



JAEA-Review

2023-019

DOI:10.11484/jaea-review-2023-019

幌延深地層研究計画 令和5年度調査研究計画

Horonobe Underground Research Laboratory Project
Investigation Program for the 2023 Fiscal Year

(編) 中山 雅

(Ed.) Masashi NAKAYAMA

核燃料・バックエンド研究開発部門

幌延深地層研究センター

深地層研究部

Horonobe Underground Research Department

Horonobe Underground Research Center

Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

November 2023

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section,
JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: ird-support@jaea.go.jp

幌延深地層研究計画 令和 5 年度調査研究計画

日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門
幌延深地層研究センター 深地層研究部

(編) 中山 雅

(2023 年 9 月 11 日受理)

幌延深地層研究計画は、日本原子力研究開発機構が堆積岩を対象に北海道幌延町で実施しているプロジェクトである。

令和 5 年度は、「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画」で示した、「実際の地質環境における人工バリアの適用性確認」、「処分概念オプションの実証」、「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」について、引き続き調査研究を行う。

令和 5 年度に実施する主な調査研究は以下のとおりである。「実際の地質環境における人工バリアの適用性確認」では、国際共同研究 DECOVALEX-2023 において人工バリア性能確認試験を対象とした連成解析を行い、その結果について異なる解析コードによる解析結果との比較を通じて適用した解析コードの検証を行う。また、声間層に分布する割れ目を対象とした物質移行特性を評価するためのボーリング調査を継続する。「処分概念オプションの実証」では、搬送定置・回収技術の実証として、地下環境におけるコンクリートの劣化に関する試験および分析を継続する。また、閉鎖技術の実証として、350m 調査坑道に新たに掘削する試験坑道の周辺を対象とした物理探査を行い、掘削直後における掘削損傷領域の割れ目の連続性や分布などの初期状態を把握するとともに、これまでに開発した物理探査技術の適用性を確認する。「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」では、過年度に実施した水圧擾乱試験の結果の解析や、岩石の強度・応力状態と断層/割れ目の水理学的連結性との関係に関する解析を継続する。

地下施設の建設・維持管理では、掘削工事を再開し、350m 調査坑道の拡張を行うとともに、深度 500 m に向けた立坑の掘削を開始する。

国内外の資金や人材の活用に関する取り組みとして幌延国際共同プロジェクトを本格的に実施する。このプロジェクトでは、令和 2 年度以降の必須の課題のうち、「実際の地質環境における人工バリアの適用性確認」および「処分概念オプションの実証」に関わる 3 つのタスク（タスク A：物質移行試験、タスク B：処分技術の実証と体系化、タスク C：実規模の人工バリアシステム解体試験）を設定して調査研究を進める。

Horonobe Underground Research Laboratory Project
Investigation Program for the 2023 Fiscal Year

(Ed.) Masashi NAKAYAMA

Horonobe Underground Research Department, Horonobe Underground Research Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development
Japan Atomic Energy Agency
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received September 11, 2023)

The Horonobe Underground Research Laboratory (URL) Project is being pursued by the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) to enhance the reliability of relevant technologies for geological disposal of high-level radioactive waste through investigating the deep geological environment within the host sedimentary rocks at Horonobe Town in Hokkaido, north Japan.

In the fiscal year 2023, we continue R&D on “Study on near-field system performance in geological environment”, “Demonstration of repository design options”, and “Understanding of buffering behaviour of sedimentary rocks to natural perturbations”. These are identified as key R&D challenges to be tackled in the Horonobe underground research plan for the fiscal year 2020 onwards.

In the “Study on near-field system performance in geological environment”, we conduct the coupled analysis on the full-scale engineered barrier system performance experiment and test the coupled simulation code through comparison with different simulation codes in the international DECOVALEX-2023 collaboration project. Borehole investigations are also carried out for solute transport experiments in the Koetoi Formation. As for “Demonstration of repository design concept”, we carry out in situ experiments and data analysis on concrete deterioration under the subsurface conditions. Geophysical surveys are also carried out around an experimental tunnel to be newly excavated at the 350m gallery and characterise the initial conditions of the excavation damaged zone. For the “Understanding of buffering behaviour of sedimentary rocks to natural perturbations”, we analyse the results of the hydraulic disturbance tests conducted in previous years and understand the relationship between rock stress / stress state and fault / fracture hydraulic connectivity.

Concerning the construction and maintenance of the subsurface facilities, the 350 m gallery is extended and shafts are sunk to a depth of 500 m.

In addition, the Horonobe International Project begin in earnest with three tasks; Task A: Solute transport experiment with model testing, Task B: Systematic integration of repository technology options, and Task C: Full-scale engineered barrier system dismantling experiment.

Keywords: Horonobe URL Project, High-level Radioactive Waste, Geological Disposal Technology, Sedimentary Rock, Investigation Program for FY2023

目次

1 はじめに	1
2 令和2年度以降の幌延深地層研究計画に示した研究課題	3
3 令和4年度成果の概要および令和5年度計画の概要	6
3.1 令和4年度の成果の概要	6
3.2 令和5年度の主な業務内容	9
4 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認	15
4.1 人工バリア性能確認試験	15
4.2 物質移行試験	20
5 処分概念オプションの実証	23
5.1 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験	23
5.2 高温度（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験	30
6 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証	33
6.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化	33
6.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験	39
7 令和2年度以降の必須の課題への対応に必要なデータ取得	43
8 地下施設の建設・維持管理	45
9 環境調査	46
9.1 排水量および水質調査	46
9.2 研究所用地周辺の環境影響調査	46
10 安全確保の取り組み	47
11 開かれた研究	48
11.1 国内機関との研究協力	48
11.2 国外機関との研究協力	49
12 用語集	51
参考文献	58
付録	61

Contents

1	Introduction.....	1
2	Key R&D challenges identified in Horonobe Underground Research Plan for fiscal year 2020 onwards	3
3	Overview of fiscal year 2022 R&D results and fiscal year 2023 R&D plans.....	6
3.1	Overview of fiscal year 2022 R&D results	6
3.2	Overview of fiscal year 2023 R&D plans	9
4	Study on near-field system performance in geological environment	15
4.1	Full scale engineered barrier system performance experiment	15
4.2	Solute transport experiment with model testing.....	20
5	Demonstration of repository design options.....	23
5.1	Demonstration of engineering feasibility of repository technology	23
5.2	Evaluation of EBS behaviour over 100°C	30
6	Understanding of buffering behaviour of sedimentary rocks to natural perturbations.....	33
6.1	Evaluation of intrinsic buffering against endogenic and exogenic processes	33
6.2	Development of techniques for evaluating excavation damaged zone self-sealing behaviour after backfilling	39
7	Acquisition of data necessary for addressing key R&D challenges.....	43
8	Construction and management of the subsurface facilities	45
9	Environmental study.....	46
9.1	Monitoring drainage water and water property	46
9.2	Environmental impact study around the Horonobe Underground Research Center.....	46
10	Safety measures.....	47
11	Collaboration with other research organizations	48
11.1	Domestic collaborations	48
11.2	International collaborations	49
12	Glossary.....	51
	References	58
	Appendix.....	61

1 はじめに

国立研究開発法人^{*1}日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）幌延深地層研究センターでは、原子力発電に伴って発生する高レベル放射性廃棄物を安全に地層処分するための基盤的な研究開発として、平成13年3月より、北海道の幌延町において幌延深地層研究計画（堆積岩を対象とした深地層の研究施設計画）を進めています。この計画は、堆積岩を対象とした深地層の科学的な研究（地層科学研究）および地層処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化に向けた研究開発（地層処分研究開発）を目的として、「地上からの調査研究段階（第1段階）」、「坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階）」、「地下施設での調査研究段階（第3段階）」の3つの調査研究段階に分けて実施してきました。地層処分のために地下を調査する施設には、最終処分場として使用しない施設で技術を磨く地下研究施設（ジェネリックな地下研究施設）と最終処分候補地の適性を見定める地下研究施設（サイトスペシフィックな地下研究施設）の2つの種類があります。幌延深地層研究センターの地下施設はジェネリックな地下研究施設です。

幌延深地層研究センターでは、北海道および幌延町により受け入れられました、「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」で示した研究課題である、実際の地質環境における人工バリア^{*}の適用性確認、処分概念オプション^{*}の実証、地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力^{*}の検証について、令和2年度以降、第3期および第4期中長期目標期間^{*2}を目途に取り組むこととしました^{*3}。その上で、国内外の技術動向を踏まえて、地層処分の技術基盤の整備の完了が確認できれば、埋め戻しを行うことを具体的工程として示します。

なお、令和3年10月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、引き続き、「高レベル放射性廃棄物については、国が前面に立って最終処分に向けた取組を進める」との考え方が示され、「国、NUMO^{*4}、JAEA^{*5}等の関係機関が、全体を俯瞰して、総合的、計画的かつ効率的に技術開発を着実に進める。この際、幌延の深地層研究施設等における研究成果を十分に活用していく。」ことが示されました。これを踏まえて、文部科学省、経済産業省および原子力規制委員会により「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が達成すべき業務運営に関する目標（中長期目標）^{*6}」（以下、第4期中長期目標）が定められ、この第4期中長期目標を達成するために、「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の中長期目標を達成するための計画（中長期計画）（令和4年4月1日～令和11年3月31日）」（以下、第4期中長期計画）を策定しました。第4期中長期計画では、幌延深地層研究計画について、「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」で示した3

※ このマークがついた用語は、用語集に説明を掲載しています。

^{*1}：独立行政法人通則法の改正（平成27年4月1日施行）により新たに設定された分類の1つで、研究開発に係る業務を主要な業務として、中長期的（5～7年）な目標・計画に基づき行うことにより、我が国の科学技術の水準の向上を通じた国民経済の発展その他の公益に資するため研究開発の最大限の成果を確保することを目的とする法人に対する名称です。原子力機構は、平成27年4月1日に「独立行政法人日本原子力研究開発機構」から「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構」に名称変更しています。

^{*2}：第4期中長期目標の期間は、令和4年4月1日～令和11年3月31日の7年間で。

^{*3}：令和2年度以降の研究期間は9年間であり、その期間を通じて必要な成果を得て研究を終了できるように取り組むこととしています（https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/press/31/press_1206.html）。

^{*4}：原子力発電環境整備機構（Nuclear Waste Management Organization of Japan）の略称です。NUMOは、原子力発電所で使い終えた原子燃料を再処理する過程で発生する高レベル放射性廃棄物および関連して発生する長半減期の低レベル放射性廃棄物の地層処分を行う実施主体です。

^{*5}：原子力機構（Japan Atomic Energy Agency）の略称です。

^{*6}：原子力機構は、原子力基本法第2条に規定する基本方針に基づき、原子力に関する基礎的及び応用の研究並びに高レベル放射性廃棄物の処分等に関する技術の開発等を総合的、計画的かつ効率的に行うことを目的としています。中長期目標はこれを踏まえ、文部科学省、経済産業省および原子力規制委員会が、独立行政法人通則法第35条の4の規定に基づき定めた目標です。

つの研究課題を進めること、「研究の実施に当たっては、稚内層深部（深度 500 m）に坑道を展開して研究に取り組むとともに、さらなる国内外の連携を進め、研究開発成果の最大化を図る」こととしています。

「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画」では、これまでと同様に、放射性廃棄物を持ち込むことや使用することなく、また最終処分場とはしないことを約束した「幌延町における深地層の研究に関する協定書」の遵守を大前提に、安全を最優先として研究を進めます。研究開発を進めるにあたっては、当初の計画の研究対象の範囲内において、国内外の関係機関の資金や人材を活用することを検討します。

2 令和2年度以降の幌延深地層研究計画に示した研究課題

「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」では、必須の課題※のうち、引き続き研究開発が必要と考えられる以下の課題（令和2年度以降の必須の課題）に取り組むこととしています（図1、表1、付録）。

(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

令和元年度までの人工バリア性能確認試験では、実際の地下環境におけるヒーターの加熱過程のデータを取得しましたが、減熱過程※のデータが取得されていません。令和2年度以降は、注入する地下水の圧力や量を増加させ緩衝材に地下水を浸潤させた場合のデータを取得し、分析・評価します。その後、減熱時のデータを取得します。加えて、人工バリアの解体作業および緩衝材の飽和度※の確認を実施します。

また、令和元年度までの物質移行試験により、トレーサー※試験手法を確立することができました。ただし、これまでの研究結果から、幌延の堆積岩において、有機物や微生物が、放射性物質の岩盤への吸着を妨げ、閉じ込め効果を低下させる可能性が確認されており、令和2年度以降は、確立した試験手法を用いて掘削損傷領域※での物質移行に関するデータ取得を実施するとともに、有機物や微生物が放射性物質を取り込んで移動する影響を確認するためのトレーサー試験を実施します。

(2) 処分概念オプションの実証

令和元年度までの試験では、実際の環境下において、坑道の埋め戻し方法の違い（締固め、ブロック方式など）による埋め戻し材の基本特性（密度や均一性）を把握しましたが、緩衝材の施工方法や坑道閉鎖に関する様々なオプションの検討には至っていません。令和2年度以降は、人工バリア性能確認試験において、注入する地下水の圧力や量を増加させ、緩衝材に十分に水を浸潤させた状態を確保して施工方法（締固め、ブロック方式など）の違いによる緩衝材の品質の違いを把握するとともに、埋め戻し方法（プラグの有無など）・回収方法※による埋め戻し材の品質の違いを実証試験で明らかにします。さらに、人工バリアの品質を踏まえて、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための実証試験を行います。また、人工バリアシステムの安全裕度の検証に向けて、緩衝材が100℃超になった状態を想定した解析手法を開発します。

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

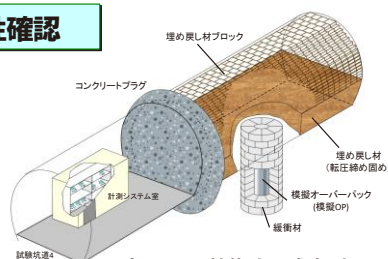
令和元年度までの検討では、まずは小規模な断層（幅数cm）に着目して試験を行い、断層への地震動の影響などを確認しました。これまでの研究開発で手法の妥当性が確認できたため、この手法を使って、処分場の設計・施工や安全評価とリンクした形で研究を進めることが可能となりました。令和2年度以降は、より大型の断層において、地震動や坑道掘削に伴う割れ目中の地下水の流れの変化に関して、堆積岩の緩衝能力（自己治癒能力）の作用に係る実証試験を実施します。さらに、地下水が動いていない環境を調査してモデル化する技術を実証するとともに、人工バリアのひび割れに対する自己治癒能力を解析する手法を開発します。

なお、令和 5 年度より、350m 調査坑道の拡張および 500m 調査坑道の整備に向けた立坑の掘削を行います。立坑は各深度へのアクセスならびに地下施設の換気のために 3 本が配置されています*7。拡張する 350m 調査坑道では、操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証に関する試験を行い、500m 調査坑道では、坑道スケール※～ピットスケール※での調査・設計・評価技術の体系化に関する試験を行う計画です。

①実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

- 人工バリア性能確認試験
- 物質移行試験

[概要] 実際の地質環境において、人工バリアや周辺岩盤中での特に減熱時における熱-水-応力-化学連成挙動や、物質移行現象などを計測・評価する技術の高度化を行う。



人工バリア性能確認試験の概要



人工バリア性能確認試験の解体調査のイメージ

②処分概念オプションの実証

- 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験
 - ・操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証
 - ・坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化
- 高温（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

[概要] 定置・回収技術や閉鎖技術も含めた、種々の処分概念オプションの工学的実現性を実証し、多様な地質環境条件に対して柔軟な処分場設計を行うことを支援する技術オプションを提供する。廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報を整理する。

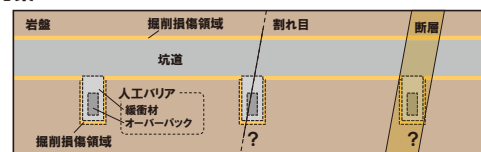


閉鎖技術オプションの整理

③地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

- 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化
 - ・地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握
 - ・地下水流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化
- 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

[概要] 地震・断層活動等の地殻変動に対する堆積岩の力学的・水理学的な緩衝能力を定量的に検証するとともに、化石海水の三次元分布に係る調査・評価手法を高度化し、堆積岩地域における立地選定や処分場の設計を、より科学的・合理的に行える技術と知見を整備する。



廃棄体定置決定や間隔設定の考え方の整理

図 1 令和 2 年度以降に取り組むべき研究課題
(令和 2 年度以降の必須の課題)

*7：地下施設で火災が発生した際に、換気立坑から煙や有毒ガスなどを排気し、東立坑もしくは西立坑からの避難を可能とするため、立坑を3本掘削するレイアウトを採用しています。これは、幌延の地下水にはメタンガスが含まれており、地下水から湧出するメタンガスの発火・爆発の可能性を考慮して、地上まで避難することを想定しているためです。

表 1 幌延深地層研究計画の令和 2 年度以降のスケジュール

		第3期		第4期中長期目標期間						
		R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認										
1.1 人工バリア性能確認試験		浸潤時・減熱時のデータ取得、連成モデルの適用性確認 国際プロジェクトにおける解析コード間の比較検証、改良・高度化								
1.2 物質移行試験		掘削影響領域での物質移行に関するデータ取得 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行試験、等								
2. 処分概念オプションの実証										
2.1 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験										
2.1.1 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証		搬送定置・回収技術、閉鎖技術の実証								
2.1.2 坑道スケール〜ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化								坑道スケール〜ピットスケールでの調査・設計・ 廃棄体設置の判断や間隔の決定に必要な情報の整理、等		
2.2 高温度（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験		100℃超の際にニアフィールドにおいて発生する現象の整理 国際プロジェクト情報の収集・整理、等								
3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証										
3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化										
3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握		数十cmの幅の断層を対象とした水圧擾乱試験 断層の活動性評価手法の整備、等								
3.1.2 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化		地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）の調査・評価技術の検証、等								
3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験		人工バリアの緩衝材や坑道埋め戻し材が掘削影響領域の力学的・水理学的な緩衝能力に与える影響を把握する解析手法の開発								
【施設計画】										
坑道掘削		掘削準備 350m調査坑道 換気立坑 東立坑 西立坑 500m調査坑道								
【維持管理】										

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題(2.1.2)に統合して実施する。

2.1.2を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

3 令和4年度成果の概要および令和5年度計画の概要

3.1 令和4年度の成果の概要

(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

人工バリア性能確認試験において、令和2年度から開始した減熱試験として、廃棄体の発熱が収まった状態を模擬した条件での試験を継続しました。緩衝材の温度分布は地下環境の温度で一定であること、緩衝材内側の飽和度は徐々に増加傾向にあることが確認できました。また、廃棄体の発熱が収まった状態における緩衝材中の温度・飽和度・応力分布の変化など、評価モデルを検証するためのデータが取得できました。熱－水理－力学－化学連成現象※に関する解析については、令和3年度に実施した温度勾配のある環境下での緩衝材中の水分移動特性に関する室内試験などを再現した解析を行い、これまでデータの不足していた条件での水分移動特性に係るパラメータを取得しました。国際共同研究 DECOVALEX※では、人工バリア性能確認試験を対象とした連成解析結果を比較検証するため、参加機関ごとに解析モデルの作成に着手しました。解体調査については、令和3年度に確認した個々のサンプリング手法を踏まえ、全体的な作業方針と施工手順、サンプリング対象と各種調査で主に取得する情報を決定しました。

物質移行試験では、過年度に実施した掘削損傷領域の割れ目を対象としたトレーサー試験結果の解釈を行いました。その結果、トレーサー試験中の水圧変化はトレーサーを瞬間的に投入するパルス試験および連続的に投入する定常試験への切り替え時に水みちの貯留性が変化したことなどが要因として考えられ、掘削損傷領域の物質移行の解析を行う上で考慮しなければならない事項が明らかになりました。また、有機物・微生物・コロイド※の影響を考慮した原位置物質移行試験に着手しました。また、350m 調査坑道において実施する原位置試験※に用いる地下水を対象に、有機物・微生物を含む地下水中の元素とコロイド粒子との相互作用を評価する試験を行いました。その結果、原位置試験結果と室内試験結果との比較検証を行う上で、有益な情報が取得できました。さらに、250m 調査坑道において声問層の割れ目を対象とした物質移行特性を評価するためのボーリング調査に着手し、割れ目の空間分布の評価に関わるデータを取得しました。

(2) 処分概念オプションの実証

搬送定置・回収技術の実証として、回収可能性※が維持される期間における吹付けコンクリートの経年劣化の把握を目的にコンクリート試験体の暴露試験※を継続し、約1年9か月の暴露期間における大気条件下と湿潤条件下における中性化※の程度の違いなどを把握しました。その結果、大気条件下の試験体では、令和3年度の結果に比べて中性化が進んでいることが確認できました。また、坑道開放条件下における長期変化を評価するために、令和3年度までの解析に基づいて、坑道埋め戻し後に埋め戻し材が再飽和する過程の解析を実施しました。その結果、坑道の周辺岩盤では埋め戻し後の数十年以内にほぼ飽和状態に達することが分かりました。

閉鎖技術の実証として、埋め戻し材の長期的な性能に関わる現象について、力学的な作用（地震動など）が埋め戻し材の変質に与える影響を評価する解析を行いました。その結果、坑道に使用されるコンクリートの溶出成分に起因した鉱物の沈殿などが埋め戻し材の変質を抑制する方向に作用することが示唆されました。埋め戻し材の設計評価に必要な緩衝材膨出※抑制機能の把握については、緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた室内試験を継続し、緩衝材と埋め戻し材の力

学的な相互作用を考慮した膨潤*変形挙動の評価に必要なデータを整理しました。また、閉鎖後に水みちとなることが想定される、掘削損傷領域の連続性を遮断するための施工技術の実証として、令和 3 年度に坑道の切欠き部に吹付けたベントナイト*のサンプリング調査を実施し、吹付けベントナイトの乾燥密度*などの施工品質を確認しました。掘削損傷領域の調査技術の高度化として、弾性波*トモグラフィ*の調査結果に対して、新たに開発した吹付けコンクリートの影響を考慮した解析手法を適用することにより、既存の解析では検出が困難であった掘削損傷領域を可視化することができました。さらに、ボーリング孔の閉塞技術の実証について、250m 調査坑道から掘削したボーリング孔を閉塞する原位置試験を実施し、ボーリング孔内にベントナイトブロックを設置できることを確認しました。

人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系*の構築に向けて、緩衝材ブロックと岩盤の間の隙間にケイ砂を充填する施工方法における緩衝材の流出挙動を確認するための試験を行い、緩衝材の流出量などを計測しました。また、緩衝材の流出量が、要求される品質を確保できる範囲となるかを推定する方法について、室内試験に基づいて流出量の評価モデルを検討し、緩衝材ブロックと岩盤の隙間からの緩衝材の流出量の評価モデルを構築するための基盤情報を整備することができました。

高温（100℃以上）等の限界条件での人工バリア性能確認試験として、令和 3 年度の調査で示唆された、緩衝材の温度が 100℃を超えた場合に生じ得る現象のうち、主としてひび割れの発生が緩衝材の特性に与える影響を確認するための原位置試験の概念について検討を行い、試験計画を立案しました。また、スイスで実施されている緩衝材の最高温度が 100℃を超えた状態を模擬する原位置試験（HotBENT*プロジェクト）について、模擬廃棄体（ヒーター）の加熱に伴う計測結果などに関する情報の入手を継続しました。

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

地殻変動が地層の透水性*に与える影響を把握することを目的に、令和 3 年度に再検証したダクティリティインデックス（以下、DI）*モデルと、令和 2 年度に実施した水圧擾乱試験*の結果との比較検証を行いました。その結果、DI の経験式*⁽¹⁾と水圧擾乱試験中の断層の透水性の変化が整合することを確認することができました。また、DI を用いた透水性評価手法の信頼性向上などを目的として、これまでに得られた地下施設建設時における地下施設周辺のボーリング孔での水圧観測データから、DI と断層/割れ目の水理学的連結性*の関係を検討しました。その結果、稚内層浅部（DI が 2 未満の領域）から深部（DI が 2 以上の領域）にかけて地層の数 m ～数十 m 以上のスケールで見た場合の透水性が断層/割れ目の透水性を反映する値から割れ目の無い健岩部の透水性を反映する値へと徐々に変化する様子を数値解析により再現することができました⁽²⁾。これにより、令和 2 年度の概念モデル、すなわち DI が 2 未満の領域（断層/割れ目の水理学的連結性が高いと推定される領域）⁽³⁾と DI が 2 以上の領域（断層/割れ目の水理学的連結性が低いと推定される領域）⁽³⁾の間に断層/割れ目の水理学的連結性が遷移的に変化する領域が存在するモデルの妥当性が確認できました。

地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水*領域）を調査・評価する技術の高度化においては、令和 3 年度に引き続き、令和 2 年度の調査により推定した化石海水の三次元分布の推定結果およびその手法の妥当性を確認するためのボーリング調査を継続しました。その結果、化石海水かど

うかを判断する指標としている塩化物イオン濃度と酸素・水素同位体比^{*}の深度分布の特徴から、当初の計画の通り、化石海水の出現深度の変化が大きいという情報を得ることができ、推定結果が妥当であることが確認できました。以上のことから、令和 2 年度に適用した電磁探査^{*}が、化石海水領域の三次元分布の把握に有効な調査技術であることを実際のデータを基に示すことができました。

地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動の検討として、坑道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤が掘削損傷領域の透水性に与える影響の評価手法の構築を目的に、掘削損傷領域の割れ目を対象とした既往の段階注水試験（段階的に注水圧を増加させる注水試験）のデータ解析を行いました。その結果、掘削損傷領域の割れ目の DI を変化させた時の透水性の変化が、令和 3 年度に再検証した DI の経験式⁽¹⁾と整合的であることが確認できました⁽⁴⁾。これにより、坑道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤による掘削損傷領域の透水性の変化は DI の経験式により推定可能とした既報のモデル⁽⁵⁾の妥当性が確認できました。

(4) 国内外の資金や人材の活用

国内機関との研究協力として、大学や研究機関との共同研究を実施するとともに、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業などを活用して研究を推進しました。国外機関との研究協力として、令和 3 年度に引き続き、人工バリア性能確認試験をタスクの 1 つとする国際共同研究 DECOVALEX などに参加し、情報共有を図りました。また、令和 2 年度以降の必須の課題のうち、実際の地質環境における人工バリアの適用性確認および処分概念オプションの実証に関わるテーマを対象とした新たな国際プロジェクトとして、OECD/NEA^{*8}の協力のもと、幌延国際共同プロジェクト（Horonobe International Project : HIP）^{*9}を立ち上げるべく、複数回の準備会合を開催しました。準備会合では、共同研究の内容や実施分担などについて議論を行い、令和 4 年 10 月にプロジェクトの協定書の内容について基本合意がなされました^{*10}。その後、令和 5 年 2 月 8 日に協定が発効し、プロジェクトを開始しました。なお、令和 5 年 2 月末日現在、原子力機構が把握している参加機関は、英国地質調査所（英国）^{*11}、原子力テクノロジー国営会社（ルーマニア）^{*12}および工業技術研究院（台湾）^{*13}です。

^{*8}：OECD/NEA（経済協力開発機構/原子力機関）は、安全かつ環境的にも受け入れられる経済的なエネルギー資源としての原子力エネルギーの発展に貢献することを目的として、原子力政策、技術に関する情報・意見交換、行政上・規制上の問題の検討、各国法の調査および経済的側面の研究などを実施しています。

^{*9}：幌延国際共同プロジェクト（HIP）は、アジア地域の地層処分に関わる国際研究開発拠点として、幌延深地層研究センターの地下施設を利用した研究開発を国内外の機関で協力しながら推進し、我が国のみならず参加国における先進的な安全評価技術や工学技術に関わる研究開発の成果を最大化することを目的としています。

(<https://www.jaea.go.jp/english/04/horonobe/IJP/HIP/index.html>)

^{*10}：協定書の内容について基本合意をした機関は、英国地質調査所（英国）、オーストラリア連邦科学産業研究機構（オーストラリア）、韓国原子力研究所（韓国）、原子力環境整備促進・資金管理センター（日本）、原子力発電環境整備機構（日本）、工業技術研究院（台湾）、電力中央研究所（日本）、連邦放射性廃棄物機関（ドイツ）、国営放射性廃棄物会社（ブルガリア）、原子力研究所（ルーマニア）です。

^{*11}：英国地質調査所：BGS（British Geological Survey）は、英国政府の研究機関で、公共の利益に焦点を当てつつ、地球上で生じる様々なプロセスなどに関する地球科学的研究に加え、客観的な地球科学的データや情報の社会への提供などの活動を行っています。

^{*12}：原子力テクノロジー国営会社：RATEN（Regia Autonomă Tehnologii pentru Energia Nucleară）は、ルーマニアの原子力エネルギー分野の研究開発の調整および原子力エネルギー計画の科学的・技術的支援を行う国有企業の研究機関で、放射性廃棄物管理を含む原子力分野の幅広い研究開発を行っています。なお、準備会合には原子力研究所（RATEN ICN）が参加していましたが、協定書にはRATENが署名しました。

^{*13}：工業技術研究院：ITRI（Industrial Technology Research Institute）は、台湾における応用研究と技術サービスを行う非営利の研究開発機関です。日本の様々な企業、大学と複数の国際共同研究などを行っています。

以上のように、令和 4 年度は計画していた調査研究を着実に進めて、予定していた成果を得ることができました。詳細については令和 4 年度の調査研究成果報告書に取りまとめます。

3.2 令和 5 年度の主な業務内容

「実際の地質環境における人工バリアの適用性確認」として、国際共同研究 DECOVALEX にて人工バリア性能確認試験を対象とした連成解析を行い、異なる解析コード^{*}との比較検証を行います。また、物質移行試験について、令和 4 年度に着手した声問層の割れ目を対象としたボーリング調査を継続し、調査エリア周辺の割れ目の水理学的連結性や水理特性データを取得します。有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行試験の結果を踏まえ、350m 調査坑道において物質移行試験を実施するとともに、掘削損傷領域に分布する割れ目の物質の移行挙動のモデル化/解析手法の検討を継続します。

「処分概念オプションの実証」については、搬送定置・回収技術の実証として、コンクリート試験体の暴露試験ならびに試験体の分析を継続して、より長期の挙動を確認するとともに、地下施設に施工されている吹付けコンクリートの劣化挙動などに関しても調査を進めます。閉鎖技術の実証として、長期的な性能に及ぼし得る条件を考慮した上で、埋め戻し材の設計および施工方法を検討するための数値解析などに着手する予定です。また、埋め戻し材が緩衝材の膨出を抑制する機能について、これまでの室内試験結果を整理し、膨潤変形挙動を理解するための検討を行います。掘削損傷領域の連続性を遮断するための施工技術の実証については、実際に施工可能な止水プラグの形状や材料配合などを検討する数値解析や室内試験に着手します。掘削損傷領域の調査技術の高度化について、350m 調査坑道に新たに掘削する試験坑道周辺を対象とした物理探査を行い、掘削直後の掘削損傷領域の割れ目の連続性や分布などの初期状態を評価するとともに、これまでに開発した物理探査技術の適用性を確認します。さらに、坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化について、令和 6 年度からの実施に先立ち、断層、割れ目からの湧水や掘削損傷領域の発達に関する既存情報の収集・整理を行い、500m 調査坑道で想定される状況などについて検討します。高温（100℃以上）等の限界条件での人工バリア性能確認試験では、令和 4 年度に策定した試験計画に基づき、高温（100℃以上）が緩衝材の特性に与える影響を検証するための原位置試験を開始します。

「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」については、水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備や、DI を用いた透水性評価手法の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備を目的に、過年度に実施した水圧擾乱試験の結果の解析や、DI と断層/割れ目の水理学的連結性に関する解析を令和 4 年度までの検討結果を踏まえて継続します。地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）を調査・評価する技術について、これまでに得られた成果の論文投稿や研究開発報告書類の整備に取り組みます。また、令和 4 年度に引き続き、産業技術総合研究所^{*14}との共同研究として実施する海上物理探査の知見を参照しながら、海陸連続三次元地質環境モデルの検討を継続します。

また、令和 2 年度以降の必須の課題への対応に必要なデータ取得を継続します。

^{*14}：特定国立研究開発法人産業技術総合研究所は、産業技術の広い分野における様々な技術開発を総合的に行っている研究組織です。

地下施設の建設・維持管理においては、掘削工事を再開し、350m 調査坑道の拡張を行うとともに、深度 500 m に向けた立坑の掘削を開始します。掘削にあたっては、可燃性ガスの存在を考慮し、防爆仕様^{*}の機器の採用や、ガス濃度の監視などにより防爆対策を行います。また、坑道掘削により発生した掘削土（ズリ）は掘削土（ズリ）置場に搬出し、有害物質の含有量などを定期的に確認します。

地下施設からの排水および掘削土（ズリ）置場の浸出水は、これまでと同様に、排水処理設備において適切に処理した上で天塩川に放流します。

環境調査においては、坑道内および掘削土（ズリ）置場で発生する排水の水質調査、天塩川の水質調査ならびに研究所用地周辺における水質・魚類に関する調査を継続します。

安全確保の取り組みにおいては、作業者などに対する安全教育や訓練の実施、定期的な安全パトロールなどの活動を継続します。

なお、幌延深地層研究計画で実施する地下深部の地質環境を対象とした研究は、地球科学の幅広い分野にわたり、学術研究の発展にも寄与することから、国内外の関連する研究機関の専門家の参加を得ながら進めていきます。また、国内外の資金や人材を活用することについて、国際共同研究 DECOVALEX や環太平洋地域における地下研究施設を活用した国際協力を継続し、研究を進めるとともに、幌延国際共同プロジェクト（HIP）を開始します。HIP では、令和 2 年度以降の必須の課題のうち、実際の地質環境における人工バリアの適用性確認および処分概念オプションの実証に関わる 3 つのタスクを設定して研究を進めます。具体的にはタスク A（物質移行試験）では、水理地質構造に関する情報を取得し、タスク B（処分技術の実証と体系化）では、既存情報の整理を行い、500m 調査坑道において想定される状況について検討するとともに、一連の操業技術の実証に向けた関連情報の整理や要素技術の試験を行います。また、タスク C（実規模の人工バリアシステム解体試験）では、これまでの取得情報をもとに、人工バリア性能確認試験の解体調査の詳細化に向けた検討を行います。

令和 5 年度に地下施設、研究所用地および周辺地域（幌延町内）で行う主な業務の実施内容を図 2、表 2 に示します。また、表 2 に示した調査に関する地上からのボーリング孔の位置および観測装置の設置場所を図 3 に、研究所用地における主な施設と観測装置の配置を図 4 に、250m および 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所を図 5 および図 6 に示します。

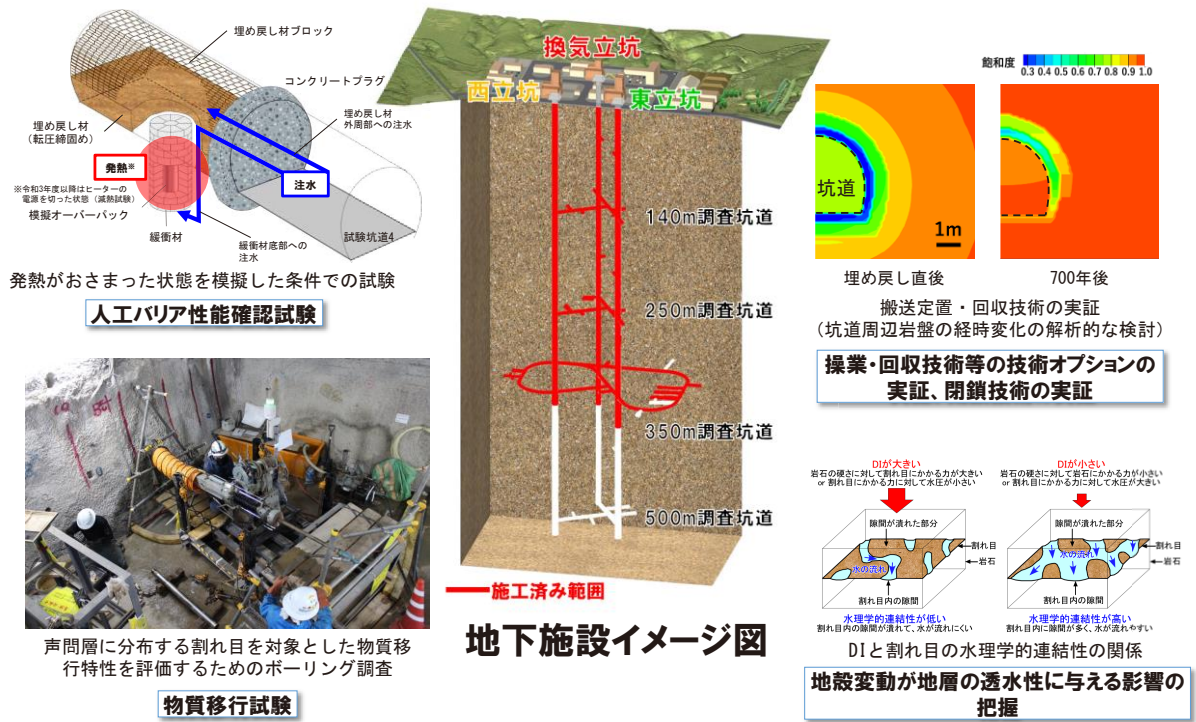


図 2 令和5年度の主な調査研究

表 2 令和 5 年度の主な業務の実施内容

実施項目		実施内容	実施場所
令和 2 年度以降の必須の課題	実際の地質環境における人工バリアの適用性確認	人工バリア性能確認試験	研究所用地、地下施設など
		物質移行試験	研究所用地、地下施設など
		人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験	研究所用地、地下施設など
	処分概念オプシヨンの実証	坑道スケール〜ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化	—
		高温度（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験	研究所用地、地下施設など
	地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証	水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化	研究所用地および周辺、地下施設、HDB-1～11孔、浜里地区など
	令和2年度以降の必須の課題へ対応するためのデータ取得	地質構造に関する調査、分析、岩盤の水理に関するデータ取得・モニタリング、分析、解析、地下水の地球化学に関する分析、岩盤力学に関するデータ取得、解析、地震観測、および計測手法の妥当性評価と必要に応じた調査技術・機器の改良など	研究所用地、地下施設、HDB-1～11孔、上幌延地区、浜里地区など
地下施設の管理		350m調査坑道の拡張、立坑掘削、地下施設の設備運転や保守点検などの維持管理、排水処理設備の運転	研究所用地、地下施設など
環境調査		地下施設からの排水などの水質調査、水質・魚類に関する調査	研究所用地、天塩川、清水川など

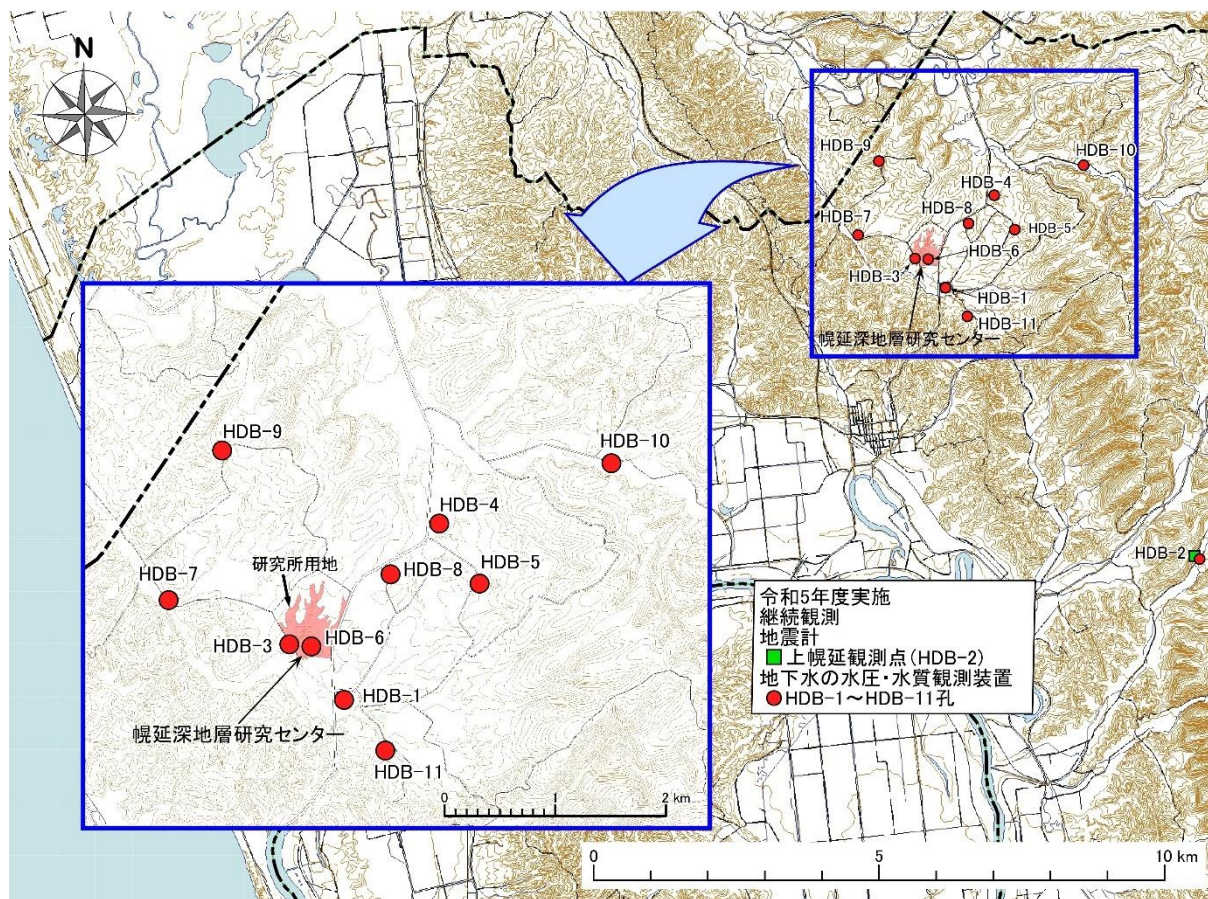


図 3 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所
国土地理院の基盤地図情報（基本項目）を加工して作成



図 4 研究所用地における主な施設と観測装置の配置

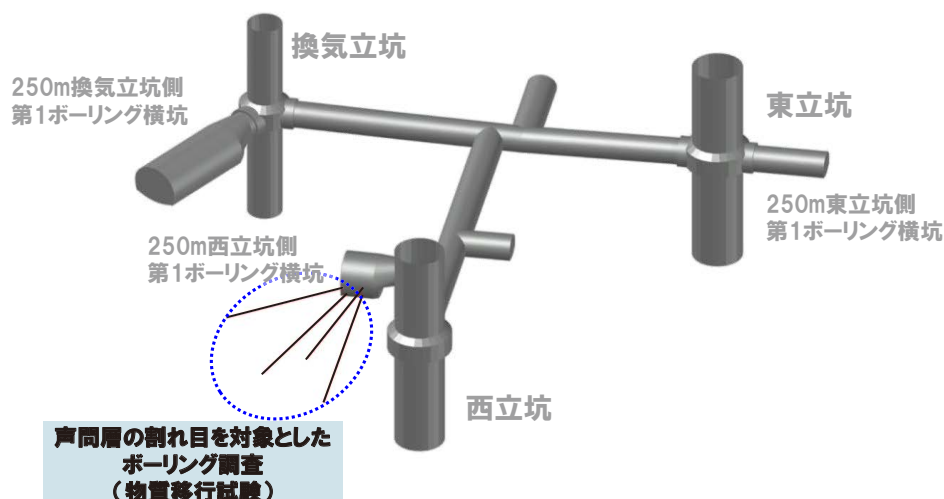


図 5 250m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

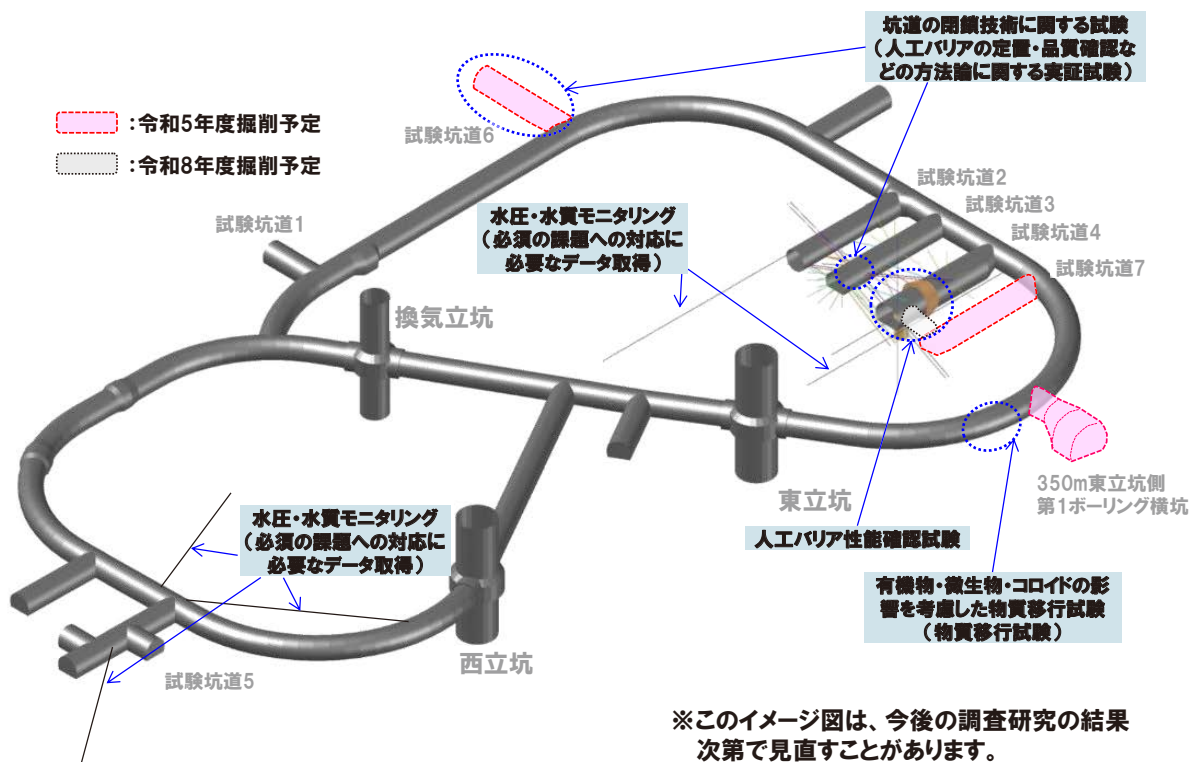


図 6 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

4 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

4.1 人工バリア性能確認試験

令和 2 年度以降は、ガラス固化体設置直後の廃棄体の発熱過程に加えて、減熱過程を模擬した原位置試験データや解体調査により得られるより詳細なデータに基づく熱－水理－力学－化学連成現象の評価モデルの高度化が課題となります。そのため、人工バリア性能確認試験で設置しているヒーターの温度を下げた試験（減熱過程を模擬した原位置試験）を行い、熱－水理－力学－化学連成現象に係るデータを取得します。また、減熱試験終了後は解体調査により、人工バリア、埋め戻し材、コンクリート、周辺岩盤やそれらの境界面のサンプリングや分析を行います。人工バリア性能確認試験の解体調査については、適用する施工方法の検証を行うために事前に試験施工を行います。設置したセンサーや解体調査により得られるデータを基に、熱－水理－力学－化学連成解析を行い、評価モデルの高度化や適用性の確認を行います。このような人工バリア周辺で起こる現象の理解は、地層処分後の数万年以上の間の安全評価における初期状態の把握やオーバーパック（以下、OP）の寿命を評価する際の人工バリア周辺の環境条件の設定に役立ちます。

令和 4 年度は、人工バリア性能確認試験（図 7）について、廃棄体の発熱がおさまった状態を模擬した条件（ヒーターの電源を切ることにより再現）での試験を継続しました。注水流量については、埋め戻し材外周部からは約 300 mL/min、緩衝材底部からは約 400 mL/min で注水しています。設置してあるセンサーにより、緩衝材中の温度分布は地下環境下の温度（約 23℃）で一定であり、加熱試験時には低下していた緩衝材内側の飽和度が増加傾向にあることが確認できました（図 8）。これは、ヒーターの電源を切ったことにより、緩衝材中の温度差によって生じる緩衝材内側から外側方向への水分移動が解消されるためです。それに伴い中央部の水分が内側へ移動し、内側の飽和度が増加、中央部の飽和度が低下した可能性があります。これらの結果は、令和元年度に実施した予察解析結果と整合しています。令和 4 年度までのデータ取得により、ヒーターの温度低下に伴う緩衝材中の温度・飽和度・応力分布の変化など、評価モデルを検証するためのデータが取得できました。

熱－水理－力学－化学連成現象に関する解析については、令和 3 年度に実施した温度勾配のある環境下での緩衝材中の水分移動特性に関する室内試験（図 9）と緩衝材中の空気の移動やそれに伴う空気圧の上昇に着目した解析を実施しました。一例として、図 10 に緩衝材中の水分移動特性に関する室内試験結果を再現した解析結果を示します。この解析では、図 10 のように試験結果を再現する解析を実施することで、これまで未取得であった緩衝材の乾燥密度を 1.8 Mg/m³（人工バリア性能確認試験の緩衝材の初期乾燥密度）としたときの温度勾配のある環境下における緩衝材中の水分移動特性に係るパラメータ（温度勾配水分拡散係数）を決定することができます。国際共同研究 DECOVALEX では、人工バリア性能確認試験を対象とした連成解析結果を比較検証するステップに進んでおり、参加機関ごとに解析モデルの作成に着手しました。

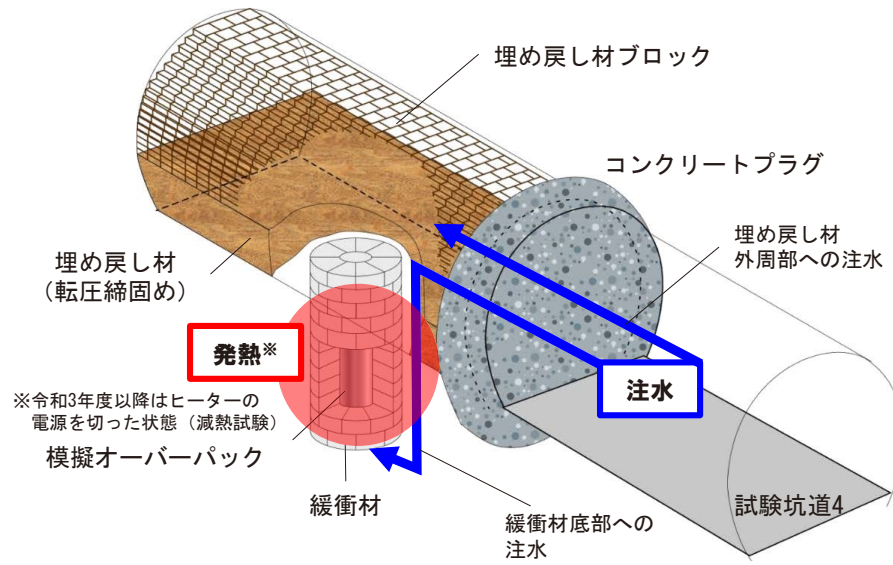


図 7 人工バリア性能確認試験の概念図

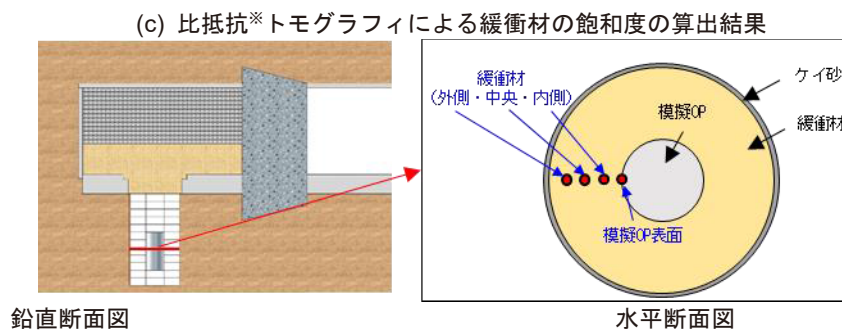
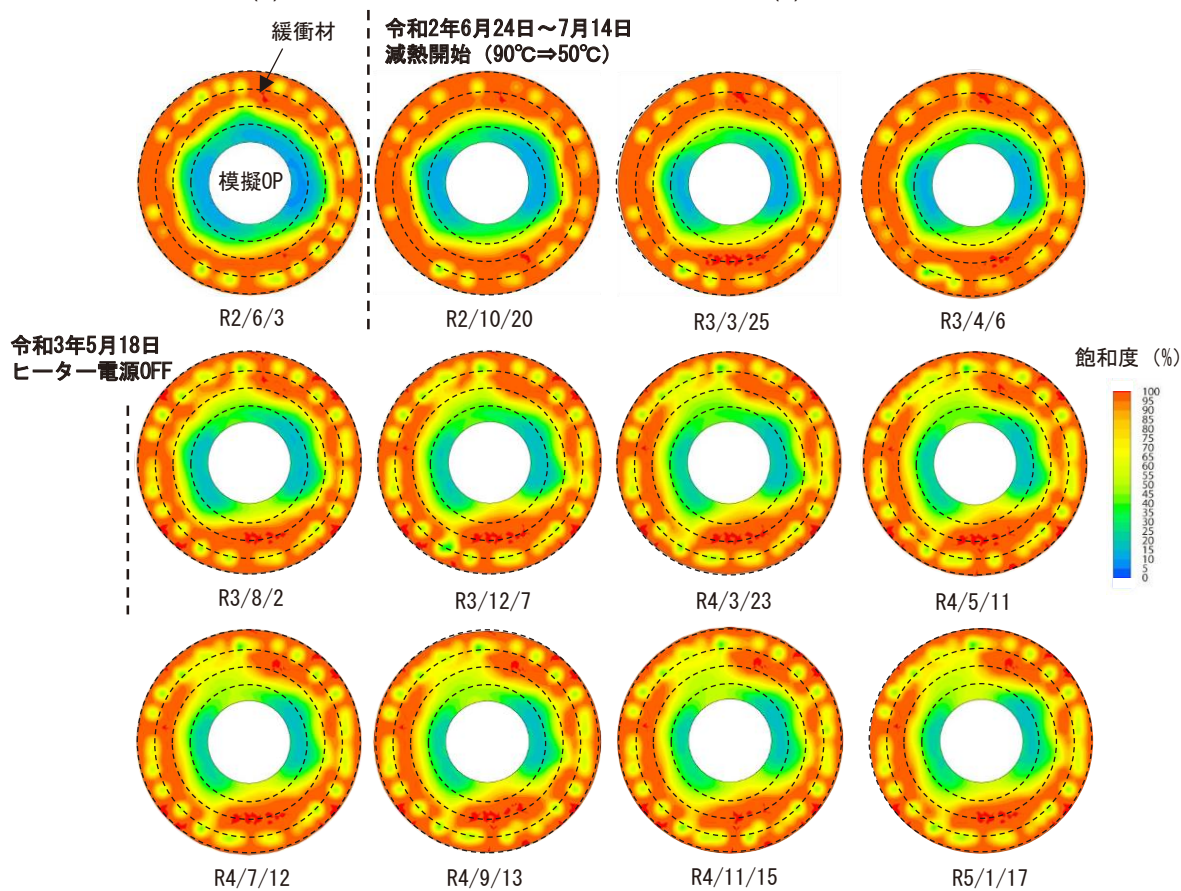
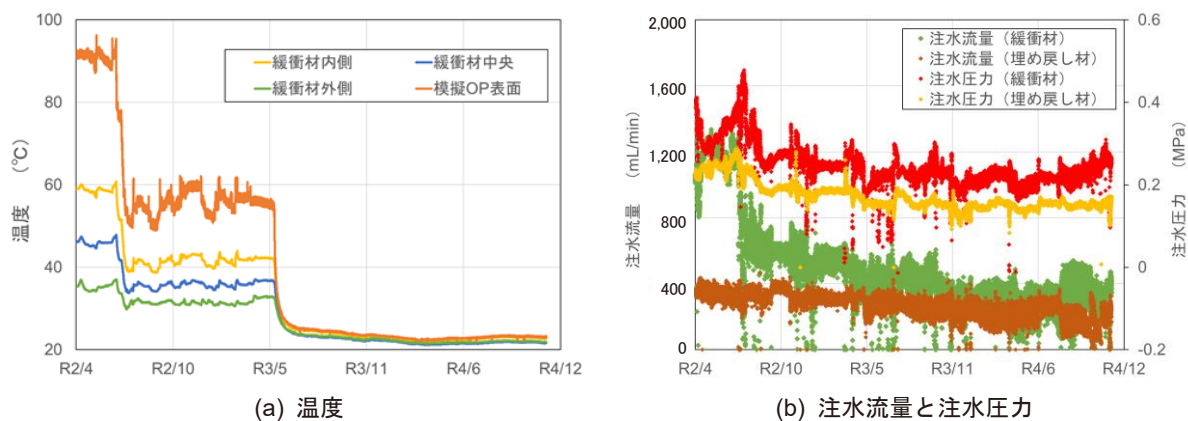


図 8 人工バリア性能確認試験の計測データ

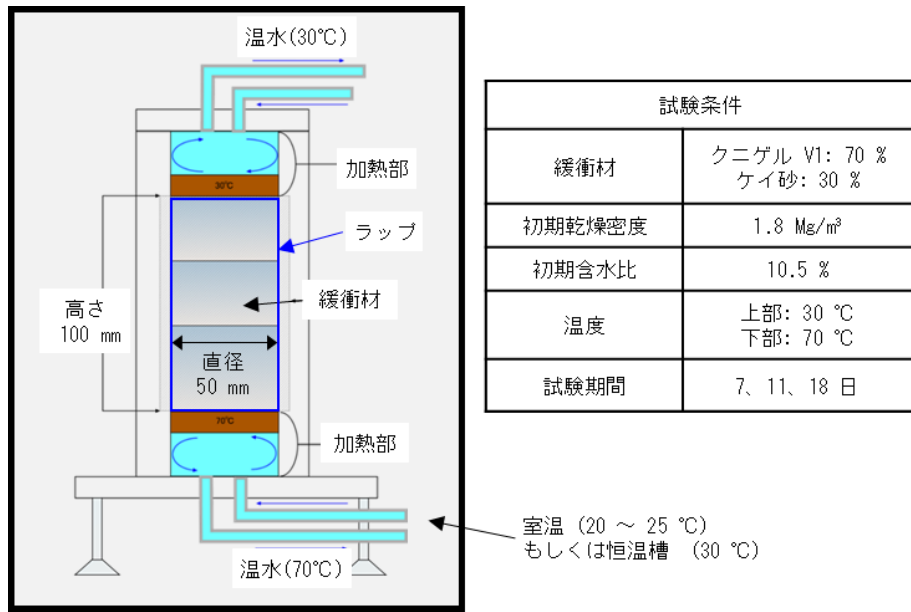


図 9 温度勾配のある環境下での緩衝材中の水分移動特性に関する試験の概念図と試験条件

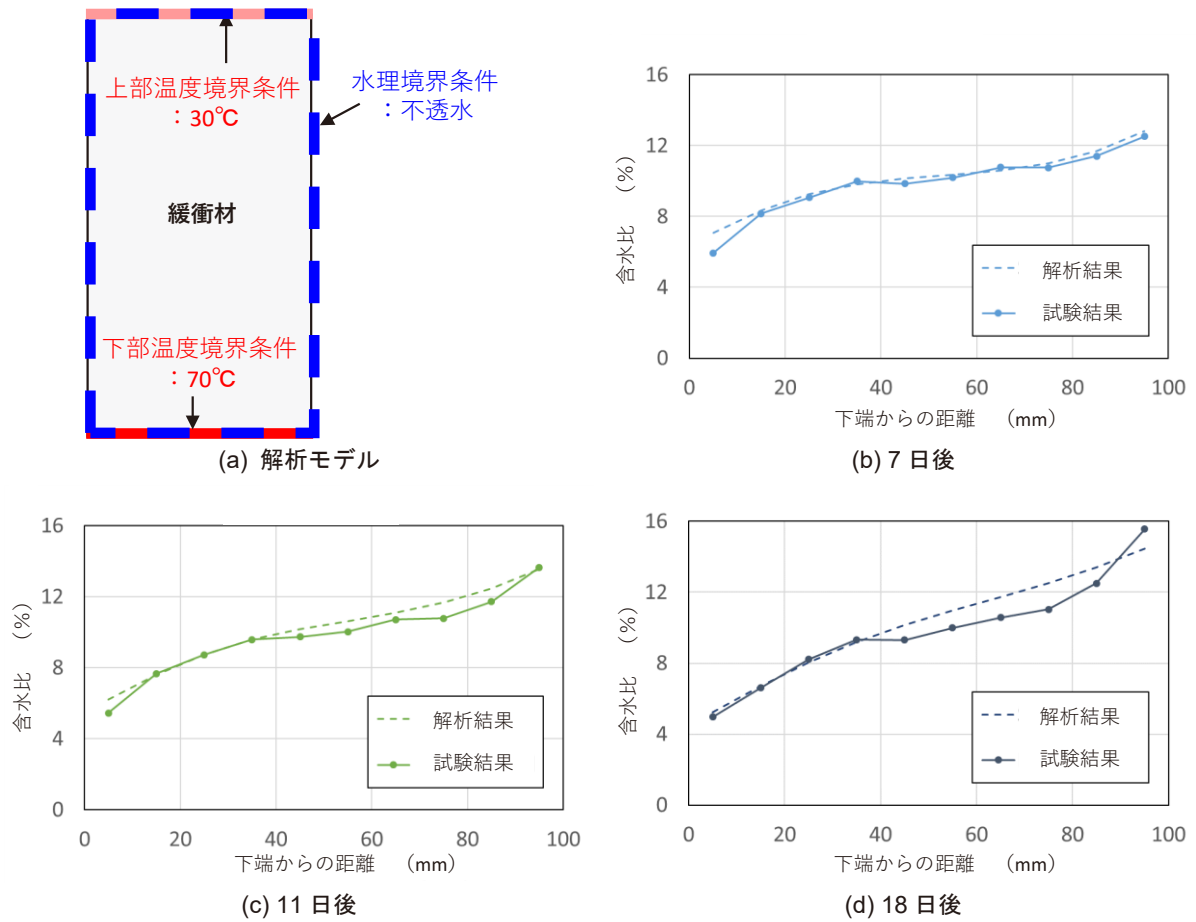


図 10 試験結果と解析結果の比較

人工バリア性能確認試験の解体調査計画について、試験施工で確認した個々のサンプリング手法を踏まえ全体的な作業方針と施工手順、実際のサンプリング対象と各種調査で主に取得する情報を整理しました。解体調査における作業方針および施工手順は、以下のとおりです。

- ・ 人工バリア性能確認試験を実施している試験坑道 4 の隣に、試験坑道 7 を掘削する
- ・ 試験坑道 7 から試験坑道 4（埋め戻し部）に向かって、解体作業用の連絡坑道（試験坑道 4・7 連絡坑道）を掘削する
- ・ 埋め戻し部のサンプリング、解体作業を行う
- ・ 試験孔部（緩衝材、模擬 OP など）のサンプリング、解体作業を行う

実際のサンプリング対象と各種調査で主に取得する情報を表 3 に示します。その際、令和 3 年度に検証したサンプリング手法を適用します。

表 3 解体調査で予定している主な取得情報

サンプリング対象	主な取得情報
模擬 OP	最大腐食深さ、平均腐食深さ
	腐食生成物
	腐食状況
	模擬 OP の位置、傾き (設置時からのずれ)
緩衝材 埋め戻し材	外観
	水分量、乾燥密度
	間隙水組成
	鉱物組成
	熱伝導率、熱容量
	微生物相互作用
埋め戻し材 転圧締固め部とブロックの接触面	接触面の状態
埋め戻し材と吹付けコンクリートの接触面	施工時の隙間の充填状況 埋め戻し材とコンクリート相互作用
緩衝材と埋め戻し材の接触面	緩衝材の膨出量
土留め壁と埋め戻し材の接触面	土留め壁の腐食状況
コンクリートプラグ	コンクリートの強度
コンクリートプラグ-岩盤接触面	密着状況 コンクリートと岩盤の相互作用

令和 5 年度は、国際共同研究 DECOVALEX を通して、人工バリア性能確認試験を対象とした連成解析を行い、異なる解析コードとの比較検証を行います。解析に使用する連成モデルは、参加機関ごとに異なり、必要となる解析パラメータもそれに応じて異なります。そこで、各機関が採用する熱－水理－力学連成モデルや室内試験をもとに各機関が推定した解析パラメータの違いが、緩衝材中の温度、飽和度、応力分布などの解析結果にどのような影響を及ぼすのかを確認します。さらに、人工バリア性能確認試験で取得したデータと比較することにより、人工バリア周辺での現象を再現するためには、どのような解析モデルが効果的かなどを検証します。なお、廃

棄体の発熱が収まった状態を模擬した条件での人工バリア性能確認試験のデータについては、データ取得を自動計測機器により継続します。

4.2 物質移行試験

令和 2 年度以降は、掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立、有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行モデル化手法の高度化、割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立が課題となります。そのため、これまでに確立した物質移行特性評価手法の適用/高度化を図りつつ、掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得を行うとともに、有機物・微生物・コロイドが物質移行に与える影響を評価します。また、掘削損傷領域の物質移行特性に加え、有機物・微生物・コロイドの物質移行特性に与える影響を考慮した上で、割れ目を有する堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むブロックスケール（数 m～100 m 規模）（図 11）における遅延性能評価手法の整備を行います。これらの成果は、処分事業で堆積岩を対象とする場合に、核種移行モデルを構築する際の基盤情報となるものです。

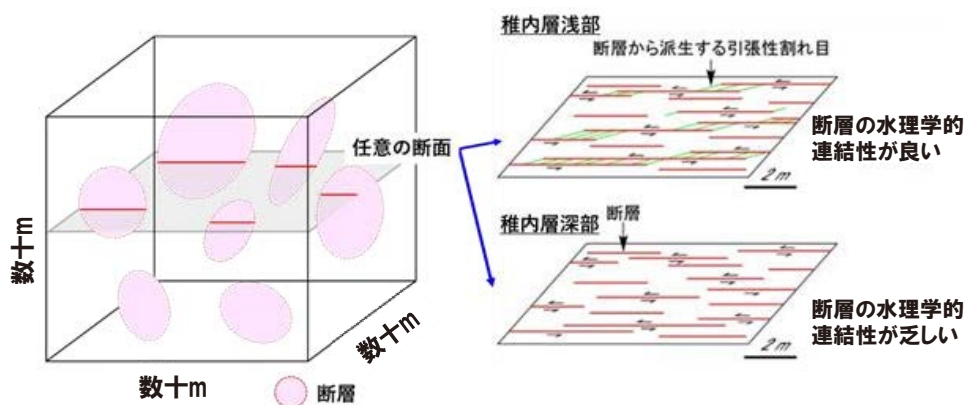


図 11 ブロックスケールにおける物質移行のイメージ

令和 4 年度は、掘削影響領域を対象とした物質移行試験については、令和 3 年度に試験坑道 4 周辺の掘削損傷領域を対象に実施したトレーサー試験結果（図 12）の解釈を行いました。この試験では、注入流量および揚水流量を一定としたパルス試験（瞬間的にトレーサーを投入する方法）および定常試験（連続的にトレーサーを投入する方法）を実施しました。その結果、両試験における注水孔（H4-1 孔）の間隙水圧の変化に違いがあることが分かりました（図 13）。この間隙水圧の変化は、パルス試験から定常試験への切り替え時に水みちの貯留性が変化したこと、この変化はメタンなどの気体の存在によって形成されていた水理境界が解消されたことが要因の 1 つとして考えられ、掘削損傷領域の物質移行モデルを構築し、解析を実施する上で考慮しなければならない事項が明らかになりました。

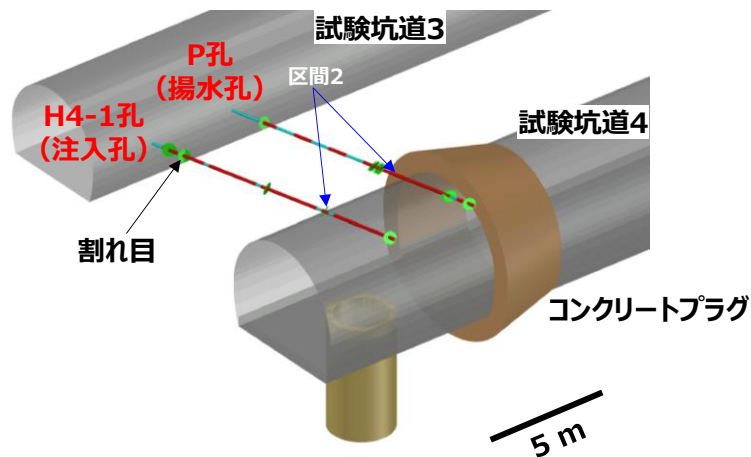


図 12 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験のレイアウト

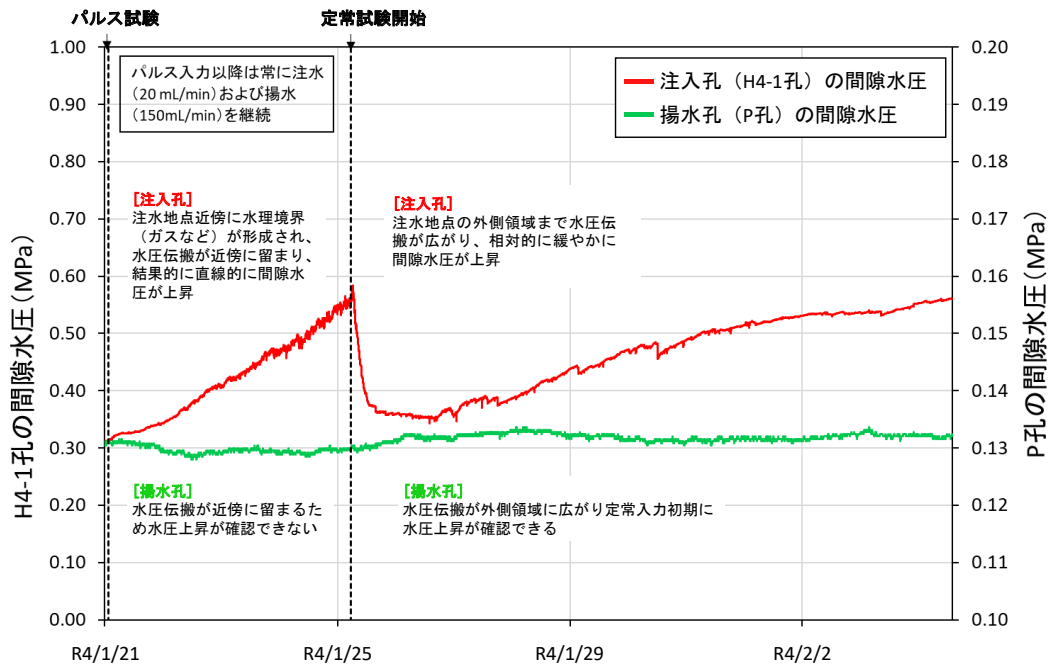


図 13 トレーサー試験中の間隙水圧測定結果

有機物・微生物・コロイドが物質移行に与える影響の評価については、令和3年度に350m調査坑道に掘削したボーリング孔などを利用して、有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行試験に着手しました。また、350m調査坑道において実施する原位置試験に用いる地下水を対象として、有機物・微生物を含む地下水中の元素とコロイド粒子との相互作用を評価する試験を実施しました。350m調査坑道から採取した地下水に希土類元素※を添加し、0.2 μm フィルターにて粒子を分画した後、0.2 μm 以上のサイズのコロイド粒子として存在する希土類元素の割合を算出しました。その結果、試験対象とした地下水中には、軽希土類元素の方が重希土類元素よりもコロイド粒子になりやすい傾向が認められるとともに、時間の経過に従い、その傾向が大

きくなることが示され（図 14）、原位置試験結果と室内試験結果との比較検証を行う上で、有益な情報が取得できました。

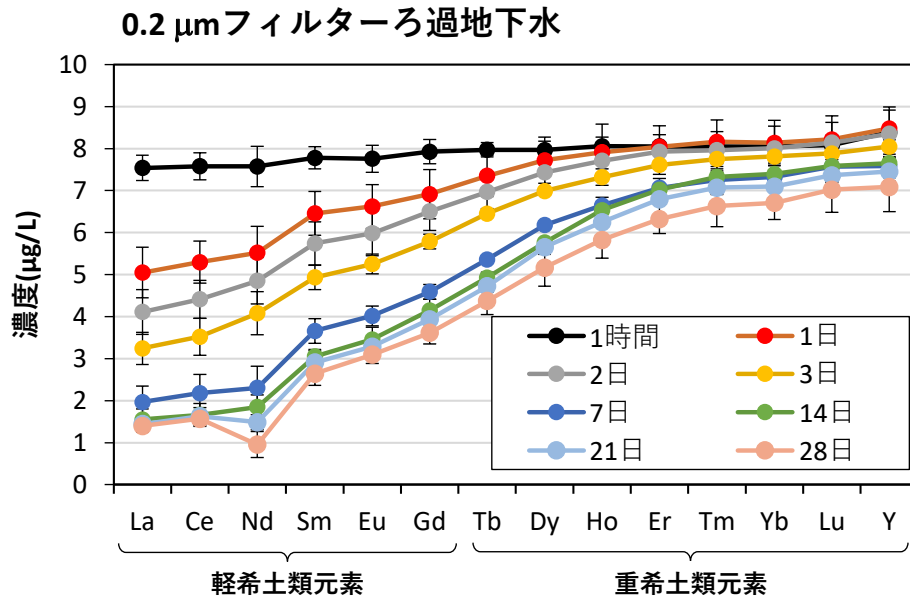


図 14 幌延の地下水（深度 350 m）中のコロイド粒子に対する希土類元素の相互作用

La：ランタン、Ce：セリウム、Nd：ネオジム、Sm：サマリウム、Eu：ユウロピウム、Gd：ガドリニウム、Tb：テルビウム、Dy：ジスプロシウム、Ho：ホルミウム、Er：エルビウム、Tm：ツリウム、Yb：イットルビウム、Lu：ルテチウム、Y：イットリウム

ブロックスケールを対象とした物質移行試験については、声問層に分布する割れ目を対象とした物質移行特性を評価するためのボーリング調査に着手しました。具体的には、250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑から西側に 4 本のボーリング孔を掘削し（図 5 参照）、水理学的連結性や物質移行特性を評価する対象となる割れ目の分布などの情報を取得しました。

令和 5 年度は、過年度の稚内層深部で実施したブロックスケールを対象としたトレーサー試験結果の評価を継続するとともに、令和 4 年度に着手した 250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑でのボーリング調査を継続し、透水試験や間隙水圧測定などに基づき、割れ目の水理学的連結性や、調査エリア周辺の間隙水圧分布などの水理特性データを取得します。また、令和 4 年度に着手した有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行試験の結果を踏まえ、350m 調査坑道に掘削したボーリング孔などを利用して、試験条件などを変化させて物質移行試験を実施していきます。さらに過年度に実施したトレーサー試験結果に基づき、第 2 次取りまとめ^⑥の核種移行評価上、考慮されていなかった掘削損傷領域内での核種移行（収着^{*}による遅延、割れ目沿いの分散など）の有無を評価するとともに、このような現象を表現可能な物質移行モデルの検討を継続します。

5 処分概念オプションの実証

5.1 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験

5.1.1 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証

令和 2 年度以降は、操業・回収技術などの技術オプションの実証、閉鎖技術の実証が課題となります。そこで、具体的には以下の 3 つの項目に取り組んでいきます。

- ・ 搬送定置・回収技術の実証
- ・ 閉鎖技術の実証
- ・ 人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いによる品質保証体系の構築

搬送定置・回収技術の実証としては、緩衝材や埋め戻し材の状態に応じたこれらの除去技術の技術オプションの整理、より合理的に人工バリアを回収するための手法の提示、回収可能性を維持した場合の処分場の安全性への影響に関する品質評価手法の提示を行います。

閉鎖技術の実証としては、将来の処分場閉鎖後に、坑道や掘削損傷領域が地上まで直結する移行経路となることを防ぐために、地下施設および周辺岩盤の長期的な変遷を考慮しつつ、埋め戻し材やプラグなどに期待される性能の具体化や設計評価技術の改良・高度化を図ります。また、埋め戻し材やプラグなどの施工方法の原位置環境への適用性・実現性について確認します。具体的には、以下に示す 5 項目について室内試験や原位置試験、数値解析などを実施していきます。

- ① 埋め戻し材やプラグなどの長期的な性能の考え方の提示
- ② 埋め戻し材の設計評価に必要となる緩衝材膨出抑制機能の把握
- ③ 掘削損傷領域の連続性を遮断するための施工技術の実証
- ④ 掘削損傷領域の調査技術の高度化
- ⑤ 坑道内から掘削されたボーリング孔の閉塞技術の実証

人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築については、人工バリア性能確認試験において、注入する地下水の圧力や量を増加させ、緩衝材に十分に水を浸潤させた状態で得られる情報などに基づき、埋め戻し材の施工方法（締固め、ブロック方式など）に応じた緩衝材の品質の違いを把握します。また、埋め戻し方法（プラグの有無など）・回収方法による埋め戻し材の品質の違いを把握します。

これらの成果は、将来的に処分場を閉鎖する際に適用される閉鎖技術に求める性能を設定する際やその性能を担保するために必要となる設計・施工技術を選択する際の基盤情報として利用されます。

令和 4 年度は、搬送定置・回収技術の実証として、安全に回収作業を行うための処分坑道内の空間の安定性を評価するために、処分坑道に施工される吹付けコンクリートの経年劣化の把握を目的としたコンクリート試験体の暴露試験を継続しました。具体的には、地下坑道の吹付けコンクリートと同様の成分および施工方法で作製したコンクリート試験体を、令和 2 年度より坑道内における大気条件下および浸潤条件下に定置しています（図 15）⁽⁷⁾。令和 4 年度は、定置から約 1 年 9 か月が経過した時点で一部の試験体を回収し、物性や化学状態を把握するための試験・分析を実施しました。その結果、大気条件下に定置した試験体は表面から約 6 mm の深さまで中性化の兆候が確認され、令和 3 年度（中性化深さは約 3 mm⁽⁸⁾）よりも中性化が進行しているのに対

し、湿潤条件下に定置した試験体では令和 3 年度と同様に、中性化の領域がごくわずかであることなどが分かりました（図 16）。

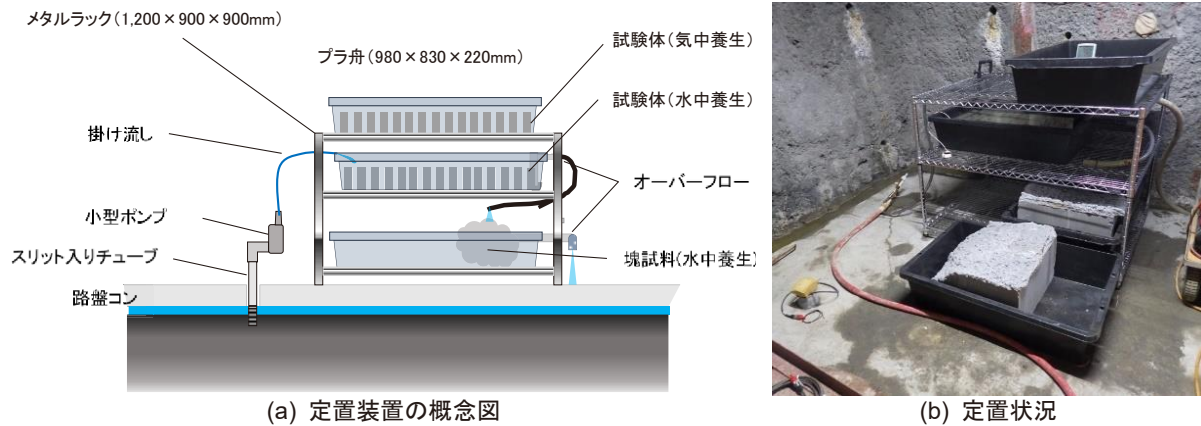


図 15 コンクリート試験体の暴露試験

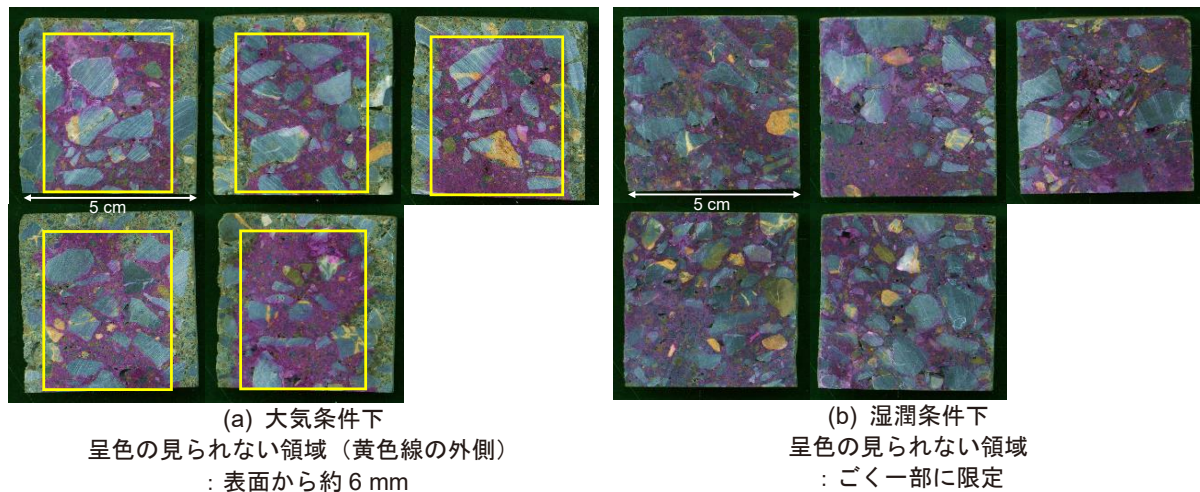


図 16 コンクリート試験体の変質領域

試験体の半割面にフェノールフタレインを塗布し、色の変化が見やすいように色調を変化させた写真です。フェノールフタレインは pH がおよそ 8～12 の範囲で赤色を呈する試薬であり、中性化が進行して pH が低下した領域では、フェノールフタレインの呈色が見られなくなります。

また、坑道開放条件下における坑道周辺岩盤の長期変化を評価するために、長期的な力学的変化やそれに伴う透水性の変化を考慮した坑道周辺の二次元多相流解析※を令和 2 年度から実施しています。令和 3 年度までは、実施した解析の妥当性を検討するとともに、坑道掘削後の坑道が解放された条件下において坑道周辺の岩盤が飽和状態から不飽和状態に向かう過程に着目した解析を実施してきました。令和 4 年度は、これまでの解析に基づき、坑道を埋め戻した後の再飽和過程の解析を実施しました。一例として、図 17 に坑道掘削後に 300 年間解放条件を維持した後に埋め戻した場合の解析結果を示します。この飽和度分布の時間変化から、解析を実施した条件下では、坑道内部においては解析期間内では完全に飽和状態に戻ることはありませんでしたが、

坑道壁面から 1 m から 2 m 程度離れた周辺岩盤においては埋め戻し後の数十年以内にほぼ飽和状態に達することが示唆されました（図 17(a)～(c)）。

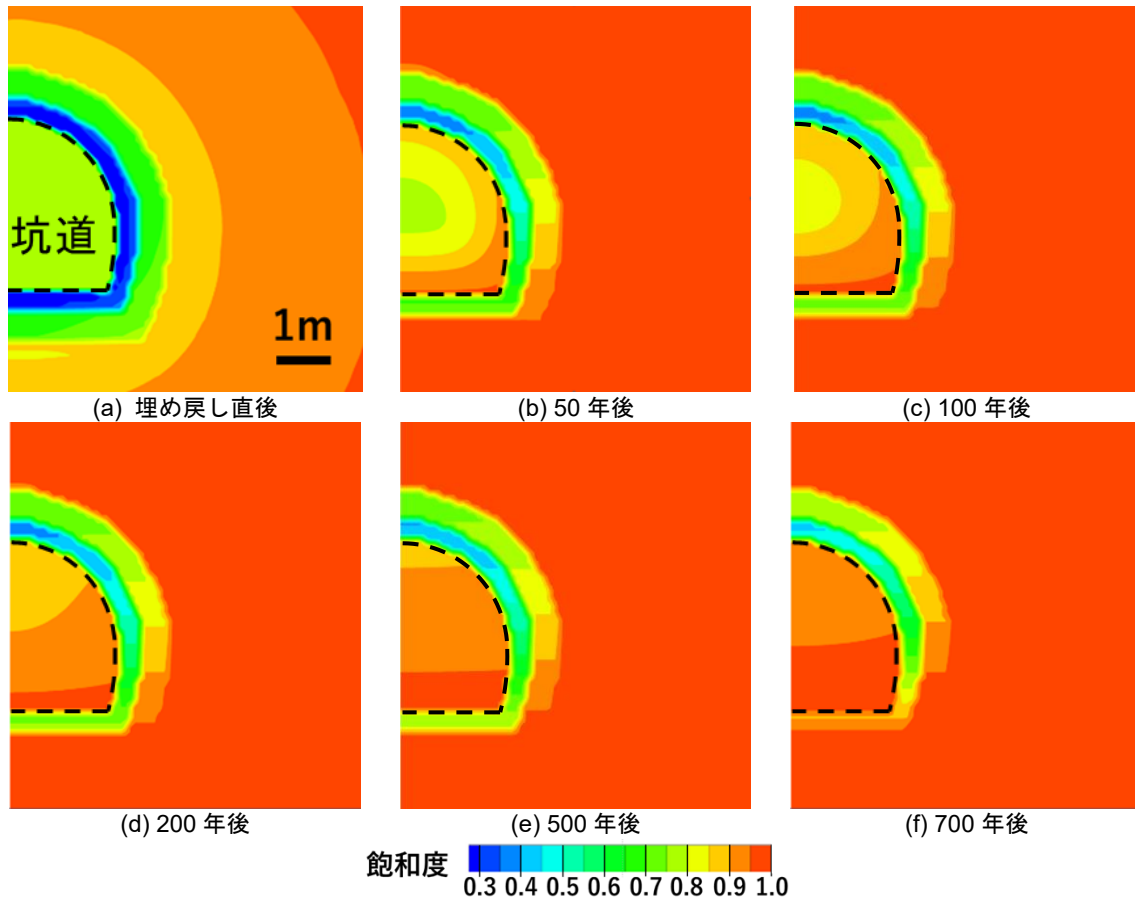


図 17 坑道埋め戻し後の飽和度変化

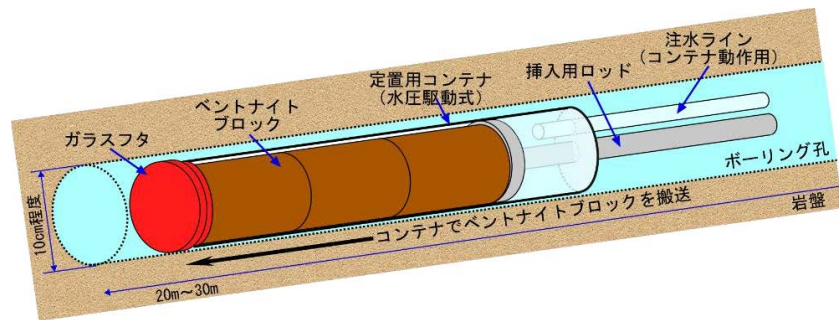
閉鎖技術の実証としては、①埋め戻し材やプラグなどの長期的な性能の考え方の提示について、力学的な作用（地震動もしくは埋め戻し材中のモンモリロナイト※の膨潤）が埋め戻し材の変質に与える影響を評価するために埋め戻し材の膨潤挙動解析を行いました。その結果、過年度に指摘した坑道の支保工※に使用されるコンクリートの溶出成分に起因した二次鉱物（カルサイト※など）の沈殿に加え、埋め戻し材の膨潤は、埋め戻し材の変質をより抑制する方向に作用することが示唆されました。また、埋め戻し材と支保工境界の初期状態に影響を及ぼし得るベントナイトの流出現象の発生条件を確認するための室内試験を継続しました。具体的には、令和 3 年度に実施した試験のうち、ベントナイトの流出が試験期間を通じて認められたケースに絞り、試験時間や注水方法を変化させた試験を実施しました。

②埋め戻し材の設計評価に必要となる緩衝材膨出抑制機能の把握については、緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた室内試験を継続して実施しました。試験結果から緩衝材と埋め戻し材の力学的な相互作用を考慮した膨潤変形挙動の評価に必要な膨潤変形量と膨潤圧のデータを整理しました。また、埋め戻し材の有無により、緩衝材の上方への膨潤変形がどの程度変化するか検討し、埋め戻し材の設置により緩衝材の膨潤変形が抑制されていることを確認しました。

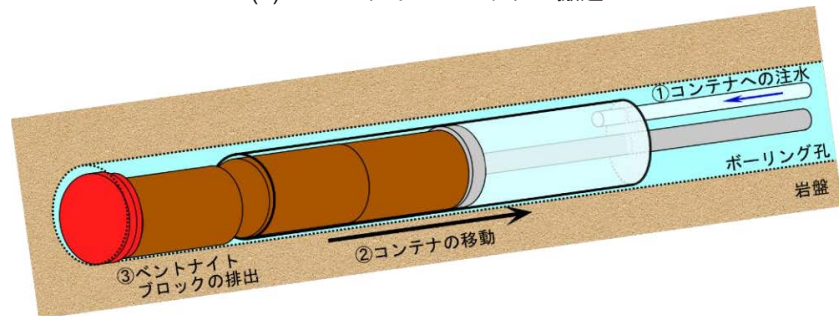
③掘削損傷領域の連続性を遮断するための施工技術の実証については、試験坑道 3 (図 6 参照) の底盤に構築した粘土系材料を用いた止水壁を対象とした透水試験を継続して実施し、止水壁を含む領域の透水係数を評価しました。その結果、止水壁を構築して 3 年が経過した時点においても、試験領域内の透水係数を構築直後と同等に低く保っていることが分かりました。また、令和 3 年度に試験坑道 2 の側面の切欠き部に吹付けたベントナイトのサンプリング調査を実施し、吹付けベントナイトの乾燥密度や含水比のばらつきなどの施工品質が吹付けから 1 年程度でどのように変化しているかを調査しました。その結果、吹付けの内側の部分で乾燥密度および含水比が維持されていることを確認しました。

④掘削損傷領域の調査技術の高度化については、原位置における調査を継続するとともに解析技術の高度化を行いました。比抵抗トモグラフィでは、原位置調査において、岩盤内に塩水を注入した後に調査を実施することにより、注水箇所の可視化を試みました。また、弾性波トモグラフィの調査結果に対して、新たに開発した吹付けコンクリートの影響を考慮した解析手法を適用することにより、既存の解析では検出が困難であった掘削損傷領域を可視化することができました。

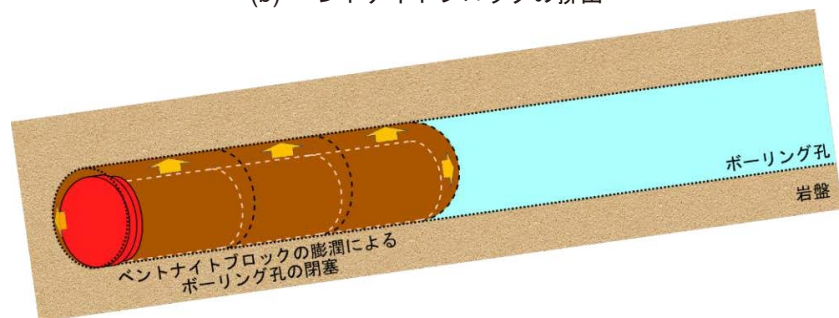
⑤坑道内から掘削されたボーリング孔の閉塞技術の実証についてはボーリング孔にベントナイトブロックを設置する方法を対象として、250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑から北側に向かって、ほぼ水平に掘削したボーリング孔を閉塞する原位置試験を実施しました (図 18)。水平なボーリング孔内に定置用コンテナを用いてベントナイトブロックを設置できることを原位置において確認しました (図 19)。また、地下水が流入する状況を模擬するために、ボーリング孔へ人工的に注水し、設置したベントナイトブロックがどのように膨潤するかを確認しました。



(a) ベントナイトブロックの搬送



(b) ベントナイトブロックの排出



(c) 膨潤によるボーリング孔の閉塞

図 18 ボーリング孔閉塞の原位置試験の概念図

設置作業中にベントナイトブロックが地下水と接触することを防ぐために、ブロックをコンテナに収納してからボーリング孔内に挿入します。(a)ベントナイトブロックを収納して密閉されたコンテナをボーリング孔内の閉塞対象となる位置まで挿入します。(b)注水ラインを通じてコンテナへ注水することでコンテナが移動してベントナイトブロックがフタとともにボーリング孔内に排出されます。(c)ボーリング孔内に排出されたベントナイトが地下水と接触して膨潤することで、ボーリング孔が閉塞します。



(a) 充填したベントナイトブロック



(b) ベントナイトブロックの充填作業

図 19 ボーリング孔閉塞の原位置試験の実施状況

人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築については、品質保証体系を構築するために必要となる緩衝材の流出挙動を把握するための試験を継続しました。緩衝材ブロックと岩盤の隙間にケイ砂を充填する施工方法において、5 か月程度の緩衝材の流出試験を実施して、緩衝材の流出量などを計測しました。令和 2 年度に 4 か月程度実施した、隙間に何も充填しない場合の試験と比較して、以下を確認しました。

- ・ 緩衝材の流出濃度が低い状態が維持されること
- ・ 緩衝材ブロックが地下水と接触して膨潤するときの膨潤圧が大きな値を示すこと
- ・ 試験孔にかかる水圧が試験期間中に変化せずにケイ砂充填領域内の隙間を地下水が流れ続けること

これらは、隙間にケイ砂を充填したことによって緩衝材ブロックの体積が変化しにくいことや、ケイ砂部分の空隙を地下水の優先的かつ均一化された様な流路とすることで緩衝材の流出の要因の 1 つである地下水の流速が速くなる局所的な領域の発生が抑制されたことを示すものです。緩衝材の流出試験が終了した後、試験孔に設置した緩衝材ブロックを回収し、緩衝材ブロックの外観の観察や乾燥密度などの測定を行いました。その結果、地下水と接触していた緩衝材ブロックの外縁部から内部に地下水が均等に浸潤していることが色調の変化から観察できました。また、緩衝材ブロックの乾燥密度の測定結果から、ブロック外縁部で乾燥密度が低下したことが確認されましたが、令和 2 年度に実施した隙間に何も充填しない場合の試験と比較して、乾燥密度が低下した範囲は限定的であることが確認されました。孔内湧水量と緩衝材流出量の関係から、孔内湧水量に対して、緩衝材の流出量が自己シール性、低透水性やコロイドろ過能などの設計要件を満足する品質を確保できる範囲となるかを推定する方法については、隙間の処理方法に応じた流出量の評価モデルが構築できるようにするため、室内試験に基づいた評価モデルを検討しました。原位置試験で得られた緩衝材流出量の試験結果により、室内試験方法や評価モデルに考慮すべき地質環境の要因などを整理しました。以上により、湧水による緩衝材ブロックと岩盤の隙間からの緩衝材の流出量の評価モデルを構築するための基盤情報を整備することができました。

令和 5 年度は、搬送定置・回収技術の実証に関する試験については、コンクリート試験体の暴露試験ならびに試験体の分析を継続して、より長期の挙動を確認するとともに、地下施設に施工されている吹付けコンクリートの現在の劣化挙動などに関しても調査を進めます。また、坑道周辺岩盤の経時変化の解析的な検討に関しても、解析条件の違いによる解析結果への影響の評価など、調査を進める予定です。

閉鎖技術の実証として、①埋め戻し材やプラグなどの長期的な性能の考え方の提示については、令和 4 年度までに得られた、埋め戻し材の変質によって立坑や坑道が水みちとなり得る水理、力学、化学条件を総合的に評価した上で埋め戻し材に求めるべき長期性能の考え方を整理します。また、坑道周辺岩盤の性質や地下水の水質など長期的な性能に及ぼし得る条件を考慮した上で、埋め戻し材の設計および施工方法を検討するために必要な数値解析や室内試験に着手する予定です。

②埋め戻し材の設計評価に必要となる緩衝材膨出抑制機能の把握については、令和 4 年度までに実施した室内試験の結果を整理し、緩衝材と埋め戻し材の力学的相互作用下で生じる膨潤変形

挙動を理解するための検討を行います。また、緩衝材の膨出抑制の観点から埋め戻し材の設計に対する考え方を整理します。

③掘削損傷領域の連続性を遮断するための施工技術の実証については、これまで試験坑道 3 の底盤部で実施してきた透水試験を継続します。また、止水プラグの設計に対する考え方を提示することを目的として、坑道周辺岩盤の透水係数や力学的性質などから実際に施工可能な止水プラグの形状や材料配合などを検討する数値解析や室内試験に着手する予定です。

④掘削損傷領域の調査技術の高度化については、新たに掘削する試験坑道周辺の掘削損傷領域を対象とした物理探査を実施し、掘削直後の掘削損傷領域の割れ目の連続性や分布などの初期状態を評価するとともに、これまで開発してきた物理探査技術の適用性確認を行います。

⑤坑道内から掘削されたボーリング孔の閉塞技術の実証については、ボーリング孔の閉塞方法として令和 4 年度までに原位置試験などで具体的な手順などを確認したベントナイトブロックを設置する方法について、試験で得られたデータを整理して、その適用性や技術的な課題点について取りまとめを行います。

人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築における坑道の埋め戻しに関しては、施工環境や設計要件に応じて柔軟に施工方法を選択できるように複数の施工技術オプションの整備を進めるため、スクリー工法やブロック工法など複数の埋め戻し材施工技術について、施工効率の向上に向けた要素試験などに着手します。また、光ファイバーセンサーを用いた埋め戻し材の乾燥密度測定など、施工品質を確認するための計測技術の高度化に取り組みます。

5.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化

令和 2 年度以降は、廃棄体の設置方法などの実証試験を通じた坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化が課題となります。そのため、人工バリアに要求される品質を踏まえて、要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認します。具体的には、坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化、先行ボーリングによる地質環境特性調査ならびに工学的対策技術を考慮した地下施設および人工バリアの設計評価技術の体系化、多接続坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、緩衝材流出・浸入現象評価手法および抑制対策技術の整備、廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理を行います（図 20）。本研究については、「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画」の研究期間の後半に実施します。

本課題に関する坑道内でのボーリング調査や坑道掘削といった原位置試験は、今後整備される 500m 調査坑道において、令和 6 年度から実施する予定です。それに先立ち、令和 5 年度はこれまでの調査研究で得られた断層/割れ目からの湧水や掘削損傷領域の発達に関する既存情報の収集・整理を行い、500m 調査坑道で想定される状況などについて検討します。

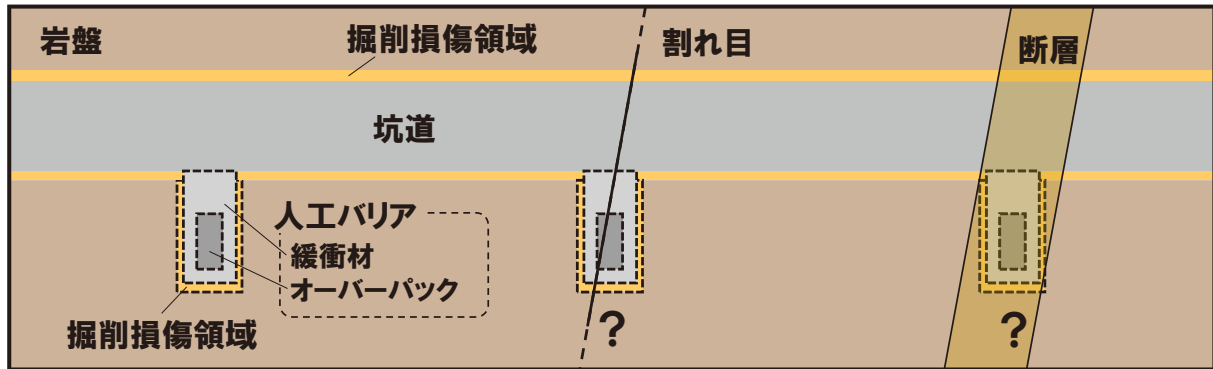
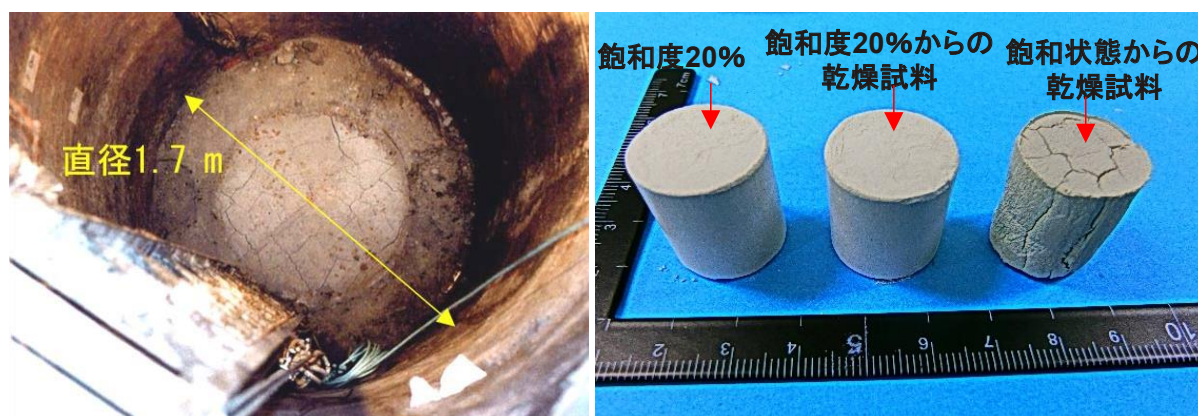


図 20 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化の概念図

5.2 高温度（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

令和 2 年度以降は、人工バリアの構成要素である緩衝材の最高温度が 100℃を超えた状態での人工バリアとその周辺岩盤の領域（ニアフィールド）において発生する現象の整理、人工バリア性能に係る試験データの整備、解析手法の開発を行うとともに、ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示します。これらの目標が達成されることにより、地層処分場において想定外の要因により緩衝材の温度が 100℃を超えた状態となった場合の人工バリアの挙動を検討できるとともに、高温条件下での人工バリアの安全裕度を評価できます。

令和 4 年度は、令和 3 年度に実施した、緩衝材の温度が 100℃を超えた状態で発生し得る現象に関する先行研究の事例調査を基に、重点的な調査が必要と考えられる現象に関する原位置試験の計画を策定しました。令和 3 年度の調査では、緩衝材の温度が 100℃を超えた場合に変化が生じ得る影響要因として、イライト（雲母鉱物）化、熱履歴、塩濃縮、微生物影響、ガスの発生、鉄/バントナイト相互作用、高 pH および高 Ca 濃度地下水による影響、シリカセメンテーション※が抽出され、また、高温蒸気との反応ならびに緩衝材のひび割れも影響し得ることが示唆されました⁽⁸⁾。このうち、イライト化、微生物影響、高 pH および高 Ca 濃度地下水による影響などの緩衝材の変質については、スイスのグリムゼル原位置試験場で実施されている、緩衝材の温度を最高 200℃程度まで上昇させる原位置人工バリア試験（HotBENT プロジェクト）でも重点的に考慮すべき項目として挙げられており、知見も得られています。一方、緩衝材のひび割れや熱履歴が緩衝材特性に与える影響については、原子力機構のこれまでの室内・原位置試験でも観測されていますが（図 21）、これらの現象が緩衝材の特性に与える影響については明らかになっていません。



(a) 釜石鉱山での原位置試験 (b) 110°Cで乾燥させた緩衝材ブロック

図 21 これまでの室内・原位置試験で確認された、100°C以上の温度で加熱された緩衝材に発生したひび割れ

(a)釜石鉱山にて実施された炭素鋼の腐食に関する原位置試験（ヒーターの設定温度を 100°Cとして 257 日間加熱）における試験後の孔内の写真⁽⁹⁾。ヒーターと接していた孔底部の緩衝材にひび割れが認められます。(b)異なる飽和度で成形した緩衝材ブロックについて、一部を 110°Cで加熱して乾燥させたもの⁽¹⁰⁾。飽和状態から乾燥させた試料のみひび割れが認められます。

そこで、100°Cを超えた熱履歴、特に緩衝材へのひび割れの発生などの現象が緩衝材の特性に与える影響を確認するための原位置試験概念について検討を行いました。具体的には、試験坑道 3 で実施されたオーバーパック腐食試験や試験坑道 5 で実施された緩衝材流出試験と同程度の工学的規模を想定し、試験坑道に掘削された深さ 1 m～2 m 程度、直径 0.6 m 程度の孔の中心にヒーター、その周囲に緩衝材ブロックを設置して、100°C以上の温度で加熱する試験の計画を立案しました。試験計画では、レイアウト、緩衝材の密度、飽和度などの初期条件、注水条件、加熱温度などについて検討しました。これらのうち、例えば温度については、オーバーパックの耐食性への影響に関する室内実験データ⁽¹¹⁾や令和 3 年度に実施した緩衝材の変質に関する研究事例の調査結果に基づき、人工バリア材料の高温による変質や劣化が顕在化しないと考えられる 120°C～140°C 程度を最高温度の目安としました。熱解析の結果から、ヒーターの設定温度を 120°Cおよび 140°C とした場合に、厚さ 0.3 m の緩衝材ブロックの外縁部が 100°Cを超えるまでの期間は、それぞれ 11 日、5 日と計算され（図 22）、比較的短期間で緩衝材全体が 100°Cを超えた状態に達すると推定されました。

令和 5 年度は、令和 4 年度に策定した試験計画に基づき、緩衝材の温度が 100°Cを超えた後に徐々に低下する温度変化が緩衝材の特性に与える影響を検証するための原位置試験を開始します。試験は 350m 調査坑道の既存孔（深さ 1 m～2 m 程度、直径 0.6 m 程度）を利用し、中心にヒーター、その周囲に緩衝材ブロックを設置して、最高 140°C程度の温度で加熱する計画です。試験の実施にあたっては、海外での原位置試験の情報も適宜反映していきます。

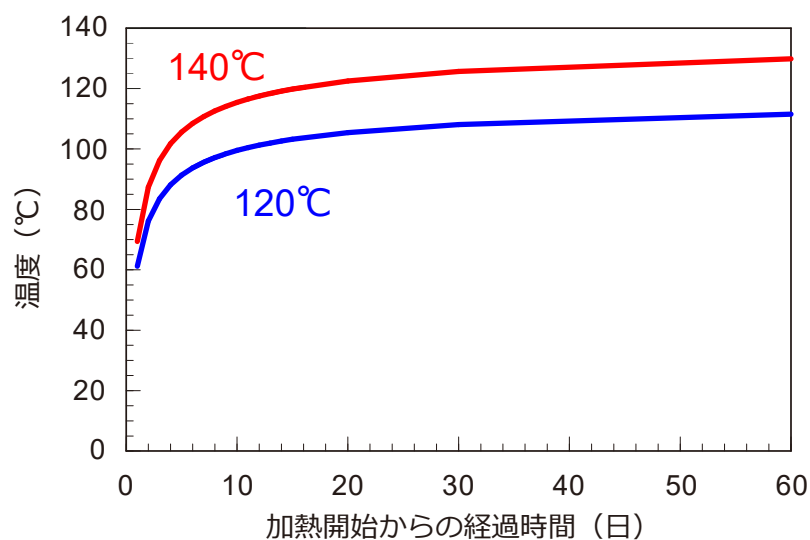


図 22 原位置試験における緩衝材ブロック外縁部の温度変化に関する熱解析の結果

緩衝材ブロックの厚さを 0.3 m とし、中心部のヒーターにより 100°C を超える温度で加熱した場合に緩衝材ブロックの外側で生じる温度変化を解析により予測したものです。解析に用いた緩衝材および岩盤（軟岩）の物性値は、第 2 次取りまとめ⁽¹²⁾の値に基づいたものです。

6 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

6.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

6.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

令和 2 年度以降は、地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握が課題となります。そのため、断層沿いに亀裂の発達する幅が数十 cm 程度のより大型の断層における地震動や坑道掘削に伴う割れ目中の地下水の流れの変化に関して、堆積岩の緩衝能力（自己治癒能力）の評価手法の確認を行います。具体的には、地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握（ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験）、ダクティリティインデックス（DI）を用いた透水性評価の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備、水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備を行います。

令和 4 年度は、地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握を目的として、令和 3 年度に再検証した DI モデルと令和 2 年度に実施した水圧擾乱試験結果の比較検証を行いました。令和 3 年度に再検証した DI モデルは図 23 の近似曲線（経験式）として表され、この近似曲線は国内外の様々な堆積岩や結晶質岩中のボーリング孔の断層交差部で確認された地下水の主要な水みち割れ目の透水性と DI を表します。これらの割れ目はいずれも主要な水みち割れ目であることから、ある DI を持つ断層の透水性は断層がずれたとしてもこの近似曲線の誤差範囲（ $\pm 2\sigma$ ）を有意に超えないことが経験的に推定されます。この近似曲線と令和 2 年度に東立坑底盤から掘削したボーリング孔で実施した水圧擾乱試験の結果を比較した結果、次のことが分かりました。すなわち、同水圧擾乱試験では、幅数十 cm の断層内の水圧を 6 段階にわたって増加させ、最終的に数 mm 以上の断層のずれを発生させることができましたが⁽⁷⁾、各段階において算出した断層の透水性はほぼ変わらないことが今回の解析により分かりました。それらの透水性は図 23 の△で示され、近似曲線の誤差範囲の最大値付近（図中の $+2\sigma$ と表記した破線付近）に相当します。このように、近似曲線の誤差範囲に透水性が既に達している断層は、断層がずれたとしてもその透水性が有意に増加しないことが今回の試験により確認できました。同様なことは、既に幅数 cm 程度の小規模な断層を対象とした水圧擾乱試験により確認できていましたが⁽¹³⁾、今回の試験により、より大規模な断層でも上記の考えを適用できることが確認できました。

DI を用いた透水性評価手法の信頼性向上などを目的に、これまでに得られた地下施設建設時における地下施設周辺のボーリング孔（HDB-6 孔および PB-V01 孔、図 4 参照）での水圧観測データを用いて、DI と断層/割れ目の水理学的連結性の関係に関する解析を行いました。HDB-6 孔および PB-V01 孔ではこれまでに孔内の複数の観測点で地下施設周辺の水圧を観測してきており、HDB-6 孔では稚内層で地下施設の建設に伴って数百 kPa の水圧低下あるいは数十 kPa の水圧上昇が観測されています。解析では、これらの水圧低下あるいは水圧上昇が地下施設の湧水量増加とともに顕著に生じ始めた、平成 20 年 10 月 9 日から 1 年間の水圧変化に着目し、その水圧変化を再現できるような地層の透水性を水理・力学的な数値解析により検討しました。その結果、図 24 に示すような地層の透水性が求められ⁽²⁾、稚内層浅部（ $DI < 2$ の領域）の透水性（約 2×10^{-8} m/s）は割れ目の無い健岩部の透水性（ 1×10^{-11} m/s 程度）よりも有意に高い透水性であることが推定されました。一方で、稚内層深部（ $DI \geq 2$ の領域）では上位の浅部との境界から 100 m 程度の領域において $1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-9}$ m/s、それ以深の領域では健岩部の透水性に相当する $1 \times 10^{-11} \sim 1 \times$

10^{-10} m/s の値が推定されました。これらの透水性の深度変化は、 $DI < 2$ の領域（断層/割れ目の水理学的連結性が高い領域）⁽³⁾から $DI \geq 2$ の領域（断層/割れ目の水理学的連結性が低い領域）⁽³⁾にかけて断層/割れ目の水理学的連結性が遷移的に変化する様子を表すものと考えられ⁽²⁾、令和 2 年度に推定した断層/割れ目の水理学的連結性が遷移的に変化する領域（図 24 の遷移領域）の存在を裏付けています。図 24 に示す地層の透水性の妥当性は、平成 20 年 10 月 9 日から 10 年以上にわたる水圧変化の検討結果からも確認でき、その結果に従えば、今後、深度 500 m まで掘削が行われたとしても、その掘削領域（稚内層遷移領域と深部領域）の断層/割れ目の水理学的連結性が低いために、地下施設周辺のボーリング孔の水圧はほとんど変化しないことが予想されます。また、湧水量も一時的な増加は予想されますが、定常的な増加が発生する可能性は低いと考えられます⁽¹⁴⁾。DI と断層/割れ目の水理学的連結性の関係については、地下水の安定同位体比から推定される地下水の流れの有無との整合性も確認することができました。その結果によれば、地下水の流れが検出される領域は $DI < 2$ の領域に限られ、 $DI < 2$ の領域でも地下水を動かす駆動力（動水勾配）が乏しいために現在は地下水の流れが検出されないほど地下水の流れが非常に遅い領域が広く存在することなどが確認できました^(15, 16)。

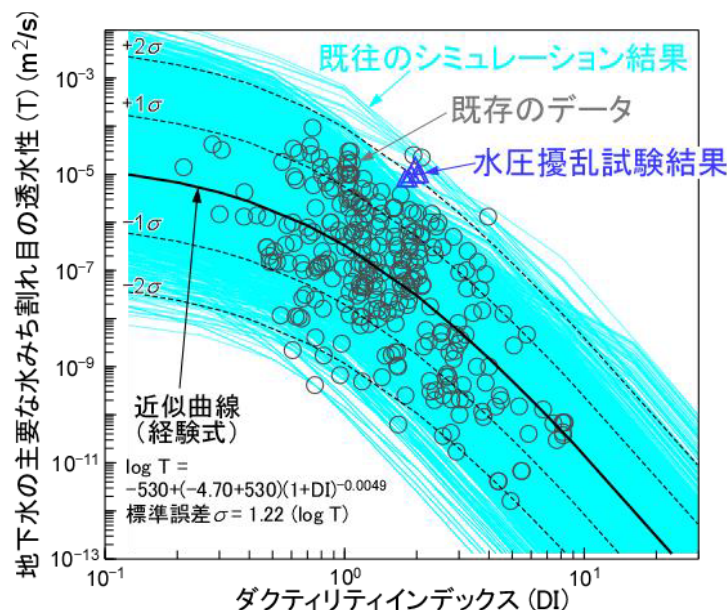


図 23 DI モデル（図中の実線と破線で示す近似曲線）と水圧擾乱試験結果の比較

図中の○は幌延、スイス、スウェーデン、フィンランド、英国の堆積岩や結晶質岩中のボーリング孔の断層交差部で確認された地下水の主要な水みち割れ目の透水性と DI を表します⁽¹⁷⁾。近似曲線は、これらのデータから既報の近似法により導出したもので、実線で示す曲線が代表的な推定値（データの対数平均値）を表し、破線で示す曲線はその推定誤差を表します⁽¹⁾。水色の曲線は、室内実験結果に基づくシミュレーション結果を示しており、近似曲線と同様な変化傾向を示すことから、近似曲線が妥当であることが示唆されます⁽¹⁾。△は今回解析した水圧擾乱試験の結果を表しており、6 段階にわたって水圧を上昇させた際の各段階の透水性と DI を表します。

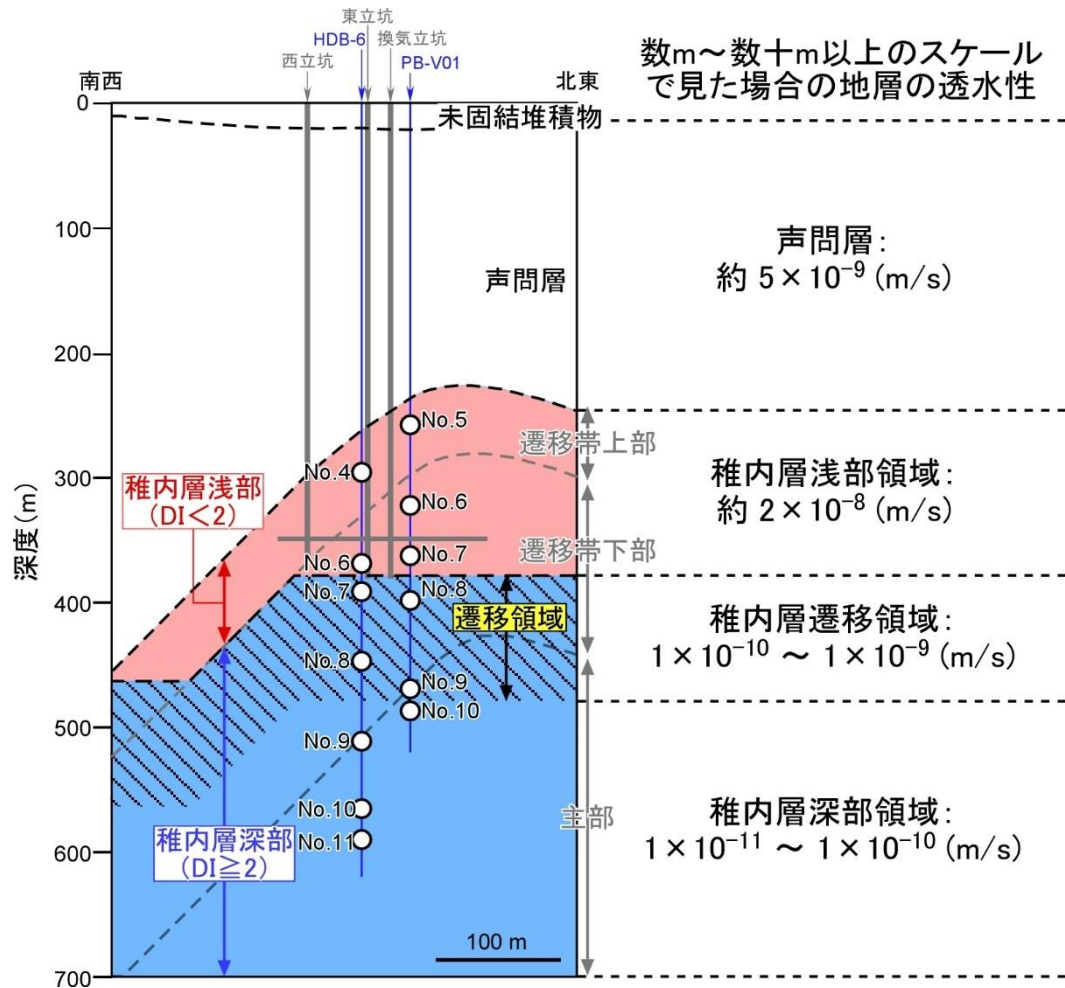
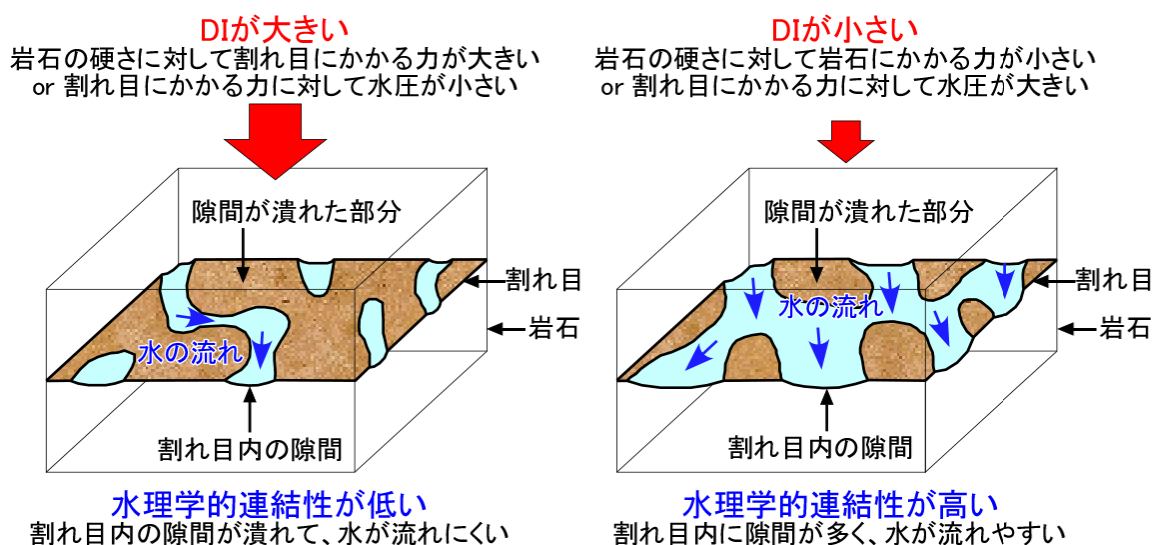


図 24 地下施設建設時の地下施設周辺のボーリング孔（HDB-6 孔および PB-V01 孔）での水圧変化から数値解析により推定された各地層の数 m～数十 m 以上のスケールで見た場合の透水性⁽²⁾

図中の No. は HDB-6 孔および PB-V01 孔の稚内層における長期水圧観測点を示します。HDB-6 孔は本断面図上から 164 m 離れた場所に位置していますが、本断面図上に垂直投影しています。斜線で示す遷移領域は断層/割れ目の水理的連結性が浅部のよい領域から深部の乏しい領域にかけて遷移的に変化する領域を表します。遷移帯上部、遷移帯下部、および主部と表記した領域は岩石の鉱物組成や硬さに基づく地質学的な領域区分を表します。

令和 5 年度は、水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備や、DI を用いた透水性評価手法の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備を目的として、過年度に実施した水圧擾乱試験の結果の解析や、DI と断層/割れ目の水理学的連結性の関係（図 25）に関する解析を令和 4 年度までの検討結果を踏まえて行います。

図 25 DI と割れ目の水理学的連結性との関係^(18, 19)

6.1.2 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化

令和 2 年度以降は、地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化が課題であり、このような地下水の流れが非常に遅い領域を調査してモデル化する技術の実証を行います。具体的には、化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証、広域スケール（十数 km × 十数 km）を対象とした水理・物質移行評価手法の検証（地下水滞留時間評価）のための水理解析、塩濃度分布評価のための水理・物質移行解析を行います。

この研究課題で整備される技術は、処分事業のサイト選定において、地質環境に求められる要件の 1 つとして挙げられている「放射性物質の移行を抑制する緩慢な地下水流動の水理場であること」を評価する際に役立ちます。本研究課題においては、化石海水が存在するような地下水の動きが非常に遅い環境を調査してモデル化する技術を実証するため、具体的には、以下を実施します。

- ①地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）の調査・評価技術の検証
- ②化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証
- ③広域スケール（十数 km × 十数 km）を対象とした水理・物質移動評価手法の検証（地下水滞留時間評価）のための水理解析および塩濃度分布評価のための水理・物質移動解析

①地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）の調査・評価技術の検証では、地上からの主要な調査である物理探査とボーリング調査を対象に、化石海水領域を把握するための調査技術としての適用性やより効率的に把握するための調査仕様や手順などを検証します。②化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証では、幌延地域において取得されたデータを用いて化石海水の三次元分布を推定し、化石海水を指標として地下水の流れが非常に遅い領域を推定するための一連の手法を整理します。③広域スケール（十数 km × 十数 km）を対象とした水理・物質移動評価手法の検証（地下水滞留時間評価）のための水理解析および塩濃度分布評価のための水理・物質移動解析では、地質環境中における過去から現在までの地下水の流動や化学的状態などの移り変わり（古水理地質学的変遷）が、化石海水の三次元分布に及ぼす影響について解析を

通じた検討を行うとともに、化石海水領域の三次元分布の評価結果を踏まえた広域スケールの解析手法について検討します。これら①～③を実施することにより、地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術を整備します。

令和 4 年度は、①化石海水領域の調査・評価技術の検証については、令和 2 年度の電磁探査により推定した化石海水の三次元分布の推定結果の妥当性を確認するために、令和 3 年度に引き続きボーリング調査を実施しました。具体的には、令和 3 年度に深度 200 m まで掘削した HFB-1 孔を深度 500 m まで延長しました。地下水が化石海水であるかどうかを判断する直接的な指標は、地下水の塩化物イオン濃度、酸素・水素同位体比です。電磁探査の結果から得られる比抵抗は、地下水の塩化物イオン濃度と相関性があり、塩化物イオン濃度が低い場合に比抵抗が高く、塩化物イオン濃度が高い場合には比抵抗が低くなります。すなわち、比抵抗が低い領域が化石海水の分布する領域と推定されます。電磁探査の結果、探査範囲の南西側では低い比抵抗の領域が深度約 100 m 以深に分布し、一方、北東側では深度約 400 m 以深に分布しており（図 26）、これに対応して、化石海水が分布すると推定しました。これに対して、HFB-1 孔の調査地点は、この南西側の深度 100 m 以深に広がる低い比抵抗領域の端に位置しており（図 26）、どの深度から化石海水が出現するのか不確実性が大きい地点です。そこで、HFB-1 孔の掘削により、深度 500 m までの岩石コアを採取し、その間隙に含まれる地下水の水質・同位体データを取得しました。その結果、HFB-1 孔の塩化物イオン濃度は、深度約 100 m までは、深度とともに上昇するものの、深度約 100 m から 340 m までは概ね一定の値で推移し、深度約 340 m 以深で再び上昇する傾向がみられました（図 27(a)）。酸素・水素同位体比も塩化物イオン濃度と同様の傾向がみられ、酸素同位体比は 0‰^{*}以上を化石海水の目安とした場合、深度約 400 m 以深から化石海水と判断できます（図 27(b)、(c)）。例えば、既存孔である HDB-5 孔（図 3 参照）のように、電磁探査の結果から明らかに深度約 400 m から化石海水が出現すると推定される地点（図 26）では、その深度まで化石海水の特徴に変化する様子は認められません（図 27）。一方、HFB-1 孔の深度約 100 m から 400 m の間において、地下水の塩化物イオン濃度や酸素・水素同位体比が化石海水の特徴に近づく様子は、化石海水が分布する領域の境界に近いことを表しています。このことは、HFB-1 孔の調査地点で化石海水の出現深度が大きく変化すると推定したことと一致します。以上のことから、令和 2 年度に適用した電磁探査の仕様や手順が地下水の流れが非常に遅い領域であると推定される化石海水が分布する領域の三次元分布を把握する調査技術として有効であることが実証できました。

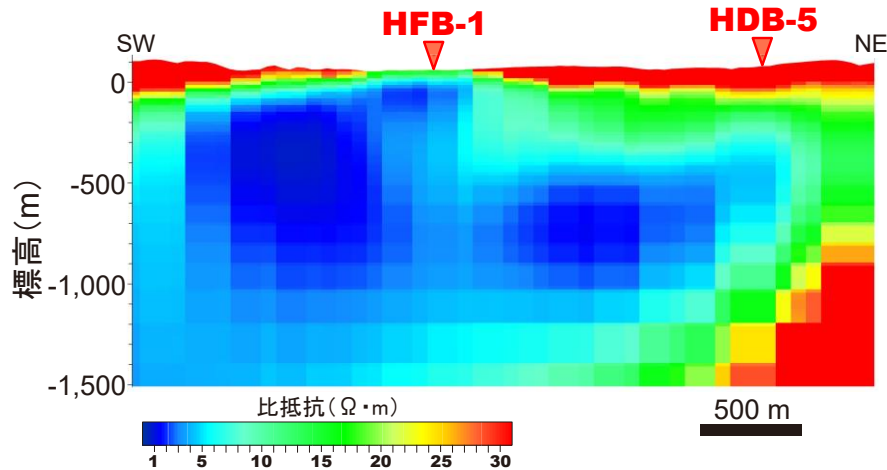


図 26 令和 2 年度の電磁探査で得られた比抵抗分布（99 測点、拘束なしの解析結果、HFB-1 孔および HDB-5 孔を通過する鉛直断面図）⁽⁸⁾

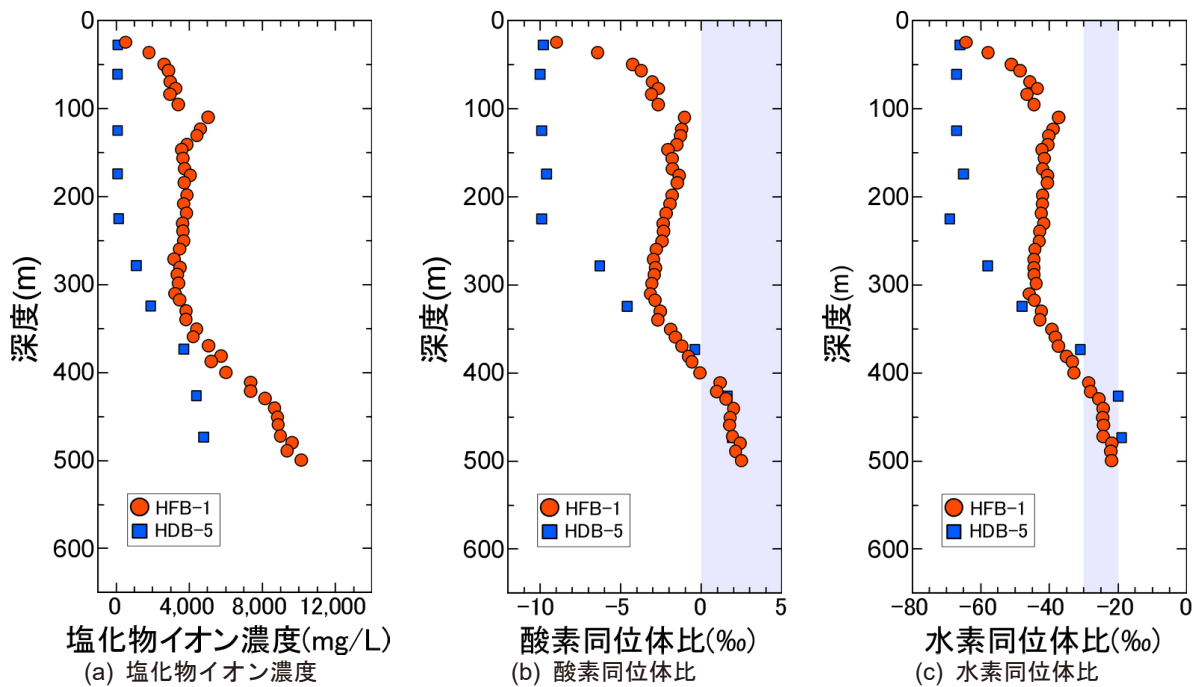


図 27 ボーリング調査から得られた塩化物イオン濃度、酸素・水素同位体比の深度分布
岩石コアからの圧縮抽出水の塩化物イオン濃度と酸素・水素同位体比の分析結果を示しています。酸素・水素同位体比の水色の領域は、化石海水の目安となる値の範囲を示しています。

②化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証については、ボーリング調査で取得した水質・同位体データを用いて地球統計学的解析を実施し、限られたボーリング調査データから良好な精度で酸素同位体比の三次元分布を推定できるボーリング調査地点の選定方法を検討しました。その際、電磁探査による比抵抗の値が酸素同位体比と相関するという特徴を利用した地球統計学的解析を適用しました。既往のボーリング孔（HDB-1 孔、HDB-3 孔～HDB-11 孔）と上述の HFB-1 孔の全 11 孔の調査結果から、任意の 1～3 孔のボーリング調査データを選択した複数のケースについて、酸素同位体比の三次元分布を推定しました。その結果、電磁探査によっ

て得られた三次元比抵抗分布から幅広い比抵抗値を網羅できるボーリング調査地点を選択した場合に、2 孔だけの選択でも全 11 孔のデータを用いた場合と類似した推定結果が得られました。以上のことから、限られた数のボーリング調査であっても、電磁探査の結果に基づいてボーリング調査地点を選定すれば、妥当な推定結果を得られることを実証しました。

以上の①と②の結果を踏まえ、物理探査およびボーリング調査によるデータ取得から地球統計学的解析による化石海水領域の三次元分布の推定に至る一連の手法を整理しました。

③広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の検証については、令和 3 年度に引き続き、広域スケールの地下水流動解析を実施する上で考慮すべき化石海水領域の分布に影響する古水理地質学的変遷（地質環境中における過去から現在までの地下水の流動や化学的状态などの移り変わり）に関する因子を抽出するために、過去 100 万年前から現在までの地形や海水準（陸地に対する海面の相対的な高さ）、涵養量（天水や地表水が地下に浸透して地下水として加わる水の量）などの長期的時間変化を考慮した地下水流動解析を実施しました。解析では、過去 100 万年間の地形や海水準・涵養量の変化の他に、塩水と淡水の密度差に起因した密度流の影響や地下深部で観測されている異常間隙圧（静水圧を超える地下水の圧力）の影響を調べました。その結果、地層の隆起・侵食により約 30 万年前から現在にかけ宗谷丘陵部が形成されるにつれて、地下浅部と深部で異なる地下水の流れが形成されていた可能性が分かりました。これは、地層の代表的な透水性を岩盤にかかる圧力と岩盤の硬さで予測できるとしたこれまでの成果⁽¹⁷⁾を解析モデルに反映したことによると考えられました。比較的透水性の高い稚内層浅部以浅の領域では、地表から涵養された天水がゆっくりと流れ、再び地表へと流出する地下水の流れが解析により確認されました。一方で、比較的透水性の低い稚内層深部には地表から涵養された天水を起源とする地下水の流れはほとんど到達せず、当該深度の地下水の流れが非常に遅いことが確認されました。この結果は、化石海水の分布領域の多くが稚内層深部以深であることと整合しています。

令和 5 年度は、これまでに得られた成果の論文投稿や研究開発報告書類の整備に取り組みます。また、産業技術総合研究所との共同研究として、令和 4 年度に引き続き、海陸連続三次元地質環境モデルの妥当性の検証を目的とした海上物理探査を行います。その際、令和 4 年度の実績に基づき探査手法を見直した上で、幌延町沿岸部の浅海域において実施します。さらに、浜里地区などにおいて、既存ボーリング孔からの地下水の採水や水文地質データの取得を行います。

6.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

令和 2 年度以降は、地殻変動による緩衝材や坑道埋め戻し材の掘削損傷領域への自己治癒能力の実証が課題となります。そのため、ひび割れに対する自己治癒能力の実証を行います。具体的には、緩衝材や坑道埋め戻し材が掘削損傷領域の力学的・水理学的な緩衝能力（自己治癒能力）に与える影響を把握する解析手法の開発を行います。

令和 4 年度は、坑道埋め戻し後の緩衝材や坑道埋め戻し材の膨潤が掘削損傷領域の透水性に与える影響の評価手法の構築を目的に、掘削損傷領域の割れ目を対象とした既往の注水試験のデータ解析を行いました。図 28 の H4-1 孔および H4-3 孔の区間 2 で実施した段階注水試験のデータを解析した結果、試験中の割れ目の透水性は概ね図 29 の予測値の曲線（黒実線で表記；黒破線は $\pm 2\sigma$ の誤差を表す）に沿って変化し（図 29 の○と□）、同試験で行ったシミュレーションに

においても概ね予測値の曲線に沿って透水性が変化することを確認することができました（図 29 の赤曲線）。さらに、図 28 の他の区間で実施した通常の注水試験においても、得られた透水性が予測値の範囲（ $\pm 2\sigma$ ）に収まることを確認することができました（図 29 の◇）。

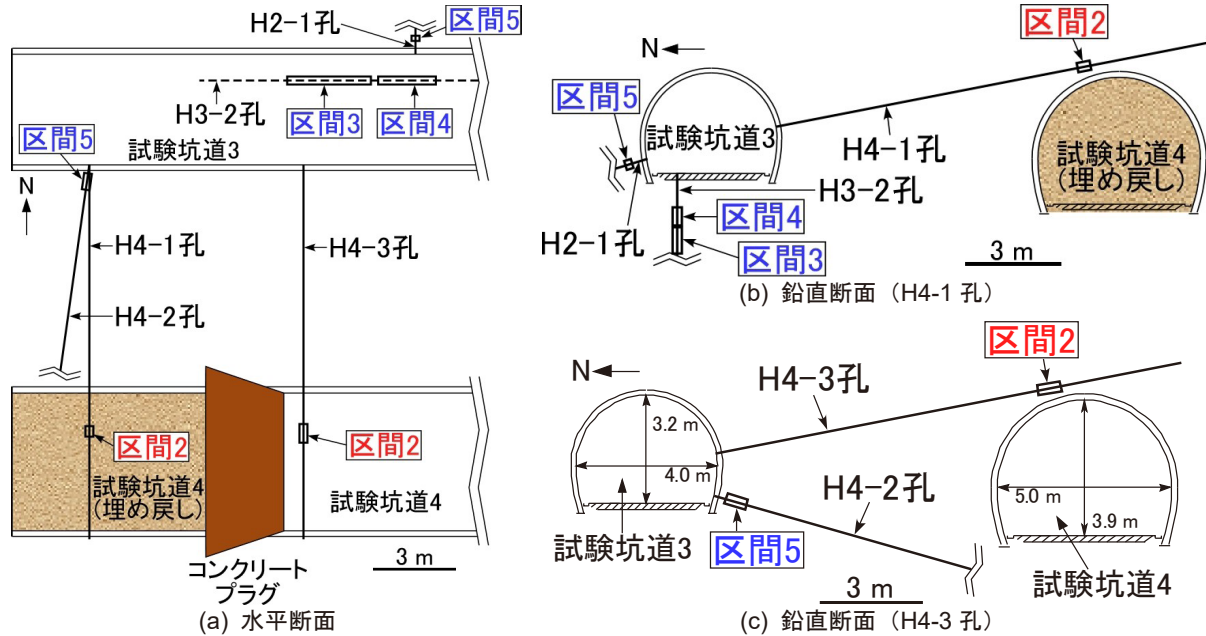


図 28 試験坑道 3 および試験坑道 4 の掘削損傷領域の割れ目を対象に実施した注水試験区間^(4, 5)

段階注水試験を実施した区間を赤字、通常の注水試験を実施した区間を青字で示します。

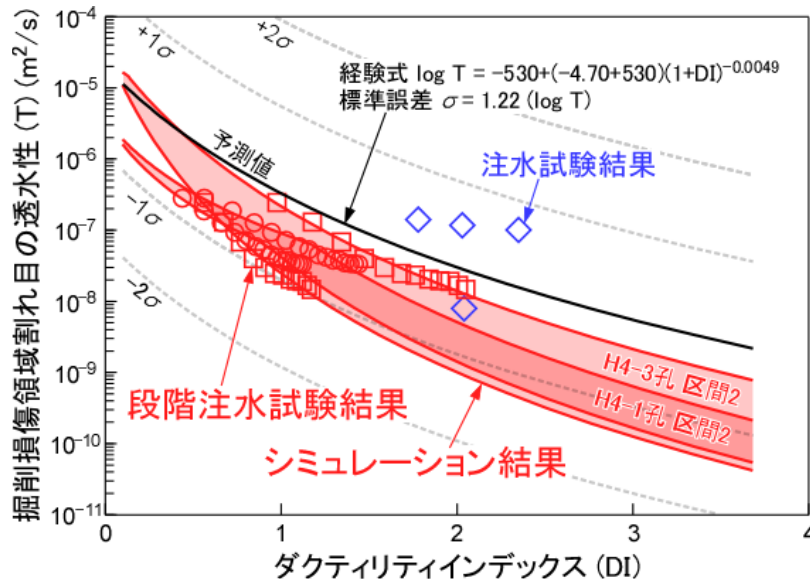


図 29 注水試験結果と DI モデルの比較

図 28 の赤字で示す H4-1 孔と H4-3 孔の区間 2 を対象とした段階注水試験結果（○が H4-1 孔で□が H4-3 孔）とその結果に基づくシミュレーション結果（赤い曲線）は参考文献(4)に、青字で示すその他の区間を対象とした注水試験結果（◇）は参考文献(5)に、そして黒の曲線で示す予測値（実線が対数平均値、破線が誤差 $\pm 2\sigma$ ）は参考文献(1)に基づきます。段階注水試験とそのシミュレーションの結果は、割れ目面に垂直にかかる力と割れ目に平均的にかかる力の比の推定誤差を考慮しており、DI の値に幅を持たせています（薄い赤色の範囲）。

図 29 の予測値の曲線は、国内外の様々な堆積岩や結晶質岩中のボーリング孔の断層交差部で確認された地下水の主要な水みち割れ目の透水性と DI の関係を表しており⁽¹⁾、掘削損傷領域の割れ目の透水性の予測にも適用できると考えられます⁽⁵⁾。すなわち、地層中の天然の割れ目と掘削損傷領域の割れ目はそれぞれ形成過程が異なりますが、いずれの場合も、割れ目が充填物などによって閉塞されていない限り、その透水性は岩石にかかる力、岩石の硬さ、そして割れ目のかみ合わせの程度によって決まります^(1, 20)。岩石にかかる力と岩石の硬さは地層中の天然の割れ目も掘削損傷領域の割れ目も DI により表現することが可能です。割れ目のかみ合わせの程度は割れ目の初期開口幅（割れ目面に垂直にかかる力が無視できるほど小さい時の開口幅）で数値化することが可能で（割れ目のかみ合わせが悪いほど初期開口幅が大きい）⁽¹⁾、掘削損傷領域の割れ目の初期開口幅は天然割れ目の初期開口幅の範囲内に収まることが分かっています^(4, 21)。したがって、図 29 の予測値の曲線は掘削損傷領域割れ目の透水性の予測にも適用できます。

図 29 に示すように、予測値の曲線と今回行った段階注水試験（あるいは注水試験）の結果が整合するということは、予測値の曲線が緩衝材や埋め戻し材の膨潤に伴う掘削損傷領域の透水性変化の推定に適用可能であることを示しています。掘削損傷領域の透水性の変化は、次のように推定できると考えられます。例えば、緩衝材や埋め戻し材で 0.9 MPa の膨潤圧が発生し^{例えば(8)}、この力が直接、掘削損傷領域に作用すると仮定した場合、緩衝材や埋め戻し材に最も近い場所の掘削損傷領域の DI が最大で 0.3 増加します（岩石の引張強度が 1.8 MPa で、処分孔もしくは坑道の延長方向に平行な力が最も大きいと仮定した場合）。膨潤が発生する前の DI が 0.1～1.5 の範囲の値である場合、DI の曲線の傾き（図 29）により、DI が 0.3 増加するとその場所の割れ目の透水性は 1/4～1/2 まで低下することが推定されます。緩衝材や埋め戻し材に最も近い場所の透水性は一般に掘削損傷領域の中で最も割れ目の開口幅が大きく^{例えば(21)}、割れ目の本数も多い場所に相当することから^{例えば(5)}、掘削損傷領域の透水性を実質的に支配する場所と考えられます。したがって、この場所の透水性が 1/4～1/2 まで低下することは掘削損傷領域の透水性も同程度低下することを意味します。緩衝材や埋め戻し材の膨潤による掘削損傷領域の透水性の変化は、このように DI の変化と図 29 の予測値の曲線から見積もることができ、予測値の曲線の信頼性あるいは適用性は今回実施したような段階注水試験（あるいは注水試験）を行うことで確認することができます。

図 29 に示す予測値の曲線は膨大な試験データとシミュレーション結果から導き出される透水性と DI の間の平均的な関係を表すものであるため、図 29 の予測値の曲線に基づく透水性の変化の推定は、その変化の幅の期待値を推定することになります。掘削損傷領域の個々の割れ目について、その位置や諸特性が特定できる場合は、以下の式⁽¹⁾を掘削損傷領域の個々の割れ目に適用することにより、掘削損傷領域の透水性の変化を具体的に推定することも可能です。

$$e = E^2 / JRC_0^{2.5} \quad (\text{この式の } e \text{ と } E \text{ の単位は } \mu\text{m}、e > E \text{ となる場合は } e = E \text{ とします})$$

$$E = E_0(1 + bDI/0.2899)^{-1}$$

ここで、 e は割れ目の水理学的開口幅（割れ目の透水性）、 E は割れ目の力学的開口幅（割れ目内の物理的な隙間の大きさ）、 JRC_0 は 10 cm スケールでの割れ目表面の粗さを表す数値（通常は 0～20 の範囲の値を取り、値が大きいほど面が粗いことを示します）、 E_0 は初期開口幅（割れ目面に垂直にかかる力が無視できるほど小さい時の割れ目の力学的開口幅）、 b は割れ目の方向性

に依存する係数（通常は 0.5～1.5 の範囲の値）を表しています。これらの諸特性は段階注水試験やボーリングコア観察、孔壁観察を行うことにより推定可能であり^(1, 4)、個々の割れ目の透水性の変化量は図 29 のシミュレーション結果に示すように推定することができます。このような個々の割れ目の透水性の変化量を足し合わせるにより、掘削損傷領域の透水性の変化量を求めることができます。

坑道埋め戻し後の掘削損傷領域の透水性は緩衝材や埋め戻し材の膨潤によって DI の増加とともに低下する可能性がある他、掘削損傷領域の割れ目がずれることにより増加する可能性もあります。図 29 の予測値はこのような可能性を既に考慮した値となっており、割れ目のずれによって図 29 の予測値を有意に上回る可能性は低いと考えられますが^(1, 20)、割れ目のずれが透水性に与える影響を原位置で確かめる方法として、令和 3 年度に掘削損傷領域割れ目を対象とした樹脂注入試験⁽²¹⁾の適用性を確認しました。この試験で既に生じている割れ目のずれ幅と開口幅の関係を直接観察することにより、割れ目のずれが開口幅（透水性）に与える影響を評価することができます。試験坑道 3（図 28 参照）で実施した既往の試験結果を検討した結果、割れ目のずれ幅の増加に伴う開口幅の変化はほとんど確認されませんでした。このことはシミュレーションでも確認することができました。したがって、今後、割れ目がずれたとしても開口幅（透水性）は増加しないと推定できます⁽²¹⁾。掘削損傷領域の割れ目のずれが開口幅（透水性）に与える影響は、このように掘削損傷領域割れ目を対象とした樹脂注入試験を行うことにより評価することが可能です。

令和 2 年度から 3 年間にわたり、坑道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤が掘削損傷領域の透水性に与える影響の評価手法を構築するために、既往の試験結果を用いた机上検討を行ってきました。その結果、坑道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤による掘削損傷領域の透水性の変化は、推定される DI の変化と図 29 に示す予測値の曲線⁽¹⁾から見積もることができ⁽⁵⁾、この曲線の信頼性あるいは適用性は掘削損傷領域の割れ目を対象とした段階注水試験⁽⁴⁾や樹脂注入試験⁽²¹⁾を行うことにより確認できることが分かりました。掘削損傷領域の透水性の変化は、個々の割れ目の透水性の変化量を参考文献(4)や参考文献(21)で行ったシミュレーションの方法により評価し、それらを足し合わせるにより推定することも可能です。これらにより、坑道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤が掘削損傷領域の透水性に与える影響を評価する手法を整備することができ、所期の目標を達成することができました。

今後は、付録の令和 2 年度以降の研究工程に示すとおり、「坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」を実施する中で、情報の不足などがあった場合に追加で試験や解析を実施します。

7 令和2年度以降の必須の課題への対応に必要なデータ取得

令和2年度以降、人工バリア性能確認試験や物質移行試験などの処分システムの設計・施工や安全評価に関わる基礎情報、例えば、岩盤の水の流れやすさや岩石の鉱物組成や化学組成、地下水のpHや酸化還元電位^{*}、化学組成などのデータの取得などについては、令和2年度以降の必須の課題への対応に必要であることから、引き続き必要最低限のデータを取得し、処分システムの設計・施工や安全評価に関する研究を行う試験場所の地質環境特性を明確にし、それらの手法の評価に用いることになります。なお、処分システムの設計・施工手法や安全評価手法の信頼性を確認するために必要となるデータが取得できているかを含めて評価することが必要であるため、計測手法の妥当性を確認し、必要に応じて調査技術・機器の改良を行います。

令和4年度におけるデータ取得例として、350m調査坑道に設置している水圧・水質モニタリング装置を用いて取得された物理化学パラメータ（pHや酸化還元電位、圧力など）のモニタリング結果を示します。地下水のpHや酸化還元電位などの物理化学パラメータについては、大気中の酸素との接触や圧力の低下などの影響を低減させた原位置の地下水の値を取得する必要があるため、令和2年度以降も水圧・水質のモニタリングを継続しています。ここでは人工バリア性能確認試験の試験箇所周辺のボーリング孔に設置した水圧・水質モニタリング装置から得られた地下水圧のモニタリング結果を示します（図30）。水圧については、採水やメンテナンスに伴う変化を除き、大きな変動はみられませんでした。

令和5年度は、地質環境特性データとして、既存のボーリング孔や140m、250mおよび350m調査坑道を利用した地質構造・岩盤の水理・地下水の地球化学・岩盤力学に係るデータ取得などを継続するとともに、掘削工事に伴い取得されるデータについても活用します。地質構造に関しては、ボーリング調査や坑道掘削時の壁面観察で得られた地質データに基づいた地層および割れ目の空間的分布に関する特徴の整理を継続します。また、令和2年度以降の必須の課題の目的に応じて、地質構造や水理の特徴を踏まえた水理地質構造モデル^{*}を構築します。岩盤の水理に関しては、坑道掘削後の地質環境の変化を把握するため、地上から掘削された既存のボーリング孔での水圧観測を行います。地下水の地球化学に関しては、既存のボーリング孔を対象に地下水の採水調査を行うとともに、地下水の水質分布や水質の時間的な変化を把握します。また、坑道掘削の影響については、地表や坑道に設置した高精度傾斜計^{*}および坑道に設置した地中変位計などを用いて、岩盤の微小な変形の観測を継続します。さらに、地震に伴う地質環境特性の変化に関わるデータ取得のため、上幌延観測点（HDB-2）と地下施設での地震観測を継続します。

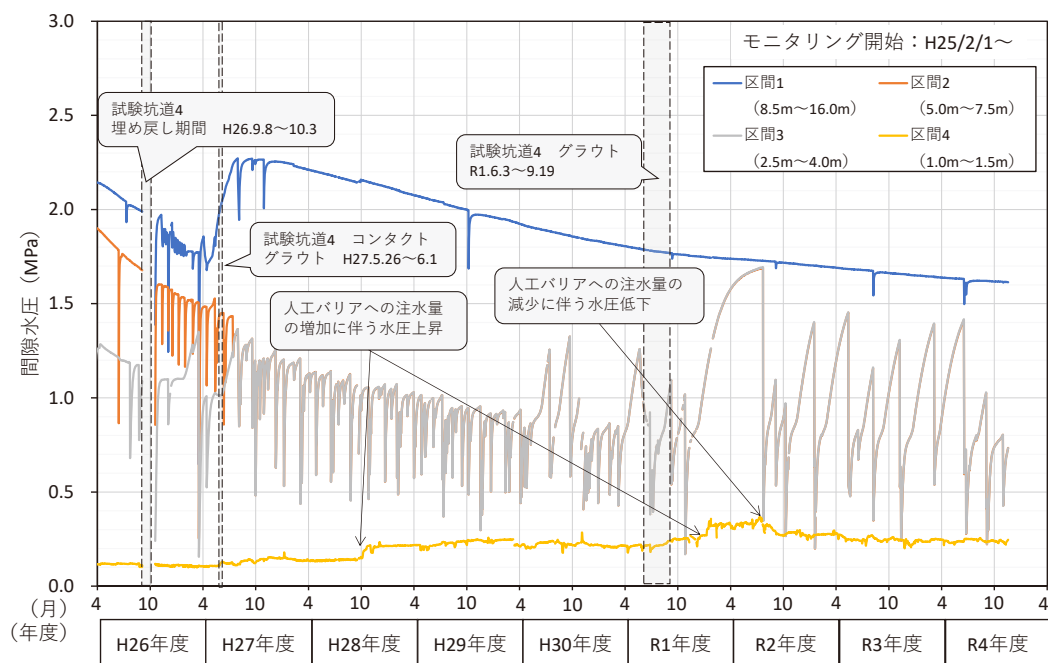


図 30 人工バリア性能確認試験の試験箇所周辺のボーリング孔（13-350-C08 孔）における水圧の経時変化

8 地下施設の建設・維持管理

令和 5 年度は、掘削工事を再開し、350m 調査坑道の拡張として、2 本の試験坑道およびボーリング横坑の掘削を行うとともに（図 6 参照）、深度 500 m に向け、換気立坑から順次掘削を開始する予定としています（西立坑は令和 5 年度は掘削準備、表 4）。また、湧水抑制のための調査を行い、必要に応じて対策を行います。なお、掘削を含めた地下施設の整備については、合理化・効率化の観点から PFI（Private Finance Initiative）※を活用した民間活力の導入を図ります。

坑道掘削に際しては、各種計測工を行うとともに、速やかに支保を構築し、坑道周辺の岩盤の安定性を保持しながら掘削を進めます。支保の選定は、そこで得られる岩盤の力学性状などの情報を適宜設計に反映したものとします。なお、研究所用地およびその周辺の地下には、メタンを主成分とする可燃性ガスが存在しているため、掘削切羽近傍においては、防爆仕様の機器の採用や、ガス濃度の監視などにより防爆対策を行いながら掘削を進めます。

坑道掘削により発生した掘削土（ズリ）は、用地内に仮置きしたのちに掘削土（ズリ）置場に搬出します。なお、掘削土（ズリ）については有害物質の含有量および溶出量を定期的に確認します。

坑道掘削に伴って発生する排水および掘削土（ズリ）置場の浸出水は、これまでと同様に、排水処理設備においてホウ素および窒素などを取り除いた後、排水管路によって天塩川に放流します。

表 4 掘削工事のスケジュール（令和 5 年度）

	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期
350m調査坑道	準備 掘削			仕上げ
換気立坑	準備 掘削			
東立坑	準備 掘削			
西立坑				準備

9 環境調査

地下施設からの排水などの水質調査および研究所用地周辺の環境影響調査を実施します。

9.1 排水量および水質調査

排水処理設備から天塩川へ放流している排水量について監視を行うとともに、排水処理前後の水質、天塩川の水質、浄化槽排水の水質について調査を行います。また、掘削土（ズリ）置場の環境への影響を監視するため、清水川および掘削土（ズリ）置場周辺の地下水についても水質調査を行います（図 31）。



(a) 天塩川の水質調査



(b) 掘削土（ズリ）置場周辺での水質調査

図 31 水質調査の様子

9.2 研究所用地周辺の環境影響調査

研究所用地周辺の環境影響調査として、清水川の水質および魚類を対象に調査を実施します（図 32）。



(a) 清水川の水質調査



(b) 清水川の魚類調査

図 32 環境影響調査の様子

10 安全確保の取り組み

調査研究に関わる作業の実施にあたっては、安全確保を最優先とした取り組みを行います。具体的には、作業計画時における安全対策の確認を徹底するとともに、作業者に対する安全教育や訓練の実施、定期的な安全パトロールなどを通じて安全確保に努めます（図 33）。



図 33 安全パトロールの様子

11 開かれた研究

幌延深地層研究計画で実施する地下深部を対象とした研究は、地球科学の幅広い分野にわたり、学術研究の発展にも寄与します。このため、国内外の大学・研究機関との研究協力を積極的に行うとともに、国際交流施設*などを利用して国内外の専門家と意見・情報交換を行いながら研究を進めていきます。また、幌延深地層研究センターの施設や研究フィールドを国内外の関連する研究機関に広く開放していきます。

経済産業省資源エネルギー庁などが進めるプロジェクトなどに協力していきます。研究開発を進めるにあたっては、当初の計画の研究対象の範囲内において国内外の機関との協力を進めます。

地層処分や研究開発に関する国民との相互理解を促進するため、幌延深地層研究センターのホームページ*¹⁵での情報発信、ゆめ地創館*における地下深部での研究の紹介および地下施設の見学会などによる研究施設の公開を進めていきます。また、令和2年度から幌延町広報誌「ほろのべの窓」の誌面をお借りして毎月連載している研究内容を紹介する記事については、令和5年度も継続して行います。

11.1 国内機関との研究協力

○北海道科学大学

AI 技術を活用した画像認識による坑道壁面の地質判読に関する研究

○東京大学

地下研究施設原位置における核種移行への有機物影響に関する研究

微生物を指標とした堆積岩中の水みち調査手法の開発

○名古屋大学

炭酸カルシウムのコンクリーション化による地下空洞掘削影響領域および水みち割れ目の自己シーリングに関する研究

○京都大学

水質形成機構のモデル構築および数値解析に関する共同研究

○京都大学、東北大学

地下水中の微量元素と有機物を対象とした地球化学研究

○幌延地圏環境研究所*¹⁶

堆積岩を対象とした岩盤力学や微生物などに関する研究

○産業技術総合研究所

海陸連続三次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータ取得手法の高度化

○電力中央研究所*¹⁷

地下微生物とニアフィールド構成材料の相互作用に関する研究

*15：幌延深地層研究センターホームページ；<https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/>

*16：幌延地圏環境研究所は、公益財団法人北海道科学技術総合振興センターが設置した研究所であり、国の補助を受けて、幌延深地層研究センターの施設や設備を活用した地下空間利用を中心とする研究を実施しています。

*17：一般財団法人電力中央研究所は、電力技術の専門研究機関として設立されました。電力技術の研究として、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を実施しています。

実地下水中のコロイドへの核種の収脱着メカニズムに関する研究（原子力機構 核燃料サイクル工学研究所が実施する共同研究への協力）

○原子力規制庁

放射性廃棄物処分坑道の閉鎖措置確認に向けた掘削損傷領域およびベントナイトの透水性に関する研究（原子力機構 安全研究センターが実施する共同研究への協力）

○深田地質研究所、東京大学

断層中のメタンガス高精度検出に関する共同研究（原子力機構 東濃地科学センターが実施する共同研究への協力）

○大林組

光式 AE 計測を用いた坑道周辺のモニタリングに関する研究

上記の他、他の大学や研究機関などとの研究協力を進めます。また、原子力や地層処分に関する人材育成のための講習やトレーニングの企画に協力します（図 34）。



図 34 国際原子力人材育成イニシアティブ事業※での実習の様子

11.2 国外機関との研究協力

○幌延国際共同プロジェクト（Horonobe International Project : HIP）

令和 2 年度以降の必須の課題のうち、実際の地質環境における人工バリアの適用性確認および処分概念オプションの実証に関わる以下の 3 つのタスクを設定しています。

タスク A：物質移行試験

タスク B：処分技術の実証と体系化

タスク C：実規模の人工バリアシステム解体試験

具体的には、各タスクの実施計画案を策定し参加機関による管理委員会において説明するとともに詳細化を図ります。タスク A では、250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑（図 5 参照）

から掘削したボーリング孔を利用し、声間層を対象とした物質移行モデルの構築に必要な水理地質構造などに関する情報を取得します。タスク B では、500m 調査坑道における試験に先立ち、断層/割れ目からの湧水や掘削損傷領域の発達に関する既存情報の収集・整理を行い、500m 調査坑道において想定される状況などについて検討します。また、廃棄体・人工バリアの定置、坑道の閉鎖、廃棄体の回収などの一連の操業技術の実証に向けて、関連情報の調査・整理や要素技術の試験などを行います。タスク C では、人工バリア性能確認試験でこれまで取得してきた情報をもとに、解体調査で取得する試料の配置や分析方法など、解体調査の詳細化に向けた検討を行います。

○DECOVALEX

人工バリア性能確認試験で取得中の原位置データや同試験に関わる室内試験データを対象とした共同解析、解析結果に関する情報交換など

○モンテリ・プロジェクト^{*18}（スイス）

オパリナス粘土層の摩擦特性試験など

○クレイクラブ（Clay Club）^{*19}

様々な粘土質媒体の特性の比較、粘土の物性や挙動および地下施設で実施される試験に関する情報交換など

○環太平洋地域における地下研究施設（URL）を活用した国際協力

各機関が課題とするテーマについて情報交換、解析技術の検討など

上記の他、国外の研究機関などとの研究協力や地下施設における原位置試験などに関わる情報交換を進めます。また、韓国の研究者を対象として、地下施設で行っている調査研究の体験を目的とした実務トレーニングを行います。

^{*18}：堆積岩を対象とした地層処分研究に関する国際的な原位置試験プロジェクトです。スイスのモンテリ岩盤地下研究所内において地層処分に関連する各種の原位置試験を実施しています。

^{*19}：Clay Clubは、経済協力開発機構/原子力機関（OECD/NEA）の放射性廃棄物管理委員会の下に置かれたプロジェクトの1つです。地層処分の実施・規制・研究機関を中心とした組織であり、様々な粘土質媒体の特性の比較や粘土の物性や挙動および地下施設で実施される試験に関する技術的かつ科学的情報の交換、ならびに、サイト特性調査技術の詳細な評価を実施しています。

12 用語集

【英数字】

DECOVALEX（デコバレックス）

DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments（連成モデルの開発とその実験結果との検証）の略称で、地層処分システムの性能評価において重要な課題の1つである熱－水理－力学－化学連成挙動モデルの開発・確証を目的とした国際共同研究です。

HotBENT（ホットベント）

High Temperature Effects on Bentonite Buffers（ベントナイトへの高温の影響）の略称で、150℃を超える高温環境がベントナイトの緩衝材としての機能に与える影響を評価するための原位置試験です。スイスのグリムゼル原位置試験場で実施されています。

‰（パーミル）

1,000 分の 1 を 1 とする単位で千分率とも呼ばれます。1‰=0.001（0.1%）です。

PFI

Private Finance Initiative（民間資金等活用事業）の略称です。公共施設などの建設、維持管理、運営などを民間の資金、経営能力、技術的能力を活用することで、国や地方公共団体などが直接実施するよりも効率的かつ効果的に事業を実施するための方策です。

【か行】

解析コード

連成現象をモデル化し、コンピュータを用いて温度や間隙水圧などの評価項目の挙動を解析するプログラムのことです。

回収可能性

地層処分において、処分坑道に放射性廃棄物を埋設した後においても、処分場の閉鎖までの間に何らかの理由でその取り出しが望まれた場合に、それを取り出し、搬出する一連の行為が実現可能であることを言います。

回収方法

地層処分において、処分坑道に放射性廃棄物を埋設した後においても、何らかの理由でその搬出が望まれた場合にそれを搬出することを回収と言います。その回収方法として、機械的方法や高水圧などを利用して埋め戻し材を除去する方法が想定されています。

化石海水

地層の堆積時に地層中に取り込まれた海水が地質学的な長い時間をかけて変質した古海水のことです。化石海水が存在する場所は、地下水の流れが非常に遅いと考えられ、物質の移動が非常に遅く地層処分に適した場所と考えられます。

カルサイト

方解石とも呼ばれる鉱物の一種で、炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）からなる結晶です。

乾燥密度

乾燥密度とは、ある体積に含まれる土粒子のみの質量を考えた場合の密度のことを言います。

希土類元素

希土類元素は、原子番号 21 のスカンジウム (Sc) と 39 のイットリウム (Y) に、原子番号 57 のランタン (La) から 71 のルテチウム (Lu) までの 15 元素を合わせた 17 元素の総称です。レアアースとも呼ばれます。希土類元素は、高レベル放射性廃棄物に含まれるウランなどと同様の化学的性質を示すことから、希土類元素を使用した試験を行うことで、高レベル放射性廃棄物に含まれる元素の移行挙動などを知ることができます。

掘削損傷領域

岩盤が掘削により損傷し、初期の性質から変化する領域のことで、坑道の周りに形成されます。具体的には、地下空洞掘削時の周辺岩盤に生じる応力集中の影響で坑道周辺岩盤に割れ目が発達することにより、岩盤の変形特性が変化したり透水性が増大したりします。また、空気の侵入により地下水の酸化還元電位などの化学的な変化が生じます。なお、掘削損傷領域を含むより広い領域で坑道への地下水排水などにより地下水圧が低下する領域のことを掘削擾乱領域といい、掘削擾乱領域では坑道埋め戻し後、低下した地下水圧が元の状態に回復すると想定されます。掘削損傷領域および掘削擾乱領域は、広義に掘削影響領域と表現されます。

経験式

理論的根拠は明らかではないが、実験や観測などによる実測値から導かれた関係を数式で表したものです。

原位置試験

試料を採取して行う室内試験に対して、実際の地下環境下で行う試験のことです。

減熱過程

人工バリアを構成するガラス固化体は、処分孔に設置した当初は発熱しており、時間の経過とともに発熱量が低下し、温度が下がっていきます。緩衝材の外側は、地下水の浸潤にともなって飽和度が上昇しますが、緩衝材の内側は発熱の影響により飽和度は低下します。温度が下がれば、地下水が緩衝材に入りやすくなり、時間の経過とともに緩衝材の内側まで地下水が浸潤します。このような熱と地下水の浸潤という同時並行的に生じる現象を原位置試験で再現するために、人工バリア性能確認試験では加熱過程、減熱過程の試験を行っています。

高精度傾斜計

通常の傾斜計が測定できるのは 3,600 分の 1°程度であるのに対し、約 1 億分の 6°の傾斜量を計測することができる非常に計測精度の高い傾斜計です。微小な地殻変動を捉えるために用います。

坑道スケール

実際の処分場では、地下深くに多数の坑道が掘削されます。これらの坑道がお互いにどのような影響を及ぼし合うかを検討するために必要な範囲のことを指します。

国際原子力人材育成イニシアティブ事業

文部科学省による原子力分野の幅広い人材育成を目的とした公募事業で、東京工業大学、東北大学、北海道大学などが令和 2 年度から令和 8 年度まで実施するものです。

参考 文部科学省

https://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/1419734_00001.htm (参照:2023 年 9 月 1 日)。

令和 4 年度の実習について (ANEC 北海道大学拠点)

<https://caren.eng.hokudai.ac.jp/anec/event/391/> (参照 : 2023 年 9 月 1 日).

国際交流施設

国内外の研究者の交流活動の拠点および地域の皆様との交流を目的とした施設です。

<https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/kokusai/introduction/introduction.html> (参照 : 2023 年 9 月 1 日).

コロイド

大きさが 1 nm~1 μ m の粒子が水などの液体中に浮遊し、容易に沈まない状態を指します。コロイドが地層中の放射性核種の移行に影響を及ぼすことが分かっています。

【さ行】

酸化還元電位

地下水の酸化還元状態を表します。酸化還元電位が低い地下水ほど含まれる酸素が少なく還元状態であることを表します。

酸素・水素同位体比

水は酸素原子および水素原子から構成されていますが、水素および酸素の中には重さの異なる原子 (同位体) が存在します。重い酸素および軽い酸素の割合を酸素同位体比、重い水素および軽い水素の割合を水素同位体比と言います。

支保 (工)

地下空間の安定を保つために設ける、ロックボルト、鉄骨、コンクリートの壁などの構造物です。

収着

地下水中有る元素が、岩盤などに取り込まれる現象です。

処分概念オプション

処分概念オプションとは、地下深くの岩盤中に高レベル放射性廃棄物を埋設するという、地層処分の概念を実現するための色々な方法のことです。例えば、廃棄体や人工バリアを豎置きにするのか横置きにするのか、人工バリアの 1 つである緩衝材をブロックで積み上げるのか現場で固めるのか、といった処分方法、埋め戻し方法の違いおよび搬送定置・回収方法などについての選択肢のことを指します。

シリカセメンテーション

シリカ含有鉱物が高温環境などで溶解し、別のシリカ鉱物として再沈殿する現象のことです。シリカセメンテーションが生じた緩衝材では、可塑性 (固体に力を加えて変形させた後、力を取り去っても元に戻らない性質) や膨潤性の低下などが認められることがあります。

人工バリア

ガラス固化体、オーバーパックおよび緩衝材からなる地層処分システムの構成要素のことで、高レベル放射性廃棄物が人間の生活環境に影響を及ぼさないようにする障壁として、人工的に形成するものです。

水圧擾乱試験

注水により断層内の水圧を上昇させ断層をずらす試験を指します。試験の前後で断層の水理特性に与える影響を確認します。

水理学的連結性

地下水の流れを評価する上で、断層や割れ目の中の隙間のつながり具合を水理学的連結性といいます。岩盤の中には、大小さまざまな断層や割れ目が存在し、これらは独立して存在したり、他とつながって存在したりします。岩盤の中での地下水の流路は、断層や割れ目内の隙間が主なものですが、隙間が広くつながっており、流路として機能する場合には、水理学的連結性が高いと表現します。一方、断層や割れ目内の隙間が一部でしかつながっておらず、地下水の流路としては機能しない場合には、水理学的連結性が低いと表現します。

水理地質構造モデル

地質構造の分布や形状に合わせて透水係数などの水理学的なデータを与えて、岩盤の水理特性を二次元的または三次元的な図や数式などを用いて表現したものです。

【た行】

堆積岩の緩衝能力

地殻変動（隆起侵食）や地震動の影響により擾乱を受けた断層や割れ目の透水特性が一定の範囲に留まろうとする能力、あるいは時間経過とともに元の状態に戻ろうとする能力のことです。

ダクティリティインデックス (DI)

岩石の強度・応力状態を示すために新たに定義した指標であり、この値が高いほど、岩石は見かけ上、やわらかくなります。岩盤にかかる平均有効応力（岩石に実際にかかる平均的な負荷応力）をその健岩部の引張強度（岩石の引っ張り破壊に対する強度）で除した値で定義されます。

多相流解析

岩盤中を流れる流体の流動シミュレーションにおいて、水の流れだけではなく、空気や蒸気などの気相の流動も考慮した解析のことです。

弾性波

岩盤の中を伝わる振動のことを指します。地震など自然に発生する振動や人工的に岩盤を叩くなどして人工的に与えた振動が伝わる速度を弾性波速度と呼び、これは岩盤の状態によって変化します。様々な場所での弾性波速度の分布を調べることで坑道周辺の岩盤の状態を知ることができます。

中性化

大気中の二酸化炭素とコンクリート中の水酸化カルシウムなどの成分が反応し、コンクリート中の細孔溶液の pH が低下する現象です。中性化が進むとコンクリート中の鉄筋が腐食しやすくなり、鉄筋が腐食することでコンクリートのひび割れなどが発生し、コンクリート構造物の劣化が進みます。

電磁探査

電磁波を利用して、対象となる岩盤などの電気的特性を観測し、その性質・状態を推定する調査手法です。

透水性

岩盤の水の通しやすさのことです。透水性を表す指標として透水係数が用いられます。透水係数： k は、以下の式で定義され、単位は長さ/時間（m/s）となります。

$$Q = kAh/l$$

ここで、 Q ：流量（ m^3/s ）、 A ：断面積（ m^2 ）、 h ：水頭差（m）、 l ：長さ（m）を表します。

トモグラフィ

トモグラフィ調査は、調査対象の範囲内の物性値（速度、比抵抗など）の分布を断面として可視化する物理探査手法です。

トレーサー

地下水中に溶存する物質が地層中を移行する際の経路や収着・拡散といった挙動などを調査するために、地下水に添加する物質をトレーサーと呼びます。幌延深地層研究計画では、トレーサーとしてウラニン（蛍光染料）やヨウ素などを用いています。これらは、いずれも放射性物質ではありません。なお、幌延深地層研究計画では放射性のトレーサーを用いた試験を行うことはありません。

【な行】

熱－水理－力学－化学連成現象

地下環境に設置された廃棄体の周辺の緩衝材や岩盤で、廃棄体からの熱、地下水の流れ、緩衝材が膨潤することによって発生する応力や岩盤に作用する応力、地下水と鉱物の反応などによる化学的な変化などが複合的に生じる現象です。

【は行】

暴露試験

材料および製品を特定の環境に暴露し、その環境における材料や製品の化学的性質・物理的性質および性能の変化を調査する試験です。

必須の課題

幌延深地層研究センターでは、地層処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化に向けた基盤的な研究開発を行っています。平成 26 年度に、それまでの研究成果を踏まえて「必須の課題」を設定し、これらの課題を解決すべく、研究に取り組んできました。これらの研究課題に関して令和元年度に研究成果の評価を行い、この「必須の課題」の中で引き続き研究が必要とされたものについて、令和 10 年度までを研究期間として研究に取り組んでいます。

「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画」では、以下の 3 つを研究課題として取り組むこととしており、これらを「必須の課題」と呼んでいます。

- ・実際の地質環境における人工バリアの適用性確認
- ・処分概念オプションの実証

- ・地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

ピットスケール

廃棄体および人工バリアを垂直に設置する、豎置き方式の場合には処分坑道に多数の処分孔（ピット）が掘削されます。これらのピットがお互いにどのような影響を及ぼし合うかを検討するために必要な範囲のことを指します。

比抵抗

岩石の電気の流れやすさを表すもので、一般的には、粘土、シルト岩などは比抵抗が低く（電気が流れやすく）、頁岩、泥岩などは特に低い比抵抗を示す傾向があります。また、砂・礫混じりの地層は比抵抗が高い（電気が流れにくい）傾向があります。

品質保証体系

地層処分における品質とは、人工バリアや埋め戻し材に要求される性能などを指します。これらの品質保証に関する事項を体系的に整理したものを品質保証体系と呼びます。

ベントナイト

モンモリロナイトを主成分とする粘土の一種です。地層処分では、緩衝材や処分坑道の埋め戻し材の原料として用いられ、ベントナイトの膨潤により緩衝材の透水性が低下し、放射性核種が緩衝材に吸着され、移行を抑制する効果があります。

防爆仕様

可燃性ガスが存在または存在する恐れのある場所で電気設備を設置または使用する場合、電気設備が原因となって生ずる爆発や火災等を防止するために、火花などが発生してもガスに引火しないようになっている構造です。

膨出

緩衝材と埋め戻し材に含まれるベントナイトの割合は、緩衝材の方が大きいため、緩衝材の方が地下水と接触した際に膨らむ力が大きくなります。このため、緩衝材と埋め戻し材の境界面では緩衝材が埋め戻し材側に膨らんでいきます。この現象を膨出と呼びます。緩衝材が埋め戻し材側に膨らんでいくことにより、部分的に緩衝材の密度が小さくなり、期待する性能が損なわれる可能性が想定されます。

膨潤

ベントナイトは水と接触すると水を吸って膨らむ性質があり、その現象を膨潤と言います。膨潤しようとするベントナイトを膨らまないように拘束した時に発生する圧力を膨潤圧と言います。

飽和度

土や岩盤などの間隙に含まれる水の体積と間隙の体積との比を表す値です。

【ま行】

モンモリロナイト

モンモリロナイトは、ノートのようなシート（層）状の結晶構造を持つ粘土鉱物であり、通常、それらが折り重なった状態で存在しており、その層間に水分子が入り込むことによって膨潤し

ます。また、層間に陽イオンを取り込む性質があり、放射性核種の移行を抑制する効果があります。

【や行】

ゆめ地創館

幌延深地層研究センターで行われている高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発について、紹介する施設です。

<https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/yumechisoukan/index.html> (参照 : 2023 年 9 月 1 日) .

参考文献

- (1) Ishii, E.: The highest potential transmissivities of fractures in fault zones: Reference values based on laboratory and in situ hydro-mechanical experimental data, *Engineering Geology*, vol.294, 2021, 106369.
- (2) Ozaki, Y., Ishii, E. and Sugawara, K.: Variation in fault hydraulic connectivity with depth in mudstone: An analysis of poroelastic hydraulic response to excavation in the Horonobe URL, *Geomechanics for Energy and the Environment*, vol.31, 2022, 100311.
- (3) Ishii, E.: Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single-borehole investigations, *Water Resources Research*, vol.54, 2018, pp.3335-3356.
- (4) Ishii, E.: Constant-head step injection tests to quantify the stress dependence of fracture transmissivity in an excavation damaged zone: A case study from the Horonobe Underground Research Laboratory, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol.159, 2022, 105229.
- (5) Aoyagi, K. and Ishii, E.: A method for estimating the highest potential hydraulic conductivity in the excavation damaged zone in mudstone, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol.52, 2019, pp.385-401.
- (6) 核燃料サイクル開発機構：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—分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, 1999, 529p.
- (7) 中山雅（編）：幌延深地層研究計画 令和2年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2021-053, 2022, 133p.
- (8) 中山雅（編）：幌延深地層研究計画 令和3年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2022-025, 2022, 164p.
- (9) 炭山守男：土壌埋設鋼材の長期腐食挙動に関する研究(XI), JNC TJ8400 99-042, 1999, 203p.
- (10) 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター：令和3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分にに関する技術開発事業 [JPJ007597] ニアフィールドシステム評価確証技術開発 報告書, 2022.
- (11) 日本原子力研究開発機構：平成24年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発—6ヶ年研究成果の取りまとめ—, 2013.
- (12) 核燃料サイクル開発機構：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—分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999, 703p.
- (13) Ishii, E.: A conventional straddle-sliding-packer system as a borehole extensometer: Monitoring shear displacement of a fault during an injection test, *Engineering Geology*, vol.275, 2020, 105748.

- (14) Ozaki, Y. and Ishii, E.: Verification of the existing hydrogeological model using hydraulic pressure monitoring data during long-term drainage from the Horonobe URL and prediction of the hydraulic response to new excavation of up to a 500-m depth. Proceedings of the 2023 30th International Conference on Nuclear Engineering ICONE30.
- (15) Mochizuki, A. and Ishii, E.: Assessment of the level of activity of advective transport through fractures and faults in marine deposits by comparison between stable isotope compositions of fracture and pore waters, *Hydrogeology Journal*, vol.30, 2022, pp.813-827.
- (16) 望月陽人, 石井英一: 地下深部の岩盤における地下水の流れの有無を水の安定同位体比から判別する, *Isotope News*, no.784, 2022, pp.23-27.
- (17) Ishii, E.: Predictions of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones from rock rheology; Preliminary results, *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, vol.120, no.4, 2015, pp.2220-2241.
- (18) Ohno, H. and Ishii, E: Effect of fault activation on the hydraulic connectivity of faults in mudstone, *Geomechanics for Energy and the Environment*, vol.31, 2022, 100317.
- (19) 日本原子力研究開発機構: 割れ目がずれると割れ目内の隙間（地下水の通り道）はつながるか? —隙間のつながり具合を現場で簡単に調べる試験手法を開発—、令和4年10月26日プレス発表, 2022, <https://www.jaea.go.jp/02/press2022/p22102601/> (参照: 2023年9月1日).
- (20) 日本原子力研究開発機構: 地下深部の割れ目の水の流れやすさに関わる法則性を発見—地層処分における地下調査の効率性の向上などに役立つ新知見—、令和3年12月6日プレス発表, 2021, <https://www.jaea.go.jp/02/press2021/p21120601/> (参照: 2023年9月1日).
- (21) Aoyagi, K., Ishii, E., Chen, Y. and Ishida, T.: Resin-injection testing and measurement of the shear displacement and aperture of excavation-damaged-zone fractures: A case study of mudstone at the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol.55, no.4, 2022, pp.1855-1869.

This is a blank page.

付録

令和 2 年度以降の研究工程

This is a blank page.

1.1 人工バリア性能確認試験

[illegible]

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

1.2 物質移行試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R5の実施内容	研究期間	
					前半	後半
・ 幌延地域に分布する泥岩は層岩（＝健岩部）を対等の構造性の割れ目が分布する。岩盤基盤として知られているため、岩盤基盤（＝健岩部）における拡散および割れ目（掘削損傷領域などの）のくっつきやすさ等の評価手法の検証 ・ 有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に影響を及ぼすことが考えられる ・ したがって、割れ目を有する堆積岩での物質移行経路や形態と物質移行に与える要因（有機物・微生物・コロイド等）を総合的に評価することが必要 ・ そのため、幌延の泥岩を事例として、岩盤基盤部（＝健岩部）および割れ目を対象としたトレーサー試験等を実施し、それぞれ構造の物質移行特性評価手法を構築することが重要 ・ 世界的にも事例が少ない泥岩中での割れ目を対象としたトレーサー試験手法を確立することも重要 ・ あわせて、有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に及ぼす影響を把握することが重要	① 岩盤基盤部（＝健岩部）を対象として、物質移行特性（物質の移動速度や岩盤へのくっつきやすさ等の）の評価手法の検証 ② 割れ目を対象とした物質移行特性（物質の移動速度や岩盤へのくっつきやすさ等の）の評価手法の検証 ③ 泥岩中の割れ目を対象としたトレーサー試験手法の検証 ④ 掘削損傷領域などの人為的な割れ目を対象とした物質移行特性（物質の移動速度や岩盤へのくっつきやすさ等の）の評価手法の検証	④ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立 ⑤ 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行モデル化手法の高度化	④ 掘削損傷領域の物質移行に関するデータ取得 ⑤ 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行試験	④ 過年度の掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の解析評価 ⑤ 有機物、微生物、コロイドが核種移行に及ぼす影響の現象理解の継続、原位置トレーサー試験の継続	前半の5年程度で実施 体系化して取り組む課題（2）処分概念オプションの実証のうち人工エリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施 R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10 ④ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立 体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施 令和6年度までに得られる成果 ○原位置試験データ（非収着性/収着性トレーサー）の取得 ○EDZにおけるモデル化/解析評価手法の提示	
	⑤ 有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に及ぼす影響を把握 ⑥ 割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立	⑥ 割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立	⑥ 過年度に実施した堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むブロックスケール（数m～100m規模）における遅延性能評価手法の整備	⑥ 過年度に実施した堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むブロックスケール（数m～100m規模）における遅延性能評価手法の整備		
	⑤ 有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に及ぼす影響を把握 ⑥ 割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立	⑥ 割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立	⑥ 過年度に実施した堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むブロックスケール（数m～100m規模）における遅延性能評価手法の整備	⑥ 過年度に実施した堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むブロックスケール（数m～100m規模）における遅延性能評価手法の整備		
	⑤ 有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に及ぼす影響を把握 ⑥ 割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立	⑥ 割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立	⑥ 過年度に実施した堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むブロックスケール（数m～100m規模）における遅延性能評価手法の整備	⑥ 過年度に実施した堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むブロックスケール（数m～100m規模）における遅延性能評価手法の整備		
	⑤ 有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に及ぼす影響を把握 ⑥ 割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立	⑥ 割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立	⑥ 過年度に実施した堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むブロックスケール（数m～100m規模）における遅延性能評価手法の整備	⑥ 過年度に実施した堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むブロックスケール（数m～100m規模）における遅延性能評価手法の整備		
	⑤ 有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に及ぼす影響を把握 ⑥ 割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立	⑥ 割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立	⑥ 過年度に実施した堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むブロックスケール（数m～100m規模）における遅延性能評価手法の整備	⑥ 過年度に実施した堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むブロックスケール（数m～100m規模）における遅延性能評価手法の整備		

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「2.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」）に統合して実施する。

「2.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直していく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

2.1 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験

目的・背景・必要性・意義			課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R5の実施内容	前半		後半		研究期間					
処分場の操業（廃棄体の搬送・回収、処分場の閉鎖を含む）に関わる人工バリアの搬送・定置方法などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証を目的として、韓延の地下施設を事例に、原位置試験を実施し、人工バリアの搬送・回収技術及び閉鎖技術を実証する	① 処分場の操業（廃棄体の搬送・回収、処分場の閉鎖を含む）に関わる人工バリアの搬送・定置方法などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術及び閉鎖技術の実証	④ 廃棄体の設置方法等の実証試験を通じた、坑道スケールレベルでの調査・設計・評価技術の体系化	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要業技術と体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するため以下を実施 ④-1 坑道スケールレベルで調査・設計・評価技術の体系化	④-2 先行ボーリングによる地質環境特性調査ならびに工学的対策技術を検討した、地下施設及び人工バリアの設計・評価技術の体系化	④-3 多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術及び処分孔支保技術の整備、緩衝材流出・侵入現象評価手法及び抑制対策技術の整備	④-4 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
							他の研究課題を取り込んで体系化して取り組む課題として、後半の5年程度で実施									
							④-1 坑道スケールレベルで調査・設計・評価技術の体系化									
							④-2 地下施設及び人工バリアの設計・評価技術の体系化									
	② 個別の要素技術の実証試験						④-3 多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術及び処分孔支保技術の整備、緩衝材流出・侵入現象評価手法及び抑制対策技術の整備									
	③ 埋め戻し材、プラグに関する設計手法、製作・施工及び品質管理手法の確立						④-4 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理									

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「2.1.2 坑道スケールレベルで調査・設計・評価技術の体系化」）に統合して実施する。

「2.1.2 坑道スケールレベルで調査・設計・評価技術の体系化」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

[illegible]

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

「2.1.2 坑道スケール〜ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R5の実施内容	研究期間					
					前半			後半		
・ 岩盤中には大小様々な断層が存在するが、小規模なものはいくつかは処分場に埋り込まざるを得ない可能性がある。それらの断層が地震や隆起などの地殻変動の影響を受けた場合に、その透水性がどの程度まで上昇し得るかを検討しておく必要がある。 ・ 断層の透水性は断層の変形様式に大きく依存する。脆性的な変形が起これば断層の透水性は有意に上昇しやすいが、延性的な変形の場合は透水性が上昇しにくい。生じる変形が脆性的か延性的かは、変形時の岩石強度、応力などに依存する。 ・ 本研究では、地殻変動に対する緩衝能力が潜在的に高いことから堆積岩に重点を置き、断層の強変形様式を支配する岩石の強度・応力状態を計測でき、かつマッピング（空間的な分布図を示すこと）が可能なパラメータで指標化することを試みる。そのようなパラメータと断層の透水性の潜在的な上限を関係付けることができれば処分場閉鎖後の断層の透水性について現実的な状態設定が可能となる。 ・ 断層は動いたとしても、その透水性は、地層の力学的な緩衝能力が働くことにより、一定の値を超えない。この現象を定量的に示したい。	①地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力を表現するパラメータ（指標）の提案 ②水圧擾乱試験によるパラメータの有効性の検証	② 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握	断層の幅が数十 cm の断層における地殻変動や坑道掘削に伴う、割れ目における地下水の流れの変化に関連して、堆積岩の緩衝能力（自己治癒能力）を実証するために、以下の検討や試験を実施する ②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握（ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験）	②-1～3 既往の水圧擾乱試験の結果の解析 ②-1～3 DI と断層/割れ目の水理学的連結性の関係に関する解析	R2	R3	R4	R5	R6	体系化して取り組む課題（②）処分概念オプシンの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施 R10
					②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握を追加で試験、解析を実施					
					より大型水圧擾乱大型の断層を対象としミューレ擾乱試験した水圧擾乱の結果と改良モデルを実施し、デバッグモデルの整合性を確認					令和6年度までに得られる成果 ○ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験データの取得
		②-2 DI（ダクティリティインデックス：岩盤にかかると平均応力を引張強度で割った値）を用いた透水性評価の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備			②-2 DIを用いた透水性評価の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備					令和6年度までに得られる成果 ○DIを用いた透水性評価手法の高度化
	②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備				②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備					令和6年度までに得られる成果 ○水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直していく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

3.1.2 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化

目的・背景・必要性・意義		R2以降の課題	R2以降の実施内容	R5の実施内容	研究期間	
意 義		課 題	内 容		前半	後半
・ 地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域に相当と仮定）の分布を把握することは、処分事業における処分場選定の際に有用な情報になり得る。このため、地上からの調査により、化石海水の三次元分布を評価する既存技術の高度化を図る	③ 地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）の調査・評価する手法の確立 ④ 三次元分布を調査・解析・評価する手法の確立	③④ 地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）を調査・評価する技術の高度化	③ 地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）の調査・評価技術の検証	③、④-1 R4までの成果に基づき、物理探査およびボーリング調査によるデータ取得から地球統計学的手法による化石海水領域の三次元分布の推定に至る一連の手法の整理と、これまでに得られた成果の整理・論文投稿や研究開発報告書類の整備	前半	後半
					R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10	体系化して取り組む課題（②処分概念オプシンの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施
					③ 地下水の流れが非常に遅い領域の調査・評価技術の検証	化石海水領域 電磁探査に R3 に掘削したボーリングを把握するより推定したボーリングの延長化による化石海水領域の三次元分布の妥当性を確認するためのボーリング調査を実施 令和6年度までに得られる成果 ○化石海水領域の調査・評価技術の整備・高度化
					④-1 化石海水の三次元分布に係る調査・評価手法の検証	化石海水の三次元分布に係る調査・評価手法の検証 令和6年度までに得られる成果 ○化石海水の三次元分布に係る調査・評価技術の整備・高度化
		④-2 広域スケール（十数 km×十数 km）を対象とした移動解析の結果に基づき古水理地質学的情報が化石海水領域に与える影響を評価するための広域スケールのモデル化・解析手法の整理・文投稿や研究開発報告書類の整備	④-2 広域スケール（十数 km×十数 km）を対象とした移動解析の結果に基づき古水理地質学的情報が化石海水領域に与える影響を評価するための広域スケールのモデル化・解析手法の整理・文投稿や研究開発報告書類の整備	④-2 R4までに実施した水理・物質移動解析の結果に基づき古水理地質学的情報が化石海水領域に与える影響を評価するための広域スケールのモデル化・解析手法の整理・文投稿や研究開発報告書類の整備	前半	後半
					④-2 広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の検証	広域スケール 地球統計学による古水理地質学的情報が化石海水領域に与える影響を評価するための広域スケールのモデル化・解析手法の整理・文投稿や研究開発報告書類の整備 令和6年度までに得られる成果 ○広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の整備
					④-2 広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の検証	広域スケール 地球統計学による古水理地質学的情報が化石海水領域に与える影響を評価するための広域スケールのモデル化・解析手法の整理・文投稿や研究開発報告書類の整備 令和6年度までに得られる成果 ○広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の整備
					④-2 広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の検証	広域スケール 地球統計学による古水理地質学的情報が化石海水領域に与える影響を評価するための広域スケールのモデル化・解析手法の整理・文投稿や研究開発報告書類の整備 令和6年度までに得られる成果 ○広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の整備

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直していく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

3.2.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R5の実施内容	R5の実施内容	研究期間
・地震・断層活動等の地殻変動に対する堆積岩の力学的・水理学的な緩衝能力（自己治癒能力）を定量的に検証し、堆積岩地帯における立地選定や処分場の設計を、より科学的・合理的に行える技術と知見を整備する	① 人工バリアの緩衝材や坑道の埋め戻し材による掘削損傷領域（EDZ）のひび割れ損傷領域（EDZ）の自己治癒能力を評価する手法の確立	② 地殻変動による人工バリアの緩衝材や坑道の埋め戻し材の掘削損傷領域（EDZ）のひび割れ損傷領域（EDZ）の自己治癒能力の実証	人工バリアのひび割れに対する自己治癒能力を実証するため以下の机上検討を実施	R5は実施しない	前半 前半の5年程度で実施	後半 体系化して取り組み課題（②）処分概念オブションの実証のうち人工バリアの定義・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施
	② 人工バリアの自己治癒能力（ひび割れの修復）を実証		人工バリアの緩衝材や坑道埋め戻し材が掘削損傷領域（EDZ）の力学的・水理学的な緩衝能力（自己治癒能力）に与える影響を把握する解析手法の開発 ✓DIを用いたEDZの透水性を予測する既存モデルの再検証		②-1 DIを用いたEDZの透水性を予測する既存モデルの再検証 試料観察に水圧擾乱試EDZの透水基つき、EDZ縁やシミュレーションモデルの整合口状況を定量的に把握を改良	R6 R7 R8 R9 R10 体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施
			✓坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測するモデル構築	R5は実施しない	②-2 坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測するモデル構築 試料観察に坑道埋め戻し材基つき、EDZ後の割れの膨潤圧が割れ目開目のずれがEDZの透水性を定量的に把握影響を確認 手法を構築	体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施
						令和4年度までに得られる成果 ○DIを用いたEDZの透水性を予測する既存モデルの再検証

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組み課題（「2.1.2 坑道スケール〜ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」）に統合して実施する。

「2.1.2 坑道スケール〜ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

