



平成19年度

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報告会

瑞浪，幌延における地上からの調査研究の成果報告
—地層処分の技術と信頼を支える研究開発：概要調査への技術基盤の確立—

要旨・スライド・ポスター



(独) 日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門

平成19年9月18日(火) JAホール

表紙紹介



①



③



②



④

- | | |
|-----------------------|------------|
| ①200m予備ステージでの坑壁観察（瑞浪） | 平成19年5月撮影 |
| ②地下施設建設工事現場（瑞浪） | 平成16年12月撮影 |
| ③地下施設建設工事現場（幌延） | 平成19年7月撮影 |
| ④ゆめ地創館（幌延PR施設） | 平成19年6月開館 |

本資料の全部又は一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

独立行政法人日本原子力研究開発機構
 地層処分研究開発部門
 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33
 TEL：029-287-3247
 FAX：029-287-1540

瑞浪，幌延における地上からの調査研究の成果報告

—地層処分の技術と信頼を支える研究開発：概要調査への技術基盤の確立—

(平成 19 年 9 月 18 日(火), 13:00~17:00, JA ホール)

プログラム

- ## 2. 原子力機構報告 [13:10~15:10]

[座 長] 小島 圭二 (地圏空間研究所)

- ### ① 全体概要

地層処分研究開発部門 副部門長 石川 博久

- ## ② 瑞浪超深地層研究所における花崗岩の調査研究

地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット長 坂巻 昌工

- ### ③ 幌延深地層研究所における堆積岩の調査研究

地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット長 福島 龍朗

- #### ④ 地層処分システムの工学技術と安全評価手法への活用

地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット長 油井 三和

- ## ⑤ 研究開発成果の知識化

地層処分研究開発部門 研究開発統括ユニット研究主席 梅木 博之

～ ポスターセッション・休憩 ～ [15:10～15:35]

- ### 3. パネルディスカッション [15:35~16:55]

テーマ「瑞浪、幌延の今後の進め方ー深地層の研究に何を期待するか?ー」

「ヨーディネーター」 西垣 誠 (岡山大学)

[パネリスト] 小島 圭二 (地圏空間研究所)

朽山 修 (東北大学)

中村 浩美 (科学ジャーナリスト)

北山 一美 (原子力発電環境整備機構)

川上 博人 (原子力安全基盤機構)

河田 東海夫（地層処分研究開発部門）

4. 閉会挨拶 理事 三代 直彰 [16:55~17:00]

瑞浪, 幌延における地上からの調査研究の成果報告：全体概要

瑞浪，幌延における地上からの調査研究の成果報告：全体概要

地層処分研究開発部門
副部門長 石川博久

1. はじめに

独立行政法人 日本原子力研究開発機構（原子力機構）は、わが国における地層処分技術に関する研究開発の中核的機関として、原子力発電環境整備機構（原環機構）による処分事業と、国による安全規制の両面を支える技術基盤を継続的に強化していくため、他の研究開発機関と連携して基盤的な研究開発を進めている。その中核となる研究施設として、岐阜県の瑞浪超深地層研究所と北海道の幌延深地層研究所の２つの深地層の研究施設計画を進めているところであるが、今般、第１段階である地上からの調査研究段階の成果を報告書として取りまとめた。

本稿では、２つの深地層の研究施設計画を中心に、原子力機構における地層処分技術に関する研究開発の概略を報告する。

2. 地層処分技術に関する研究開発

1) 研究開発の概要

わが国における高レベル放射性廃棄物の地層処分計画は、核燃料サイクル開発機構（サイクル機構）が平成 11 年に公表した地層処分研究開発の「第２次取りまとめ」（サイクル機構，1999）を技術的な拠り所として、研究開発だけの段階から、研究開発と並行して地層処分の事業と安全規制の施策を進めていく事業段階へと進展した。事業段階における研究開発の目的は、「第２次取りまとめ」が示した「わが国における地層処分の技術的信頼性」をさらに向上させ、国民の理解を促進するとともに、処分事業や安全規制の技術基盤を強化していくことにある。

平成 17 年 10 月に、サイクル機構と日本原子力研究所の統合により発足した原子力機構は、サイクル機構が進めてきた「地層処分技術に関する研究開発」を全面的に引継ぎ、主要業務のひとつとして実施している（原子力機構，2005）。具体的には、地層処分研究開発部門が中心となり、また、東濃地科学センター（岐阜県土岐市・瑞浪市）、幌延深地層研究センター（北海道幌延町）および東海研究開発センター（茨城県東海村）の３つの研究センターが、それぞれの役割を分担して研究開発を進めている。

原子力機構における研究開発は、サイクル機構時代と同様、地層処分システムにかかわる工学技術的信頼性向上と安全評価手法の高度化を目指した「地層処分研究開発」と、その基盤となる「深地層の科学的研究」から構成される。「地層処分研究開発」としては、東海研究開発センターにおける地上の実験施設を活用した、人工バリアの長期的な健全性や放射性物質の溶解・移行などに関するデータの充実とモデルの高度化、あるいは、深地層の研究施設で得られるデータを用いた地層処分システムの設計・安全評価手法の適用性確認などを進めている。「深地層の科学的研究」では、自然科学的なアプローチを取り入れつつ、深地層の研究施設などを活用して、地質環境を調査・評価する技術の体系化や適用性確認などを進めている。

2) 研究開発の目標と深地層の研究施設計画

「第２次取りまとめ」以降の事業段階における研究開発には、地層処分技術的信頼性をさらに高め、処分事業や安全規制の段階的な進展にあわせて、そ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。これに応えるため、原子力機構では、「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」と「地層処分システムの長期挙動の理解」の２つの研究開発目標を定めている。前者は、これまでに整備してきた地層処分に関連する様々な技術を実際の地質環境へ適用することを通じて、その信頼性や実用性を確認していくことであり、後者は、処分システムに関連する様々な現象への理解をさらに深めながら、モデルやデータベースを

改良し、評価の信頼性や裕度を高めていくことである。このうち、第 1 の目標である「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」を目指した総合的な研究開発の場となるのが深地層の研究施設である。

深地層の研究施設については、わが国の地質環境の特性と分布を考慮して、結晶質岩を対象とした瑞浪超深地層研究所（岐阜県瑞浪市）および堆積岩を対象とした幌延深地層研究所（北海道幌延町）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段階」（第 1 段階）、「坑道掘削時の調査研究段階」（第 2 段階）、「地下施設での調査研究段階」（第 3 段階）の 3 段階からなる、全体で 20 年程度の計画である。

3. 深地層の研究施設計画

1) 深地層の研究施設の役割

深地層の研究施設では、様々な技術を実際の地質環境に適用して、段階的に調査研究を進めながら、順次得られてくる情報に基づき、理解の程度と進展を確認していく。調査研究を段階的に進めることにより、地下深部の地質環境についての理解を深めながら、これを体系的に調査・解析・評価するための技術基盤を整備していくことがねらいである。また、得られた地質環境情報に基づき、地下の研究坑道を設計・施工していくことを通じて、深地層中での様々な調査や試験に必要な地下空間を確保・維持するための工学技術の基盤を整備していく。これら、「地質環境の調査・解析・評価技術」と「深地層における工学技術」の基盤を整備していくことが、深地層の研究施設計画における重要な技術課題である。

さらに、「深地層の科学研究」を通じて得られる情報や知見、あるいは岩石や地下水の試料などは、地層処分研究開発における重要な基盤情報となる。調査の進展に応じて得られる地質環境情報を活用して、設計手法や安全評価手法の検討を繰り返し進めることにより、地層処分技術全体としての適用性を確認し、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していく。また、深地層の研究施設における特定の地質環境と比較検討しながら、条件を制御した工学試験や放射性核種を用いた試験を行うことにより、地層処分システムに関連する様々な現象に対する理解や一般化を進め、設計・安全評価にかかわる技術の信頼性向上をはかっていく。加えて、幌延深地層研究所においては、堆積岩における人工バリアの施工・定置技術の開発や性能試験など、研究坑道を利用した地層処分研究開発をあわせて実施する。

深地層の研究施設は、「学術研究の場であるとともに、国民の地層処分に関する研究開発の理解を深める場としての意義を有し、その計画は、処分施設の計画と明確に区分して進めることが必要」（原子力委員会、2000）とされている。深地層の研究施設計画を進めるにあたっては、国内外の研究機関や専門家との研究協力を積極的に進め、広く学術的な研究の場としての活用をはかるとともに、国民が地下深部の環境を実際に体験・学習し、研究者との対話を通じて、地層処分やその研究開発に対する理解を深める場としても整備していく。また、計画の内容や得られた成果については、地域の方々をはじめ広く国民に公開しつつ、透明性の確保に努めていく。

なお、深地層の研究施設においては、放射性廃棄物を持ち込まないことや将来にわたって処分場としないことなどを、関係自治体との協定により約束している。

2) 深地層の研究施設計画の現状

2 つの深地層の研究施設計画は、地域の方々をはじめとする関係各位の理解と協力のもと、着実に進展してきている。瑞浪超深地層研究所においては平成 16 年度をもって、また、幌延深地層研究所においては平成 17 年度をもって、地上からの調査研究段階（第 1 段階）を終了した。現在は、第 2 段階として、実際に地下に研究坑道を掘削しながら調査研究を進めている。掘削時の調査によって得られる地質環境データに基づき、第 1 段階に構築した地質環境モデルを確認し、地上からの調査技術やモデル化手法の妥当性を評価することが重要な目的である。また、坑道掘削にかかわる施工技術や対策技術あるいは掘削影響を評価する技術の適用性などを確認しながら、施設建設と調査研究の最適化を図っている。以下、2 つの深地

層の研究施設における地上からの調査研究および坑道掘削工事の進展状況の概略を示す。

(1) 瑞浪超深地層研究所

平成 8 年度から、超深地層研究所計画として、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、現在の瑞浪超深地層研究所用地（市有地）において、物理探査やボーリング調査などを実施した。ボーリング調査としては、花崗岩を覆っている上部の堆積岩を対象とした深度 200m 程度までの浅層ボーリング調査（4 孔）、花崗岩を対象とした深層ボーリング調査（掘削長 1,300m の傾斜孔）、ボーリング孔間での水理試験やトモグラフィー調査などを実施した。これらの調査を通じて、花崗岩中の割れ目の分布や地下水の水質・起源などに関するデータを取得しながら、地上からの調査研究段階における地質環境モデルを更新していった。平成 17 年 3 月に地上からの調査研究段階を終了したが、既設のボーリング孔においては、長期的な変化や研究坑道の掘削による影響を観測するため、地下水（水質・水圧）のモニタリングを継続している。

また、地上からの調査研究と並行して、平成 14 年度に用地の造成工事を行い、平成 15 年 7 月に研究坑道（主立坑および換気立坑）の掘削を開始した。平成 19 年 8 月末現在、2 本の立坑を深度 200m まで掘削し、深度 200m における水平坑道を掘削中である。

(2) 幌延深地層研究所

平成 12 年度末から、幌延町の広い範囲を対象とした空中からの物理探査や代表地点でのボーリング調査などを行い、その結果を踏まえて平成 14 年 7 月に、調査研究を中心的に行う領域として 3km 四方程度の区域を幌延町北部に選定した。その後、この区域を中心に地表での物理探査やボーリング調査（計 11 孔）などを実施しながら、地質環境モデルの作成・更新を進め、平成 18 年 3 月に地上からの調査研究段階を終了した（既設のボーリング孔での地下水モニタリングを継続）。

また、平成 15 年 3 月には研究所を建設する用地を取得し、同年 7 月に用地の造成工事に着手した。平成 16 年度は、造成工事と並行して、地上施設（研究管理棟など）の建設を進め、平成 17 年 11 月から、研究坑道の掘削を開始した。平成 19 年 8 月末現在、換気立坑を深度 75m まで、アクセス立坑（東立坑と西立坑）のひとつである東立坑を深度 44m まで掘削した。

3) 地上からの調査研究段階の成果報告書

今般、瑞浪と幌延の深地層の研究施設計画における地上からの調査研究段階（第 1 段階）を通じて得られた成果を報告書として取りまとめた。第 1 段階における調査研究の達成度を評価し、第 2 段階以降における調査研究の課題や方向性を具体化するうえでの重要なステップである。報告書は、瑞浪超深地層研究所における深地層の科学研究に関する 1 冊と、幌延深地層研究所における深地層の科学研究と地層処分研究開発に関する 2 分冊から構成される。

本報告書は、結晶質岩と堆積岩というわが国を代表する 2 つの地質を対象に、地上からの物理探査やボーリング調査などにより、地質環境を総合的に調査・評価することを通じて得られた成果を網羅的に取りまとめたものである。原環機構が処分地の選定に向けて行う概要調査や地上からの精密調査の技術基盤として、また、国が策定する概要調査のガイドラインや精密調査地区の環境要件などの検討作業を進めるうえでの基盤情報として活用されることを期待している。

現実の地形・地質条件や社会的な制約などに対応しつつ、不均質性を有する地質環境を理解していくためには、単にデータ取得に必要な調査技術や機器を整備するだけではなく、現場での経験を積み、実際の適用事例に学ぶことが重要となる。第 1 段階の調査研究を進めるにあたっては、学術的な成果や技術開発の実績だけではなく、失敗事例なども含めた経験やノウハウを重要な研究の成果と認識し、それらをできるだけ知識化、体系化して継承していくことに留意した。淡々と調査を進めるのではなく、調査の段階とその進展を明確に意識して、段階ごとに計画から実施、評価までの流れを意図的に繰り返していくアプローチをとっ

た。第 1 段階の成果取りまとめにおいては、地上からの調査研究という実地経験を通じて得られたノウハウや知見、教訓などについても、出来るだけ整理して盛り込むことに心がけた。

4. 今後の予定

瑞浪と幌延の深地層の研究施設計画については、坑道を掘削しながら調査研究を進める第 2 段階が本格化している。原環機構が行う処分地選定のための調査は、最終処分法に基づいて、文献調査、概要調査、精密調査（前段の地上からの精密調査と後段の地下施設を利用した精密調査）と段階的に進められるが、深地層へのアプローチの方法としては、概ね深地層の研究施設計画における「第 1 段階」が【概要調査】と【地上からの精密調査】に、また、「第 2 段階」および「第 3 段階」が【地下施設を利用した精密調査】に対応する。このうち、概要調査のための技術基盤は、「第 2 次取りまとめ」や今般の第 1 段階の研究成果取りまとめなどにより整備されてきた。今後は、地下施設の設置を前提として行われる地上からの精密調査の技術基盤を整備していく観点から、深地層の研究施設計画の第 2 段階に得られる地質環境データに基づき、第 1 段階に構築した地質環境モデルを確認することを通じて、地上からの調査技術やモデル化手法の妥当性を評価し、その信頼性を高めていく。

わが国の基盤研究開発を効果的・効率的に進めるための枠組みとして発足した「地層処分基盤研究開発調整会議」が平成 18 年 12 月に策定した「高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画」（資源エネルギー庁・原子力機構、2006）においては、地質環境調査評価技術に関する【フェーズ 2】（2006～2010 年度）の段階目標を「地上からの調査に関わる技術基盤の確立」、【フェーズ 3】（2011 年度以降）の段階目標を「地下施設を活用した調査に関わる技術基盤の確立」としている。

原子力機構は、この全体計画を進める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計画を推進していくとともに、東海研究開発センターの室内試験施設（エントリー、クオリティ）などを活用した地層処分システムの工学技術や安全評価にかかわる基盤的な研究開発を進めていく。また、成果の公表、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、開発・整備した技術の継承や研究者の育成、国民の地層処分に対する理解の増進に寄与していく。とくに、長期にわたる処分事業を支えていくためには、常に最新の科学的知見を集約・体系化しつつ、適切に次世代に継承していくことが重要となる。このため、地層処分の安全確保の考え方や安全性にかかわる様々な論拠を統合したセーフティケースの一般概念に照らしつつ、研究開発の成果や国内外の最新の知見を体系化し、知識基盤として適切に管理・継承していくことを目指した知識マネジメントシステムの開発を進めている。

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.

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 年度）.

資源エネルギー庁・日本原子力研究開発機構（2006）：高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画.

日本原子力研究開発機構（2005）：独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期目標を達成するための計画（中期計画）（平成 17 年 10 月 1 日～平成 22 年 3 月 31 日）.

全体概要

瑞浪, 幌延における地上からの調査研究の成果報告

—地層処分の技術と信頼を支える研究開発: 概要調査への技術基盤の確立—

平成19年9月18日 JAホール

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門

石川 博久

原子力機構における研究開発施設

1



(イメージ図)



東濃地科学センター

● 瑞浪超深地層研究所

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

● 幌延深地層研究所

深地層の科学的研究

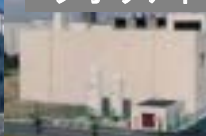
工学技術の信頼性向上

安全評価手法の高度化

東海研究開発センター

エントリー

クオリティ



工学技術の信頼性向上

安全評価手法の高度化

研究開発の目標と課題

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

研究課題

深地層の
科学的研究

地層処分研究開発

工学技術の
信頼性向上

安全評価手法
の高度化

地質環境特性の調査・
評価技術の開発

深地層における工学技術の
基礎の開発

処分技術の実際の地質
環境への適用性の確認

処分場閉鎖等の工学
技術の信頼性向上

安全評価手法の実際の地
質環境への適用性の確認

地質環境の長期安定性
に関する研究
(隆起・侵食、地震・断層活動、
火山活動、ナチュラルアナログ等)

人工バリア等の基本特性
データベースの開発

人工バリア等の長期複合
挙動に関する研究

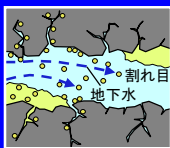
安全評価シナリオの充実
安全評価モデルの高度化
核種移行データベースの
整備

知識ベースの開発、知識管理システムの構築

2つの深地層の研究施設計画

瑞浪超深地層研究所
(岐阜県瑞浪市)

幌延深地層研究所
(北海道幌延町)

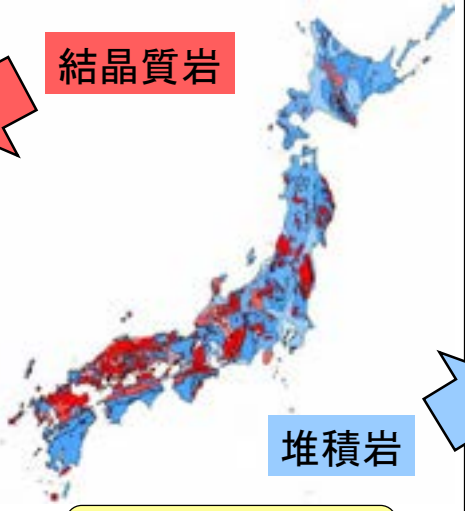


花崗岩
(結晶質岩)

淡水系

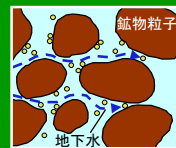
硬 岩

結晶質岩



堆積岩

わが国の地質の分布
(海拔-500m)



泥 岩
(堆積岩)

塩水系

軟 岩

深地層の研究施設計画の段階的な進め方

処分事業

文献調査

概要調査

精密調査

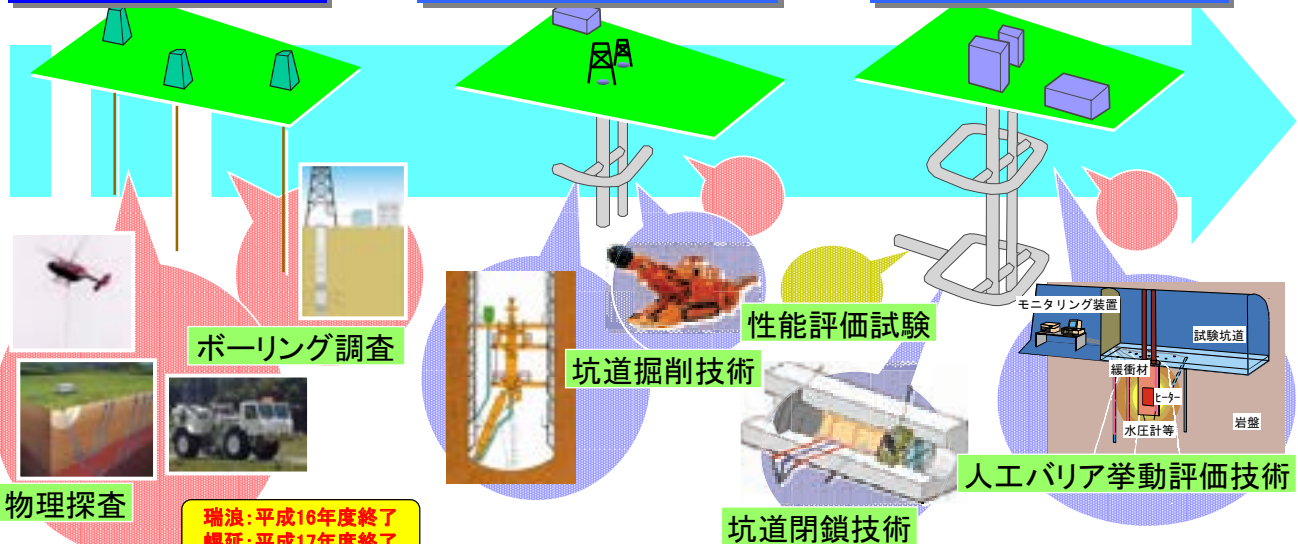
(ボーリング調査, トレンチ調査, 物理探査等) (地下水の流れや地層の性質等の詳細な調査)

深地層の研究施設

第1段階
地上からの調査研究

第2段階
坑道掘削時の調査研究

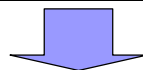
第3段階
地下施設での調査研究



第1段階の取りまとめの意義

<第1段階の目標>

- ①地上からの調査研究による地質環境モデルの構築, および坑道掘削前の深部地質環境の状態の把握
- ②地下施設(研究坑道)の詳細設計および施工計画の策定



概要調査地区において,

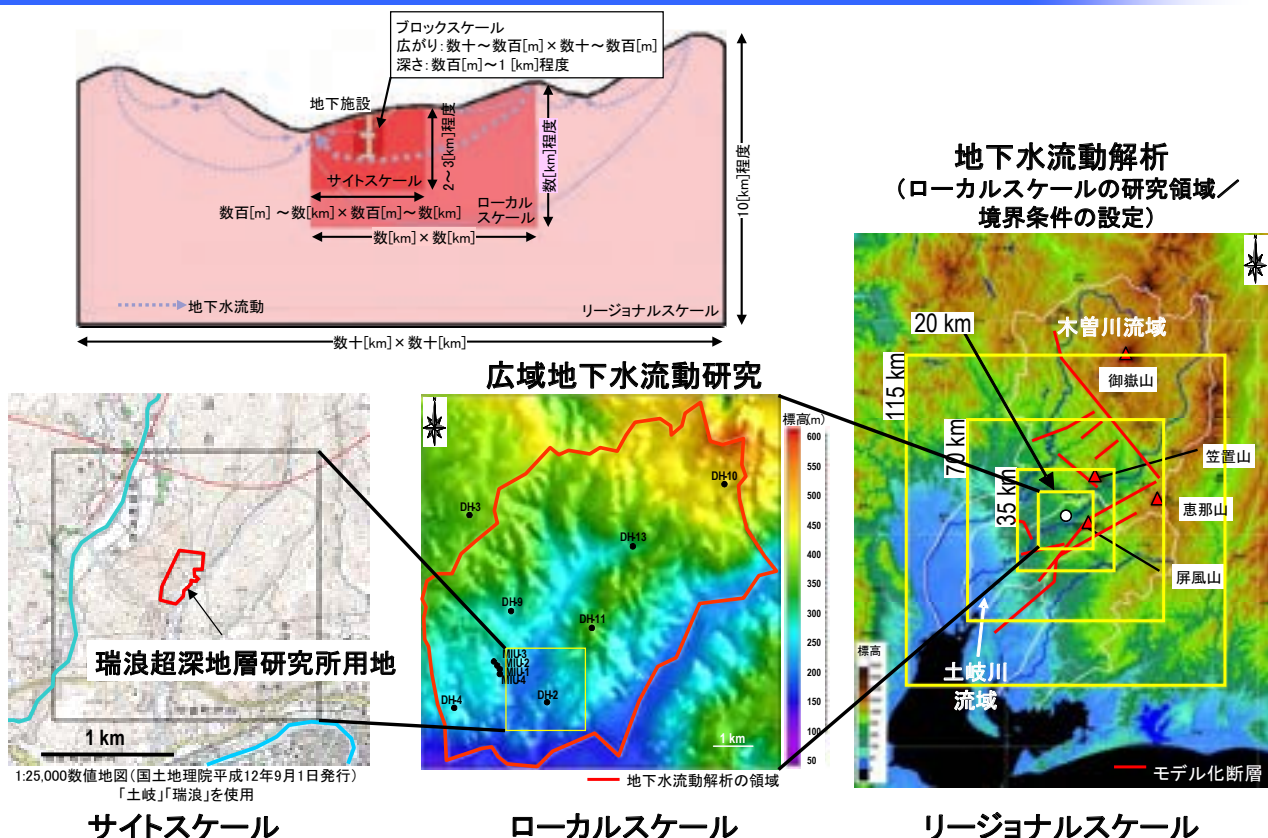
- どのように調査計画を立案するのか
- どのような方法で, どの程度の調査を行えばよいのか (不確実性の低減)
- どのような評価を行い, 何を判断して次に進めばよいのか などについての技術・知見・ノウハウを提供していく。

第1段階の調査研究（瑞浪・幌延）の特徴

瑞浪と幌延では、地質環境が異なるだけでなく、社会的制約などにより、調査研究の進め方が異なる（調査研究を進める上での考え方や調査研究の基本的な内容は共通）

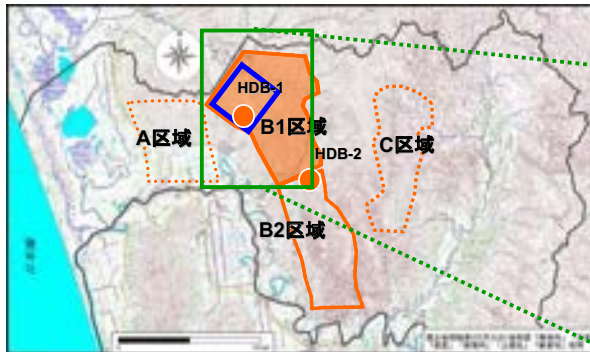
	超深地層研究所計画 (瑞浪超深地層研究所)	幌延深地層研究計画 (幌延深地層研究所)
場所	瑞浪市の市有地を賃貸借(given)	幌延町内から段階的に選定(selection)
プロセス・アプローチ	調査研究開始当初より、研究用地(約7.5ha)を含むサイトスケール(約2km四方)での調査*) ↓ 同一範囲(サイトスケール)での調査をステップに分けて実施(繰り返しアプローチ) *)広域地下水流動研究(約10km四方)を別途実施 「深地層の科学的研究」のうち、特に深部地質環境の調査・解析・評価技術を詳細に検討	幌延町全域から研究所設置地区(約3km四方)を選定 ↓ 研究用地(約19ha)を取得 研究所設置地区において主たる調査研究を展開 「深地層の科学的研究」に加えて、「地層処分研究開発」も合わせて実施

超深地層研究所計画と各調査スケールの関係(瑞浪)

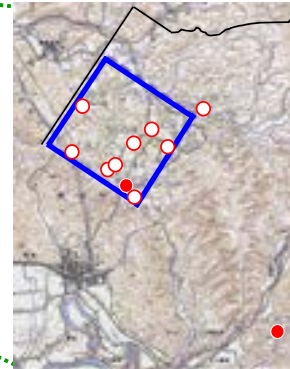


研究所設置地区の選定調査と選定後の調査(幌延)

**①幌延町全域から研究所設置地区
(3km×3km)を選定**



②研究所設置地区とその 周辺での調査

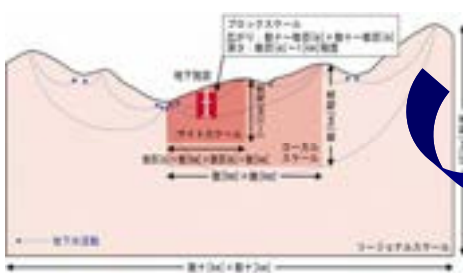


↓ 文献調査
4区域
↓ 文献調査, 地表地質調査, 物理探査
2区域
↓ ボーリング調査(2本), 詳細検討,
インフラ整備状況等
1区域

地表地質調査, 物理探査,
ボーリング調査(9本)
↓
地質環境モデルの構築

地上からの調査の進め方

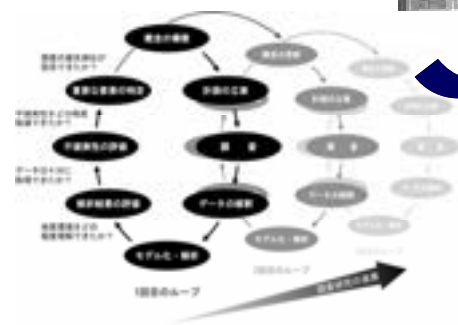
①空間スケールの設定



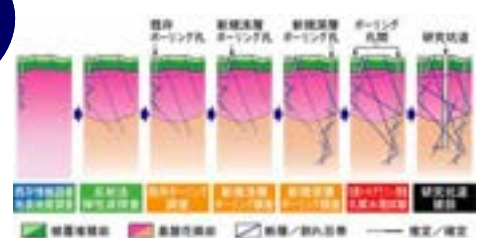
②個別目標と課題の設定

[illegible]

④繰り返しアプローチ

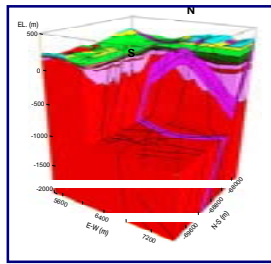


③第1段階における調査手順

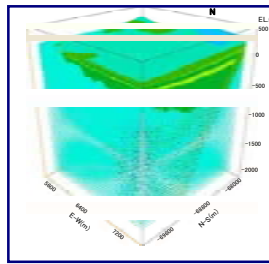


第1段階の成果例：地質環境モデルの構築

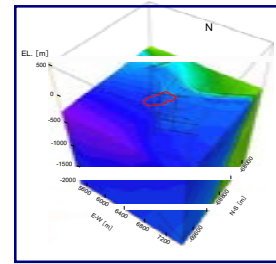
地質構造モデル～地下水流動解析の例（瑞浪）



地質構造モデル

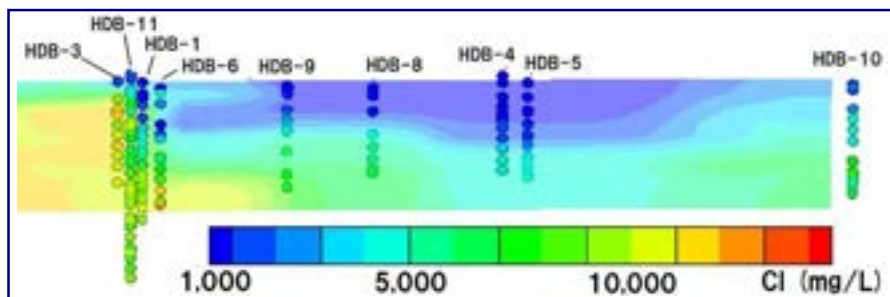


水理地質構造モデル



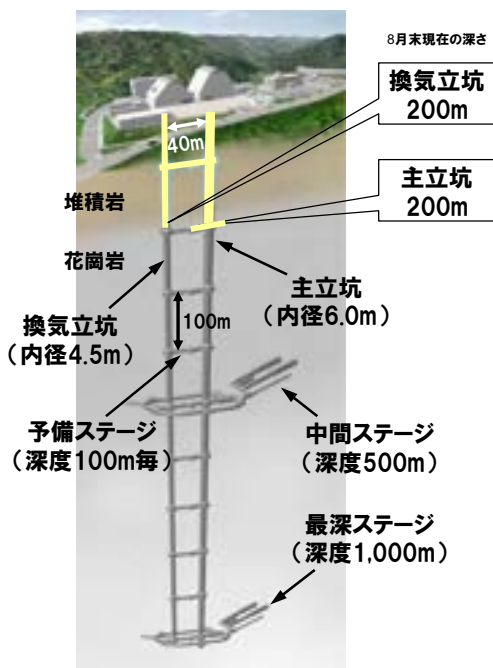
地下水流動解析
（ポテンシャル分布）

地球化学モデルの例（幌延）



地球化学モデル

瑞浪超深地層研究所の現状



地下施設イメージ
（H15.7 立坑掘削開始）

撮影：平成17年6月



100m予備ステージ貫通状況

撮影：平成19年5月



200m予備ステージでの坑壁観察

建設工事状況



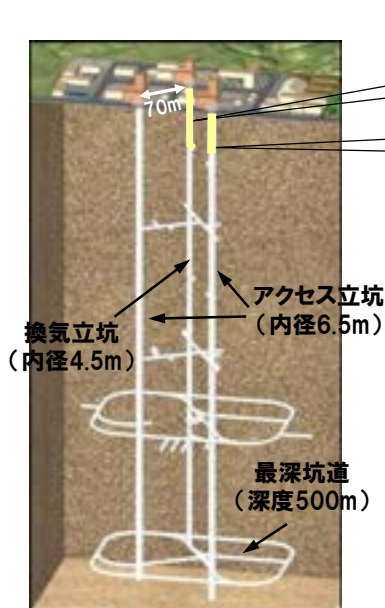
主立坑掘削状況



スカーフオード



幌延深地層研究所の現状



地下施設イメージ
(H17.11 立坑掘削開始)

8月末現在の深さ

換気立坑
75m

東立坑
44m

ゆめ地創館 (PR施設)



平成19年6月開館

東立坑櫓建屋



撮影: 平成19年8月

研究管理棟・試験棟



換気立坑掘削状況



撮影: 平成18年11月

地下施設建設工事状況



撮影: 平成19年4月

第1段階報告書の構成と本日の報告

<目次(大項目のみ)>

◎超深地層研究所計画(瑞浪)

1. 超深地層研究所計画の位置付けと役割
2. 超深地層研究所計画・第1段階調査研究の概要
3. 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備
4. 深地層における工学技術の基盤の整備

◎幌延深地層研究計画

「深地層の科学的研究」(分冊)

1. 段階的な地質環境調査研究の進め方
2. 研究所設置地区及び研究所設置場所の選定
3. 地上からの地質環境の調査研究
4. 深地層における工学技術の基礎の開発
5. 地下施設建設に伴う周辺環境への影響調査

「地層処分研究開発」(分冊)

1. 処分技術の信頼性向上 —設計手法の適用性の確認—
2. 安全評価手法の高度化 —安全評価手法の適用性の確認—

瑞浪超深地層研究所における花崗岩の調査研究

瑞浪超深地層研究所における花崗岩の調査研究

地層処分研究開発部門
東濃地科学研究ユニット
ユニット長 坂巻 昌工

1. はじめに

独立行政法人 日本原子力研究開発機構（原子力機構）では、岐阜県瑞浪市の瑞浪超深地層研究所において結晶質岩を対象として、「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）や「原子力政策大綱」（原子力委員会，2005）に示された深地層の研究施設計画（超深地層研究所計画）を進めている。本年3月に、地表からの調査予測研究段階（第1段階）の報告書を取りまとめた（三枝他，2007）。本報告書は、原子力発電環境整備機構（原環機構）が行なう概要調査および精密調査における地上からの調査ならびにこれらに対する安全規制に対して技術基盤の強化を図るものである。以下、その概要を述べる。

2. 超深地層研究所計画における調査研究の目標

超深地層研究所計画は、以下の2つを全体目標として、「第1段階：地表からの調査予測研究段階」、「第2段階：研究坑道の掘削を伴う研究段階」、「第3段階：研究坑道を利用した研究段階」の3つの段階に区分して調査研究を進める計画である（サイクル機構，2002）。

- 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」

以下に2つの目標の概要を示す。

1) 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備

地質環境の特性として重要な地下水の動きや性質、岩盤の熱・力学特性、岩盤中での物質の挙動、坑道掘削が周辺の岩盤に与える影響などを明らかにしていくものであり、超深地層研究所計画を通じて、深部地質環境への理解を深めながら、これを体系的に調査・解析・評価するための技術基盤を整備していく。

具体的には、超深地層研究所計画における調査研究を段階的に進めながら、これまでに整備してきた地質環境の調査技術や評価手法などを実際の地質環境に適用していくことを通じて、その信頼性や適用性などを確認していく。その過程で、地質環境への理解や取得する地質環境情報の精度の向上を図りつつ、地質環境モデルの検証や調査・評価技術の改良を進め、段階ごとに、実際の地質環境に適用可能な技術として体系化していく。

2) 深地層における工学技術の基盤の整備

研究坑道を設計・施工・維持していくことを通じて、地層処分に特有の「情報の取得や技術の実証を目的とした地下施設」を設置するための工学技術の基盤を整備していくものである。すなわち、研究坑道の建設自体が目的ではなく、地質環境を理解するための調査手段として、また深部の地質環境に到達し試験を行う場を確保するために、地下に施設を展開し維持していく技術である。このような研究坑道の設計、施工及び維持管理を通じて培われた技術や経験は、実際の処分事業において、最終処分施設建設地の選定に向けた精密調査の後段に実施される地下施設を利用した調査の技術基盤として活用されることになる。

3. 第1段階報告書の位置づけ

超深地層研究所計画の2つの全体目標である、「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」および「深地層における工学技術の基盤の整備」に対して、第1段階では以下の2つを段階目標として調査研究を進めた

- 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」

この取りまとめは、超深地層研究所計画の全体目標を踏まえて設定した第 1 段階における段階目標に対して、その達成度と今後の課題を明らかにするとともに、第 2 段階以降における調査研究の方向性を具体化するうえで重要な意味を持っている。また、ここで取りまとめる成果は、地層処分技術の知識基盤として、特に原環機構が実施する概要調査や精密調査、並びに国が進める安全規制の両面を支える技術基盤の強化を図っていくうえで、有効に活用されるものであることが重要となる。

以上のような状況を踏まえ、本報告書では、「第 1 段階目標に対して調査研究の成果を適切に取りまとめるとともに、課題を抽出・整理し、第 2 段階以降の調査研究における具体的課題を抽出すること」を目標として設定し、第 1 段階におけるすべての調査研究の成果を整理した。また、取りまとめを進めていくにあたっては、取得したデータや結果のみならず、一連の調査・解析・評価の方法論や深地層における工学的な技術、さらには実際の調査研究を通じて得られた知見（ノウハウや失敗例）を整備することに留意した。

4. 第 1 段階の研究成果報告書の構成

本報告書は、全体で 5 章から構成される。

第 1 章「超深地層研究所計画の位置付けと役割」では、わが国の深地層の研究施設計画の位置付けと役割を概観し、超深地層研究所における研究計画の概要および第 1 段階成果の取りまとめの目標などについてまとめた。第 2 章「超深地層研究所計画・第 1 段階調査研究の概要」では、第 1 段階における調査研究の目標や進め方について概括した。第 3 章「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」では、第 1 段階の目標である「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状態の把握」に関する成果を取りまとめた。具体的には、第 2 章で設定した調査研究の個別目標と課題に関する調査研究の成果に基づき、結晶質岩を対象とした第 1 段階の調査・解析・評価技術に関する技術的知見を整理するとともに、第 2 段階の調査研究に向けた深部地質環境とその変化の予測結果について取りまとめた。第 4 章「深地層における工学技術の基盤の整備」は、第 1 段階の目標である「研究坑道の詳細設計および施工計画の策定」の成果を取りまとめた。具体的には、硬岩を対象とした研究坑道の設計・施工対策技術および安全確保技術などについて取りまとめた。最後の第 5 章「おわりに」では、第 1 段階における成果を総括するとともに、今後の展開について記述した。

5. 第 1 段階調査研究の実施内容

超深地層研究所計画では、瑞浪市と市有地賃貸借契約を締結した研究用地において研究坑道の設置を伴う調査研究を実施することとし、「安全評価」、「地下施設の設計・施工」及び「環境影響評価」の観点から調査・評価すべき地質環境の特性やプロセスとして、具体化を図るとともに整理を行い、それらを把握することを調査研究の個別目標と課題として設定した。

また、安全評価及び地下施設の設計・施工への研究成果の反映を念頭に置いて、不均質性を有する地質環境を、限られた調査量で効率的に理解していくために空間スケールの設定を行い、超深地層研究所計画で対象とする空間スケール（サイトスケール）を定義した。サイトスケールより広いスケール（リージョナルスケール、ローカルスケール）は、「広域地下水流動研究」として別途実施した。

さらに、第 1 段階の調査研究では、既得情報整理／地表地質調査から孔間トモグラフィ探査／孔間水理試験までの 6 つの調査項目を設け、それらを 5 つの調査ステップにグループ化して、この調査ステップごとに繰り返しアプローチを用いた調査研究を展開した。それぞれのステップにおいて、調査研究で得られた情報に基づき地質環境モデルを構築し、次の段階における調査研究の対象を抽出・特定した。このような考え方に基づき調査・解析・評価を行うことによって、調査の種類や量と、個別目標と課題に対する理解度や不確実性との関連性を事例的に明らかにした。

6. 成果とその反映

1) 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備

瑞浪超深地層研究所における調査研究を開始する前に文献等により取得された既得情報を整理（ステップ 0）し、個別目標として設定したサイトスケール領域における地質構造の三次元分布や地下水の流動特性、地下水の地球化学特性などの項目の概略を把握した。次に、地表地質調査や反射法弾性波探査（ステップ 1）によって岩相境界や不連続構造の位置を面的に推定し、各岩相や不連続構造の特性をボーリング調査（ステップ 2, 3）によって評価した。なお、ボーリング調査においては、時間的な制約を考慮して既存の深層ボーリング調査と新規浅層ボーリング調査（ステップ 2）を同時期に実施したため、これらを一つの調査ステップとしてまとめることとした。さらに、孔間トモグラフィ探査や孔間水理試験（ステップ 4）によって、ボーリング孔間における不連続構造の位置及び幾何学的形状の同定、水理特性やその連続性を評価した。このような流れで調査研究を進める際に、調査研究の進展に伴う情報の種類・量と地質環境の理解度や調査研究の達成度との関係を順次評価するとともに、この評価結果に基づき次の調査研究における重要要素を抽出・特定して調査計画に反映した。その結果、地層処分にとって重要な地質環境特性を効率的に理解することができた。

また、取得するデータの種類、データの解釈及び異なる分野で得られた情報の統合などの観点から調査ステップごとに、調査から評価までの合理的な道すじ（系統的なデータの流れ）を統合化データフローとして事例的に整理した。

調査研究を行う際には、調査対象項目を明確にするとともに、時間や予算などの制約条件を考慮した調査項目や調査手法の最適化及び合理化を図った調査研究計画を策定することが重要である。また、品質が保証されたデータを取得するためには、個別の調査研究における品質管理体系と実施体制作りが重要である。これらのことが、実際の地質環境を対象とした調査研究をとおして再確認された。

さらに、調査研究をとおして得られた技術的知見、失敗事例やノウハウなどについては、処分事業や安全規制に対して有益な情報となることから、処分事業や安全規制の基盤技術として知識化を図るため各ステップ毎に「処分事業や安全規制のための技術基盤」を項目として設け記述したほか、「地質環境の調査・評価技術の整備」の章においても記述した。研究開発の個別目標と課題の設定、空間スケールの設定による段階的な進め方及び統合化データフローによる調査から評価までの道すじの明示、さらには、それらに基づいた報告書における記述構成などは、知識化の一端をなすものである。

このように、東濃地域を事例とした調査研究をとおして、実際の地質環境に適用可能な一連の地表からの調査・解析・評価技術（技術基盤）の整備を図るとともに、深部地質環境の様々な不均質性を理解し、地質環境特性（特に結晶質岩）に関するデータの蓄積を図り、繰り返しアプローチに基づく段階的な調査研究の実施をとおして、設定したそれぞれの個別目標と課題をほぼ達成し、その過程で多くの技術的知見を得た。一方で、第 1 段階において達成された課題を整理し、第 2 段階以降の調査研究における具体的課題を抽出した。

なお、実際の地質環境（結晶質岩）を対象とした調査研究をとおして整備した調査・評価技術や技術的知見などの多くの部分は、これまでの国外における同様の調査研究事例から、場所や地質環境条件などが異なっているにもかかわらず、与えられた場の地質環境特性の差異や与条件などを考慮し、適切に変更を加えることにより広く活用することができるものと考えられる。

2) 深地層における工学技術の基盤の整備

実際に取得された地質環境情報に基づいて研究坑道を設計・施工していくことを通じて、「情報の取得や技術の実証を目的とした地下施設」を設置・維持するための工学技術の基盤を確立していくことが重要である。

瑞浪超深地層研究所においては、調査研究に必要となる地下深部までの研究坑道を設計した。具体的には、地下施設の深さ、坑道レイアウトの複雑さ、および入坑者の多様性に留意するとともに、第 1 段階での調査研究結果、現状の土木工学や資源工学での施工技術、安全

上の制約、時間的な制約、対象とする岩盤の力学特性（硬岩）に基づき、研究坑道の仕様や詳細レイアウトを決定した。さらに、空洞安定性評価や支保設計、耐震設計などの地下施設の設計・施工計画に係る検討をとおして、地下坑道の設計・施工対策技術の高度化・体系化を図るとともに、計測結果の設計・施工計画へのフィードバック技術（情報化施工）を検討した。あわせて、実際に適用する施工技術並びに機械・設備を選定し、具体的な施工計画を策定するとともに、突発湧水などの突発事象に対する対策や、リスクマネジメント手法を活用した安全を確保する技術の整備を行った。

また、地下施設建設前の環境状態を把握するための調査を実施した。

7. 現状と今後の予定

瑞浪の超深地層研究所計画は、平成 15 年度より第 1 段階の調査研究と並行して立坑掘削工事を開始し、平成 19 年 8 月末現在で、主立坑及び換気立坑を深度約 200m まで掘削するとともに、深度 200m の水平坑道を掘削中である。今後は、「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」については、坑道掘削時に得られる情報に基づき、地上からの調査研究で構築した地質環境モデル（地質構造モデル、水理地質構造モデル、地球化学モデル、及び岩盤力学モデル）を確認しながら、地表での調査技術やモデル化手法の妥当性を検討していく。第 1 段階で残された重要な課題として、実際の地質環境に適用可能な体系的な技術の提示を行う上での信頼性の向上が挙げられた。このため、繰り返しアプローチに基づく段階的な調査研究を継続することにより、地層処分にとって重要な地質環境特性に係る理解度を深めるための調査・解析・評価技術の体系化を図る予定である。また、第 2 段階以降で、新たに得られる知見などを踏まえ、統合化データフローの下位を構成する調査フローなどを整備し、より具体化するとともに、階層的な技術体系としての整理を試みる予定である。あわせて、その過程で得られた経験（失敗例を含む）やノウハウをできるだけ知識化して提示していくことが重要となる。さらに、他研究機関で進められている調査研究の成果や議論を踏まえつつ、処分事業や安全規制を支える技術基盤として厚みを加えていく考えである。

工学技術においては、第 2 段階の調査研究として、研究坑道の設計結果の検証を掘削中に得られる計測データなどに基づいて実施していくとともに、実際の岩盤や湧水の状況に応じた施工対策技術、安全性を確保する技術の有効性などの確認を本格的に進めていく。具体的には、今後もデータの取得を継続し、設計時に行った検討内容の妥当性の評価及び設定の見直しなどにより、以深の研究坑道掘削にフィードバックしていくことを繰り返すことにより、設計・施工技術の高度化を図るとともに、掘削工事に伴う周辺環境への影響を観測していく計画である。

これらの調査研究によって得られる成果については、処分事業や安全規制を支える技術基盤として、当面は、原環機構による地上からの精密調査への反映を目指して取りまとめていく予定である。

参考文献

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 年度）。

原子力委員会（2005）：原子力政策大綱。

三枝博光 他（2007）：超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第 1 段階）研究成果報告書，JAEA-Research 2007-043。

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，JNC TN7410 2001-018。

瑞浪超深地層研究所における 花崗岩の調査研究

瑞浪，幌延における地上からの調査研究の成果報告

—地層処分の技術と信頼を支える研究開発：概要調査への技術基盤の確立—

平成19年9月18日 JAホール

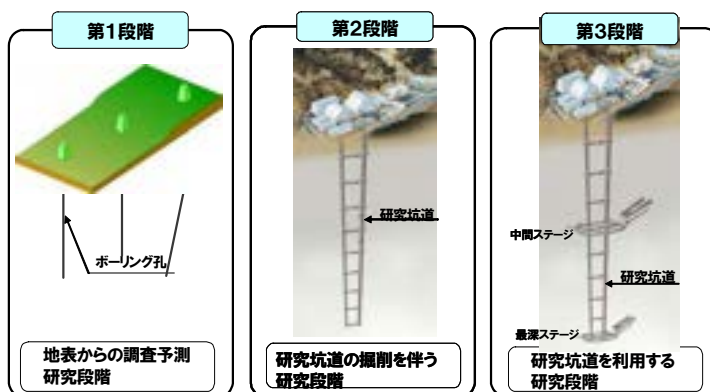
日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット

坂巻 昌工

超深地層研究所計画の目標・進め方

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



		年度	2000	2010	2020
場所	瑞浪市の市有地を賃貸借し、地下研究施設を建設	調査・研究			
プロセス・アプローチ	調査研究開始当初より、研究用地(約7.5ha)を含むサイトスケール(約2km四方)での調査*)	第1段階			
		第2段階			
		第3段階			
施設計画	造成工事 坑口基礎部および立坑の掘削 中間・最深ステージ掘削	掘削深度(2007年8月30日現在) 主立坑：GL-200.2m 換気立坑：GL-200.2m			

第1段階取りまとめの目的と要件

<第1段階の目標>

- ①地上からの調査研究による地質環境モデルの構築，および坑道掘削前の深部地質環境の状態の把握
- ②地下施設（研究坑道）の詳細設計および施工計画の策定

<第1段階取りまとめの目的>

- ・ 調査研究の達成度の明確化
- ・ 地層処分技術に係る知識
基盤としての整備・体系化
(処分事業・安全規制)
- ・ 第2段階以降の調査研究
の方向性の具体化

<取りまとめの要件>

- ・ 第1段階の目標（①，②）が適切にまとめられていること
- ・ 第1段階で用いた一連の調査・解析・評価の方法論および知見（ノウハウや失敗例を含む）が，基盤技術としてまとめられていること
- ・ 第2段階以降の調査研究の課題（モデルの検証方法等）が示されていること

第1段階取りまとめ報告書の構成

<取りまとめ報告書の内容>

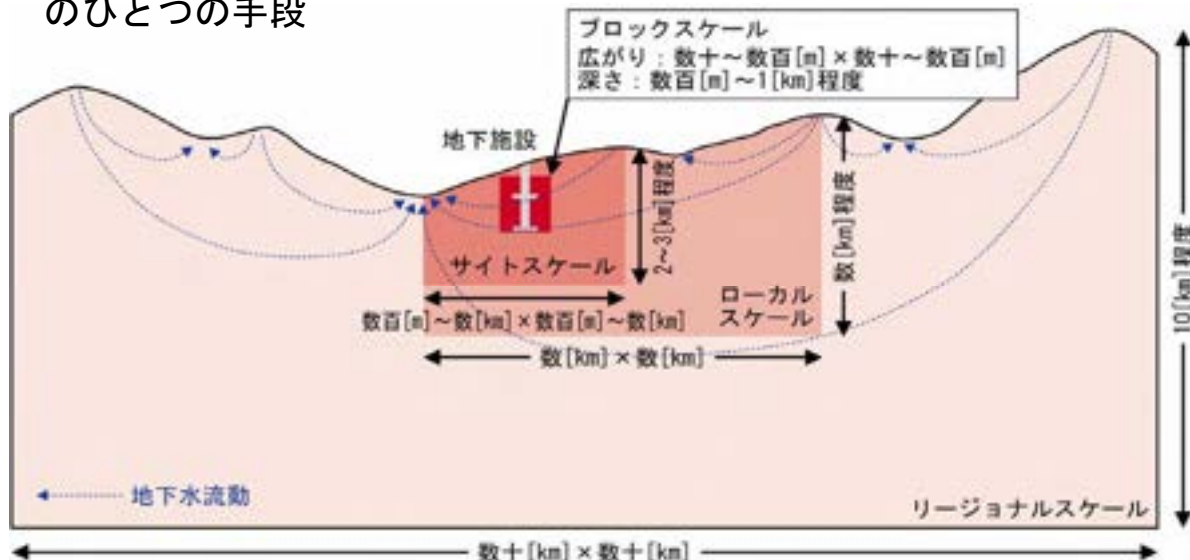
- H17取りまとめをベースとして，その後に得られた成果と合わせて包括的に取りまとめ
- 以下の2つの全体目標に対する第1段階の成果を記述
 - ・ 深地層の調査・解析・評価技術の基盤の整備
 - ・ 深地層における工学技術の基盤の整備

<目次>

1. 超深地層研究所計画の位置付けと役割
⇒ 超深地層研究所計画の全体目標，取りまとめの目標について記述
2. 超深地層研究所計画・第1段階調査研究の概要
⇒ 第1段階の調査研究の目標や進め方について記述
3. 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備
⇒ ステップ毎に，個別目標・課題に対する技術的知見を示すとともに，処分事業および安全規制のための基盤技術を提示
⇒ 第2段階の調査研究に向けた深部地質環境とその変化の予測結果を記載
4. 深地層における工学技術の基盤の整備
⇒ 研究坑道の設計・施工対策技術および安全確保技術などについて記述
5. おわりに
⇒ 第1段階の成果を総括するとともに，今後の展開について記述

◎空間スケールの設定

- 安全評価，地下施設の設計・施工への研究成果の反映を念頭に置き，不均質性を有する地質環境を限られた調査量で効率的に理解するためのひとつの手段



- * サイトスケール，ブロックスケールの調査研究を「超深地層研究所計画」として実施
- * リージョナルスケール，ローカルスケールの調査研究は「広域地下水流動研究」として別途実施

◎個別目標と課題の設定

- 安全評価，地下施設の設計・施工および環境影響評価の観点から，調査研究の個別目標と課題を整理（調査研究内容の具体化）

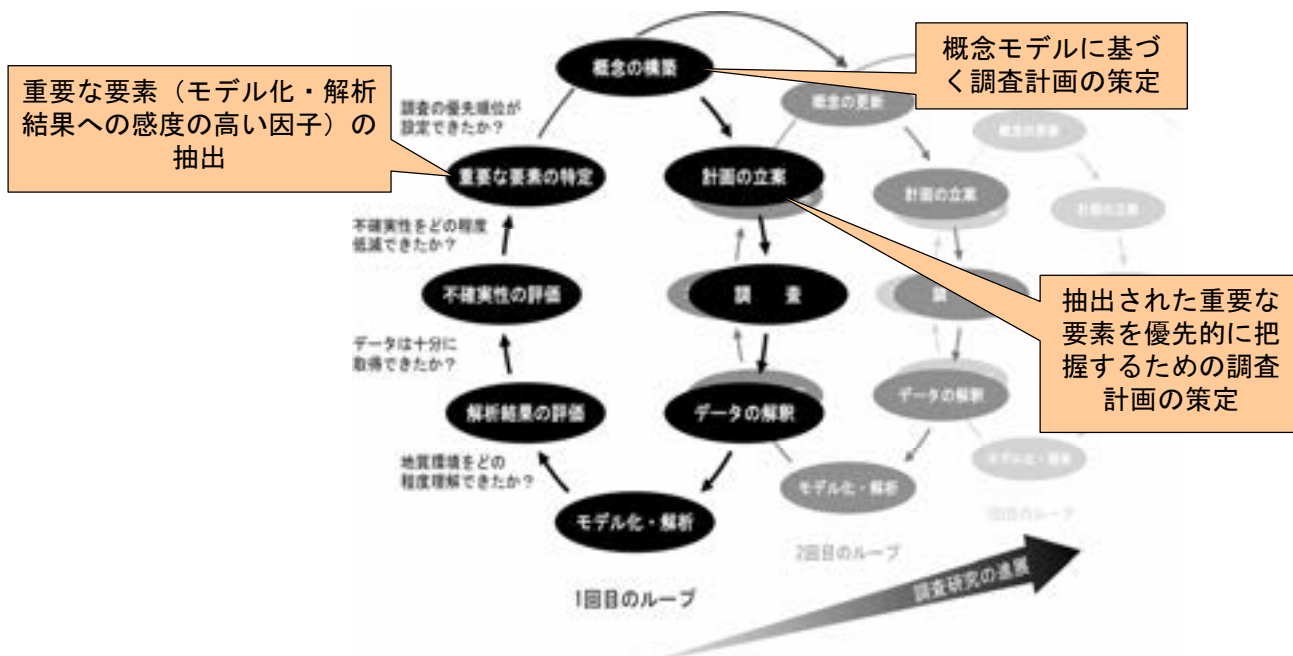


個別目標と課題に対して，以下を図ることが重要

- 個別の調査・評価技術の整備
- 調査・評価技術の体系化

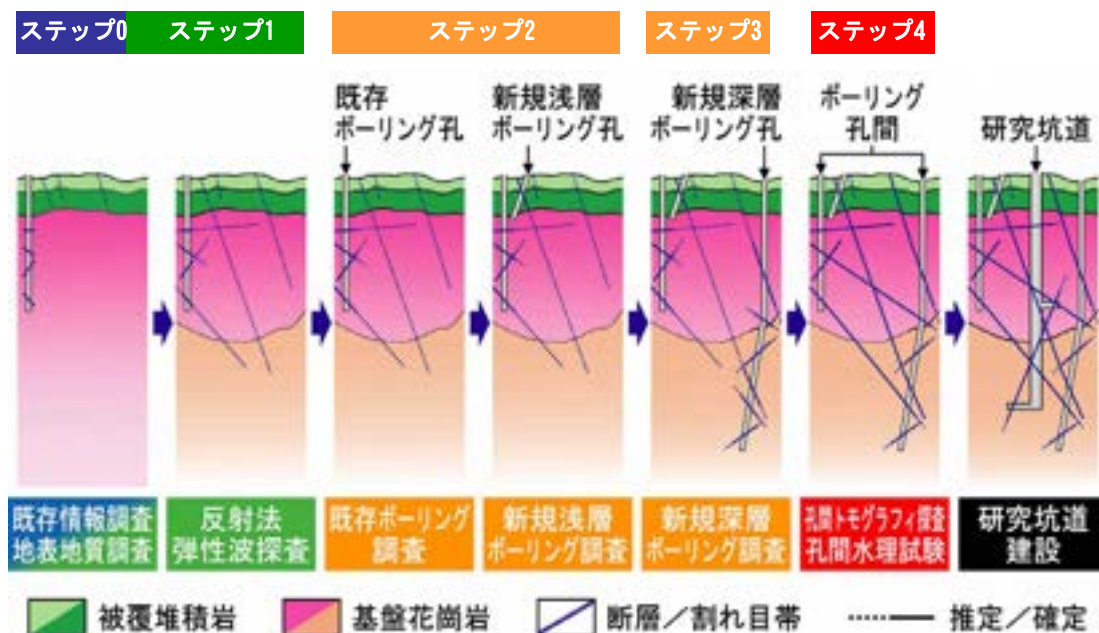
◎繰り返しアプローチ

様々な制約条件の下で、地質環境特性を理解する上で、調査を効率的に進めるための基本的考え方



◎調査ステップ

- 地質環境特性を面的に調査できる手法を用いて広い領域を概略的に把握した上で、詳細な情報を必要とする項目を抽出・特定し、それをボーリング孔を利用した調査によって把握し、さらに連続性を調査するといった手順を採用



地質図

主な成果・課題

<ステップ1>

- 地表地質調査
- 反射法
弾性波探査



成果：

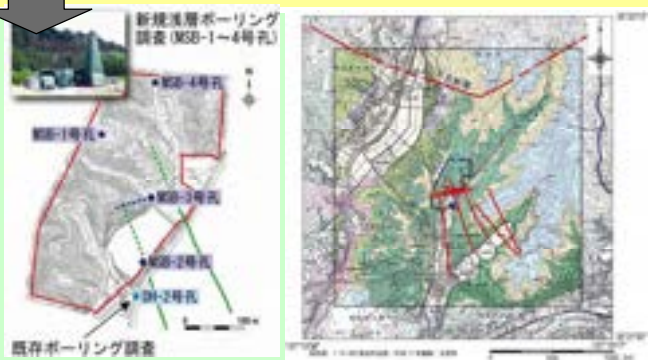
- ◎地表付近の地質構造（特に堆積岩中の不連続構造の分布）の把握

課題：

- ？北北西系／北東系 断層の地下水流動への影響
- ？地下浅部の水質

<ステップ2>

- 既存ボーリング調査
- 新規浅層
ボーリング調査



成果：

- ◎概念モデルの構成要素（低角度割れ目帯、各累層の基底礫岩、花崗岩風化部）の抽出と深度500mまでの水みちの分布、水理特性、水質の把握

課題：

- ？北北西系／東西系断層の地下水流動への影響
- ？地下深部の地質環境特性

地質図

主な成果・課題

<ステップ3>

- 新規深層
ボーリング調査



成果：

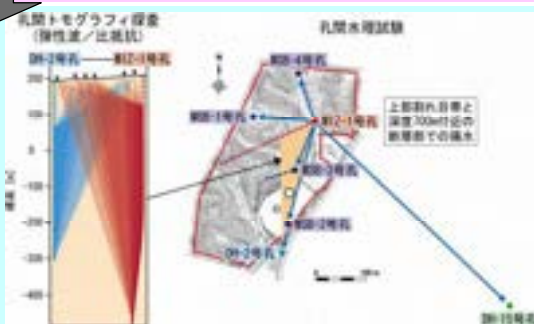
- ◎深度1,300mまでの地質構造の区分および領域ごとの水理特性、水質、力学特性の把握

課題：

- ？研究坑道近傍における地下水流動の詳細な評価
- ？水みちの連続性

<ステップ4>

- 孔間
トモグラフィー
- 孔間水理試験



成果

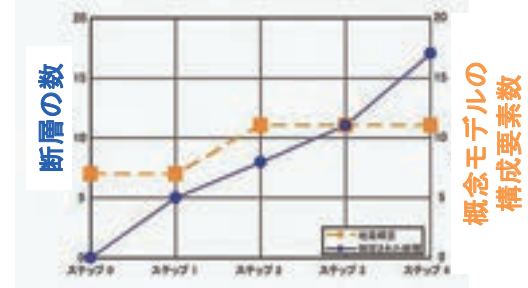
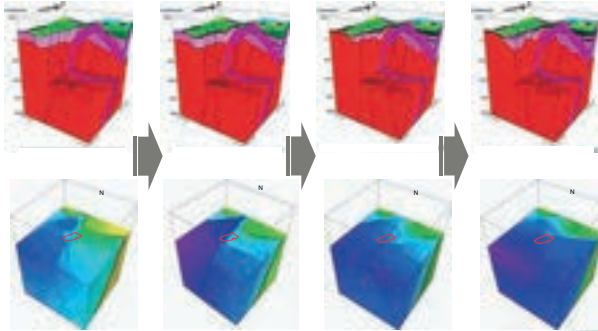
- ◎研究坑道近傍における水みちの連続性

課題：

- ？遮水構造として機能していると考えられる立坑近傍の断層の詳細な幾何学的形状と空間分布

◎地質環境の効率的な理解

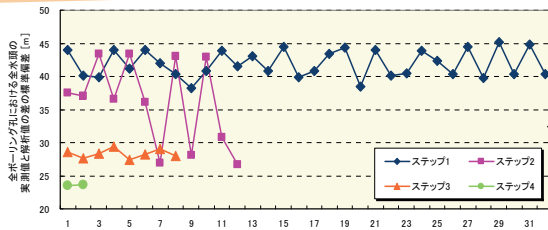
- 繰り返しアプローチに基づく段階的な調査研究により、「個別目標と課題」として設定した地層処分にとって重要な地質環境特性（例えば、地質構造分布、地下水流動特性など）を効率的に理解



確認された断層の総本数および概念モデルの構成要素数の推移

不確実性

理解度



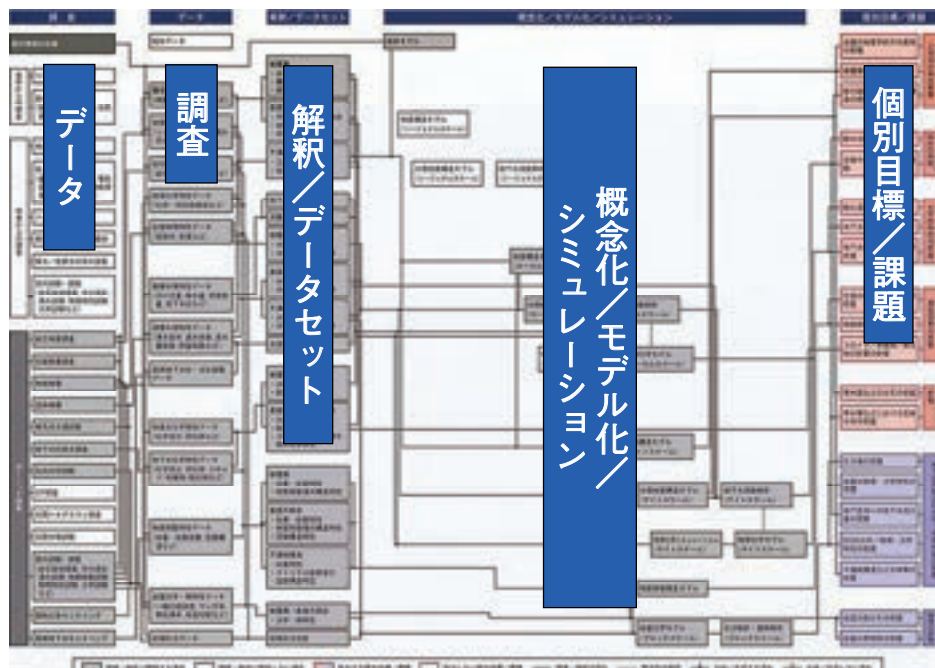
地下水流動特性の不確実性の推移

調査研究の進展に伴い・・・

- 感度解析のケース数の減少
 - 感度解析のケース間での全水頭分布のばらつきの減少
 - 全水頭分布の実測値の再現性の向上
- ⇒ 岩盤の透水性および動水勾配分布の理解度向上

◎統合化データフローの例示

- 研究対象の地質環境（例えば、割れ目などが地下水流動を大きく支配する岩盤であること）を踏まえつつ、調査ステップごとに、調査研究の個別目標と課題に向け、結晶質岩を対象とした合理的な調査・解析の道すじを統合化データフローとして整理



◎計画性と品質保証

- 調査の対象となる地質環境の特性や調査手順をできる限り明確化するとともに、それらのある時点での理解度や時間・予算などの制約条件あるいは環境への影響などを考慮し、調査の項目や手法の最適化あるいは合理化を図った調査計画を策定することが重要
- 面的に調査できる手法を適用して広い領域を概略的に把握・概念モデル化した上で、詳細な情報を必要とする項目を抽出したうえで、それらをボーリング調査などにより更に精緻化する（モデルの更新を含む）といった手順が有効
- 複数のボーリングが利用可能な場合には、ボーリング孔間の地質学的・水理学的な連続性などを把握することを目的として、確認すべき対象領域や地質・地質構造を明確にしたうえで調査計画を立案することが重要

◎地質環境モデル構築システム

- 調査・解析・評価の繰り返しは、迅速に実施する必要があるため、地質環境モデルの構築が効率的に実施できるシステムを準備しておくことが重要

深地層における工学技術の基盤の整備

第1段階の目標

- ・ 研究所用地における深部地質環境に関する情報や次段階以降の調査・研究計画などに基づき研究坑道の詳細レイアウトを決定
- ・ 実際に適用する施工技術並びに機械・設備を選定し、具体的な施工計画を策定

設計・施工技術

- ・ 研究坑道レイアウト
- ・ 研究坑道安定性と支保安定性評価
- ・ 計測結果のフィードバック技術
[情報化施工]
- ・ 研究坑道の地震時安定性評価
- ・ 通気解析・通気計画

建設技術

- ・ 施工計画
[施工方法(ショートステップ工法), 掘削の進め方, 施工サイクル]
- ・ 施工設備計画
[掘削設備, 坑口設備, 周辺設備]

施工対策技術

- ・ 突発湧水対策
[プレグラウト, 前方探査技術]
- ・ 山はね発生評価
- ・ 高抜け崩壊解析

安全確保技術

- ・ 防災コンセプト
- ・ 坑内統合管理システム
[入出坑, 坑内環境, 通信管理, 火災管理]
- ・ リスクマネジメント

深地層における工学技術

周辺環境への影響モニタリング

- ・ 騒音・振動
- ・ 河川(表流水)水質, 底質
- ・ 水文(河川流量, 表層地下水位)

情報の取得や技術の実証を目的とした地下施設(URL)

設計

施工

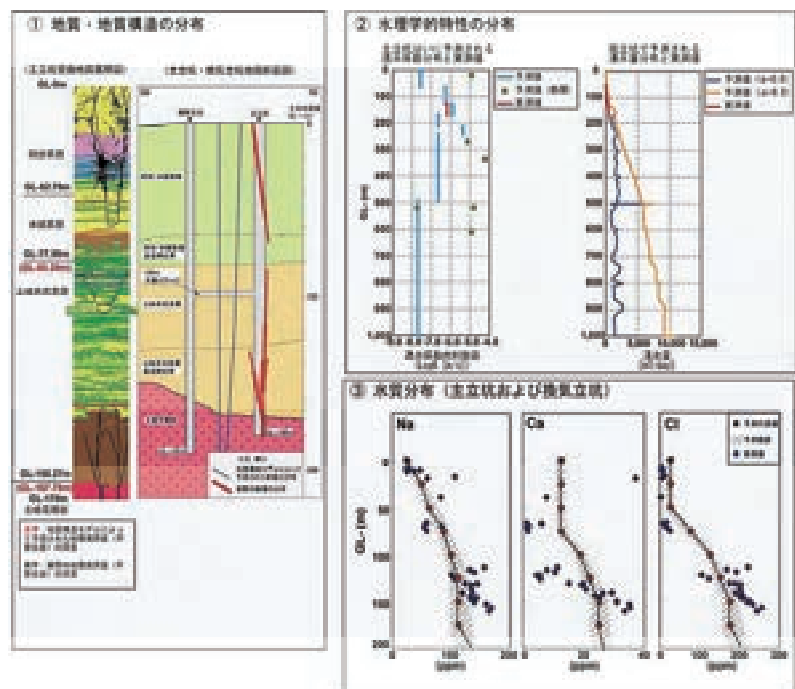
維持管理

実際の深部地質環境や調査・研究計画に基づき、研究坑道と周辺設備の設計・施工を具体的に計画し、第2段階で検証中

処分事業
安全規制
への
反映活用

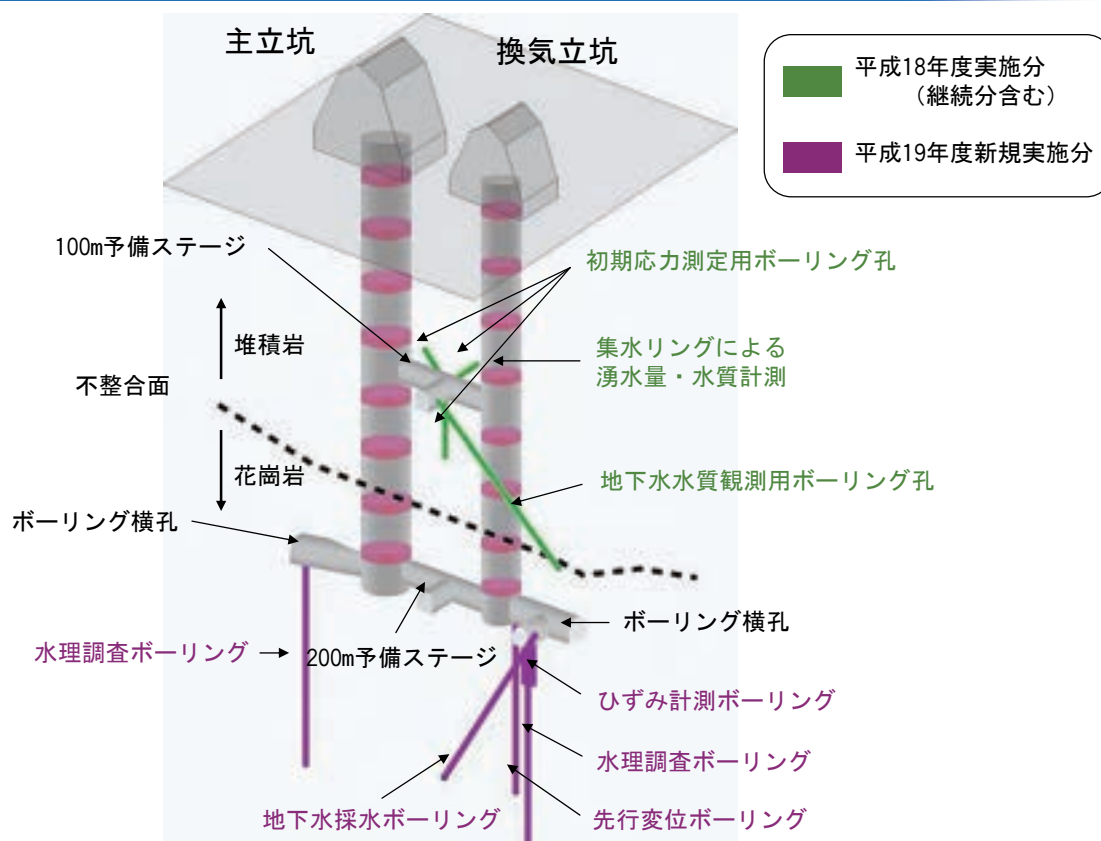
第2段階の現状と今後の予定①

- 第2段階以降の調査研究では、第1段階の課題の解決と調査研究成果（例えば、地質環境モデルや地質環境の変化の推定結果など）や設計・施工技術の妥当性の確認を行う
- 繰り返しアプローチに基づく調査研究を継続することにより、地層処分にとって重要な地質環境特性の理解度を深めるための調査・解析・評価技術の体系化を図る予定



第2段階の調査による第1段階の結果の確認の例

第2段階の現状と今後の予定②



換気立坑シャフトジャンボ



換気立坑ボーリング横坑掘削





まとめ

- 実際の地質環境を対象とした調査研究の計画立案，調査，データ解釈，解析・評価の各検討過程を通じて得られた**技術的知見**（ノウハウや失敗例）を**処分事業の基盤技術**として整理
- 地質環境の理解度や不確実性の評価結果に基づき，**対象項目の優先度**を明確にした**調査研究計画**の策定が有効であることを確認
- 結晶質岩を対象とした主要な調査技術および解析技術に係る**技術的知見**（例えば，ボーリング調査における透水性構造を抽出するための流体検層手法や水理試験手順，物理探査データの解析手法，品質管理体系・実施体制作りなどの有効性）および**経験**を蓄積
- 「**情報の取得や技術の実証を目的とした地下施設**」を**安全に建設・維持**するための工学技術の基盤の確立を目標として合理的に設計
- 第1段階において**残された課題**を整理し，**第2段階以降の調査研究の課題**を具体化

幌延深地層研究所における堆積岩の調査研究

幌延深地層研究所における堆積岩の調査研究

地層処分研究開発部門
幌延深地層研究ユニット
ユニット長 福島 龍朗

1. はじめに

独立行政法人 日本原子力研究開発機構（原子力機構）が進める幌延深地層研究計画は、北海道幌延町に分布する新第三紀以降の堆積岩を対象とした「地層科学研究（深地層の科学的研究）」と「地層処分研究開発」に関する調査研究計画である。計画全体は約 20 年間にわたり、3 つの調査研究段階に分かれている。第 1 段階は「地上からの調査研究段階」、第 2 段階は「坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階」、そして第 3 段階は「地下施設での調査研究段階」である。幌延深地層研究計画の第 1 段階は、平成 13 年 3 月から開始し、平成 18 年 3 月に終了した（原子力機構、2006）。現在は、第 2 段階に入っており、地下施設を建設しながら調査研究を進めているところである。本報告では、平成 13 年 3 月から平成 18 年 3 月の約 5 年間にわたり実施した第 1 段階の調査研究における深地層の科学的研究の実施内容と成果を取りまとめた、「幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第 1 段階）研究調査報告書分冊『深地層の科学的研究』」（太田他、2007）、について概説する。

2. 幌延深地層研究計画における調査研究の目標

幌延深地層研究計画では、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、③実際の地質環境での地層処分技術の適用性確認、を全体目標としている。「地層科学研究（深地層の科学的研究）」では、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技術の基礎の開発、及び地質環境の長期安定性に関する研究の 4 つの研究課題を設定し、「地層処分研究開発」では、処分技術の信頼性向上、安全評価手法の高度化の 2 つの研究課題を設定した（サイクル機構、2005）。

幌延深地層研究計画の第 1 段階においては、上記の全体目標及び研究開発課題を踏まえて、深地層の科学的研究に関して、次の 2 つの段階目標を設定した。

- ①「地上からの調査研究における地質環境モデルの構築及び坑道掘削前の深部地質環境の状態の把握」
 - ②「地下施設の詳細設計及び施工計画の策定」
- 以下に 2 つの目標の概要を示す。

1) 地上からの調査研究における地質環境モデルの構築及び坑道掘削前の深部地質環境の状態の把握

地上からの調査研究を通じて、地下深部の地質環境に関する情報を取得し、地下施設建設前の未擾乱の地質環境の状態について、特に、地層処分にとって重要な地質環境特性やプロセスに着目して、その理解を深める。また、取得した情報の統合と解釈を通じて、地質環境モデルの構築と解析を段階的に行い、その妥当性を評価することにより、堆積岩を対象とした地上からの体系的な調査・評価技術の整備を図る。

2) 地下施設の詳細設計及び施工計画の策定

地下施設の安全な建設・維持と調査研究のための環境の確保を前提として、地上からの調査研究において取得した地質環境情報、地下施設内で実施される調査研究の計画、及び現状の施工技術に基づき、地下施設の仕様及びレイアウトを検討するとともに、地下施設の設計・施工計画を策定する。また、施工計画の策定においては、地下施設の建設が周辺環境へ可能な限り影響を与えないように配慮する。

3. 第1段階の研究成果報告書（分冊「深地層の科学的研究」）の構成

幌延深地層研究計画における第1段階の研究成果報告書（分冊「深地層の科学的研究」）は、第1段階における深地層の科学的研究の成果を取りまとめたものであり、全7章から構成されている。2章「幌延深地層研究計画・第1段階における深地層の科学的研究の概要」では、第1段階における深地層の科学的研究の目標や進め方について概括した。3章「研究所設置地区及び研究所設置場所の選定」では、選定プロセスの各段階における基本的な考え方、選定の要件や結果などを記述するとともに、調査を実施する区域あるいは用地の選定という実経験を通じて確認した選定上の要件や考慮すべき条件とその重要性について記述した。4章「地上からの地質環境の調査研究」では、地層処分にとって重要な地質環境特性やプロセスに関する調査研究の成果をまとめ、堆積岩を対象とした地上からの体系的な調査・評価技術とともに、実際の調査研究を通じて得られた技術的知見などを整理した。5章「深地層における工学技術の基礎の開発」では、地下施設の仕様及びレイアウトや、地下施設における安全確保などに関する検討を通じて整備した堆積軟岩における地下施設の設計・施工計画技術について記述した。6章「地下施設建設に伴う周辺環境への影響調査」では、地上及び地下を対象とした環境影響評価の事例を取りまとめた。最後の7章「おわりに」では、3章から6章までの記述を踏まえて、第1段階における深地層の科学的研究の成果を総括するとともに、今後の展開について記述した。

4. 地質環境の調査研究の段階的な進め方と実施内容

第1段階の地質環境の調査研究については、幌延町全域を対象とした調査研究と研究所設置地区及びその周辺を対象とした調査研究の2つの段階に分けて実施した。幌延町全域を対象とした調査研究は、第1段階の前半に実施し、研究所設置地区（地上からの調査研究を主に展開する約3km×3kmの領域）及び研究所設置場所（地下施設の建設場所）を選定した。また、研究所設置地区及びその周辺を対象とした調査研究については、第1段階を通じて、上記の「地層科学研究」における課題に対する調査研究を実施した。また、地下施設等の建設に伴う周辺環境への影響を把握するために、環境調査や地質環境モニタリングなども継続的に進めた。

1) 幌延町全域を対象とした調査研究

幌延町全域を対象とした調査研究（平成13年度末～平成14年度の約2年間）では、幌延町全域から、地質学的要件、社会的条件、土地利用状況等を考慮して、研究対象とすべき主要な領域を段階的に絞り込むことにより、研究所設置地区及び研究所設置場所を選定した。幌延町全域から研究所設置地区及び研究所設置場所を段階的に絞り込むにあたっては、既存情報を用いた調査から、空中物理探査、地表からの調査（地上物理探査及び地表地質調査）、ボーリング孔（HDB-1及び2孔）を利用した調査へと、調査の対象領域のスケールとそれに応じた地質環境情報の精度に留意して調査を実施した。

2) 研究所設置地区及びその周辺を対象とした調査研究

研究所設置地区及びその周辺を対象とした調査研究（平成14年度～平成17年度の約4年間）では、研究所設置地区及びその周辺の地質・地質構造、岩盤の水理、地下水の地球化学、岩盤力学等の地質環境についての特性把握やその中の重要な地質構造である大曲断層の位置や性状の把握などに主眼を置いた。本調査研究は、①既存情報を用いた調査、②地表からの調査、③ボーリング孔を利用した調査、の3つに大別できる。地表からの調査とボーリング孔を利用した調査については並行して実施し、特に地層処分にとって重要な地質環境の特性のひとつである大規模不連続構造（大曲断層）の位置や地層の分布を把握するための地上物理探査や、ガスや石油を胚胎する堆積軟岩を対象とした掘削技術などの個別の調査技術開発に重点を置いた。地質環境調査においては、基本的に、「計画の立案」→「調査の実施」→「調査結果の評価」→「計画の修正や新たな計画の立案」を繰り返すアプローチを採用した。

(1) 既存情報を用いた調査

研究所設置地区の選定にあたって収集した文献情報（公開論文や報告書など）と、広域的に実施した調査（空中物理探査，地上物理探査，地表地質調査，HDB-1 及び 2 孔における深層ボーリング調査）で新たに取得した地質環境情報に基づき，研究所設置地区及びその周辺の地質環境特性を概括的に把握した。また，この結果を踏まえて，地表からの調査及びボーリング孔を利用した調査の計画立案を行った。

(2) 地表からの調査

大曲断層などの大規模不連続構造の位置や性状を把握することを主な目的として，地表地質調査及び浅層ボーリング孔を用いたガス調査を実施するとともに，反射法地震探査及び電磁探査を実施した。また，地下水流動解析において上部境界条件の設定に必要な地下水涵養量を算定するために，研究所設置地区及びその周辺の流域を対象に表層水理調査を実施し，さらに，地球化学モデルの構築に必要な表層水（河川水や浅層地下水）の地球化学特性を把握するために，水質調査を実施した。

(3) ボーリング孔を利用した調査

ボーリング孔を利用した調査では，上述した浅層ボーリング孔を利用した調査及び深層ボーリング孔を利用した調査を実施した。深層ボーリング孔を利用した調査は，研究所設置地区の地質構造，特に大曲断層の位置や性状の把握，地下施設の設計に必要な地質環境特性に関するデータの取得，モデル化・解析において必要となる研究所設置地区内及びその境界付近における地質環境情報の取得を主な目的として実施した。研究所設置地区及びその周辺では，研究所設置地区の選定段階において HDB-1 孔を掘削しており，そこで得られた地質環境情報や調査の目的などを考慮したうえで，研究所設置地区の全域に偏りが少ないように調査地点を選定し，深層ボーリング孔（掘削長 470m～1020m）を新たに 9 孔（HDB-3～11 孔）掘削した。これらの深層ボーリング孔では，主として稚内層と声問層を対象の地層として，地層処分にとって重要な地質環境の特性である地質構造特性，岩盤の透水性や力学特性，地下水の水質の分布を三次元的に，かつ精度よく把握することに重点を置いて調査（コア観察，物理検層，水理試験，採水調査，力学試験など）を行った。また，これらの調査終了後はボーリング孔内に長期モニタリング装置を設置し，地下水の水圧及び水質のモニタリングを実施した。

5. 深地層における工学技術の基礎の開発

第 1 段階における深地層の工学技術の基礎の開発では，主に稚内層と声問層を対象地層として，地表からの調査により得られた地質環境情報，地下施設内で実施される予定の調査試験の計画，現状の施工技術を考慮して，坑道の仕様・レイアウトを検討するとともに，地下施設の建設・供用時において地下深部で遭遇する様々な現象を考慮した坑道の安全確保，坑内環境の維持のために必要となる対策工，施工管理方法について検討し，地下施設の設計・施工計画を策定した。具体的には，地下施設の事前設計技術については，稚内層と声問層を構成する堆積軟岩における不連続面に起因する岩盤挙動発生の可能性を考慮するため，ヘアークラックに着目した地山区分及び岩盤物性値の設定方法を提案した。また，地山強度比の低い条件下での掘削工事に際して，二重支保構造の概念を導入し，掘削後の空洞の安定性を保持しつつ，岩盤及び支保工に掘削開放応力を合理的に負担させることで，支保設計の合理化を実現した。さらに，地下施設における代表的な部位での地震に対する安定性の検討を行い，地下施設の耐震性能照査に関する検討手法を整理した。

施工計画技術としては，大深度立坑の自由断面掘削機による掘削工法の計画を策定した。掘削土（ズリ）や地下水に含まれる特定有害物質への対応については，各種法令や関係機関との調整結果を踏まえ，周辺環境への影響を考慮した処理方法を策定した。さらに，地下施設内での安全確保の観点から，坑内作業環境対策，坑内情報管理システム，火災時対策，可燃性ガス対策などの計画を立案するとともに，坑内火災時に発生する浮力による通気主流の

逆転現象や、水平坑道の風門を開閉した場合の通気挙動などを実験により確認した。

6. 成果とその反映

第 1 段階における調査研究で得られた成果については、処分事業における概要調査や精密調査における地上からの調査及び国による安全規制における安全審査基本指針等の策定を支援する技術基盤として整備することを念頭に取りまとめた。ここでは、整備した技術基盤の中で、①要素技術開発、②不確実性の低減、③調査手法の体系化と信頼性向上、④総合的な調査の例示、の 4 項目について、それぞれの代表例を示す。

1) 要素技術開発：地球化学調査技術

- ・堆積岩中の地下水の地球化学特性の評価においては、地下水やコア等のサンプリング手法ならびに分析手法の品質管理が重要である。
- ・堆積岩中の地下水の地球化学特性を把握するための地下水採取方法として、ボーリング孔からの揚水による方法とコアから間隙水を抽出する方法を組み合わせることにより、地下水水質の 3 次元分布に関する評価の信頼性が向上する。
- ・コアから間隙水を抽出する際には、掘削水のコアへの浸透、コア保管中の水－岩石反応系の変化、酸化、脱ガス等による間隙水水質の変化、間隙水が少ない場合の分析誤差に留意する必要がある。また、コアに含まれる鉱物の吸着水や層間水が抽出されることにより間隙水の希釈を生じる可能性があることも考慮する必要がある。
- ・コアの酸化は、間隙水水質の分析値に影響を与える重要な要因となるが、コア採取後直ちに間隙水を抽出することやコアのラッピングを行うことにより、コアの酸化の影響を低減できる。

2) 不確実性の低減：地下水水質の空間分布の推定

- ・調査においては、「計画の立案」→「調査の実施」→「調査結果の評価」と繰り返すアプローチを採用することにより、新たな調査結果を用いて過去の調査結果の評価・修正を行うことが重要である。これにより、調査量の増加に応じた不確実性低減の様子を定量化できるとともに、対象領域の地質環境特性の分布と傾向が把握できる。
- ・地下水水質の空間分布は、対象領域で深層ボーリング調査を実施することによって得られる深度方向の地下水水質分布を 3 次元的に補間することにより概括的に推定することができる。補間方法としては地質統計法や比較的単純な逆距離加重法などがある。
- ・幌延においては、第 1 段階で合計 11 本の深層ボーリング調査を段階的に実施したが、その結果、大規模不連続構造である大曲断層を挟んで東側の領域と西側の領域で地下水水質の分布状態が異なることが明らかになった。

3) 調査手法の体系化と信頼性向上：大規模不連続構造の 3 次元分布の推定

- ・大曲断層のような物質の移行経路として重要な大規模不連続構造の 3 次元分布や性状の把握にあたっては、露頭での観察やリニアメント調査等の地表踏査、反射法地震探査や電磁探査等の物理探査及び深層ボーリング調査を体系的に組み合わせて実施し、各調査結果を相互に対比することにより、整合した解釈を得ることが重要である。
- ・深層ボーリング調査は、地質構造や地層境界等に関する詳細な深度方向 1 次元の地質・地質構造、水理特性、地下水水質、岩盤力学特性に関する情報を直接取得することができる。当該地点において物理探査により得られる弾性波や比抵抗等のデータの解釈を検証することができる。
- ・物理探査によって得られる弾性波や比抵抗等のデータの空間分布は、当該地域に分布する大規模不連続構造等の重要な地質環境特性の空間的な広がり（3 次元分布）に起因して生じると考えることができ、これと深層ボーリング調査や露頭調査の結果と対比することにより、データの解釈の信頼性を向上させることができる。
- ・幌延のような塩水系地下水が支配的な地域において観察される地表部から地下深部へと連

続して分布する高比抵抗ゾーンは、大規模不連続構造に沿って天水起源の地下水が浸透している部分に相当する可能性があることが推定された。

4) 総合的な調査の例示：研究所設置地区及び研究所設置場所の選定

- ・対象地区を選定するにあたっては、選定のための要件とその重要度・優先度を明確にする必要がある。考慮すべき選定のための要件は、地質環境要件（調査対象の地層が地下深部に適度な層厚で広く分布していること、地下水が存在すること等）、地形要件（調査の展開や施設建設において有利なこと等）、安全要件（地下施設を安全に建設でき、安全な作業環境を確保できること等）、社会的条件（調査のための許認可や用地取得が容易なこと等）、道路状況、土地利用状況及び利害関係者の意向などである。
- ・調査の対象領域のスケールに応じた調査手法とそこで取得される地質環境情報の精度を考慮して調査を実施することが肝要である。調査の実施にあたっては、a) 文献などの既存情報の調査による広域を対象とした地質環境要件を満たす複数区域の選定、b) 複数区域から安全要件、社会的要件、地形要件等を考慮した対象区域の絞り込み、c) 絞り込んだ対象区域から道路状況、土地利用状況、利害関係者の意向などを考慮した対象領域の選定、d) 選定した対象領域における詳細な地質環境調査の実施、と手順を踏んで進めるとともに、対象領域の絞り込みの各段階における調査結果や選定理由等について積極的に情報公開を行うことにより調査の透明性を確保することが重要である。
- ・調査計画の策定においては、「調査」→「データの解釈」→「モデル化・解析」→「地層処分において重要な地質環境特性やプロセスの理解」を合理的に進めるために系統的なデータの流れを記述・整理した統合化データフローを作成することが有効である。これにより地下施設の建設・施工、人工バリアの信頼性向上及び安全評価手法の高度化へと反映先を明確にした地質環境調査を行うことができる。

7. 現状と今後の予定

幌延深地層研究計画では、平成 17 年度から、第 2 段階の坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究を実施しており、平成 19 年 3 月末までに、換気立坑及び東立坑ともに、調査研究の対象となる堆積岩層の上部（換気立坑：深度約 50m、東立坑：深度約 40m）までの掘削を行った（原子力機構 幌延深地層研究センター、2007）。また、坑道掘削に伴い露出する坑道壁面における地質観察等や坑道掘削に伴う周辺地質環境の変化を把握するための各種モニタリング調査を連続的に実施している。今後、安全及び環境保全に配慮しながら坑道掘削（地下施設の建設）を進める一方、第 2 段階において、深地層の科学的研究と地層処分研究開発が密接に連携し、調査研究がより合理的及び体系的に進められるように、調査研究の基本的な考え方や計画の具体化を早急に図っていく予定である。さらに、その計画に基づき、調査研究を本格的に展開しながら、第 1 段階で残された課題の解決に向けて取り組む。また、坑道掘削時に得られる情報に基づき、地下施設あるいは坑道の近傍の地質環境を対象にして、地層処分にとって重要な地質環境特性やプロセスの理解を深めていくとともに、地上からの調査研究で構築した地質環境（地質構造、岩盤水理、地球化学、岩盤力学）モデルや地下施設建設による地質環境の変化の予測結果について、その妥当性を評価しながら、地上からの体系的な調査・評価技術の信頼性を確認していく。一方、深地層における工学技術の基礎の開発については、地下施設の設計手法・施工技術の適用性を実際の施工を通じて確認するとともに、地下坑道の設計・施工計画の策定、施工対策、安全確保や維持・管理に関する工学技術の整備・高度化を進めていく。

参考文献

- 核燃料サイクル開発機構（2005）：平成 16 年度研究開発課題評価（中間評価）報告書，評価課題「幌延深地層研究計画」，JNC TN1440 2005-002.
- 日本原子力研究開発機構（2006）：幌延深地層研究計画 平成 17 年度調査研究報告，JAEA-Research

2006-073.

日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター (2007) : 幌延深地層研究計画 平成 18 年度調査研究成果報告.

太田久仁雄 他 (2007) : 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階 (第 1 段階) 研究成果報告書, 分冊「深地層の科学的研究」, JAEA-Research 2007-044.

幌延深地層研究所における 堆積岩の調査研究

瑞浪，幌延における地上からの調査研究の成果報告

—地層処分の技術と信頼を支える研究開発：概要調査への技術基盤の確立—

平成19年9月18日 JAホール

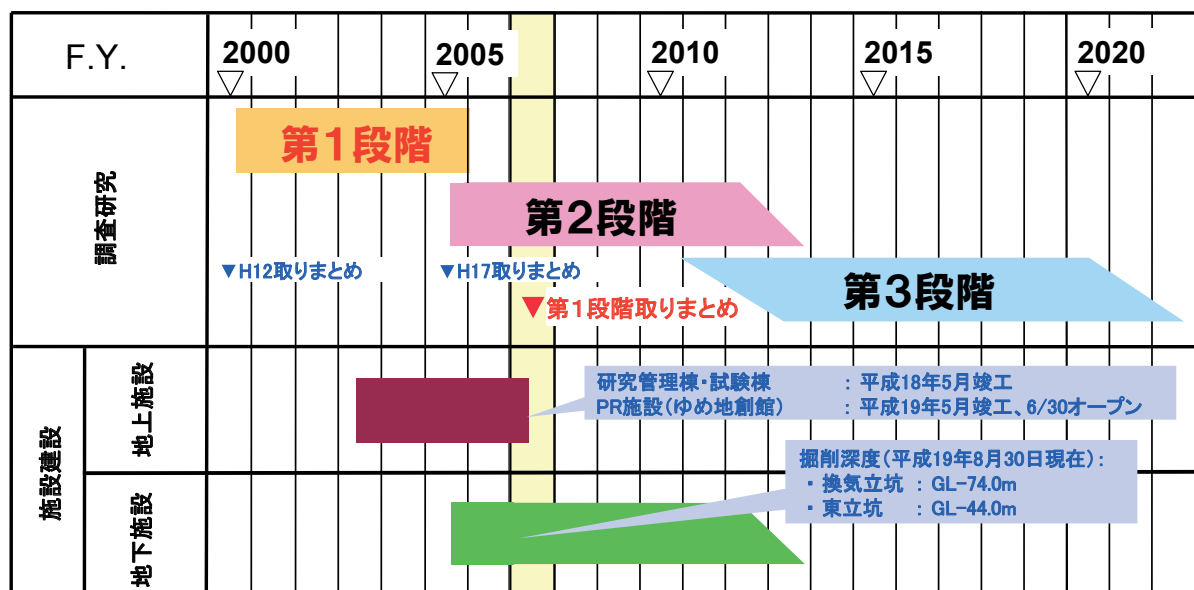
日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット

福島 龍朗

幌延深地層研究計画の目標・進め方

1

■ 段階的な調査研究



- 第1段階 : 地上からの調査研究段階
- 第2段階 : 坑道掘削時(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

■ 幌延深地層研究計画の研究開発課題

● 地層科学研究(深地層の科学的研究)

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. 深地層の工学技術の基礎の開発

● 地層処分研究開発

5. 処分技術の信頼性の向上
 - － 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

第1段階取りまとめ報告書の構成

■ 取りまとめの基本方針

- 第1段階における調査研究の**成果の適切な取りまとめ**と課題の抽出・整理
- 第2段階以降の調査研究の**目的・目標の明確化**
- 処分事業と安全規制を支える地層処分技術の**知識基盤の整備**に留意

分冊「深地層の科学的研究」

- 第1段階における深地層の科学的研究の概要
- 研究所設置地区及び研究所設置場所の選定
- 地上からの地質環境の調査研究
- 深地層における工学技術の基礎の開発
- 地下施設建設に伴う周辺環境への影響調査

分冊「地層処分研究開発」

- 処分技術の信頼性向上 – 設計手法の適用性の確認 –
- 安全評価手法の高度化 – 安全評価手法の適用性の確認 –

第1段階における深地層の科学的研究

■ 幌延町全域を対象とした調査研究

□ 幌延町全域を対象とした広域的な調査

文献調査、空中物理探査、地上物理探査、地表地質調査、深層ボーリング調査(HDB-1,2)

→ 研究所設置地区及び研究所設置場所の選定

研究所設置地区：地上からの調査研究を主に展開する約3km×3kmの領域

研究所設置場所：地下施設の建設場所

■ 研究所設置地区及びその周辺を対象とした調査研究

□ 地表からの調査

地表地質調査、浅層ボーリング調査、地上物理探査、表層水理調査

□ ボーリング孔を用いた調査

深層ボーリング調査(HDB-3～11)

掘削長：470～1,020m

岩芯観察、物理検層、水理試験、力学試験など

調査終了後、長期モニタリング装置を設置し、地下水の圧力及び水質のモニタリングを実施

→ 地上からの地質環境の調査研究

深地層における工学技術の基礎の開発

地下施設建設に伴う周辺環境への影響調査

第1段階における深地層の科学的研究

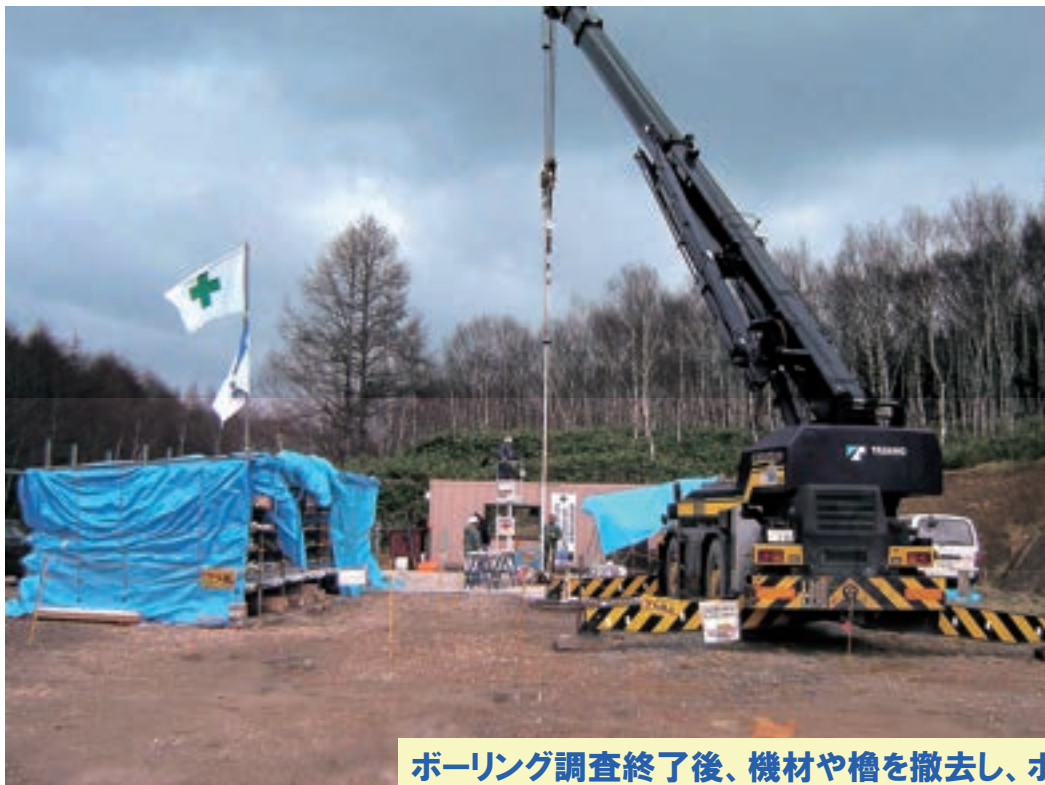
■ 第1段階の調査研究の段階・領域・項目・対象の整理

対象領域	段階	2000 (年度)	2001	2002	2003	2004	2005	対象・目的
幌延町 全 域	幌延町全域を対象 とした調査研究段階							地質構造の三次元分布 地下水の流動特性 物質移動の遅延効果 地下施設の力学・水理 環境影響評価
研究所 設置地区	研究所設置区及び その周辺における 調査研究段階			前半	後半			地下の温度環境 希釈効果
実施項目	既存情報を用いた調査							✓
	空中物理探査							✓
	地上物理探査 (電磁探査)							✓
	(反射法地震探査)							✓
	(電磁探査)							✓
	(高密度反射法地震探査/重力探査)							✓
	(高密度電磁探査)							✓
	地表調査							✓
ボーリング調査	(HDB-1/2)							✓
	(HDB-3/4/5)							✓
	(HDB-6/7/8)							✓
	(HDB-9/10)							✓
	(HDB-11)							✓
環境調査								✓



電磁探査の現地作業風景
右上はボーリング調査の櫓

ボーリング孔への水圧モニタリング装置の設置



ボーリング調査終了後、機材や櫓を撤去し、ボーリング孔内に地下水圧モニタリング装置を設置

雪上車での移動



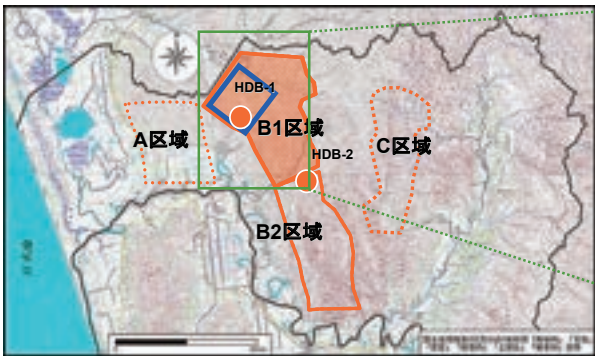
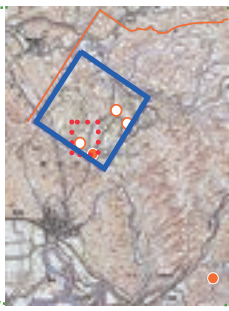
冬期の観測機器のデータ回収や
点検には場所により雪上車を利用

表層水理調査（河川流量観測）



冬期の研究所周辺の小河川の流量観測
作業は、川を掘り出すことから開始

研究所設置地区及び研究所設置場所の選定（成果）

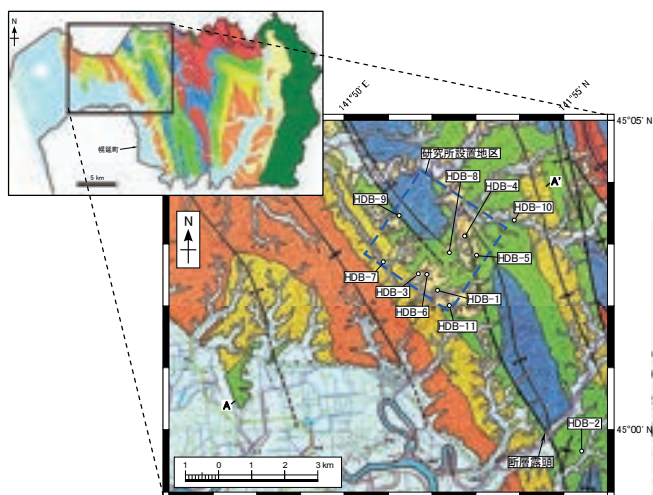
	研究所設置候補区域 A, B1, B2, C	研究所設置候補区域 B1, B2	研究所設置地区	研究所設置場所
調査対象領域				
調査項目	文献調査 地質調査 空中物理探査 地上物理探査	文献調査 地質調査 試験調査（HDB-1孔、HDB-2孔） 土地利用状況	試験調査 土地利用状況	土地利用状況
選定要件	研究の対象となる地層と地下水の存在 ・深度350m程度に層厚150m程度 ・塩水系の地下水	対象地層の存在 地下水の存在 土地利用状況 ・国有林、農地 地下施設の安全な建設・維持 ・メタンガスの胚胎 ・力学強度など	研究の展開 地質学的条件 施設の建設 地形条件 道路状況 土地利用状況	許認可 用地取得 施設の建設 地形条件 道路状況 土地利用状況

地上からの地質環境の調査研究（成果1）

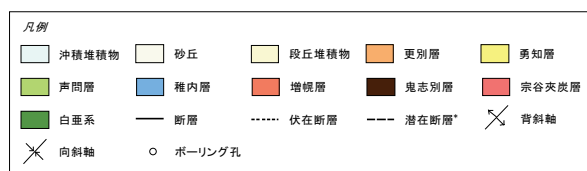
■ 地質・地質構造に関する調査研究

研究所設置地区及びその周辺の地質・地質構造

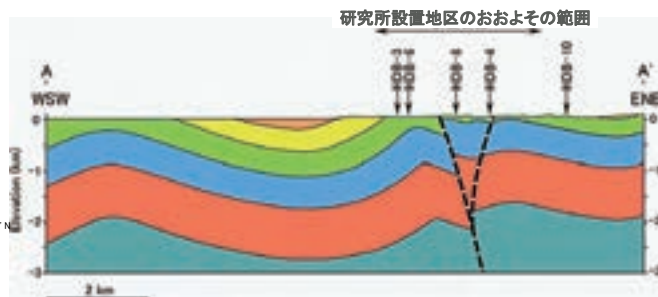
- 更別層：礫岩・砂岩・シルト岩の互層から構成され、亜炭層を挟在、層厚最大約700m
- 勇知層：軟質な細粒砂岩、層厚約400～800m
- 声間層：塊状の珪藻質泥岩が主体、層厚約400～700m
- 稚内層：層理の不明瞭な珪質泥岩あるいは層理の明瞭な硬質頁岩が主体、層厚約600～1,000m



研究所設置地区及び周辺の地質図



* 反射法地震探査、AMT探査およびボーリング調査に基づく

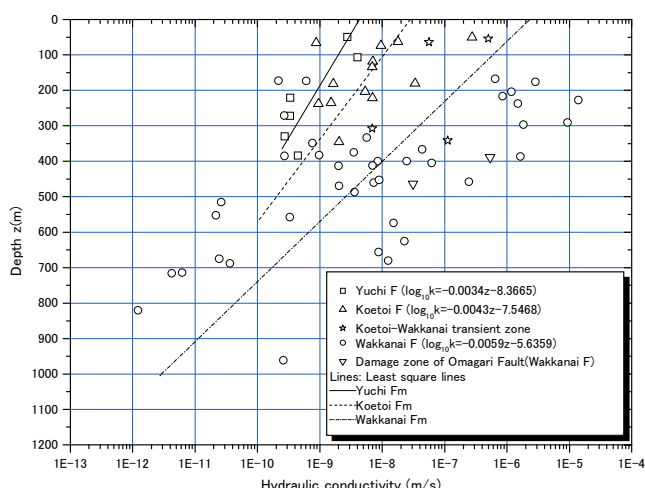


研究所設置地区及び周辺の地質断面図(A-A'断面)

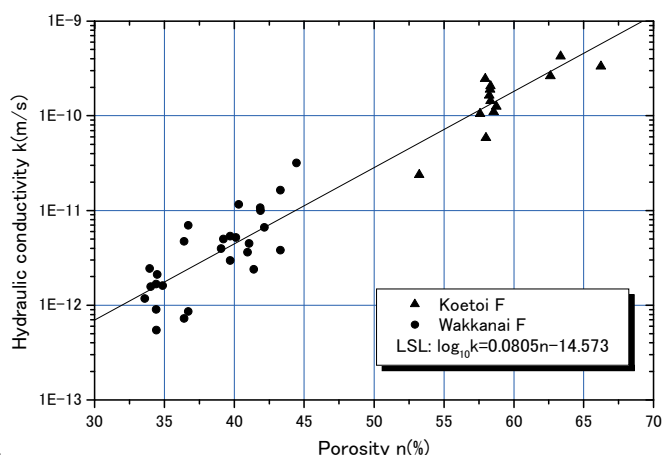
■ 岩盤の水理に関する調査研究

水理試験結果：地層の透水係数

- 原位置試験
 - 稚内層： $10^{-11} \sim 10^{-5} \text{ m/s}$ と広範囲。深度依存性を示し、深度に対する変化率が高い
 - 声問層、勇知層： $10^{-10} \sim 10^{-8} \text{ m/s}$ の範囲。深度依存性を示す
- 室内試験
 - 稚内層、声問層に係わらず、空隙率と良い相関を示す



透水係数分布(原位置試験)

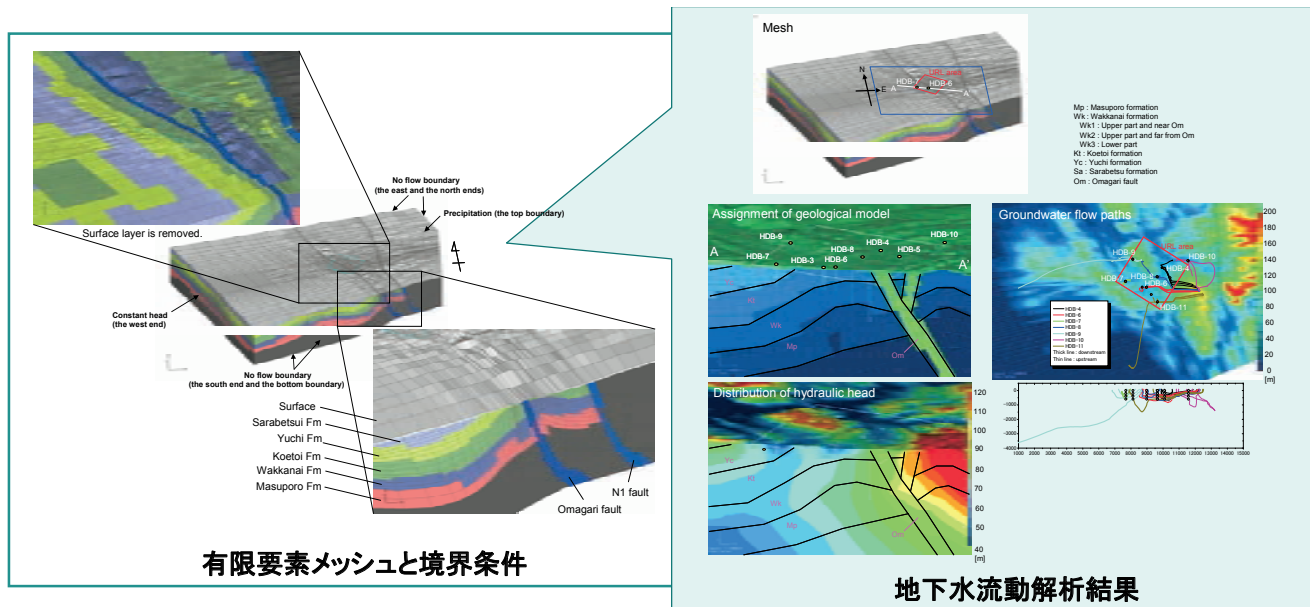


透水係数分布(室内試験)

■ 岩盤の水理に関する調査研究

水理地質構造モデルの構築と地下水流動解析

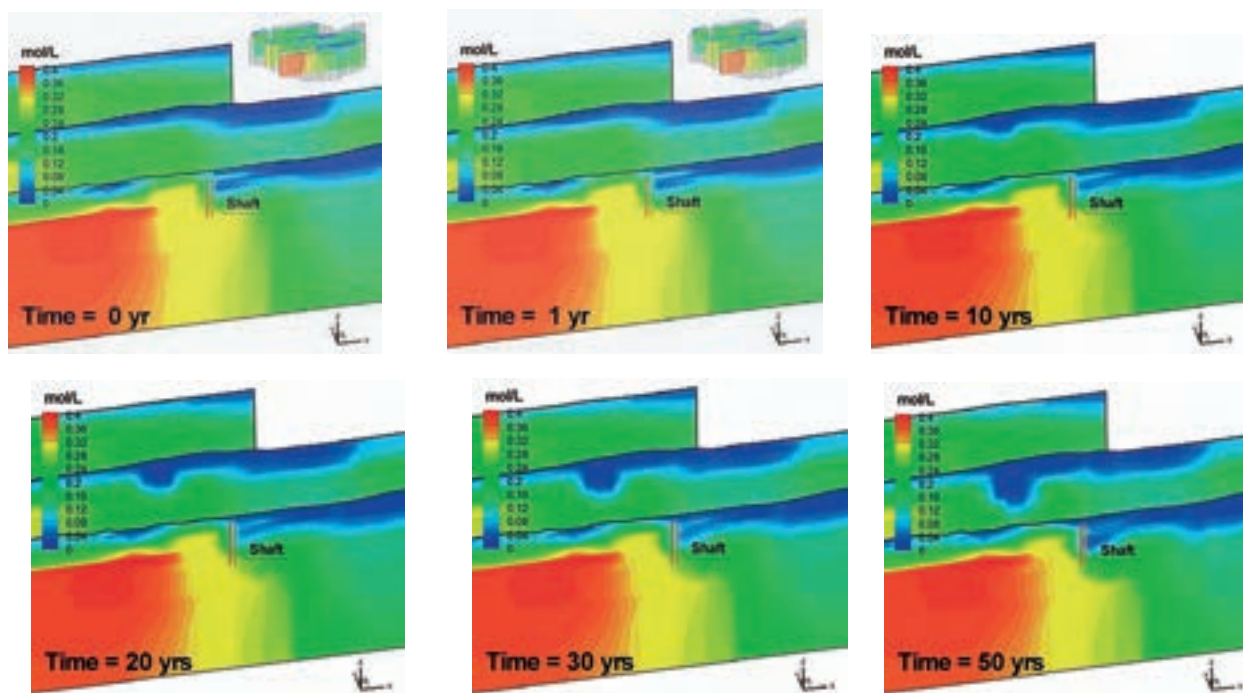
- 均質連続体モデルによる解析
- 稚内層、声問層、勇知層の透水係数の深度依存性を考慮
- 研究所設置地区の地下水は大局的には東側から西側に流れ、局所的な流れは地形勾配に支配される



地上からの地質環境の調査研究（成果4）

■ 地下施設建設に伴う地質環境の変化の予測

地下水中の塩化物イオン濃度の変化



地上からの地質環境の調査研究（成果5）

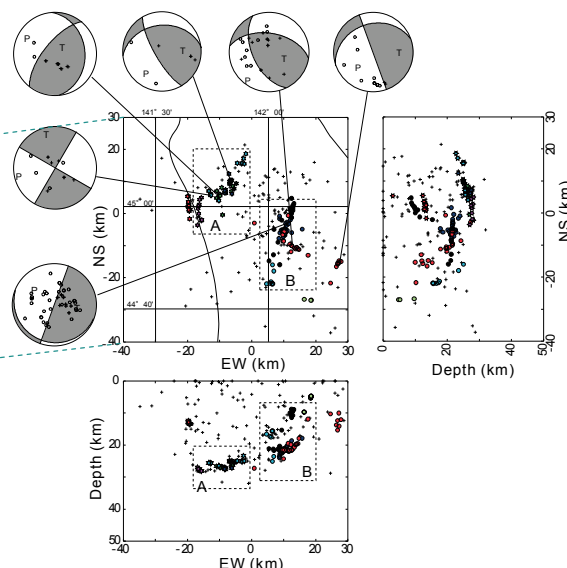
■ 地質環境の長期安定性に関する調査研究

地震活動の調査・解析

- これまでに取得された地震データに基づき、hypomhとマルチプレットクラスタリング解析により震源分布及びメカニズム解を推定
- 解析の結果、南北方向もしくは北北東から南南西に延びる震源分布が推定された



北海道北部における地震計設置場所



北海道北部における震源分布(解析結果)

深地層における工学技術の基礎の開発（成果1）

■ 地下施設の設計・施工計画の策定

地下施設の支保設計

- ・ボーリング調査で得られた力学試験結果等より、堆積岩(軟岩)においても、不連続面(割れ目・ハークラック)の影響を受けることを考慮して設計を実施

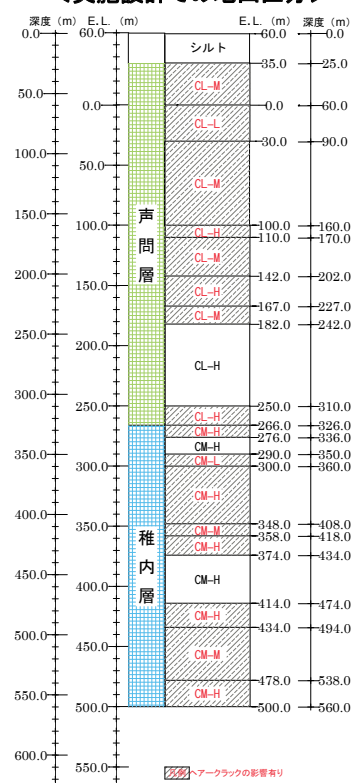
- ①岩級(岩盤物性値)を母岩の硬さ、割れ目頻度、ヘアークラックの有無で区分
- ②岩級と土被り(地圧)に応じて、挙動予測解析を実施
- ③ゆるみ領域(塑性領域)幅と支保部材の健全性から空洞の安定性を評価

＜解析用岩盤物性値＞

岩級区分	静弾性係数 MPa	割れ目 低減 係数	強度特性		ヘアークラック 低減係数	
			c	Φ	変形	強度
声間層(珪藻質泥岩)						
CL-H	1300	1.0	2.2	15	0.8	0.7
ヘアークラック 有	1040		1.5			
CL-M	500	0.38	0.8		0.9	0.8
ヘアークラック 有	450		0.6			
CL-L	300	0.23	0.5		1.0	1.0
ヘアークラック 有	300		0.5			
稚内層(硬質頁岩)						
CM-H	2500	1.0	5.2	25	0.8	0.3
ヘアークラック 有	2000		1.6			
CM-M	500	0.60	3.1		0.9	0.5
ヘアークラック 有	1350		1.6			
CM-L	300	0.20	1.0		1.0	1.0
ヘアークラック 有	300		1.0			

- HDB-3およびHDB-6
のコア観察結果を内
挿して設定した地山
区分のため、**施工時
の切羽観察での岩級
評価が必要**

＜実施設計での地山区分＞



深地層における工学技術の基礎の開発（成果2）

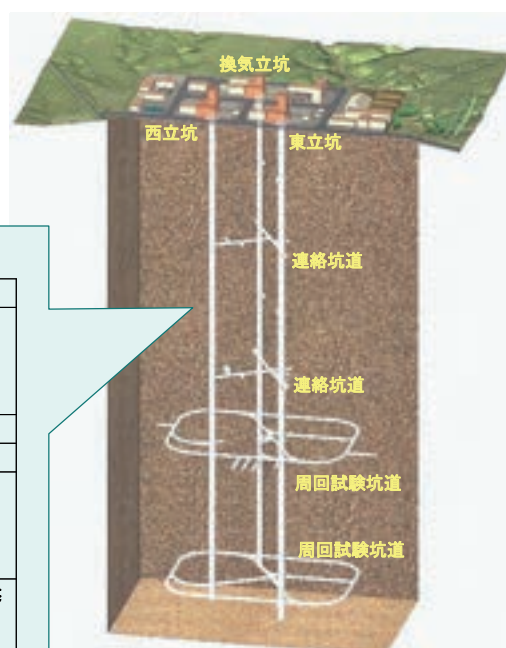
■ 地下施設の設計・施工計画の策定

地下施設の配置計画

- アクセス方式として立坑方式を採用
- 立坑の深度約500mを予定、複数の深度において水平坑道（連絡坑道と周回試験坑道）を展開

坑道断面

項 目	東・西立坑	換氣立坑	水平坑道
断面図			
断面形状	円形	円形	三心円馬蹄形
内 径	6.5m	4.5m	4.0m(内空幅)
掘削工法	全断面掘下がり工法 東立坑 発破工法 西立坑 機械工法 (ショートステップ工法)	全断面掘下がり工法 機械工法 (ショートステップ工法)	全断面掘削工法 機械工法 (NATM)
断面算定根拠	立坑・水平坑道の施工性の確保	立坑の施工性の確保	坑道内からの試験作業空間の確保 (試験長は10数m程度)
備 考	水平坑道の作業立坑として利用		・大型試験座の設置 7.0m(内空幅)断面



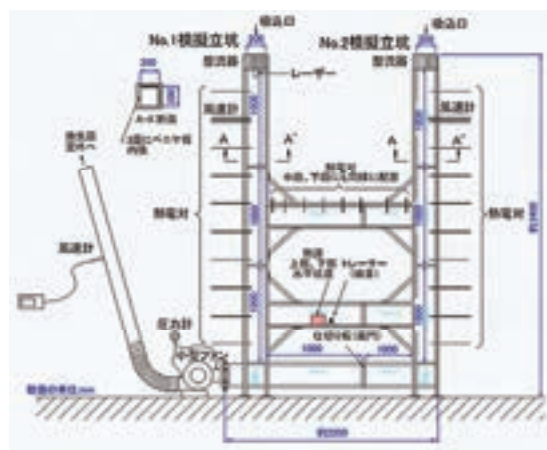
※この検討図は、今後の調査研究の結果次第で変わることがあります。

地下施設レイアウトの検討図

■ 地下施設の設計・施工計画の策定

防災対策の検討

- 坑内環境対策
 - 熱環境の予測解析の結果、労働安全衛生規則の作業環境を満足することを確認
- 可燃性ガス対策
 - 換気方式は、吸出し方式とし、定常時の排出効果とファン停止時の湧出抑制効果を保持
 - 換気設備の性能としては、ガスレイヤー生成防止の風速限界0.5m/s以上の風量を確保
 - 切羽から30m以内で使用する機器類には防爆設備を配置
 - 切羽部における掘削サイクル毎のガスチェックボーリングの実施
- 火災時対策
 - 通気網解析による坑内火災時の燃焼影響範囲の予測と通気制御方式の妥当性を検証
→ 安全区域が確保できることを確認
 - 水平坑道内における緊急時の避難場所の設置
- 通気挙動模型実験
 - 坑内火災時の複雑な通気挙動を把握するための模型実験の実施
→ 通気網解析モデルの改良と信頼性向上

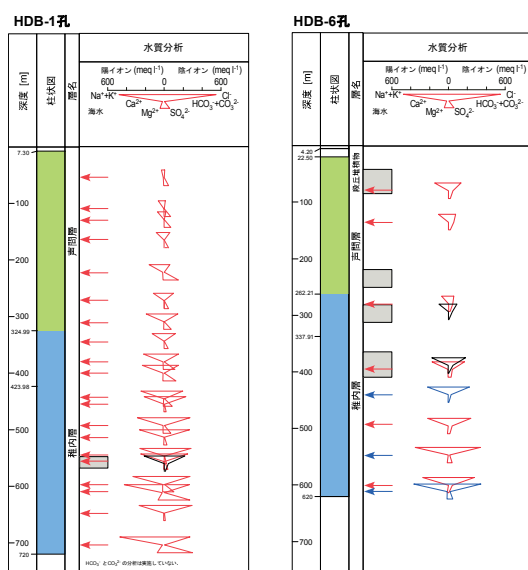


通気挙動模型実験装置の概要

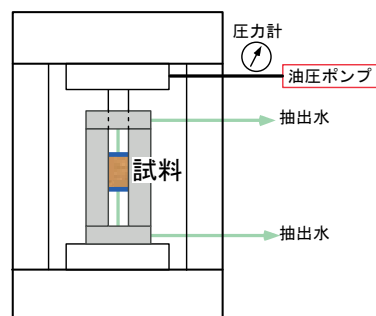
成果の反映（1）

■ 要素技術開発（地球化学調査技術）

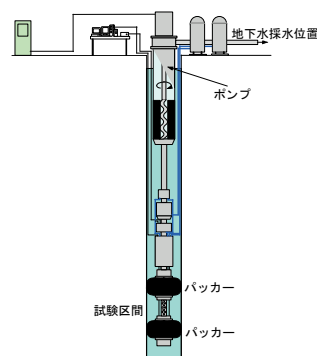
地球化学特性の調査において、揚水した地下水に加えて、間隙水を利用することが有効



- 大気中で抽出した間隙水
- 不活性雰囲気下で抽出した間隙水
- 揚水した地下水



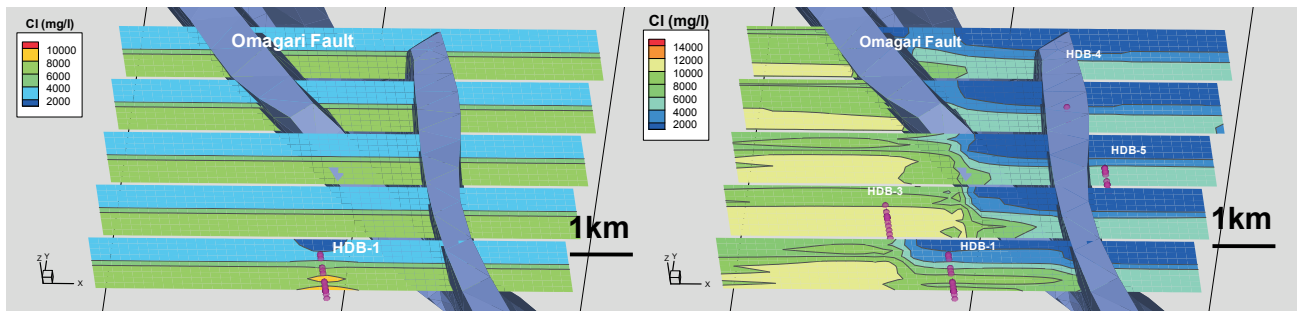
コアからの間隙水抽出装置の概念図



揚水地下水の採水装置の概念図

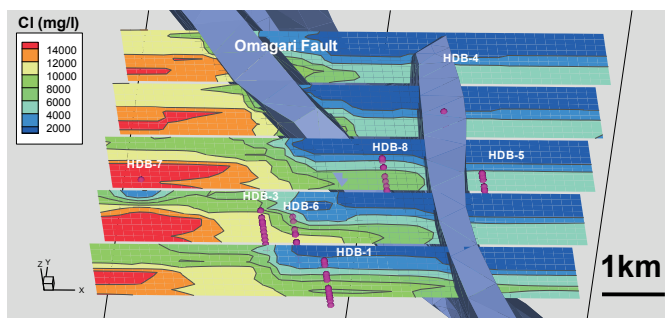
成果の反映（2）

■ 不確実性の低減(地下水水質の空間分布の推定)



(a) HDB-1

(b) HDB-1, 3, 4, 5



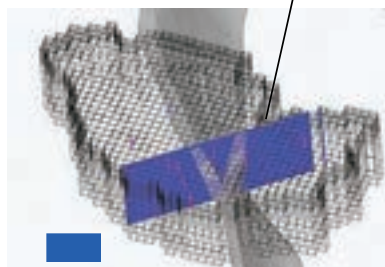
(c) HDB-1, 3, 4, 5, 6, 7, 8

調査計画立案に際して、調査量の増加に応じて不確実性が低減することを考慮

成果の反映（3）

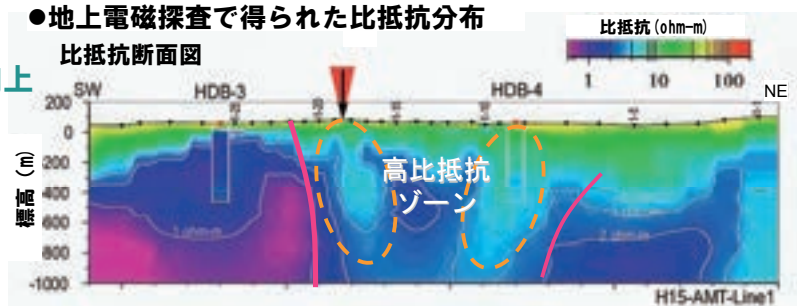
■ 調査手法の体系化と信頼性向上

異なる調査手法の結果を、対比し組み合わせる事により、調査手法体系化の信頼性が向上



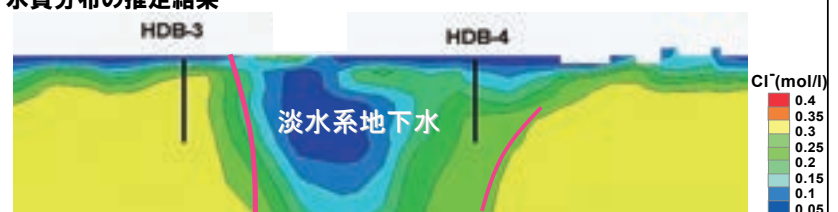
表示断面

●地上電磁探査で得られた比抵抗分布
比抵抗断面図



●地下水の地球化学モデルの例
地下水水質の変遷を考慮した
水質分布の推定結果

比較・検討

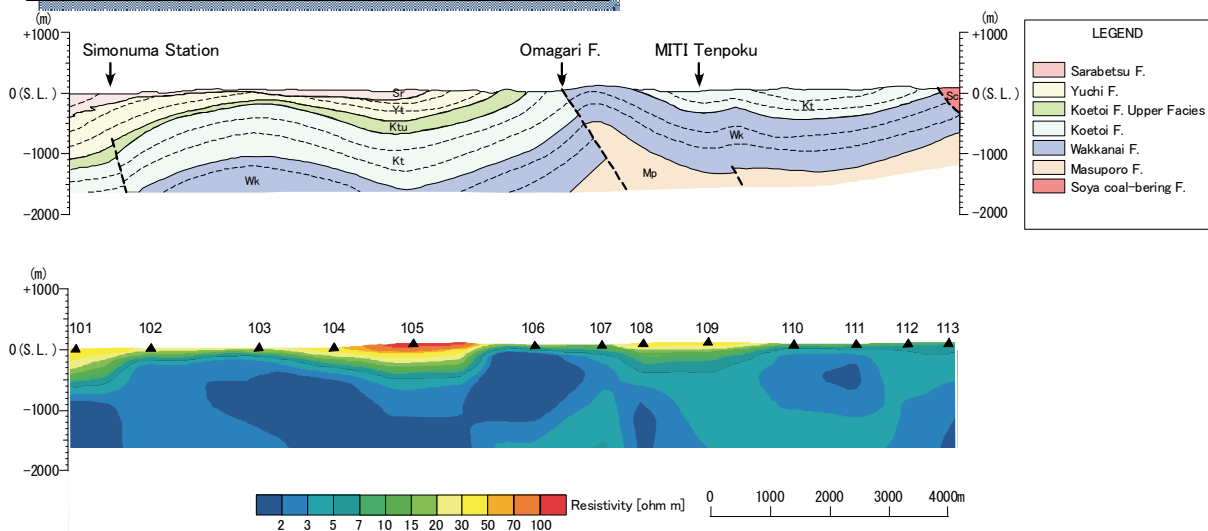


地下施設建設に伴う地質環境の変化の予測と各分野間のモデルの整合性の検討

■ 総合的な地質環境調査の例示

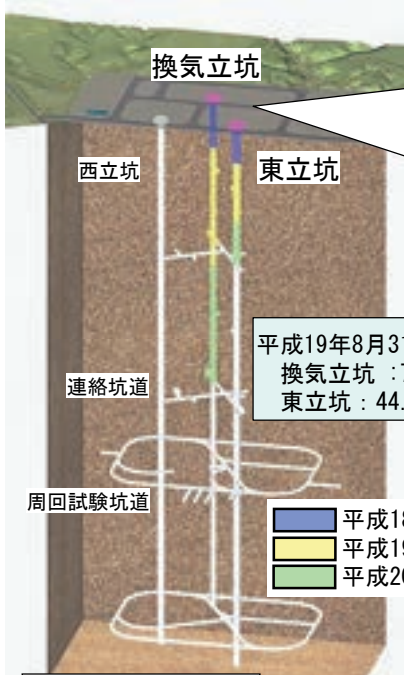
調査を進めるにあたっては、技術面のみならず、安全面、社会面などの条件を考慮することが必要

既存文献に基づく推定地質断面図と
地上物理探査の比較の例



第2段階の現状と今後の予定

地下施設工事の現状



平成19年8月31日現在の深度
換気立坑 : 75.0m
東立坑 : 44.0m

このイメージ図は、今後の調査研究等の結果次第で見直すことがあります。



平成19年度～20年度の予定

- 地下施設工事
 - 換気立坑掘削: 280m
 - 東立坑掘削: 140m
 - 先行ボーリング調査: 520m
- 坑道掘削に伴う調査
- 共同研究・受託研究
 - 沿岸域調査
 - 地質環境総合評価技術高度化開発
 - 処分システム化学影響評価高度化開発
 - 地下坑道施工技術高度化開発 等

- 研究所設置地区及び研究所設置場所の選定の考え方と実施した調査の内容・結果
- 研究所設置地区及びその周辺で実施した調査研究で得られた技術的知見の整理
 - ・地質環境の調査研究
 - ・地質環境の変化の予測
 - ・調査技術の整備
 - ・地質環境の長期安定性に関する調査研究
- 地下施設を安全に建設・維持するための工学技術の基礎の開発として、地下施設の設計・施工計画策定を実施
- 残された課題と、第2段階の調査研究

地層処分システムの工学技術と安全評価手法への活用

地層処分システムの工学技術と安全評価手法への活用

地層処分研究開発部門
地層処分基盤研究開発ユニット
ユニット長 油井 三和

1. はじめに

独立行政法人 日本原子力研究開発機構（原子力機構）東海研究開発センターでは、国の計画・方針にしたがい、地層処分研究開発を進めている。本稿では、地層処分研究開発のうち、幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第1段階）で得られた地質環境データを活用した工学技術および安全評価手法の適用性確認の現状について報告する。

2. 目標と進め方

原子力機構は、処分事業や安全規制を支える技術基盤を強化していくという観点から、「実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認」と「地層処分システムの長期挙動の理解」の2つの研究開発目標のもと研究開発を進めてきた。幌延深地層研究所は、前者の目標を達成するための中核の施設の一つである。

これら2つの研究開発目標に対して、幌延深地層研究計画の地上からの調査研究段階（第1段階）における段階目標としては、工学技術の開発では、処分場の設計手法の適用性確認とそれに基づく工学技術の改良、代替技術の開発や同段階における設計上の留意点の提示を掲げた。また、安全評価手法の開発では、処分場の安全評価手法の適用性確認とそれに基づく評価手法の改良や同段階における安全評価上の留意点の提示を掲げた。

研究の進め方としては、幌延深地層研究計画における調査研究のみでは個別現象のメカニズムや時間依存性の理解を進めるには限界があるため、条件を制御した室内・工学試験や放射性核種を用いた試験と連携することにより、理解や一般化を進め、設計や安全評価に関する技術の信頼性向上を図っていくこととした。また、調査の各段階において設計・施工、解析・評価などを進める際の留意点なども含めて地層処分技術の知識基盤として整理していく。

3. 幌延深地層研究計画の第1段階における地層処分研究開発の実施内容

1) 工学技術の適用性確認

ここでは、幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階で得られた地質環境データを活用した工学技術の適用性確認について代表的な成果例を報告する。成果例としては、具体的な地質環境に適用するための設計フローの更新、検討対象深度や地質環境条件の設定方法、空洞安定性評価指標の更新、施設や人工バリアの設計上の留意点などが挙げられる。

詳細は、「幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第1段階）研究成果報告書 分冊『地層処分研究開発』」（藤田他，2007）の第2章を参照されたい。

(1) 処分場設計フローの検討と更新

幌延深地層研究所で取得された具体的な地質環境データを利用して設計に関する検討を行うに当たっては、最新の知見を踏まえ、第2次取りまとめで示した処分場全体の設計フローを見直し、更新した。なお、処分方式としては処分孔堅置き方式を想定した。見直しにおいては、幌延地域の特徴である軟岩、海水系の地質環境であることに着目し、埋め戻し材とオーバーパックの設計順序、低アルカリ性コンクリート支保工設計などに留意した。

(2) 検討対象深度と地質環境条件の設定

① 検討対象深度の設定

第2次取りまとめでは、地質環境の長期安定性、地質環境特性、現在の建設技術や調査技術の適用範囲などを考慮し、合理的に地下施設を建設できる最大深度として、軟岩系岩盤では深度500mを想定した。一方、最終処分法では、深度300m以深に廃棄物を処分することが

明示されている。したがって、ここで検討する深度としては 300～500m とした。

深度の設定に当たっては、処分孔の力学的安定性が確保されること、平面的な不均質性は小さいことなどから設置環境として鉛直方向に均質で大きな岩体が存在することの 2 つの条件を設定した。幌延深地層研究所の建設地点の岩盤等級区分、岩盤等級毎の変形・強度特性から、深度 450m 付近の岩盤が、ある程度の厚さを有し、かつ処分孔の力学的安定性を満たし得る領域と評価した。以降の検討は深度 450m を目安として実施した。

② 設計のための地質環境条件の設定

岩盤の熱特性、水理特性、力学特性については研究所設置地区に近い複数のボーリング孔を対象とした原位置試験や岩盤コアを用いた室内実験結果などから設定した。地球化学特性については、アルカリイオンや塩素イオン濃度などは測定結果に基づくとともに、pH、Eh や C、Fe、S 濃度については地球化学モデルにより推定した。

③ 低アルカリ性コンクリート支保工の開発

地下空洞を建設する際には、特に軟岩系においては周辺岩盤の力学的な安定性を図るため支保工を設置する場合が多い。原子力機構では、低アルカリ性セメントとしてフライアッシュ (FA) を高含有したシリカフューム (SF) セメント (HFSC: Highly Fly Ash Contained Silica Fume Cement) の開発を進めてきており、幌延深地層研究所にて計画している HFSC 吹付けコンクリートの原位置施工試験へ向け、試験計画案の策定ならびにコンクリートの配合選定試験を実施した。HFSC 吹付けコンクリートの支保工への適用性については、幌延深地層研究所の地下施設の設計基準強度 (36MPa (材齢 28 日)) を目標とし、模擬空洞での吹付け試験により施工性について検討した結果、ほぼ適用可能との見通しを得た。pH の低下に関する室内実験では、65℃であれば目標の 11 近くまで低下するのに対し、常温では目標値まで低下するのに時間を要すると考えられたため、解析的な評価により補完した。

④ 地下施設の設計

(2) で設定された地質環境条件を用いて地下施設を設計するに当たり重要なことは、軟岩系であることを考慮した空洞安定性評価指標の設定である。これは、①支保工応力度、②岩盤の局所安全率、③岩盤の直ひずみおよび最大せん断ひずみを指す。地下施設の設計では、③については、解析技術の進歩により情報化施工のための重要な指標として、また、②はどのような対策工がどの程度の範囲に対して必要かの判断基準として用いられるに留まっている。以上の実績を踏まえ、実際の地質環境を対象とした処分場の単一坑道の設計においては、①許容応力度設計法による支保工の健全性照査、②塑性領域が対策工 (ロックボルト) により改良可能な範囲にあることの 2 つの基準を設けて支保工設計を行うこととした。

⑤ 人工バリアの設計

上述の処分場の設計フローを踏まえ、緩衝材やオーバーパックに関する個々の設計手順を検討し、個別要素の設計フローの構築を行った。

幌延のような海水系地下水条件下においては、緩衝材の透水性や膨潤応力に関する性能が、降水系地下水と比較して、低下する傾向にあることから、これらの影響を考慮した緩衝材の試設計を行った。緩衝材の設計では有効粘土密度や厚さの設定が重要であるため、これらに着目して、止水性、コロイドろ過性、応力緩衝性などに関する性能と緩衝材仕様との関係について検討を行った。この結果、第 2 次取りまとめで示した緩衝材仕様により、所期の性能を確保できることがわかった。

幌延の地下水化学を考慮したオーバーパックの設計検討では、炭素鋼については、緩衝材中では不動態化せず全面腐食を受けると考えられること、銅については、活性溶解型の分極挙動であり、局部腐食発生の可能性は小さいことなどが示された。また、炭素鋼を用いた場合、第 2 次取りまとめで示したオーバーパック仕様により、所期の性能を確保できることがわかった。

(6) まとめ

幌延地域の地質環境は、軟岩、海水系地下水といった特徴を有しているため、これらの特徴を考慮した工学技術の適用性確認を進め、空洞安定性評価指標の見直し、低アルカリ性コンクリート支保工の開発、海水系地下水に対する人工バリア仕様の検討などを行った。これらは、地質環境が実際に与えられた場合の主要な設計手順を試行したものであり、その成果は、処分事業や安全規制の基盤技術として活用されるものと考えられる。

2) 安全評価手法の適用性確認

ここでは、幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階で得られた地質環境データを活用した安全評価手法の適用性確認について代表的な成果例を報告する。成果例としては、具体的な地質環境を対象とした物質移行解析作業フローの設定、物質移行経路情報の抽出、幌延深地層研究所設置地区周辺の堆積岩に関する物質移行遅延性能の把握や安全評価上の留意点などが挙げられる。

詳細は、「幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第1段階）研究成果報告書 分冊『地層処分研究開発』（藤田他，2007）の第3章を参照されたい。

(1) 物質移行解析作業フローの設定

幌延深地層研究所で取得された地質環境情報に基づき物質移行解析を実施するための具体的な手順を作業フローとして作成した。本作業フローでは、物質移行解析を行うために、ボーリング孔などを用いた調査や試験で取得した地質環境データから構築した地質構造の概念モデルに基づき、地下水流動に影響を及ぼす地質構造や透水性の分布などを水理地質構造モデルとして設定する。次に、地下水流動解析による地下水流動場の推定を行い、対象とする地質環境の物質移行挙動を表現するモデルの構築と地下水流速、移行距離などを設定する。また、物質移行に関する地下水化学、岩石の物理化学特性などの地質環境特性に関するデータを整理し、物質移行解析で用いる分配係数、拡散係数などを設定する。以上の作業フローに従って、物質移行解析を試行することにより、実際の地質環境に対して具体的な調査・解析・評価からなる一連の安全評価手法の構築が可能となる。

(2) 物質移行経路情報の抽出

地上からのボーリング孔などを利用した調査解析では、断層などの不連続構造、地質構造の空間分布、岩盤の透水性分布、地下水水質の三次元分布などが整理された。これらの調査結果に基づき、研究所設置地区周辺の地質構造モデル、水理地質構造モデル、地球化学モデルなどが構築された。

地質構造モデルの検討においては、割れ目帯の分布や透水性への寄与が示唆されているものの、それらを定量化してモデルに取り込むまでには至っていない。また、大曲断層については、地表調査や物理探査、深層ボーリング調査の結果から推定した調査結果を統一的に説明できる同断層の三次元分布を考慮した。これらの水理特性に関わるデータの解釈を踏まえた水理地質構造モデルを用いて地下水流動解析を実施した。解析領域は幌延町全域を包含する約30km四方の領域とした。対象とした水理地質区分は、増幌層より下位、増幌層、稚内層、声間層、勇知層、更別層、表層、大曲断層とした。地下水流動解析は、実測値のもつ不確実性、取得されていない地層の透水係数、上部境界条件を考慮して、各層の透水係数などを変化させた計18ケースの解析を実施した。物質移行の開始点は、工学技術の設計深度と同じ450mとした。以上により、概略的な物質移行経路を把握した。

(3) 幌延深地層研究所設置地区周辺の堆積岩に関する物質移行遅延性能の把握

研究所設置地区周辺の堆積岩に関する物質移行遅延性能の把握では、物質移行解析を進める上で感度の高い因子や不確実性の幅が大きな因子などに関する検討を通じて、地質環境の調査やモデル化を進める上で留意すべき点を抽出し次段階の調査計画へ反映することを目的

として検討を進めた。

物質移行モデルの具体化に当たっては、地下水流動解析による移行経路（流跡線）、地下水流速、移行距離などの移行経路情報が不均質性を有するという特徴を踏まえ、

① 移行経路情報の不均質性を物質移行解析に直接取り込む方法

② 移行経路情報の不均質性を統計処理などにより簡略化し、物質移行解析に取り込む方法を比較した上で、①は流跡線に基づく解析に、②は感度解析に、それぞれ用い考察を行った。

物質移行モデルは、対象地域が堆積岩であることから多孔質媒体モデルを仮定した。また、海水系地下水などの情報に基づき分配係数などの核種移行パラメータの設定を行った。代表的な核種である Cs-135, Se-79, Np-237 および Th-229 に対する物質移行解析の結果、稚内層、声問層とも高い遅延性能を有することが分かった。

しかし、調査で取得した割れ目帯の透水係数分布などを参考にすると、稚内層では割れ目帯が地下水流動に及ぼす影響が大きく、移行経路として機能している可能性が高いと考えられる。今後の調査を踏まえた水理地質構造モデルや物質移行モデルの見直しが必要である。

(4) まとめ

幌延深地層研究所で取得された地質環境情報に基づき物質移行解析を実施するための具体的な手順を作業フローとして設定し、地上からのボーリング孔などを利用した調査に基づく地下水流動解析により物質移行経路情報を抽出し、さらに移行経路情報の評価手法を比較検討した上で、研究所設置地区周辺の堆積岩に関する物質移行遅延性能を把握した。以上を通じ、一連の評価手法の具体例を提示した。これらは、地質環境が実際に与えられた場合の主要な安全評価手順を試行したものであり、その成果は、処分事業や安全規制の基盤技術として活用されるものと考えられる。

4. 今後の予定

1) 工学技術の開発

第2段階を通じた工学技術の具体的な地質環境への適用性検討を進め、成果を体系的に整理して提示していく。研究としては、「地下施設の掘削に伴い得られる様々な情報や地下施設自体を利用する研究」と「地下水や岩を用いた室内試験や解析的検討に関する研究」に分類し検討を進める。特に、建設工事の支保工材料としての低アルカリ性セメントの施工事例や留意点の整理、設計手法の検証や建設技術の例示・留意点の抽出、人工バリア材料の設計手法や長期挙動評価手法の信頼性向上、原位置試験計画の立案などを進める。

2) 安全評価手法の開発

第2段階を通じて物質移行解析に至る一連の手法の具体的な地質環境への適用性検討を進め、成果を体系的に整理して提示していく。特に、掘削段階で取得される地下水や岩石試料などを用いて、地下水流動や物質移行に関するデータ取得を進め、現象の理解と評価手法の高度化を進める。また、掘削段階で不可避なコンクリートやグラウトなどの長期性能への影響に配慮した評価手法を検討する。これら一連の作業を通じ、地質環境の調査・研究や工学技術の開発との連携を進め、経験を蓄積していく。

参考文献

藤田朝雄 他 (2007)：幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第1段階）研究成果報告書 分冊「地層処分研究開発」、JAEA-Research 2007-045。

地層処分システムの工学技術と 安全評価手法への活用

瑞浪, 幌延における地上からの調査研究の成果報告

—地層処分の技術と信頼を支える研究開発: 概要調査への技術基盤の確立—

平成19年9月18日 JAホール

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

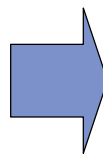
油井 三和

研究開発の目標と進め方

1

研究開発の全体目標

- 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



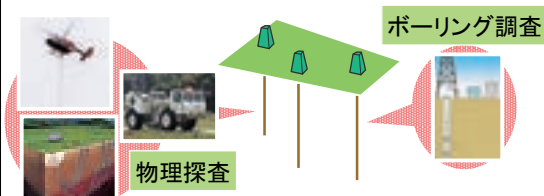
深地層の研究施設計画における第1段階の目標

- 【工学技術の開発】
設計手法の適用性確認
- 【安全評価手法の開発】
安全評価手法の適用性確認

進め方

幌延深地層研究所における調査

- 地質環境情報
- 深部地質環境下での試験
⇒ 地質環境の不均質場の考慮



情報



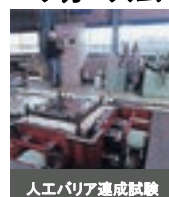
適用



適用

室内試験(エントリー/クオリティ)

- 条件を制御した室内・工学試験
- 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



人工バリア達成試験



放射性核種の溶解・収着・拡散試験

分冊「地層処分研究開発」

- ・第1章 はじめに
- ・第2章 処分技術の信頼性向上
 - 設計手法の適用性確認—
 - ・想定対象深度と地質環境条件の設定
 - ・施設および人工バリアの設計手法の適用事例
 - ・低アルカリ性コンクリートの開発
 - ・地上からの調査研究段階における留意点
- ・第3章 安全評価手法の高度化
 - 安全評価手法の適用性確認—
 - ・物質移行解析に必要な情報の設定手順
 - ・物質移行解析の結果および考察
 - ・地上からの調査研究段階における留意点
- ・第4章 おわりに
 - ・成果のまとめと今後の計画

工学技術の開発

安全評価手法
の開発

工学技術の開発 — 研究成果（1）

◎ 幌延の地質環境の特徴： 軟岩、塩水系地下水

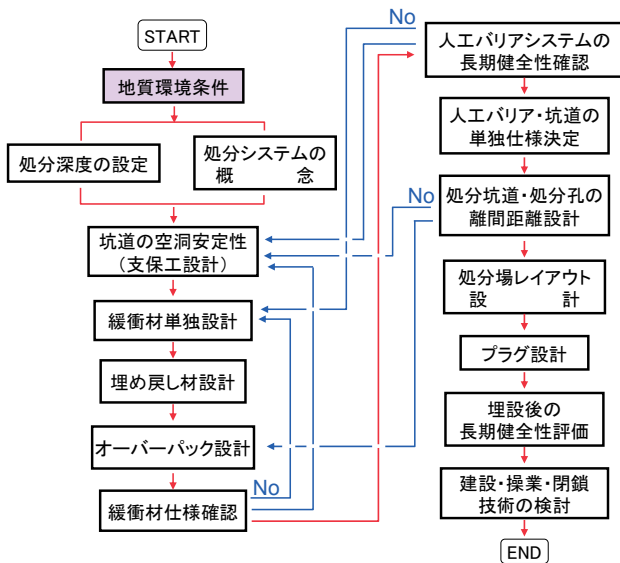
◎ 想定対象深度： 450m

（ある程度の厚さを有し、かつ処分坑の力学的安定性を満たし得る領域）

◎ 空洞安定性評価指標

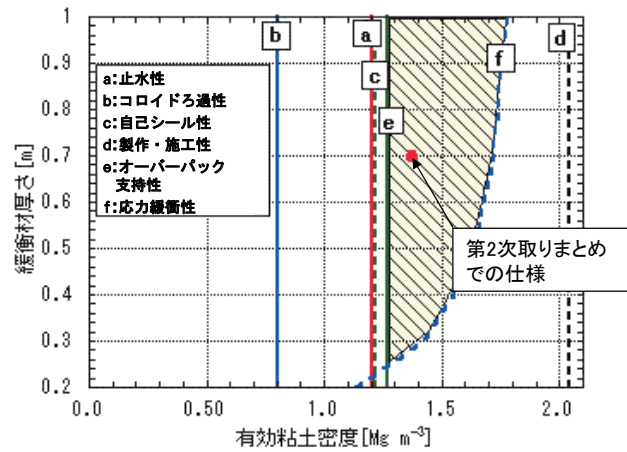
指 標	第2次取りまとめ	第1段階における検討
支保工の応力	許容応力度以内	同左（許容応力度以内）
応力状態	局所安全率1.5を下回る領域が対策工により改良可能な範囲にあること	塑性領域が対策工により改良可能な範囲であること
変形(岩盤の直ひずみ及び最大せん断ひずみ)	桜井・足立(1988)による限界ひずみと弾性係数の関係における中央値を上回る領域が対策工により改良可能な範囲であること	情報化施工のための指標

◎ 処分場設計フローの更新



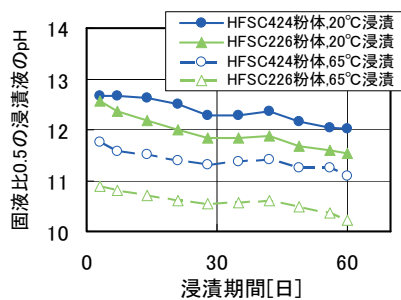
◎ 緩衝材仕様の検討

幌延の地質環境条件を考慮した検討

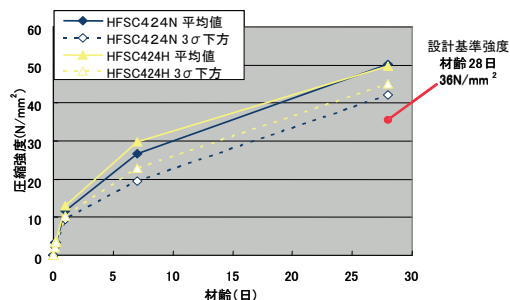


緩衝材設計例（ブロック方式）

◎ 低アルカリ性コンクリートによる支保工の開発



低アルカリ性コンクリート(HFSC)のpH変化

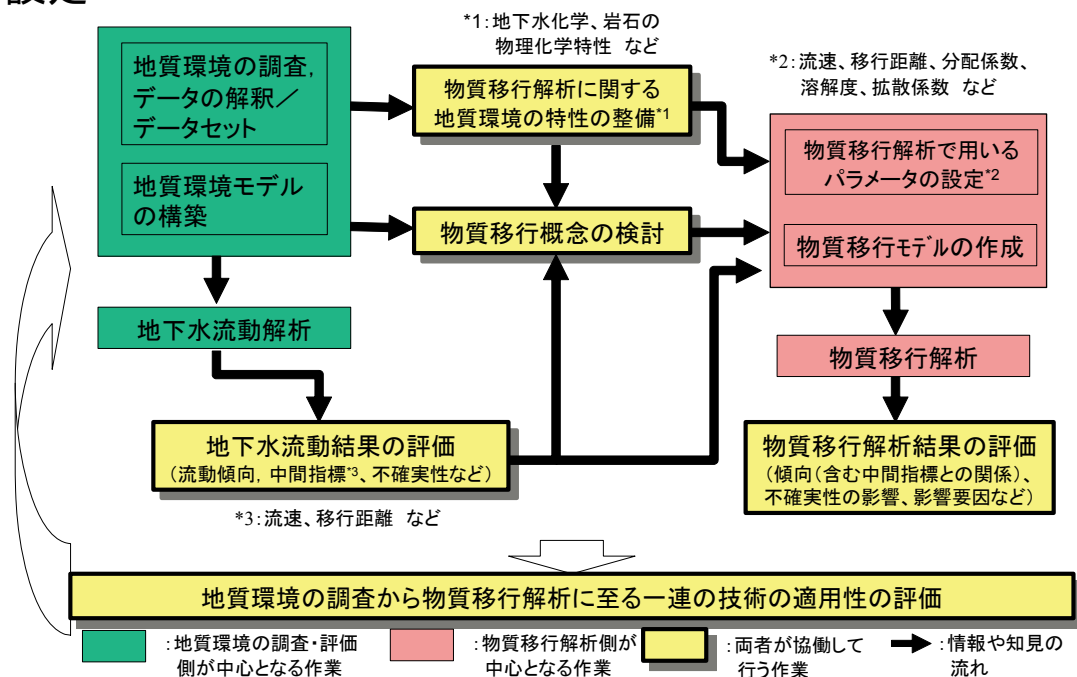


低アルカリ性コンクリート(HFSC)の圧縮強度

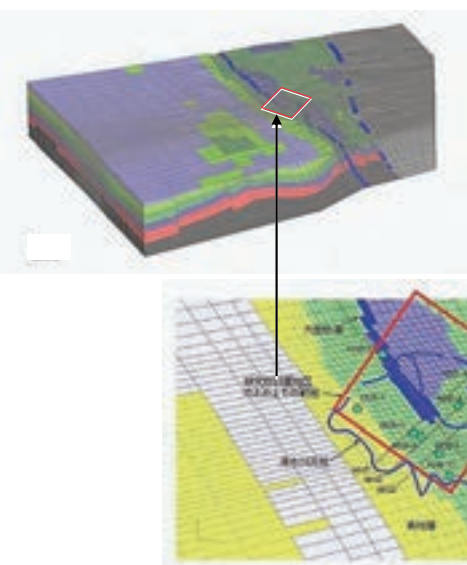


低アルカリ性コンクリートの吹付試験

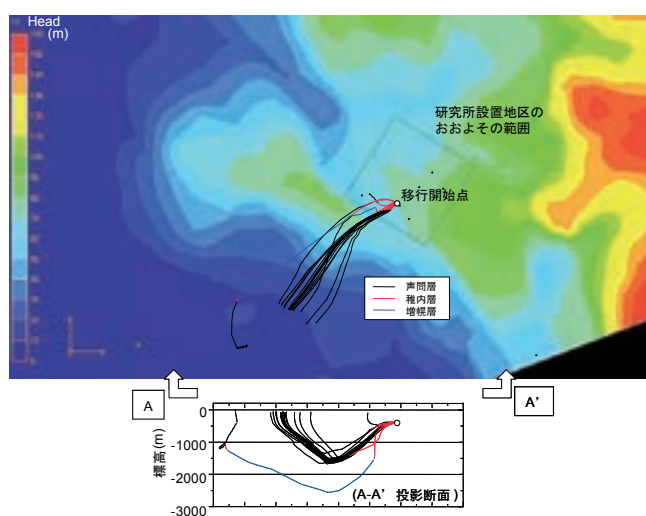
◎ 地質環境の調査・解析から物質移行解析にいたる作業フローの設定



◎ 物質移行経路情報の抽出(地下水流動解析)

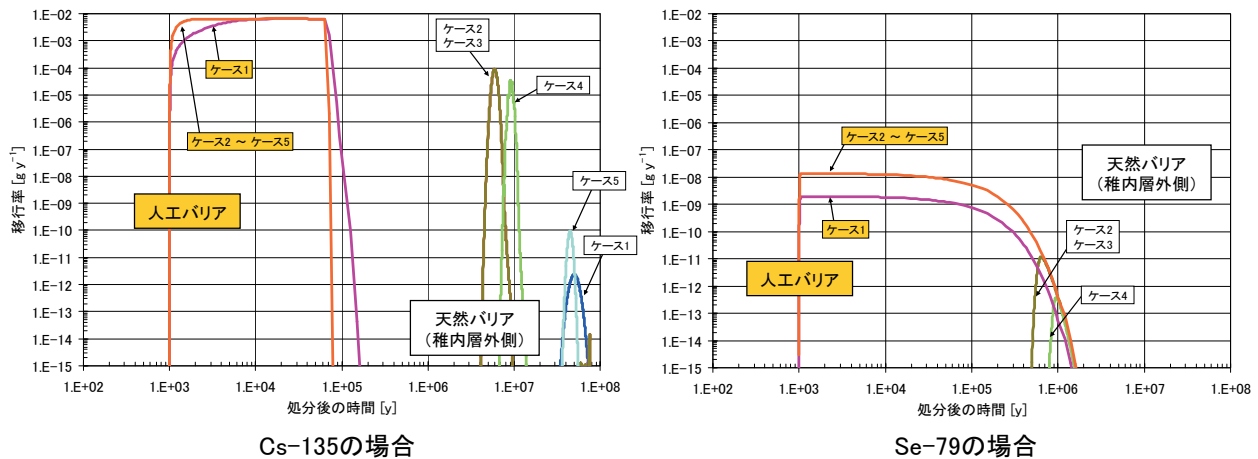


地下水流動解析のため
調査位置図(上)と要素分割(下)
上図の全体の領域は約30km四方



標高-400m断面の全水頭分布と
移行開始点からの地下水流動経路の解析例

◎ 幌延深地層研究所設置地区周辺の堆積岩における物質移行遅延性能の把握 (Cs-135とSe-79の場合の例)



ケース1～4: 水理学的特性(地下水流速, 移行距離など)を変えた場合
 ケース5: 核種移行特性(分配係数)を変えた場合

まとめ

幌延深地層研究所の第1段階(地上からの調査研究段階)で得られた地質環境データを活用

【工学技術の開発】

- 処分場設計フローの更新
- 力学的安定性等に基づく対象深度の設定
- 軟岩系岩盤で必須な空洞安定性評価指標の見直し
- 低アルカリ性コンクリート支保工の開発

【安全評価手法の開発】

- 地質環境データに基づく物質移行解析作業フローの設定
- 物質移行に着目した一連の評価(物質移行経路情報の抽出や岩盤性能の概略把握など)を実施

⇒ 幌延のような特徴(軟岩／塩水系地下水)を有する実際の地質環境条件に対して、技術の適用性を確認

工学技術の開発

【課題】

- 建設技術, 情報化施工技術, グラウト技術, 低アルカリ性コンクリートを用いた支保工技術等の実現性の提示
- 室内試験に基づく設計・長期挙動評価技術開発

【現状】

- 低アルカリ性コンクリートの配合率決定, 建設で持ち込まれる人工材料の影響評価の検討などを実施

安全評価手法の開発

【課題】

- 地質環境モデルの妥当性確認に基づく水理・物質移行モデル等の信頼性向上
- データの不確実性に基づく物質移行影響評価／評価技術の体系化

【現状】

- 安全評価の個別評価(物質移行, 微生物影響等)モデルの詳細化など

研究開発成果の知識化

研究開発成果の知識化

地層処分研究開発部門
研究開発統括ユニット
研究主席 梅木 博之

1. はじめに

独立行政法人 日本原子力研究開発機構（原子力機構）は、地層処分の長期的な安全確保と事業全体に対する信頼を支えるために、研究開発成果を知識基盤として整備し、長い事業期間を通じて、これを常に最新の科学技術的知見を取り込んだ形で事業実施主体や規制関連機関などのステークホルダーに継続的に提供していくことができるよう、知識マネジメントシステムの開発を行なっている。ここでは、これまでに進めてきた知識マネジメントシステムの基本概念の構築とそれに基づくマネジメント機能および知識ベースの基本設計について概要を紹介し、深地層の研究施設計画においてこれまでに得られた研究開発成果の知識化に関するアプローチについて述べる。

2. 知識マネジメントシステムの開発

処分事業の実施主体や安全規制機関など、地層処分計画に関わるステークホルダーは、長期的な安全性を示す論拠（セーフティケース）の構築や地層処分計画の様々な段階における意思決定において、多様な技術的情報やデータ、経験やノウハウなどの知見（これらを一括して「知識」と呼ぶ）を用いる。このような知識は、長い事業期間を通じ、ステークホルダーの要望に沿ってタイムリーに提供されることが必要である。一方、研究開発においては、過去に蓄積された知識に基づいて、最新の科学技術的知見を取り込みながら新たに必要となる知識を適切かつ効率的に生産していくことが重要となる。こうした観点から、知識マネジメントシステムの開発においては、研究開発の成果として蓄積された知識だけではなく、実際の研究開発の場における組織的な取り組みとして従来行われてきた個々の研究者が知識を創出、共有、活用、統合、継承する作業を、最新の IT 技術を適用しながら体系的に管理することを目指している。

提案した知識マネジメントシステムの基本概念は、セーフティケース概念を視軸として構造化した知識を収納する知識ベース、シンクタンクや研究開発セクターなどの知識創造、スタッフのトレーニング、ユーザーであるステークホルダーとのコミュニケーション、全体をマネジメントするナレッジオフィスなどの機能で構成される¹⁾⁻¹²⁾。これによって、研究者同士あるいはステークホルダーと研究者が知識創出・伝達の間となる協働作業を支援する枠組みを提供することが可能となる。この基本概念を具体化していくために、基本設計として必要なマネジメント機能や知識ベースの設計、これらの機能の実現に必要な技術・手法の検討などを行った¹³⁾⁻¹⁷⁾。

基本設計では、「開発を進めている地層処分システムが長期的に安全である」ことを主張するために構築されるセーフティケースの内容を、主張の根拠となる種々の「論証」とある論証に対して考える「反証」との連鎖で表現すること（以下、「論証モデル」という）により、知識ベースに格納されている地層処分技術に関する知識が、セーフティケースの構築という観点からどのように利用されているかをユーザーが理解できるようにするとともに、新たに生産すべき知識は何かを明らかにすることができるよう工夫した。また、こうした論証モデルによって知識をコンピュータ上で適切に取り扱うためのマネジメント機能（論証支援ツール、知識協働支援ツール、コミュニティ支援ツール）を提示した。

論証支援ツールには、論証モデルを作成するために必要な論証スキーム（論理構成のパターンを示したもの）、論証に関する仮説生成を支援する機能、論証モデルを表示する機能が含まれる。知識協働支援ツールは新たな知識の生産に関わる原子力機構の専門家の知識協働のためのポータルサイト、コミュニティ支援ツールは実施主体や安全規制機関などの外部の専門家や非専門家とのコミュニケーションのためのポータルサイトを提供する。これらのポー

タルサイトを介して、ステークホルダーは、論証モデルなどを参照しつつ、セーフティケースの論理構成について議論をし、必要となる知識に関する要望や要求を行うことが可能となる。また、これらの機能を通じて新たに生産された知識は知識ベースに追加され、次の論証モデルの更新に反映される。知識ベースには、データや情報などの知識が収納されるデジタルライブラリ／ストレージサーバーとともに、知識の生産を支援するために必要な専門家の経験・ノウハウをエキスパートシステムとして体系化したライブラリが含まれる。これらは共用ユーティリティを介して利用することが可能となる。

エキスパートシステムライブラリの一つとして、実施主体が段階的に進めるサイト特性調査において、調査フィールドでの様々な条件や状況変化に応じて柔軟に計画を立案・変更できるように、調査の局面における様々な判断を支援するエキスパートシステムの構築に着手している。このシステムは、処分場の設計や安全評価への情報提供に留意してこれまでに深地層の研究施設計画などで実施した地質環境調査やその情報に基づく解析評価について、統合化データフロー¹⁸⁾の形で蓄積してきた経験やノウハウおよび判断根拠に関わる情報をルールベース化し、統合化データフローの発展型、「次世代型サイト特性調査情報統合システム (Information Synthesis and Interpretation System: ISIS)」〔資源エネルギー庁 平成 19 年度地層処分技術調査等委託費 (地層処分共通技術調査：地質環境総合評価技術高度化開発) にて実施〕として開発を行うものである。

3. 今後の展開

知識マネジメントシステムは、平成 22 年度を目途にプロトタイプを開発し、公開を行って幅広い利用に供する計画である。これを社会共有の知的財産とするため、ステークホルダーなどのユーザーとの対話を進めながら要望を的確に把握して、システムの設計、構築、試行を段階的に実施することとしている。このうち、次世代型サイト特性調査統合システムについては、まず深地層の研究施設計画の第 1 段階の調査研究などで得られた経験・ノウハウの抽出と分析を踏まえて、地表からの調査・評価に関わる判断支援のエキスパートシステムとして構築し、第 2 段階以降の調査研究などを通じて引き続き開発を進めることによって、調査全体を網羅した総合的な調査技術体系として整備していく予定である。地層処分基盤研究開発調整会議¹⁹⁾などを通じた研究開発の調整や協力の枠組みの下、他の関連研究開発機関の成果も適切に知識ベースに反映していくことにより、地層処分技術に関する研究開発の中核的機関としての役割を果たすことができるものと考えている。

参考文献

- 1) 河田東海夫 (2006) : 地層処分の知識基盤構築, 第 1 回原子力機構報告会「原子力・未来への挑戦ーサイエンスからテクノロジーー」報告要旨・スライド集, pp.40-51.
- 2) 河田東海夫 (2007) : 放射性廃棄物地層処分の知識基盤構築, 「原子力知識マネジメント; その現状と展望」講演資料集, pp.47-61.
- 3) Kawata, T., Umeki, H. and McKinley, I. G. (2006) : Knowledge management; The Emperor's new clothes?, Proceedings of International High-Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM), Las Vegas, Nevada, pp.1236-1243.
- 4) Kawata, T., Umeki, H., Osawa, H., Nakano, K., Makino, H., Naito, M. and McKinley I. G. (2007) : Knowledge Management: sine qua non for HLW disposal in the 21st century, International Journal of Nuclear Knowledge Management (to be published) .
- 5) Miyamoto, Y., Umeki, H., Ohsawa, H., Naito, M., Nakano, K., Makino, H., Shimizu, K. and Seo, T. (2006) : Key R&D activities supporting disposal of radioactive waste; Responding to the challenges of the 21st century, Nuclear Engineering and Technology, Vol.38, No.6, pp.505-534.
- 6) 中野勝志, 梅木博之, 大澤英昭, 内藤守正, 牧野仁史 (2006) : 地層処分技術に関する知識管理システムの開発, 日本原子力学会 2006 年秋の大会, B63.
- 7) 大澤英昭, 梅木博之 (2006) : 21 世紀の地層処分研究開発; 技術的知識基盤の構築, シンポジウム「先端技術と原子力」講演要旨集, 日本原子力学会中部支部「先端技術と原子力」研究専門委員会, 3-1~3-7.

- 8) 大澤英昭, 梅木博之, 内藤守正, 中野勝志, 牧野 仁史 (2006): 高レベル放射性廃棄物地層処分に関する知識基盤構築に向けた取り組み; 地層処分技術に関する知識マネジメントシステムの基本概念”, 研究・技術計画学会第 21 回年次学術大会講演予稿集 I, 1F16, pp.376-379.
- 9) 梅木博之 (2006): 21 世紀の地層処分研究開発; 技術的知識基盤の構築, 日本原子力学会誌, Vol. 48, No. 3, pp.166-171.
- 10) 梅木博之 他 (2006): 地層処分技術に関する知識管理システムの基本的概念, JAEA-Research 2006-078.
- 11) Umeki, H. (2007): A Challenge for computing in the 21st century; Radwaste knowledge management, Proceedings of Joint International Topical Meeting on Mathematics & Computations and Supercomputing in Nuclear Applications (M&C+SNA 2007) (CD-ROM), Monterey, California, April 15-19, 2007, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL, 11.
- 12) Umeki, H., Osawa, H., Naito, M., Nakano, K., Makino, H. and McKinley, I. G., (2007): Knowledge Management: The Cornerstone of a 21st Century Safety Case, International Symposium on Safety Cases for the Deep Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand?, January 23-25, 2007, Paris La Défense, France (to be published) .
- 13) 梅木博之, 大澤英昭, 内藤守正, 中野勝志, 牧野仁史, 宮本陽一, 高瀬博康, McKinley, I. G., 大久保博生 (2007): 地層処分技術に関する知識管理システムの開発 (II); (1) 知識管理システムの基本設計, 日本原子力学会 2007 年春の年会, I32.
- 14) 大澤英昭, 中野勝志, 梅田浩司, 浅森浩一, 瀬尾俊弘, 梅木博之, 高瀬博康, McKinley, I. G. (2007): 地層処分技術に関する知識管理システムの開発 (II); (2) 地質環境分野における知識管理のケーススタディ, 日本原子力学会 2007 年春の年会, I33.
- 15) 内藤守正, 小林保之, 油井三和, 梅木博之, 高瀬博康, McKinley, I. G. (2007): 地層処分技術に関する知識管理システムの開発 (II); (3) 工学技術分野における知識管理のケーススタディ, 日本原子力学会 2007 年春の年会, I34.
- 16) 牧野仁史, 油井三和, 梅木博之, 高瀬博康, McKinley, I. G. (2007): 地層処分技術に関する知識管理システムの開発 (II); (4) 性能評価分野における知識管理のケーススタディ, 日本原子力学会 2007 年春の年会, I35.
- 17) Makino, H., Osawa, H., Nakano, K., Naito, M., Umeki, H., Takase, H., and McKinley, I. G. (2007): Concept and Design of the JAEA KMS for Geological Disposal of HLW, Global 2007, (to be published) .
- 18) 三枝博光 他 (2007): 超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階 (第 1 段階) 研究成果報告書, JAEA-Research 2007-043.
- 19) 資源エネルギー庁, (独) 日本原子力研究開発機構 (2006): 高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画.

研究開発成果の知識化

瑞浪，幌延における地上からの調査研究の成果報告

—地層処分の技術と信頼を支える研究開発：概要調査への技術基盤の確立—

平成19年9月18日 JAホール

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 研究開発統括ユニット

梅木 博之

地層処分技術の知識基盤化

1

■ 研究開発の役割

- 地層処分の超長期的な安全確保と長期間にわたる事業に対する継続的な信頼性向上

■ 知識基盤化

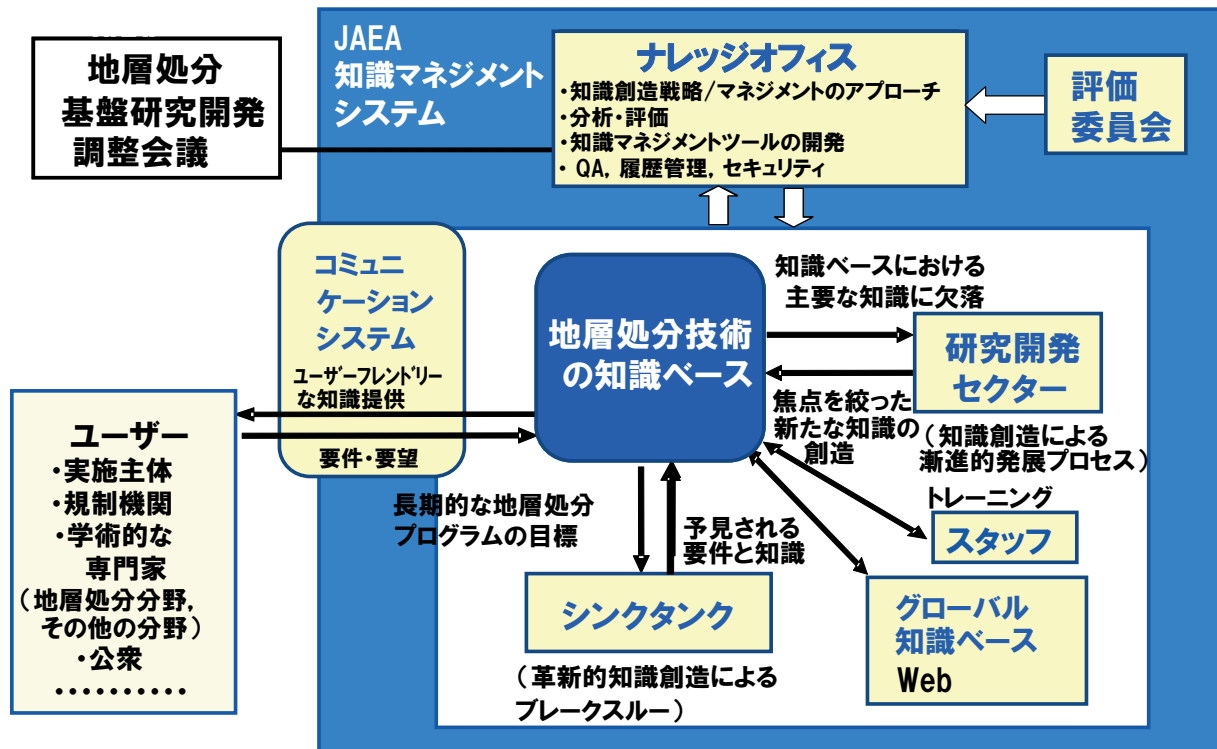
- 学際的総合技術である地層処分技術を“知識”として体系的に管理

■ 知識マネジメントシステムの開発

- 概念開発（e.g., H17レポート, 2005; 梅木, 2006a, b; Kawata et al., 2006; 中野ほか, 2006; 大澤ほか, 2006; Umeki et al., 2007; etc）
- プロトタイプ設計・構築（2006 - 2010）
- プロトタイプ公開・試運用（～2010 - ）

知識：地層処分プロジェクトを支える全ての科学技術（社会科学，経済学，医学などを暗に内包）を示す広範な意味で使用

知識マネジメントシステムの基本概念



知識マネジメントシステム: 地層処分技術の知識基盤を構築するために行なわれる知識の創出, 統合, 品質保証, コミュニケーション, 維持・記録保存, 知識の継承や人材育成といった全ての側面を運営・管理するための体系

知識マネジメントシステムの開発

● ナレッジビジョン

- 知識マネジメントの範囲を設定した上で必要な知識を網羅的に蓄積
- セーフティケースの一般概念を視軸とした構造化
- ユーザーの視点の重視

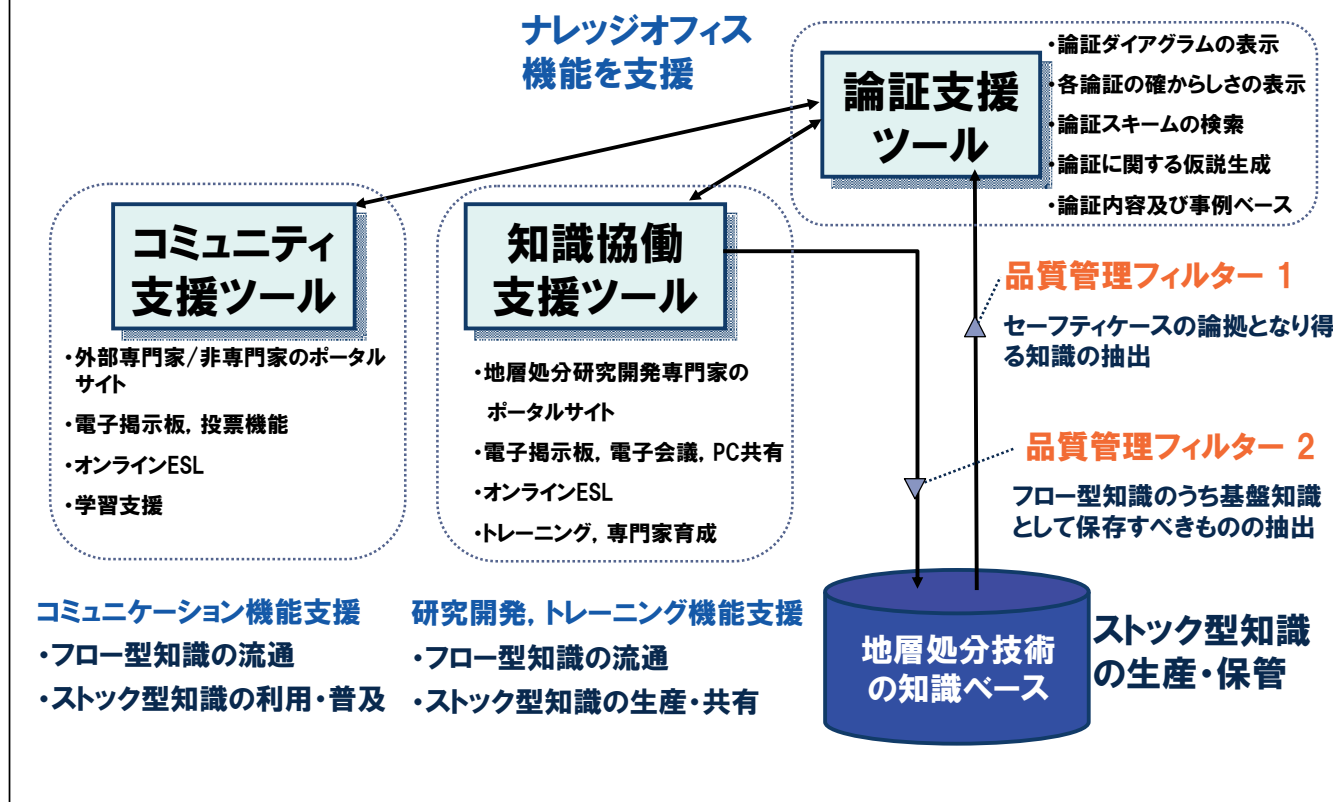
● ナレッジビジョンを実現するための具体的な目標

- 最新の科学技術知識に基づくセーフティケースの論証構造の構築
- セーフティケースの信頼性をさらに向上するための知識ベースの拡充
- セーフティケースを介した地層処分安全性に関する社会的合意形成

● システム設計の基本的アプローチ

- 設計の主要な要素は **マネジメント機能** と **知識ベース**
- **組織論的方法論** と **インテリジェント手法** のベストミックス
 - 知識の内容やマネジメント機能に応じた適用区分
 - 知識工学・人工知能技術を利用したインテリジェント化
 - 既存のDBやパブリックドメイン & オープンソースのソフトウェアを活用
- ケーススタディの実施

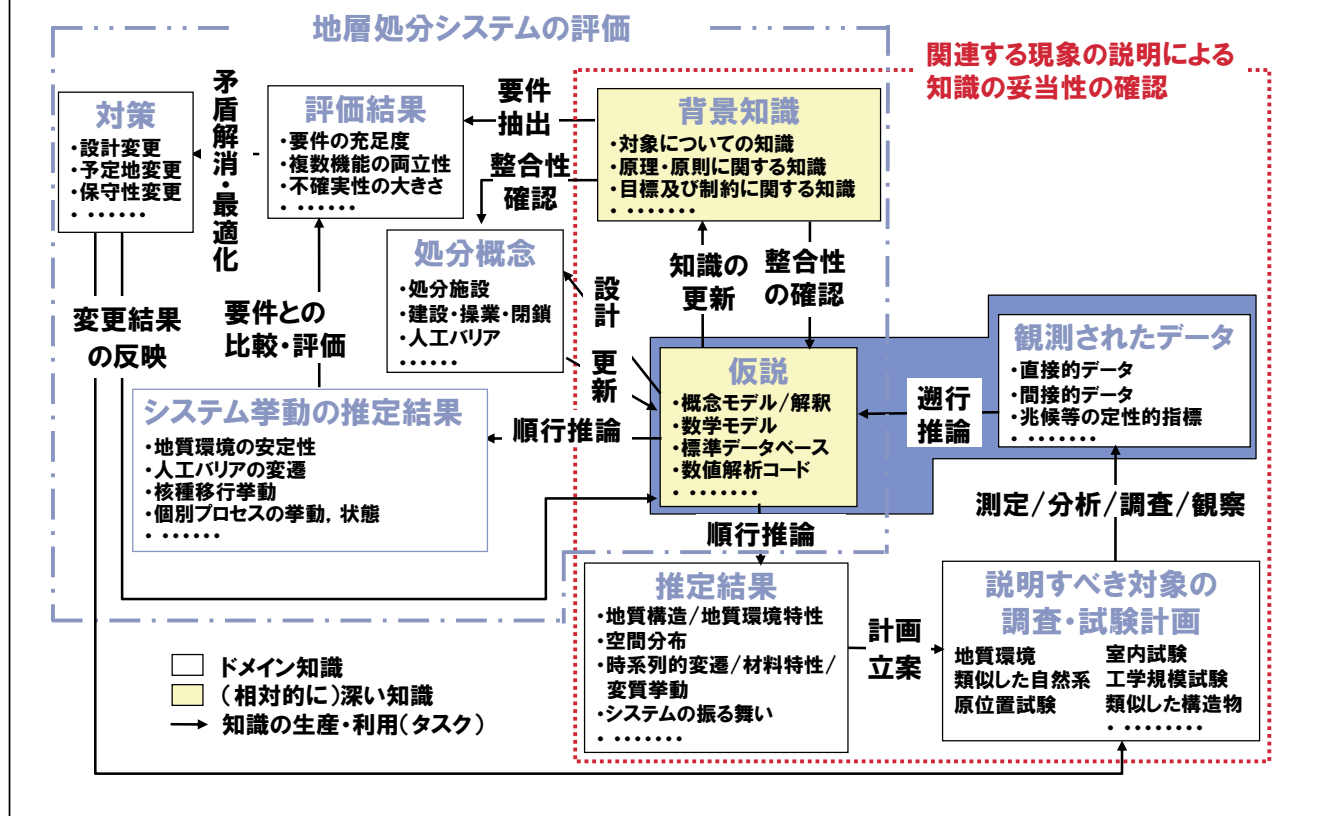
ナレッジビジョン: 全体戦略と知識の共有・創造の方向性を一致させた目標・目的



知識ベースの設計

- 知識ベースの機能と類型化に関するアプローチと方法論の明確化
- 設計の手順
 - 地層処分研究開発に関する知識工学的モデルの作成(知識ベースの範囲と必要機能の体系的抽出)
 - タスク知識とドメイン知識の分類及びそれらを具体化するためのアプローチ(インテリジェント化/組織論的方法論)の提示
 - 各タスク知識及びドメイン知識の形態の類型化とセーフティケースの一般構造に基づく知識ベースの構成
- インテリジェント化の検討
 - 人工知能分野で実績のある問題解決パターンと地層処分分野の問題とのマッピング, 例えば,
 - ・ 地質環境モデリングにおけるアノマリの理解→**故障検出/故障診断**
 - ・ 設計における新規技術の開発→**矛盾解消**
 - ・ パネルレイアウト等の最適化→**構成設計**
 - ・ シナリオ解析→**定性推論**
 - 電子情報としてのドキュメントの保管(デジタルライブラリ)による全文検索や自動翻訳・自動要約等の知的サービスの提供

知識の具体化のイメージー知識工学的モデルの例ー



知識を具体化するためのアプローチ

タスク 知識	ドメイン知識			インテリジェント化		組織論的方法論によるアプローチ	
	起点	制約条件	終点	手法	事例	知識	マネジメントの方法
測定/分析 調査/観察	調査・試験計画	-	観測データ	-	-	機器の原理、精度、使用法 機器・手法の適用条件等	マニュアル作成 専門家育成、品質管理
遡行推論	観測データ	背景知識	仮説	事例ベース推論等	発想支援等	過去の事例・発想法	ブレインストーミング KJ法
				SBL EBL	機械学習	経験・勘等の暗黙知	共同作業による 知識伝承
				ニューラルネットワーク等	パターン認識		
調査・試験 計画立案	推定結果	-	調査試験計画	計画作成	プロジェクト プランニング等	機器の原理、精度、使用法 機器・手法の適用条件 コスト・時間・必要人員数等	マニュアル作成、 専門家育成、品質管理等
整合性確認	背景知識	-	仮説、処分概念 対策	アブダクション	故障診断	過去の事例・発想法	ブレインストーミング等
更新	仮説	-	背景知識	比較・照合	信念修正	背景知識・仮説 に関する専門家の意見	ピアレビュー
設計	仮説	背景知識	処分概念	設計のAI化	プラン設計等	処分概念カタログ等	知識協働の最適化
順行推論	仮説	-	予測結果	数値解析のAI化	汎用ソルバー 解析自動化	数値解析コードの使用法 数値解法、メッシュ分割法等	マニュアル作成、 専門家育成、 知識協働の最適化等
				定性推論	定性的挙動予測	FEPベースのシナリオ解析法	
要件抽出	背景知識	-	評価結果	-	-	複数の要件間の優先順位 不確実性と裕度の比較	要件管理
比較・評価	予測結果	-	評価結果	-	-		
矛盾解消	評価結果	背景知識	対策	アブダクション	発想的問題解決	過去の事例	ブレインストーミング 試行錯誤
最適化	評価結果	背景知識	対策	進化論的手法	構成設計		
変更結果 の反映	対策	-	調査試験計画 仮説	計画作成	スケジューリング	調査・試験のタスク知識(上述) モデル・データの保守性	

当面3年間の開発目標

より長期的な課題

地層処分技術の知識ベースの要素

類型	内容	例
データ	・生データ ・処理データ ・外部発掘データ	・熱力学・収着データ ・人工バリアの基本特性データ
ドキュメント	・組織内作成技術文書 ・主要な外部作成文書	・技術メモ ・研究報告書, 論文
ソフトウェア	・関連ソフト/データベースのアーカイブ ・マニュアル, ハンドブックなどのアーカイブ ・関連する研究成果のアーカイブ	・データベース(熱力学・収着, 人工バリアの基本特性) ・地下水流動解析モデル/コード ・地形変化シミュレーションモデル/コード ・物質移行解析モデル/コード ・熱-水-応力-化学連成解析モデル/コード
経験・ノウハウ (方法論など)	・手順マニュアル/ガイドブック ・エキスパートシステム ・トレーニング資料	・断層の推定手法 ・ボーリング調査手法 ・分析手法マニュアル
統合化した知識	・経験を積んだ統合チーム ・エキスパートシステム	・地質構造の推定手法 ・地下水の化学特性の推定手法
ガイダンス	・経験を積んだ調整チーム(シンクタンク)	・将来シナリオ ・予見される要件と知識
プレゼンテーション素材	・ユーザーフレンドリーインターフェースを考慮に入れたグラフィック表示素材	・地質環境の長期変動のビジュアル画像

タスク知識とドメイン知識の分類例

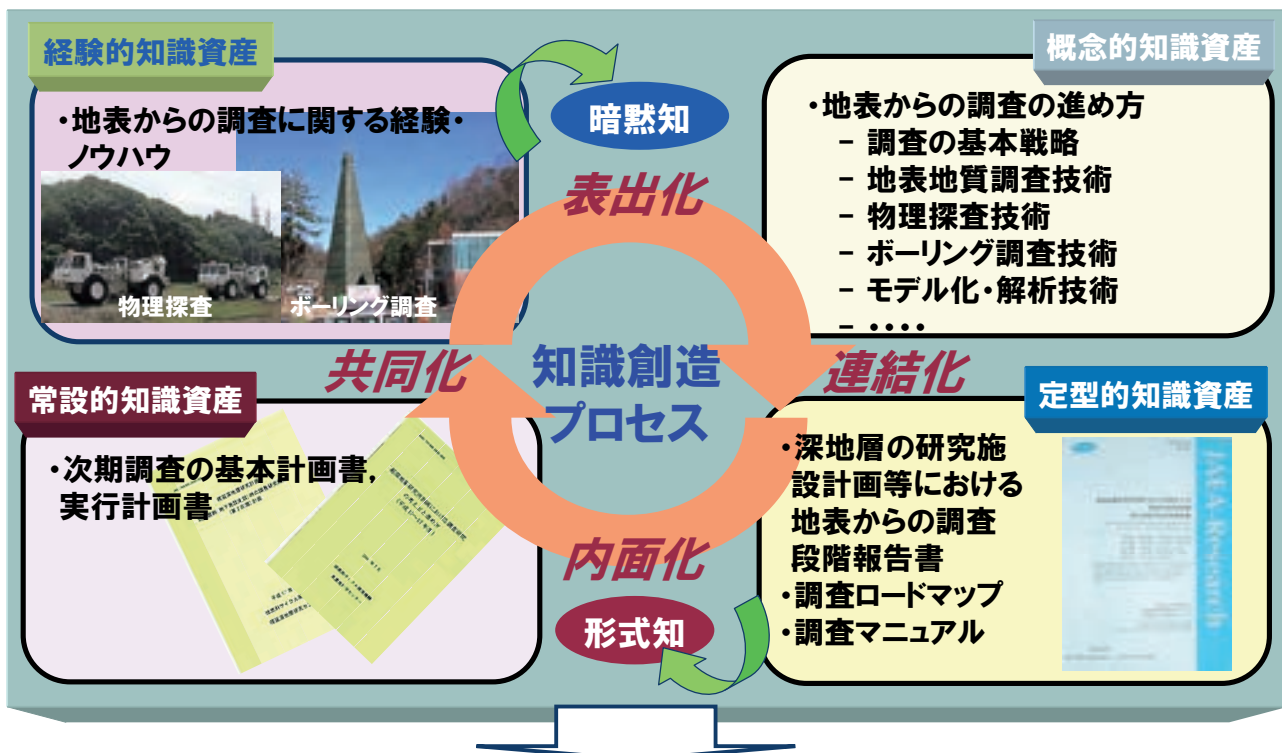
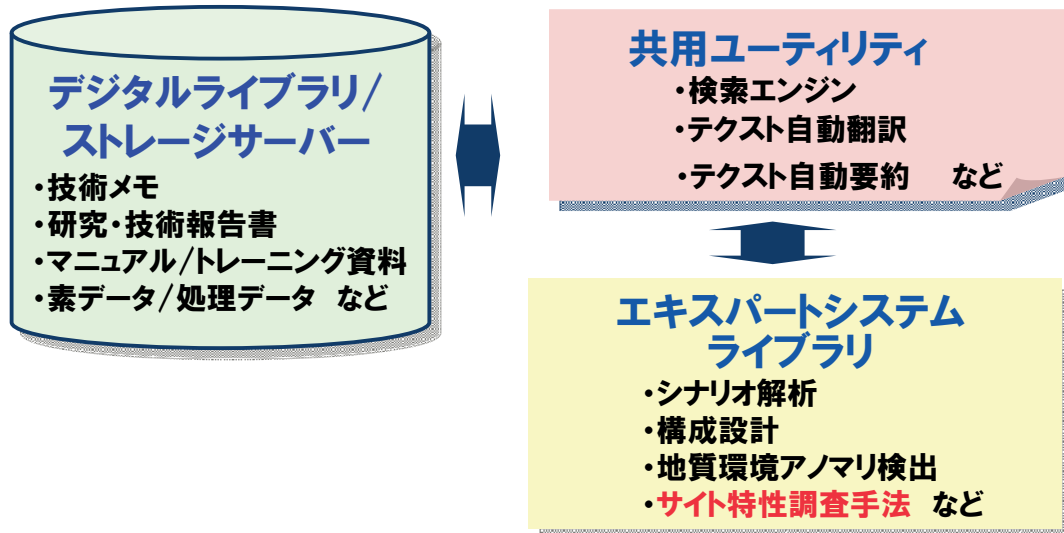
タスク知識

ドメイン知識

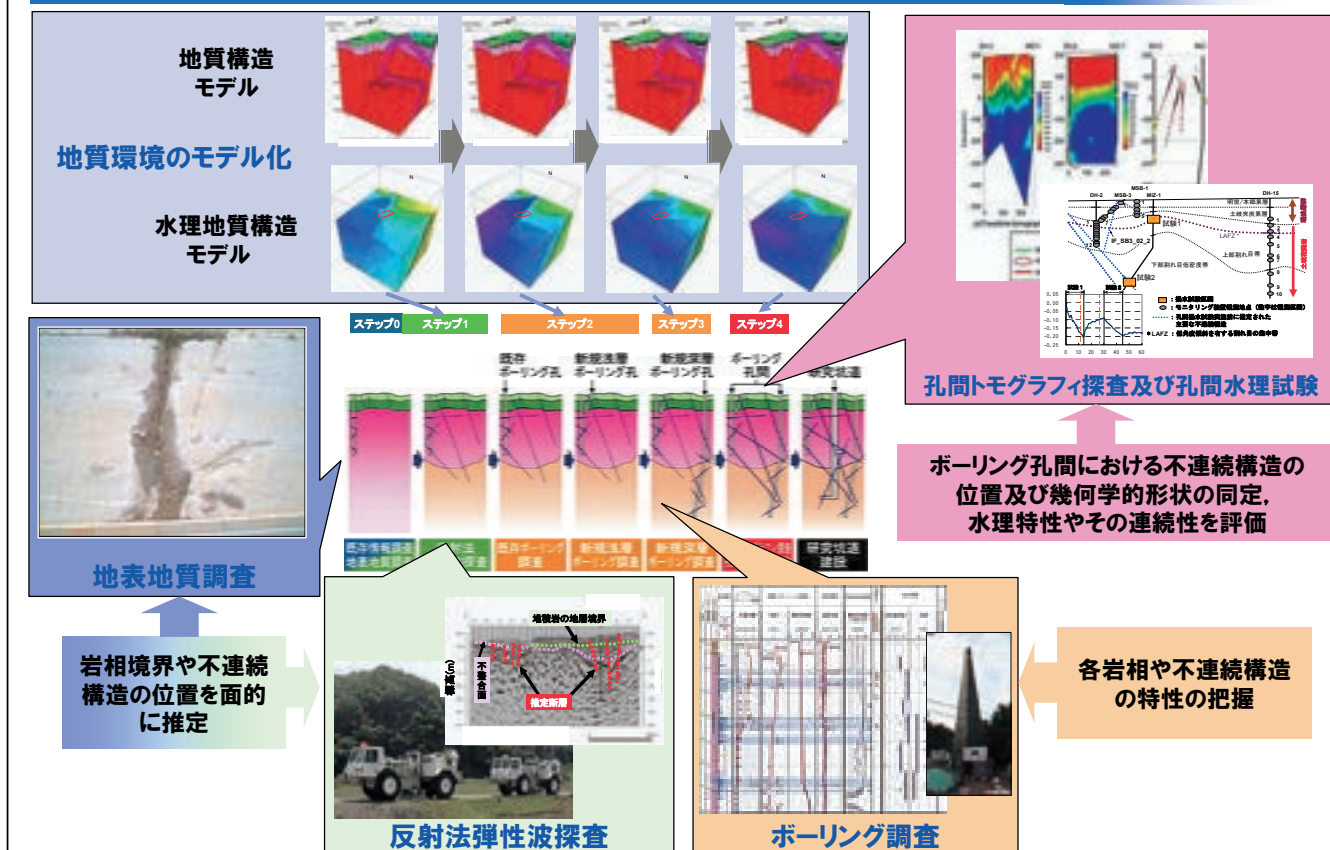
		例	知識の類型
タスク知識	測定/分析/調査/観察	機器の原理、精度、使用法 機器・手法の適用条件 コスト・時間・必要人員数等	ドキュメント, 経験・ノウハウ
	遡行推論	数値解析コードの使用法 数値解法及び精度	ドキュメント, 経験・ノウハウ
		メッシュ分割法	ソフトウェア
	計画立案	適用条件 初期条件・境界条件の知識 結果の解釈・評価方法	ドキュメント, 経験・ノウハウ
		調査・試験の原理、精度 調査・試験の適用条件 コスト・時間・必要人員数等	ドキュメント, 経験・ノウハウ
	知識の更新	背景知識・仮説の正しさに関する 専門家の意見	ドキュメント, データ 経験・ノウハウ
	基本設計	処分場概念カタログ	画像情報・ドキュメント
		設計手順 設計思想	ドキュメント, 経験・ノウハウ
	順行推論	数値解析コードの使用法 数値解法及び精度	ドキュメント, 経験・ノウハウ
		メッシュ分割法	ソフトウェア
		適用条件 初期条件・境界条件の知識 結果の解釈・評価方法 FEPベースのシナリオ解析手法	ドキュメント, 経験・ノウハウ ソフトウェア
	評価	複数の要件間の優先順位 不確実性と裕度の比較	ドキュメント, 経験・ノウハウ

		例	知識の類型
ドメイン知識	背景知識	対象についての知識 原理・原則に関する知識等	ドキュメント
	仮説	概念モデル及び解釈、数学モデル	ドキュメント
		標準データベース、数値解析コード	ソフトウェア
	推定結果	地質環境特性空間分布 地質環境の時系列的変遷 材料特性あるいは変質挙動 核種移行特性等	画像情報 ・データ
		地質環境調査計画 ナチュラアナログ研究計画 原位置試験計画 室内試験計画 工学規模試験計画	ドキュメント
	観測データ	対象の直接的/間接的なデータ 兆候等の定性的指標	データ
	処分概念	調査・試験の条件・方法・制約等	ドキュメント
		処分施設、人工バリア 建設・操業・閉鎖システム	ドキュメント ・データ
	予測結果	地質環境の長期安定性 核種移行挙動、人工バリアの変遷 被ばく線量・リスク等	画像情報 ・データ
	評価結果	要件に対するコンプライアンス 不確実性の大きさ等	ドキュメント
	対策	設計変更、予定地変更 保守性修正	画像情報 ・データ

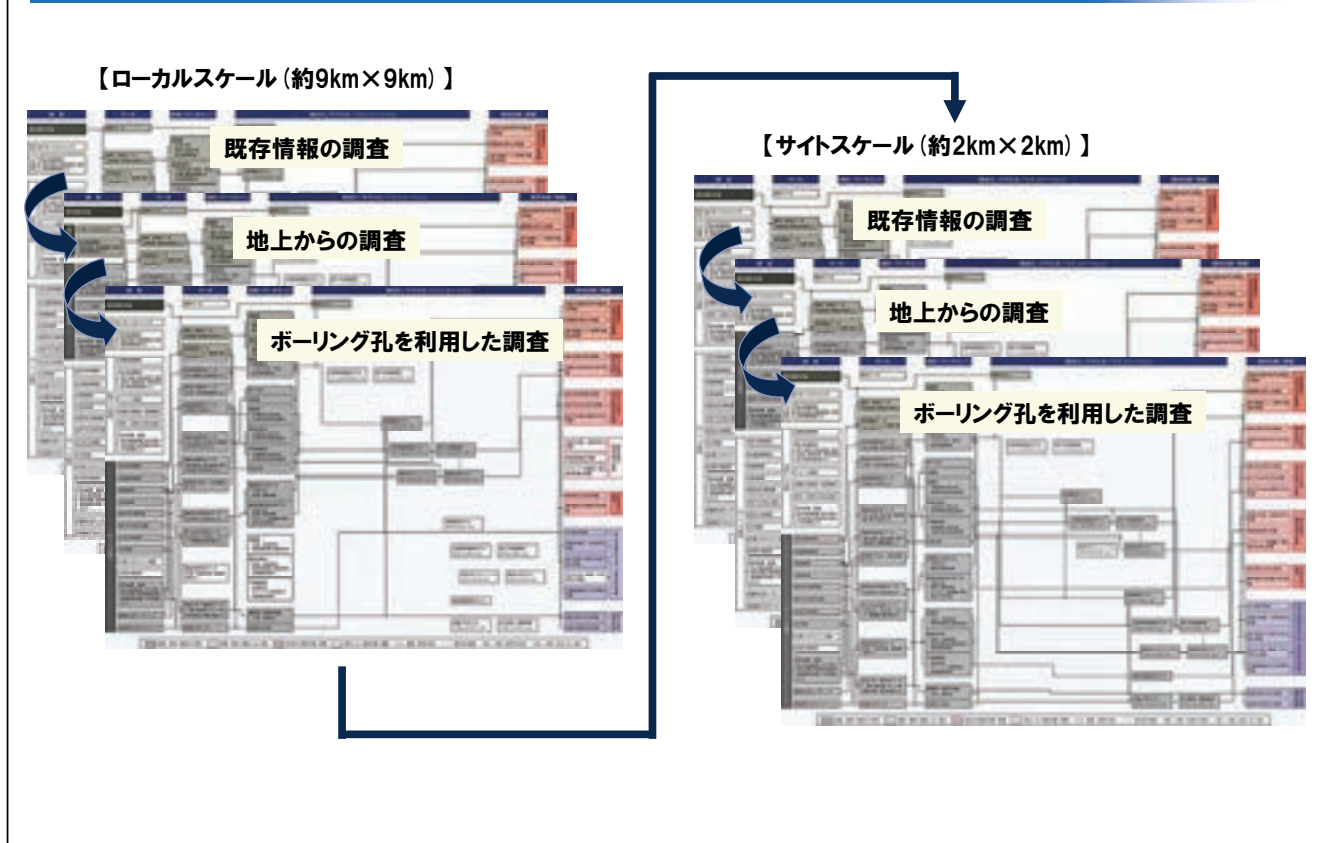
- ・ タスク知識とドメイン知識に関する類型化
- ・ セーフティケースの一般構造にしたがった領域分割と格納

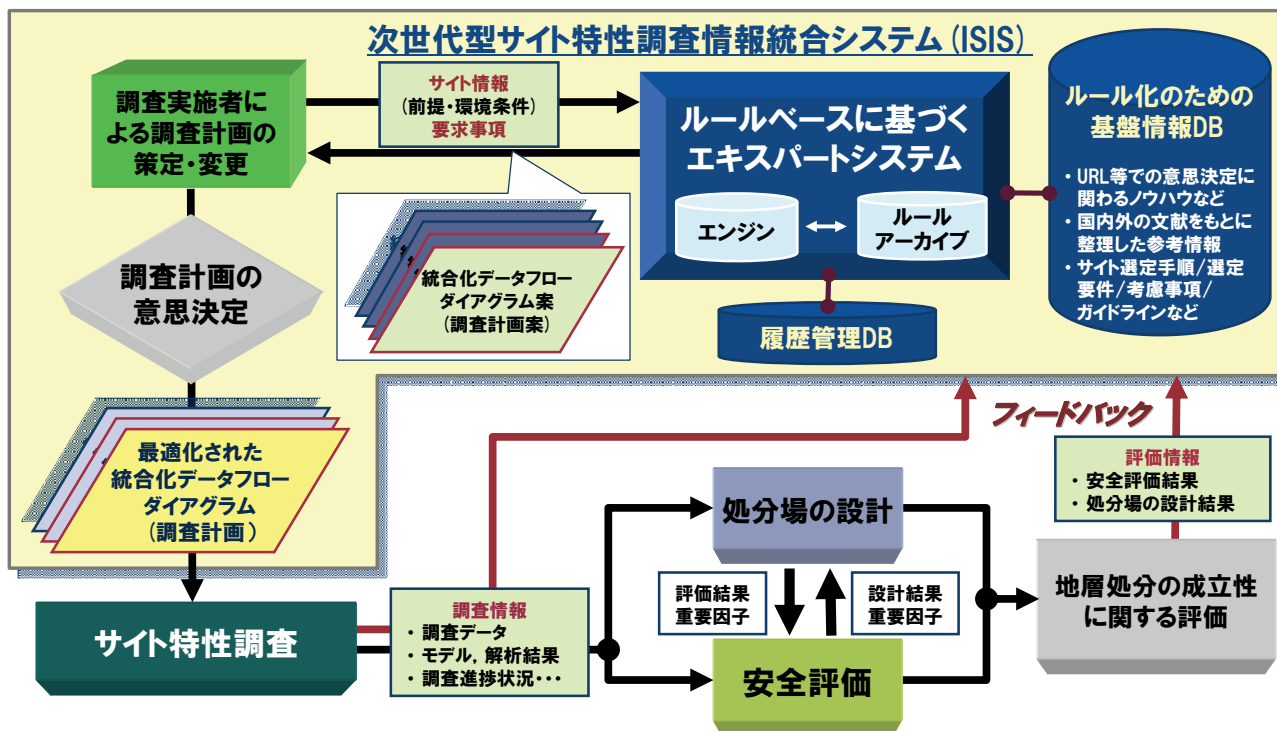


地表からの段階的調査（瑞浪の例）



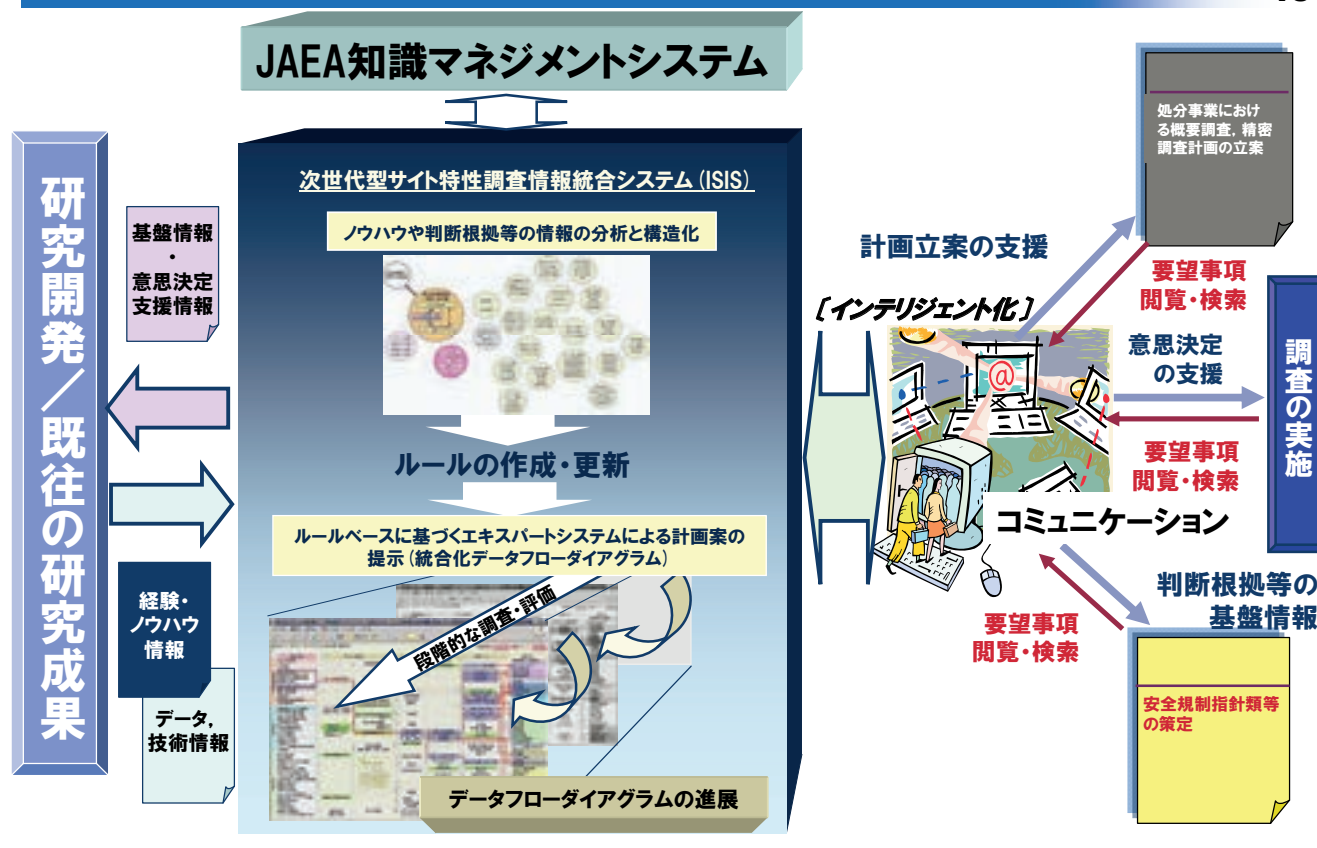
統合化データフロー（瑞浪の例）





【資源エネルギー庁 平成19年度地層処分技術調査等委託費(地層処分共通技術調査:地質環境総合評価技術高度化開発)】

ISISによる処分事業や安全規制への支援



地層処分技術に関する知識マネジメントシステムの基本設計

- セーフティケースの論理構造を論証モデルとして概念化し、関連する知識の生産、流通及び利用を最適化するというマネジメント機能の枠組みを構築
- マネジメント機能のインテリジェント化として論証支援ツール、知識協働支援ツール及びコミュニティ支援ツールの基本仕様を提示
- 地層処分技術に関する知識ベースの基本構成を提示するとともに、深地層の研究施設計画の経験・ノウハウの取り込み方を提示

今後の展開

- セーフティケース構築や地層処分研究開発のさまざまな局面で行われる多様なタスクとこれに付随したドメイン知識に関するより精密な分析に基づく知識マネジメントシステムの詳細設計
- 深地層の研究施設計画の第1段階で得られた経験・ノウハウの抽出、判断支援のエキスパートシステム化を進め、次世代型サイト特性調査統合システムを構築
- 知識マネジメントシステムの試作、試運用を通じた適用性、実効性の確認と必要に応じた改良

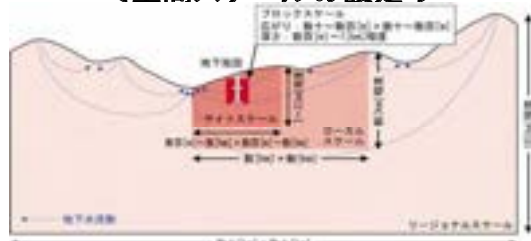
ポ ス タ ー

— 第1段階における調査研究の全体概要 —

地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット
三枝 博光・内田 雅大・仙波 毅・濱 克宏・瀬野 康弘・鶴田 忠彦・天野 健治・竹内 竜史

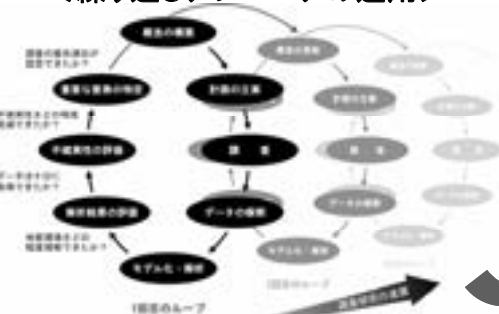
1) 調査研究の着眼点

<空間スケールの設定>



涵養域から流出域までの地下水流動系や研究用地および地下施設のレイアウトなどに着目して、4つの空間スケールを定義

<繰り返しアプローチの適用>



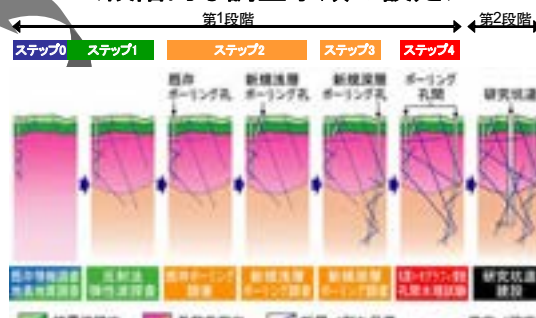
空間的、時間的、経済的な制約の下、効率的な調査を行うため、繰り返しアプローチを適用

<調査研究の個別目標と課題の設定>

調査研究の個別目標と課題	調査研究の個別目標と課題	調査研究の個別目標と課題	調査研究の個別目標と課題	調査研究の個別目標と課題	調査研究の個別目標と課題	調査研究の個別目標と課題	調査研究の個別目標と課題
調査研究の個別目標と課題	調査研究の個別目標と課題	調査研究の個別目標と課題	調査研究の個別目標と課題	調査研究の個別目標と課題	調査研究の個別目標と課題	調査研究の個別目標と課題	調査研究の個別目標と課題

安全評価、地下施設の設計・施工および環境影響評価の観点から、調査研究の個別目標と課題として整理

<段階的な調査手順の設定>



第1段階では、調査研究を4つのステップに区分し、繰り返しアプローチを意識した調査研究を展開

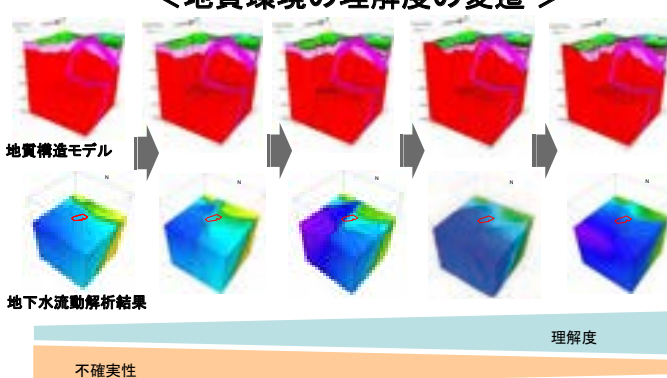
2) 調査研究結果の概要

<統合化データフロー>



取得するデータの種類、データの解釈及び異なる分野で得られた情報の統合などの観点から調査ステップごとに、調査から評価までの合理的な道すじ(系統的なデータの流れ)を統合化データフローとして整理

<地質環境の理解度の変遷>



- 調査研究の進展に伴う情報の種類・量と地質環境の理解度や調査研究の達成度との関係を順次評価するとともに、この評価結果に基づき次の調査研究における重要要素を抽出・特定して調査計画に反映
- 地層処分にとって重要な地質環境特性を効率的に理解

本報告書で記述されている主な成果

- 実際の調査研究を通じて得られた**技術的知見**(ノウハウや失敗例)を**処分事業の基盤技術**として整理
- 地下施設近傍の地質・地質構造および地下施設建設に伴う水理・水質／力学特性の変化を推定
- 地下施設の建設が地質環境へ与える影響を観測する技術を整備
- 結晶質岩を対象とした主要な調査技術および解析技術に係る**技術的知見**(例えば、ボーリング調査における透水性構造を抽出するための流体検層手法や水理試験手順、物理探査データの解析手法などの有効性)および**経験**や**ノウハウ**を蓄積
- 地上からの調査研究において、**地質環境の理解度や不確実性の評価結果**に基づく**対象項目の優先度**を明確にした**調査研究計画**の策定、個別の調査研究における**品質管理体制**と**実施体制作り**が有効であることを確認

地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット
中俣 公徳・天野 健治・鶴田 忠彦・松岡 稔幸・鏡 顕正・程塚 保行

1) 目標・実施概要

全体目標を受けて設定した地質・地質構造に関する調査研究における個別目標と課題

- 地質構造(岩盤の地質学的不均質性、被覆層の厚さ、移行経路として重要な構造)の三次元分布の把握
- 地下空洞周辺の力学・水理状態の把握に必要な不連続構造などの有無の把握

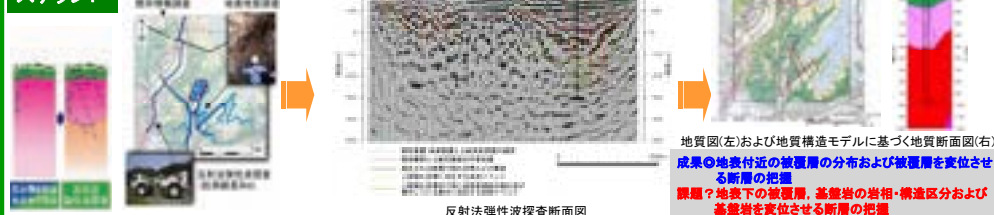
調査項目	調査方法	調査時期	調査場所	調査内容
地質調査	地表地質調査	平成24年度	研究坑道周辺	地質図の作成
地質調査	反射弾性波探査	平成24年度	研究坑道周辺	地質図の作成
地質調査	既存深層ボーリング調査	平成24年度	研究坑道周辺	地質図の作成
地質調査	新規浅層ボーリング調査	平成24年度	研究坑道周辺	地質図の作成
地質調査	新規深層ボーリング調査	平成24年度	研究坑道周辺	地質図の作成
地質調査	孔間トモグラフィ探査等	平成24年度	研究坑道周辺	地質図の作成

下記の段階的な調査ステップの設定により、理解度や不確実性を段階的に評価するとともに重要な要素を効果的に特定

- ステップ0: 既存情報調査
ステップ1: 地表地質調査
反射弾性波探査
ステップ2: 既存深層ボーリング調査
新規浅層ボーリング調査
ステップ3: 新規深層ボーリング調査
ステップ4: 孔間トモグラフィ探査等

2) 主な調査研究結果

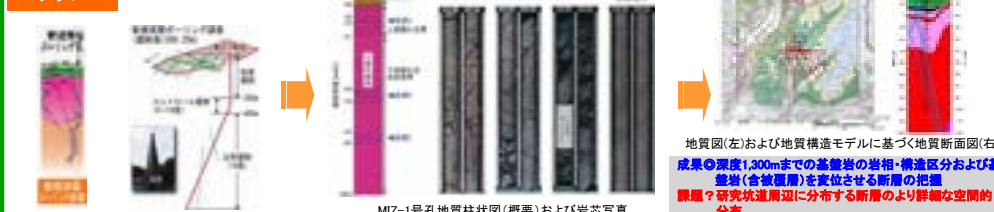
ステップ1



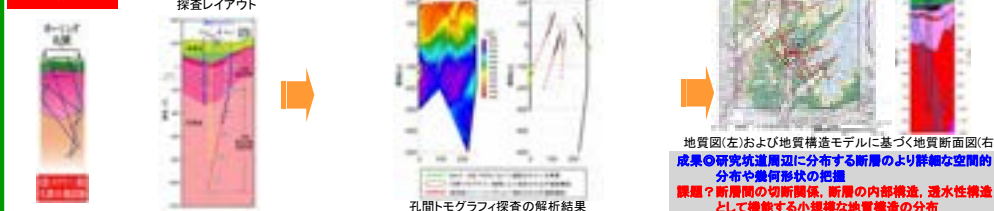
ステップ2



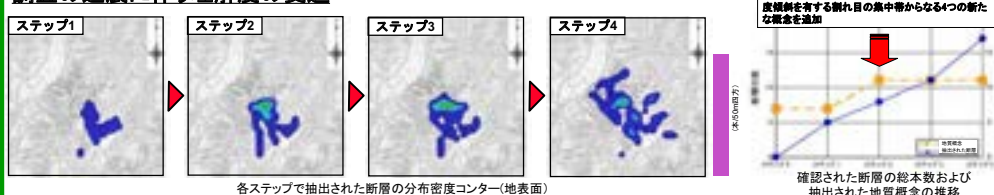
ステップ3



ステップ4



調査の進展に伴う理解度の変遷



4) 処分事業・安全規制のための主な技術的基盤

- 地表からの調査の進め方として、面的に調査できる手法を適用して広い領域を概略的に把握・概念モデル化した上で、詳細な情報を必要とする項目を抽出し、それらをボーリング調査などにより更に精緻化する(モデルの更新を含む)といった手順が有効。特に重要な構造である断層の分布は、地質調査と弾性波探査を一体化した調査と解釈、モデル化により効率的に把握していくことが可能
- 調査計画の最適化に際しては、水理学的調査・解析との連携による移行経路として重要な構造の抽出とそれらの理解度・不確実性の評価が不可欠。また、これらを行うために整備された一連のモデル化技術は、それぞれの調査結果を統合し、解釈する際に有益

3) 得られた主な技術的知見

- 地表地質調査と反射弾性波探査により、被覆層中の地層境界面や基盤岩と被覆層の不整合面の分布推定のほか、基盤岩上部に分布する割れ目帯の構造区分が可能
- 地表地質調査により、既存の地質図に記載されていない被覆層を穿位させる数百m〜数km規模の断層を確認
- 反射弾性波探査は断層の深度方向への連続性を推定する際に有効
- 既存深層ボーリング調査および新規浅層ボーリング調査により、被覆層中の岩相区分や基盤岩上部において特に割れ目が卓越する区間の構造区分が可能
- ボーリング孔における岩芯地質調査、物理検層、マルチオフセットVSP探査の組合せは、反射弾性波探査では不明確であった基盤岩を穿位させる断層の空間分布を把握する際に有効
- 新規深層ボーリング孔は、岩相・構造区分の妥当性を確認する際に不可欠であるほか、基盤岩を穿位させる断層のより深部への連続性を把握する際に重要
- コントロール掘削を用いることにより、断層の水平、垂直方向の推定精度が格段に向上し、断層分布の全体像や可能性のある構造発達過程を効果的に推定することが可能
- 孔間トモグラフィ探査などの複数の物理調査を深層ボーリング調査の後に適用することにより、研究坑道周辺など重要な領域における断層の分布位置をより精度良く把握することが可能
- 本調査研究を通じて新たに開発した水平成分記録を用いた高角度反射波のイメージング技術は、断層の三次元的分布や規模、派生構造の有無などの解釈に対して特に有益
- 地質・地質構造の概念化は、ステップ2までの調査により概ね可能
- 断層を例に取ると、今回適用した各調査は、解析対象領域(4km²)においてそれぞれ数本程度抽出することが可能
- 岩盤水理に関する調査研究との連携により、抽出された断層のうち、移行経路として重要な構造が特定可能
※本報告書の概要発表(その3)「岩盤水理に関する調査研究」参照

本報告書では、これらの知見を処分事業(概要調査、地上からの精密調査など)や安全規制のための技術的基盤として記述・とりまとめ

—岩盤水理に関する調査研究—

地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット
大山 卓也・三枝 博光・尾上 博則・竹内 竜史

1) 目標・実施概要

全体目標を受けて設定した岩盤水理に関する調査研究における個別目標と課題

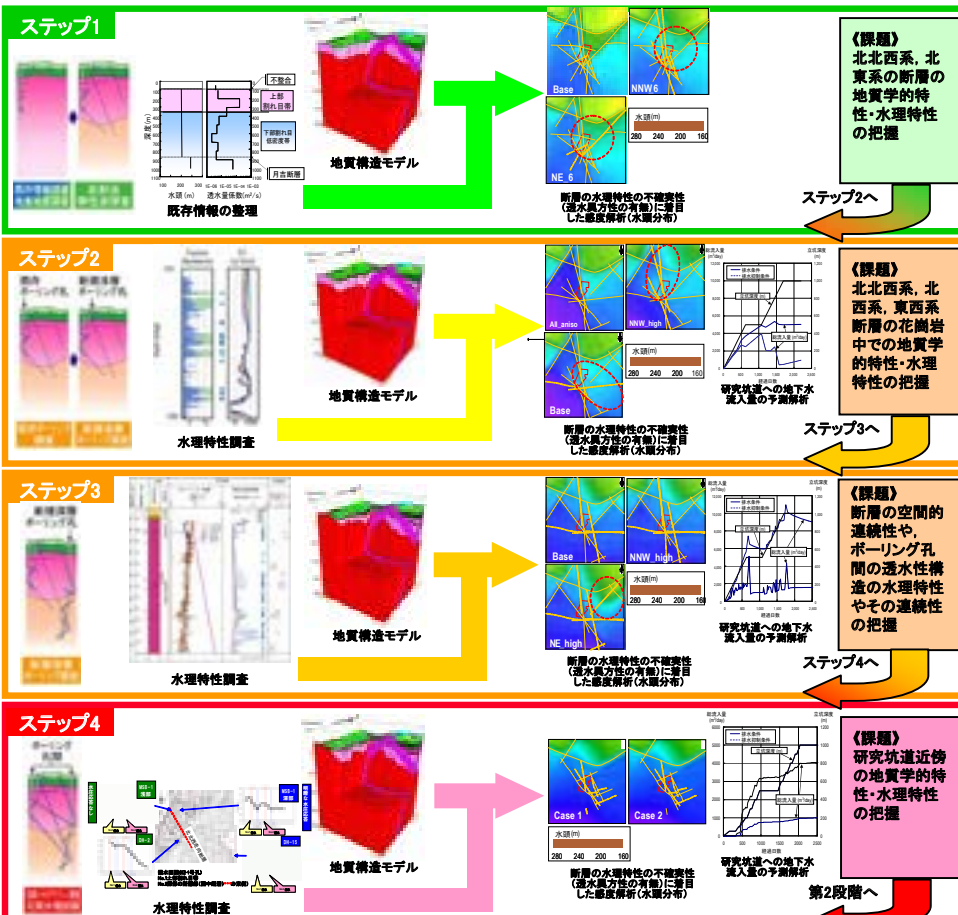
- 地下水の流動特性の把握
- 希釈効果の把握
- 地下空洞周辺の力学・水理状態の把握に必要な地下空洞への地下水流入量の把握
- 地下施設建設が地下水位分布や地下水圧分布へ与える影響の把握



下記の調査ステップの設定により、地質・地質構造に関する調査研究結果に基づく岩盤水理に関する調査研究を段階的に実施

- ステップ0: 既存情報調査
ステップ1: 地表地質調査
反射法弾波探査
ステップ2: 既存深層ボーリング調査
浅層ボーリング調査
ステップ3: 新規深層ボーリング調査
ステップ4: 孔間トモグラフィ探査等
孔間水理調査

2) 主な調査研究結果

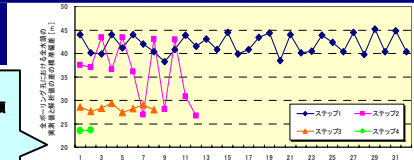


3) 得られた主な技術的知見

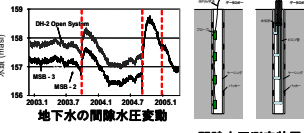
- 断層の透水性に着目した地下水流動解析は、断層の透水性が動水勾配分布に及ぼす影響の評価及び解析領域内の動水勾配分布に大きな影響を及ぼす断層を抽出し、調査を行う断層の優先順位をつけるうえで有効
- 水理地質構造モデルを構築する際には、断層の分布位置及び断層のトレス長に着目したスクリーニングによって、モデル化対象断層の選定を行うことが効率的
- 単孔式水理試験を実施するに当たっては、ボーリング調査で把握された地質・地質構造に基づいた試験区間を設定することが重要
- 水みちを抽出するうえで電気伝導度検層が有効
- 電気伝導度検層に基づく数値解析結果は水理試験を補完するうえで有効
- 複数のボーリング調査を実施する場合は、これらを同時に実施することを避け、1本のボーリング調査終了後に地下水モニタリング装置を挿入して、次の掘削調査による水圧応答などのモニタリングを実施することが水理地質構造を把握するうえで有効
- 高透水性構造が立坑に出現することが想定される場合は、その数や位置、水理特性などの情報を優先的に取得することが重要
- 研究坑道掘削に伴う水圧低下の範囲や程度は、地下水の流入量に影響を及ぼすものであることから、研究所用地周辺に分布する断層の空間分布や水理特性に関する情報を取得することが重要
- 水圧の非定常変化のデータは、地質・地質構造の水理特性及び分布範囲・位置を特定するうえで有益
- ボーリング孔を利用した調査で取得された地質学的情報や水理学的情報などに基づき、間隙水圧が異なると思われる区間ごとに観測区間を設定することにより、初期値の取得からその後の掘削に伴う影響を正確に把握することが可能

調査の進展に伴う理解度の変遷

- 感度解析のケース数の減少
- 感度解析のケース間での全水頭分布のばらつき減少
- ボーリング孔における全水頭分布の実測値の再現性の向上



環境影響評価



4) 処分事業・安全規制のための主な技術的基盤

- 効率的に地下水流動特性を把握するためには、調査とモデル化・解析を繰り返し実施するといったアプローチが有効
- 岩盤中の透水性分布を把握するための単孔式水理試験の実施に当たっては、地質学的な調査・解析から推定された地質構造要素の分布や流体検層から把握されるボーリング孔内の地下水の流入・流出箇所分布に基づく実施計画(試験区間の設定、試験方法の選定など)の立案が重要
- 研究領域内で複数のボーリング調査を実施する際には、ボーリング孔間の水理学的な連続性や水理境界を把握することを前提として、確認すべき対象領域や地質・地質構造の明確化、最適なボーリング調査位置、ボーリング調査の実施時期などの調査計画を立案することが重要
- 調査・解析・評価の繰り返しは、迅速に実施する必要があるため、地質/水理地質構造モデルの構築や地下水流動解析が効率的に実施できるシステムを構築しておくことが有効

ー地下水の地球化学に関する調査研究ー

地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット
水野 崇・濱 克宏・吉田 治生・齋 正貴・天野 由記・萩原 大樹

1) 目標・実施概要

全体目標を受けて設定した地下水の地球化学に関する調査研究における個別目標と課題

- 地下水の地球化学特性(塩分濃度, pHおよび酸化還元状態)の把握
- 地下施設建設が地下水の水質へ与える影響の把握

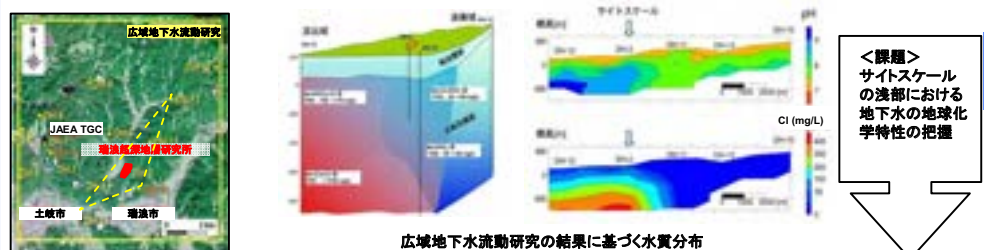


- 下記の段階的な調査ステップの設定により, 理解度や不確実性を段階的に評価するとともに重要な要素を効果的に特定
- ステップ1(地表からの調査・解析・評価)およびステップ4(ボーリング孔間を対象とした調査・解析・評価)は当該分野に該当なし

ステップ0: 既存情報調査
ステップ1: 既存深層ボーリング調査, 浅層ボーリング調査
ステップ2: 既存深層ボーリング調査
ステップ3: 深層ボーリング調査
ステップ4:

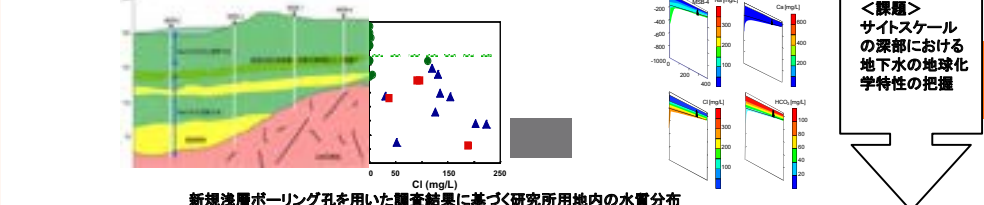
2) 主な調査研究結果

ステップ0



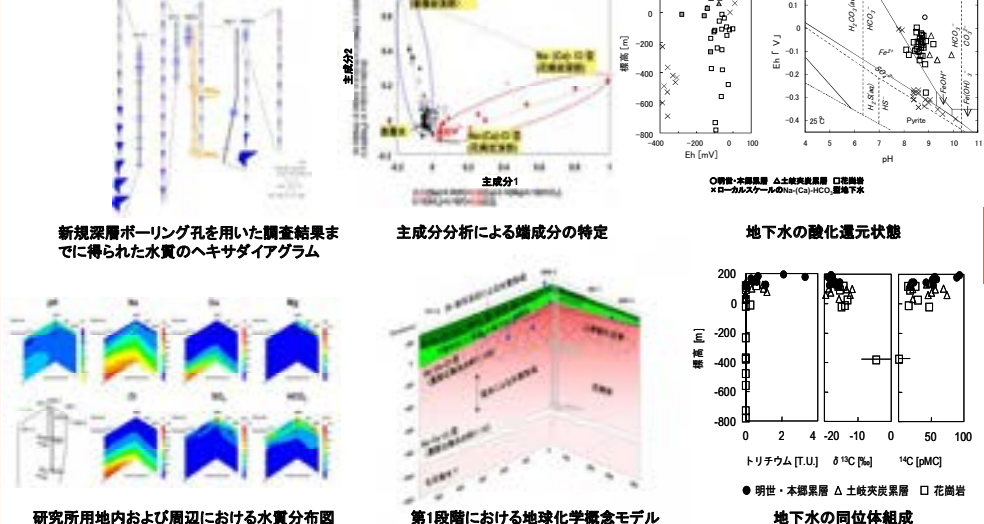
- 主な地下水水質はNa-Ca-HCO₃型
- 流出域の土岐花崗岩中の地下水水質はNa-Cl型
- pHは弱アルカリ性
- 酸化還元状態は弱～強還元性

ステップ2



- 瑞浪層群浅部ではケイ素, 硫酸イオンに富むNa-Ca-HCO₃型地下水
- 瑞浪層群深部および土岐花崗岩上部ではNa-Cl型地下水
- 両者の分布境界の深度では低透水層の存在により低透水層以深での水頭の急激な低下が観察されており, 水理地質構造が地下水の地球化学特性の分布を支配

ステップ3



- pHは概ね7～9の範囲を示しステップ0の結果を支持
- 水理特性と地下水の水質分布を比較することにより, 地下水流動解析結果の妥当性を確認するとともに地球化学モデルの信頼性を向上させることが可能

- 深度約1,000mの花崗岩中には塩分濃度が2,500mg/L程度のNa-(Ca)-Cl型地下水が存在
- 多変量解析により地下水水質の三次元的分布を推定
- 土岐花崗岩中の地下水のpHは概ね8～9の範囲を示し, ステップ0の結果を支持
- 主要なpH緩衝反応は炭酸塩鉱物の溶解・沈殿反応
- 酸化還元電位については含鉄鉱物, 含硫黄鉱物, 硫化水素ガスに関連した酸化還元反応が支配
- 本ステップにおいて研究坑道掘削前の地球化学的初期条件を把握し, その結果に基づく定量的な地球化学モデルを構築
- Na-(Ca)-Cl型地下水の起源や滞留時間の把握は第2段階以降の調査における課題

4) 処分事業・安全規制のための主な技術的基盤

- 地下水水質に関わる地球化学モデルを構築するための手順として, 下記の手順が有効
 - 1) 定性的な情報も含む地下水の水質データベースに基づき場の状態の概念を構築
 - 2) 調査により得られたデータによる解析用水質データベースを構築し, 1)の概念について適切な解析手法を用いて解析を実施
 - 3) 解析用水質データベースを用いた性能・安全評価に関わる溶存化学成分等の水質形成プロセスについての解析を実施
- サイトスケールのように異なる地下水の混合により地下水の水質が形成される環境では, 地下水の地球化学特性を理解する手法として, 多変量解析や熱力学解析と鉱物・地下水の分析・観察を併用した調査・解析が有効
- 調査地域の地球化学データの参照に用いることのできる各地の情報(地質, 地史, 水質, 同位体組成, 水質形成プロセスなど)の整備により, 調査地域の不足情報を補足可能

1) 目標・実施概要

全体目標を受けて設定した岩盤力学等に関する調査研究における個別目標と課題

- 研究所用地に分布する石英花崗岩を対象に、物理・力学特性と初期応力状態の把握による岩盤力学モデルの構築、および地下温度環境の把握
- 研究坑道掘削による掘削影響領域の分布と物理・力学特性の変化の予測



下記のステップ0(既存情報調査)とステップ2, 3における既存、新規ボーリング調査により、課題となる項目を段階的に評価し不確実性を低減

- ステップ0: 既存情報調査
掘削影響予測解析
- ステップ2: 深度 500mまでの
既存深層ボーリング調査
- ステップ3: 深度1,000mまでの
新規深層ボーリング調査
掘削影響予測解析

2) 主な調査研究結果

ステップ 0

岩盤力学モデル

初期応力状態



断層上盤側岩体

- 深度300m以深の水平面内の最大主応力方向はNNW-SSE~NW-SE方向
- Stress decouplingが発生
- 地表から地下1,000mの範囲で3つの異なる応力ゾーンが存在
- 断層近傍以外は、鉛直応力はほぼ土被り圧

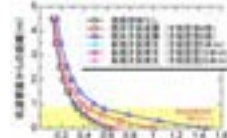
断層下盤側岩体

- 水平面内の最大主応力方向は断層上盤側と同様、NNW-SSE~NW-SE方向
- 作用している応力が断層上盤側に比べかなり小
- 断層近傍以外は、鉛直応力はほぼ土被り圧

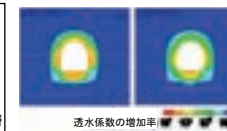
正馬様用地の岩盤力学モデル(深度1,000mまで)

掘削影響予測解析

※深度500mを想定。
掘削影響領域は壁面から深さ80cmの場合



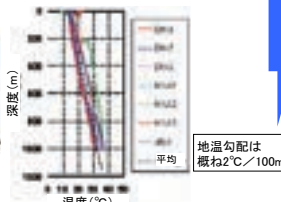
等価連続体解析で予測された
岩盤変位(MBCモデル)



等価連続体解析で予測された
横坑周囲の透水性増加域
(クラックテンソル+仮想割れ目モデル)

※掘削影響領域: 不飽和領域、応力再配分領域とならび、掘削影響領域(EDZ)三大構成要素の一つとなる

温度環境



ローカールスケールの
深層ボーリング孔で観測された
地温分布

3) 得られた主な技術的知見

初期応力状態の把握

- 地下の応力状態は、地質構造などの影響を受けて不均一なため、三次元初期応力場の同定が必要
- 三次元初期応力場を同定するためには、地質構造や力学特性を考慮しつつ、測定点や測定深度の複数設定が必要

掘削影響予測

- 掘削による影響領域の発生が及ぼす影響は、等価連続体解析を基本とした手法を用いることで概ね予測可能
- 掘削影響領域内のき裂の幾何学的条件は、予測結果に影響
- 影響領域の発生により、壁面変位は2倍程度の増加、発生部位での透水性は掘削前の1,000倍程度の増加

温度環境の把握

- ローカールスケールでの温度環境(地温勾配)は、火山地帯等でなく通常の条件であれば、概ね1本のボーリング孔で調査可能

岩盤力学モデルの更新

- 研究所用地周辺(サイトスケール)の岩盤力学モデルは、既存のボーリング孔で得られたコアを用いることで構築可能
- DSCA法: 最大主応力方向の評価に有用
- 物理・力学試験: 力学的パラメータが同定可能

温度環境の把握

- サイトスケールでの温度環境(地温勾配)は、火山地帯等でなく通常の条件であれば、概ね1本のボーリング孔で把握可能

初期応力状態の把握

- 断層を境とする応力状態の変化等、局所的変化は原位測定によってのみ把握可能
- 局所的変化を捉えるために、断層位置に着目した計画(複数の原位測定)が必要

掘削影響予測

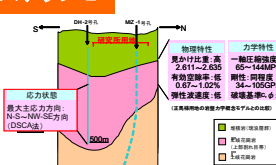
- 掘削影響による新規き裂の方向性は、既存き裂の方向性や応力状態とならび、坑道周辺岩盤の挙動に強く影響
- 坑道の接続部のような複雑な部位の評価、き裂の方向性を反映した評価のためには、三次元解析が必要

温度環境の把握

- サイト/ブロックスケールでの温度環境(地温勾配)は、火山地帯等でなく通常の条件であれば、概ね1本のボーリング孔で把握可能

ステップ 2

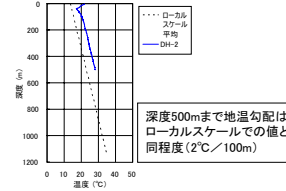
岩盤力学モデル



- 応力状態は、ステップ0で行ったローカールスケール(正馬様用地)のものと概ね同様
- 物理特性と力学特性は、岩盤の不均一性があるため、具体的場所を特定することで、ステップ0の値から更新

研究所用地周辺の岩盤力学モデル(深度500mまで)

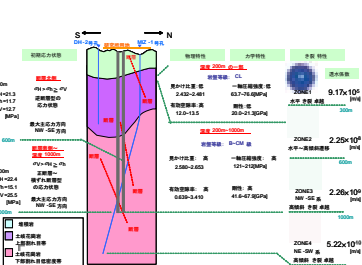
温度環境



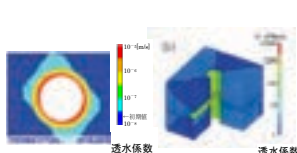
サイトスケールの浅層ボーリング孔で観測された地温分布

ステップ 3

岩盤力学モデル



掘削影響予測解析

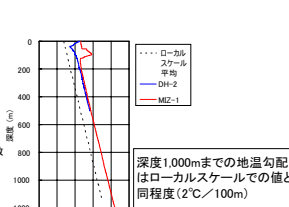


※深度500mを想定。
掘削影響領域は壁面から深さ80cmの場合

(左) 立坑を対象とした2次元解析
(右) 接続部を含む、横坑・立坑周囲の3次元解析

等価連続体解析で予測された立坑および接続部
を含む横坑・立坑周囲の透水性増加域
(クラックテンソル+仮想割れ目モデル)

温度環境



サイト/ブロックスケールの
深層ボーリング孔で観測された
地温分布

4) 処分事業・安全規制のための主な技術的基盤

- 岩盤の応力場や物理・力学特性に関する既得情報ならびに調査結果は、坑道設計の基礎となるほか、EDZの分布/物理・力学特性を予測するときの入力条件として利用可能
- 地表からの調査では、深層ボーリング孔とそのコアを用いた、室内物理・力学試験や初期応力測定(水圧破壊法など)によって岩盤の物理・力学特性の深度分布の把握が可能
- 初期応力調査計画は、主要な断層などの地質構造の空間的変化に着目して立案することが重要
- 掘削影響領域の力学的変化の予測は、地表からの調査段階で得られる情報を用いることである程度可能
- 地下の温度環境は、深層ボーリング孔とそのコアを用いた温度検層ならびに熱特性試験によって把握可能



1-6 超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階 (第1段階)研究成果報告書 (その6) —地質環境の調査・評価技術の整備—



地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット
瀬野 康弘・三枝 博光・鶴田 忠彦・松岡 稔幸・竹内 竜史・水野 崇・内田 雅大

1) 地表からの調査・評価技術

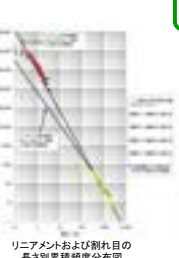
① リニアメント調査技術

目的:

- 大縮尺の画像(1万分の1縮尺の空中写真)を用いて、適正に抽出可能なリニアメントの規模や判読精度および小規模なリニアメントの断層や割れ目の推定手法としての有効性の検討

主な技術的知見・成果:

- リニアメントの判読限界は、長さ300～1000m程度、幅20～60m程度
- リニアメントと基岩露頭で観察した割れ目の長さや分布密度の関係(右図)から、両者は概ね同一のフラクタル特性
- 上記の関係から、リニアメント調査では抽出が困難な数mから数百m規模の割れ目を推測可能



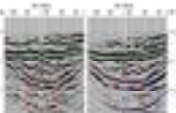
リニアメントおよび割れ目の長さ別累積頻度分布図

② 物理探査技術

反射法弾性波探査

目的:

- 花崗岩を対象とした反射法弾性波探査の適用性は十分に明らかにされていないことから、その適用性や効果的な処理・解析手法を検討



通常の反射法処理・解析結果と再処理・解析結果との比較

主な技術的知見・成果:

- 花崗岩部に着目した各種処理・解析(重ね前マイグレーション等)を適用することにより、通常の反射法処理・解析法による結果と比較して花崗岩部の可視化精度が向上
- 花崗岩の上に堆積岩が厚く被覆するような条件下においては、一般的な処理・解析法に加えて、花崗岩に着目した処理・解析を実施することが花崗岩部の地質構造解釈の精度の向上に寄与する上では有効

高密度電気探査

＜反射法弾性波探査法の補完技術の整備＞

目的:

- 反射法弾性波探査では抽出が困難な花崗岩が地表に露出している地域における高角度断層の抽出技術の整備

主な技術的知見・成果:

- ボーリングデータと解析の拘束条件とすることでより正確な解析結果を取得可能(花崗岩風化部、高角度断層を抽出)
- 花崗岩が地表に露出する地域において、精度の高い地質構造解釈をする上では高密度電気探査は有効

高密度電気探査結果の地質構造解釈

マルチオフセットVSP探査

目的:

- 反射法弾性波探査では抽出が困難な花崗岩深部の断層分布を推定する技術の整備

主な技術的知見・成果:

- 反射法弾性波探査で確認、推定された高角度断層の花崗岩深部への延長を抽出可能(左図(左))
- 高角度断層のトレースを可視化する技術を構築(左図(右))



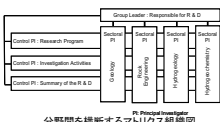
VSP重畳断面記録

2) ボーリング孔を利用した調査・評価技術

③ ボーリング調査計画

目的:

- 複数分野の様々なニーズを担うボーリング調査における計画立案、調査時の品質管理などの最適化
- ラバル時の迅速な対応
- 調査の進展に伴う臨機応変な計画見直し
- 調査関係者間の認識共有化
- 計画の最適化と合理化



分野別を横断するマトリクス組織図

主な技術的知見・成果:

- 計画書へのトラブル発生時の対応オプションの規定(⇒ラバル時の迅速対応)
- 分野別を横断するマトリクス組織の編成(⇒分野別の認識共有の強化)
- 調査試験チームの設置(⇒調査ニーズの最適化)



ボーリング調査プログラムの一例

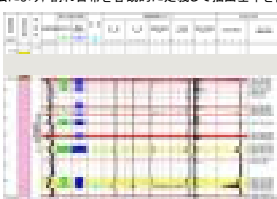
⑤ 物理検層技術

目的:

- 一般的に定義やそれに基づく客観的な抽出基準が整備されていない割れ目の客観的な区分手法の整備

主な技術的知見・成果:

- 孔壁画像データ 物理検層データなどを用いて、主成分分析や統計学的処手法により、割れ目を客観的に定義して抽出基準を構築



深層ボーリング孔における割れ目の抽出結果の一例

⑦ 水理試験技術

目的:

- 幅広い透水性を有する岩盤($10^{-12} \sim 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ オーダー程度)に対して、試験データの品質を確保して取得可能な水理試験手法の整備

主な技術的知見・成果:

- 試験装置の改良、試験手法の構築、データ評価手法の改良からなる一連の試験手法を構築
- 開発、構築した試験手法の現場での適用性を確認



ポンプバックの概念図(左)とキャビティポンプの概念図(右)

透水性に応じた試験手法の選択(シーケンシャル試験手法の概念)

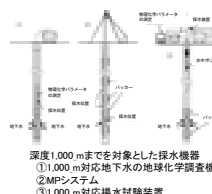
⑧ 地下水の地球化学調査技術

目的:

- 地下水試料の採取技術の整備

主な技術的知見・成果:

- トレーサ物質の添加、モニタリング手法、直接採水方法などを構築
- ボーリング孔の掘削過程で、透水性の岩層(透水帯や湧水帯など)に遭遇した時点で随時、揚水試験と組み合わせて地下水採取



深度1,000 mまでを対象とした採水機器
①1,000 m対応地下水の地球化学調査機器
②MPSシステム
③1,000 m対応揚水試験装置

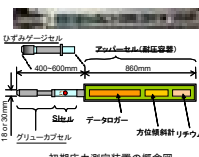
⑨ 初期応力測定技術

目的:

- 応力解放法の大深度ボーリング孔での適用手法の整備

主な技術的知見・成果:

- ゲージセルおよび接合装置、データロガー、方位傾斜計測装置、リチウム電池から構成される初期応力測定装置を開発
- パイロット孔の掘削から初期応力測定装置の設置、オーバーコアリングまでをワイヤーラインシステムにより実施可能なシステムの採用により、作業効率を向上させて、大深度ボーリング孔への適用を実現



初期応力測定装置の概念図

3) 解析技術・その他

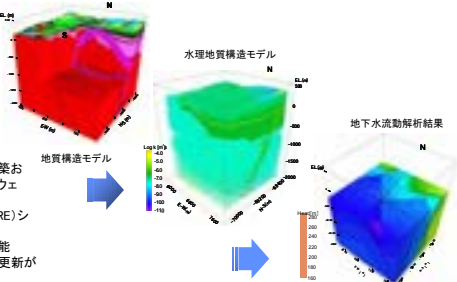
⑩ 地下水流動解析

目的:

- 複雑な地質構造/水理地質構造を有する岩盤中の地下水流動を効率的に解析可能なシステムの開発

主な技術的知見・成果:

- 地質構造モデルの構築から水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析までの一連の作業に必要なソフトウェアや解析コードを統合したGEOMASS(GEOLOGICAL MODELLING ANALYSIS AND SIMULATION SOFTWARE)システムを構築
- 複雑な地質・水理地質構造を考慮したモデル構築が可能
- 調査の進展に伴う情報量の増加に対し、迅速にモデル更新が可能



GEOMASSシステムによる結果の可視化の一例

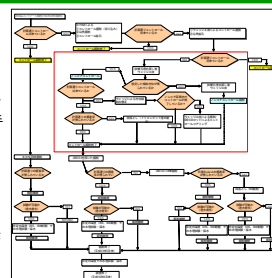
⑪ 品質管理手法

目的:

- 地層処分技術や地質環境に関する研究成果などの信頼性を恒常的に高めていくための品質管理手法の整備

主な技術的知見・成果:

- 「透明性」、「追跡性」、「公開性」の留意と「専門家レビュー」の実施
- 事業予測と対応策の検討・準備
- 調査毎の調査実施計画書、品質管理計画書の作成による調査品質の確保
- PDPC(Process Decision Program Chart)の活用



PDPCの一例

地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット・東濃地科学センター
久慈 雅栄・見掛 信一郎・黒田 英高・杉原 弘造・佐藤 紘紀

1) 目標・実施概要

第1段階の目標

研究用地における深部地質環境に関する情報や次段階以降の調査・研究計画などに基づいて、研究坑道の詳細レイアウトを決定するとともに、実際に適用する施工技術並びに機械・設備を選定し、具体的な施工計画を策定

研究の進め方

設計・施工技術

- ・研究坑道と周辺設備の設計・施工
- ・計測管理・フィードバック
- ・地震時安定性評価
- ・通気網解析

建設技術

- ・ショートステップ工法
- ・施工設備（替えキブル、非電気式雷管等）

施工対策技術

- ・突発湧水対策（プレグラウト、前方探査）
- ・山はね、高抜け発生評価

安全確保技術

- ・坑内管理システム（入出坑、坑内環境、通信、火災監視）
- ・リスクマネジメント

2) 主な調査研究結果

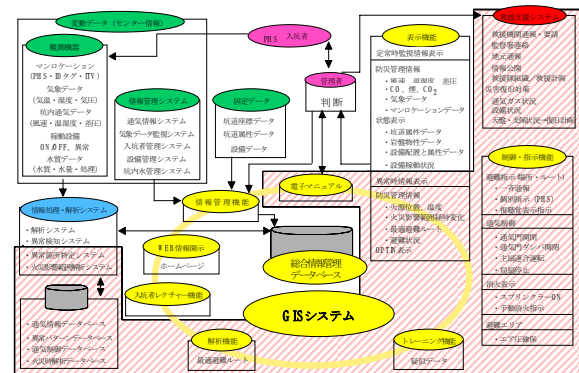
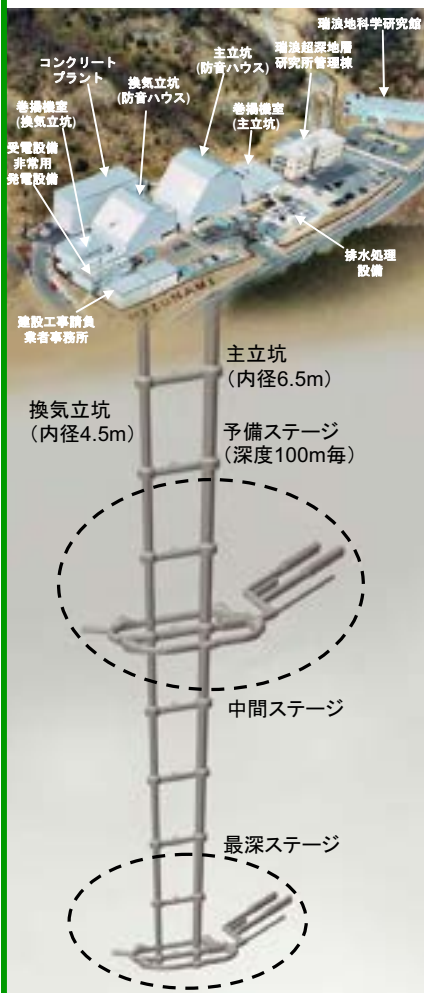
注)研究坑道の詳細レイアウトは、第2段階以降に明らかとなる地質環境や研究開発ニーズに基づき、適切に見直す予定

立坑の目的と仕様

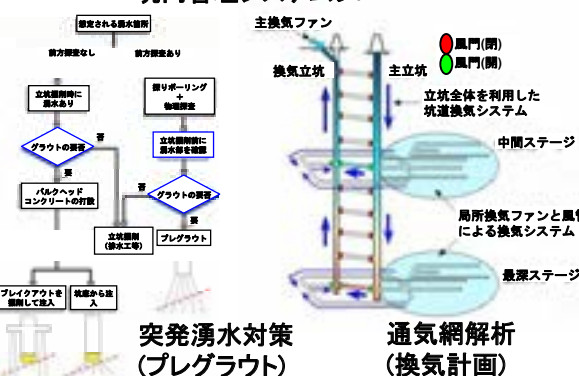
目的	主立坑	換気立坑
	● 目的とする研究深度（最深ステージ）への到達 ● 第1段階における地質環境予測結果の確認 ● 設計の妥当性の確認 ● 研究坑道掘削時のズリ崩出 ● 資機材の搬出入ルート	● 研究坑道全体の換気機能 ● 昇降機（エレベータ）設備
深度（計画）	1,025 m	1,010 m
直径		
掘削	7.3 m	5.3 m
完成	6.5 m	4.5 m

水平坑道の目的と仕様

	最深ステージ	中間ステージ	計測坑道	予備ステージ
目的	本研究の目標である深度1,000 m付近に設置する主要研究ステージ	最深ステージに対して、深度依存性等の影響把握のために、中間深度に設置する主要研究ステージ	中間、最深ステージの掘削影響の計測を実施する坑道	両立坑の連絡、各種機器設置スペース、地質的に地質環境の調査等を行うための坑道
深度	1,000 m 付近	500 m 付近	470 m, 528 m, 970 m	100 m 毎
延長	約 770 m	約 770 m	約 240 m	約 32 m



坑内管理システムフロー



3) 得られた技術的知見

- 研究坑道の詳細レイアウトを決定
- 実際に適用する施工技術並びに機械・設備を選定し、具体的な施工計画を策定
- 空洞安定性と支保設計は、第2次取りまとめの手法を踏襲して実施。なお、第1段階調査と平行し、実施設計(ステップ0)で基本計画を、調整設計(ステップ3)でその見直しを実施。この結果、岩盤等級の取扱い、ボーリング調査位置等に関して提言
- 耐震設計について、当地域の想定地震等に基づき、第2次取りまとめの手法を用いて実施すると共に、鉛直地震動についても検討を行い、耐震性を確認
- 計測結果の設計・施工計画へのフィードバック技術(情報化施工)について、フロー図を作成。地質観察においては、最適な岩盤分類法の検討を計画
- 突発湧水について、プレグラウト(事前グラウト)による止水を基本とする対策工検討フローを作成
- 安全対策について入出坑、火災、坑内環境及び通信の各システムと通気網解析を組み合わせた統合管理システムの概念を構築。また、リスクマネジメント手法を活用してリスクを抽出し、安全対策に反映を計画

4) 処分事業・安全規制のための技術的基盤

- 実際の深部地質環境や調査・研究計画を反映し、研究坑道と周辺設備を設計・施工・維持管理する一連のフローを提示
- 検討内容を実際に研究所計画に反映・適用し、その妥当性を検証(第2段階以降、実施予定)
- 実際の設計・施工・維持管理を通じてノウハウを含めた情報を取得・データベース化し、地層処分計画へ反映・活用(第2段階以降、実施予定)



2-1 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階) 研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」(その1)

ー全体概要及び研究所設置場所の選定についてー

地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット
國丸 貴紀

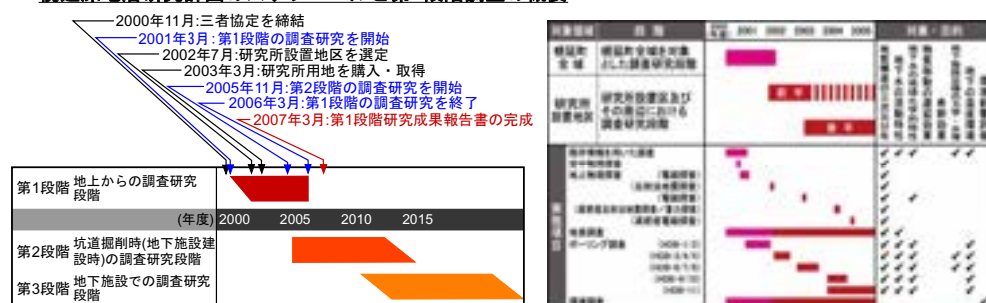
1) 全体概要

幌延深地層研究計画は、原子力機構が北海道幌延町で進めている堆積岩を対象とした総合的な研究開発計画であり、「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」や「原子力政策大綱」に示された深地層の研究施設計画の一つである。幌延深地層研究計画では、「深地層の科学的研究」と「地層処分研究開発」の2つの領域において以下の3つの目標を設定し、調査研究を進めている。

- 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
- ③ 実際の地質環境での地層処分技術の適用性確認

本報告書は、そのうちの「深地層の科学的研究」について、地上からの調査研究段階(第1段階)における調査研究の成果を取りまとめたものである。

幌延深地層研究計画のスケジュールと第1段階調査の概要



3) 得られた技術的知見

第1段階における 深地層の科学的研究の成果

「研究所設置地区及び研究所設置場所の選定」では、その実経験を通じて確認した、地区・用地の選定上の要件や考慮すべき条件とその重要性を示した。

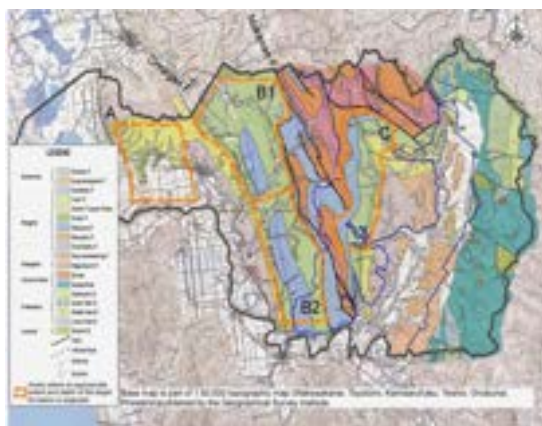
「地上からの地質環境の調査研究」では、調査結果の解釈とモデル化を通じて、地層処分にとって重要な地質環境の特性・プロセスを把握し、その過程で得られた技術的知見を踏まえて統合化データフローを構築した。

「深地層における工学技術の基礎の開発」では、堆積岩(軟岩)中での地下施設の仕様・レイアウトを決定し、地下施設を安全に建設・維持するための設計・施工計画を策定した。

「地下施設建設に伴う周辺環境への影響調査」では、環境調査などを継続し、地上及び地下施設の建設に伴う影響の低減を図る措置が適切であることを確認した。

2) 研究所設置場所の選定

幌延深地層研究計画における地下施設は、地層処分技術を実際の地質環境へ適用し、その実用性や信頼性の確認を通じて、地層処分技術の信頼性の向上を図っていくための研究開発の場であり、地下施設を建設する場所(研究所設置場所)が求められる要件は、実際の処分地の選定において考慮すべき要件とは明確に区別される。



研究所設置場所の選定手順

- ① 研究所設置候補区域を選定(A, B1, B2, C区域)
- ② 空中物理探査、地上物理探査等の実施
- ③ ボーリング調査の実施(B1, B2区域)
- ④ 研究所設置候補区域内(B1区域)において研究の対象となる地区を選定
- ⑤ 研究所設置地区内から研究所設置場所を選定

研究所設置場所に求められる要件と条件

- ① 研究の対象となる地層と地下水が存在すること(地質環境要件)
- ② 安全に地下施設を建設でき、研究環境を確保できること(安全要件)
- ③ 調査に関わる法令、アクセス、土地利用状況、地権者などの社会的条件
- ④ 研究所建設に伴う周辺環境への影響が小さいことなどの環境条件

4) 処分事業・安全規制のための技術的基盤

- ① 「研究所設置地区及び研究所設置場所の選定」、「地上からの調査研究における地質環境モデルの構築」、「坑道掘削前の深部地質環境の状態の把握」、「坑道掘削に伴う周辺の地質環境の変化の予測」及び「地下施設の詳細設計及び施工計画の策定」までの一連の調査手法
- ② 適切な実施体制(チーム)づくりや調査研究の全体から細部に至る品質管理体系の整備が重要である。

1) 目標・実施概要

地質・地質構造に関する調査研究の目標は、水理、地球化学及び岩盤力学に関するモデルの基礎情報となる地質情報を取得するとともに、地質・地質構造に関する調査技術を整備することにある。具体的な課題は、地形、岩盤の地質学的不均質性、被覆層(未固結堆積物)の厚さ、及び物質の移動経路として重要な構造の把握である。これらを把握するため、地形調査、地表踏査、空中物理探査(比抵抗探査・磁気探査・放射能探査)、地上物理探査(比抵抗探査・反射法地震探査・重力探査)及びボーリング調査を実施した。

2) 主な調査研究結果

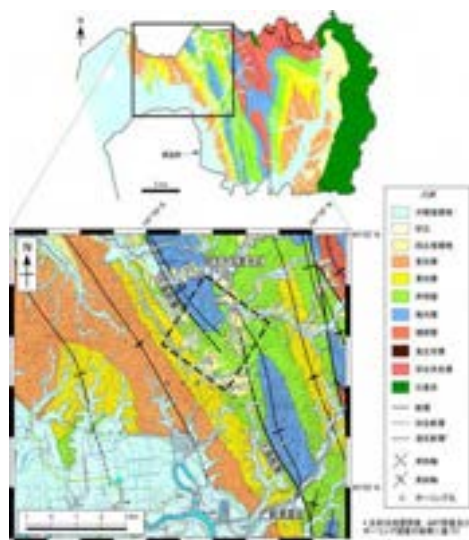


図1 研究所設置地区周辺の地質図

➤地形調査、地表踏査、物理探査及びボーリング調査の結果、研究所設置地区に存在する大曲断層(図1)は分岐構造をなすこと(図1~3)、及び地下水の主要な水みちであることが示唆された。

➤地表踏査及びボーリング調査の結果、稚内層及び声問層中には層理面に高角な小断層と層理面にほぼ平行な小断層が存在しており(図4)、前者の小断層が互いに密集して小断層帯を形成すること、及びそれらが地下水の主要な水みちであることが示唆された。しかし、これらの連続性や連結性についてはまだ不明な点が多い。

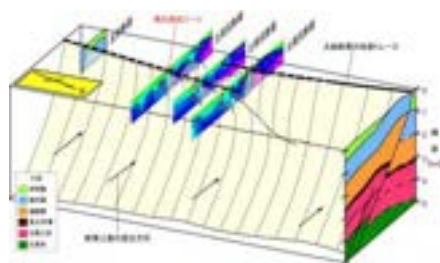


図2 推定した大曲断層の三次元分布

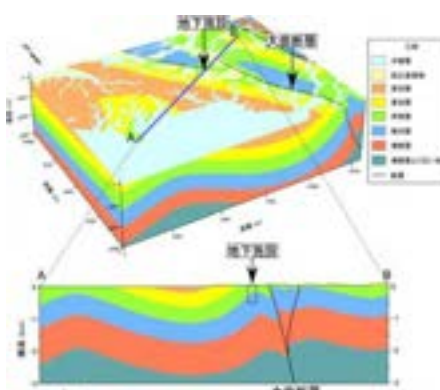


図3 地質構造モデル

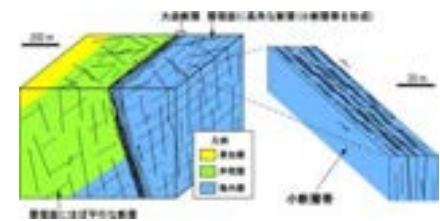


図4 断層に関する地質構造の概念図

3) 得られた技術的知見

地表踏査

➤幌延地域に発達する横ずれ優勢な断層の地質学的特徴を把握する上で、重機を用いて作り出した水平露頭面での観察結果が有用であった。

比抵抗探査

➤「塩水系」と「淡水系」の2種類の地下水が存在し、顕著な岩相変化を示さない稚内層及び声問層中の大曲断層の位置を推定する上で、比抵抗探査で得られた比抵抗分布が有用であった。

反射法地震探査

➤物性変化に乏しい稚内層及び声問層を対象に反射法地震探査を実施した結果、発振点／受振点の密度を高くしても、反射波の連続性や分解能に大きな向上が期待できないことが分かった。

課題

➤研究所設置地区周辺に分布する小断層帯の位置(特に地下施設での遭遇位置)やそれらの連続性・連結性を地上からの調査研究から推測することは規模や数の問題から困難であった。これについては今後の課題である。

4) 処分事業・安全規制のための技術的基盤

- 大規模な断層の位置は、地形調査、地表踏査、物理探査及びボーリング調査の適切な組み合わせにより推定可能である。
- 物質の移動経路として重要な構造は、地表踏査やボーリング調査における地質観察からある程度まで推定可能である。
- 段階的な反射法地震探査の進め方としては、まず通常の仕様で探査を実施し、そこで得られた反射波の連続性や分解能が比較的良好な場合に限り、より高密度な探査の実施を検討することが効率的である。

1) 目標・実施概要

岩盤の水理に関する調査研究の目標は、下記の通りである。

- ・研究所設置地区及びその周辺における地下水流動特性の把握
- ・地下研究施設建設に伴う周辺の水理地質環境の変化の予測
- ・第2段階以降における効率的・体系的な調査研究の進め方の提示

第1段階では、調査研究の進捗に応じた2つの段階(①幌延町全域を対象とした調査研究段階、②研究所設置地区及びその周辺における調査研究段階)について、上記の目標に向けた既存情報の整理とそれに基づく水理地質構造モデルの構築・地下水流動解析を行った。

2) 主な調査研究結果

①幌延町全域を対象とした調査研究段階—HDB-1, 2孔を利用した試験を含めた既存情報に基づく調査研究—

幌延町全域を含む領域(50km四方程度)を対象とした地下施設に影響する因子に関する感度解析を実施(図1,2)。

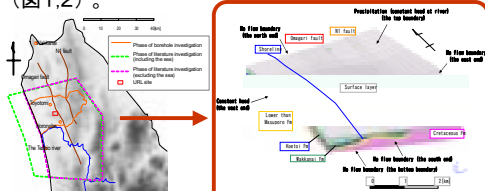


図1 対象領域

図2 水理地質構造モデルおよび境界条件

東側の全水頭が西側に比べて高いことから、地下水の主な流動は東から西に向かう。

一方、研究所設置地区及びその周辺においては、局所的な地形の起伏の影響で、全水頭分布はやや複雑であり、流動方向も深度や場所により異なる(図3)。

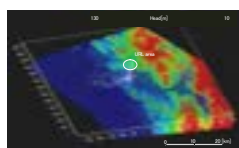


図3 水圧分布と地下施設位置を通る地下水流経路

研究所設置地区を含む流動系は、地形の起伏に支配され、深度によって局所流動系、広域流動系に分かれている。広域流動系と局所流動系の境界は標高400m程度となり、地下施設(深度約500m)に位置する坑道近傍の地下水の流動は広域流動系に支配される可能性が高いと考えられる(図4)。



図4 研究所周辺の地下水流動の概念

②研究所設置地区及びその周辺における調査研究段階—HDB-1~8孔を利用した試験を含めた調査研究—

研究所を中心とした領域(20km四方程度)を対象とした地下水流動解析を実施(図5,6)。

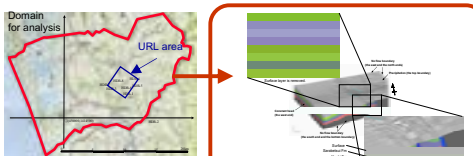


図5 対象領域

図6 水理地質構造モデルおよび境界条件

研究所設置地区の東側の山に高い全水頭が保持され、地下水の流動は大局的に東から西に向かい、局所的には地形勾配に支配された流動となる。これは、既存情報を用いた調査段階の解析結果で推定された流動系の概念と同じである(図7)。

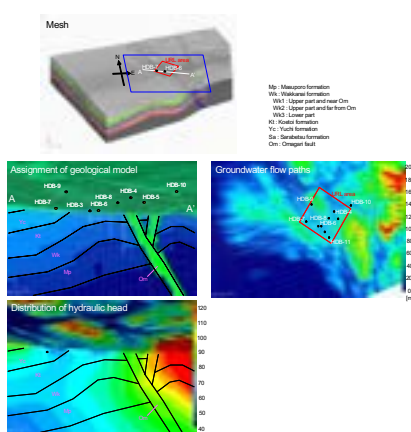


図7 水圧分布と各ボーリング孔(HDB-4, 6, 7, 8, 9, 10, 11)を通る地下水流経路

3) 得られた技術的知見

●ボーリング孔を利用した調査研究により、地層の透水性が深部ほど低下する傾向があることや小断層帯の有無が影響することがわかった。これらの情報を考慮した水理地質構造モデルの構築・地下水流動解析を通じて、対象地域の大局的な地下水流動を把握した。

●解析に必要な境界条件の一つである地下水涵養量について、研究所設置地区及びその周辺における算定手法を整理し、適用性を確認した。また、浅層部を対象としたボーリング孔での試験から、段丘堆積物中ないし段丘堆積物と健岩部の境界付近と想定される箇所を高透水性の層が存在することがわかった。

●幌延町全域を対象とした地下水流動に関する感度解析によって、地層の透水性や地下水涵養量などが解析結果に及ぼす影響が高いことがわかり、今後の調査研究において、透水性や涵養量について信頼性の高いデータを取得することの重要性が示唆された。

●調査研究の進捗に応じた解析結果については、水圧等の実測値との定性的な整合を確認したが、今後定量的な検討が必要である。

4) 処分事業・安全規制のための技術的基盤

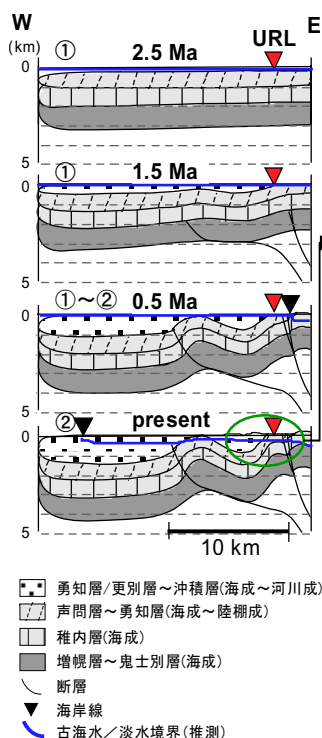
より広範な領域を対象として地下水流動特性を把握する際、感度解析によって解析結果への影響が高い因子を確認した。処分事業の概要調査などにおいても、取得すべきデータの検討において感度解析は有効であると考えられる。また、解析結果を評価する上で、用いたデータや仮定の根拠を明確にすることにより情報の透明性・追跡性を担保することは、評価結果の信頼性を示す上で重要である。調査研究の進捗に応じた解析結果については、水圧等の実測値との定性的な整合を確認したが、今後、幌延地域を事例として、調査の進捗に応じた不確実性の低減に関する定量的な検討を行い、その知見を知識基盤として整備していくことが重要である。

1) 目標・実施概要

第1段階の調査研究では、研究所設置地区選定に用いるための幌延町全域を対象とした調査、選定した研究所設置地区とその周辺の地球化学環境の概念構築を目的とする調査を行った。物理探査や深層ボーリング調査(深度500~1,000m級ボーリング孔11本)により得られたデータを用いて、研究所設置地区周辺における地下水水質の三次元分布、主要な水質形成機構の考察などを行った。また、これらの一連の調査・解析を通じて、要素技術の開発を行うとともに、沿岸域の堆積岩・塩水系地下水環境を対象とする地下水の地球化学特性調査手法を整理した。

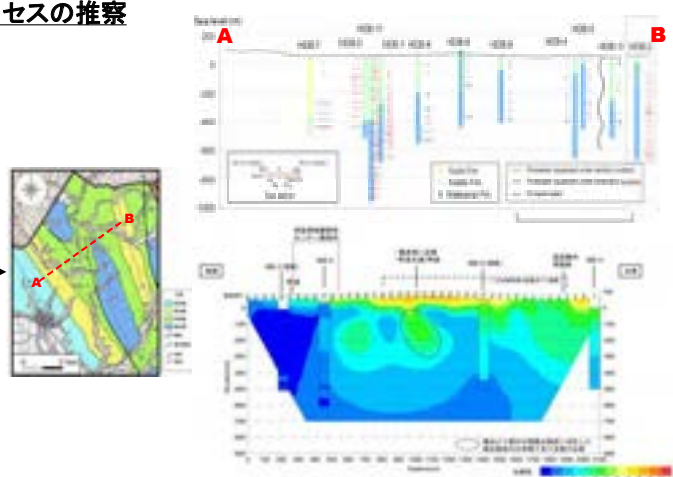
2) 主な調査研究結果

地史を踏まえた水質形成プロセスの推察

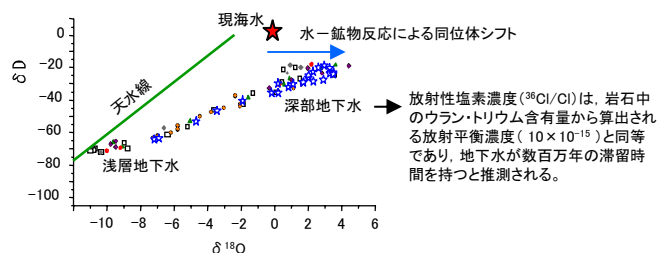


- ① 稚内層・声間層・勇知層が海水中に堆積後、上部更別層堆積時に浅部に含まれていた海水が淡水に置換。
- ② 約70万年前以降、氷期-間氷期サイクルに伴い、間氷期の海進時に更別層以深に浸透した海水が、氷期および沖積層堆積時に淡水に置換。

ボーリング調査による水質の把握、 物理探査技術の確認



同位体による地下水の起源・年代の推測



堆積岩浅部では塩分濃度の低いNa-HCO₃型地下水、深部では現代海水の1/3~1/2程度の塩分濃度のNa-Cl型地下水が分布する。pHは7~8、酸化還元電位は、深度600m付近で約-170mVである。また、岩盤の比抵抗分布は塩分濃度分布と整合的であることが確認された。

同位体組成から、深部地下水と浅層地下水の混合、続成過程のオパール脱水反応等で水質が形成されていると考えられ、深部地下水の滞留時間が数百万年であることが示唆された。これは地史を踏まえた水質分布と整合的である。

3) 得られた技術的知見

幌延において確認された堆積岩・塩水系地下水環境に適用可能な要素技術と今後の提言

- ① コア抽出水分析による3次元的水質分布評価技術
 ▶ 透水性が低く地下水を得られない堆積岩では、抽出水分析により地下水の水質型とその分布を評価できる。
- ② 水質分布を把握するための物理探査技術
 ▶ 高密度電気探査により、ボーリングのない領域についても、地下水の塩分濃度分布を概観できる。
- ③ 同位体を利用した地下水の起源・年代推測技術
 ▶ 様々な同位体を併用することで、長期間滞留している地下水の起源・滞留時間を推測することができる。

今後、地下水流動速度が非常に遅い場(数百万年間地下水が滞留した場)において、大規模地下施設を建設した場合の化学環境の変動幅や施設閉鎖後の化学環境および物質移行に関わる研究が重要である。

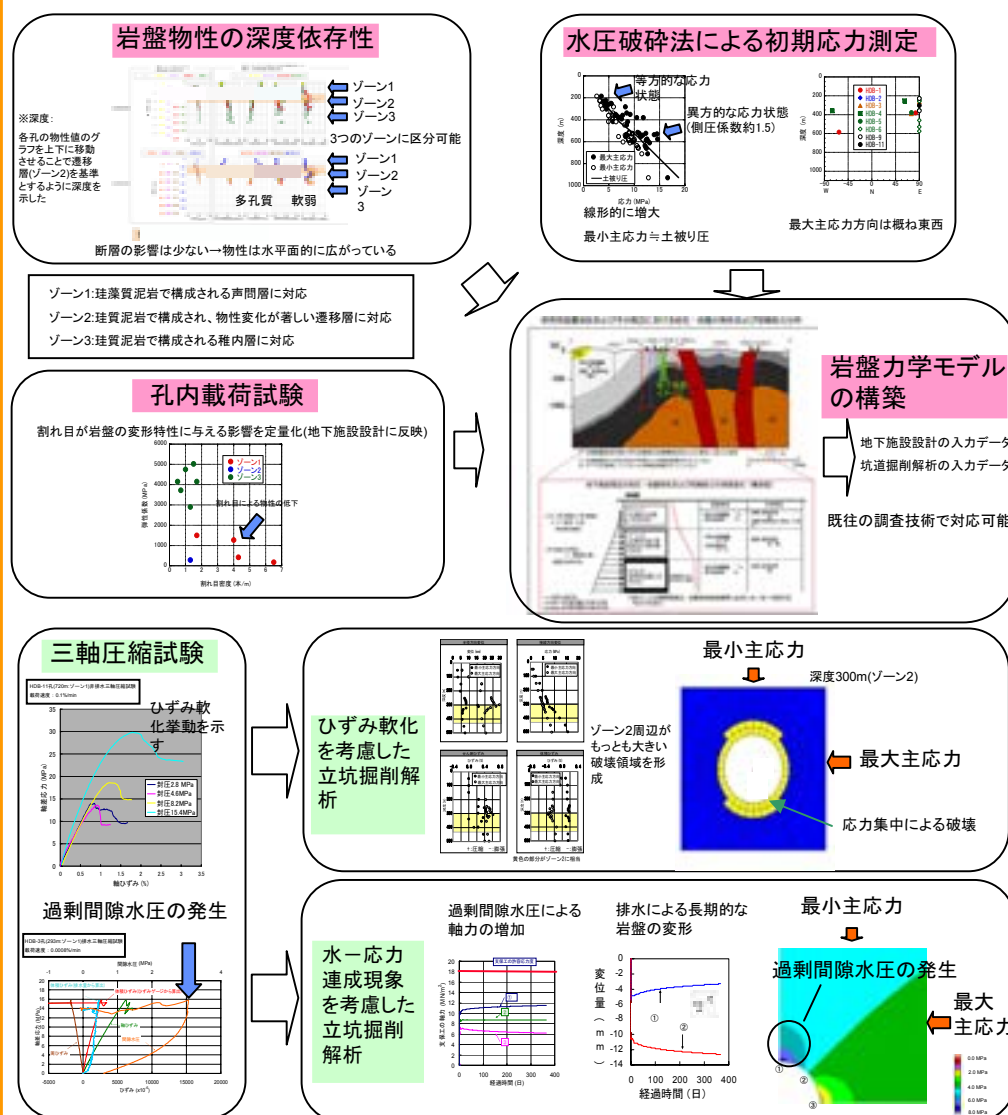
4) 処分事業・安全規制のための技術的基盤

堆積岩・塩水系地下水環境を対象とした調査評価技術として、沿岸域においては現代海岸線にこだわらず、地史(特に海岸線の変化と地層堆積史)を踏まえた地球化学環境(塩水の分布領域など)の予察とボーリング調査に基づく確認、化学成分、同位体データに基づく解析が有効である。

1) 目標・実施概要

- | | |
|--|--|
| 目標 <ul style="list-style-type: none"> ■ 研究所設置地区及びその周辺の地表から地下深部にいたる岩盤力学特性の把握 ■ 地下施設の設計に必要なデータの取得 ■ 地下施設建設によって生じる周辺岩盤への力学的影響の予測手法の構築 | 実施概要 <ul style="list-style-type: none"> ■ 地表から地下深部までの岩盤力学特性を把握・評価する手法構築と地下施設設計に供するデータの取得のための深層ボーリング孔を用いた原位置試験と室内試験を実施 ■ 地下施設建設に伴う周辺岩盤への物理・力学特性に関する地質環境への影響予測のための数値解析手法の検討と、それに基づく空洞安定性解析を実施 |
|--|--|

2) 主な調査研究結果



3) 得られた技術的知見

- 研究所設置地区およびその周辺の岩盤は、力学的には深度方向に3つのゾーン区分を行うことで、深度方向の各種物性分布を場所によらず統一的に説明可能
- 堆積軟岩においても割れ目が岩盤の剛性を低下させるため、地下施設設計の入力パラメータとして使用する際、割れ目の影響を定量化することが必須
- 研究所設置地区およびその周辺における水平面内最大主応力方向は、概ね東西方向であり、最大主応力と最小主応力の比は1~1.5の範囲内に存在
- 坑道周辺は、ひずみ軟化により破壊領域が形成され、その範囲は、ゾーン2で特に大きい
- 掘削直後は、過剰間隙水圧が発生することで、支保工の軸力が増加
- 岩盤からの排水によって長期的に変形が発生する可能性が示唆

4) 処分事業・安全規制のための技術的基盤

- 地表から地下深部までの岩盤力学特性の把握と地下施設設計のためのデータの取得のためには、深層ボーリング孔を用いた既往の原位置試験と室内試験を実施することで対応可能
- 原位置試験と室内試験からの情報を用いた空洞安定性解析を実施することで、地下施設建設に伴う周辺岩盤への物理・力学特性に関する地質環境の影響予測が可能



2-6 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階) 研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」(その6)

—地質環境の長期安定性に関する調査研究—

地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット
新里忠史

1) 目標・実施概要

- 目標: 幌延地域を事例として、地層処分にとって重要な地質環境特性(地下水流動、地下水水質、物質移動特性など)の現在から将来にわたる長期的な挙動を予測するための一連の調査・解析技術を整備する。
この過程を通じて、ある与えられた場(沿岸域、堆積岩分布地域)における地質環境の長期挙動を予測し評価するための方法論を構築する。
- 実施概要: 第1段階では、幌延地域において過去に生じた天然現象の発生様式、規則性および規模の程度を把握し、幌延地域における将来の地質環境の変遷を予測する上で重要と考えられる天然現象の概念モデルを構築することを目的として調査研究を実施した。

2) 主な調査研究結果

①現在の広域テクトニクスの把握

- ・広域テクトニクス
- ・震源分布、活構造の分布
- ・第四系の分布

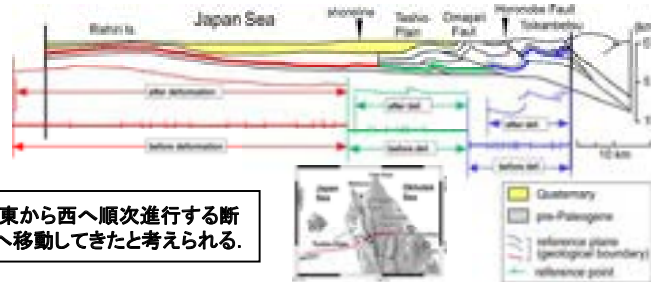
幌延地域は東西圧縮の応力場にあり、現在陸域において地殻変動が最も活発である地域は、幌延地域の西部と推定される。



②地殻変動域・堆積域の変遷

- ・現在の地殻変動域の分布
- ・地層と地質構造の時空分布
- ・各地区の歪量

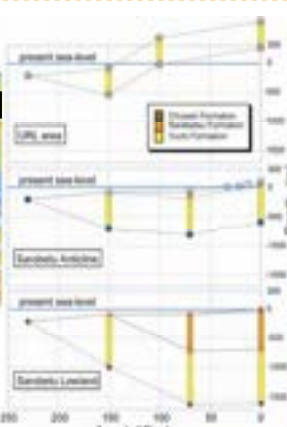
地殻変動の活発な地域や堆積域は、東から西へ順次進行する断層活動・褶曲作用とともに、東から西へ移動してきたと考えられる。



③隆起・沈降の傾向

- ・地形/地質分布、年代層序
- ・海水準変動、堆積環境、古水深
- ・断層/褶曲構造の分布

約250万年前から現在に至る各地区の隆起・沈降の変遷は、広域テクトニクスと地質構造を反映し、各地区で異なる傾向を示す。



④概念モデルの構築



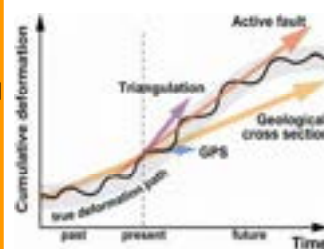
前提: 過去の天然現象は将来も同じ様式で発生する
・過去から現在に至る変動傾向に基づき、将来数10万年程度の期間を対象として、氷期における状況を誇張して描いた。
・現在の地下水の流動状態を基準として、永久凍土の形成や海岸線位置の移動、地形変化などによる地下水の流動状態の変化についても概念的に記述した。

3) 得られた技術的知見

○天然現象とそれに伴う地質環境の変遷は、広域テクトニクスを反映して進行している。このため、個別事象のみを取り出して予測・評価するのではなく、その背景となる広域テクトニクスに関する情報収集が重要となる。

○幌延地域における隆起・沈降は、断層運動や褶曲作用などの地質構造の発達と密接に関連した事象である。このため、天然現象が地質環境にもたらす変化を予測・評価するうえでは、天然現象の相互作用に関わる検討が重要と考えられる。

○天然現象とそれに伴う地質環境の長期的変遷を予測・評価するうえでは、その期間と比較して、同程度かそれ以上の期間を対象とした調査手法を適用し、変動傾向を把握することが重要である。そして、その変動傾向の中で、現在が発生初期か、終末期かなど、どの状態であるかを把握した上で、予測・評価をすることが重要となる(下図)。



4) 処分事業・安全規制のための技術的基盤

地層処分にとって重要な地質環境の特性やプロセスの長期的な変遷を予測・評価するうえでは、個別の事象のみを取り出して詳細な調査研究を実施するのではなく、関連する重要な事象についての抜け落ち等を防ぐため、網羅的に情報収集を進めていくことが重要である。そして、得られた情報を総合的に取りまとめた数値解析等を実施し、次段階の調査研究の戦略を立てていくことが必要である。そのためには、調査研究の開始初期において、調査の大まかな進め方を示す研究の基本フローや、目的に至る具体的な道筋を示す統合化データフローを作成しておくことが有効と考えられる。

2-7 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階) 研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」(その7) —地質環境の調査技術の整備(遠隔監視システムの開発)—

地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット
浅森 浩一・大原 英史・國友 孝洋※・中島 崇裕※・茂田 直孝 (※東濃地科学研究ユニット)

1) 目標・実施概要

処分場の安全を確保するためには、事前のサイト特性調査で予測される地下水の流動や地球化学特性、岩盤の力学特性などの地質環境条件が、処分場の建設や操業、あるいは天然現象などによる擾乱によって変動しても、その幅が設定された設計条件の範囲内にあることに関し、処分場の管理を通して適切に確認することが重要である。そのため、これまでの物理探査技術に比べてより高い分解能での地質環境の把握及びその時間変動を推定することが可能なモニタリング技術の構築を目標として、精密制御定常信号システム(アクロス)を幌延に適用し、地下施設の建設から操業、閉鎖後の地質環境の変化を高精度でモニタリングするシステムの開発を進めている。第1段階では、弾性波および電磁アクロスの設置を行い、地下施設建設前における試験観測を開始した。

2) 主な調査研究結果

環境ノイズレベルの調査結果(図1)および既存の物理探査の結果を踏まえ、地下施設建設前における試験観測を行った(図2)。弾性波アクロスは、平成17年12月から試験観測を開始し、HDB-3からの送信信号をHDB-4, 5, 8の各受信点で受信している。電磁アクロスはHDB-4, Z受信点において平成16年12月から、HDB-8 では平成17年3月から、東西方向および北西-南東方向の2組の送信電極によるそれぞれ異なった周波数の信号を送信する試験観測を行った。また、一定時間分の試験観測データをスタッキングし、振幅スペクトルを求めることによって、送信信号とその他の信号(環境ノイズ)とが識別可能であることが確認された(図3)。

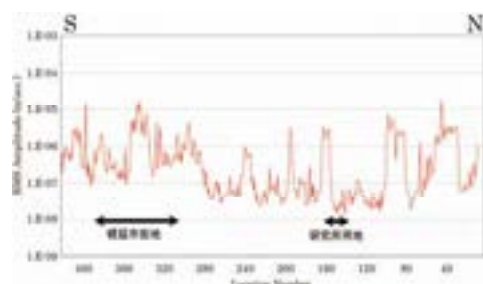


図1 弾性波ノイズ調査結果



図2 弾性波及び電磁アクロスの送受信点位置 (IKONOS衛星画像データを使用)

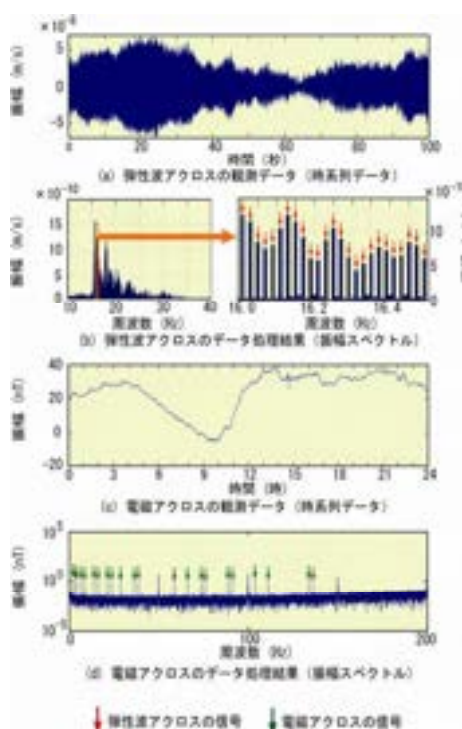


図3 弾性波(a, b)及び電磁アクロス(c, d)の観測記録例

3) 得られた技術的知見

○一般に、弾性波及び電磁波データの観測に当たっては、環境ノイズレベルより極めて小さい信号の観測は困難と考えられているが、信号を精密に制御し、連続的に送受信を行うことで、そのような微小な信号を観測することができる。

○地下施設近傍での地下水飽和度や岩盤応力の変化等に伴い、弾性波速度や比抵抗が変化すると予想される。これらの地質環境の変化を把握するため、弾性波及び電磁波を連続かつ安定して送受信することで、その微小な変化を検出することが期待できる。

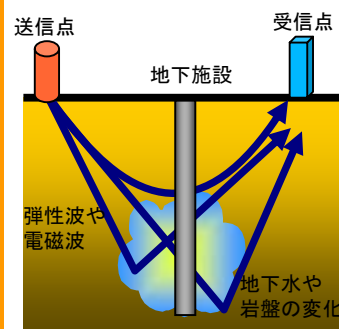


図4 遠隔監視システムの概念図

4) 処分事業・安全規制のための技術的基盤

地層処分は本質的に受動的(passive)なシステムであり、その長期安全性を確保することを目的とした処分場閉鎖後の管理(モニタリング等)を必要としないことを原則とするものである。しかしながら、処分場の安全を確保するためには、その建設等に伴う周辺地質環境の地下水及び岩盤特性の変化を確認することが重要である。遠隔監視システムは、標記の目標に加えて、これらの変動を非破壊かつ連続的に把握するためのツールとしても有用であると考えられる。

1) 目標・実施概要

第1段階の目標

地上からの調査研究により得られた地質環境情報に基づいて地下施設を実際に設計・施工することを通じて、地下施設の設計・施工計画技術、建設技術、施工対策技術及び安全確保技術の高度化・体系化を図る

実施概要

①設計技術

・空洞安定性評価
(支保設計・耐震性能照査)

②建設技術

・掘削工法・支保工法
・掘削土(ズリ)処理計画
・排水処理計画

③防災対策技術

・可燃性ガス、坑内作業環境対策
・火災時対策
・通気挙動模型実験

地下施設イメージ図

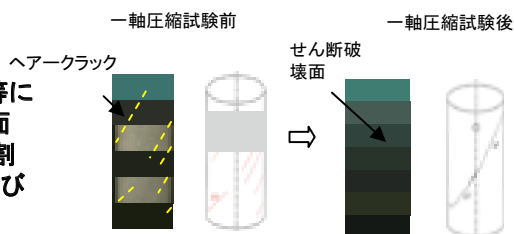


※この図はイメージで、今後の調査研究等の結果次第で見直すことがあります。

2) 主な調査研究結果

①空洞安定性の評価

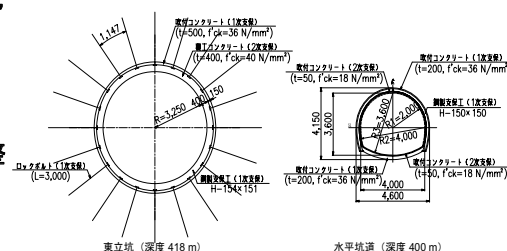
・ボーリング調査で得られた力学試験結果等に基づき、堆積岩(軟岩)においても、不連続面の影響を受けることを考慮して、岩石硬さ、割れ目、ヘアークラックに着目した地山区分及び岩盤物性値の設定方法を構築
・地山強度比の低い条件下での掘削工事に際して、二重支保構造の概念を導入し、掘削後の空洞安定性を保持しつつ、岩盤及び支保工に掘削解放応力を合理的に負担させることで、支保設計の合理化を実現



室内試験によるヘアークラックの破断状況

②掘削土(ズリ)及び排水の処理計画

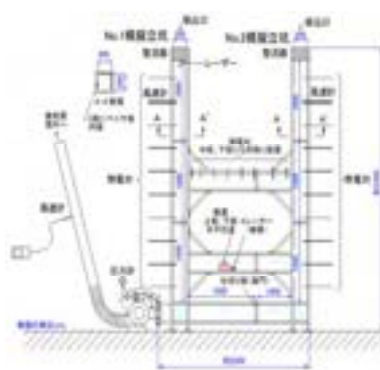
・掘削土(ズリ)や地下水に含まれる特定有害物質について、各種法令や関係機関との調整結果を踏まえ、周辺環境への影響を考慮した処理方法を策定
・掘削土(ズリ)置場は、土壤汚染対策法の遮水工封じ込め型に準ずる構造を採用
・地下水に含まれる特定有害物質(ホウ素及びアンモニア性窒素)は、水質汚濁防止法に定める排水基準値及び関係機関との協議で決定した排水基準値以下になるように脱ホウ素及び脱窒素処理後、天塩川へ放流する計画を策定



二重支保構造の例

③防災対策

・可燃性ガス対策、坑内作業環境対策、火災時対策、坑内情報管理システム等の計画を立案
・坑内火災時に発生する浮力による通気主流の逆転現象や、水平坑道の風門を開閉した場合の通気挙動等を立坑と複数の水平坑道を組み合わせた模型実験により確認



火災時の坑道模型実験のレイアウト図

3) 得られた技術的知見

●地下施設の事前設計技術として、堆積岩(軟岩)においても、当該地点に分布する岩種によっては割れ目やヘアークラック等の不連続面の影響を適切に考慮した岩盤物性値の評価が必要

●地山強度比の低い岩盤条件下での坑道掘削において、二次支保に応力を負担させる二重支保構造の概念を設計に導入することで、支保設計の合理化が可能

●周辺環境への影響を低減するため、岩石試料を用いた室内試験や地下水の水質分析を行い、各種法令や関係機関との調整を通じて掘削土(ズリ)や地下水の処理方法の最適化が必要

●地下施設においては、坑内火災が発生した際に生じる浮力による通気主流の逆転現象や、水平坑道の風門を開閉した場合の複雑な通気挙動の発生が実験的に確認され、これらを考慮した対策を講じることが肝要

4) 処分事業・安全規制のための技術的基盤

第2段階以降の地下施設建設を通じた妥当性確認ならびに更新を行うことにより、処分場建設に向けた地下坑道の設計・施工計画技術、建設技術、施工対策技術及び安全確保技術を高度化・体系化していくことが必要である。

さらに、地層処分研究開発の成果と統合し、処分場操業時を想定した制約条件を反映した地下施設の設計・施工技術として整備していくことが重要である。

ー 設計手法の適用性確認の概要 ー

地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット
棚井 憲治・藤田 朝雄・谷口 直樹・小林 保之・内藤 守正・油井 三和

1) 目標・実施概要

幌延深地層研究計画において段階的に得られる地質環境条件をひとつの適用例として、

□第1段階である地上からの調査で得られた情報をもとに、その検討対象深度及び地質環境条件を設定し、それらの条件をもとに処分場の設計技術の適用性に関する事例検討を行い、適用にあたっての留意すべき事項等を整理

□第2段階以降における調査研究の方向性を具体化

2) 主な調査研究結果

□検討対象深度及び地質環境条件の設定

- 処分孔の力学的安定性が確保されること、設置環境として鉛直方向に均質で大きな岩体が存在すること、という2つの要件を満足するような検討対象深度を設定 ⇒ 450m付近の岩盤(434m~474m)
- ボーリング調査などから得られたデータを用い、検討対象深度における物理特性、力学特性、初期応力、熱特性、地下水化学特性及び水理特性を設定
(右表に第2次取りまとめと本検討における力学特性及び地下水化学特性の設定方法の比較を一例として示す)

【力学特性の設定方法】

第2次取りまとめ	本検討
文献調査の結果をもとに、一軸圧縮強度その他の特性(弾性係数、粘着力、内部摩擦角、有効間隙率など)間の関係を用い、設定	地下施設近傍のHDB-3、6孔を対象とした室内・原位、岩石試験及びコア観察等により、岩盤モデル(岩盤成分の深度構成)を作成し、岩盤区分毎に物性を設定

【地下水化学特性の設定方法】

第2次取りまとめ	本検討
文献調査等から地下水を起源とする地下水を適宜、組成、濃度分布などについて整理	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

3) 得られた技術的知見

- 地下水化学データに関しては、大気との接触などが避けられない場合が多い。その場合、深度方向での地下水水質の深度依存性に関する知見や水質形成の熱力学的解析結果および地層中に認められる鉱物に関する情報を総合的に考慮することが重要

□堅置き方式を一例とした設計手法の適用性検討

- 追跡可能性を考慮に入れ、緩衝材とオーバーバックの力学的相互作用を考慮した設計手順の明確化や埋め戻し及びプラグ設計の明示を実施
- また、これらの設計手順にもとづき幌延の地質環境条件を一例とした手法の適用性に関する検討を行い、地上からの調査段階における留意点を抽出



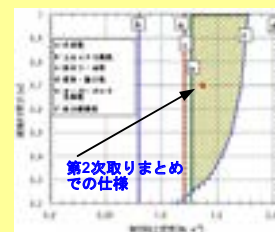
第2次取りまとめで示された全体設計フロー

堅置き方式を一例とした全体設計フローの更新

地上からの調査段階における留意点の整理例

- 【地質環境条件】
 - ◆処分孔の安定性の適切な評価・建設・保集中の岩盤クリープ挙動の考慮
 - ◆地下水化学データの取得
 - ・大気との接触が避けられない場合、地下水水質の深度依存性に関する知見、熱力学的解析結果及び地層中に認められる鉱物に関する情報を総合的に考慮
- 【坑道の空間安定性】
 - ◆情報化施工による支保設計の見直し
 - ◆低pH酸性コンクリートに関する特性データの拡充
- 【埋め戻し材設計】
 - ◆セメント系材料の緩衝材に対する影響に関わる評価モデルやデータベースの整備
 - ◆埋め戻し材の透水・膨潤・熱及び力学特性などの実験データをデータベース化し、Web公開
- 【緩衝材仕様確認】
 - ◆設計条件のついでである自己シール性の範囲を設定するための判断基準の整備
- 【長期健全性確認】
 - ◆掘削時の法・掘削現象は、地下水系条件よりも地下水系地下環境での考慮が重要

- 設計構成要素間の相互関係の整理によって、一般性・客観性をより向上させた全体設計フローの構築
- 長期間の施設管理の面から、現状の地下空洞施工で一般的になりつつある情報化施工を考慮した評価指標が必要
- 強度が小さい、異方圧下、多孔質という特徴を有するような堆積岩を対象とする場合は、異方的な応力状態にある場合の長期安定性や異方性を考慮した物性値の設定方法などを考慮
- サイト環境条件に応じて要件を満足する幅を設定することにより柔軟な緩衝材設計が可能



ブロック方式の設定例

- 埋め戻しとプラグに関する設計フローと適用事例の明示

□第2段階以降における調査研究の方向性(今後の課題)

- 地下施設の建設と関連する項目;
 - ・建設工事の支保工やグラウト材料としての低アルカリ性セメントの施工事例や留意点の整理
 - ・地上からの調査段階で示した設計手法の検証や建設工事を通じた建設技術の例示・留意点の抽出 など
- 幌延の地質環境条件を対象とした室内試験や解析的検討に関連する項目;
 - ・セメント系材料の緩衝材に対する影響に関わる評価モデルやデータベースの整備
 - ・第2段階で得られる地質環境データを用いた熱・水・応力・化学連成挙動解析コードによる数値実験の実施と適用事例の拡充

4) 処分事業・安全規制のための技術的基盤

- 処分孔堅置き方式を一例として、施設設計、人工バリア設計及び埋め戻し材設計相互の複雑な関係を考慮し、第三者にも分かりやすく、客観性をより向上させた一般性のある処分場全体設計フローを提示
- 幌延の地上からの調査段階により得られたデータを一つの事例として、上記の処分場全体設計フローを用いた試設計を行うことにより、設計手法の適用可能性を確認
- 緩衝材の設計に用いられる緩衝材の透水・膨潤・熱及び力学特性などに関する実験データをデータベース化し、Web公開 <http://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/>



3-2 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階) 研究成果報告書 分冊「地層処分研究開発」(その2) 安全評価手法の高度化—安全評価手法の適用性確認—

地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット (※研究開発統括ユニット)
前川 恵輔・澤田 淳・牧野 仁史*・笹本 広・吉川 英樹・宮原 要・油井 三和

1) 目標・実施概要

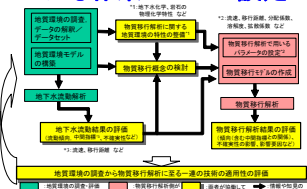
- 幌延深地層研究計画において段階的に得られる地質環境条件をひとつの適用性とした地上からの調査研究段階の情報に基づく物質移行解析事例の例示, モデルやパラメータの検討・設定手順の提示
- 物質移行解析上の感度の高い因子等の検討を通じた次段階の調査計画における留意事項の抽出

今回の検討と第2次取りまとめとの比較

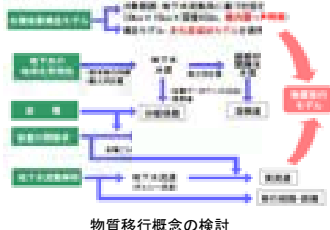
項目	第2次取りまとめ	今回の検討
対象	地層処分研究開発計画に基づく地質環境条件をひとつの適用性とした地上からの調査研究段階の情報に基づく物質移行解析事例の例示, モデルやパラメータの検討・設定手順の提示	地層処分研究開発計画に基づく地質環境条件をひとつの適用性とした地上からの調査研究段階の情報に基づく物質移行解析事例の例示, モデルやパラメータの検討・設定手順の提示
内容	地層処分研究開発計画に基づく地質環境条件をひとつの適用性とした地上からの調査研究段階の情報に基づく物質移行解析事例の例示, モデルやパラメータの検討・設定手順の提示	地層処分研究開発計画に基づく地質環境条件をひとつの適用性とした地上からの調査研究段階の情報に基づく物質移行解析事例の例示, モデルやパラメータの検討・設定手順の提示

2) 主な調査研究結果

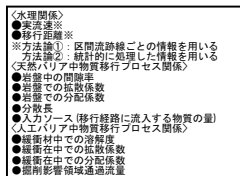
□ 地質環境の調査・解析から物質移行解析にいたる作業フローの設定



□ 物質移行概念・モデルの設定



物質移行解析における人工バリア中物質移行モデルと天然バリア中物質移行モデルの結合の考え方

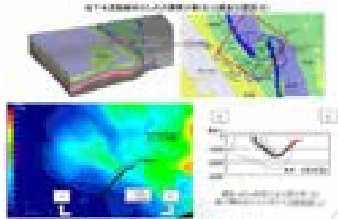


物質移行解析で用いたパラメータ

□ 物質移行経路情報の抽出

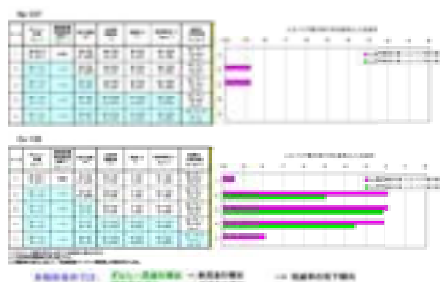


研究所設置地区およびその周辺の地下水流動系の概念と広域スケール領域(北東-南西方向で10km程度の範囲)



移行経路情報の抽出(地下水流動解析)

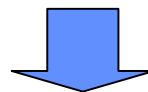
□ 物質移行解析の実施



物質移行解析結果の整理・分析

3) 得られた技術的知見

- ・本検討では、天然バリアによる移行率の低減の程度が大きくなることが示唆された。
- ・実流速や間隙率、分配係数などの条件の変化に対して低減の程度が敏感に変化する特徴があることに留意する必要がある。
- ・地質環境の調査・解析あるいは性能評価のモデル化やデータ取得における不確実性の適切な把握などを進める上で、移行率の低減の程度そのものと、条件変化に対する感度の両方を考慮することが必要。



- ・物質移行解析の結果、対象とした地層(稚内層、声間層)が高い遅延効果を有することが示唆されたが、透水係数分布等によると、割れ目帯が移行経路として機能している可能性が高いため、今後の調査等に基づいて水理・物質移行モデルの概念の再評価を行うことが重要。

- ・坑道の周辺等のコンクリートやグラウトなどの人工材料や、掘削影響領域を考慮した安全評価手法の適用性について検討することが、より現実的な評価体系を構築するうえで重要。

□ 第2段階以降における調査研究の方向性(今後の課題)

- (1) 地質環境の調査研究を通じたデータの取得・拡充や、そのデータに基づく地質環境に関するモデルの構築・更新、水理・物質移行に関する解析・評価の継続
- (2) 調査の結果得られた実際の地質環境のデータの不確実性や、それらのデータに基づく地質環境に関するモデルの不確実性が物質移行解析の結果に及ぼす影響等の定量的な把握・分析
- (3) 一連の評価に関する技術の体系化

4) 処分事業・安全規制のための技術的基盤

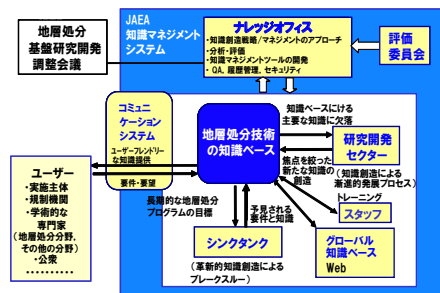
- 第2次取りまとめで示した安全評価の考え方や手法に基づき、幌延地域の地質環境条件を対象とした物質移行解析における具体的な作業フローを作成し、解析の試行を通じて、一連の評価手法の具体例を提示
- 地質環境の調査・解析から物質移行解析に至る方法論の例示とその過程の試行錯誤から得られるノウハウや知見の提示
- 物質移行解析を進める上で感度の高い因子や不確実性の幅が大きな因子などに関する検討を通じた、地質環境の調査やモデル化を進める上で留意すべき点の抽出



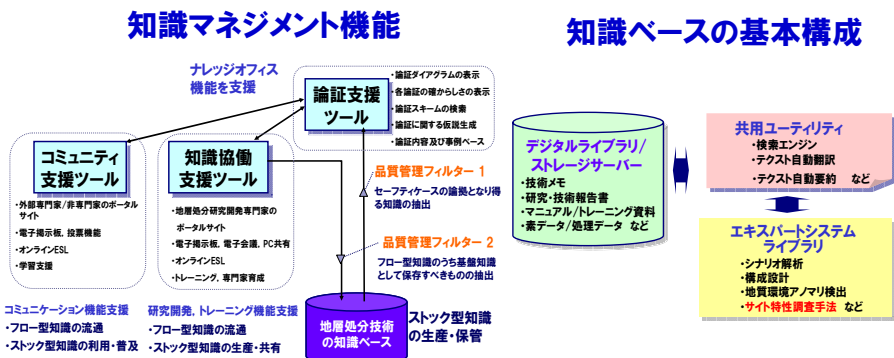
4 研究開発成果の知識化

地層処分研究開発部門 研究開発統括ユニット
梅木 博之・中野 勝志・牧野 仁史・大澤 英昭・宮本 陽一

1) 知識マネジメントシステムの基本概念

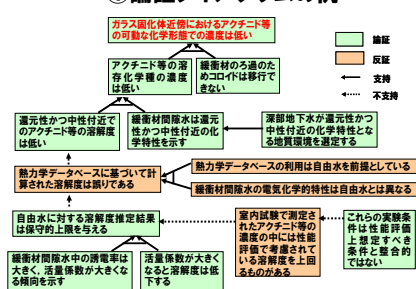


2) 基本設計の概要



マネジメント機能に必要な手法の適用性の確認を目的としたケーススタディ 例:「性能評価において用いる溶解度の設定」

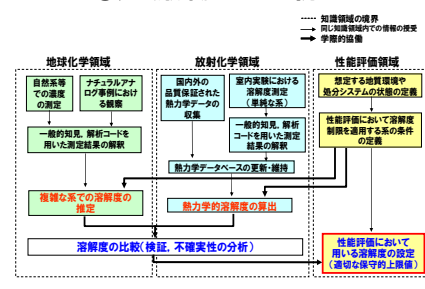
① 論証ダイアグラムの例



② オントロジーの例



③ 知識協働モデルの例



3) 深地層の研究施設計画第1段階で得られた経験・ノウハウの取り込み

事業や規制を進める上での拠り所となる技術基盤の構築

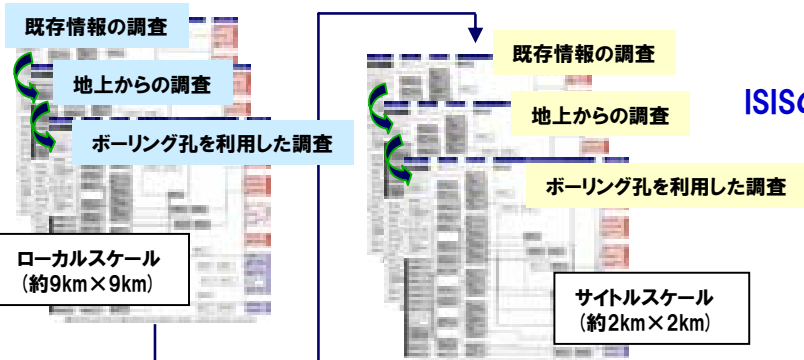
- ・処分場設計や安全評価へ適切に情報を提供しつつ段階的に進められるサイト特性調査における一連の調査評価技術の信頼性向上
- ・処分場計画における様々な条件や調査状況変化などに応じて計画を柔軟に立案・変更し適正化するための技術開発

「次世代型サイト特性調査情報統合システム」 (Information Synthesis and Interpretation System: ISIS)

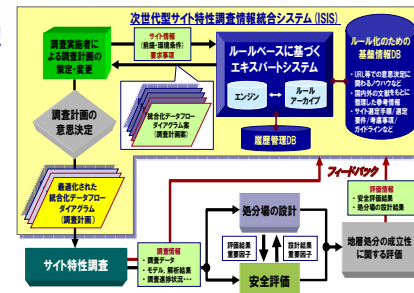
資源エネルギー庁 平成19年度地層処分技術調査等委託費(地層処分共通技術調査:地質環境総合評価技術高度化開発)

ノウハウや判断根拠
のルールベース化

統合化データフローを用いた調査・評価の最適化過程



ISISの全体像



4) 今後の予定

- セーフティケース構築や地層処分研究開発のさまざまな局面で行われる多様なタスクとこれに付随したドメイン知識に関するより精密な分析に基づく知識マネジメントシステムの詳細設計と知識ベースの整備
- 深地層の研究施設計画第1段階で得られた経験・ノウハウの抽出、判断支援のエキスパートシステム化を進め、次世代型サイト特性調査統合システムを構築するとともに第2段階以降における成果を反映した改良
- 知識マネジメントシステムの試作、試運用を通じた適用性、実効性の確認と必要に応じた改良



Japan Atomic Energy Agency

Geological Isolation Research and Development Directorate

<http://www.jaea.go.jp/04/tisou/toppage/top.html>