施設における
トンネルシーリング試験



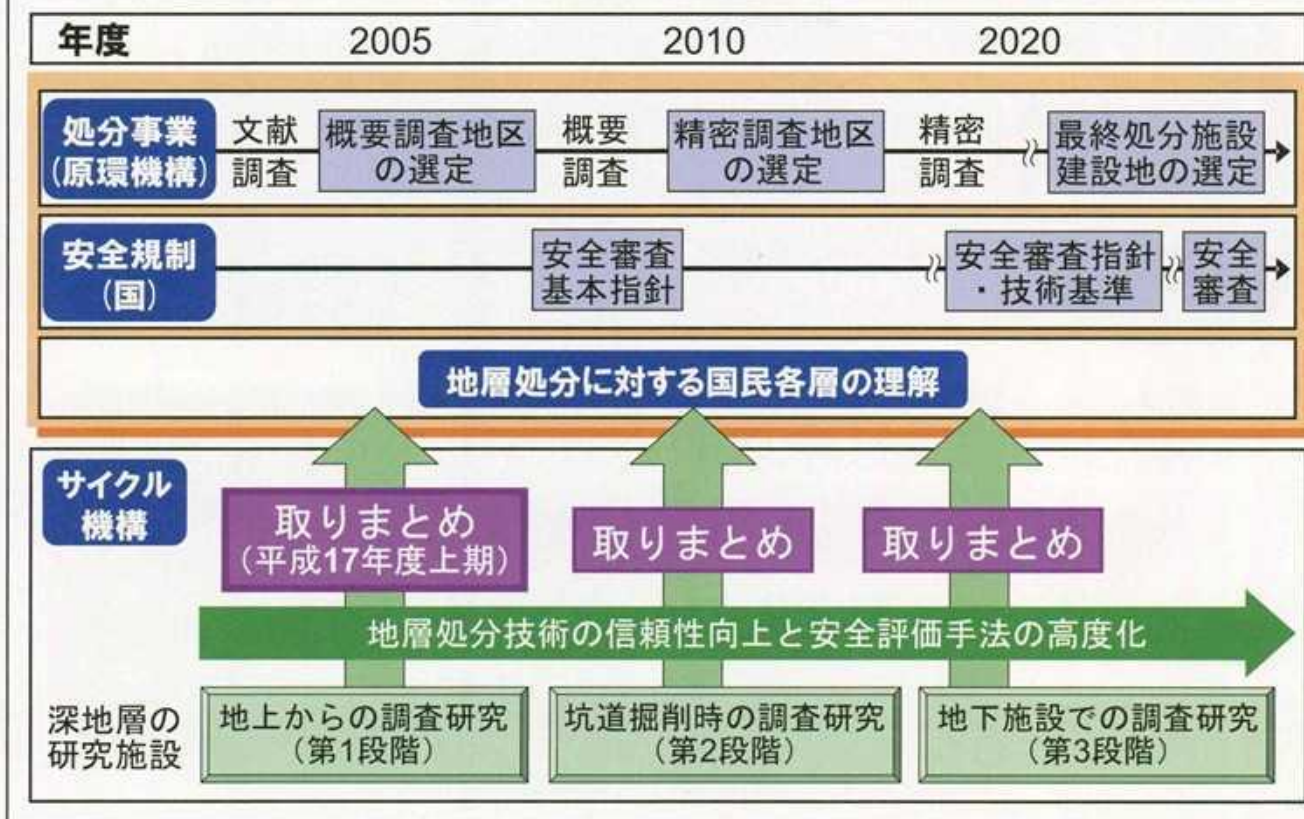
サンディア国立研究所(SNL)との
岩石中拡散・コロイド移行挙動試験



グリムゼル原位試験場における
トレーサー試験



段階的な研究開発のスケジュール



新法人設立に向けて

新法人設立までの経緯（原研とサイクル機構の統合）

平成13年12月19日	「特殊法人等整理合理化計画」閣議決定
平成14年 1月29日	「原子力二法人統合準備会議」設置
平成15年 9月19日	「原子力二法人の統合に関する報告書」公表
平成16年12月 3日	独立行政法人日本原子力研究開発機構法公布・施行
平成17年10月 1日	日本原子力研究開発機構設立、中期計画認可（予定）

独立行政法人日本原子力研究開発機構法

- ▶ 独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下、「機構」という）は、原子力基本法に基づき、原子力に関する研究、核燃料サイクルを確立するための高速増殖炉等の技術開発を総合的、計画的、効率的に行い、その成果を普及する等により、原子力の研究開発利用の促進に寄与する。
- ▶ 機構の研究開発に関する主な業務は以下のとおり。
 - 原子力に関する基礎的研究／応用の研究
 - 核燃料サイクル確立のための、高速増殖炉、高速増殖炉用核燃料物質、再処理、高レベル放射性廃棄物の処理及び処分に関する技術の開発及びこれに必要な研究
 - 成果の普及、及びその活用の促進
 - 原子力人材育成

地層処分技術の信頼性の向上

- 深地層の研究施設等における基盤的研究開発
- 段階的な成果の取りまとめ
- 開かれた研究開発

○ 処分の実施と安全規制の技術基盤となる知見の集約・提供

○ 研究者の育成と技術の継承

○ 国民の理解増進

透明性・公開性の確保



【個別技術報告】

東濃地科学センターにおける深地層の科学的研究の現状

—超深地層研究所計画を中心として—

東濃地科学センターにおける深地層の科学的研究の現状 ー超深地層研究所計画を中心としてー

核燃料サイクル開発機構
東濃地科学センター
瑞浪超深地層研究所長
坂巻 昌工

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）東濃地科学センターでは、国の計画・方針にしたがい、地層処分技術に関する研究開発として、地層処分研究開発の基盤となる深地層の科学的研究（以下、地層科学研究）を進めている。このうち、超深地層研究所計画は、原子力長期計画に示された深地層の研究施設計画のひとつとして結晶質岩を対象に岐阜県瑞浪市において進めているものである。本稿では、超深地層研究所計画を中心に、東濃地科学センターにおける地層科学研究の現状について報告する。

2. 研究の課題

「第2次取りまとめ」（サイクル機構、1999）以降における地層処分技術に関する研究開発の課題については、国の報告書で示された課題を踏まえ、深地層の科学的研究に関して、以下の4つの研究課題を設定している。

- ・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
- ・深地層における工学技術の基礎の開発
- ・ナチュラルアナログ研究

東濃地科学センターでは、これらの研究課題に対して、超深地層研究所計画、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、という3つのプロジェクトとして取り組んでいる。超深地層研究所計画では、結晶質岩（花崗岩）を対象に、地質環境特性に関する研究と深地層における工学技術の基礎の開発を実施している。広域地下水流動研究では、超深地層研究所計画よりも広い地域の結晶質岩（花崗岩）を対象として、地質環境特性に関する研究を実施している。なお、ナチュラルアナログ研究については、地質環境の長期安定性に関する研究の中で実施している。

3. 研究の現状

東濃地科学センターが進めている地層科学研究のうち、超深地層研究所計画および広域地下水流動研究の2つのプロジェクトは、地下深部の岩盤とそこに含まれる地下水の性質やそこで起こっている現象を理解しながら、その調査・評価のために必要な技術を開発整備していくことを主な目的として、東濃地域を対象に実施している。この地域の地質は、主な研究対象である結晶質岩（花崗岩）と、それを覆う上位の新第三紀の堆積岩から成る。堆積岩の厚さは最大200m程度であり、また、月吉断層と呼ばれる長さ約7kmの逆断層である地質断層が分布する。

一方、地質環境の長期安定性に関する研究は、わが国における地震や火山活動等の天然現象の特徴とそれによる地質環境への影響を把握することや、そのための調査技術・評価手法を開発することを目的に、全国を視野に入れて実施している。

1) 広域地下水流動研究と超深地層研究所計画における研究のアプローチ

実際に地質環境を理解するための調査や解析においては、空間的、時間的さらには経済的にも目的を達成するまでの間に一定の制約が設けられる。このような制約の下で、地質環境を効率的に把握していくためには、調査研究を進める過程で地質環境の理解の程度を繰り返し評価し、目的の達成に向けて計画を見直しつつ進めることが必要である。このことから、

超深地層研究所計画および広域地下水流動研究の2つのプロジェクトにおいては、調査－モデル構築－解析結果の評価－さらに次の調査とモデル改良へ、という一連の繰り返しのアプローチを基本に調査研究を進めている。このアプローチでは、調査の進展に伴う情報量の増加に応じて、地質環境特性に関わる理解度や調査の達成度を順次評価し、その結果を次の調査の具体的な計画立案および次の段階に移行する判断につなげていく。

広域地下水流動研究と超深地層研究所計画の2つのプロジェクトにおいては、地質環境の調査研究を進める上で、限られた調査量で効率的に地質環境特性を把握していくことと、断層や割れ目などが地質環境の不均質性を大きく支配していると考えられる割れ目系の岩盤を対象としていることの2点に注目しつつ、処分システムの設計や安全評価との連携を考慮して区分した空間スケールを設定して研究を進めている。広域地下水流動研究では、数十平方キロメートル程度までの領域を対象とし、超深地層研究所計画における地上からの調査研究段階では、数平方キロメートル程度の領域を解析対象面積として設定している（サイクル機構、2004）。

2) 超深地層研究所計画

(1) 計画の概要

超深地層研究所計画では、深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備および深地層における工学的技術の基盤の整備を目標とする（サイクル機構、2002）。前者の目標を達成するため、地質環境を調査・予測・検証する一連のアプローチを繰り返し行うことにより、地上や地下から、地質環境を調査・解析・評価する手法の有効性を確認していく。後者の目標に向けては、研究坑道の掘削に伴う地質環境の変化に着目し、深地層での掘削に関わる技術を適用していく。そのため、全体計画を3段階（第1段階：地表からの調査予測研究段階、第2段階：研究坑道の掘削に伴う研究段階、第3段階：研究坑道を利用した研究段階）に分け、全体を約20年間かけて実施する計画である。研究施設は広く公開し、地下深部についての学術的な研究の場、あるいは深部地質環境や地層処分の研究開発に対する国民の理解を深める場としても寄与する。

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所有する用地（正馬様用地）において、第1段階として地表からの調査研究を行ってきた。平成14年1月に、瑞浪市と、正馬様用地の約2 km 東方に位置する同じ明世町内にある広さ約7.8 ha の市有地（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に変更することとした。

(2) 現状と主な成果

研究所用地では、深さ100～180 m 程度までは堆積岩、その下位には花崗岩が分布する。第1段階の調査研究として、平成16年度までに地上物理探査や、深度100～200 m 程度までの4孔のボーリング調査（MSB-1～4号孔）、深層ボーリング調査（MIZ-1号孔；掘削長1,300 m）および複数のボーリング孔を利用した孔間水理試験などを実施してきた。また、これらの調査結果をもとに地質環境モデルを作成・更新している。第2段階については、調査研究計画の検討を進めるとともに、平成14年7月に研究所用地の造成工事に着手し、平成15年7月には研究坑道の掘削を開始している。

① 第1段階の調査研究

研究所用地における繰り返しアプローチに基づく主な調査として、地上物理探査（ステップ1）、浅層ボーリング調査（同2）、深層ボーリング調査（同3）、トモグラフィ調査・孔間水理試験（同4）の4つのステップを設定し、各ステップにおいては、地質環境モデルとして地質構造、地下水流動、地下水地球化学、岩盤力学の各モデルの構築を進めている。現在、深層ボーリング調査（MIZ-1号孔）の結果の解析およびステップ4の調査試験を実施中である。

これまでに、地質構造としては、「上部割れ目帯」のほかに、「下部割れ目低密度帯」が区

分されること、地下水流動解析結果からは、北北西系の断層の性質が地下水の流れに大きな影響を与えること、また、地下水の水質として Na-HCO_3 型と Na-Cl 型の両タイプが存在することなどが明らかにされた。また、各ステップにおいて地質環境モデルの作成・更新を行い、用いられた各調査手法の妥当性などについても検討を進めている。

また、第 1 段階において、国内外の先行事例やこれまでに得られた深部地質環境に関する情報をもとに研究坑道の設計や施工計画の立案を行った。

② 第 2 段階の調査研究

第 2 段階における深地層の工学技術に関する研究については、第 1 段階で立案した施工計画にしたがい、平成 15 年より研究坑道の掘削を開始した。平成 17 年 2 月現在、深度 50 m までの立坑掘削を終了し、深度 50 m 以深の本格掘削に向けた準備を進めている。また、第 2 段階における調査試験計画についても検討を進めている。

3) 広域地下水流動研究

広域地下水流動研究では、平成 15 年度より実施した深度 1,000 m の深層ボーリング調査（2 孔）の結果を解析中であり、平成 16 年度に現地作業を終了する。今後は、広域的な地下水の経年変化などを把握するためのモニタリング観測を継続するとともに、本研究と超深地層研究所計画の研究成果を相互に活用し、広い領域から研究坑道を展開する瑞浪超深地層研究所用地までの各空間スケールを対象とした一連の調査データ・調査手法として取りまとめていく。

4) 地質環境の長期安定性に関する研究

地質環境の長期安定性に関する研究では、「第 2 次取りまとめ」以降、実施主体による概要調査地区等の選定や国による安全審査基準・指針等の策定等のための技術基盤としての反映を念頭に置き、①実際の地質環境に適用できる調査技術の開発（調査技術の開発・体系化）、②地殻変動・火成活動等に伴う地質環境の長期的変動を評価するための手法の開発（長期予測・影響評価モデルの開発）のほか、③これらの開発の基盤となるそれぞれの現象のプロセスに関わる最新の学術的知見や工学技術に関する基盤情報の整備（情報基盤の整備）を図っている。

調査技術の開発・体系化としては、中国地方を事例とした震源断層の抽出技術の開発や、鳴子火山周辺や紀伊半島南部を事例としたマグマ・高温岩体当の探査技術の開発を行ってきた。長期予測・影響評価モデルの開発については、三次元地形変化モデルの開発や、火山発生に係る確率モデルの検討を行ってきた。また、情報基盤の整備として、精密制御定常信号システム（アクロス）による高精度物理探査技術の開発を進めている。

4. おわりに

東濃地科学センターにおいては、平成 17 年度以降、超深地層研究所計画の第 2 段階の調査研究を本格的に進めていく。また、地質環境の長期安定性に関する研究についても、実施主体による概要調査地区等の選定や国による安全審査基準・指針等の策定等のための技術基盤としての反映を適時適切に行うべく、引き続き取り組んでいく。

広域地下水流動研究や超深地層研究所計画の第 1 段階でこれまでに得られた成果や、地質環境の長期安定性に関する研究の成果について、平成 17 年度の成果取りまとめにおいて、幌延深地層研究センターと共同で地層科学研究に関する分野レポートを担当するとともに、知識化レポートについても幌延深地層研究センター、東海事業所処分研究部などと共に執筆作業を進めていく。

研究を進めていくにあたっては、今後も国内外の研究機関との連携をはかり、大学等の専門家の協力を得つつ、原子力長期計画等で求められている地層科学研究を着実に、かつ効率的に進めていく。研究開発業務の透明性を確保する観点からは、研究計画の策定段階から成果までの情報を積極的に公表し、瑞浪超深地層研究所についても広く公開していく。また、

地下深部についての学術的な研究の場，学習の場，国民の理解を深める場としても寄与していく方針である。

参考文献

核燃料サイクル開発機構（1999）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ－，サイクル機構技術資料，JNC TN1410 99-020～024.

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

核燃料サイクル開発機構（2004）：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成15年度報告－，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 2004-007.

【個別技術報告】

東濃地科学センターにおける 深地層の科学的研究の現状 ～超深地層研究所計画を中心として～

地層処分技術に関する研究開発報告会
－わが国の地層処分計画を支える技術基盤の継続的な強化－

平成17年3月8日 有楽町朝日ホール

核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター
坂巻 昌工

東濃地科学センターにおける地層科学研究

広域地下水流動研究



超深地層研究所計画



地質環境の長期安定性に関する研究



■ 地質環境の長期安定性に関する研究

概要調査に求められている体系化された調査技術の開発・整備と、地層処分システムの安全評価に反映するための将来の地殻変動・火成活動等が地質環境に及ぼす影響を予測・評価するためのモデル開発等を実施。

■ 広域地下水流動研究

H15に実施したボーリング調査の取りまとめ・解析等を実施。（H16までに現場作業を終了）

■ 超深地層研究所計画

第1段階である地表からの調査予測研究段階として、深層ボーリング調査、孔間水理試験等を実施。

（第1段階の調査研究をH16に終了）

地質環境の長期安定性に関する研究

調査技術の開発・体系化

古地形・水系等の復元技術、震源断層等の抽出技術、マグマ・高温岩体等の探査技術 etc.

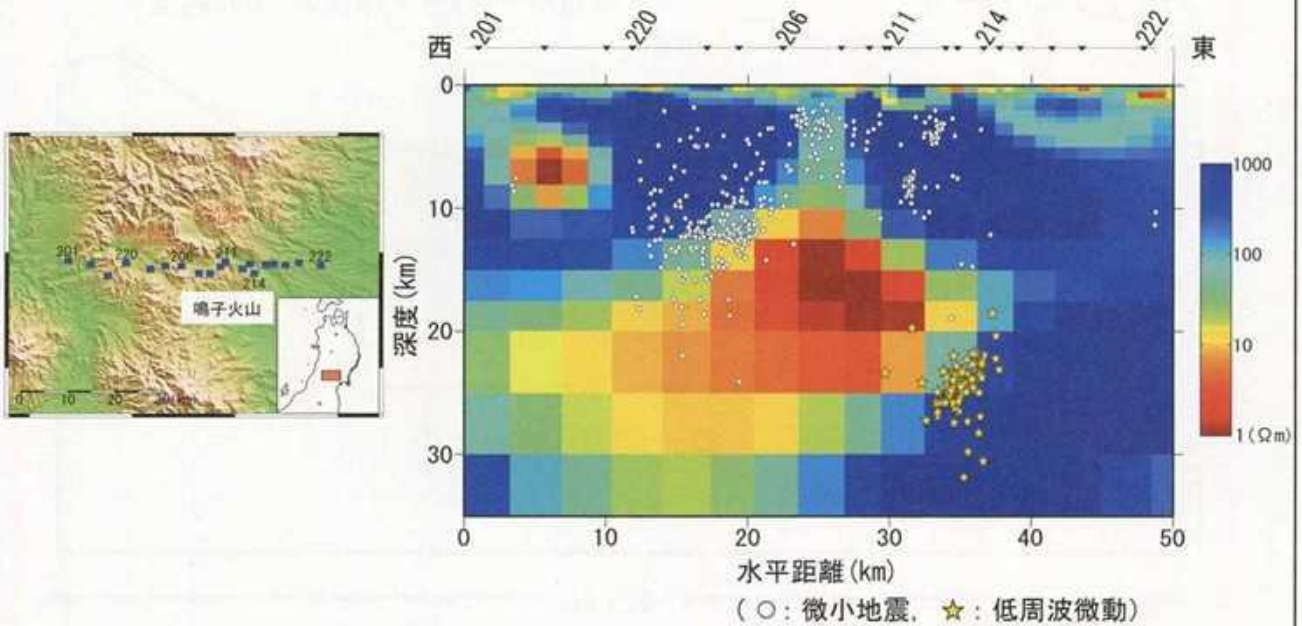
長期予測・影響評価モデルの開発

三次元地形変化モデル、火山活動域の長期予測モデル、断層周辺の力学・水理モデル etc.

研究情報基盤の整備

安全評価に係る地質環境データベース、次世代の高精度探査技術 etc.

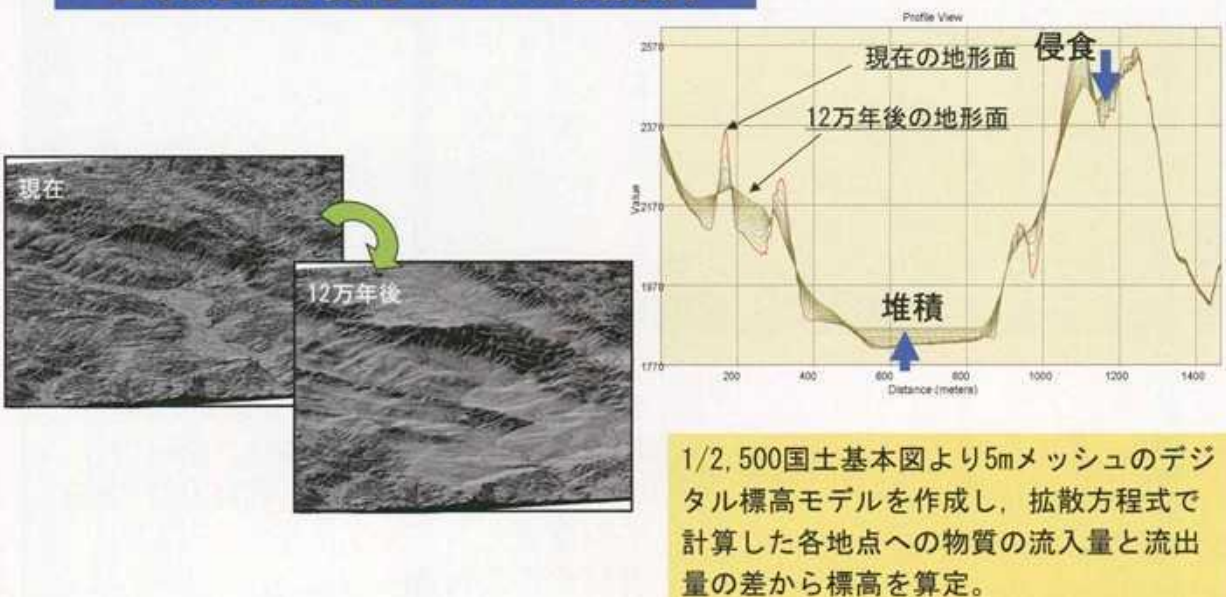
ーマグマ・高温岩体等の探査技術の開発例ー



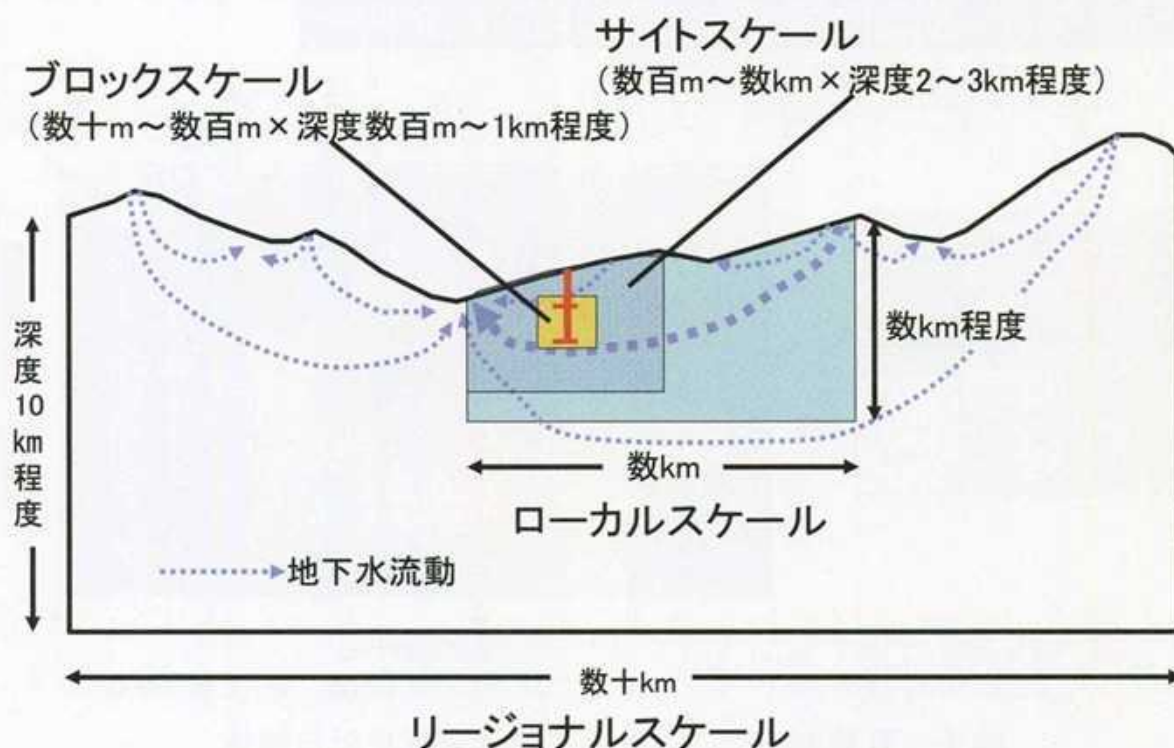
鳴子・鬼首火山下における二次元深部比抵抗構造

長期予測・影響評価モデルの開発

ー三次元地形変化モデルの開発例ー



岐阜県瑞浪市北西地域の現在と12万年後の地形



	空間スケール		面積	主な研究項目
広域地下水流動研究	広域スケール	リージョナルスケール	数百km ²	大規模な地質構造 広域地下水流動 構造発達史
		ローカルスケール	数十km ²	岩体・地層の分布 主要な断層の分布と地質学的性状 地下水の主要な流動経路と水質分布 広域応力場
超深地層研究所計画	施設スケール	サイトスケール	数km ²	主要な岩相の分布 断層・割れ目帯の分布と地質学的性状 断層・割れ目帯の水理特性と連続性 地下水の酸化還元境界・地球化学特性の深度変化 岩盤の応力分布
		ブロックスケール	数百m ² ～数km ²	岩盤の物質移行特性 掘削影響領域の分布



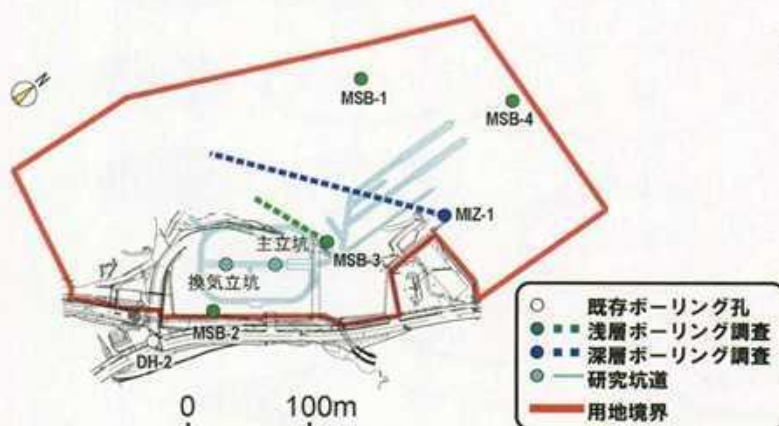
【主な調査項目】

- ・ボーリング調査
(物理検層, BTV, 水理試験, 地下水地球化学調査, 岩石鉱物試験など)
- ・物理探査
- ・表層水理観測
- ・地下水圧観測

- 広域地下水流動研究における研究実施領域 (約10km四方)
- 500m級ボーリング孔
 - 700m級ボーリング孔
 - 1,000m級ボーリング孔

超深地層研究所計画の目標

- ① 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備
- ② 深地層における工学技術の基盤の整備



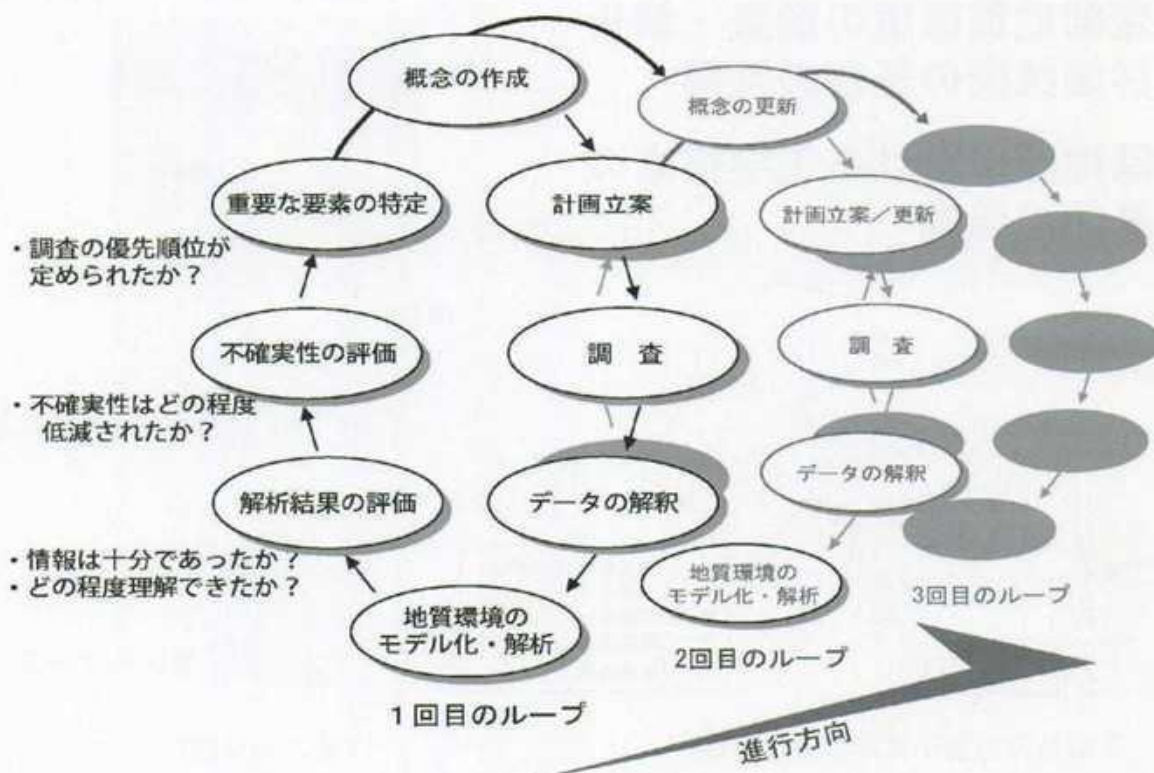
瑞浪超深地層研究所調査位置図



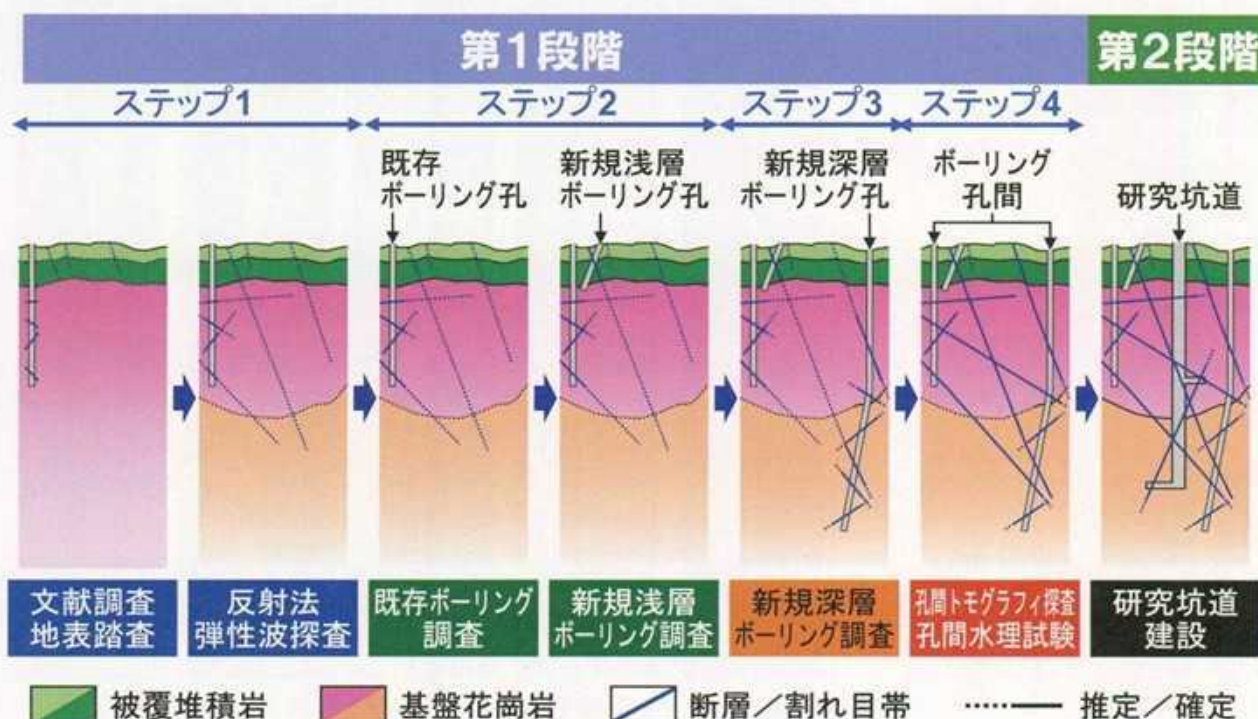
(イメージ図)

年度	2000	2005	2010	2015
● 第1段階（地表からの調査予測研究段階）	① 地表からの調査・研究による地質環境モデルの構築および研究坑道掘削前の深部地質環境の状態の把握 ② 研究坑道の詳細設計および施工計画の策定 ③ 研究坑道の掘削を伴う研究段階の調査・研究計画の策定			
● 第2段階（研究坑道の掘削を伴う研究段階）	① 研究坑道の掘削を伴う調査・研究による地質環境モデルの構築および研究坑道の掘削による深部地質環境の変化の把握 ② 研究坑道の施工・維持・管理にかかわる工学技術の有効性の確認 ③ 研究坑道を利用した調査・研究計画の策定			
● 第3段階（研究坑道を利用した研究段階）	① 研究坑道からの調査・研究による地質環境モデルの構築および研究坑道の拡張による深部地質環境の変化の予測 ② 深地層における工学技術の有効性確認			

調査研究の繰り返しアプローチ



第1段階における調査研究の進め方



第1段階における繰り返しアプローチ状況



深層ボーリング調査結果(地質・地質構造)

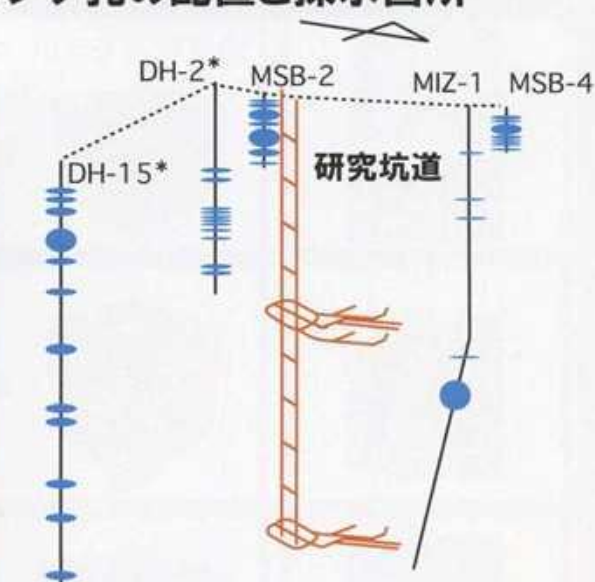


深層ボーリング調査結果(地下水地球化学)

調査研究に用いたボーリング孔の配置と採水箇所



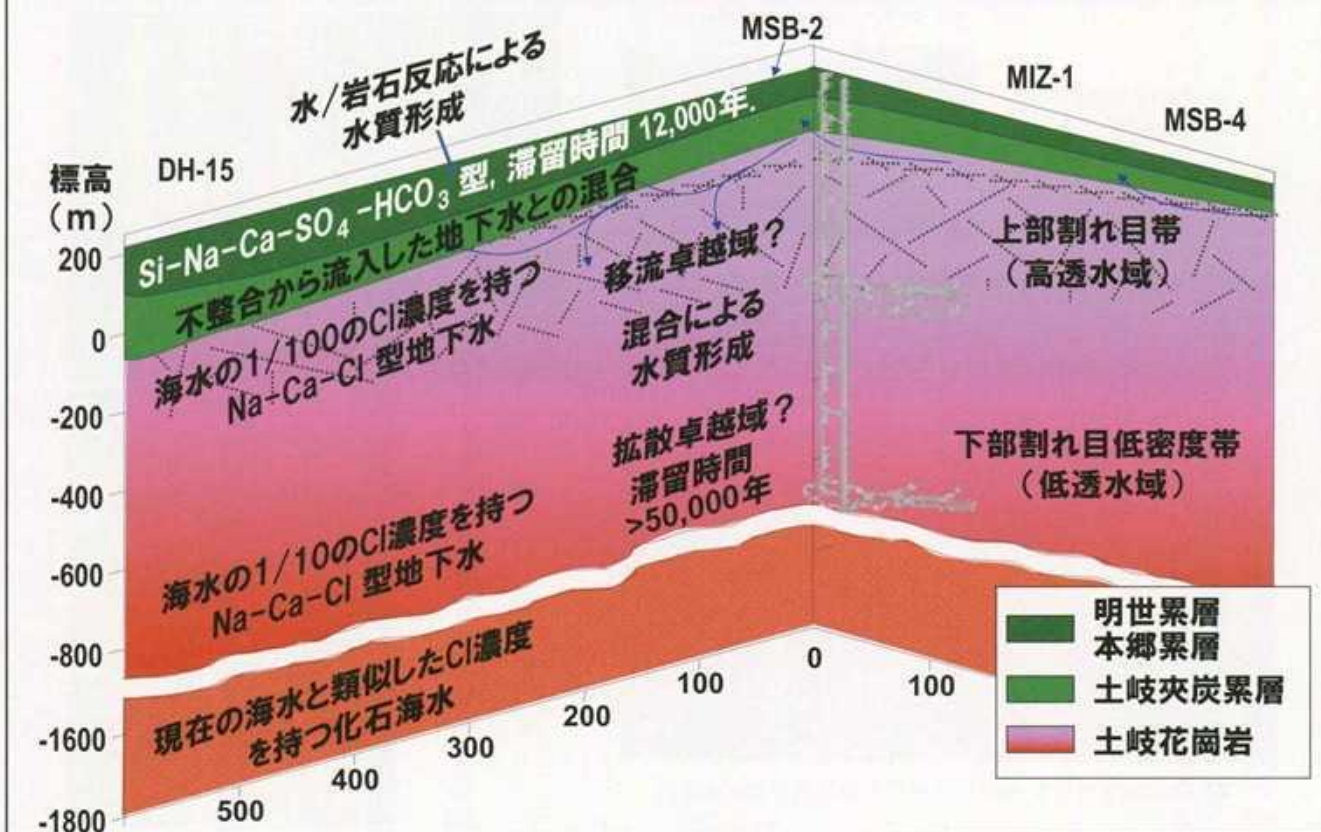
*: 広域地下水流動研究のボーリング孔



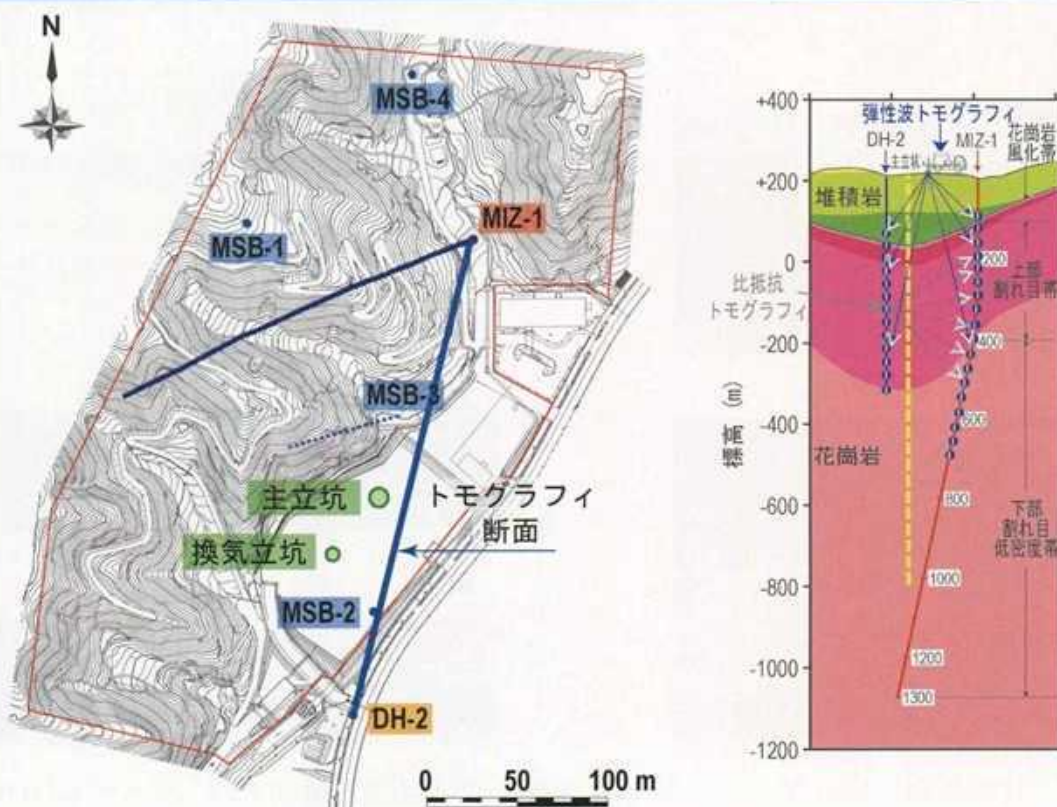
● 採水箇所

46 試料 (ボーリング孔5孔)

第1段階における地下水地球化学概念モデル



孔間弾性波トモグラフィ調査



研究坑道の掘削

瑞浪超深地層研究所
レイアウト
(地上施設)



瑞浪超深地層研究所の研究坑道掘削現場風景(2005.2.9)



↑
櫓からの眺め
(換気立坑)



→
櫓全景
(主立坑)

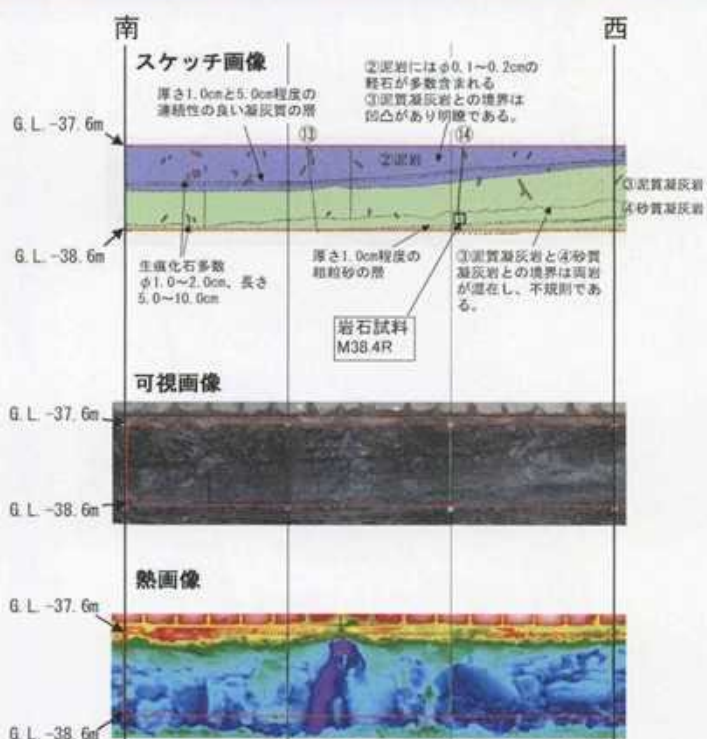
立坑壁面の地質観察の例



立坑壁面状況



立坑壁面観察状況



立坑壁面の地質記載例 (G.L.-37.6~-38.6 m)

○地質環境への影響評価

(場の変化の把握, 現象の理解)

○第1段階の成果の評価

(調査・解析結果, 調査・解析体系の評価)

○研究坑道掘削に関する設計・実施・評価

(工学技術の有効性の確認)

○第3段階の計画

(レイアウト, 調査・試験項目の決定)

立坑近傍での調査研究計画の例

○水圧分布の変化

⇒間隙水圧測定

○岩盤の透水性の変化

⇒掘削影響領域の調査

(水理)

○研究坑道への湧水量

⇒湧水量計測

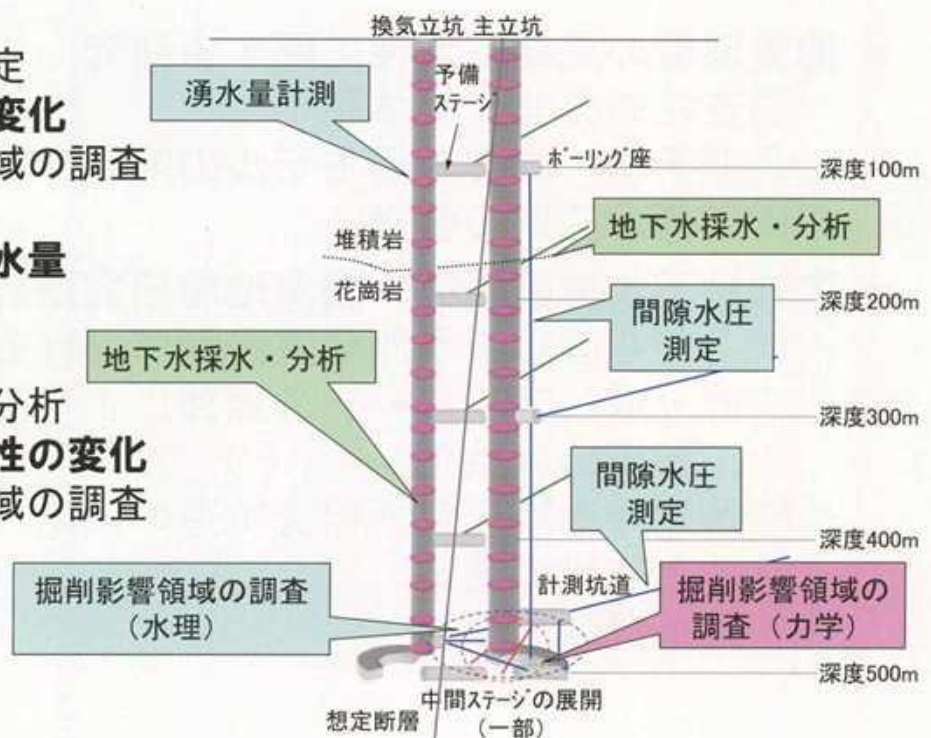
○水質の変化

⇒地下水採水分析

○応力場と岩盤物性の変化

⇒掘削影響領域の調査

(力学)



■ 研究計画・成果の品質

- 調査計画書・報告書の作成
- 各種委員会での報告・評価
- 学会発表，査読付き論文としての公開

■ 調査・施工における品質

- 品質保証マネジメントシステムの運用
- データベースによる技術情報・施工情報の管理

■ 地質環境の長期安定性に関する研究

- 調査技術の開発・体系化
- 長期予測・影響評価モデルの開発
- 研究情報基盤の整備

■ 広域地下水流動研究・超深地層研究所計画

- 地上からの調査予測研究段階における調査研究
繰り返しアプローチの実践による調査・解析
・評価の体系化
- 瑞浪超深地層研究所研究坑道の掘削
地上施設の整備
本格掘削の開始

平成17年度成果取りまとめ

- 知識化レポート
- 分野レポート

平成17年度以降の予定

地質環境の長期安定性に関する研究

現象の規模や影響範囲を定量的に把握することに
重点を置いた調査技術の開発，予測モデルの統合化

広域地下水流動研究

ローカルスケールの解析，モニタリングの継続

超深地層研究所計画

本格掘削，第2段階の調査研究の実施

【個別技術報告】

幌延深地層研究計画(地上からの調査段階)の現状

幌延深地層研究計画（地上からの調査段階）の現状

核燃料サイクル開発機構
幌延深地層研究センター
副所長 武田 精悦

1. はじめに

幌延深地層研究計画は、「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」（原子力委員会、2000）に示された深地層の研究施設計画のひとつであり、堆積岩を対象とした深地層の研究施設計画として核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）が現在、北海道幌延町内において進めているものである。

本研究計画においてサイクル機構は、堆積岩における地層処分技術の信頼性向上に向けて、地表から地下深部までの地質環境の調査技術、地層処分の工学技術、安全評価手法の適用性を確認すること、また、地下施設において一般の方々や専門家の方々が実際に深地層を体験し、地層処分技術の研究開発に対する理解を深めていただく場として整備することを目標に掲げている。

本報告では、幌延深地層研究計画の調査研究と施設建設の現状と主な成果について述べる。

2. 経緯

平成 12 年 11 月に北海道、幌延町、サイクル機構の 3 者間で「幌延町における深地層の研究に関する協定」（以下、協定）が締結された。サイクル機構は本協定に基づいて深地層研究計画を策定し、13 年 3 月に調査研究を開始した。協定には、「研究実施区域に放射性廃棄物を持ち込むことや使用することはしない」、「深地層研究所を放射性廃棄物の最終処分を行う実施主体へ譲渡、貸与しない」、「研究終了後は地上の施設を閉鎖し、地下施設を埋め戻す」および「研究実施区域を将来とも放射性廃棄物の最終処分場とせず、幌延町に放射性廃棄物の中間貯蔵施設を将来とも設置しない」こと等が定められている。

14 年 7 月には 13 年度の地上からの調査結果等に基づき、主な調査研究の展開場所となる研究所設置地区を幌延町北部の北進地区に選定した。これに引き続き 15 年 3 月には研究所設置地区内において、地上／地下施設を建設するための用地を取得し、15 年度に第Ⅰ期の造成工事を 16 年度に第Ⅱ期の造成工事を行い、敷地造成の大部分を終了した。

3. 幌延深地層研究計画の概要

幌延深地層研究計画は、幌延町に存在する新第三紀以降の堆積岩を調査研究の対象とした 20 年程度の計画である。この計画は 3 つの段階に分けて実施する。第 1 段階である「地上からの調査研究段階」は協定締結後の 13 年 3 月から開始しており、17 年度に終了する。第 2 段階である「坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階」は 17 年度より開始する。地下施設は、深度 500 m 程度の立坑 3 本（アクセス用立坑 2 本、換気用立坑 1 本）と試験研究のための水平坑道から成る。第 3 段階である「地下施設での調査研究段階」は、試験坑道を使用した地層処分技術に関する各種の試験研究を行う。これら各段階の研究計画については研究の進捗に合わせて適宜見直しを行っていく。

幌延深地層研究計画の各段階においては、深地層の科学研究（以下、地層科学研究）と地層処分研究開発を実施する。地層科学研究としては、地質環境調査技術開発、地質環境モニタリング技術開発、深地層における工学的技術の基礎の開発、地質環境の長期安定性に関する研究の 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。

4. 幌延の地質環境

幌延町は天北堆積盆の東端部に位置し、町内には、白亜系を基盤岩として、古第三系の羽幌層・曲淵層、中期中新世前半の宗谷夾炭層・鬼志別層・増幌層、中期中新世後半～鮮新世

の稚内層・声問層，鮮新世～前期更新世の勇知層・更別層，中期更新世以降の段丘堆積物群，および完新世堆積物が分布している（岡・五十嵐，1997）。これらのうち，羽幌層・曲渕層は地表に露出しないが，深層ボーリングにおいて確認できる（石油公団，1995）。稚内層，声問層，勇知層，および更別層は，増幌層に不整合で重なる深海性→浅海性→半陸成～陸成の一連の堆積物で（岡・五十嵐，1997），各層の主な構成岩種はそれぞれ，硬質頁岩，珪藻質泥岩，細粒砂岩，および礫岩・砂岩・シルト岩である。幌延町は，いずれも北北西－南南東走向の東の幌延断層と西の大曲断層により3分され（岡，1986），幌延断層以東の東部，幌延断層と大曲断層の間の中部，および大曲断層以西の西部に区分される。それぞれの特徴を述べると，1) 東部は白亜系～新第三系が分布し，褶曲・断層が多く，2) 中部は主に稚内層・声問層が分布し，軸の走向が断層にほぼ平行な褶曲が雁行状に配列し，3) 西部は声問層・勇知層・更別層が分布し，緩傾斜の褶曲構造が発達する（秋山・保柳，1990）。また，東部および西部には，活断層，とう曲，傾動等の第四紀の新しい活構造も認められる（中田・今泉，2002）。

研究所設置地区は中部と西部の境界付近すなわち大曲断層近傍に位置し，地区近辺には稚内層および声問層が主に分布する。最近の研究により，これらの岩石中には割れ目が多く存在し，割れ目が地層の水理特性に大きな影響を与える可能性のあることがわかってきている。また，地層中に存在する地下水が「塩水系の地下水」と「淡水系の地下水」の2種類に分類されること，および地下水には溶存ガスが存在することが確認されている。幌延深地層研究計画では，このような地質環境の特徴に着目して研究を進めている。

5. 調査研究の進捗状況

5.1 地層科学研究

5.1.1 地質環境調査技術開発

(1) 地質環境データの取得

地上からの調査研究段階において，これまでに地質調査，空中／地上物理探査，表層水理調査，ボーリング調査等の地質環境調査を実施した。地質調査や空中／地上物理探査によると，研究所設置地区およびその周辺地域には声問層と稚内層が広く分布しており，これらの地層は埋没続成変質の程度により上下に区分される。調査地域には大曲断層が存在し，その位置や特徴が特定されつつある。声問層および稚内層中には亀裂が多く存在することが観察されており，これらの亀裂は層理面と高角に交差する亀裂と層理面とほぼ並行な亀裂に分類できた。また，前者の亀裂は密集し，亀裂ゾーンを形成していることがわかった。

地層の透水係数については，声問層が $10^{-9} \sim 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ ，稚内層では $10^{-11} \sim 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ （亀裂帯）および $10^{-10} \sim 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ （健岩部）を示す。稚内層の透水係数は，非常に広い範囲に分布しており，亀裂の存在が透水係数に大きな影響を与えていることを示唆している。また，室内透水試験から得られた透水係数の多くは原位置水理試験結果に比べて数オーダー小さな値となるが，大曲断層西側の深部ではよく一致する区間も存在する。表層水理観測については，研究所設置地区およびその周辺地域における表層水理特性を把握するために河川流量観測システム，気象観測システムおよび地下水位・土壤水分観測システムを整備した。河川流量については，北進地区を流れる3つの河川のそれぞれ3地点に河川流量計を設置し，連続観測を行っている。気象観測については幌延町内に4箇所の観測所を設置し，降水量，温度，風速等の連続観測を行っている。また，森林からの蒸発散量および表層部の地下水位・土壤水分を観測するための機器類を新設し，観測を開始した。

地下水水質については，ボーリング孔から直接サンプリングした地下水およびボーリングコアを圧搾することによりサンプリングした間隙水を用いて分析した。同深度の場合，双方の水質がほぼ一致することが確認できた。これらの地下水は一般に，深度が大きくなるにつれて淡水から塩水へと徐々に変化する。地下水の起源を推定するために酸素・水素同位体比の分析を行った結果，研究所設置地区の地下水は，地下に浸透した降水と地層堆積時に閉じ込められた海水が混合しつつ，岩石とも反応しながら，現在の水質になっていると推察された。

力学特性は、声間層、声間層／稚内層の遷移部分および稚内層でそれぞれ異なる。一軸圧縮強度については、声間層で 5 MPa 程度、声間層／稚内層の遷移部分で 5～20 MPa 程度、稚内層で 20 MPa 程度である。水圧破碎法による応力測定の結果からは、最小主応力はほぼ深度に比例して増加すること、および最大主応力は最小主応力のほぼ 1.5 倍の範囲内にあることがわかった。

(2) 地質環境のモデル化

地質環境調査によって得られたデータに基づき地質環境モデル（地質構造モデル、水理モデル、地下水の地球化学モデル、岩盤力学モデル）を作成・更新した。

地質構造については、大曲断層の内部構造を詳細に記述するとともに、堆積層序、大曲断層および亀裂ゾーンを考慮した地質構造モデルを構築した。水理については、地層構造を考慮した研究所用地を含む広域の地下水流動解析モデルを構築し、地下水流動の方向と流れの経路を予測した。地球化学については、地下水の水質形成モデルの構築に着手した。岩盤力学については、既存データに基づき、岩盤物性分布モデルを構築した。

(3) 調査技術の改良

ガス発生を考慮した水理試験手法の構築、定方位コア採取方法の検討、ボーリングコアからの間隙水抽出方法の考案、軟岩への適用を目指した岩盤力学測定装置の改良、原位置 pH-Eh 測定装置の開発、コントロール掘削技術の開発等を行った。このうち、原位置 pH-Eh 測定装置、コントロール掘削技術については開発を継続しており、その他の技術はこれまでのボーリング調査へ適用している。

5.1.2 地質環境モニタリング技術の開発

地下水の圧力と水質について、各種調査活動や地下施設建設による影響、およびその後の回復過程を系統的にモニタリングするために、これまでに掘削したボーリング孔に長期モニタリング装置を設置した。

また、地下施設周辺の構造や物性の変化などを遠隔監視するために、東濃地科学センターにおいて技術開発が進められているアクロス（ACROSS : Accurately Controlled Routinely Operated Signal System）を幌延の研究所設置地区に適用するための準備を行った。

5.1.3 深地層における工学的技術の基礎の開発

研究所設置地区を対象とし、地下施設について、15 年度に基本設計、16 年度に実施設計を行い、地下施設のレイアウトおよび施工計画を策定している。施工計画の策定では、地下施設における調査研究の他、施設の安全性を確保するために岩盤特性に応じた地下空洞の安定性を評価するとともに、可燃性ガスの発生を前提に施設の通気や防災対策などを検討した。

5.1.4 地質環境の長期安定性に関する研究

幌延地域の現在の地殻変動を把握することを目的に、ボーリング孔内（深度 140 m）に 1 台、地上に 4 台の地震計を設置して連続観測を実施している。また、地殻変動観測用の電磁探査機器、GPS 観測機器を設置して地殻の歪み等の連続観測を実施している。さらに、地層に残された記録から過去の地質構造発達史を明らかにする観点で、段丘堆積物の調査、解析等を行い、その結果に基づき、研究所設置地区周辺の地形の変遷過程を試行的に記述した。

5.2 地層処分研究開発

5.2.1 処分技術の信頼性向上

人工バリアの搬送定置や支保工材料、坑道閉鎖、周辺岩盤を含む人工バリアの長期挙動に関して、第 2 段階以降に地下施設で行う試験計画について検討し、概要をまとめた。また、地下施設深部の塩水系地下水環境下での緩衝材の力学特性を把握するために、ボーリング孔から採取した地下水を用いて室内試験を実施するとともに試験結果を用いてオーバーパック

の沈下挙動解析を行った。さらに、第2次取りまとめで示した人工バリア設計手法の幌延の地質環境への適用性を検討するために、これまでの調査で取得した地質環境データを用いて人工バリアの試設計の検討を行った。

5.2.2 安全評価手法の高度化

不確実性を考慮に入れた地質環境モデルの体系的な構築方法を検討するために、研究所設置地区および周辺地域を対象とした文献調査やボーリング調査等により取得した地質環境調査データの整理を行い、地質環境の試行的なモデル化を行った。

6. 地下施設

15年度の基本設計によると、幌延深地層研究計画における地下施設は、東立坑(内径 6.5 m)、西立坑(内径 6.5 m)、換気立坑(内径 4.5 m)の3本を深度 500 m 程度まで掘削することとし、また、最深部のほか途中の深度にも水平坑道を展開する計画としている。

地下施設の設計・施工計画については、研究環境を確保し、施設を安全に建設・維持できることが基本的な要件である。地下施設における調査研究の内容のほか、地下施設の安全性を確保するために、岩盤特性に応じた空洞の安定性を評価すると共に防災対策(可燃性ガス対策、坑内作業環境、火災等)を考慮している。さらに、一般の方々が深地層を体験する場であることを考慮して設計を行っている。

7. 今後の予定

本報告では第1段階における調査研究等の現状について簡単にまとめた。17年度には、第1段階の調査研究は終了し、第2段階の調査研究が始まる。地上からの調査研究の成果は第2段階および第3段階の調査研究のベースとなるものであり、立坑や試験坑道掘削に伴う影響評価、モデルによる予測技術の評価、試験坑道を使用した原位置試験計画の具体化等に反映される。また、幌延深地層研究計画で得られた成果は、処分事業の推進や国が進める安全基準等の具体化に反映される。

地上施設としては、17年度に研究管理棟、コア倉庫棟、ワークショップ棟などの建設を開始し、18年度には建設を終了する予定である。また、地下施設については、17年度に立坑掘削に着手、18年度より本格掘削を開始する。今後、幌延の地下研究施設は試験・研究を行うだけでなく、多くの人々が深地層を体験し、地層処分技術の研究開発に対する理解を一層深めるための体験の場として提供してゆく。

参考文献

- 秋山雅彦, 保柳康一(1990):「新第三系, 天北地域」, 日本の地質1 北海道地方, 共立出版, pp. 105-106.
- 原子力委員会(2000): 原子力の研究, 開発及び利用に関する長期計画(平成12年11月), 原子力委員会.
- 中田 高, 今泉俊文(2002): 活断層詳細デジタルマップ(+DVD2枚 +付図), 東京大学出版会.
- 岡 孝雄(1986): 北海道の後期新生代堆積盆の分布とその形成に関わるテクトニクス, 地団研専報 31, pp. 295-320.
- 岡 孝雄, 五十嵐八枝子(1997): 北海道・天塩平野北部の上部新生界一特に勇知層・更別層の堆積相と花粉化石層序について一, 加藤誠教授退官記念論文集, pp. 341-365.
- 石油公団(1995): 国内石油・天然ガス基礎調査基礎試錐「天北」調査報告書, 石油公団.

【個別技術報告】

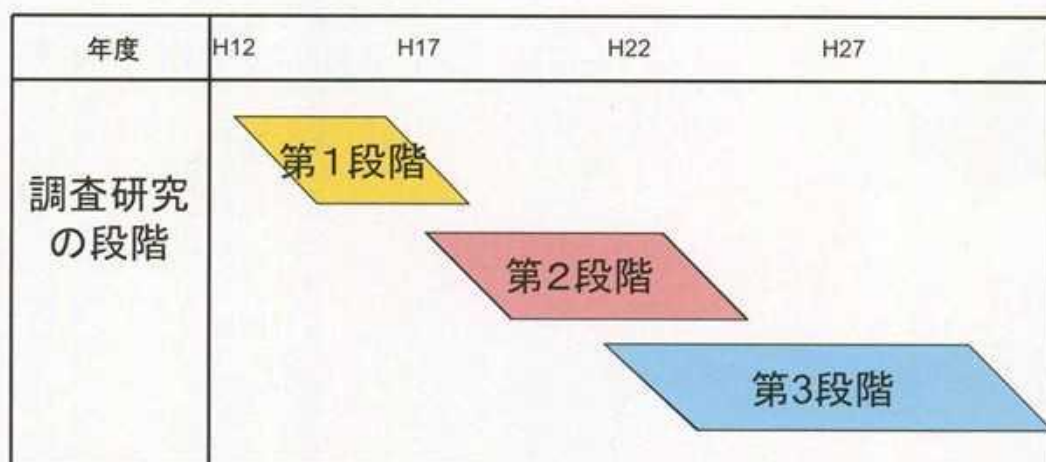
幌延深地層研究計画の現状

地層処分技術に関する研究開発報告会
－わが国の地層処分計画を支える技術基盤の継続的な強化－

平成17年3月8日 有楽町朝日ホール

核燃料サイクル開発機構 幌延深地層研究センター
武田 精悦

幌延深地層研究計画スケジュール



- 第1段階 地上からの調査研究段階
- 第2段階 坑道掘削(地下施設建設)時の調査研究段階
- 第3段階 地下施設での調査研究段階

「地層科学研究」

- ①地質環境調査技術開発
- ②地質環境モニタリング技術の開発
- ③地質環境の長期安定性に関する研究
- ④深地層における工学的技術の基礎の開発

「地層処分研究開発」

- ⑤処分技術の信頼性向上
 - ・人工バリア等の工学技術の検証
 - ・設計手法の適用性確認
- ⑥安全評価手法の高度化
 - ・安全評価手法の適用性確認

幌延深地層研究計画の現状



研究所設置地区と調査位置



国土地理院1/25,000地形図（幌延、本流、豊富、豊幌）を使用

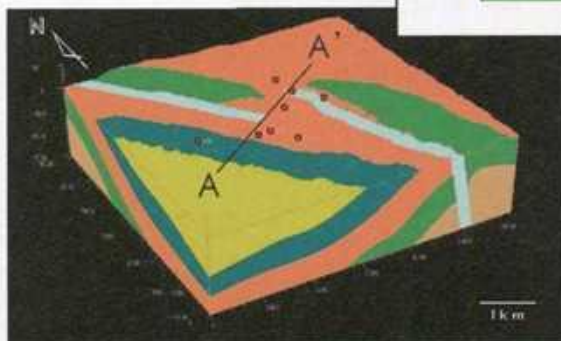
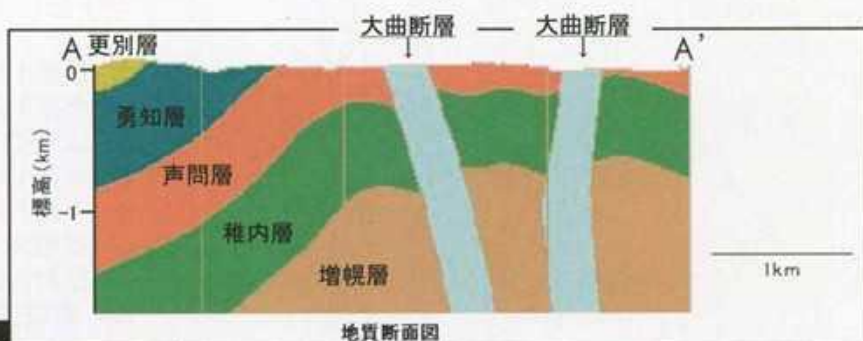
- 凡例**
- 平成16年度ボーリング孔
 - 平成15年度ボーリング孔
 - ▲ コントロールボーリング
 - 平成14年度ボーリング孔
 - 平成13年度ボーリング孔
 - 電磁法 (AMT法) 探査測線 (H15)
 - 反射法地震探査測線 (H14)
 - 電磁探査測点 (H13)
 - ★ 河川流量観測システム設置位置
 - 研究用地

地質・地質構造



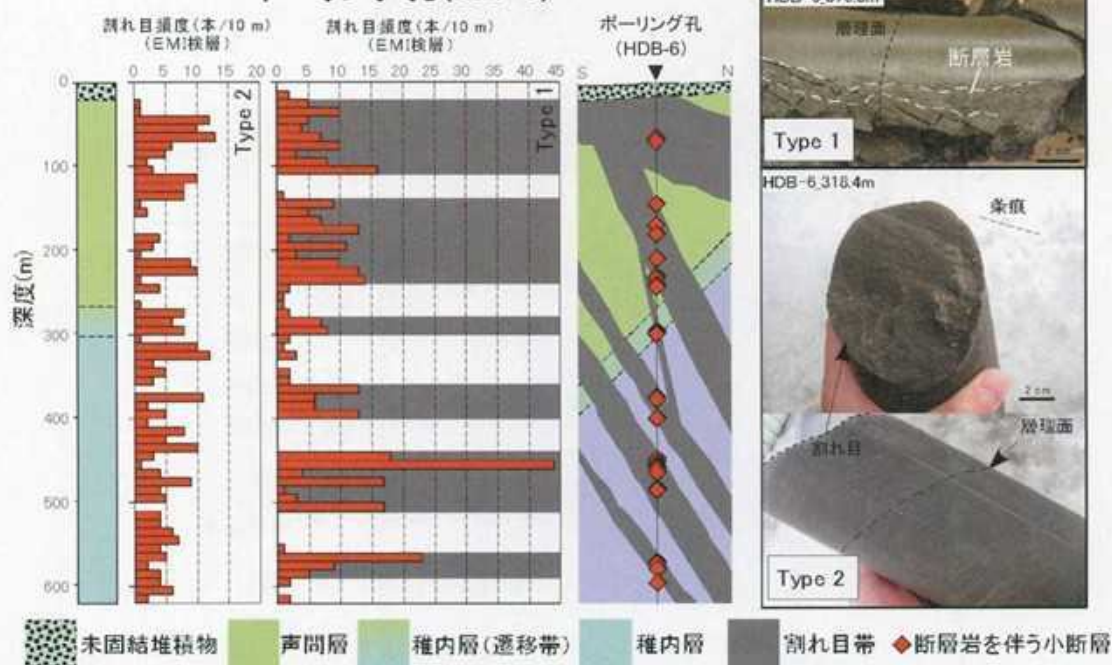
- 凡例**
- 更別層
 - 勇知層
 - 声問層
 - 稚内層
 - 断層
 - 潜在断層
 - 向斜
 - 背斜

国土地理院1/50,000地形図（豊富、雄信内）を使用



地質構造モデル

ボーリング孔(HDB-6)

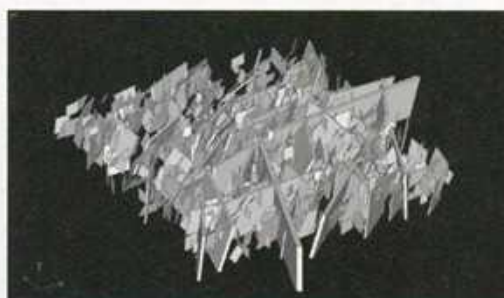


3次元地質構造モデル(研究所設置地区)



大曲断層を考慮した地質構造モデル

+



割れ目帯ネットワーク



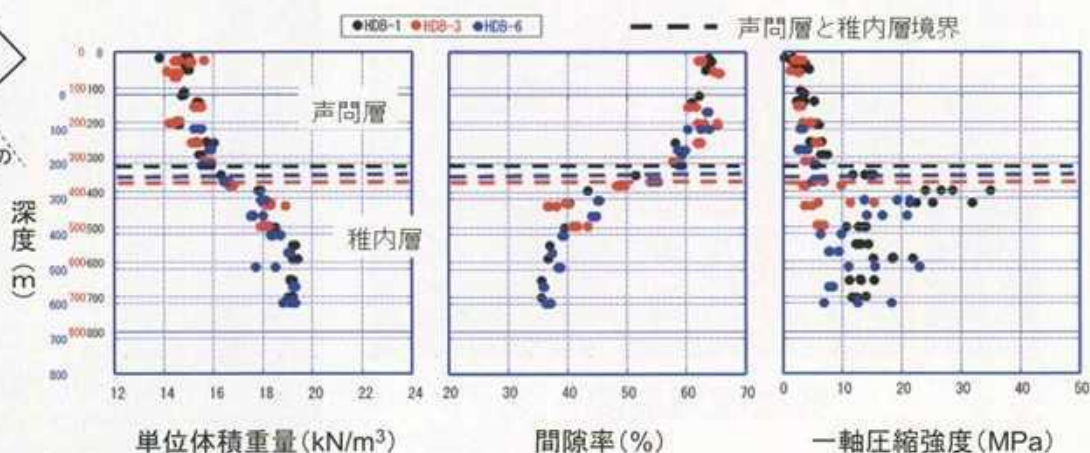
- 表層
- 更別層
- 勇知層
- 声問層
- 稚内層
- 増幌層
- 大曲断層



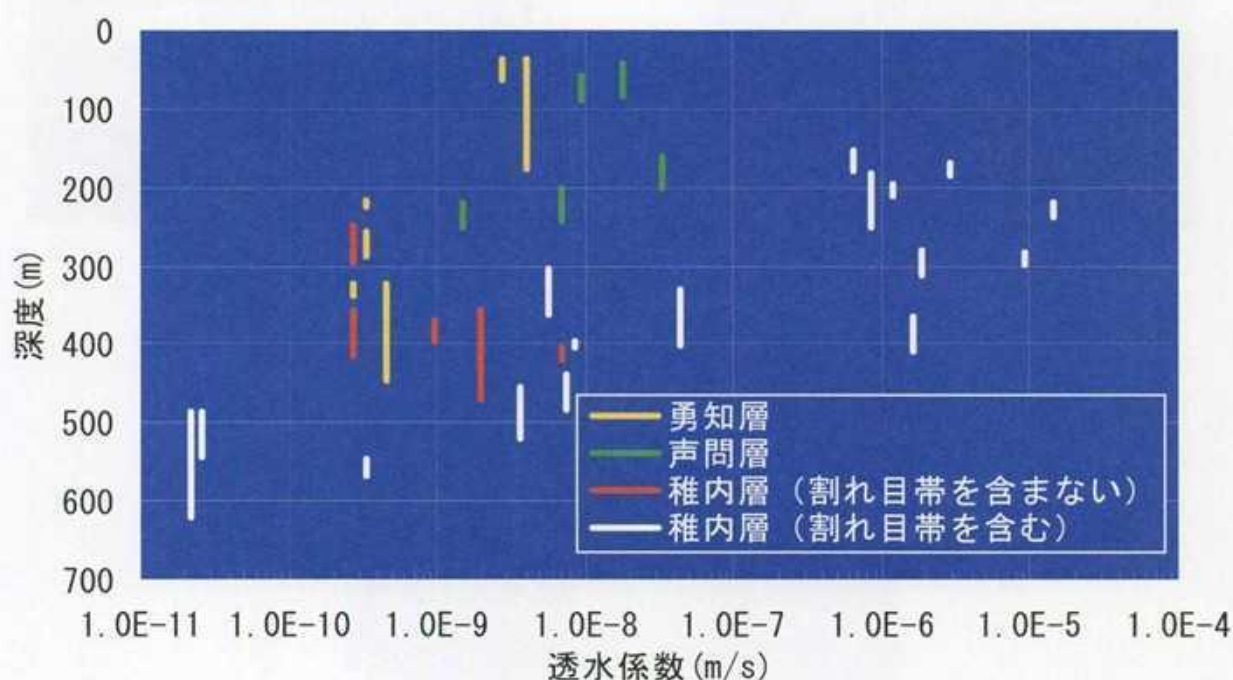
地質・地質構造(岩盤力学)

岩盤物性値の深度分布 (ボーリングHDB-1,3,6孔)

ボーリング孔の概略位置



岩盤の透水性



表層水理調査



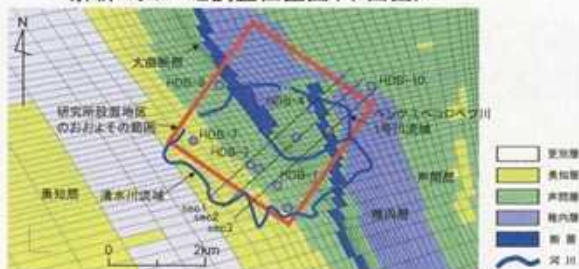
気象観測装置



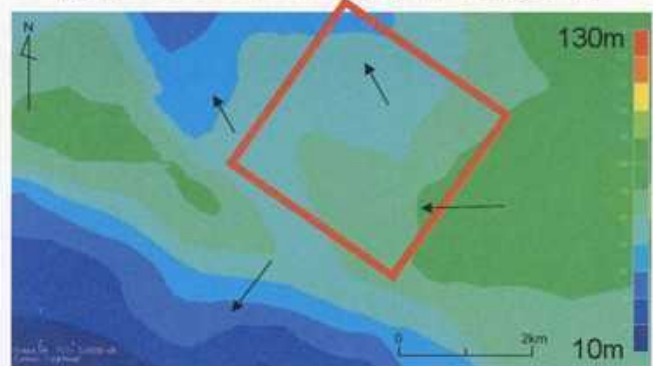
蒸発散量算定のための機器
(樹冠上蒸発散量観測システム)

解析結果(全水頭分布)

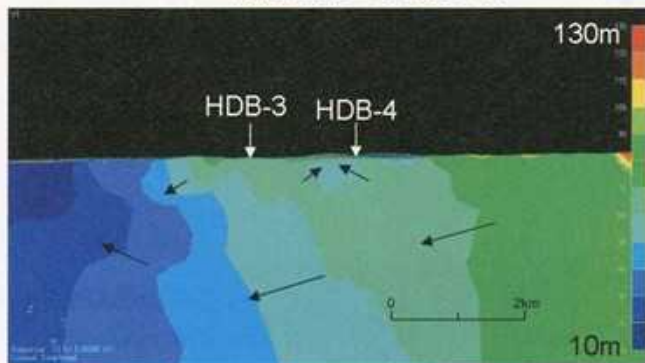
解析メッシュと調査位置図(平面図)



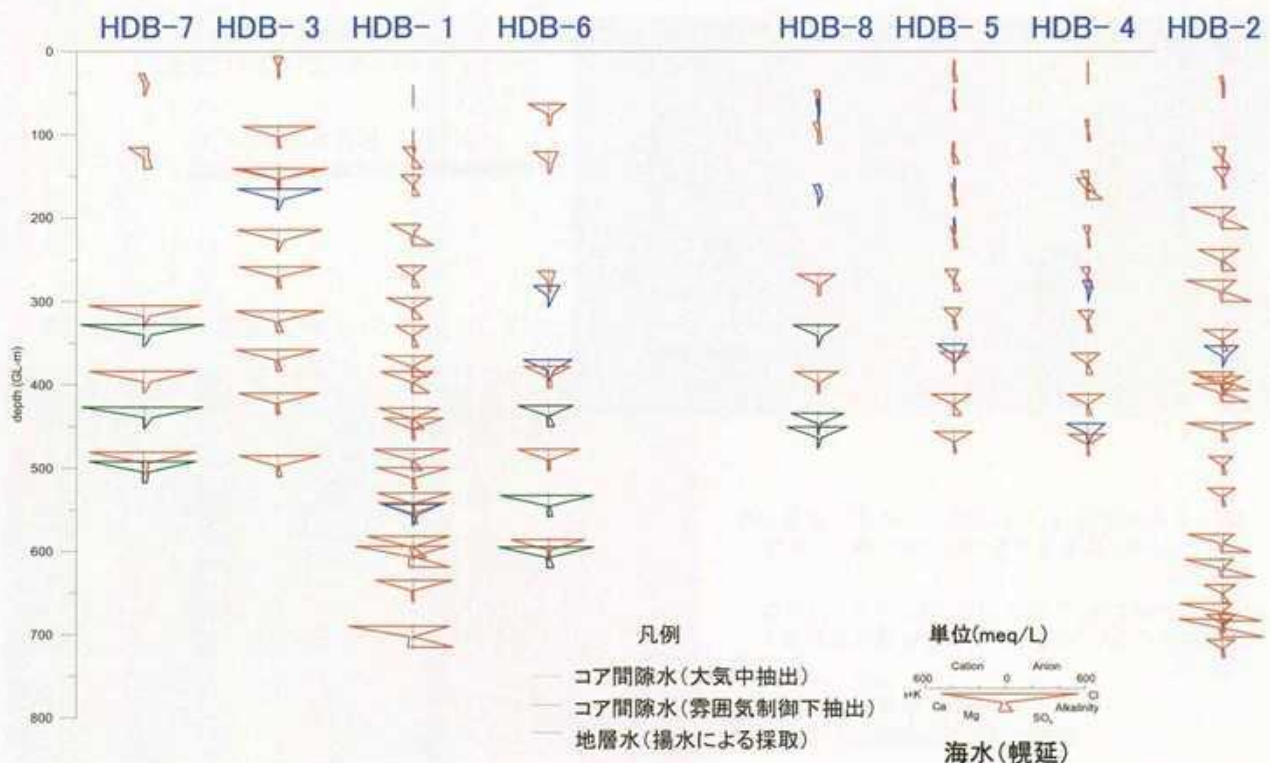
海拔-400mでの水平断面図(全水頭分布)



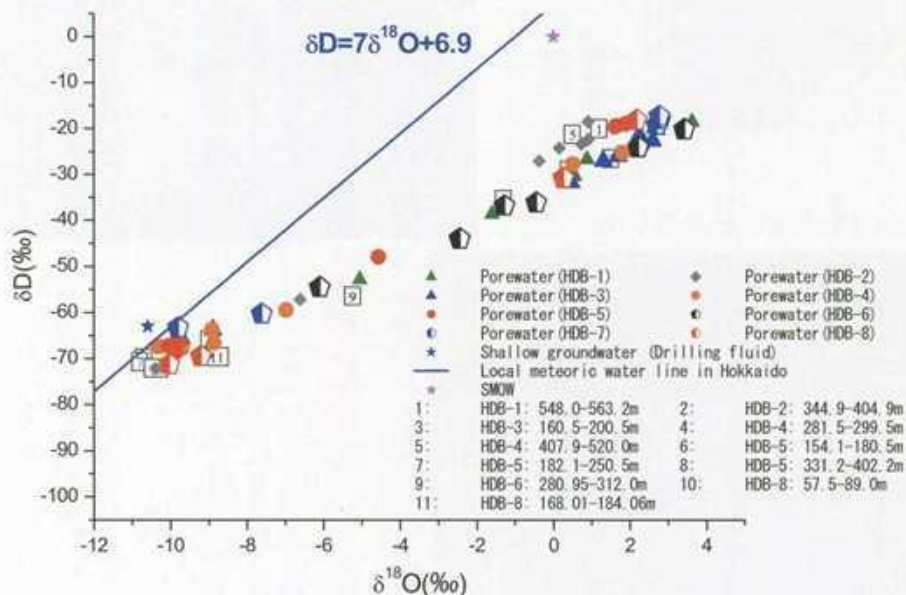
sec1断面図(全水頭分布)



地下水の地球化学特性

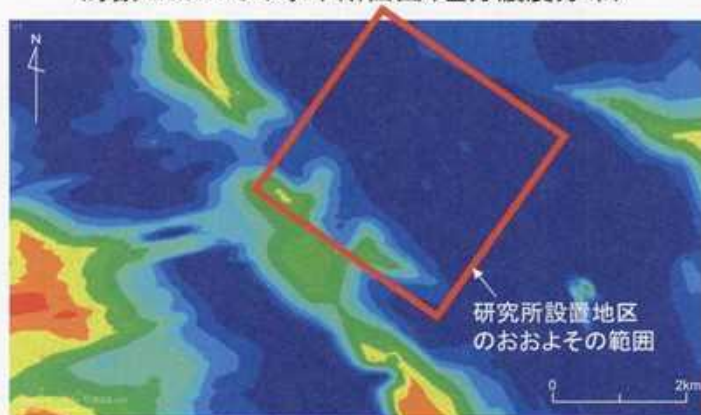


ボーリング調査中に採水された地下水とコアから抽出した間隙水に含まれる酸素・水素同位体比の関係



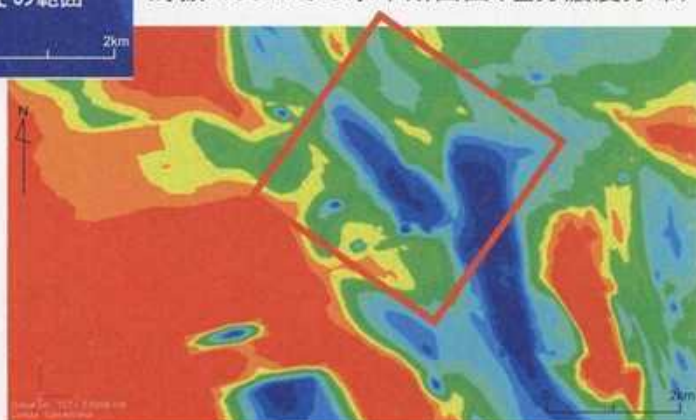
解析結果(塩分濃度分布)

海拔-200mでの水平断面図(塩分濃度分布)



海拔-200mでは、塩水系地下水が降水によって洗い出され、ほぼ降水に置換されている。

海拔-400mでの水平断面図(塩分濃度分布)



なお、この結果は洗い出し開始5万年後の濃度分布を表しており、濃度は現海水の濃度で除して正規化している。

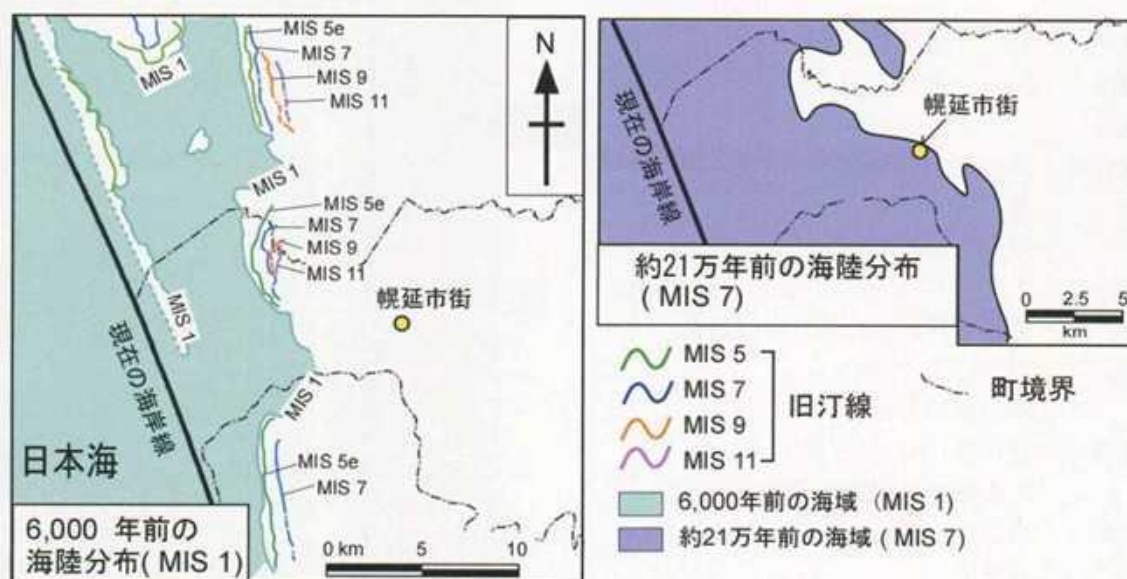
海拔-400mでは、古海水が残っているが、相対的に透水性の高い大曲断層周辺では降水の影響が大きい。

アクロス(精密制御定常信号システム)による観測



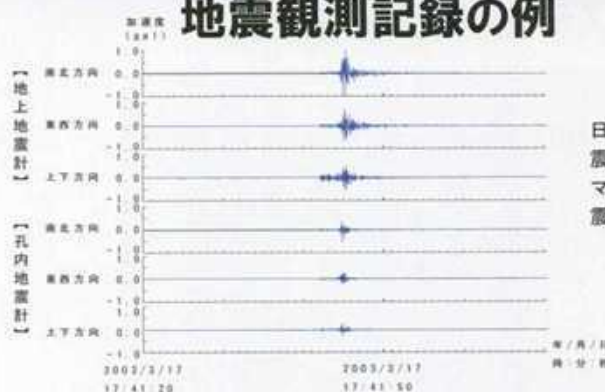
地質環境の長期安定性研究

過去の海岸線の復元

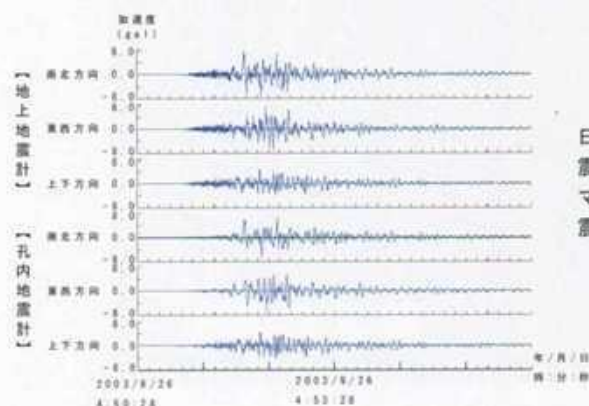


MIS: 海洋酸素同位体ステージ

地震観測記録の例



日時：平成15年3月17日
震央：宗谷岬沖
マグニチュード：1.5
震央距離：71.7km



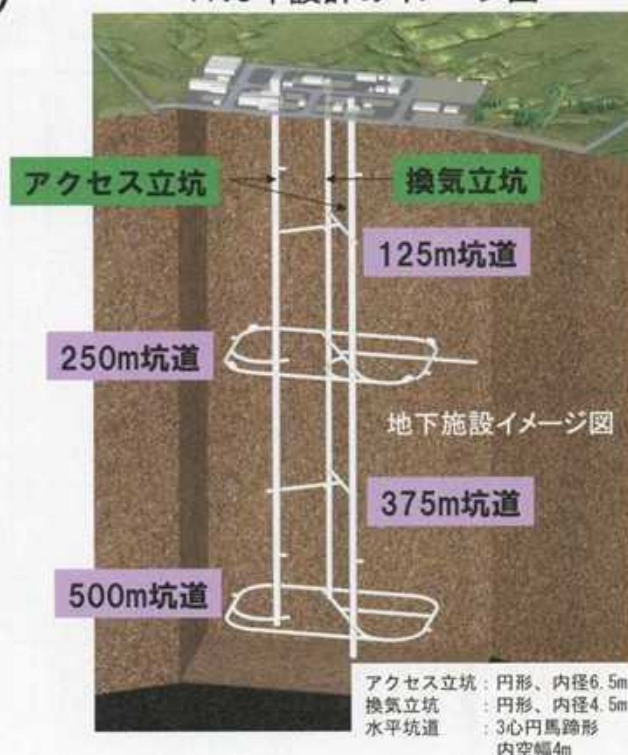
日時：平成15年9月26日
震央：十勝沖
マグニチュード：8.0
震央距離：428km

工学的技術の基礎の開発

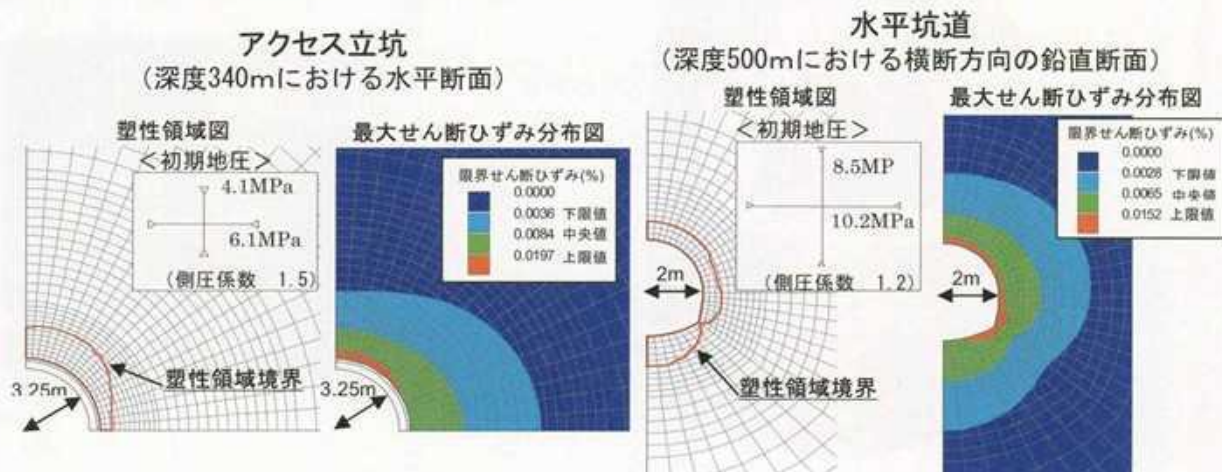
地下施設の坑道配置(案)

立坑本数	3本 (7ヶ所2本、換気1本)
立坑深度	500m 目途
周回坑道	
設置深度	深度250m・500m
規模	長辺180m、短辺110m 総延長1,600m程度
曲率半径	半径30m (レール工法を想定)
方向	長辺を最大主応力方向に配置
連絡坑道	深度125m・375m 総延長200m程度
離間距離	立坑間70mの正三角形配置 その他坑道間掘削径の3倍以上
換気立坑	坑口から分岐した扇風機坑道を設置

H15年設計のイメージ図



空洞安定性解析



地層処分研究開発

第2次取りまとめで示された課題

- ・現象理解と長期挙動予測手法の信頼性確認
- ・具体的地質環境への適用性確認

【処分技術開発】

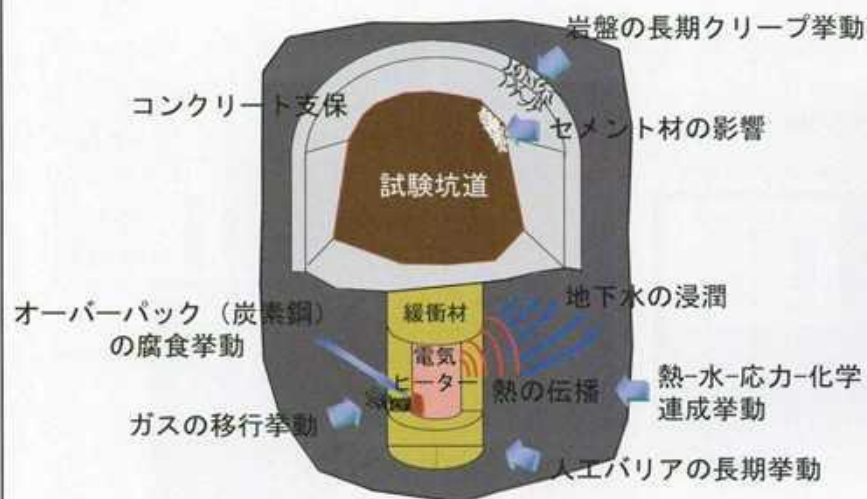
- 施設設計・建設
 - ・施工計画と施工実績の比較による事前設計の妥当性評価など
- 操業・閉鎖
 - ・坑道・ホーリング孔の閉鎖技術の確認など
- 人工バリア設計・施工
 - ・具体的地質条件での設計・施工など
- 人工バリアの長期挙動評価
 - ・再冠水時の挙動評価
 - ・劣化変質評価など

【安全評価研究】

- 天然バリア安全評価の信頼性向上
- 人工バリア安全評価の信頼性向上
- 安全評価用データの拡充
 - ・分配係数、拡散係数等の取得など

原位置試験

- ①人工バリア試験(THMC試験)
- ②緩衝材/岩盤クリープ試験
- ③ガス移行挙動試験
- ④オーバーパックの腐食試験
- ⑤セメント影響試験
- ⑥低アルカリ性コンクリート
施工性確認試験
- ⑦定置精度確認試験
- ⑧坑道閉鎖試験
- ⑨天然バリア中のトレーサ試験
- ⑩人工バリア中のトレーサ試験



人工バリア周辺岩盤の
長期挙動のイメージ



人工バリア搬送定置
試験の例

まとめ

「地層科学研究」

- 地質環境のモデル化
- 地質環境のモニタリングシステムの整備
- 海岸線の変遷／地震観測
- 地下施設設計

「地層処分研究開発」

- 室内試験
(低アルカリ性コンクリート／緩衝材)

第1段階(～平成17年度)

- これまでの成果の取りまとめ
- 地質環境モニタリングの継続
- 地下水水理と地球化学の統合
- 地質環境の変遷を取り入れた地質環境のモデル化

第2段階(平成17年度～)

- 地下施設の建設開始
- 地下施設建設(坑道掘削)時の調査研究

【個別技術報告】

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取組みの現状

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取組みの現状

核燃料サイクル開発機構
東海事業所 処分研究部
次長 油井 三和

1. はじめに

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は、事業段階における我が国の地層処分技術の基盤強化の一環として進められている。東海事業所のエントリーおよびクオリティ等における研究開発は、幌延深地層研究センターや東濃地科学センターで段階的に進められる研究開発と連携し、国際共同研究における最新の知見も取り込みつつ実施している。

処分技術の信頼性向上の目的は、人工バリアや周辺岩盤における長期的な現象について、メカニズムの理解に基づくモデルやデータベースを構築し、実際の地質環境に対して設計手法等の適用性を確認するとともに、安全評価の前提となる処分場の長期挙動を予測することである。安全評価手法の高度化の目的は、実際の地質環境に適用可能でかつ信頼性の高い安全評価に向けた基盤技術を開発することである。これらの目的のために、エントリーおよびクオリティ等における室内試験および原位置試験データを活用し、データベース、モデルおよび安全評価手法の開発を進めてきた。平成 17 年度に、これらの研究成果を取りまとめ、公開する予定である。

2. 研究開発課題

1) 処分技術の信頼性向上に関する研究開発課題

処分技術の信頼性向上に関する研究開発課題として、以下の①～④を進めている。①人工バリアの基本特性データベースの整備については、オーバーバックおよび緩衝材について幅広い地質環境を考慮し、塩水系地下水、幌延地下水や高アルカリ性環境等のデータの拡充を図るとともに、緩衝材基本特性データベースの公開に向け作業を進めた。②人工バリア等の長期複合挙動に関する研究については、これまでの経験則に基づくモデル開発から X 線 CT 等による現象理解や数値実験手法の開発を進め、信頼性を高めるとともに、ナチュラルアナログ研究等も活用して、評価の妥当性の確認を行っている。③人工バリア等の工学技術の検証については、実際の地質環境への適用を視野に入れた工学技術や設計手法の検討を行うとともに、閉鎖技術の検証試験や人工材料の開発を進めている。閉鎖技術については、カナダ AECL との国際共同研究でトンネルシーリング試験を実施中で、本年度完了の予定である。④設計手法の適用性確認については、「第 2 次取りまとめ」の設計手法に基づき、幌延の地質環境における設計検討を進めた。

2) 安全評価手法の高度化に関する研究開発課題

安全評価手法の高度化に関する研究開発課題では、以下の⑤～⑧の項目を進めている。⑤核種移行のデータベース整備では、クオリティを中心に、主に還元環境や幌延地下水等の条件で核種移行データを拡充した。また、公開性、透明性の観点から、核種移行データベースの国内外への公開を進めた。⑥安全評価モデルの高度化では、核種の溶解現象に関する研究として、ラジウム等について共沈や固溶体モデルの開発を進めた。また、亀裂性媒体・多孔質媒体中における基本的なコロイド移行評価モデルの構築、地上からの調査研究段階を対象とした地下水流動評価手法の整備等を進めた。⑦安全評価手法の整備・高度化では、シナリオやモデル不確実性に関する検討、技術情報統合システムの開発を進めた。⑧安全評価手法の適用性確認では、深地層の研究施設計画において段階的に得られる情報等を参考に、地質環境調査および安全評価の研究者間の連携作業を通じて、実際の地質環境条件に基づく物質移行評価手法の構築および天然現象の事例研究成果に基づく、天然現象影響評価手法の具体化等を進めている。

3. 研究開発成果

1) 処分技術の信頼性向上に関する研究開発成果

① 人工バリアの基本特性データベースの整備

金属製オーバーバックの腐食寿命評価に関する研究については、炭素鋼ではマグネタイト共存下での水素発生反応の加速挙動を調査し、マグネタイトによる影響は顕著ではないことを示した（谷口ほか、2004）。また、チタンでは、還元環境における水素脆化に関する基本データの取得（鈴木ほか、2003）、銅では高 pH、酸化性環境での腐食局在化等のデータを取得した（川崎ほか、2004）。さらに、緩衝材の基本特性データベースのもととなるデータ集を作成し、公開した（菊池・棚井、2004）。

② 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究

緩衝材の長期挙動評価の一環として、X 線 CT を用いた緩衝材中のガス移行挙動に関する研究や力学的変形挙動のモデル化研究等を進めた（棚井・松本、2003）。X 線 CT を用いた研究では、緩衝材の流出・侵入挙動に引続き、ガス移行挙動についても適用性を確認した（松本・棚井、2004）。その結果、ガスは緩衝材中を一様に移行するのではなく、選択的な移行経路の形成による挙動であることがわかり、解析との比較によりガス移行モデルの妥当性も示すことができた。緩衝材の力学変形挙動のモデル化では、岩盤－緩衝材のクリープ連成モデルのプロトタイプモデルを構築した。岩盤の力学的変形挙動の研究では、幌延の地質条件でのシミュレーションを行い、変形量は第 2 次取りまとめの標準的な軟岩と同等であること、緩衝材による内圧効果や掘削直後の支保工対策の影響が顕著なこと等が確認された。

金属のナチュラルアナログ研究について、千年程度に及ぶ弱酸性～還元雰囲気と思われる考古学試料の事例データを拡充し、第 2 次取りまとめの腐食評価の保守性を示した。

③ 人工バリア等の工学技術の検証

閉鎖技術に関しては、カナダ AECL とのシーリング性能試験を踏まえて、閉鎖性能の取りまとめを行うとともに、室内試験により海水条件下における埋戻し材性能に関するデータを取得した（菊池ほか、2003）。

人工材料の開発では支保工材料として低アルカリ性セメントの開発を行っている。低アルカリ性セメントは、緩衝材の変質やオーバーバックの腐食に対して顕著な影響を与えない材料として開発を進めており、強度要件を満たす候補材料が室内試験で開発され、現在 pH 低下に関する室内試験およびモデル化を実施している。また、幌延の深地層研究施設に適用するための材料特性の設定を行った。

④ 設計手法の適用性確認

深地層の研究施設における地質環境調査および処分技術の研究者間の連携作業により、人工バリア設計等で用いる地球化学、力学、熱特性の設定を行うとともに、オーバーバック、緩衝材の仕様や坑道離間距離に関する設計検討を進めている（栗原ほか、2004a,b）。

2) 安全評価手法の高度化に関する研究成果

① 核種移行データベースの整備

核種移行データベースの整備では、これまでにサイクル機構で開発してきた熱力学および収着データについてデータベースとして取りまとめ、国内外に公開しているが、ユーザーの指摘等による改良や収着データベースの更新を行った。

また、還元雰囲気における pH、イオン強度をパラメータとした NpO_2 の溶解度積の導出、幌延堆積岩に対する Cs 等の収着挙動、ベントナイトコロイドに対する Np の収着挙動に関する研究を実施した。

② 安全評価モデルの高度化

より現実的な核種溶解現象の解明に関して、 Ra-Ca-CO_3 等の共沈現象の解明を進め、簡易な分配モデル、固溶体モデルによる解釈を行った。コロイド影響評価モデルの開発では、コロイド特性の測定、スイス Nagra との共同研究による原位置試験・モデル解析、室内試験によるモデルの検証等を踏まえ、亀裂性媒体、多孔質媒体の特徴を踏まえた基本的なコロイド移行現象解析モデルを構築した (Kurosawa, et al., 2004)。また、有機物/微生物影響評価モデルの開発においては、天然有機物/微生物と核種の相互作用に関する情報を取りまとめるとともに、微生物に関しては影響評価モデルの概念を構築した。

岩盤中の水理物質移行モデルの開発では、地上からの調査研究段階における地下水流動評価の手法の整備する一環として、確率有限要素法による浸透流解析に基づいた任意点からの地下水移行経路とその到達点および到達範囲の定量化手法を開発した。

③ 安全評価手法の整備・高度化

不確実性評価技術開発においては、シナリオ不確実性について、天然現象の事例研究成果を取り込むことにより影響評価の方法論の開発を進めるとともに、モデル不確実性については、ガラス固化体からの核種溶出が割れによる表面積の増加に比例しないことをモデル解析により確認した。

地層処分技術に関する研究開発を進める中で生じる種々の技術情報のやりとりを支援するために開発した技術情報統合システムに関しては、地質環境の情報を物質移行解析に受け渡す作業などを対象に試運用を開始した。

4. おわりに

東海事業所では、今後とも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分野について、2つの深地層の研究施設計画の成果も踏まえ、エントリー、クオリティ等の施設を活用した基盤的な研究開発に関して、相互の連携を図りながら効率的に進め成果を集約していく。特に、平成17年度には、事業や規制への反映を念頭に第2次取りまとめ以降の成果を取りまとめ、公開する予定である。

参考文献

- 川崎学, 谷口直樹, 川上進 (2004): 大気吹き込み下での模擬地下水中における純銅の腐食速度と腐食局在化, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-041.
- 菊池広人, 棚井憲治, 杉田裕 (2003): 海水系地下水条件下における埋め戻し材特性に関する基礎試験, サイクル機構技術資料, JNC TN8430 2003-008.
- 菊池広人, 棚井憲治 (2004): 緩衝材の基本特性データベース, サイクル機構技術資料, JNC TN8450 2003-010.
- 栗原雄二ほか (2004a): 幌延深地層研究計画における処分技術に係わる原位置試験概念の検討, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2004-002.
- 栗原雄二ほか (2004b): 人工バリア等の設計検討および幌延の地質環境を条件とした原位置試験環境の検討, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2004-006.
- Kurosawa, S., Ibaraki, M., Yui, M., Ueta, S. and Yoshikawa, H. (2004): "Experimental and Numerical Studies on Colloid-Enhanced Radionuclide Transport, - The Effect of Kinetic Radionuclide Sorption onto Colloidal Particles -", Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 824, pp.473-478.
- 松本一浩, 棚井憲治 (2004): 緩衝材の流出/侵入特性, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-035.
- 鈴木浩幸, 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.
- 棚井憲治, 松本一浩 (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, 建石剛, 西村務, 川上進 (2004): 模擬腐食生成物中 Fe(III)/Fe(II) 比による炭素鋼の腐食挙動への影響, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 2003-049.

【個別技術報告】 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 取組みの現状

地層処分技術に関する研究開発報告会
－わが国の地層処分計画を支える技術基盤の継続的な強化－

平成17年3月8日 有楽町朝日ホール

核燃料サイクル開発機構 東海事業所 処分研究部
油井 三和

東海事業所における研究開発課題

研究開発目標

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

研究開発課題

処分技術の信頼性向上

- ①人工バリアの基本特性
データベースの整備
- ②人工バリア等の
長期複合挙動に関する研究
- ③人工バリア等の工学技術の検証
- ④設計手法の適用性確認

安全評価手法の高度化

- ①核種移行データベースの整備
- ②安全評価モデルの高度化
- ③安全評価手法の整備・高度化
- ④安全評価手法の適用性確認

地層処分研究開発の進め方

室内・工学試験による モデル・データベース開発 [エントリー、クオリティ]

- 条件を制御した試験
- 放射性核種のデータ取得

メカニズム
や時間
依存性
の理解



連携



実際の地質環境への 適用性確認 [深地層の研究施設等]

- 地質環境情報 [瑞浪, 幌延等]
- 原位置試験 [幌延, 海外地下研 (国際共同研究)]

地質環境の
不均質場の
理解



ナチュラルアナログ研究／数値実験／国際共同研究

設計・安全評価手法の信頼性向上 (高度化・適用性)

処分技術の信頼性向上と 安全評価手法の高度化のねらい

● 処分技術の信頼性向上

- 経験則からメカニズムに基づくモデル開発, 数値実験手法の開発
- 実験や解析結果の可視化による信頼性向上
- 深地層の研究施設等と整合した工学技術や設計手法の整備
- 処分環境に類似した長期のナチュラルアナログデータの拡充
- 人工バリア等の基本特性データベースの整備

● 安全評価手法の高度化

- 核種移行データベースの開発と更新
- 現象理解に基づく科学的信頼性の向上, 保守性の確認
- 深地層の研究施設等の情報と整合した評価手法の整備
- 不確実性の取扱手法の整備
- 効果的, 効率的な分野間の連携, 情報の集約 (インターネットの活用)

➡ 事業および規制のための技術基盤の強化と継承

処分技術の信頼性向上に関する 平成16年度成果例

①人工バリアの基本特性 データベースの整備

炭素鋼のマグネタイトによる腐食加速挙動

②人工バリア等の 長期複合挙動に関する研究

掘削材の基本特性データベースの構築
X線CTによる掘削材中のガス移行挙動の把握

③人工バリア等の 工学技術の検証

粘土プラグ・掘削影響領域周辺のトレーサ移行解析

④設計手法の適用性確認

視延の地質条件を対象とした力学挙動評価

炭素鋼のマグネタイトによる腐食加速挙動

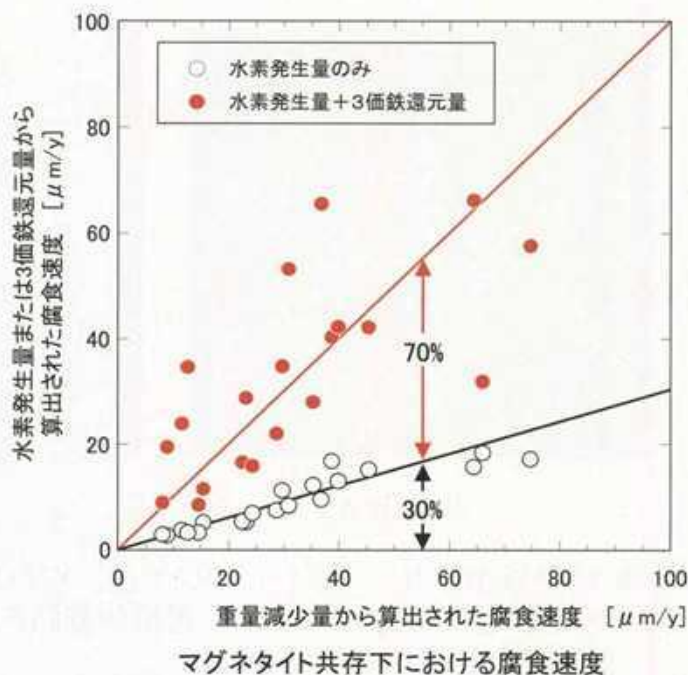
➤ 炭素鋼においては、マグネタイト共存下における腐食加速の発生が懸念されている。専門家間においても意見が分かれている。

● 実験的研究

マグネタイト共存下における浸漬試験を行い、水素発生挙動、マグネタイト中3価鉄／2価鉄比の変化を調査した。

● 結果

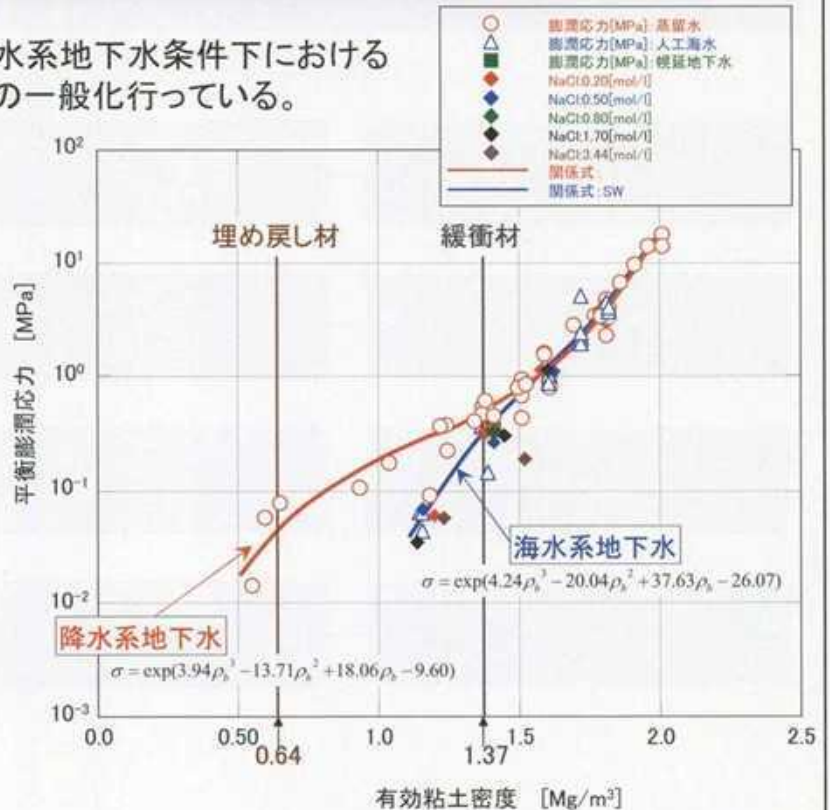
マグネタイト中3価鉄による酸化作用が腐食加速の主要因であり、水素発生反応の寄与は小さい。
⇒ マグネタイトによる腐食加速現象が生じたとしても、3価鉄の消費によりその現象は停止し、長期的な影響は小さいことが確認された。



緩衝材の基本特性データベースの開発

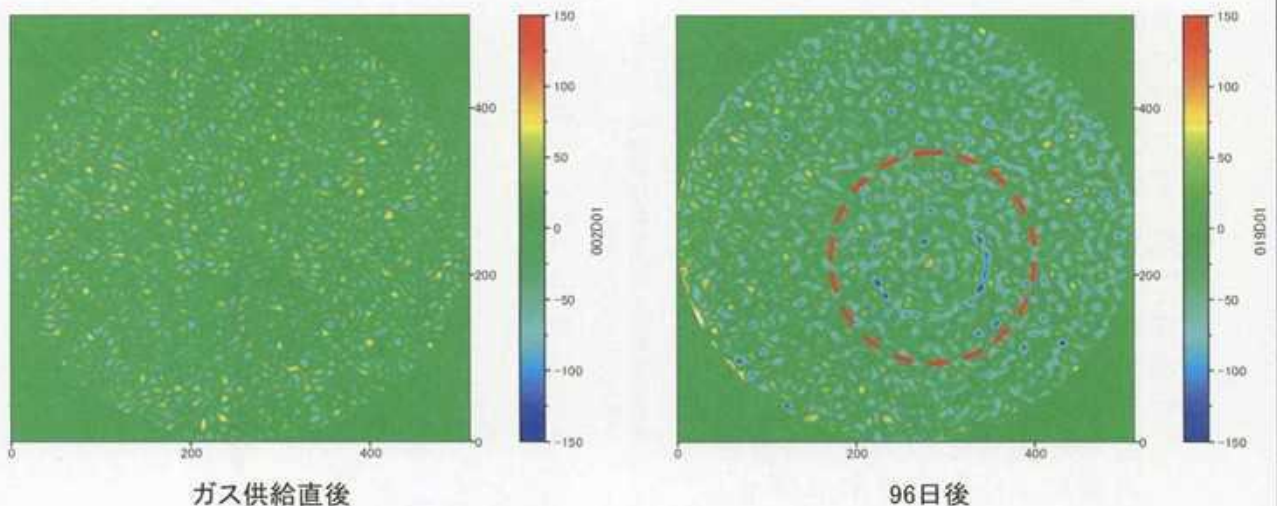
➤ 緩衝材の基本特性として海水系地下水条件下における特性データの取得、関係式の一般化を行っている。

- 第2次取りまとめでの緩衝材仕様においては、地下水条件による膨潤応力に大きな差異は無い。
- ベントナイトを用いる埋め戻し材については、第2次取りまとめ仕様において顕著な差が予測され、仕様の設定において地下水条件を十分に留意する必要がある。
- 基本特性データ集は公開中、データベース公開は準備中である。



X線CTによる緩衝材中のガス移行挙動の把握

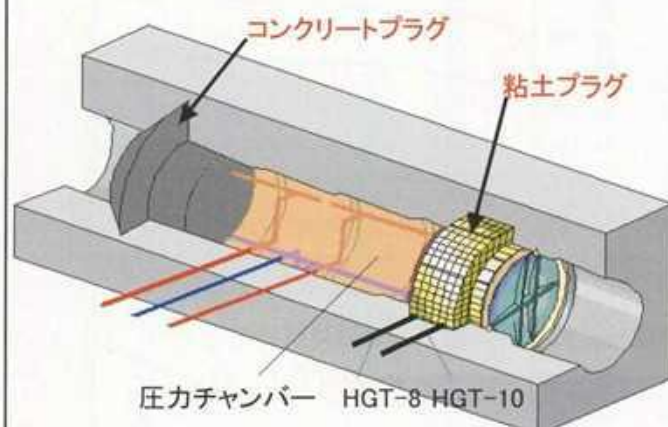
➤ 緩衝材(粘土)中のガス移行挙動については、多くのモデルが提案されているが、直接的にガス移行挙動を観測した例はない。



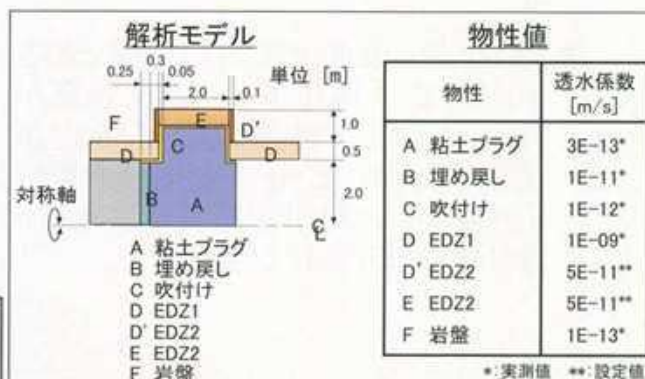
- 緩衝材中のガスの移行については、X線CTを用いた可視化試験により緩衝材中を一樣に移行するのではなく、選択的経路を形成し移行することが確認された。

粘土プラグ・掘削影響領域 (EDZ) 周辺の トレーサ移行解析(TSX試験)

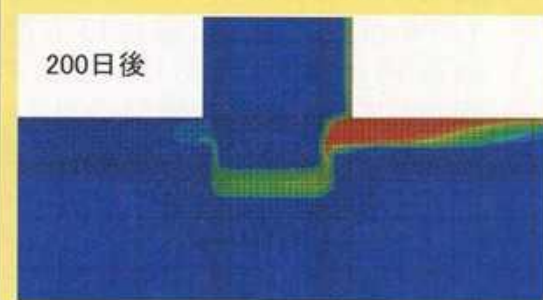
- カナダ・URLで国際共研・トンネル
シーリング試験(TSX)を実施している。



- 粘土プラグのシーリング性能を確認すると
ともに、岩盤性能が良好な場合、EDZが
物質移行経路となり得ることを示した。



トレーサー濃度比分布解析結果の例



幌延の地質条件を対象とした設計評価

- 岩盤の長期力学挙動評価 (1/2) -

- 幌延(深度450m)と代表的な軟岩(第2次取りまとめ)における、
縦置き式ピット周辺岩盤の長期力学(クリープ)挙動を比較した。

- 岩盤クリープ挙動に影響を及ぼす主な力学的地質環境条件

主な力学的 地質環境条件	幌延深度450m	第2次取りまとめ	岩盤クリープ への影響
力学特性 (地山強度比)	2.26	0.91	地山強度比が 大きいほど安定
初期応力比 (鉛直:水平最大:水平最小)	1:1.3:0.9 【偏圧下】	1:1:1 【等方等圧下】	等方等圧に 近いほど安定
内圧効果 (緩衝材の弾性係数[MPa])	18.3 (幌延地下水仕様)	30 (淡水仕様)	緩衝材の弾性係数 が大きいほど安定

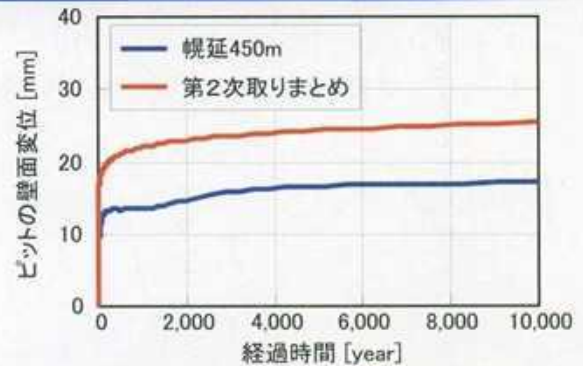
→ 3次元弾塑性解析による掘削時の応力状態をもとに、
2次元クリープ解析を実施。



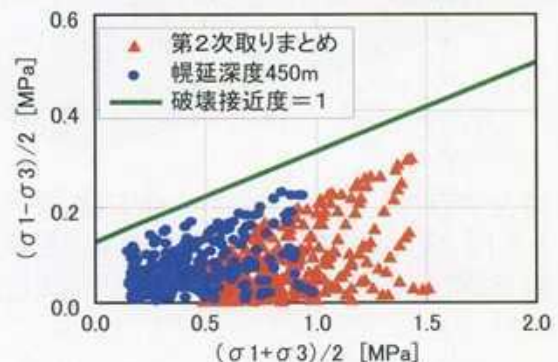
幌延の地質条件を対象とした設計評価

- 岩盤の長期力学挙動評価 (2/2) -

- 幌延450m条件は第2次取りまとめと比較して、「偏圧下」、「内圧効果が小さい」も、「岩盤の力学特性が良好」なため、ピットの壁面最大変位（岩盤クリープ）小さく、長期にわたりより岩盤の安定性が見込める。
- 両条件ともに、緩衝材の応力状態は、1万年間弾性状態（破壊接近度=1の直線より下）にあり、力学的に安定しているため、岩盤のクリープ挙動は、人工バリア長期健全性の観点から許容内にある。



縦置き式ピットにおける壁面最大変位



緩衝材の応力状態 (1万年間)

安全評価手法の高度化に関する

平成16年度成果例

①核種移行
データベースの整備

・熱力学データベースの公開と信頼性向上

②安全評価モデルの高度化

・浸透現象の解明とモデル化
・核種の収束挙動に関する研究
・コロイド、有機物及び微生物の影響評価に関する研究
・岩盤中水理・物質移行モデルの高度化

③安全評価手法の
整備・高度化

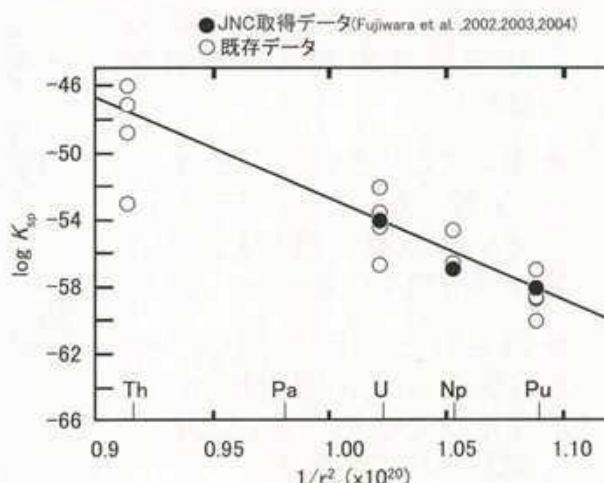
・ガラス凝集に関する不確実性評価
・地層処分技術の技術情報統合システムの利用

④安全評価手法の
適用性確認

➤ 最新の知見に基づく熱力学データベースの更新・公開と恒常的信頼性向上

- 熱力学データベース(JNC-TDB)の公開(2003年8月より)
国内外の利用登録者250名突破, ユーザー指摘による改良を実施した。
- 熱力学データの信頼性確認
(アクチニド4価の溶解度積の取得)

アクチニド水和酸化物の平衡定数, 溶解度積(K_{sp})の値は, 溶解度の大小を論ずる上で重要な値である。アクチニド4価(ネプツニウム, ウラン, プルトニウム)の結晶イオン半径と溶解度積の関係について, 直線的な傾向が確認された。このような傾向性は, 試験の困難な熱力学データを求める際に重要である。



結晶イオン半径と溶解度積の関係

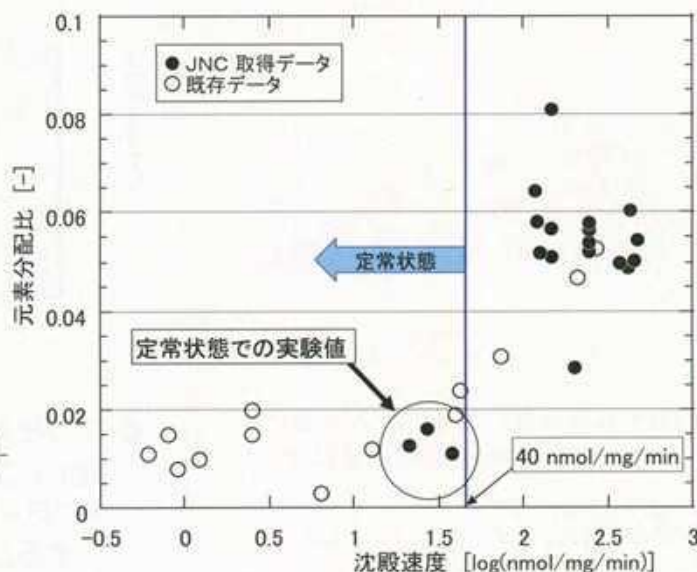
共沈現象の解明とモデル化

-Ra(Ba)-Ca-CO₃系共沈挙動-

➤ 現実的な核種の溶解度は, 熱力学的に安定で複雑な固溶体等により支配されると想定されるが, 熱力学モデルや基本定数が整備されていない。

- 元素分配比の方解石沈殿速度依存性を取得
→ ラジウムの溶解度は簡易モデル(第2次取りまとめ)の50~100倍と推定される。
- 反応機構を固溶体反応と仮定し, モデル化を踏まえて基本定数を整備した。

$$\text{元素分配比} = \frac{(\text{固相中Ba/Ca mol比})}{(\text{溶液中Ba/Ca mol比})}$$



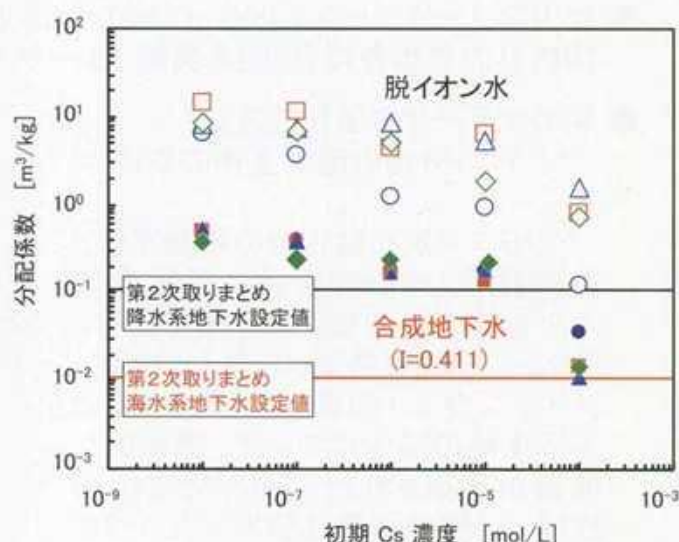
方解石沈殿速度と元素分配(Ba/Ca)比

核種の収着挙動に関する研究

- 幌延堆積岩を対象としたCsのバッチ収着試験とモデル化 -

➤ 堆積岩や海水系地下水における核種の分配係数データの充実と収着現象の理解が求められている。

- 幌延地域の堆積岩(声問層・稚内層)に対するセシウムの分配係数の濃度依存性を取得した。
- 第2次とりまとめにおける“泥質・凝灰質岩”に対する分配係数設定値を上回る。
→ 保守性を確認
- 得られた分配係数は、イライトを支配固相としたイオン交換モデルにより解釈が可能である。



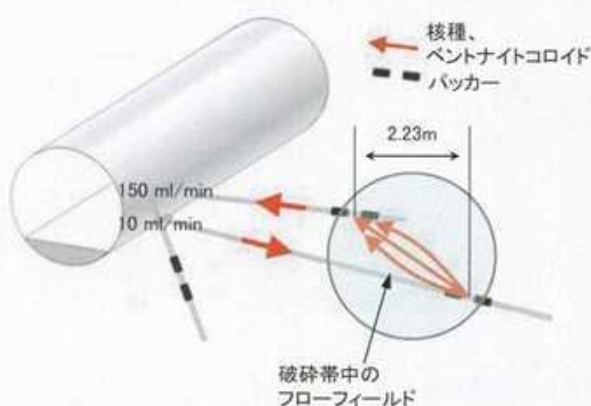
幌延堆積岩に対するCs収着挙動

- 108.45~108.80m 声問層 イライト 16%
- 266.60~267.00m 声問層 イライト 13%
- △ 404.65~405.00m 稚内層 イライト 12%
- ◇ 504.70~505.00m 稚内層 イライト 20%

天然バリア中の核種移行に及ぼすコロイドの影響に関する解析

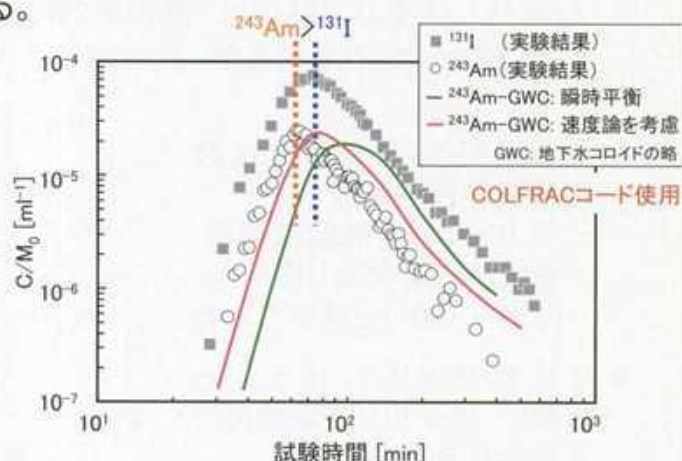
- 核種移行に及ぼすコロイドの影響評価 (1/2) -

➤ 亀裂性媒体及び多孔質媒体におけるコロイド影響に関する理解や基本モデルの構築が求められている。



グリムゼル原位置試験場(スイス)におけるコロイドおよび核種移行実験の概略図

(1998年~2004年まで、国際共同研究プロジェクトとしてJNCも参加)



原位置実験の解析結果(Am)

- アクチニドは非収着性のヨウ素より移行が速い(これまでに知見とは異なる！)
→ コロイドへの核種収着に速度論を導入することで解釈が可能

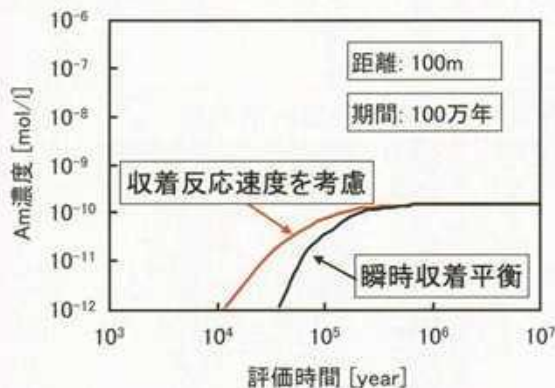
長期的評価(性能評価)へ応用

グリムゼル原位置試験条件

地下水流速: 40 m/d

コロイド濃度: 0.1 ppm

評価距離、評価期間のみを変更して解析



各条件におけるAmの移行解析(COLFRACコード使用)

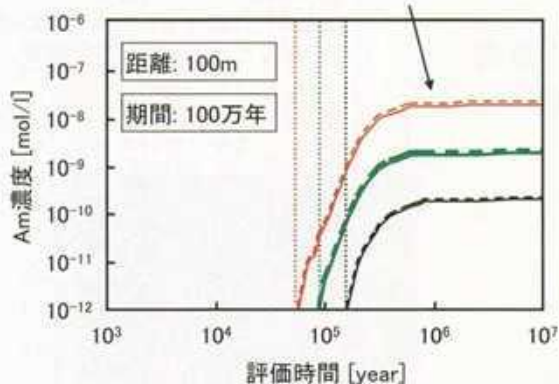
性能評価条件

地下水流速: 0.14 m/d (50m/y)

コロイド濃度: --- 0.1 ppm
--- 1 ppm
--- 10 ppm

実線: 瞬时収着平衡

破線: 収着反応速度を考慮



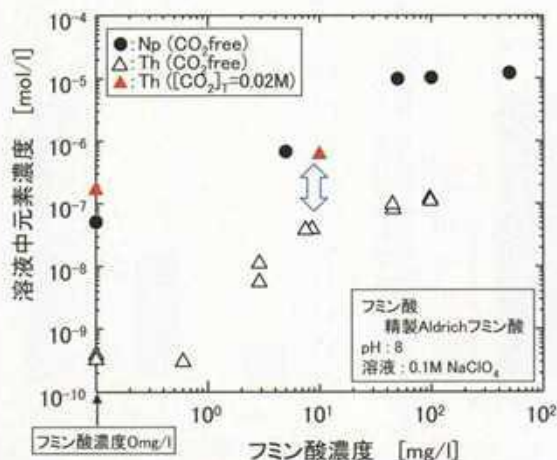
- 性能評価では、核種-コロイドの収着反応速度を考慮する必要性は低い。
- 短期の原位置試験結果のみでは、直接安全評価は行えない。
- コロイド影響が顕著となる条件として①地下水流速、②コロイド濃度が示された。

天然バリア中の核種移行に及ぼす

有機物及び微生物の影響に関する評価

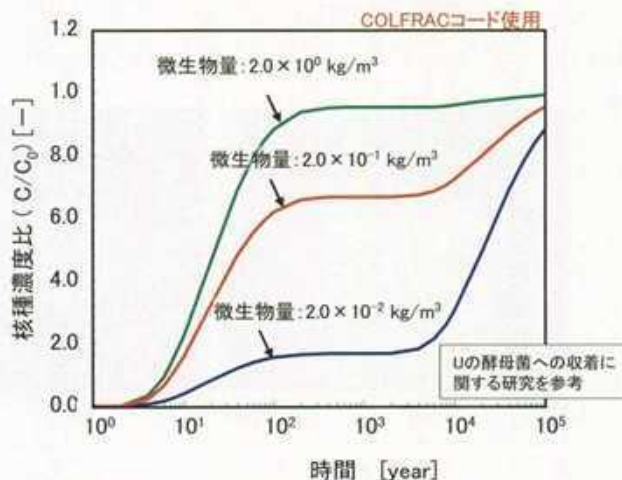
➢ 有機物及び微生物の影響に関する理解や概念モデルの構築が求められている。

- アクチニドの溶解度に及ぼす天然有機物の影響評価(Np, Th)



- アクチニド4価: 数mg/lのフミン酸の存在で、有意に溶解度が増加した。
- 溶液中の炭酸濃度が約0.02mol/lより高い場合はフミン酸の影響は有意でない。

- 微生物の挙動をコロイド相当とした影響評価の検討(U移行挙動)

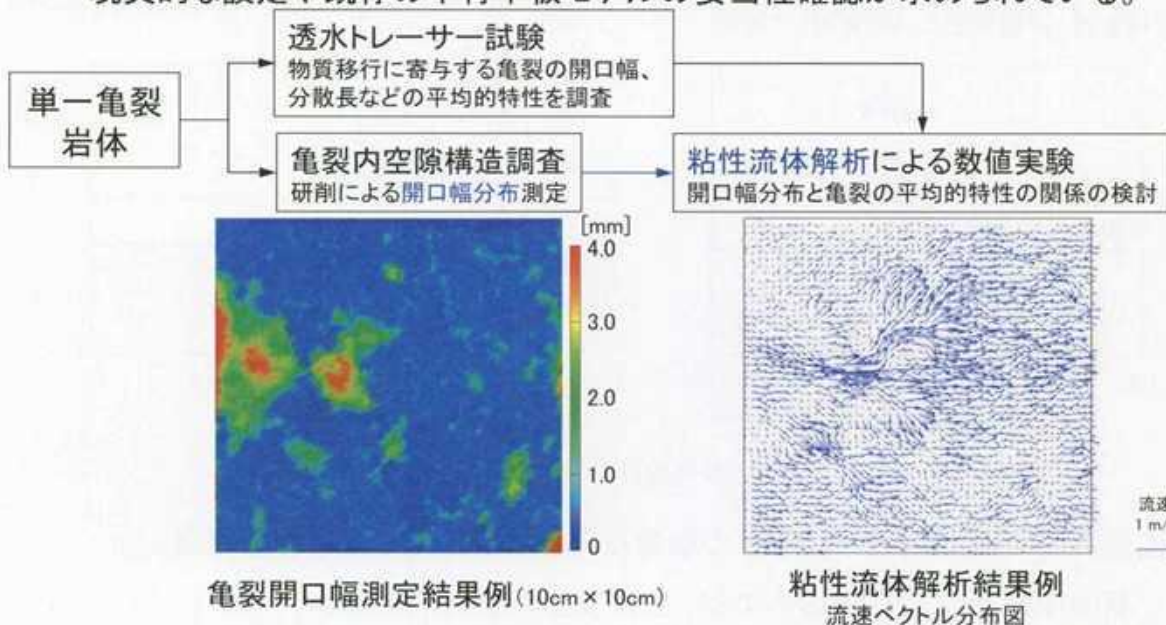


- 微生物のバイオフィルム、バイオコロイドの存在割合が重要である。

岩盤中水理・物質移行モデルの高度化

-亀裂モデルの信頼性向上に向けたアプローチ-

- 天然の単一亀裂中の水理・物質移行に影響を及ぼす開口幅などのパラメータの現実的な設定や既存の平行平板モデルの妥当性確認が求められている。



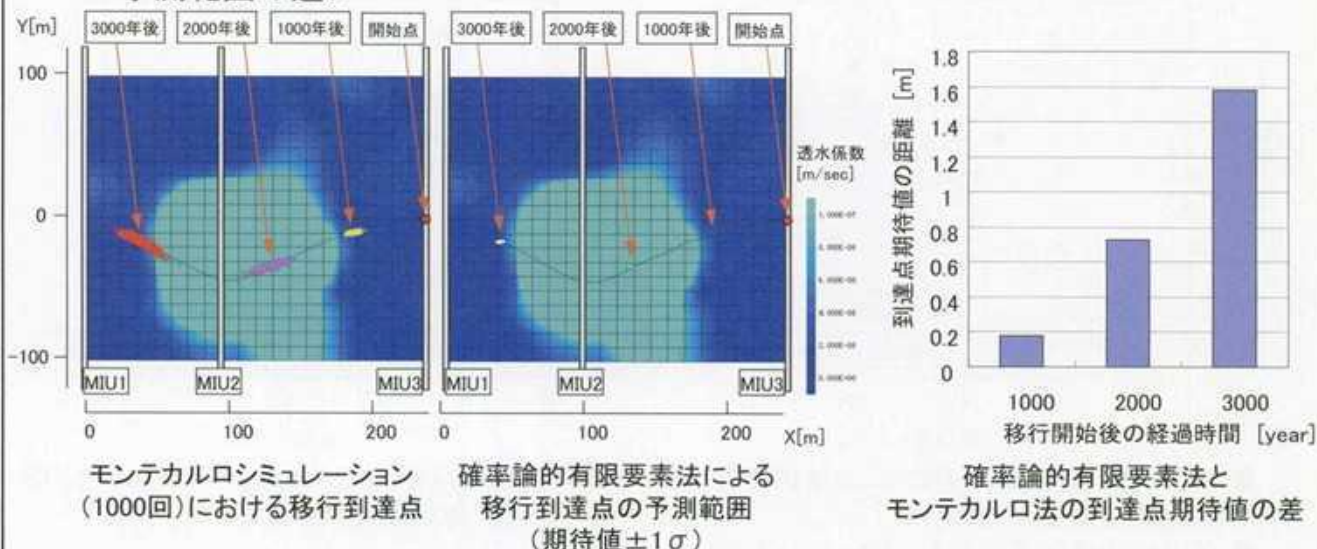
- 既存モデルの妥当性やより信頼性の高いパラメータ値設定方法の提示が可能。

岩盤中水理・物質移行モデルの高度化

-不均質場における移行経路の不確実性評価手法の開発-

- 広域スケールにおける調査データが限られた条件下での地下水流動に関する不確実性の定量化や手法の検証が進められている。

- モンテカルロ法による移行到達点と確率論的有限要素法による移行到達点の予測範囲の違い



- 目的に応じた手法の多様化と信頼性確認

ガラス溶解に関する不確実性評価

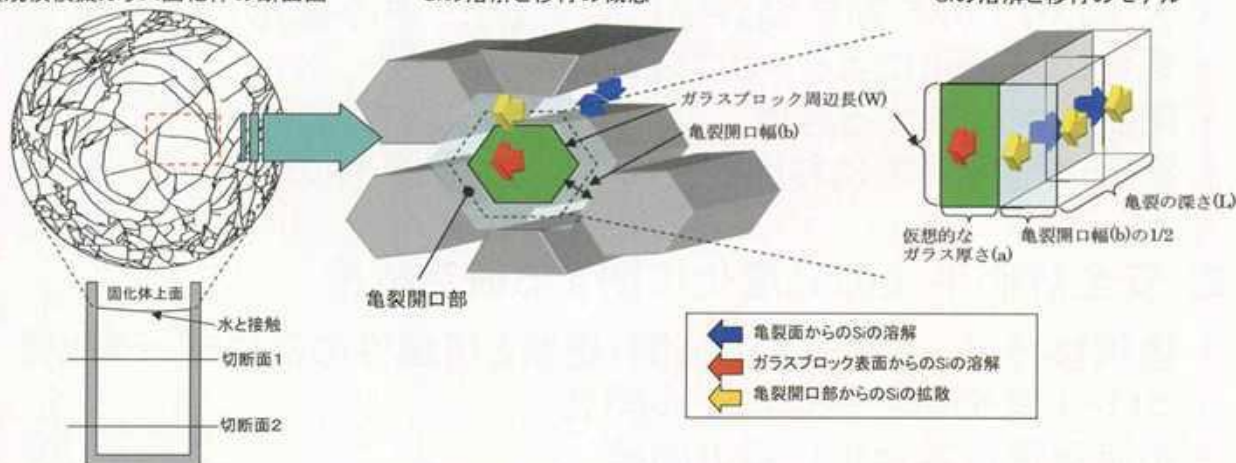
-ガラス割れによる表面積増加の影響-

➤ 不確実性評価の一環として、ガラス溶解に関する割れの不確実性評価を実施

実規模模擬ガラス固化体の断面図

Siの溶解と移行の概念

Siの溶解と移行のモデル



- 実規模模擬ガラス固化体を用いた浸出試験の条件に本モデルを適用：割れによる100倍以上の表面積増加に対して、シリカの溶解量の増加は2倍程度。表面積、亀裂開口幅などの感度は小さい。
- ガラス固化体の溶解量は亀裂による表面積の増加に比例しない。

地層処分技術の

技術情報統合システム (JGIS) の利用



- H17取りまとめにおいて、多種・多様な技術情報のやりとりを必要とする、地質環境の調査から核種移行解析への展開など、連続性や整合性が重要となる作業が発生する。JGISの概念および機能が有効になると考えている。

1. 処分技術の信頼性向上に関する研究成果

- ・ 人工バリアの長期挙動評価に関するデータの拡充
- ・ 現象の可視化によるメカニズム理解
- ・ 閉鎖性能に関する評価
- ・ 実際の地質環境における人工バリア設計条件の設定

2. 安全評価手法の高度化に関する研究成果

- ・ 核種移行データベースの公開・更新と信頼性の高いデータ取得
- ・ コロイド等の影響評価モデル開発
- ・ 不確実性の定量化技術の開発
- ・ 分野間の連携を効率的に行う技術情報統合システムの整備

【特別講演】

High-level radioactive waste management:
R&D challenges for the 21st century

（高レベル放射性廃棄物対策：21世紀における研究開発の挑戦）

【講演者紹介】

Dr. Ian G. McKinley

スイス放射性廃棄物管理協同組合（Nagra）上席相談役（Executive Consultant）

＜経歴概要＞

グラスゴー大学化学科卒業後、1979 年、同大学にて博士号取得（化学）。英国地質科学研究所（現英国地質調査所）放射化学者を経て、1987 年までスイス連邦原子炉研究所に研究員として勤務。この間、再処理施設や処分場からの放射性物質の移行に関する研究、「1985 年保証プロジェクト（スイスにおける安全な処分施設の実現に関する基本的な概念の分析）」報告書の安全評価等に従事。1987 年よりスイス放射性廃棄物管理協同組合（Nagra）に勤務。同組合において、1997 年まで研究開発コーディネータ、2004 年まで国際支援・協力本部長を務め、2005 年に上席相談役に就任した。「クリスタリン・I プロジェクト（スイス北部の結晶質岩を対象とした地層処分の実現可能性に関する調査研究計画）」の総括、報告書の作成管理、グリムゼル岩盤研究所における国際共同研究プログラムの総括を担当するほか、国際原子力機関（IAEA）をはじめとする国際機関の委員会等で活躍。これまでに 3 冊の著書（共著含む）があるほか、まとめた論文は 150 編を超える。

わが国では、「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書」（H3 レポート）の取りまとめ作業に直接係わるとともに、「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—」（H12 レポート）、「TRU 廃棄物処分概念とりまとめ」の国際的なレビューの中心的な役割を果たす。現在、原子力発電環境整備機構・技術アドバイザー国際委員会科学事務局を務める。

High-level radioactive waste management: R&D challenges for the 21st century

Ian G. Mc Kinley

Nagra, Wettingen, Switzerland

Background

During the latter half of the 20th century, major progress was evident in the development of deep geological disposal concepts for high-level radioactive waste (HLW). There is now a broad consensus that safe disposal is possible in a wide range of different geological settings, with the required isolation being assured by various combinations of natural and engineered barriers. Despite large investments in supporting R&D, however, progress towards implementation of repositories has been generally much slower than originally planned in national programmes (with the notable exception of Finland). The factor contributing most to such delays has been the growth of public opposition to these (and, indeed, most other major industrial) projects.

In Japan, the technical foundations for geological disposal of HLW were documented by the H3 (PNC, 1992) and H12 (JNC, 2000) projects. The associated generic safety assessments illustrated the fundamental feasibility of siting a repository in the Japanese archipelago, with a particular emphasis on post-closure safety. Based on this assurance, when NUMO was established as the HLW disposal implementing organisation, they were able to adopt a novel "volunteering" approach to siting, which acknowledged the great importance of acceptance – particularly by local communities.

In its few years of existence, NUMO has made remarkable progress in establishing itself as a key player in the international radwaste business. Unfortunately, they have yet to find volunteers. Nevertheless, NUMO's documented approaches to characterising (and comparing) sites (NUMO, 2004a) and developing appropriate repository concepts (NUMO, 2004b) allow some of the main R&D challenges for the next 3 to 5 decades (or even longer) to be identified.

A missing part of the entire Japanese waste management jigsaw, however, is the "HLW Regulator". International experience has indicated that progress is facilitated by a strong regulatory organisation which is seen to be independent and technically competent and is capable of producing clear regulations (and associated compliance guidelines) which embody a commitment to facilitating implementation of suitable repository projects. The regulator will have additional R&D requirements focused on its own particular role but, like NUMO, may also want to establish higher profile "flagship" projects as part of establishing credibility - a very challenging task for a new organisation in this complex, multi-disciplinary field.

Site characterisation

NUMO has defined a stepwise site selection procedure following the Final Disposal Act, which commences with literature studies of volunteers to identify suitable Preliminary Investigation Areas (PIAs). A number of PIAs are investigated in parallel, using surface-based techniques including deep boreholes. Thereafter, one or more Detailed Investigation Areas (DIAs) are selected for more intensive characterisation – including

studies from an underground research facility. This leads to selection (or confirmation) of the site for repository implementation, although site characterisation activities would continue throughout the entire construction and operation phases.

The data collection, synthesis and interpretation procedure has to be tailored to the particular volunteer sites, which could be very different in terms of geology, geography and accessibility. NUMO is committed to carrying out such work in an open and transparent manner. This should result in all decisions with respect to siting being fully traceable, based on quality-assured information.

Special challenges resulting from the chosen procedure include the requirement to study several sites in parallel and the expected need to show that level of investigation is "equivalent" for all sites. If only one or two suitable volunteers come forward and they are reasonably similar, this may not be a serious problem. For a larger number (3 or more), this could become extremely difficult – particularly if they differ considerably in terms of geological & tectonic setting, host rock, etc. This potential problem has already been identified by NUMO and efforts are underway to develop a formalised approach to defining the flow of information from the raw field data to the interpreted characteristics required for repository design and safety assessment (SA). The extent to which this can be done on a generic basis is, however, limited – especially because of the inherent flexibility in design (see below) which means that there needs to be iterative development of the site characterisation plan, the reference design and the associated SA. Given that all NUMO's work will be carried out on "real sites", under close public inspection, the importance of a well-integrated – and safe – characterisation programme cannot be overemphasised.

These basic difficulties are made worse by the very tight schedule set for the characterisation work. It should be emphasised that the time between formation of NUMO and selection of DIAs is just over a decade on the basis of current planning. In Finland the equivalent time period was over twice as long and this period will be probably four to five decades (or even longer) in Sweden, Switzerland, the UK, etc. This short time allows for very little opportunity to "learn as you go". The equipment and methodologies used thus need to be reasonably well established in advance and, equally importantly, the project teams involved must be experienced in their application. It is noticeable that the experienced teams in other national programmes gained their background during decades of continuous field work. Even though often characterised by extensive "teething problems" during early stages of work, the continuity of key staff allowed the programmes to evolve with improvements of efficiency and technical sophistication. The experience gained in the JNC field programmes at the Mizunami and Horonobe sites can certainly contribute greatly here, especially if they can be scheduled to provide tools, experience and manpower as and when required for the PIA and DIA investigations.

It is presently unclear what role the regulator will play in the site characterisation process. This varies considerably in other national programmes – in some cases being very active (e.g. reviewing field investigation programmes and resulting raw data) and in others much more passive (e.g. reviewing only final top-level "geosynthesis" documentation). In either case, regulatory staff will also need the experience to assess the large quantities of complex data which result from site characterisation activities and be able to evaluate resulting decisions – particularly associated with the selection of PIAs, DIAs and, finally, the repository site. To aid both NUMO and the regulator, it is advantageous if a rigorous QA programme is implemented prior to initiation of data

gathering (ideally with the explicit authorisation of both organisations). This will, of course, become even more critical at formal licensing stages.

Repository concept development

NUMO has a rather wide definition of the term "repository concept", which includes not only the design of all surface and underground repository structures (tailored to a given siting environment) along with a description of how they would be constructed, operated and closed, but also an evaluation of operational and long-term safety and an assessment of socio-economic impacts. This is very much in line with recent international trends, which put increasing emphasis on site-specific tailoring of the rather simple concepts used originally for feasibility demonstration to improve operational practicality, robustness and safety. Much of such development has been driven by large-scale demonstration projects in underground test facilities, which have clearly illustrated the difference between a design that is *possible* to implement and one that is truly *practical* under the boundary conditions in a working repository.

When viewed from such a perspective, there are clearly a number of aspects of the H12 designs that need to be revised or, at least, analysed in further detail. These are mainly associated with the emplacement of the bentonite-based buffer, which plays many important roles in the associated safety case, e.g.:

- Colloid filter
- Hydraulic barrier
- Radionuclide sorption
- Plastic mechanical buffer
- Chemical buffer (esp. pH)

To guarantee that these roles are assured for relevant time periods, the buffer needs to be emplaced in a strictly quality assured manner and its mineralogical / structural stability must not be degraded by other engineered barrier materials under the expected hydrogeological and thermal conditions. Although a number of buffer emplacement methods were illustrated in H12, none have been demonstrated to meet defined quality levels (e.g. density, homogeneity) when implemented with appropriate tele-operated procedures. This could be particularly challenging in Japan, where potential host rocks are likely to be rather wet. Handling of highly compacted bentonite is known to be difficult under even high humidity conditions and its entire practicality / QA becomes questionable if significant liquid water is present. Nevertheless, there are certainly ways to engineer around this problem, such as the use of pre-fabricated EBS modules – a concept which was mentioned in H12 based on desk studies but, in the interim, is being increasingly studied based on experience gained in full-scale tests (e.g. SKB's move from KBS-3(V) to the KBS-3H concept).

One other way of reducing the problems associated with water inflow involves the use of high quality tunnel (or borehole) liners. Indeed, the use of some form of liner may be required for mechanical stability / operational safety – as increasingly recognised internationally, even in programmes focusing on strong, hard rock. Unfortunately, designs of such liners tend to focus on use of concrete, which raises questions with regard to long-term degradation of bentonite. In fact, similar concerns arise from all uses of cementitious materials in repositories – including floors, plugs, seals, grouts, etc. As

noted elsewhere (NUMO/Posiva, 2004), there are several possible approaches to solving (or avoiding) this problem:

- Remove the source of hyperalkaline fluids by
 - avoiding use of cement-based materials in sensitive areas
 - removal of any such materials before closure
 - adoption of "low pH" cements with suitable engineering properties
- Replace bentonite with a buffer material less sensitive to alteration by hyperalkaline fluids
- Add a barrier to prevent (or minimise) bentonite – cement interaction
- Develop models & databases to allow rigorous (and robust) quantification of the consequences of any bentonite alterations involved.

When considering this particular problem, a further characteristic of NUMO's range of design options needs to be taken into account – the emphasis on flexibility to fit designs to smaller footprints, resulting in higher emplacement densities and hence higher thermal loadings. Such increased thermal loading could significantly increase both the maximum temperatures within the EBS and the duration of the thermal transient, which could have a large impact on kinetically-controlled chemical interactions.

Moving forward towards practical designs appropriate to Japanese repository conditions will inevitably require testing concepts underground at large (or full) scale. Modifications needed to ensure operational safety, practicality and quality assurance will have to be assessed in terms of their impact on long-term performance, probably via long-duration experiments (in conventional laboratories and underground, complemented by analogues if appropriate). Especially as there exists no obvious technology at present for non-invasive monitoring of the EBS, "post-mortem" analysis of large-scale, in-situ tests may provide a key component of the post-closure safety case.

In order to develop optimised designs for specific sites, it is important not only to have an integrated database of the required information from site characterisation and supporting R&D, but also a formal mechanism for supporting and documenting decisions. At the present, several implementing organisations (including NUMO) are investigating variants of "Requirements Management" for this purpose. Ideally, this tool can be integrated with the development of the information database ("Knowledge Management") and assurance that required quality levels are maintained ("Quality Management"). Both the information and quality databases should be completely objective and thus form a valuable resource for both the implementer and regulator if compiled and managed by an independent third party (e.g. JNC).

Safety Assessment

Although this is defined as part of NUMO's repository concept, for the purposes of identifying R&D requirements it is worth considering SA as a separate topic, even though it clearly develops together with repository designs in an iterative manner. As noted above, a key development in this area from the basis provided by H12 is the need to include rigorous assessment of operational safety. As has clearly been seen by accidents in other countries (Gorleben, Germany; Bure, France), even during the first stages of site characterisation / repository construction, safety is a critical factor. Even the type of conventional (i.e. non-radiological) accidents common in the engineering and mining industries can cause major disruptions of repository programmes. Internationally, the safety of waste handling and emplacement has recently received increasing interest.

Because issues arise not only from risks during normal operations but also from disturbances from external perturbations, this is of particular relevance to Japan (e.g. consequences of earthquakes, recent great concern about risks from tsunamis). Extensive R&D will be needed to develop the tools and experience for the implementer to produce an operational Safety Case and for the regulator to adequately review it.

The post-closure SA in H12 was sufficient to demonstrate concept feasibility, but clearly limited in its ability to compare different design options or specific sites. In order to form the basis for evaluating different PIAs or DIAs and, later, supporting repository licensing, significant developments will be needed in basic safety assessment model chain (and supporting databases and "research models"), the development and analysis of scenarios and the management of uncertainties.

In terms of the main SA model chains, some areas where further R&D could be valuable include:

- EBS
 - Explicit representation of all engineered materials present (incl. liners, drains, plugs, seals, etc.)
 - Realistic representation of emplacement geometry (including consideration of interactions between individual waste packages)
 - Representation of variation in barrier properties with time (with explicit consideration of interfaces between different materials)
 - Inclusion of EDZ (with properties as function of time, if appropriate)
 - Robust representation of the RN release source-term
- Geosphere
 - Realistic representation of the near-field / geosphere interface
 - Consistent and reasonable representation of advective groundwater flow paths on all relevant spatial scales (macro – for assessing fluxes – to micro – for assign RN retardation)
 - Robust representation of RN retardation processes (sorption, matrix diffusion etc.)
 - Explicit consideration of the "usual problems" (colloids, organics, microbes)
- Biosphere
 - Site-specific representation of the geosphere / biosphere interface (as a function of time, if appropriate – e.g. in a coastal setting)
 - Development of Japanese-specific food-chain and dose conversion factor models (representing appropriate lifestyle conditions)

It should be borne in mind that the assumed geological barrier conditions in H12 tended to be rather favourable and volunteer sites may require a more realistic treatment (including mobilising "reserve FEPs") in order to support a robust safety case. The resulting model chain should be able to represent all important "groundwater" scenarios, considering gradual evolution of barrier properties. Further models will be needed to quantify perturbation or "what if?" scenarios.

A major part of post closure SA involves evaluation of the uncertainties; which are inevitable in the evaluation of behaviour over very long timescales. For such evaluation, deterministic calculations coupled to sensitivity analysis and probabilistic calculations may provide complementary information. In both cases, however, verification and validation of codes & associated databases is a continual challenge.

Finally, it should be emphasised that, as the programme advances, the level of the argumentation which the regulator is likely to require as support of the safety case is likely to increase (e.g. ITC, 2005). This will require much more subtle treatment of key processes. A good example here would be the very complex and strongly coupled geochemistry of the near field which is, at present, represented by simplistic material or element specific parameters (corrosion rates, solubilities, Kds, etc.) At present, resultant databases are neither complete, consistent nor validated (in all national programmes) but significant improvement would be possible if R&D resources could be focused on this problem (a possible future role for ENTRY / QUALITY).

Gaining acceptance of key stakeholders

The work outlined above is very much focused on meeting the requirement of ensuring development of a safe and well-structured repository programme. There are, however, further practical constraints on reaching key programme goals that are associated with gaining the acceptance of key groups, including:

- Local communities (municipality, prefecture)
- Local and national politicians
- Regulators
- National academic and professional expert groups
- International "radioactive waste community"

In order to gain such acceptance, it may be necessary to evaluate (or even implement) design variants that are not otherwise technically justified – e.g. extensive monitoring and institutional control, eased retrieval. Even though safety should not be compromised, there may be considerable benefit to be gained by working together with concerned groups to develop concepts that focus on the areas of most concern.

For the regulators and other expert groups, the technical arguments that support the formal SA to build the safety case may be of considerable importance (e.g. ITC, 2005). NUMO, together with key R&D groups, thus need to develop a "Safety Strategy" which establishes their national and international credibility and ensures that all required resources of infrastructure and trained manpower is available when required.

References

- ITC (2005): Record of executive training course on the Safety Case, in preparation.
- JNC (2000): "H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan", JNC TN1410 2000-001 - 004.
- NUMO (2004a): "Evaluating Site Suitability for a HLW repository", NUMO-TR-04-04.
- NUMO (2004b): "Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environment", NUMO-TR-04-03.
- NUMO & Posiva (2004): Proceedings of the bentonite-cement workshop, NUMO-TR-04-05.
- PNC (1992): "Research and Development on Geological Disposal of High-level Radioactive Waste (H3)", PNC TN1410 93-059.

High-level radioactive waste management: R&D Challenges for the 21st Century

Ian G. Mc Kinley

Entsorgungsnachweis-Japan-July03-McK

Background: State-of-the-art at the **start of the 21st Century**

International:

- **Consensus: Geological disposal of HLW is the only practical option (“alternatives” unrealistic / unacceptable)**
- **Progress in national programmes considerably delayed by lack of acceptance / political commitment**

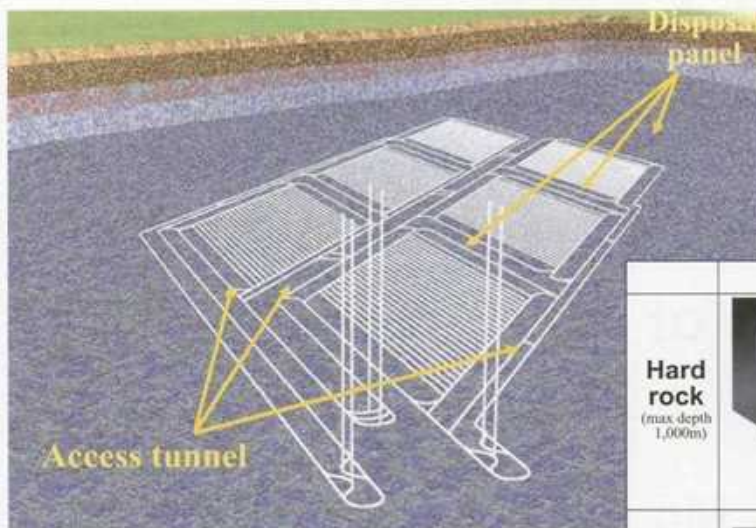
Japan:

- **Basic feasibility documented (H3 / H12)**
- **NUMO established and siting initiated using volunteering approach**
- **Law defines basic responsibilities, but regulations and guidelines still missing**

Entsorgungsnachweis-Japan-July03-McK

2

H12 Concept: idealised / site-generic



Repository layout

Emplacement of waste package

	Pit disposal	Tunnel disposal
Hard rock (max depth 1,000m)	This diagram shows a cross-section of a pit disposal system in hard rock. A red waste package is being lowered into a pit. The rock is dark grey and the pit is lined with a red material. Dimensions like 4.5m, 3.5m, and 3.0m are indicated.	This diagram shows a cross-section of a tunnel disposal system in hard rock. A red waste package is being lowered into a tunnel. The rock is dark grey and the tunnel is lined with a red material. Dimensions like 4.5m, 3.5m, and 3.0m are indicated.
Soft rock (max depth 500m)	This diagram shows a cross-section of a pit disposal system in soft rock. A red waste package is being lowered into a pit. The rock is dark grey and the pit is lined with a red material. Dimensions like 4.5m, 3.5m, and 3.0m are indicated.	This diagram shows a cross-section of a tunnel disposal system in soft rock. A red waste package is being lowered into a tunnel. The rock is dark grey and the tunnel is lined with a red material. Dimensions like 4.5m, 3.5m, and 3.0m are indicated.

The Challenge: Goals for the end of the 21st Century

International:

- Many successful ongoing or completed repository projects worldwide
 - Nuclear waste management “established” safe technology; little public concern
 - Increasingly seen as attractive local industry (high benefits to community, low environmental impact)
- ➔ Competition between communities / countries to host regional facilities

The Challenge: Goals for the **end of the 21st Century**

Japan:

- NUMO repository #1 closed and under institutional control
 - NUMO repository #2 fully operational (50% full)
 - DIA site characterisation ongoing for repository #3
 - HLW repositories integrated within national (or regional / international) management plan for all radioactive wastes
- ➔ Within a mature industry, R&D continues to optimise the repository system in the light of developments in science & technology and to maintain the large, experienced workforce required

The Challenge: Japanese goals for **mid 21st Century**

Optimisation

- NUMO repository #1 fully operational (25% full); maybe re-licensing ongoing
 - PIA site characterisation(s) ongoing for repository #2
 - HLW repositories becoming integrated within national management plan for all radioactive wastes
- ➔ R&D is strongly focused to serve the needs of the implementer (using first experience to improve designs and procedures and to develop a stronger safety case), the regulator (monitoring and inspecting operations, review of the safety case) and the local public (clear information on key scientific and technical issues)

The Challenge: Japanese goals for 2025

Synthesis

- NUMO repository #1 site selected; licensing process started; DIA characterisation ongoing
 - Decision on second DIA site; continue characterisation for repository #2 or abandon?
 - 2 decades of experience at Mizunami & Horonobe; decision to continue generic work or focus on site-specific facilities?
- ➔ R&D serves the needs of the implementer (site-specific concept analysis to support selection, documentation for licensing), the regulator (review of the license application) and the local public (independent information on concerns)

The Challenge: Japanese goals for 2015

Integration

- NUMO repository #1 DIAs selected on the basis of parallel characterisation of a number of PIAs
 - Safety assessment of site specific RCs key input for selection process
 - Experience from Mizunami & Horonobe provides input for planning of site-specific URLs
- ➔ Safety case arguments developed by the implementer and reviewed by the regulator focus on integration of information from the field, URLs, specialist labs, natural analogues and fundamental, mechanistic models

Site selection and characterisation

Special challenges set by:

- **Volunteering process**; potentially
 - Several PIAs
 - Diverse host rocks and geological settings
 - Parallel characterisation
- **Very short timescale**
 - Selection of PIAs within a couple of years
 - Selection of DIA(s) within 5 years
- Requirements for **openness & transparency**

Repository design and engineering

Special challenges set by:

- **Volunteering process**
 - RC needs to be tailored to sites
 - Potentially, range of options in each site
- Emphasis on **practicality**
 - Must be feasible using existing technology
 - Safety and QA essential
- Requirements for **openness & transparency**
- Requirements for **acceptance** (e.g. retrievability)

Performance assessment: **codes**

Operational safety:

- Quantitative evaluation of conventional and radiological hazards
- Feedback to repository design

Post-Closure safety:

- Much greater realism (comparison of sites and concepts)
- Direct representation of time-evolution of engineered and natural barriers
- Relevant model biospheres (Japan-specific)

PA: **Data / system understanding(1)**

Operational safety

- Integration of information from underground construction and nuclear industry
- Special emphasis on detailed description of perturbation scenarios

PA: Data / system understanding(2)

Post-closure safety

- Integration of near-field analysis
 - Improved understanding of RN release & transport processes
 - Validation database for complex multi-component systems (e.g. glass-steel-bentonite)
- Site-specific far-field analysis
 - Rigorous “geosynthesis” (QA!) to derive site characteristics
 - Consistent representation of flow-paths on macro and micro scales
 - Explicit definition of time-evolution scenarios (including geosphere-biosphere interface)

R&D challenges – examples (1)

- Improved understanding of RN release & transport processes
 - Solubility, speciation, sorption & diffusion data inconsistent
 - Fundamental basis of thermodynamic approach poor
 - Need to edit databases / reactions
 - Kinetic data even more limited
 - Lack of understanding limits robustness
 - Geochemical analogues suggest approach possibly greatly over-conservative
- ➔ **A novel approach is needed**

R&D challenges – examples (2)

- **Validation database for complex multi-component systems (e.g. glass-steel-bentonite)**
 - **Multicomponent experiments**
 - **Integrated laboratory, in-situ and natural analogue programme**
 - **Large physical scale and long timescale studies essential**
 - **Development & use of state-of-the-art analytical technology**
 - **Careful synthesis of data with full analysis of uncertainties**
 - **QA!**

R&D challenges – examples (3)

- **Rigorous “geosynthesis” (QA!) to derive site characteristics**
 - **Integration throughout planning, site characterisation & data synthesis**
 - **Multi-disciplinary teams including experts in all key areas (geology, hydrogeology, geophysics, geochemistry, ...)**
 - **Close links with end-users (design engineers, PA teams)**
 - **Generalists to carry out both integration and review (esp. for regulator)**
 - **Quality management!**

R&D challenges – examples (4)

- Consistent representation of flow-paths on macro and micro scales
 - Hydrogeology evaluated on scales of 10s or 100s of km
 - Solute retardation analysis (sorption, matrix-diffusion) requires detail on cm scale (or finer)
 - PA traces solute transport paths through EBS, EDZ, host-rock, surrounding formations and into the biosphere
- ➔ **To integrate these requirements, a novel approach is needed**

R&D challenges – examples (5)

- Explicit definition of time-evolution scenarios (including geosphere-biosphere interface)
 - PA considers a million-year time horizon
 - The EBS, geosphere and biosphere will evolve dramatically over this period
 - Distinct events and continuous evolution should both be considered
 - The biosphere can only be evaluated with idealised representations, but major evolution (e.g. GBI in coastal sites) should be explicitly considered
- ➔ **Again a novel approach is needed**

The Challenge: **Infrastructure**

The next 3 decades should provide:

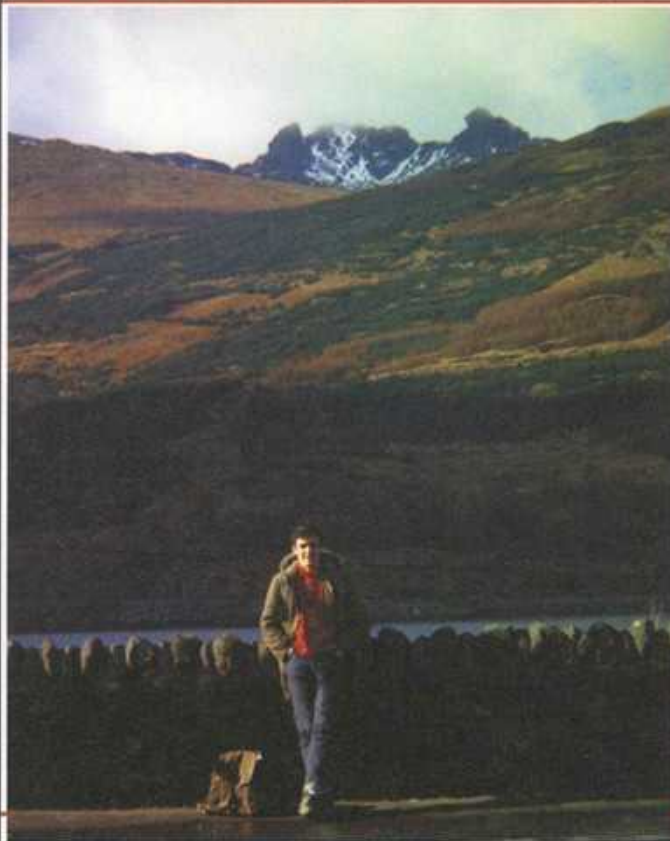
- Site-specific repository designs based full understanding of how characteristics of engineered and natural barriers can be combined to develop a robust safety case
 - The methodology and technology to carry out all characterisation work and resultant geosynthesis with rigorous QA and transparency
 - Well tested designs and procedures to ensure safety and quality of repository construction and operation
- ➔ Establishing required databases and practical experience requires state-of-the-art, specialist R&D facilities (allowing work with radionuclides, direct access to the deep underground environment)

The Challenge: **Human Resources!**

The next 3 decades are critical:

- NUMO's repository may be the first in the world focused on vitrified HLW and a volunteer siting approach
 - The HLW repository will develop in parallel to other projects (Rokkasho L/ILW, TRU, "RI" wastes)
 - Many licensing steps will require development and application of regulations and guidelines
- ➔ High demand for executive staff with long-term, multi-disciplinary experience supported by expert teams with state-of-the-art R&D facilities

3 decades ago: starting a career in nuclear waste



nagra

2 decades ago: old PNC offices - Preparation of H3



nagra

A decade ago – Entry review



nagra

The first director of a NUMO repository



nagra

The head of the regulatory organisation



Entsorgungsnachweis-Japan-July03-M&K

25

nagra

...and the JNC R&D support team



Entsorgungsnachweis-Japan-July03-M&K

26

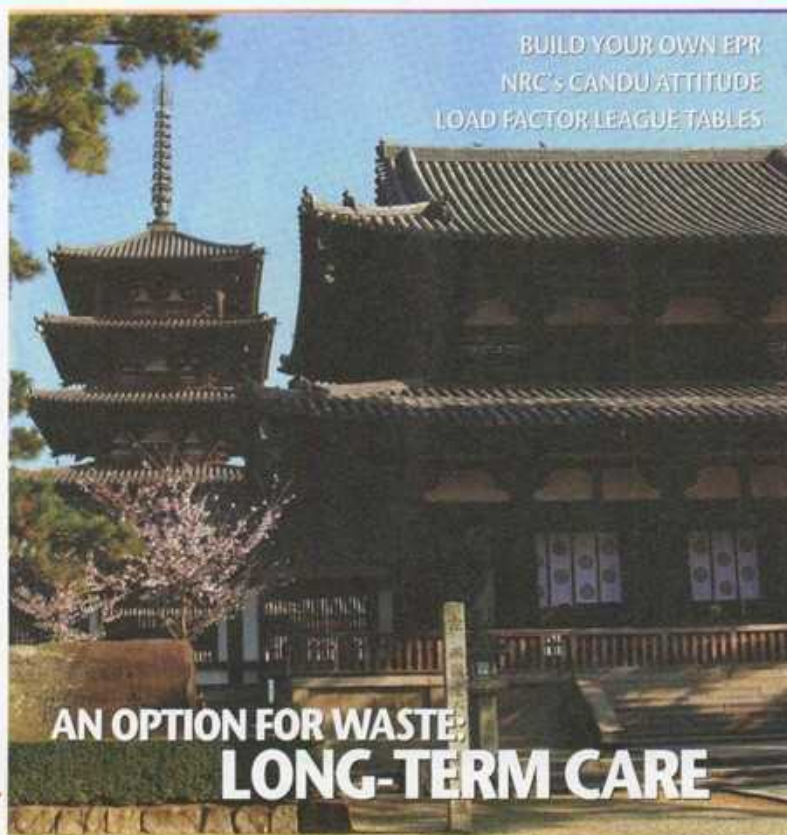
nagra

Finally – to get the best people, be at the front!

In key areas, Japanese R&D groups should be world-leaders:

- Tectonics and active-fault analysis
- EBS design & optimisation
- RN chemistry / geochemistry
- Solute transport in heterogeneous rocks
- Natural analogues
- ...

Grabbing the front page – Nuclear Engineering International



【ポスター発表】

ポスターセッション・テーマ一覧

1. 東濃地科学センター（8枚）

- 1-1 超深地層研究所計画における研究の現状(1/3)
超深地層研究所計画における研究の現状(2/3)
超深地層研究所計画における研究の現状(3/3)
- 1-2 瑞浪超深地層研究所施設建設の現状
- 1-3 超深地層研究所計画第2段階調査研究計画の概要
- 1-4 地質環境の長期安定性に関する研究(1/2)
地質環境の長期安定性に関する研究(2/2)
- 1-5 次世代の高精度物理探査技術等に係わる基盤研究

2. 幌延深地層研究センター（6枚）

- 2-1 幌延深地層研究計画-地質・地質構造、岩盤力学-
- 2-2 幌延深地層研究計画-地下水の水理・地球化学特性-
- 2-3 幌延深地層研究計画-施設計画-
- 2-4 幌延深地層研究計画-第2, 3段階研究計画案-
- 2-5 幌延深地層研究計画-地質環境の長期安定性研究-
- 2-6 地層処分研究開発-低アルカリ性セメントの開発-

3. 東海事業所（8枚）

- 3-1 緩衝材基本特性データの整備状況及びデータベース開発
- 3-2 X線CTを用いた可視化研究と緩衝材の長期挙動評価モデルの信頼性向上
- 3-3 処分場の閉鎖技術-TSX試験におけるプラグ性能の検証-
- 3-4 幌延の地質環境における人工バリア設計条件の設定と第2次取りまとめの手法の適用
- 3-5 核種移行データベースの公開・更新と熱力学データの信頼性向上
- 3-6 炭酸塩の共沈時におけるラジウム(Ra) の挙動評価 - Baによる予察 -
- 3-7 コロイド・有機物・微生物の影響評価モデルの開発
- 3-8 不均質場における移行経路の不確実性評価手法の開発

1-1 超深地層研究所計画における研究の現状 (1/3)

核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター
荻内 聡, 松岡 稔幸, 三枝 博光

超深地層研究所計画

全体目標

- ・ 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備
- ・ 深地層における工学技術の基盤の整備
(結晶質岩を研究対象)

計画概要

- ・ 3つの段階に分けて約20年をかけて研究を実施
- ・ 研究用地と正馬様用地の2箇所で研究を実施

超深地層研究所計画のスケジュール



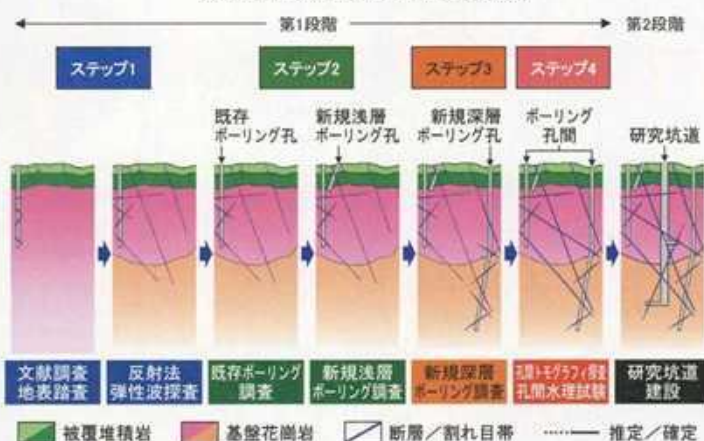
岐阜県 東濃地域



調査・研究の進め方

超深地層研究所計画においては、繰り返しアプローチに基づく地質環境モデルの構築・更新を通して、合理的な地質環境特性調査の手順を構築する

第1段階における調査研究の流れ

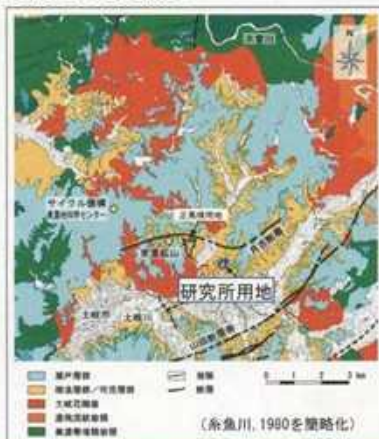


繰り返しアプローチ



東濃地域の地質概要

一研究用地周辺の地質概要一



第1段階における地質構造モデル・地下水流動解析領域

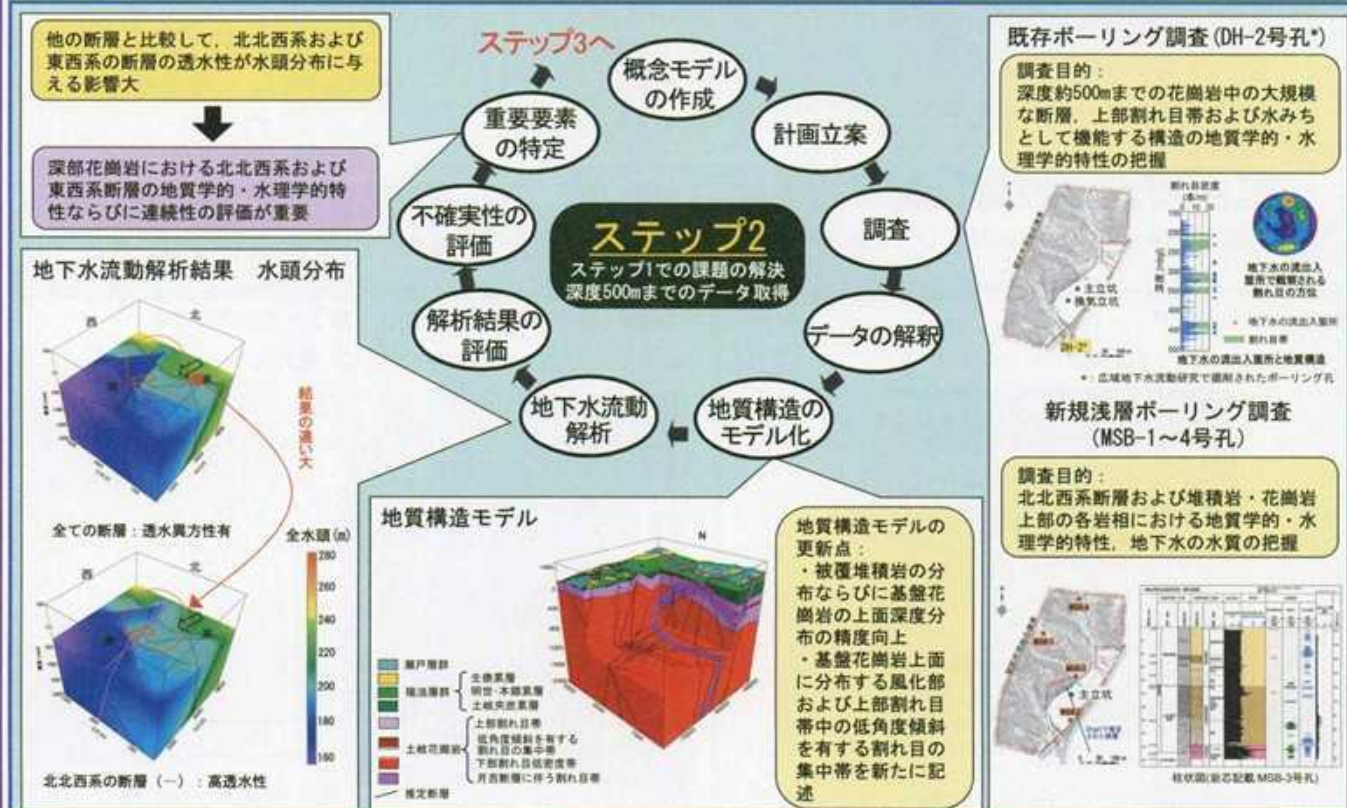
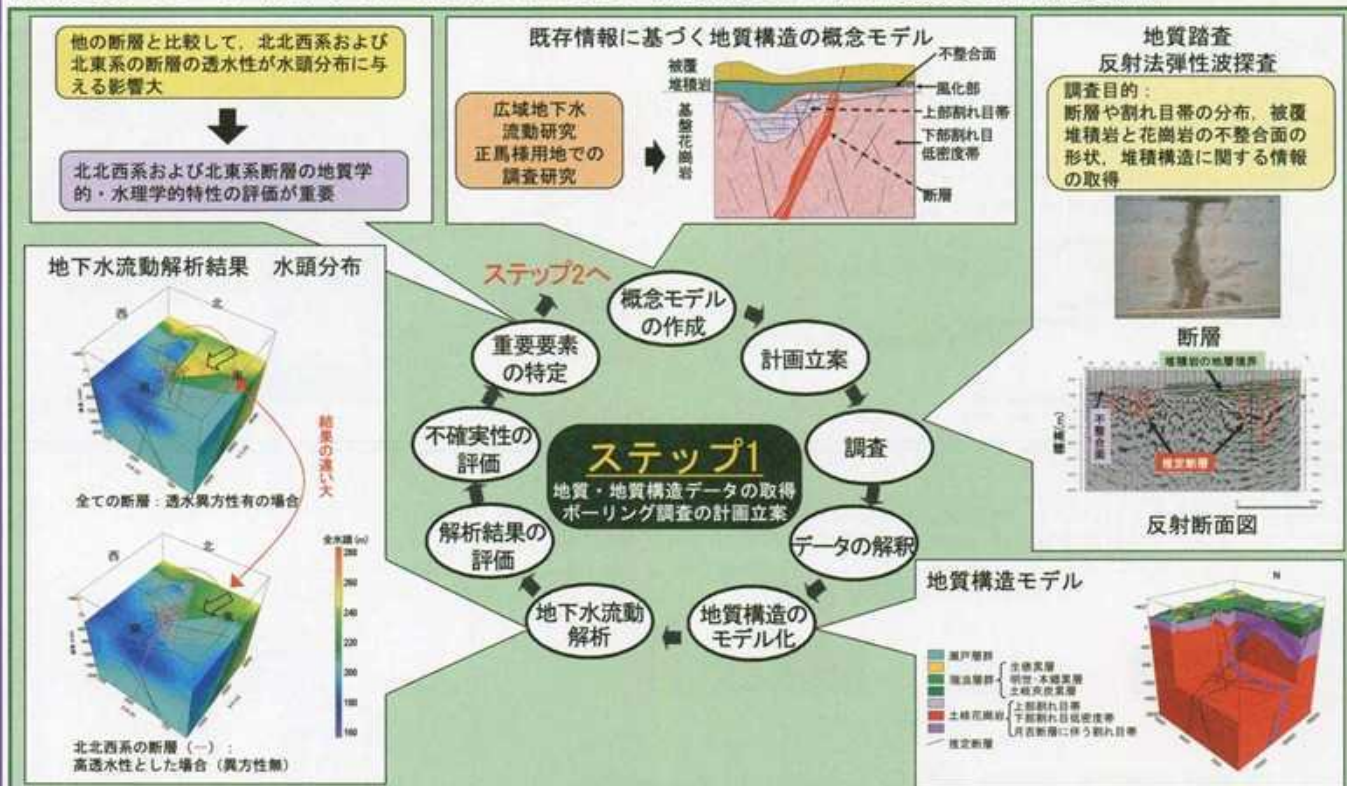
一研究坑道周辺の地質環境に着目して空間スケールを設定一



超深地層研究所計画における研究の現状 (2/3)

核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター
藪内 聡, 松岡 稔幸, 三枝 博光

繰り返しアプローチ（ステップ1→ステップ2）に基づく地質構造のモデル化および地下水流動解析



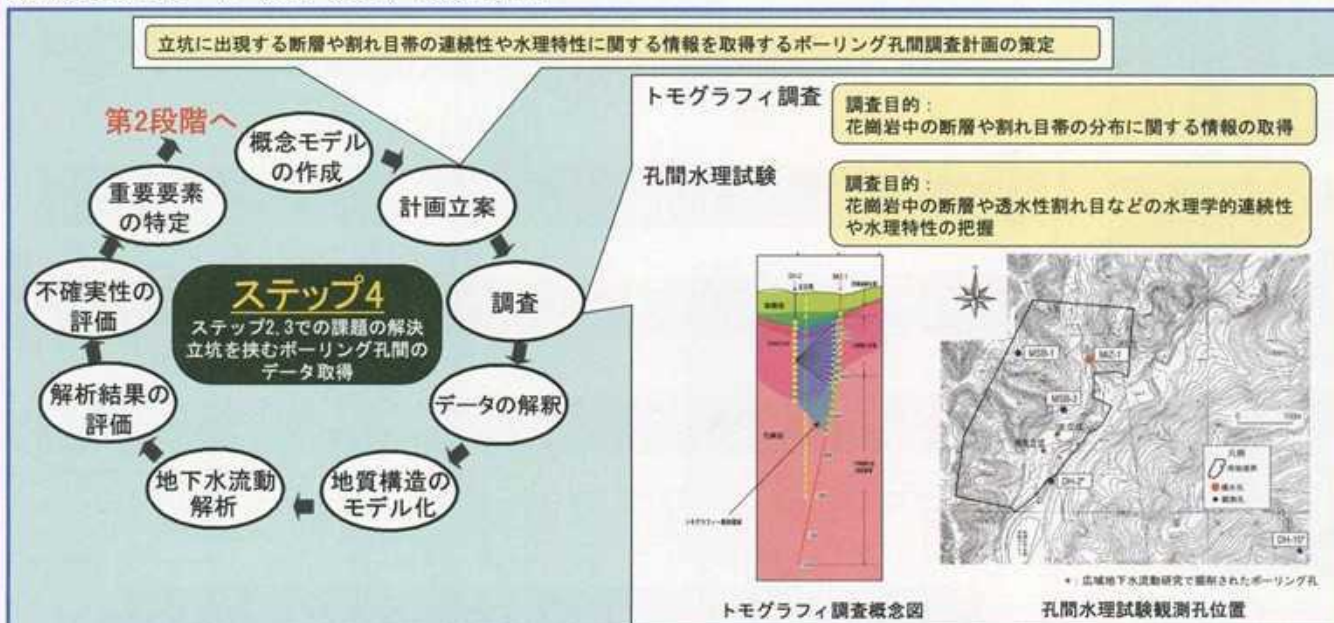
1-1 超深地層研究所計画における研究の現状 (3/3)

核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター
藪内 聡, 松岡 稔幸, 三枝 博光

繰り返しアプローチ（ステップ2→ステップ3）に基づく地質構造のモデル化



繰り返しアプローチ（ステップ4）の調査計画

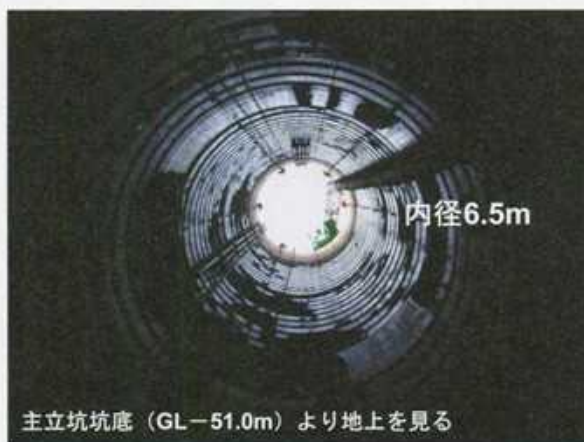


1-2 瑞浪超深地層研究所施設建設の現状

核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター
見掛信一郎、玉井 猛、永崎靖志、山本 勝



地上設備構築状況（H16年12月28日現在）



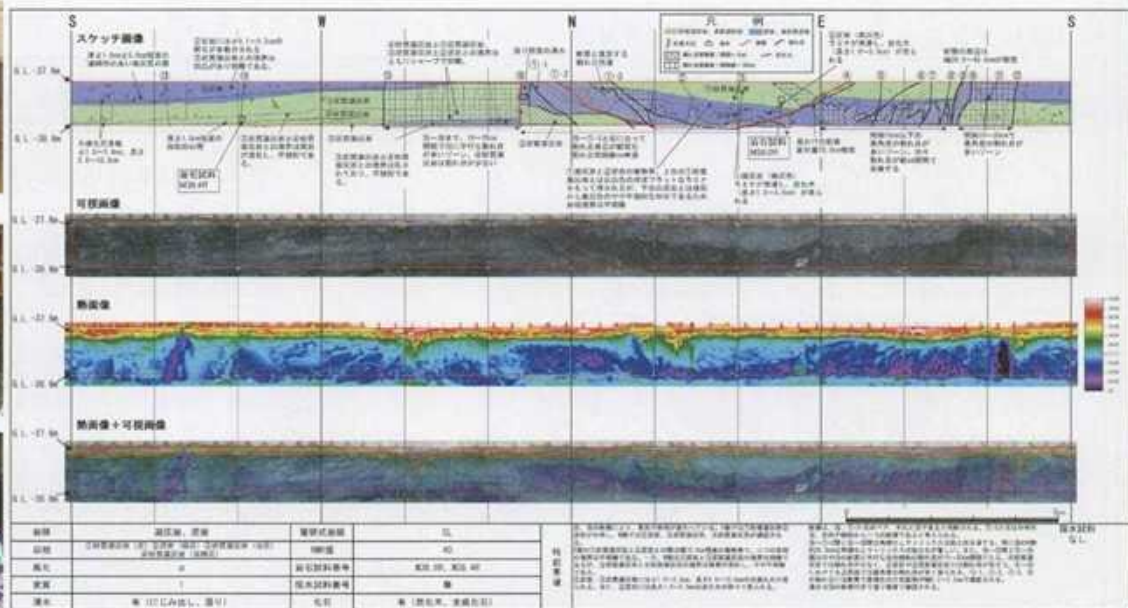
施工状況 (坑口部 GL-51.0m)



立坑壁面狀況



立坑壁面觀察狀況



立坑壁面の地質観察例（主立坑GL-37.6m～-38.6m）

1-3 超深地層研究所計画第2段階調査研究計画の概要

核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター
仙波 毅, 花室 孝広, 茂田 直孝

超深地層研究所計画のスケジュールと第2段階の目標

年度	2000	2005	2010	2015
第1段階: 地表からの調査予測研究段階				
第2段階: 研究坑道の掘削を伴う研究段階				
○研究坑道の掘削が地質環境に与える影響の把握				
○研究坑道の施工・維持・管理にかかわる工学技術の有効性の確認				
第3段階: 研究坑道を利用した研究段階				

第2段階の目標を達成するためのアウトプット

- 地質環境への影響評価（場の変化の把握、現象の理解）
- 第1段階の成果の評価（調査・解析結果、調査・解析体系の評価）
- 研究坑道掘削に関する設計・実施・評価（工学技術の有効性の確認）
- 第3段階の計画（レイアウト、調査・試験項目の決定）

第2段階の目標と主要な課題

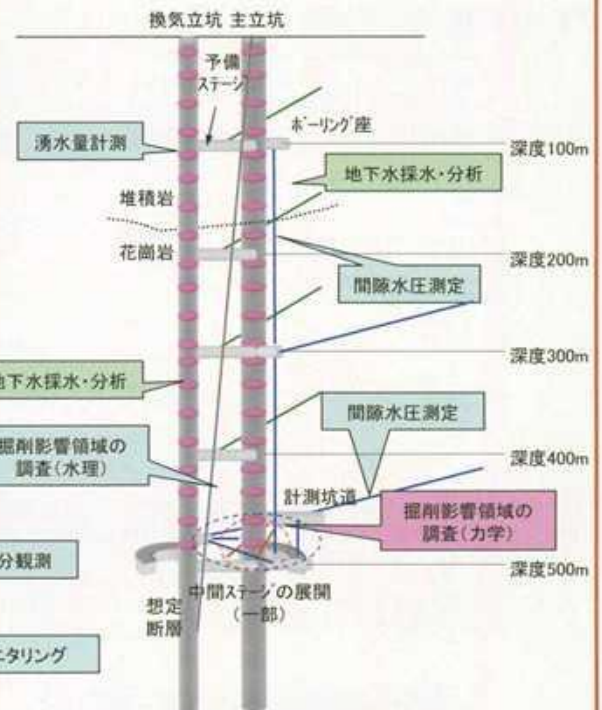
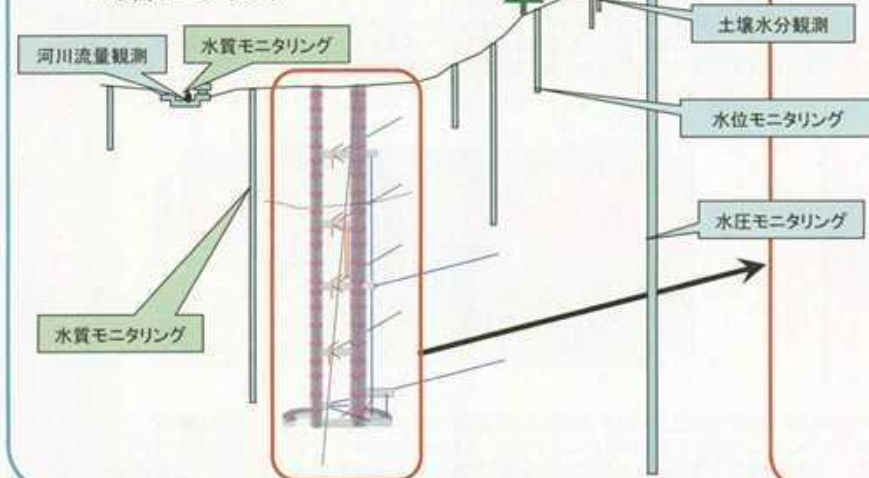
第2段階 目標	課題	スケール	
		サイト	ブロック
研究坑道の掘削が地質環境に与える影響の把握	地質構造の三次元的分布の把握	○	
	母岩の地質学的不均質性の把握	○	
	移行経路としての重要な水みちの把握	○	
	地下水の流動速度の把握	○	
	動水勾配分布の把握	○	
	透水性分布の把握	○	
	酸化還元環境の把握	○	
	pH分布状態の把握	○	
	塩分濃度の把握	○	
	地下空洞への地下水の流入量の把握	○	
研究坑道の掘削が周辺環境に与える影響の把握	E/DZの物性と分布の把握		○
	断層破砕帯などの有無の把握	○	
	研究坑道掘削の地下水位への影響の把握	○	
	研究坑道掘削の地下水圧への影響の把握	○	
	研究坑道掘削の地下水質への影響の把握	○	
	研究坑道掘削による振動・騒音の把握	○	
	地下施設の設計・施工計画構築技術の構築	○	
	地下施設の建設技術の確認		○
	施工対策技術の確認		○
	安全性を確保する技術の確認		○

スケール別・目的別の地質環境のモデル化の目標

領域	目的		反映先
	地質環境への影響評価	地下施設の設計・施工	
サイト	・施設建設前の初期状態の把握 ・施設周辺の影響評価	・地下施設の設計	・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
ブロック	・施設建設前の初期状態の把握 ・施設の極近傍の影響評価	・地下施設の詳細設計 ・研究坑道の設計	・地層処分システムの一部分の地質環境（場所・特性）に着目した評価

研究所用地周辺における調査項目

- 水圧分布の変化 ⇒ 水圧モニタリング
- 地下水面の変化 ⇒ 水位モニタリング
- 表層水理特性の変化 ⇒ 河川流量観測、植生調査、土壌水分観測、気象観測
- 水質の変化 ⇒ 水質モニタリング



立坑近傍における調査項目

- 水圧分布の変化 ⇒ 間隙水圧測定
- 岩盤の透水性の変化 ⇒ 掘削影響領域の調査（水理）
- 研究坑道への湧水量 ⇒ 湧水量計測
- 水質の変化 ⇒ 地下水採水分析
- 応力場と岩盤物性の変化 ⇒ 掘削影響領域の調査（力学）

地質環境の変化に着目した第2段階の調査研究項目

1-4 地質環境の長期安定性に関する研究 (1/2)

核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター
梅田浩司, 野原 壯, 藤原 治, 笹尾英嗣, 浅森浩一, 大澤英昭, 中司 昇

地質環境の長期安定性に関する研究の背景

選定要件(最終処分法, 2000)

<概要調査地区選定>

- 地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録がないこと。
- 将来にわたって、地震等の自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。

<精密調査地区選定>

- 対象地層等において自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。
- 対象地層等内に活断層、破砕帯または地下水の水流があるときは、これらが坑道その他の地下の施設に悪影響が少ないと見込まれること。

環境要件(原子力安全委員会, 2000)

<概要調査地区選定>

- 対象地域の隆起・侵食量を評価し、著しい変動が生ずるおそれがある地域については、これを含めないこと。
- 処分施設を合理的に配置することが困難となるような活断層の存在が明らかな場合は、これを含めないこと。
- 第四紀に活動したことがある火山がある場合には、これを含めないこと。



【火山・火成活動】

- ・マグマの貫入・噴出による廃棄体の破壊
- ・地温上昇・熱水対流の発生、熱水・火山ガスの混入による地下水の水質変化等

【隆起・侵食、気候・海水準変動】

- ・侵食作用による廃棄体の地表への接近
- ・地形変化や気候変化による地下水の流動特性や水質の変化

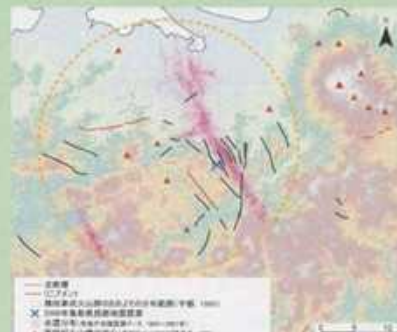
【地震・断層】

- ・岩盤の破断・破砕による処分施設及び廃棄体の破損
- ・岩盤の破断・破砕による地下水移行経路の形成、水圧の変化等

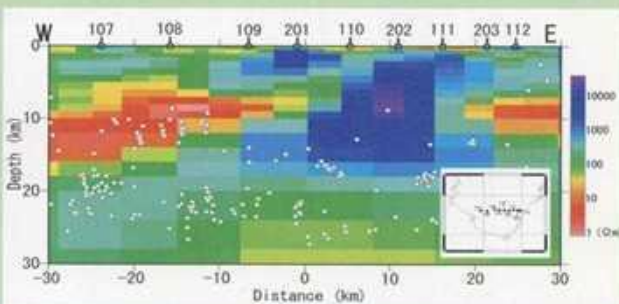
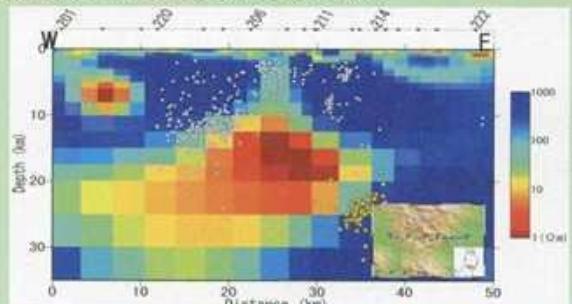
地層処分において考慮すべき天然現象

調査技術の開発・体系化

最終処分法によると概要調査地区等の選定に際しては、対象地層等において自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等を明らかにすることが求められている。そのためには、地層処分システムの成立性に重大な影響を及ぼす現象の存在や過去の変動の履歴やその影響を予め確認するための体系化された調査技術が必要となる。このためサイクル機構では、隆起・侵食量の推定技術、震源断層の抽出技術、マグマ・高温岩体等の探査技術、古地温・熱水系の復元技術等に係わる研究開発に取り組んでいる。



震源断層の抽出技術:中国地方(左図)及び2000年鳥取県西部地震震源付近(右図)の活断層及びリニアメント分布と火山分布の関係
左図:中国地方の活断層及びリニアメントと、12Ma以降の単成火山群の位置関係をみると、松江や横田、鳥取などの火山フロント背弧側にあたる日本海側で両者の分布が重なる。鳥取県西部地震震源付近は、リニアメントが特に集中する地域である。右図:この震源付近には、第四紀火山が震源から約10km離れた東西両側にNNW-SSE方向の列状に分布し、余震分布の方向とほぼ平行している。また、余震分布は、横田単成火山群の一連の火山岩が分布する範囲の中にあり、余震域では深部低周波地震が発生している。これらのことから、余震域およびその周辺の断層活動と火成活動は、同様の応力場で生じる深部流体の上昇等の何らかの作用が共通の原因となって生じたと考えられる。



マグマ・高温岩体等の探査技術:鳴子火山周辺(左図)および紀伊半島南部(右図)における二次元深部比抵抗構造

マグマ・高温岩体等の探査技術の一環として、電磁法探査技術の地下30 km程度までの適用性について検討。地震波トモグラフィーによって地下深部のマグマの存在が示唆されている鳴子火山周辺地域においてMT法を適用した結果、地震波の低速度体と低比抵抗体の分布域が調和的であることから、MT法は有効な探査技術の一つと考えられる。一方、紀伊半島南部地域では、地下10km付近に顕著な低比抵抗層が存在するが、地殻熱流量、震源分布等を考慮すると、この低比抵抗層は溶融体ではない深部流体の存在によるものと考えられる。



1-4 地質環境の長期安定性に関する研究 (2/2)

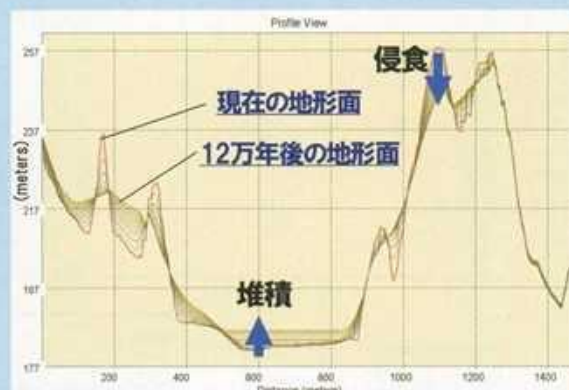
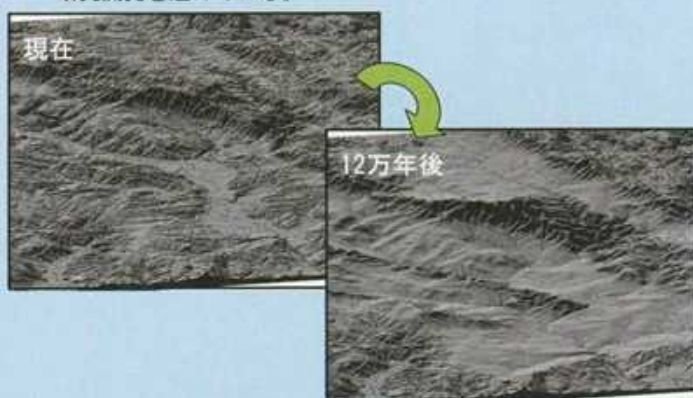
核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

梅田浩司, 野原 壯, 藤原 治, 笹尾英嗣, 浅森浩一, 大澤英昭, 中司 昇

長期予測・影響評価モデルに関する研究開発

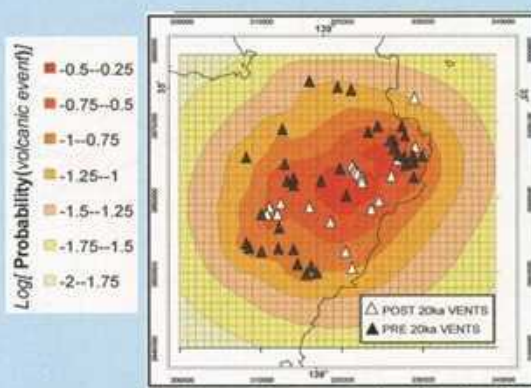
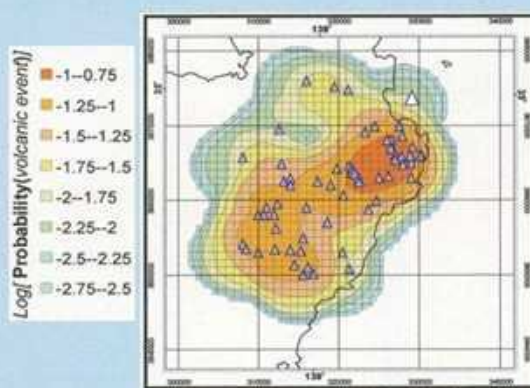
● 長期予測・影響評価モデルの構築

長期予測・影響評価モデルに関する研究開発の成果は、処分施設の設計・施工等の工学的対策や地層処分システムの安全評価等に資するため、長期にわたる地殻変動・火成活動等の予測とそれらが地質環境に及ぼす影響を評価するためのモデルの開発を目指している。サイクル機構では、三次元地形変化モデル、火山発生に係る確率モデル、断層周辺の力学・水理モデル等に係わる研究開発を進めている。



三次元地形変化モデル: 東濃地域中部の現在と12万年後の地形(右図は日吉川流域の断面図)

シミュレーションは、斜面や河川からの物質の移動を従順化モデルによって表現し、物質の流入量と流出量の差から標高を算定する手法を用いた。また、解析には10m-DEM数値地図データを用い、水平方向の解像度は10mである。12万年後の地形に比べて傾斜の急な尾根部が大きく侵食され、穏やかな川底で堆積が進んでいることが読み取れる。

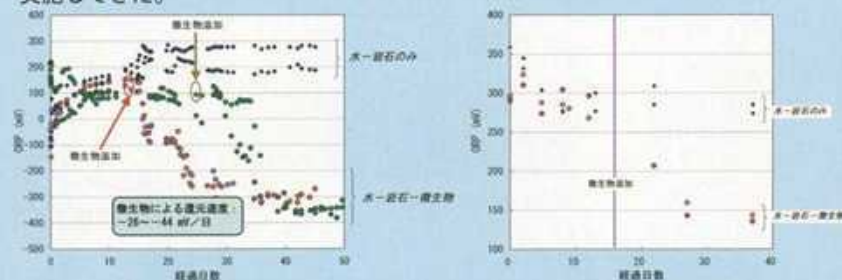


火山発生に係る確率モデル: Kernel法(左図)およびnearest neighbor法(右図)による火山発生の確率分布

東伊豆半成火山群を対象に、空間統計学的なアプローチにより地質データ(火山分布・年代)をモデル化し、今後1万年間の半成火山の発生確率を計算したもの。

● 長期予測・影響評価モデルの確認(ナチュラルアナログ研究)

地層処分システムの安全評価の信頼性をより向上させるため、1~10万年といった長期的な時間スケールで生じる地質学的事象と地質環境の変化、およびそれに伴う物質の移行・遅延挙動を把握するため、東濃ウラン鉱床においてナチュラルアナログ研究を実施してきた。



酸化還元電位の変化

硫酸イオン濃度の変化

水-岩石土微生物反応実験の結果

地下水と有機質な岩石、および微生物を反応させた結果、強還元環境が形成された。地下水中の硫酸濃度は微生物添加後に減少しており、硫酸還元菌による硫酸イオンの消費と硫化水素の生成が推測される。また、微生物の遺伝子解析から、経過日数によって卓越する微生物種が変化することが明らかになった。今回の調査によって、地下深部の還元環境の形成・維持のメカニズムを解明できる可能性が示された。

1-5 次世代の高精度物理探査技術等に係わる基盤研究

核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

熊澤峰夫, 笠原順三,

國友孝洋, 中島崇裕, 鶴我佳代子, 羽佐田葉子, 長尾大道, 茂田直孝

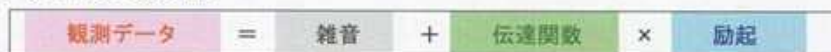
アクロス (精密制御定常信号システム) の開発

【アクロス (ACROSS: Accurately Controlled Routinely Operated Signal System) とは】

線形力学系モデルと見なしうる問題に対応する、汎用的な計測システム。

システム実現における最重要事項は雑音への対処にあると認識して、一連の要素技術を開発。

【アクロスの要素技術】



- ・安定なセンサーと校正手法
- ・指向性機能確保のためのセンサーアレイ
- ・精密同期重合データロガー

- ・環境へ配慮しつつ周波数依存性(色)の情報取得を前提に高い信号対雑音比を実現するための、信号エネルギーの時間拡散と複数の狭い周波数範囲に局在する離散的スペクトル線の特徴とする、超精密信号の長期間安定送信

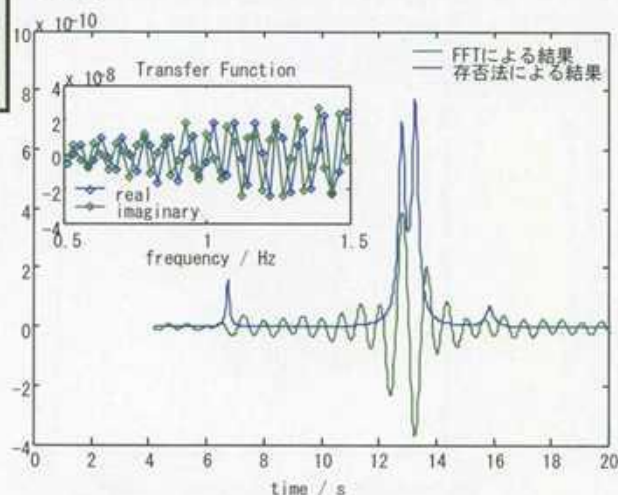
データ処理:
データ取得時間の平方根に比例した(理論上最大の)信号対雑音比の実現
・誤差評価付き伝達関数算出

解析:
獲得したい構造と物理状態の情報を伝達関数から抽出する多段階のステップ
・順逆問題の理論とアルゴリズム
・複素遅延解析
・モード解析

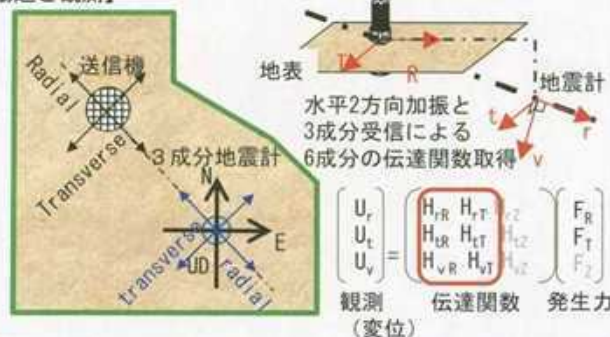
【解析】

・複素遅延解析 (存否法解析)

狭い周波数範囲(0.5~1.5Hz)の伝達関数を用いたイベント解析における従来法(逆FFT)と存否法の比較。



【励起と観測】



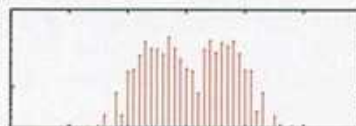
【観測試験とデータ処理結果】

理論上の限界に近い雑音低減技術により、弱い震源(30m離れば震度0)を用いて、送受信点間距離100km以上の信号検出を達成。

10⁶ 秒観測の最遠信号検出点



送信信号のスペクトル

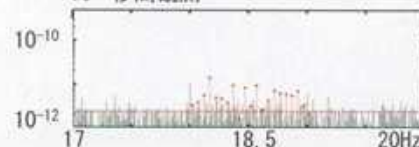


観測点Aにおける受信信号のスペクトル

10² 秒間観測



10⁶ 秒間観測



雑音振幅

10⁴ 倍の観測時間で雑音振幅が 1/10² に低減

2-1 幌延深地層研究計画 —地質・地質構造，岩盤力学—

核燃料サイクル開発機構 幌延深地層研究センター
松井裕哉，丹生屋純夫，石井英一，高橋一晴，舟木泰智

地質・地質構造

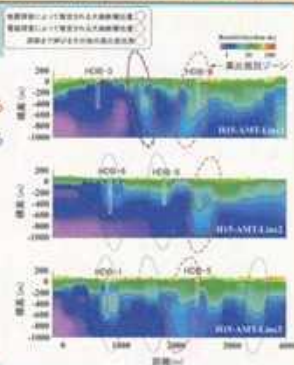
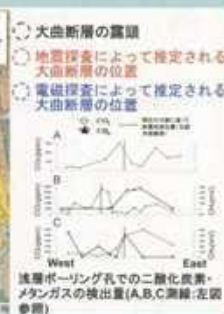
地質図(更新前)



地質図については巻末(156頁)を参照

地震探査，AMT(Audio Magneto Telluric)法電磁探査および浅層ボーリング孔におけるガス測定結果の比較

- 地震探査によって推定される大曲断層の位置および傾斜方向は，深部へ延びる高比抵抗ゾーンと一致する。
- それ以外の3つの高比抵抗ゾーンは上記の高比抵抗ゾーンと類似し，深部まで延びている。
- 他の高比抵抗帯は割れ目帯に対比される可能性がある。
- 断層推定位置を横切る形で縦列配置した浅層ボーリング孔のうち，推定位置近傍で高濃度メタンガスや二酸化炭素が検出され，深部からガス移行経路の存在が示唆される。



AMT電磁探査結果と各ボーリング孔における高比抵抗帯の比較

研究所設置地区およびその周辺は，堆内層(硬質頁岩)，声間層(珪藻質泥岩)，勇知層(砂岩)が分布し，堆内層の上部には遷移帯(珪藻質泥岩/硬質頁岩)が存在する。堆内層・声間層中に見られる割れ目は，以下の二つのタイプに分けることができる。

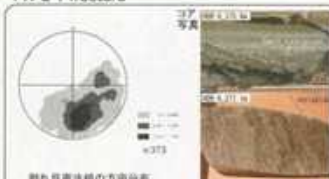
Type 1: 高角で層理面を横切る割れ目で頻りに断層岩・条線・鏡面を伴う。

Type 2: 層理面と平行な割れ目で希に断層岩・条線・鏡面を伴う。

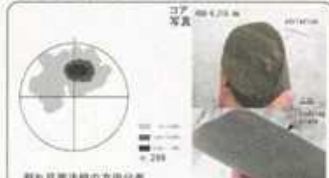


研究所設置地区の総合柱状図

TYPE 1 fracture

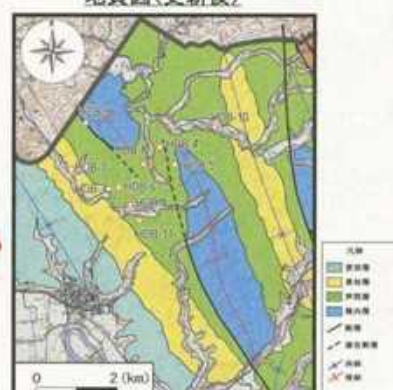


TYPE 2 fracture



Type 1, 2 Fractureの特徴 (HDB-9)

地質図(更新後)



国土地理院発行5万分の1地形図「豊富」(雄内)を使用

岩盤力学

研究所設置地区内における

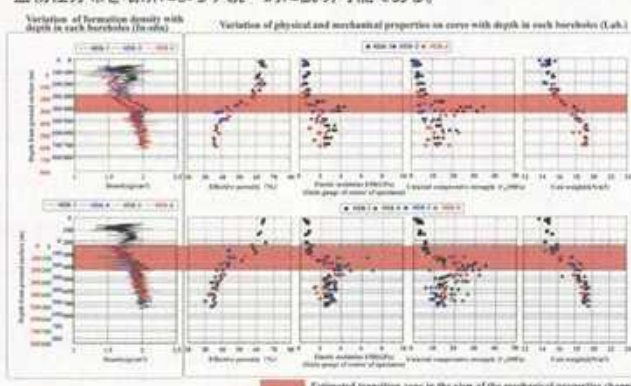
岩石・岩盤の物理的・力学的物性に関する総合評価

岩石物性

- 深度変化の傾向の違いから，3つの異なる物性ゾーン(ZONE1:珪藻質泥岩層にほぼ対応，ZONE2:珪藻質泥岩と硬質頁岩の地質的遷移領域を含む，ZONE3:硬質頁岩層にほぼ対応)で構成されると考えられる。
- ZONE1は，50~60%の非常に大きな有効空隙率を有しており，力学特性は弾性係数が1GPa，一軸圧縮強度は5MPaより小さい。
- ZONE3は，有効空隙率が30%程度，弾性係数が1~3GPa，一軸圧縮強度で5~20MPa程度の物性を有する。
- ZONE2は，ZONE1とZONE3の100m程度の間で連続的かつ大きな物性変化を生じており，研究所設置地区およびその周辺に固有な特徴の一つと考えられる。

原位置岩盤物性

原位置岩盤物性に及ぼす割れ目の影響は相対的に小さいと考えられる。また，各種検層結果の比較から，前述のゾーンコンセプトにより研究所設置地区内の岩石・岩盤物性分布を場所によらず統一的に説明可能である。



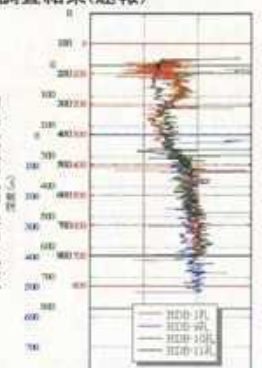
研究所設置地区およびその周辺の岩石物性の深度変化

HDB-9,10,11孔における力学調査結果(速報)

岩盤物性の特徴 (密度検層結果の比較より)

- HDB-9, 10, 11孔の深度方向の密度変化は，これまで得られているHDB-2孔を除く研究所設置地区内のボーリング調査結果と同様の傾向を示す。
- 検層結果の比較から，HDB-9孔地点の岩盤は，これまで得られている大曲断層東側の物性を示している。
- HDB-10孔地点の岩盤は，大曲断層東側に位置するものと考えられるが，物性境界が他の東側のボーリング地点に比べ相対的に深い。HDB-1孔との深度差は概ね70m程度である。
- HDB-11孔はHDB-1孔と比べると，物性境界が100m程度深い。

密度検層結果の比較



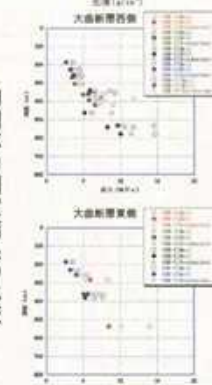
初期応力状態

これまでの知見

研究所設置地区内の大曲断層西側領域では，水平面内最小主応力はほぼ土被り圧に等しく，水平面内最大主応力はその1.5倍より小さい値を示す。最大主応力方向は，地表付近から深度700mまでほぼ東西で一定である。

- HDB-9孔: 応力値は，同一深度で断層東側のHDB-4, 5孔とほぼ同等である。また主応力方向は，ほぼ東西である。
- HDB-11孔: 応力値は，HDB-6孔の測定結果とほぼ同等である。主応力方向は，ほぼ東西である。

初期応力測定結果の比較





2-2 幌延深地層研究計画 —地下水の水理・地球化学特性—

核燃料サイクル開発機構 幌延深地層研究センター
竹内 竜史、國丸 貴紀、濱 克宏

水理調査研究の概要

地下水の水理に関する調査研究では、地表から地下深部における地下水流動特性を明らかにするための調査・解析技術の構築を目標として、研究所設置地区およびその周辺地区を対象に、表層水理調査、ボーリング調査を実施している。また、これら調査結果に基づき水理地質構造モデルの構築・更新、地下水流動解析を実施している。

表層水理調査

●目的：地下水流動解析における上部境界条件となる涵養量や地下水位分布の把握

●実施内容

- ・水収支法による涵養量の算定に必要な河川流量、降水量、蒸発散量（牧草地、森林）の観測
- ・地盤水理的手法による涵養量の推定に必要な土壌水分分布の観測
- ・地下水位の観測（各観測の実施位置は図-1を参照）

●今後の予定

- ・水収支法による涵養量の算定（平成16年度から）
- ・地盤水理的手法による涵養量の推定（平成16年度から）



図-1 表層水理調査観測位置

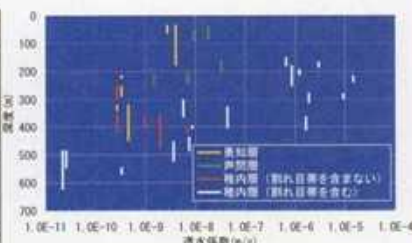


図-2 透水係数 (HDB-1,3,4,5,6,7,8)

ボーリング調査

●目的：地下深部の地下水流動特性の把握

●実施内容

- ・水理試験・流体検層 (HDB-1~11孔)
- ・地下水位の長期観測 (HDB-1,2,3孔)
- これまでの知見 (図-2)
- ・声問層の透水係数は $10^{-9} \sim 10^{-7} \text{ m/s}$
- ・稚内層の透水係数は $10^{-11} \sim 10^{-5} \text{ m/s}$
- ・高透水区間の多くが層理面に高角に交わるせん断性の割れ目帯（以降、割れ目帯）中に存在している⇒割れ目帯がみずみちとなる可能性がある
- ・透水係数は深度の増加とともに低下する傾向がある（割れ目帯中も同様）



図-3 解析領域

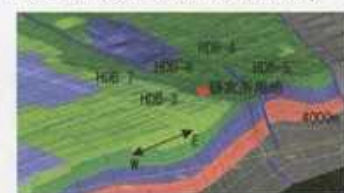


図-4 解析メッシュ

水理地質構造モデルの構築

●目的：水理地質環境の理解

●実施内容

- ・研究所設置地区を対象とした地下水流動解析のための解析領域を設定 (図-3)
- ・各地層の透水係数の分布や深度依存性を考慮した水理地質構造モデル（連続体モデル）の更新 (図-4)
- ・地下水流動解析を実施中 (図-5)
- ・割れ目帯の分布を考慮した水理地質構造モデルの構築、地下水流動解析を実施中

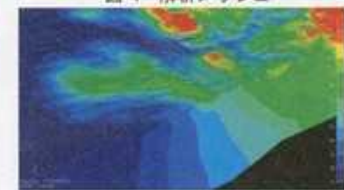
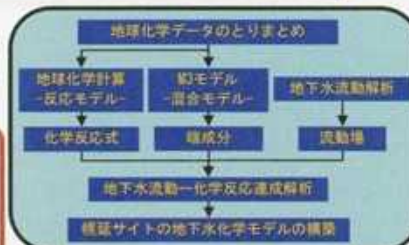


図-5 解析結果の一例（全水頭分布）

地球化学調査研究の概要

地下水の地球化学特性調査では、掘出した地下水とコアから抽出した間隙水を分析することにより、地下水の水質の空間分布を効率的に把握できることが明らかとなった（図-6）。現在、これらの結果をもとに地下水の水質形成過程や分布についての検討を実施中である。

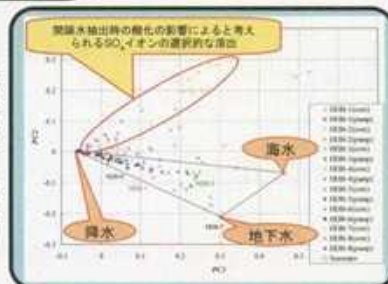


モデル化の進め方

- ①ボーリング調査などにより取得されたデータを取りまとめ、品質チェックを行い解析に必要なデータセットを構築する。
- ②データセットをもとに、地球化学モデルとして岩石-水反応、混合モデルを検討する。
- ③地下水流動解析と比較し、地球化学モデルの妥当性を確認する。

M3解析手法を用いた検討

Multivariate Mixing and Mass balance (M3:SKB)を用いて多変量解析を実施した。その結果、本地域の地下水は、表層部の降水と溶存成分濃度の高い地下水との混合が優勢であることが示唆された。また、大気雰囲気下で間隙水抽出を行った際の酸化の影響と考えられる SO_4 イオンの選択的な溶出が確認された。

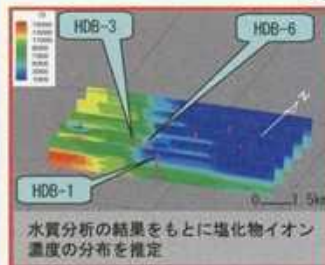


地下水の水質の3次元分布

各ボーリング孔から得られた地下水の地球化学特性および、M3解析の結果をもとにクリギング法により地下水の水質分布を推定した。

今後の予定

- ①原位置で取得されるデータと解析結果との比較による解析手法の検討
- ②地下水流動解析と地球化学計算を組合わせた解析の実施
- ③複数のモデル化手法の適用性の確認



水質分析の結果をもとに塩化物イオン濃度の分布を推定



図-6 各ボーリング孔における水質分布

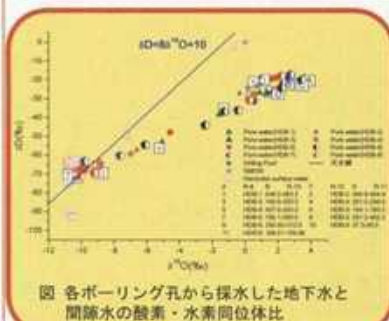


図 各ボーリング孔から採水した地下水と間隙水の酸素・水素同位体比

結果

- ①本地域の地下水は深度が深くなるにともなって溶存成分濃度も高くなる傾向を示す。
- ②各ボーリング孔ごとに溶存成分濃度分布を比較すると、HDB-1,3孔の方がHDB-4,5孔より浅い深度から高くなる傾向を示す。
- ③酸素・水素同位体比の分布は、溶存成分濃度分布の分布と調和的である。
- ④酸素・水素同位体比から、降水と深部の塩水系地下水が混合している可能性が考えられる。
- ⑤深部の塩水系地下水の起源は、現海水ではなく、過去の海水が岩石と反応した可能性が考えられる。

2-3 幌延深地層研究計画 一施設計画一

核燃料サイクル開発機構 幌延深地層研究センター
白戸伸明、畠山信也、小島亘、森岡宏之、尾留川剛

地下施設は、3本の立坑を設置し、複数の深度に水平坑道を展開する計画である。地下施設の設計・施工計画においては、研究環境を確保し、施設を安全に建設・維持できることが基本的な要件であるため、地下施設における調査研究の内容のほか、地下施設の安全性を確保するために岩盤特性に応じた空洞の安定性を評価すると共に、防災対策（可燃性ガス、坑内作業環境、火災等）を検討している。さらに、一般の人々が深地層を体験する場であることも考慮する。

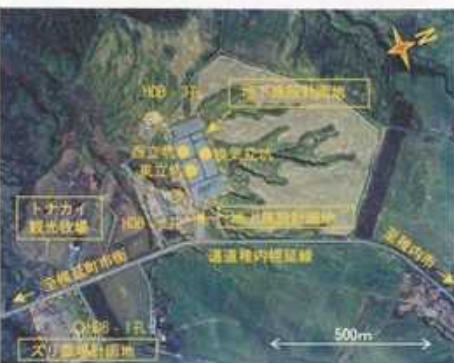
研究用地

研究用地は、幌延町市街地から北東方向約3.5kmに位置し、面積は約19.1haである。地形は、丸みを帯びた丘陵地に囲まれた盆状の部分にあたる緩い傾斜地である。



施設全体計画

研究用地のうち約6.8haを造成して地上施設および地下施設用地として計画している。施設用地の造成高は標高60mである。



地山性状

地質は新第三紀の堆積岩で、珪藻質泥岩（声間層）および硬質頁岩（稚内層）で構成され、両者とも軟岩に属する。地質環境の特徴は、可燃性ガスを賦存し、地下水は塩水系である。

岩盤の物理性状および初期地圧（HDB-3・6孔）

項目	声間層	稚内層
<岩盤物理性状>		
単位体積重量	14~16 kN/m ³	16~18 kN/m ³
空隙率	60~65 %	40~50 %
一軸圧縮強度 (ボーリングコア)	5 MPa程度	5~25 MPa
透水係数 (原位置試験)	10 ⁻⁹ ~10 ⁻⁸ m/s	10 ⁻¹¹ ~10 ⁻⁶ m/s
耐久性 (IS)	90 %以上	95 %以上
膨潤ひずみ指数 (円筒拘束)	0.04 %以下	0.03 %以下

<初期地圧 (水圧破壊による)>

水平面内	E-W
最大主応力方向	1.2:0.8:1.0
主応力比	(水平面内: 水平面内: 鉛直応力) 最大主応力: 最小主応力: 鉛直応力

* 鉛直応力は土被り圧相当を仮定

地下施設の配置計画

東立坑 深度530m目途
西立坑 深度505m目途
換気立坑 深度500m目途

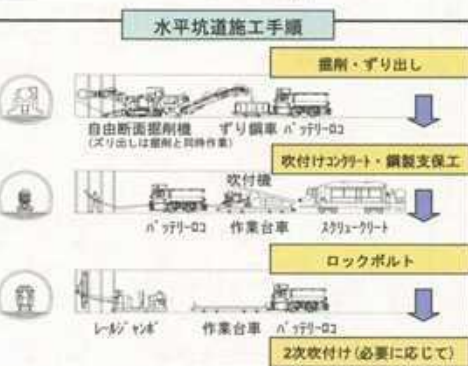
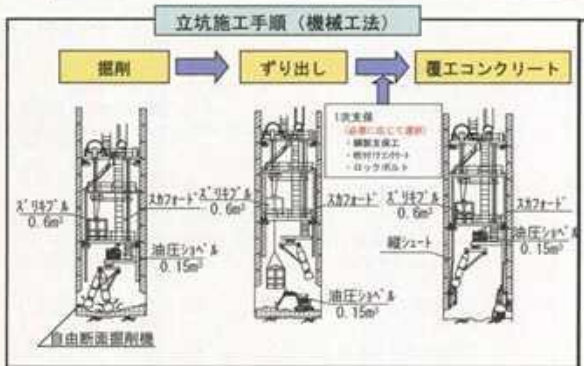
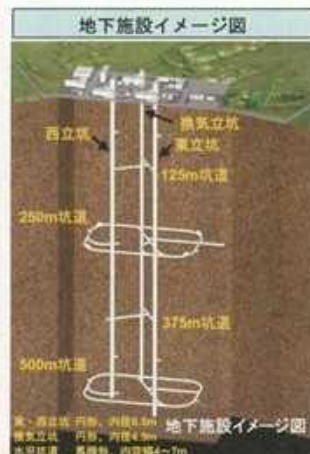
地下施設の掘削および支保計画

<掘削工法>

東立坑 発破工法
西立坑 機械工法 (自由断面掘削機)
換気立坑 機械工法 (自由断面掘削機)
水平坑道 機械工法 (自由断面掘削機)

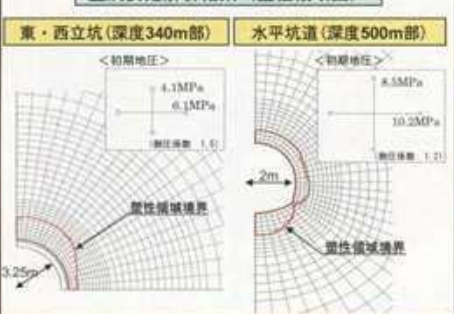
<支保工法>

立坑 ショートステップ工法
水平坑道 NATM

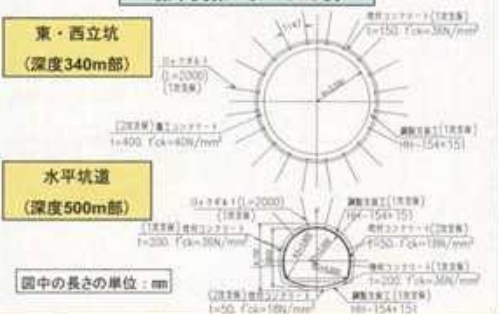


空洞の安定性評価

空洞安定解析結果 (塑性領域図)



標準支保パターンの例



環境調査

モニタリング調査等の例





2-4 幌延深地層研究計画 ー第2, 3段階研究計画案ー

核燃料サイクル開発機構 幌延深地層研究センター 松井 裕哉

東海事業所処分研究部

青柳 茂雄, 牧野 仁史

計画案策定に当たっての基本的考え方

①全体

・研究所設置地区内の地質環境の知見に基づき、地下施設建設時に生じると予測される諸現象を考慮しつつ、現在の研究施設の坑道レイアウト・工程をできる限り踏襲し調査研究計画とする

・深地層の科学的・処分技術の信頼性向上・安全評価手法の高度化に関する研究が合理的・体系的に進められるものとする

②第2段階調査計画

・地質環境モデルの検証及びその更新のため、研究対象地層である声間層、稚内層それぞれについて可能な限り3次元的地質環境データの取得を試みる

・第3段階研究の中心となる250m坑道、500m坑道周辺の地質環境に関する詳細なデータ取得を試みる。これは、第3段階の調査試験計画を最適化するとともに、成果の一般化(地質環境への掘削影響を合理的に説明するメカニズムの解明)に寄与する

・建設への影響を最小限にとどめる調査試験計画とする

③第3段階調査計画

・研究ステージ(250m坑道及び500m坑道)の完成時期が異なることから、深部においてデモンストレーションが必要な試験と長期間にわたる試験期間が必要な試験を分離して検討する

・処分技術の信頼性の向上に関する研究のうち、支保部材の施工性や耐久性に関する試験は、地質環境への影響を考慮し、他の調査試験への影響がないと考えられかつ建設工程に大きな影響を及ぼさない場所で実施する

各調査試験の相互関連

深地層の科学的研究

第1段階における地下施設建設に伴う掘削影響の予測結果を第2段階で検証するとともに、さらにそれをフィードバックし地表からの調査から客観的かつ信頼度の高い地質環境モデルを構築する技術を例示する。また、第3段階までの地質環境変化のモニタリングを継続し、第2段階で構築した地質環境モデルを長期の変化を表現できるよう改良するとともに、地質環境長期モニタリング技術の適用性の検討を実施する。本成果は、第2, 3段階で計画している処分技術の信頼性向上・安全評価手法の高度化研究を進める上でのモデル及び各種境界条件となる

処分技術の信頼性向上に関する研究

第1段階で実施する人工バリアシステム(オーバーバック、緩衝材など)の試験設計及び第2段階までで得られるサイトスケール・ブロックスケールの地質環境モデルを用い、原位置試験場所の選定を実施する。選定した試験場所において設計仕様に従った人工バリアシステムを設置し、第3段階終了時点までのモニタリング及び解体調査を実施することにより、実環境を想定した人工バリア設計手法を確立し実証する。本研究実施時に、第2段階までで構築したブロックスケールモデルの更新を図る

安全評価手法の高度化に関する研究

第1段階で研究の全体計画を策定するとともに、第2次とりまとめで示されたリファレンスケースで考慮されている断層、天然バリア(EDZも含む)、人工バリア中のトレーサー試験を主として第3段階に行い、その結果に基づき、ブロックスケール、ディテールスケールにおける地質環境モデルの更新を図る

さらに、最終的には、深地層の科学的研究で構築した短期・長期にわたるサイトスケール・ブロックスケールまでの地質環境の変化を表現できるモデルと合わせ、地下・生物圏までの物質移動を表現する統合解析を試行し、実際の地質環境を対象とした場合の地表・地下深部にわたる体系的な物質移行評価技術を例示する

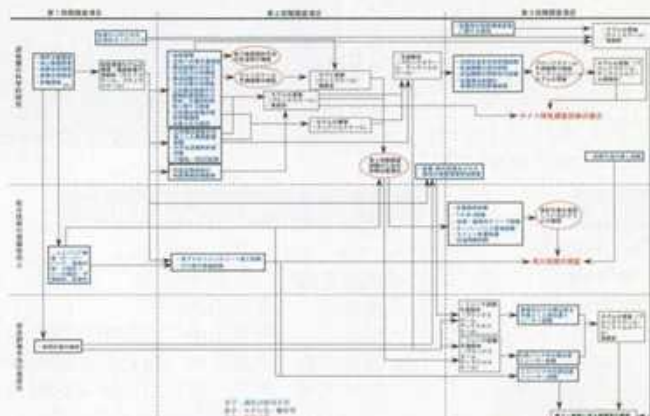


図 各調査試験項目間およびモデル化の相互関連

表 第2, 3段階において計画の中主な調査試験

分類	項目	主な試験項目	試験概要
第2段階	深地層の科学的研究	第1段階で構築した地質環境モデルおよび掘削影響予測手法の検証	立坑内での地質環境調査、湧水調査等 立坑周辺地層中の水圧・水質および地質環境データ取得
		第2段階で構築した地質環境モデルの検証	地質・地質環境調査、コア調査、地質・地質環境調査、地質・地質環境調査、地質・地質環境調査
	処分技術の信頼性の向上	第2段階の調査試験の計画最適化のためのデータ取得	地質・地質環境調査、コア調査、地質・地質環境調査、地質・地質環境調査、地質・地質環境調査
		第2段階の調査試験の計画最適化のためのデータ取得	地質・地質環境調査、コア調査、地質・地質環境調査、地質・地質環境調査、地質・地質環境調査
第3段階	深地層の科学的研究	第2段階の調査試験の計画最適化のためのデータ取得	地質・地質環境調査、コア調査、地質・地質環境調査、地質・地質環境調査、地質・地質環境調査
		第2段階の調査試験の計画最適化のためのデータ取得	地質・地質環境調査、コア調査、地質・地質環境調査、地質・地質環境調査、地質・地質環境調査
	処分技術の信頼性の向上	第2段階の調査試験の計画最適化のためのデータ取得	地質・地質環境調査、コア調査、地質・地質環境調査、地質・地質環境調査、地質・地質環境調査
		第2段階の調査試験の計画最適化のためのデータ取得	地質・地質環境調査、コア調査、地質・地質環境調査、地質・地質環境調査、地質・地質環境調査

参考資料(公開技術資料)

「幌延深地層研究計画-第2, 3段階における全体研究計画案」
「幌延深地層研究計画における処分技術に係る原位置試験概念の検討」
「人工バリア等の設計検討および幌延の地質環境を条件とした原位置試験環境の検討」

JNC TN 5400 2003-004

JNC TN8400 2004-002

JNC TN8400 2004-006

幌延における遠隔監視システム(アクロス)の概要

ACROSS (Accurately Controlled Routinely Operated Signal System; 精密制御定常信号システム)

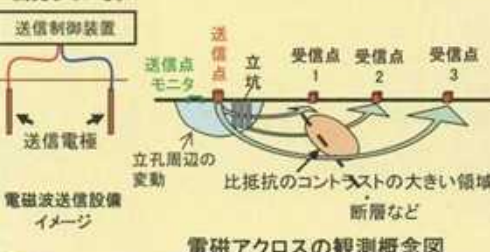
アクロスは、時間変動の検知も考慮した物理探査の手法の一つで、位相と周波数を精密に制御した連続的な弾性波と電磁波を送信し、地盤などの対象からの応答を計測・解析して、その構造や状態の変化を観測する手法である

幌延深地層研究計画では、地下研究施設の建設(立坑掘削)に伴い生じであろう地質環境の変化を把握するため、東海地科学センターにおいて開発・改良等が進められてきたアクロス技術を用いた遠隔監視システムの送受信機器を幌延町北進地区に設置し、調査・研究を実施することとしている

電磁アクロスは、H16年度に設置終了し、弾性波アクロスは、H17年度に設置の予定である

・電磁アクロスの概要(H16:送受信機器を設置し、現在試験観測中)

送信点モニタと受信点の観測データを分析することにより、立坑周辺の地質変動などを、モニタリングする技術を研究開発している



電磁アクロスの観測概念図



幌延におけるアクロス設置予定図

幌延深地層研究計画 — 地質環境の長期安定性研究 —

核燃料サイクル開発機構 幌延深地層研究センター
新里 忠史、安江 健一

〈概要〉

幌延深地層研究センターにおける「地質環境の長期安定性に関する研究」では、天然現象の過去から現在にわたる変動の時間的・空間的変化(変動のプロセス)を明らかにし、一連の変動プロセスの中で現在がどのような地殻変動の場にあるかを把握した上で、これから変動がどのように変化していくかを予測するという事例研究を実施している(図1)。

本報告では、幌延地域における「天然現象の過去から現在にわたる変動の時間的・空間的変化(変動のプロセス)」について、数100万年オーダーおよび数10万～数千年オーダーを対象とした研究の一例を紹介する。

图1. 研究项目·内容

天然現象の過去から現在にわたる変動の時間的・空間的変化
(変動プロセス)の把握

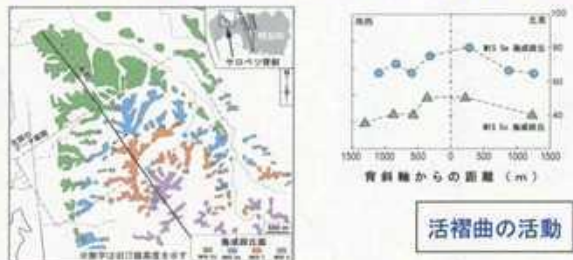
- 地質学的手法(数100万年オーダー):地質調査など(図2)

一連の変動プロセスの中で、現在がどのような地殻変動の場にあるのか
一測地・地球物理学的手法(数100年～数年オーダー)の適用:GPS観測、地震観測など

現地調査により、褶曲作用、変動域の移動など様々な要因が複合した地域固有の現象を把握

天然現象の変動傾向および変動速度等を数万年以上の時間スケールで予測(外挿・類推法による)

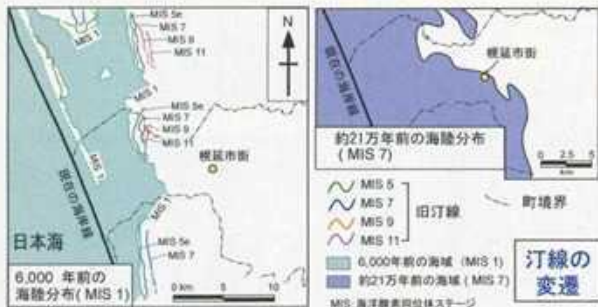
図3. 数10万～数千年オーダーの天然現象を対象とした研究



同ステージの旧汀線高度 ⇒ 背斜軸部で高くなる傾向

$$(\text{全隆起}) = (\text{広域的な隆起}) + (\text{活褶曲による局所的隆起})$$

⇒ 広域的な隆起に対する活褶曲の影響



一 汎地球的海水準は、MIS 1, MIS7ともに現在比-20~+10mの範囲

一汀線位置は、MIS 1で内陸7.6km、MIS 7で内陸15km

一特に、活構造分布域がMIS1で陸化

⇒ 汀線位置の変遷に対する活構造の影響

図2. 数100万年オーダーの天然現象を対象とした研究



Figure 1 is a stratigraphic correlation chart of the Cenozoic in the western and eastern parts of the Qaidam Basin. The chart is divided into two main sections: 祁連山地區西部 (Western Qilian Mountains) and 祁連山地區東部 (Eastern Qilian Mountains). The vertical axis represents time in millions of years (Ma), ranging from 0.5 to 4.5 Ma. The horizontal axis represents the stratigraphic units, which are color-coded and labeled with numbers 1, 2, 3, and 4. The legend at the bottom identifies the lithological units: ① 更別層 (Miocene), ② 漸新層 (Eocene), ③ 泥 (Mudstone), and ④ 火山灰 (Ash). The legend also includes the age scale: 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 Ma.

Period Epoch	Ma	Custom Zone	Western Qilian Mountains	Eastern Qilian Mountains
Quaternary	0.5	0.3	① Sb	④ Sb
Quaternary	1.0	1.0	① 礫	④ 礫
Quaternary	1.5	1.5	① Yc	④ Yc
Quaternary	2.0	2.0	① 砂	④ 砂
Quaternary	2.5	2.5	① 2.5 ± 0.1	④ 2.5 ± 0.1
Quaternary	3.0	3.0	① Kt	④ Kt
Quaternary	3.5	3.5	① 2.5 ± 0.1	④ 2.5 ± 0.1
Quaternary	4.0	4.0	① 2.5 ± 0.1	④ 2.5 ± 0.1
Quaternary	4.5	4.5	① 2.5 ± 0.1	④ 2.5 ± 0.1

幌延地域における層序の時間・空間分布
※柱状図の位置（丸囲み数字）は上図参照

＜まとめ＞

一 地層の時空間的分布から、堆積域が数100万年オーダーの時間スケールで天北堆積盆内を西方へ移動もしくは収斂することが推測された。

一今後、幌延地域において隆起、汀線の移動など広域的で緩慢な天然現象を数万年以上の時間スケールで評価・予測するに当たっては、活断層や活褶曲など活構造の履歴と堆積物の移動、およびその影響等に関する情報を十分検討する必要がある。



2-6 地層処分研究開発-低アルカリ性セメントの開発-

核燃料サイクル開発機構 幌延深地層研究センター 中山 雅, 畑中耕一郎
東海事業所 小西一寛

低アルカリ性セメント開発の必要性

軟岩内に処分施設を設置する場合、空洞の支保工としてセメント系材料の使用が検討されているが、地下水がセメント系材料と接触することによって高アルカリ化(pH12)し、セメント系材料周辺の緩衝材および岩盤を変質させ、人工バリア・天然バリアとしての性能に影響を及ぼす可能性がある。
「第2次取りまとめ」では、支保工として低アルカリ性セメントの使用を推奨している。

・サイクル機構が提案する低アルカリ性セメント：HFSC (High Flyash contained Silicafume Cement)

普通ポルトランドセメントにボゾラン材料*を添加し、ボゾラン反応**により高pHの原因となるCa(OH)₂を低減することを目的としたセメント。

*ボゾラン材料：天然産および人工のシリカ質混合材（フライアッシュ、シリカフュームなど）

**ボゾラン反応：可溶性シリカであるボゾランがCa(OH)₂と反応し、硬化して難溶性のシリカ質化合物を生成する反応

<低アルカリ性(pH)の目標値>

セメントの模擬浸出液(pH=10~13)に対するベントナイトの溶解試験から、ベントナイトの溶解はpH11以上でpHとともに増大することが示唆されている（久保他、土と基礎、46-10、pp31-34（1998））ため、本研究ではpHの目標値をpH≤11に設定した。

開発課題

1. 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（セグメント）、グラウトとしての施工性の確認

2. 目標品質の達成

・pH：11以下

・圧縮強度：材齢28日で場所打ちコンクリートで40N/mm²以上、吹付けコンクリートで30N/mm²以上（幌延地下施設の基本設計強度）

3. 品質変動の把握

・フライアッシュの変動に起因するコンクリートの品質変動の把握

4. 耐久性の評価

・鉄筋の腐食挙動を把握し、長期間の使用に対する耐久性を評価

HFSC中のボゾラン材料の混合割合 (wt%)

	OPC	SF	FA
HFSC226	20	20	60
HFSC325	30	20	50
HFSC424	40	20	40

OPC: 普通ポルトランドセメント

SF: シリカフューム FA: フライアッシュ

1. 施工性の確認

～吹付けコンクリート施工試験・実規模セグメントの製作

吹付けコンクリートとしての施工性

配合：HFSC226, 325, 424

吹付け施工は可能：圧送、付着、リバウンド、粉塵などOPCと同等

透水性はOPCと同等⇒透水係数： $\sim 10^{-10}$ m/s (HFSC424)

場所打ちコンクリート（セグメント）としての施工性

HFSC226でセグメントを作成⇒1年間の気中および水中養生

寸法：外径560mm、幅1200mm、厚さ250mm

試験結果

- ・製造に影響する問題は生じない
- ・ひび割れ発生荷重・破壊荷重ともに設計値をクリア
- ・気中養生で鉄筋の腐食を確認



吹付け試験
実施状況



セグメント1年間気中養生後

3. 品質変動の把握

・FA：石炭火力発電所から発生する工業副産物

・炭種の変化によって品質が変動する可能性

・使用したFA：JISⅡ種相当品→1ヶ月ごと（炭種が変わると想定される期間）に採取

・確認したコンクリートの性状

硬化前性状：スランブフロー*

硬化後性状：圧縮強度

スランブフロー試験結果

・FAの変動によるばらつきは大きい。HFSC混練時の品質管理で対応可能。

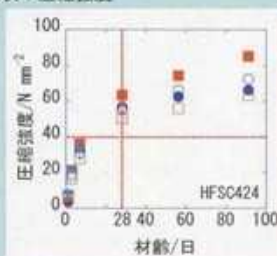
圧縮強度試験結果

・圧縮強度の変動は通常の管理範囲内

・場所打ちコンクリートはHFSC424、w/c=27.3%で目標強度（材齢28日で40N/mm²）をクリア

*スランブフロー：

硬化前のコンクリートのやわらかさを示す指標。プレート上で底のない所定の容器に硬化前のコンクリートを詰め、容器を引き上げたときのプレート上に広がった試料の直径で表す。



4. 耐久性の評価～鉄筋腐食挙動

試験条件

配合：HFSC226, OPC

供試体寸法：φ10cm×h20cm

暴露条件：海上、海中（0.5年、1年）

使用鉄筋：SR13

1年後の鉄筋腐食状況

・OPC：腐食は認められない

・HFSC：表面に腐食を確認

→腐食面積率=5~20%

長期の暴露試験を継続中



鉄筋腐食状況
(HFSC226/1年)

2. 目標品質の達成～pH低下挙動

浸出液のpH測定方法

・蒸留水中に浸漬（液固比2:1）

①粉体浸漬

・φ5cm×h10cmの供試体を28日間水中養生したのち、0.5mm以下に粉砕

⇒所定の浸漬期間でpH測定

②固体浸漬

・φ5cm×h2cmの供試体を浸漬

⇒所定の浸漬期間後に0.5mm以下に粉砕後、再度蒸留水に浸漬（液固比2:1）

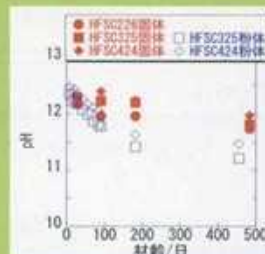
⇒1日後のpHを記録

試験結果

・pH低下速度

- ・固体浸漬＜粉体浸漬
- ・HFSC424＜HFSC325＜HFSC226（ボゾラン材料の割合が多いほど低下速度が大きい）

・実際の構造物では、pH低下にさらに時間がかかることが想定される



長期のpH低下挙動についてはモデル化による解析が必要
→現在、モデル化に必要な基礎データの取得を実施中

まとめ

1. 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（セグメント）としての施工性を確認
グラウトとしての施工性は未確認

2. 目標品質の達成

pH≤11：室温条件下では未確認
圧縮強度：地下施設の基本設計強度をクリア

3. 品質変動の把握

FAの変動による品質への影響は少ない（施工上の管理で対応可能）

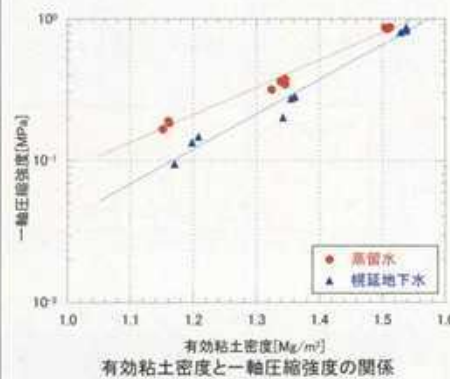
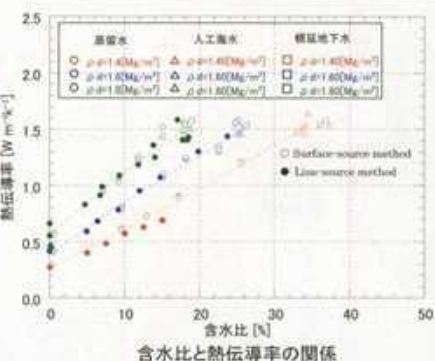
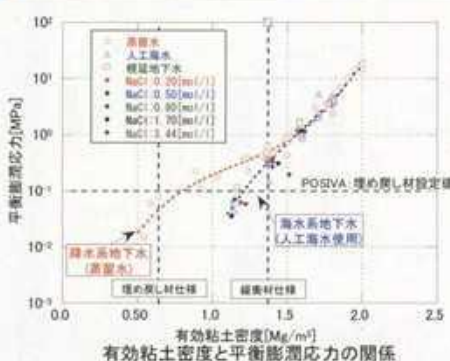
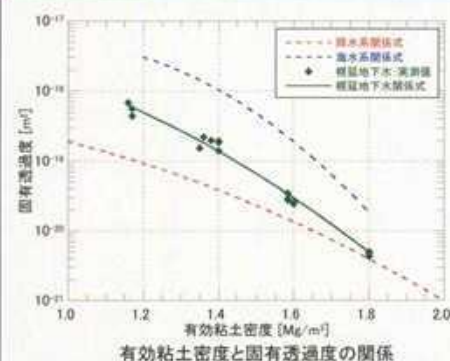
4. 耐久性の評価

HFSCに埋め込んだ鉄筋は海中暴露1年で腐食を確認
鉄筋腐食速度の精度向上のために長期試験を継続中

3-1 緩衝材基本特性データの整備状況及びデータベース開発

核燃料サイクル開発機構 東海事業所 処分研究部
菊池 広人, 棚井 憲治

緩衝材基本特性データの整備状況



緩衝材の基本特性における関係式一覧表

透水特性	降水系：高留水 $\kappa = \exp(-42.1 + 1.1447\rho_s - 2.1232\rho_s^2)$	熱伝導率	ベントナイト単体（一例） 乾燥密度 1.20 [Mg/m³] $\lambda = 0.1380 + 0.0296w + 0.00005w^2$
	海水系：人工海水 $\kappa = \exp(-47.155 + 15.138\rho_s - 7.878\rho_s^2)$		乾燥密度 1.40 [Mg/m³] $\lambda = 0.2677 + 0.0333w + 0.0001w^2$
飽和特性	降水系地下水関係式（高留水） $\sigma = \exp(3.94\rho_s^3 - 13.71\rho_s^2 + 18.06\rho_s - 9.60)$	熱特性	乾燥密度 1.60 [Mg/m³] $\lambda = 0.3885 + 0.0479w - 0.0002w^2$
	海水系地下水関係式（人工海水等） $\sigma = \exp(4.24\rho_s^3 - 20.04\rho_s^2 + 37.63\rho_s - 26.07)$		乾燥密度 1.80 [Mg/m³] $\lambda = 0.5470 + 0.0647w - 0.0007w^2$
力学特性	降水系：高留水 $qu = 1.0 \times 10^{-1} \exp(4.4565\rho_s)$	比熱	ベントナイト単体 $c = \frac{63.10 + 4.18w}{100 + w} \quad [1.20 \leq \rho_d \leq 1.80]$
	海水系：模擬地下水 $qu = 1.4 \times 10^{-1} \exp(5.637\rho_s)$		ケイ砂混合物 $c = \frac{67.32 + 4.18w}{100 + w} \quad [1.20 \leq \rho_d \leq 1.80]$

緩衝材基本特性データベース開発

緩衝材基本特性データベース開発

データベースの構築に向けた取り組み「第2次取りまとめ」までの知見及び、平成15年度末までに取得された各特性データをデータ集として取りまとめ公開した。

データベースの骨格の構築

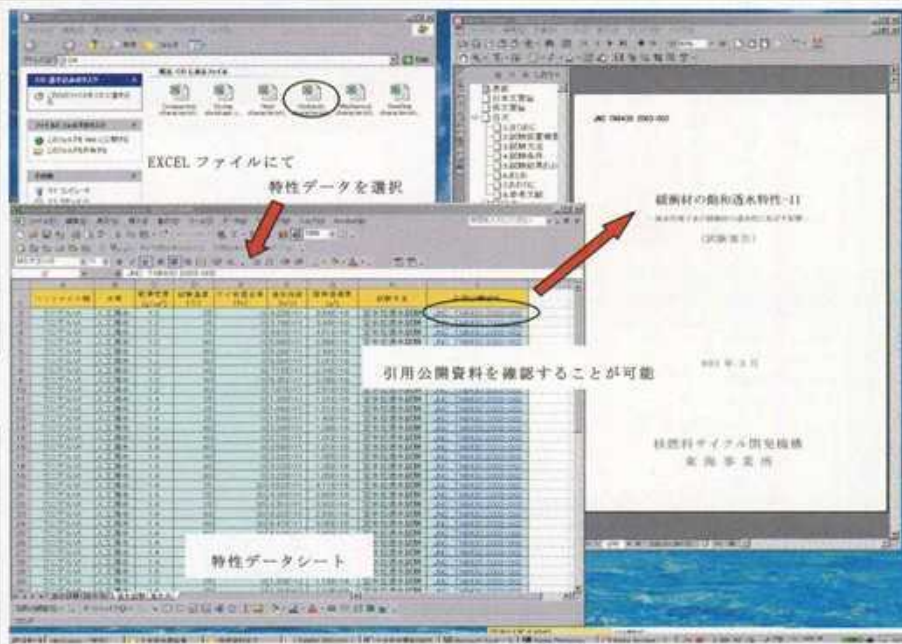
平成17年度末を目標にWeb公開するため、上記データ集及び最新の知見を取入れたWebデータシステムを現在構築中

今後の計画

①国内外産問わず幅広い仕様のベントナイトにも対応できるよう。

例えば、
・緩衝材密度に関して、ベントナイトの主要成分であるモンモリロナイト含有率を考慮した関係式の一般化を図る。
・地下水の影響評価に関して、電荷密度等を指標とした関係式の一般化を図る。

②緩衝材の設計・評価手法上必要となるデータ範囲やデータの取り扱い等を十分に考慮し、それらとの整合をとった形でデータベースの体系を構築する。



データファイルの取扱方法

参考資料（公開技術資料）

- 1) 菊池ほか：緩衝材の飽和透水特性-II JNC TN8430 2003-002
- 2) 菊池広人, 棚井憲治：緩衝材の熱物性試験-III JNC TN8430 2003-009
- 3) 菊池広人, 棚井憲治：緩衝材の基本特性データベース JNC TN8450 2003-010



3-2

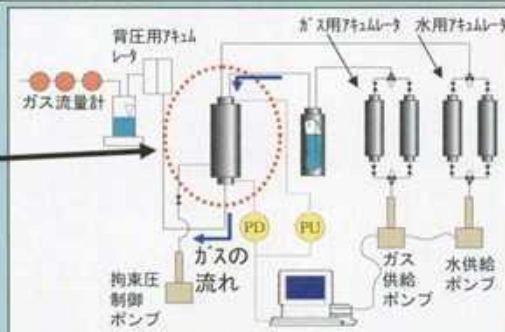
X線CTを用いた可視化研究と緩衝材の長期挙動評価モデルの信頼性向上

核燃料サイクル開発機構 東海事業所 処分研究部
棚井 憲治, 松本 一浩

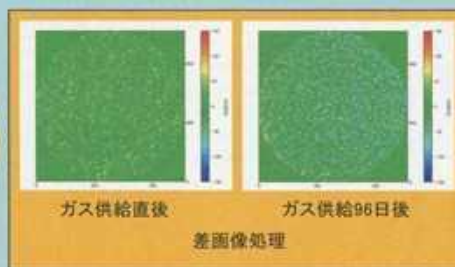
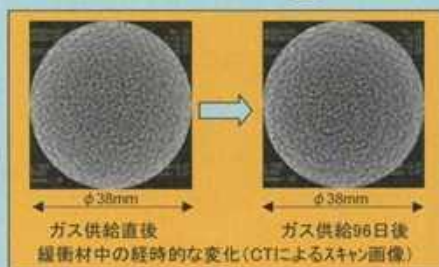
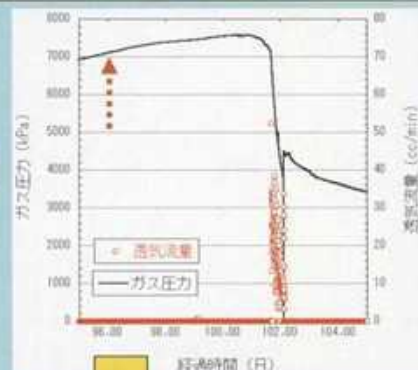
1. ガス移行挙動評価研究への適用



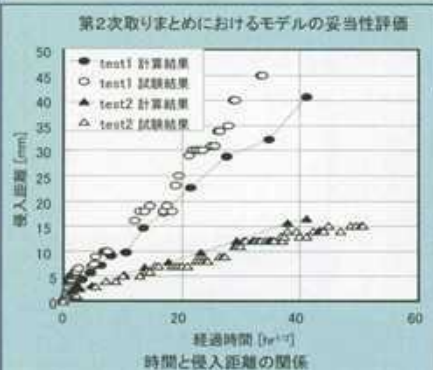
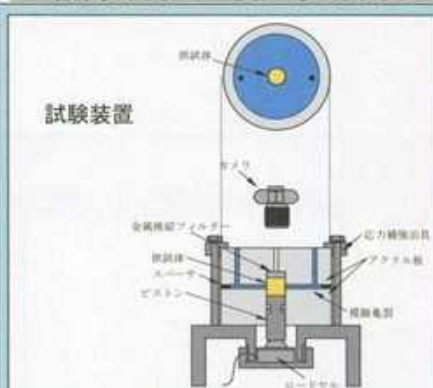
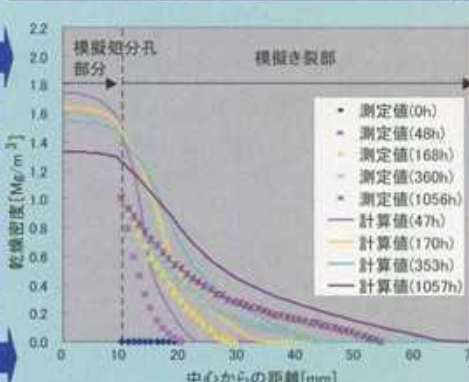
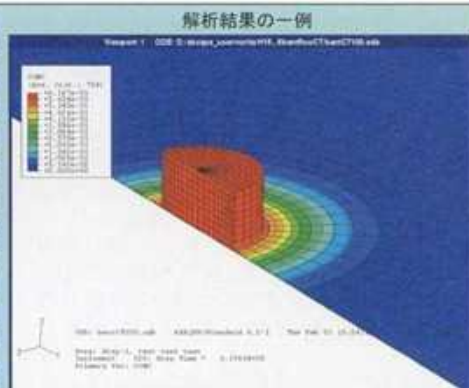
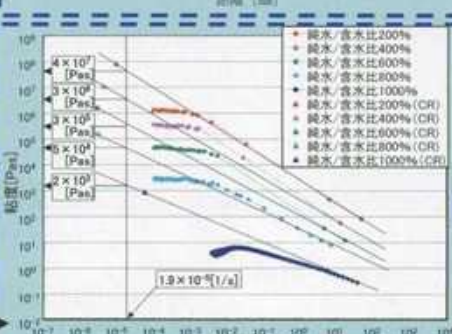
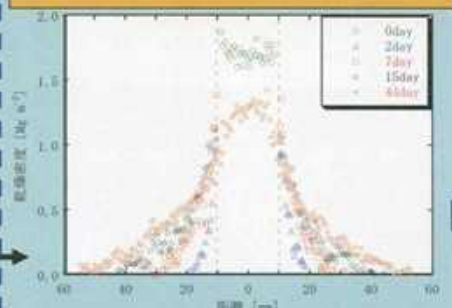
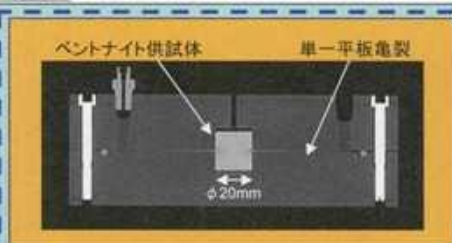
【X線CTスキャナの概観】



【ガス移行試験装置の概要】

現象の詳細な理解
■選択的移行経路の形成による
ガスの移行今後の予定
・従来の試験結果とX線CTデータに
よるモデルの妥当性検討
・三次元的な変化領域の把握

2. 緩衝材流出／侵入挙動研究への適用

課題
・侵入密度分布データの取得
・ベントナイトの粘性係数データの取得侵入速度が実験結果よりも大きく評価され
たが、密度分布の時間的変化の傾向に
関しては、実験結果を再現している。

3-3 処分場の閉鎖技術 -TSX試験におけるプラグ性能の検証-

核燃料サイクル開発機構 東海事業所 処分研究部
藤田 朝雄, 川上 進, 油井 三和

●目的

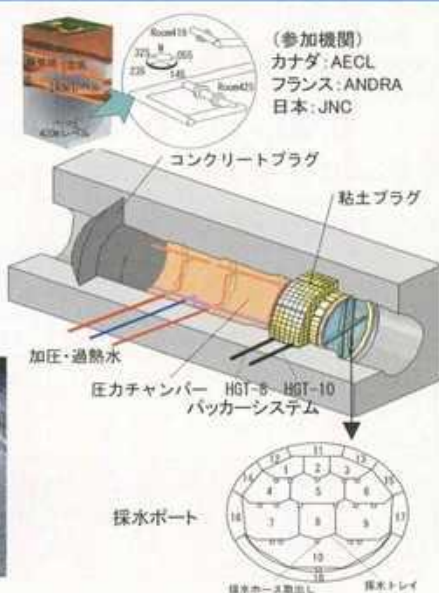
閉鎖性能、即ち人工物、人工構造物が有意な核種移行経路にならないことを示す必要がある。そのため、閉鎖に係わる個々の技術の実証と安全評価の観点からみた処分場としての閉鎖性能の検討を行う。

具体的取り組み

- ▶実規模原位置試験(海外・結晶質岩)を通じた、プラグのシーリング性能に関するデータの蓄積
- ▶塩水環境の影響を考慮した埋め戻し材に関するデータの蓄積。
- ▶閉鎖要素(埋め戻し材、プラグ等)の要件に関する検討。

○カナダ・URLでの実規模原位置試験(トンネルシーリング試験)を通じた、閉鎖性能に関する検討

- ・粘土・コンクリートプラグに関する止水性の評価
- ・粘土プラグに対するトレーサー試験の解析評価
- ・解体・サンプリング



⇒粘土プラグ:

- ・約9,500個の粘土ブロック集合体。大きさ 10.5×36×約15cm(約11kg)
- ・ケイ砂30wt%混合ベントナイト(クニゲルV1)、平均乾燥密度 1.9Mg/m³

⇒コンクリートプラグ:

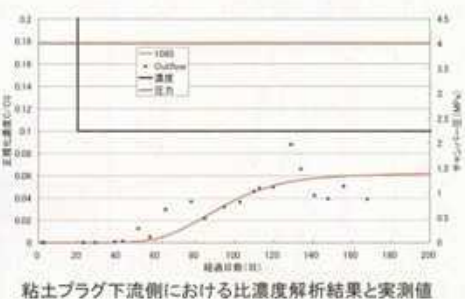
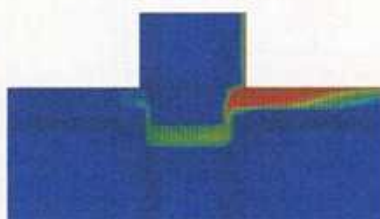
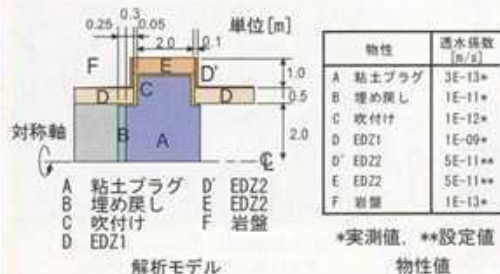
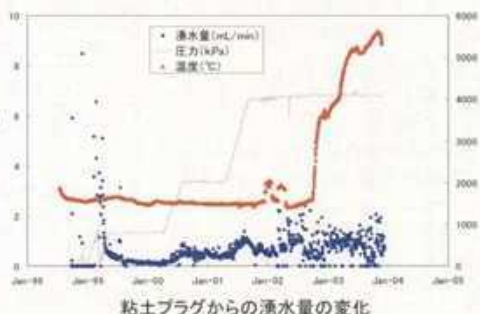
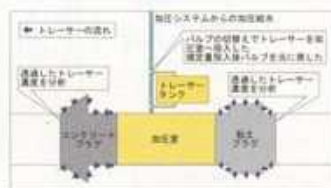
- ・AECLで開発した低発熱高流動コンクリート
- ・多量のシリカフォーム、シリカフラワーを添加、低アルカリ性を示す(90日材齢25°CでpH=10.6)

【湧水量測定】

- ・粘土プラグ: 約1ml/min程度(9割が境界部)
- ⇒プラグ全体としての透水係数 10^{-12} m/secオーダー
- ・コンクリートプラグ: 数ml/min~10ml/min程度

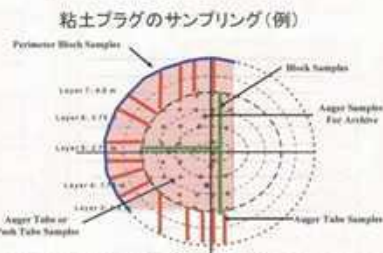
【トレーサー試験】

- ・周辺岩盤(EDZ)を含めたプラグ周辺のモデル化
- ・二次元軸対象解析による移行経路の評価
- ⇒解析値は実測値と良く一致、主な移行経路はEDZ



【解体・サンプリング】

- ・試験終了後、解体・サンプリング開始
- 粘土プラグ、コンクリートプラグ、周辺岩盤
- ・評価項目
- プラグ施工技術の検証
- 止水性能の評価
- EDZの把握
- プラグ周辺の浸透・物質移行現象の把握



粘土プラグの解体



○まとめ

- ▶施工されたプラグの閉鎖性能に関する検証データを取得し、低透水性を確認した。
- ▶解析により、周辺岩盤(EDZ)を含むプラグ性能を評価するモデルを構築し、移行経路を評価した。

これらの結果から、TSX試験のような岩盤性能が良い条件(結晶質岩)では、プラグ等の閉鎖性能が発揮されることにより、EDZが主な核種移行経路になることが示された。

1. 目的

実際の地質環境条件を対象とした一連の設計作業の全体像及び具体的内容等の例示, さらには, それらの作業(人工バリアの試設計等)を通じて得られる問題点や留意点等の整理と課題の抽出

2. 人工バリア設計に必要な幌延における主な地質環境条件の設定

◎ 幌延地区の地質環境の主な特徴: 海水系, 堆積岩(珪藻質泥岩, 硬質頁岩)

① 熱特性: 離間距離の検討に反映

	熱伝導率 [W m ⁻¹ K ⁻¹]	比熱 [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	密度 [kg m ⁻³]
緩衝材	0.80	0.90	1712
埋戻材	2.24	0.65	1980
岩盤 (深度450m)	1.33	1.56	1895

緩衝材, 埋戻材の熱特性は室内試験結果より, 岩盤はHDB-1, 3, 6孔の試験コアを用いた室内試験結果より設定



試錐調査配置図

③ 力学特性: 施設の設計, 離間距離の検討及び長期健全性評価に反映

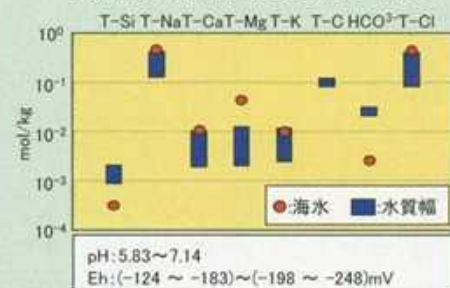
地下施設近傍のHDB-3, 6孔を対象とした室内・原位置試験, コア観察などにより, 岩盤モデル(岩級区分の深度構成)を作成し, 岩級区分毎に物性を設定

初期応力比 ($\sigma_v: \sigma_{hmax}: \sigma_{hmin}$)
1:1.3:0.9

設定した代表的な力学物性の一例

深度(m): 硬質頁岩	450
弾性係数(MPa)	2500
ポアソン比	0.186
単位体積重量(kN/m ³)	18.5
一軸圧縮強度(MPa)	16.3
内部摩擦角(°), 粘着力(MPa)	25, 5.2

② 地下水化学特性: 緩衝材, 埋戻材, オーバーバックの基本特性・設計及び長期健全性評価に反映 (HDB-1, 3, 6)



水質幅の推定方法

Na, K, Ca, Mg, Cl については, 水質分析結果より, pH, Eh, C, Fe, S については, 一般的な深部地下水に関する地球化学的知見とその不確実性をもとに地球化学モデルにより推定

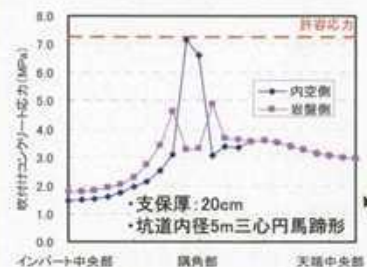
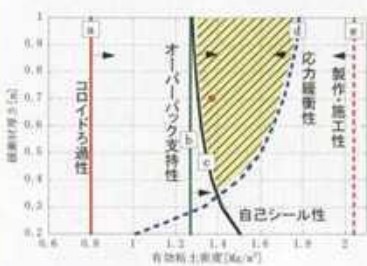
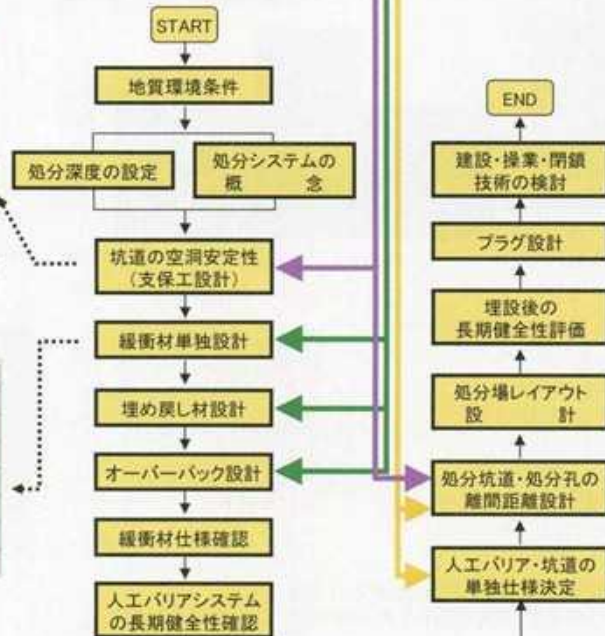
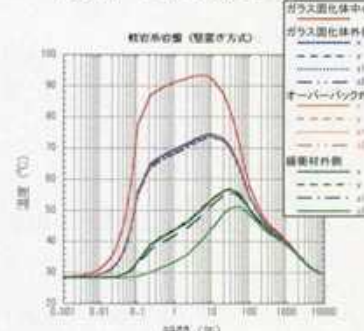
④ 水理特性: 緩衝材, 埋戻材, オーバーバックの基本特性・設計及び長期健全性評価に反映

試錐調査 → 透水係数の設定

地下水流動解析 → 動水勾配・流速の設定

一例) 透水係数 稚内層: $10^{-5} \sim 10^{-11}$ m/s
(割れ目帯が無い場合は $10^{-6} \sim 10^{-10}$)

3. 人工バリア等の設計フロー案と第2次取りまとめの手法の適用例

処分坑道の支保工設計例
(低アルカリコンクリート)地質環境条件に応じた
緩衝材の仕様設定概念坑道離間距離(力学安定性)解析の
検討イメージ(2次元弾塑性解析)幌延岩盤の熱物性を用いた
ニアフィールド熱解析例

3-5 核種移行データベースの公開・更新と熱力学データの信頼性向上

核燃料サイクル開発機構 東海事業所 処分研究部
柴田 雅博, 笹本 広, 吉田 泰, 小原 幸利, 陶山 忠宏, 磯貝 武司

核種移行データベースの整備・公開

2003年8月1日より、サイクル機構の公開ホームページ上に
おいて、熱力学・収着データベースを公開

<http://migrationdb.jnc.go.jp/>

ユーザ登録者数(2005/2/21現在) 266名
(国内:146名、国外:120名)

熱力学データベース(TDB)

評価対象元素の地下水・緩衝材間隙水中での溶解度、
溶存化学種の推定に必要な、標準状態における固相の
溶解度積、錯体の生成定数(logK)のデータベース

収着データ

- ・サイクル機構が第2次取りまとめに向けて整備したデータベース
 - 放射性元素(Yui et al.,1999,(JNC TN8400 99-070))
 - 地球化学元素(Arthur et al.,1999,(JNC TN8400 99-079))
- ・OECD/NEAにより整備された個別元素毎のデータ
 - U(Grenthe et al.,1992)
 - Am(Silva et al.,1995)
 - Tc(Rard et al.,1999)
 - Np(Lemire et al.,2001)
 - Pu(Lemire et al.,2001)
 - 上記元素のUpdate版(Guillaumont et al.'03)
- ・その他の個別元素の熱力学データ
 - Sm(湯谷 他,1998,(PNC TN1340 98-001等))

収着データベース(SDB)

評価対象元素の岩石・緩衝材等へのパッチ収着試験に関する情報を
広く調査し、分配係数(Kd)値をその実験条件等の詳細情報とともに
登録したデータベース。

収着データ

対象元素:22元素

Ni, Se, Zr, Nb, Tc, Pd, Sn, Sb, Cs, Sm, Pb, Bi, Po, Ra, Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm

対象固相

岩石、鉱物、粘土、酸化物等の純粋固相

SDBの推移と登録件数

約2万件(湯谷 他,1999,(JNC TN8410 99-050))

→ Web siteから Microsoft Access版のフルダウンロードが可能

1999~2003年までのデータを調査、約2千件の追加登録

(陶山・笹本,2004,(JNC TN8410 2003-018))

→ ダウンロード準備中

SDBの付加機能

詳細データ表示

データ一覧表示画面のうち“固相情報”、“溶液情報”、“文献情報”等については、
当該カラムのクリックで詳細データ画面が表示される。

簡易グラフ作成機能

検索、抽出したデータを対象にワンクリックでグラフ作成が可能

pH vs Kd, Eh vs Kd, 反応時間 vs Kd, 対象元素初期濃度 vs Kd,

イオン強度 vs Kd, Kd値の頻度分布(ヒストグラム)

インターネットを介してのデータ検索、検索データのダウンロード等の新システムを開発準備中

熱力学データの信頼性向上

重要化学種の熱力学データの取得

重要化学種については、

地層処分放射化学研究施設(QUALITY)等に
おいて試験を実施し、データの導出を実施。

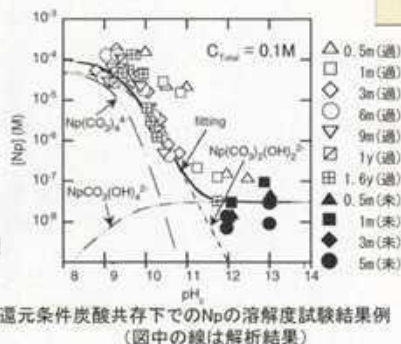
重点項目

アクチニド(IV)のヒドロキソ炭酸錯体データ

アクチニド(IV)酸化物アモルファス固相の溶解度積

アクチニド(IV)の加水分解定数

鉄含有セレン固相(FeSe₂)の溶解度積 等



還元条件炭酸共存下でのNpの溶解度試験結果例
(図中の線は解析結果)



熱力学・収着データベース
メインページ



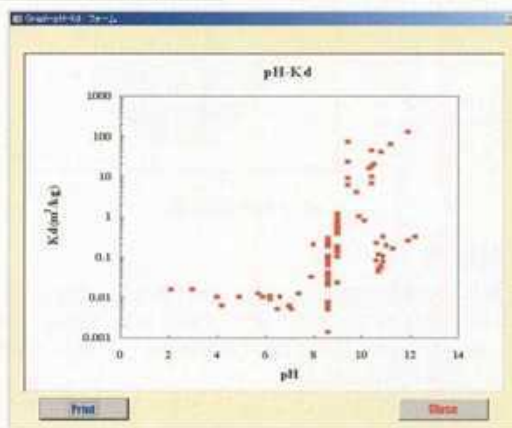
個別熱力学データベース詳細情報
&ダウンロードページ

提供(ダウンロード)可能なデータベースファイルフォーマット

- PHREEQE(Parkhurst, 1980) - PHREEQC(Parkhurst,1995)
- EQ3/6(Wolery,1992) - Geochemists' Work Bench (Bethke,1996)

収着データベースデータ収録数

		粘土鉱物	花崗岩	その他			粘土鉱物	花崗岩	その他
Ni	-	129	585	448	Po	-	12	6	23
Se	酸化条件	49	60	717	Ra	-	467	116	604
	還元条件	37	35	132	Ac	-	12	12	36
Zr	-	53	218	193	Th	-	187	26	323
Nb	-	44	390	281	Pa	-	14	18	55
Tc	酸化条件	180	88	660	U	酸化条件	729	191	1041
	還元条件	50	28	90		還元条件	119	28	282
Pd	-	24	24	41	Np	酸化条件	483	52	935
Sn	-	118	40	184		還元条件	116	41	275
Sb	-	16	4	141	Pu	酸化条件	96	159	453
Cs	-	661	715	1383		還元条件	230	84	601
Sm	-	71	0	14	Am	-	397	118	939
Pb	-	205	4	92	Cm	-	12	12	23
Bi	-	1	0	3					



作図例[pH vs Kd]
(元素:Np,固相:ベントナイト,雰囲気:還元条件)

溶解度試験から得られた

Np(IV)ヒドロキソ炭酸錯体の安定度定数 $\beta_{n,m,0}$

元素	(n,m)	log $\beta_{n,m,0}$	文献
Np	(2,2)	46.4±0.5	本研究
	(2,2)	43.17	Rai et al.,1999a
U	(2,2)	41.33	Rai et al.,1998
Pu	(2,2)	44.76	Rai et al.,1999b
Np	(1,4)	50.5±0.5	本研究

(Kitamura & Kohara 2004)



研究の背景

<Raの溶解度について>

Raは評価上重要な核種であり、第2次取りまとめでは、その化学的性質から、主沈殿元素(Ca)と全く同じ振る舞いをするとして仮定した簡易的な共沈モデルにより評価。

Ra濃度(降水系間隙水中)
= Ca濃度 × ガラス固化体中Ra/Ca mol存在比
→より現実的なRaの共沈メカニズムに基づくモデル開発が必要

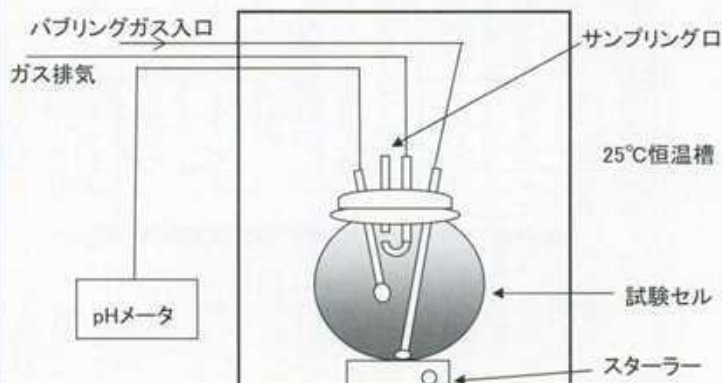
RaはBaと化学的類似性があり、Baの共沈はBaの固溶体反応モデルで推定できる可能性あり。

研究目的

Raのアナログ元素としてBaを用い、方解石への共沈実験結果より固溶体モデルによる評価を行う。

Free Drift Method (FDM)試験法

FDMは炭酸ガスの吹き込みや脱ガスにより、炭酸を供給しつつ溶液のpHを変化させ、炭酸塩鉱物を沈殿させる手法。



Free Drift法概略図

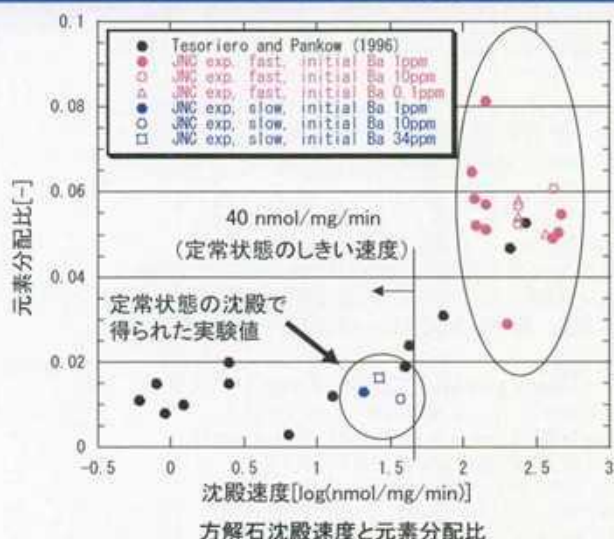
実験結果

実験条件 方解石沈殿速度の遅い領域でのデータ取得が必要(地層処分環境下では定常に近い反応のため)であり、FDMを用い、過飽和後の溶液の脱ガス量を制御し、方解石沈殿時にトレーサ量Baを共沈させる。

- 定常に近い条件(40nmol/mg/min)でデータが取得できた。
- 沈殿速度の低い領域における元素分配比は $1.14 \times 10^{-2} \sim 1.63 \times 10^{-2}$ であった。
- 沈殿速度の高い条件では元素分配比は2~3倍となる。
- Ba添加量に関係なく沈殿速度の高い条件では元素分配比も大きくなる

元素分配比(distribution coefficient)
= (固相中Ba/Ca mol比) / (溶液中Ba/Ca mol比)

沈殿速度(precipitation rate)
= nmol/mg/min (単位種結晶, 単位時間当たりの方解石沈殿mol数)



方解石沈殿速度と元素分配比

モデル解析結果

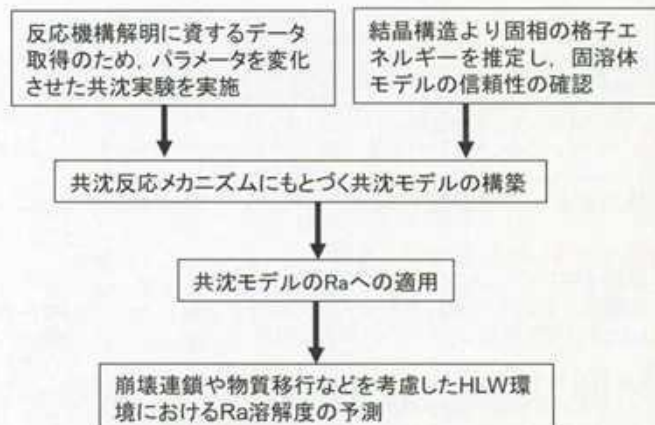
実験結果をもとに、固相の $\Delta_f G^\circ$ を固溶体モデルにより求め、実験条件を模擬した地球化学計算を行った。計算の結果、非理想系モデルであるMargules modelを用い、固相中Ba/Ca比および溶液中Ba濃度の変化を説明することができた。

$$\left(\begin{array}{l} \text{Margules model:} \\ \Delta_f G^\circ = \mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 + RT(x_1 \ln x_1 + x_2 \ln x_2) + x_1 x_2 w \end{array} \right)$$

まとめ

- 方解石沈殿速度の遅い領域におけるBaの共沈実験を行い、固相および溶液中のBaの分配データを取得した。
- 得られたデータを用いた固溶体反応を仮定したモデルによる解析の結果、非理想系の固溶体モデルによる熱力学的な評価モデルで実験結果を説明することができた。

今後の予定



3-7 コロイド・有機物・微生物の影響評価モデルの開発

核燃料サイクル開発機構 東海事業所 処分研究部
飯島 和毅, 飛塚 早智子, 黒澤 進, 吉川 英樹, 亀井 玄人, 油井 三和

研究の目的 地下水中に存在するコロイド・有機物・微生物、緩衝材から生成するベントナイトコロイド等が、放射性核種と相互作用(収着、錯形成)することにより、その移行を促進させる可能性がある。

・影響を及ぼす可能性のあるコロイド等の特性を評価
・核種との相互作用データを取得、現象を明らかにする
・相互作用及び移行挙動をモデル化し、影響を評価

地下水中のコロイド等の分析

茂原ガス田の地下水中有機物分析結果

採取深度(m)	742~1,200	743~1,301	852~1,302
pH	7.82	7.81	7.69
Eh (mV)	-27	-57	-15
TOC (mg/l)	23±2	22±1	24±0
フルボ酸(mg/l)	3.5±0.2	3.4±0.1	3.3±0.2
フミン酸(mg/l)	<2	<2	<2
コハク酸(mg/l)	8.3±0.3	8.2±0.1	5.8±0.5

※フミン酸、フルボ酸、コハク酸、アミノ酸、糖類、有機酸、有機塩基(2 mg/l)以下

JIS・学会の提唱する方法等標準的な手法を用いて地下水中有機物を分析。

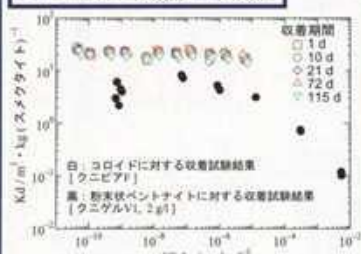
→手法の適用可能性が確認された

ベントナイトコロイドの生成

緩衝材のベントナイトからベントナイトコロイドが生成する可能性がある。

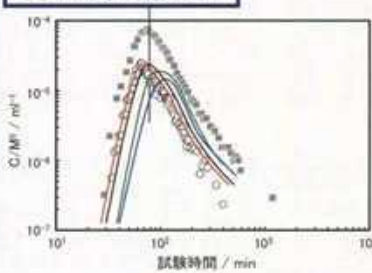
→生成挙動を調べ、モデル化を検討

コロイド等への核種の収着



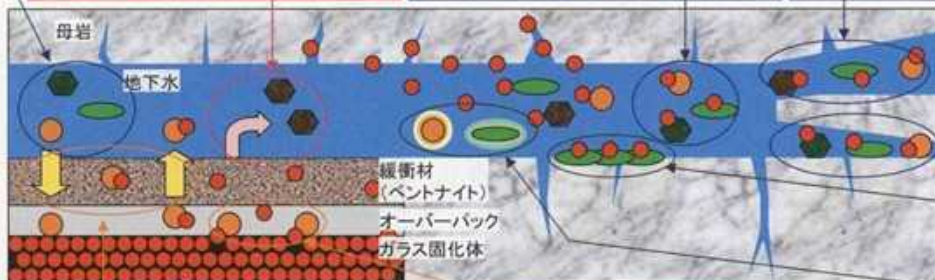
ベントナイトコロイドへのCsの分配係数
ベントナイトコロイドに対するCsの収着特性を調べた。
→コロイドは薄いシート形状で、粉末ベントナイトよりCsを収着しやすい
→収着サイトは1種類で可逆的

コロイド移行挙動評価



→Amの場合、コロイドとの速度論的収着及びHDC現象を考慮した解析結果は、試験結果とよく一致した
GWC: 地下水コロイド(groundwater colloid)の略
コロイド・核種移行原位置試験におけるAm移行挙動

破砕帯を含む岩盤にコロイドと核種を注入して実施した原位置移行試験結果を、COLFRACを用いて解析した。



フィルトレーション効果

核種を収着したコロイド等が、狭い亀裂等に捕捉され、結果的に核種の移行を遅延させる可能性がある。

→挙動を調べ、モデル化を検討

バイオフィルムの形成

亀裂表面を覆う微生物が核種を収着し、その移行を遅延させる可能性がある。

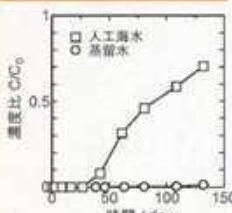
→具体的な現象を調べ、取扱いを検討

地下水化学の変化

微生物や有機物が、地下水のpH/Eh等の化学的特性を変える可能性がある。

→具体的な現象を調べ、取扱いを検討

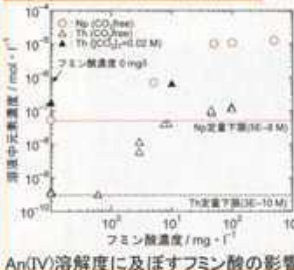
有機物の緩衝材透過



ポリアクリル酸(PAA)の圧縮ベントナイト透過特性を評価。
→限界分子量は450,000以下
→塩濃度が高い方が透過しやすい

分子量15,000のPAAの圧縮ベントナイト透過曲線(450,000は透過せず)

有機物と核種との錯形成



Th(IV)・Np(IV)溶解度に及ぼすフミン酸の影響を評価。
→競合する配位子がない場合、数mg/lのフミン酸で溶解度は有意に増加
→炭酸が0.02M存在するとフミン酸の影響は有意でない

An(IV)溶解度に及ぼすフミン酸の影響

主な成果

- ・地下水中コロイドの分析: 分析手法の検討
- ・コロイドへの核種収着: ベントナイトコロイドへの収着特性取得
- ・コロイド移行挙動評価: 影響評価コードCOLFRACの開発
COLFRACを用いた核種・コロイド移行挙動原位置試験(CRR)の評価

今後の課題

- ・地下水中コロイドの分析: 分析事例拡充と分析手法確立
- ・ベントナイトコロイドの生成: 緩衝材からの生成挙動評価
- ・コロイドへの核種収着: ベントナイトコロイドからの脱離特性取得
- ・フィルトレーション効果: 効果のモデル化
- ・コロイド移行挙動評価: COLFRACを用いたコロイド生成・移行挙動原位置試験(CFM)の評価

コロイド

主な成果

- ・地下水中有機物の分析: 分析手法適用性の確認
- ・緩衝材透過特性: ポリアクリル酸の透過特性の取得
- ・核種との錯形成: フミン酸と核種の錯形成に関するデータの取得
(フミン酸濃度の影響、炭酸との錯形成競合)

今後の課題

- ・地下水中有機物の分析: 幌延地下水の分析
- ・緩衝材透過特性: フミン酸・フルボ酸の透過特性の取得
- ・核種との錯形成: フミン酸と核種の錯形成に関するデータの取得
(錯形成の可逆性、相互作用モデル選定、安定度定数の評価)

主な成果

- ・コロイド的挙動を示す微生物影響のCOLFRACによる評価
- ・微生物に固有な現象を考慮した微生物影響評価モデルの開発
(地下水化学の変化、バイオフィルムの形成)

微生物

有機物



3-8 不均質場における移行経路の不確実性評価手法の開発

核燃料サイクル開発機構 東海事業所 処分研究部
澤田 淳, 武部 篤治

1. 研究の背景

地下水流動の調査計画立案に際しては、地下水流動に与える因子（地形勾配、地質・地質構造、不均質性、透水特性など）の重要度分類に応じた調査優先度が決定される。しかし、評価対象とするスケールに対して取得可能なデータ量は限定されることが多く、それが各段階における調査結果を踏まえた重要度分類や調査優先度の見直しによる調査計画の最適化を阻害している場合がある。このような観点から、データフローやワークフローを用いた調査から評価に至るデータや作業の流れの明示化やそれらのフローに介在する不確実性の定量化と、その不確実性がフローの下流側へ与える影響を分析し、意思決定手法などを用いた調査と評価の繰り返しによりプロジェクト全体をマネジメントする考え方が示されてきている¹⁾。図1は水理地質構造のモデル化に介在する不確実性を、地質構造モデルの不確実性と水理特性値の不確実性に分類してそれぞれの不確実性の定量化とそれらを用いた地下水流動評価の流れを整理したものである。地下水流動解析において、これまででは決定論的手法が用いられることが多かったが、近年それぞれの定量化手法の提示とともにモンテカルロ法による検討が行われてきた。しかし、モンテカルロ法は決定論的な解析を何回も繰り返して結果の統計量を評価するため、統計的に有意な数の決定が必要であり、解析時間が膨大となる欠点がある。このような問題に対して、本研究では「確率論的有限要素法」を浸透流に適用するとともに、地下水移行経路長の不確実性の定量的評価手法を開発した。

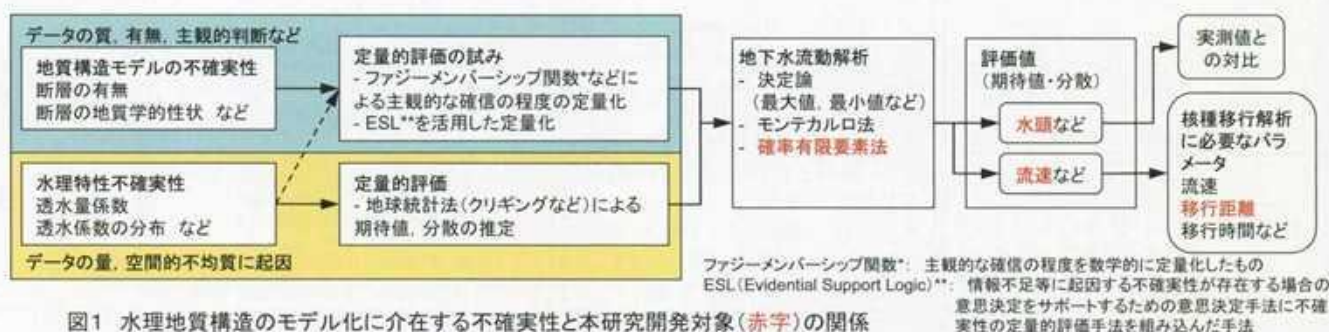


図1 水理地質構造のモデル化に介在する不確実性と本研究開発対象(赤字)の関係

2. 浸透流を対象とした確率有限要素法²⁾

浸透流を対象とした確率有限要素法は透水性係数の推定値と推定誤差を入力とし、圧力水頭や流速について確率的な評価(推定値と推定誤差)を直接的に行うことが可能で、モンテカルロ法に比べて計算時間が短縮される利点がある。本研究においては、図2に示す任意点からの移行距離の推定誤差評価への拡張を行った。

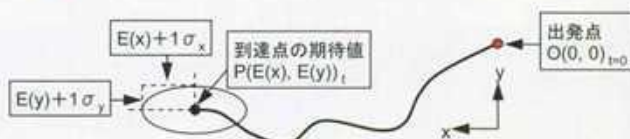


図2 任意点からの移行到達点の予測範囲概念図

3. 二次元鉛直断面における検討事例³⁾

岐阜県東濃地域のMIU1~3孔で測定された透水試験データから3孔を含む鉛直断面において透水性係数分布をクリギングにより推定した結果を用いて、モンテカルロ法による移行到達点(図3)と確率論的有限要素法による移行到達点の予測範囲(図4)の違いを比較した(図5)。

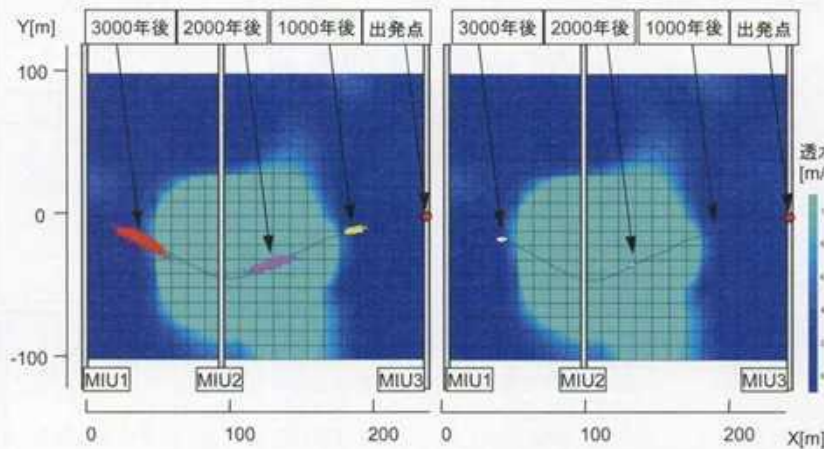


図3 モンテカルロ法(1000回)による移行到達点
解析時間: 225秒

図4 確率論的有限要素法による移行到達点の予測範囲(期待値 $\pm 1\sigma$)
解析時間: 16秒

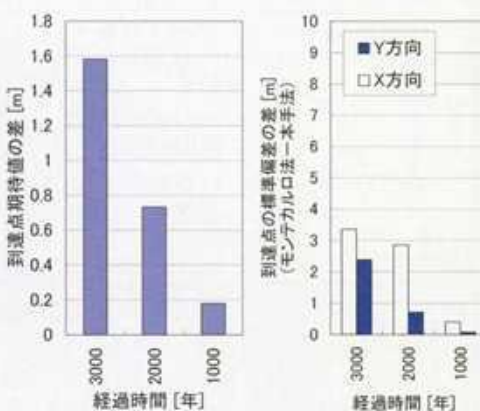


図5 確率論的有限要素法とモンテカルロ法の差

4. まとめ

処分場を含む地下水の涵養域から流出域までの比較的大きなスケールを対象とした地下水流動評価手法整備の一環として、浸透流に対する確率論的有限要素法を活用した不確実性評価に対する考え方を整理するとともに任意点からの移行距離の推定誤差評価手法を開発した。本手法はモンテカルロ法に比べて計算効率が良く、ほぼ同様の結果を得た。

今後は、本解析手法の三次元化などの機能拡張を進めるとともに、実際の地質環境データを用いた適用事例を蓄積してゆく必要がある。

参考文献

- 1) 例え、核燃料サイクル開発機構: 超深地層研究所計画における調査研究の考え方と進め方(平成15年度~17年度)、JNC TN7400 2004-008、2004。
- 2) 例え、田中靖治: 岩盤水理特性の評価法と確率論的浸透流解析に関する研究、東京大学博士論文、1998。
- 3) 吉野尚人ほか: 不均質場における地下水流動の不確実性評価手法の開発 - 特定移行経路における移行距離の不確実性評価 -、土木学会第59回年次学術講演会、CS1-020、2004。

JNC

Japan Nuclear Cycle Development Institute

<http://www.jnc.go.jp/>