



JAEA-Review

2024-033

DOI:10.11484/jaea-review-2024-033

幌延深地層研究計画 令和6年度調査研究計画

Horonobe Underground Research Laboratory Project
Investigation Program for the Fiscal Year 2024

(編) 中山 雅

(Ed.) Masashi NAKAYAMA

幌延深地層研究センター

Horonobe Underground Research Center

September 2024

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 研究開発推進部 科学技術情報課
〒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 Library, Institutional Repository and INIS Section, Research and Development Promotion Department, 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6年度調査研究計画

日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター

(編) 中山 雅

(2024年6月4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6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」および「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6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、人工バリア性能確認試験のデータ取得を継続するとともに、解体試験計画の具体化や解析課題などに取り組む。また、物質移行試験について、掘削損傷領域を対象とした試験および有機物・微生物・コロイドの影響について取りまとめ、評価手法を整備する。さらに、ブロックスケールを対象とした物質移行について、稚内層深部を事例とした評価手法を取りまとめる。

「処分概念オプションの実証」では、閉鎖技術の実証として、坑道掘削・閉鎖後の地質環境変化に関する調査試験結果などの整理・取りまとめを行うとともに、坑道内から掘削されたボーリング孔の閉塞技術の適用性や技術的な課題について取りまとめる。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、調査・評価手法の整理や解析などを進める。また、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では、令和5年度に開始した原位置試験を継続し、ひと組の試験体を解体して100℃を超える熱履歴を経た緩衝材の特性を確認する。

「実際の地質環境における人工バリアの適用性確認」では、地殻変動が地層の透水性に与える影響、ダクティリティインデックスを用いた透水性の評価手法・隆起侵食の影響の評価手法および水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法について取りまとめる。

地下施設の建設・維持管理では、令和5年度に引き続き東立坑と換気立坑の掘削を行うとともに、湧水対策を実施した後に西立坑および500m調査坑道の掘削を開始する。

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にて「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）について調査研究を継続する。

Horonobe Underground Research Laboratory Project
Investigation Program for the Fiscal Year 2024

(Ed.) Masashi NAKAYAMA

Horonobe Underground Research Center
Japan Atomic Energy Agency
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received June 4, 2024)

The Horonobe Underground Research Laboratory Project is being pursued by the Japan Atomic Energy Agency 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 2024, 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 continue to obtain data from the full-scale engineered barrier system performance experiment, and work on the specifics of the full-scale engineered barrier system dismantling experiment. We summarise the solute transport experiments for the excavation damaged zone and the effects of organic matter, micro-organisms and colloids, and develop the assessment methodology. We summarise the evaluation methodology using the deep Wakkanai Formation as a case study for block-scale solute transport experiments. As for “Demonstration of repository design options”, we summarise the results of investigations and experiments on changes in the geological environment after tunnel excavation and closure, and summarise the applicability and technical challenges of the closure technology for boreholes excavated from tunnels. The systematic integration of technologies towards EBS emplacement, including the organisation of investigation and evaluation methods and analysis, will be promoted. Experiments to confirm the performance of the engineered barrier system under critical conditions, such as high temperatures (>100°C), continue the in-situ tests started in 2023. For the “Understanding of buffering behaviour of sedimentary rocks to natural perturbations”, we summarise the effects of crustal deformation on the permeability of formations, methods for evaluating permeability using the ductility index and the effects of uplift and erosion, and methods of evaluating fault activity using hydraulic disturbance tests.

Concerning the construction and maintenance of the subsurface facilities, excavation of the East Access Shaft and the Ventilation Shaft will continue, while excavation of the West Access Shaft and the 500m gallery will commence following the implementation of groundwater inflow control measures.

In addition, we continue R&D on the following three tasks in the Horonobe International Project; 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 Rocks, Investigation Program for FY2024

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 5 年度の成果および令和 6 年度の計画の概要	6
3.1	令和 5 年度の成果の概要	6
3.2	令和 6 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	17
5.	処分概念オプションの実証	22
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	22
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	31
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
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	39
8.	地下施設の建設・維持管理	41
9.	環境調査	42
9.1	排水量および水質調査	42
9.2	研究所用地周辺の環境影響調査	43
10.	安全確保の取り組み	44
11.	開かれた研究	45
11.1	国内機関との研究協力	45
11.2	国外機関との研究協力	47
12.	用語集	48
	参考文献	54
	付録	55

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 2023 R&D results and fiscal year 2024 R&D plans	6
3.1	Overview of fiscal year 2023 R&D results	6
3.2	Overview of fiscal year 2024 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.....	17
5.	Demonstration of repository design options.....	22
5.1	Demonstration of engineering feasibility of repository technology	22
5.2	Evaluation of engineered barrier system behaviour over 100°C.....	31
6.	Understanding of buffering behaviour of sedimentary rocks to natural perturbations ..	33
6.1	Evaluation of intrinsic buffering against endogenic and exogenic processes.....	33
7.	Acquisition of data necessary for addressing key R&D challenges.....	39
8.	Construction and management of the subsurface facilities	41
9.	Environmental study	42
9.1	Monitoring drainage water and water property	42
9.2	Environmental impact study around the Horonobe Underground Research Center	43
10.	Safety measures	44
11.	Collaboration with other research organizations.....	45
11.1	Domestic collaborations	45
11.2	International collaborations	47
12.	Glossary	48
	References	54
	Appendix.....	55

図リスト

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）	4
図 2	250m および 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所	12
図 3	研究所用地における主な施設と観測装置の配置	13
図 4	ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所	13
図 5	地質断面図	14
図 6	人工バリア性能確認試験の概念図	15
図 7	試験坑道 7 の掘削	16
図 8	人工バリア性能確認試験の計測データの一例	16
図 9	ブロックスケールにおける物質移行のイメージ	17
図 10	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	18
図 11	トレーサー試験の再現解析結果	18
図 12	希土類元素添加試験の装置概念図および試験手順	19
図 13	地下水に添加した希土類元素（La）の濃度変化	19
図 14	深度による溶存有機物の特徴と希土類元素（Eu ³⁺ ）との親和性の違い	20
図 15	ブロックスケールを対象としたトレーサー試験結果の解析例	21
図 16	吹付けコンクリートの変質領域	23
図 17	坑道掘削および埋め戻し後の坑道周辺岩盤の透水性および飽和度変化	24
図 18	試験坑道 6 における弾性波トモグラフィの実施状況	25
図 19	人工バリアやそれを定置する坑道の周辺において想定される地質構造の特徴を示すイメージ図（鉛直断面）	27
図 20	水理・物質移行特性に関わる評価手法を検討するスケールのイメージ図（鉛直断面）	27
図 21	500m 調査坑道の試験坑道 8 および試験坑道 9 における原位置調査のイメージ図	28
図 22	処分場の閉鎖段階のイメージ図	29
図 23	湧水量の減少速度を支配するメカニズムを表す概念図	30
図 24	試験孔周辺に発達した掘削損傷割れ目を対象とした透水試験の概念図と割れ目に作用する有効応力と開口幅の関係	30
図 25	試験体設置の様子	31
図 26	X 線 CT を活用した緩衝材試料の湿潤に関する室内試験結果	32
図 27	水みちのつながり方の次元の解析例	33
図 28	地下施設周辺の稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元と DI の関係	34
図 29	割れ目の水理学的連結性と DI の関係	34
図 30	断層に注水した際に生じた断層沿いのずれの方向	35
図 31	化石海水の三次元分布を推定するための電磁探査およびボーリング調査の手順	36
図 32	割れ目水と間隙水のコントラストと地下水の ¹⁴ C 年代に基づき解釈した地下水流動概念	37
図 33	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	39
図 34	水質調査の様子	42
図 35	環境影響調査の様子	43
図 36	安全パトロールの様子	44
図 37	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	46

表リスト

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	5
表 2	令和 6 年度の主な業務の実施内容	11
表 3	試験エリア（図 30）周辺で推定された地圧の状態	35
表 4	掘削工事のスケジュール（令和 6 年度）	41

This is a blank page.

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。このうち、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に該当します。

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、地下施設の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、原子力機

※ このマークがついた用語は、12.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ひとつで、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年間です。

*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核種の濃度が高い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および応用の研究なら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。

構は「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500m）に坑道を展開して研究に取り組むとともに、更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。

幌延深地層研究センターは「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」を、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していきます。

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^{*}）に取り組んでいます（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

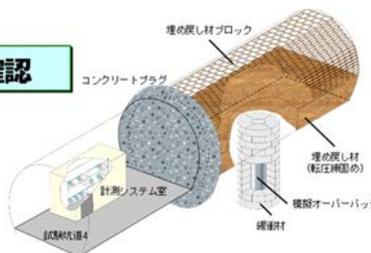
令和元年度までの検討では、まずは小規模な断層（幅数 cm）に着目して試験を行い、断層のずれが断層沿いの地下水の流れに与える影響などを確認しました。これまでの研究開発で手法の妥当性が確認できたため、この手法を使って、処分場の設計・施工や安全評価とリンクした形で研究を進めることが可能となりました。令和2年度以降は、より大型の断層において、断層のずれが断層内の地下水の流れに与える影響に関して、堆積岩の緩衝能力（自己治癒能力）の作用に係る実証試験を実施します。さらに、地下水が動いていない地下環境を調査してモデル化する技術を実証するとともに、人工バリアのひび割れに対する自己治癒能力を解析する手法を開発し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

なお、令和6年度は、令和5年度より開始した500m調査坑道の整備に向けた立坑の掘削を継続するとともに、500m調査坑道の掘削に着手します。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の役割を担っています*7。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

- 人工バリアの位置・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] 位置・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。

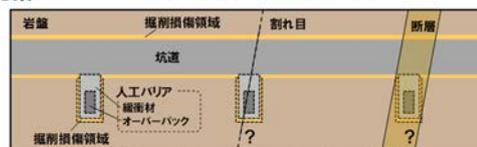


閉鎖技術オプションの整理

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。



廃棄体位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いるため、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。

3. 令和5年度の成果および令和6年度の計画の概要

3.1 令和5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では、廃棄体の発熱が収まった状態を模擬した条件でのデータ取得を継続するとともに、解体調査に向けた準備として試験坑道 7 (図 2 参照) を掘削しました。試験坑道 7 の掘削による計測データへの影響はなく、これまでと同様、緩衝材内側の全応力が地下水の浸潤に伴って緩やかに増加していることが確認できました。国際共同研究 DECOVALEX[※]では、人工バリア性能確認試験のデータを対象に熱-水理-力学-化学連成現象[※]のうち、熱-水理-力学の連成現象を対象とした解析を実施し、室内試験および原位置試験[※]を対象とした各機関の解析結果を比較しました。その結果、等温環境下での地下水の浸潤挙動は室内試験結果と解析結果がよく一致する結果が得られました。一方、温度勾配環境下での地下水の浸潤挙動については計測結果と解析結果が異なる場合があることを確認しました。

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の解析評価を行いました。その結果、一次元の解析モデルを掘削損傷領域の割れ目に適用することにより、堆積岩(泥岩)中の掘削損傷領域の割れ目の移流[※]分散[※]効果を評価できることが確認できました。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を実施し、地下水に添加した希土類元素[※]の濃度変化を観察しました。その結果、原位置環境下で「元素-有機物・微生物・コロイド」の二元系と「元素-有機物・微生物・コロイド-岩盤」の三元系の試験データを取得することができました。さらに、ブロックスケール(数 m~100 m 規模)を対象とした物質移行試験については、稚内層深部の断層を対象としたトレーサー試験の解析評価を行った結果、曲がりくねった非常に長いチューブ状の経路を仮定することによって、水理学的連結性[※]が限定的な物質の移行経路を表現できることが分かりました。

(2) 処分概念オプションの実証

人工バリアの搬送定置・回収技術の実証に関しては、安全な回収作業の実施に向けて処分坑道内の空間の安定性を評価するために、350m 調査坑道の壁面から低アルカリ性の吹付けコンクリートを採取して分析を行いました。その結果、坑道表面から厚さ数 cm、岩盤との接触部から厚さ数 mm において中性化[※]が進行していることなどが分かり、低アルカリ性コンクリート支保工[※]の長期的な物性変化の評価に必要な知見を得て、調査手法を整備することができました。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、坑道の開放期間が坑道埋め戻し後の埋め戻し材の再飽和過程に及ぼす影響の評価を行いました。その結果、透水性[※]が顕著に変化する領域は坑道壁面から 1 m~2 m 程度の範囲であり、坑道が埋め戻されてから 100 年経過後にはこれらの領域を除き周辺岩盤ではほぼ飽和状態に戻ることが分かりました。これまでに実施してきた一連のモデル化・解析により埋め戻し後の地質環境の回復状況を評価できる方法論を整備できました。

閉鎖技術の実証に関しては、埋め戻し材および止水プラグに関する室内試験などを実施するとともに、これまでに得られた試験結果から材料仕様の設定や施工方法の検討などの設計に対する考え方をまとめて設計フローとして整備しました。掘削損傷領域の調査技術の高度化について、令和 4 年度までの結果に基づき、弾性波[※]トモグラフィ[※]を用いた掘削損傷領域調査のための最適

な観測点配置を検討し、令和 5 年度に掘削した試験坑道 6（図 2 参照）においてその観測点配置を適用した弾性波および比抵抗*トモグラフィを実施しました。また、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、令和 4 年度に実施した原位置試験の結果を整理するとともに、ベントナイト*ブロックが膨潤*してボーリング孔を閉塞する過程を理解するための室内試験を実施し、ボーリング孔内で膨潤したベントナイトブロックの乾燥密度*の分布を確認しました。

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*の構築における坑道の埋め戻しに関しては、施工効率の向上が期待できるスクリー工法*などの要素試験を実施し、それぞれの工法に適用可能な材料の配合の範囲や施工品質などに関するデータを取得しました。また、埋め戻し材の施工品質を確認するための計測技術について光ファイバーセンサーの設置方法の検討などを行いました。

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に関しては、令和 4 年度に構築した原位置試験概念に基づき、試験坑道 5（図 2 参照）の既存孔にヒーター、緩衝材ブロックおよび温度や水分分布などを測定するセンサーを 2 組設置し、原位置試験を開始しました。

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

ダクティリティインデックス (DI) *を用いた透水性評価手法の信頼性向上および隆起侵食の影響評価手法の整備を目的として、断層の水理学的連結性と DI の関係に関する解析を行いました。断層の水理学的連結性は断層内の水みちのつながり方の次元*として数値化することができ、次元の値が小さいほど、水理学的連結性が低いことを表します。解析の結果、地下施設周辺の稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元と DI が相関していることが分かりました。このような情報は、断層/割れ目の水理学的連結性と DI の関係を定量的に理解する上で重要となります。また、水圧擾乱試験*による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法の整備を目的として、水圧擾乱試験の結果から原位置の地圧の状態を推定する方法を検討しました。その結果、既往の地圧試験と整合する推定結果を得ることができ、水圧擾乱試験により原位置の地圧の状態を推定できることが分かりました。

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、これまでに得られた成果を踏まえた調査手順の整理を行い、データの一部を研究開発報告書類として公表するとともに、地下水の水質や年代を利用した地下水流動の評価手法を構築し、論文として取りまとめました。産業技術総合研究所*8との共同研究として、これまで把握が困難であった浅海域の地下構造を対象に海上から物理探査を行った結果、探査に用いる音波（弾性波）の発振源を調整することで、より詳細な構造を把握できることが確認できました。また、既存の調査孔を用いた地下温度測定を実施した結果から、当該地域の地下深部の地下水の流れが非常に遅いことを確認することができました。この結果は地下水流動解析の結果と整合しています。

*8：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。

(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 4 年度に引き続き、人工バリア性能確認試験をタスクのひと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 5 年 2 月に開始した幌延国際共同プロジェクト（Horonobe International Project : HIP）^{*9}においては、管理委員会や設定した 3 つのタスクについて参加機関との会合を行い原位置試験の計画などを検討するとともに、現地での打ち合わせを通じて現場の確認などを実施しました。HIP には令和 5 年度末現在、原子力機構を含めて国内外の 11 機関^{*10}が参加しています。

以上のように、令和 5 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 5 年度の調査研究成果報告書に取りまとめます。

*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/04/horonobe/status/hip/project_hip.html)

*10：HIPの参加機関は、原子力機構の他、連邦放射性廃棄物機関（BGE、ドイツ）、英国地質調査所（BGS、英国）、電力中央研究所（GRIEPI、日本）、オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO、オーストラリア）、工業技術研究院（ITRI、台湾）、韓国原子力研究所（KAERI、韓国）、原子力発電環境整備機構（NUMO、日本）、原子力テクノロジー国営会社（RATEN、ルーマニア）、原子力環境整備促進・資金管理センター（RWMC、日本）、国営放射性廃棄物会社（SERAW、ブルガリア）です。

3.2 令和6年度の主な業務内容

(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ついて、データ取得を自動計測機器により継続します。また、HIPのタスク C（実規模の人工バリアシステム解体試験）において解体試験計画の具体化や解析課題へ取り組んでいきます。物質移行試験について、掘削損傷領域を対象とした物質移行試験に関するこれまでの成果の取りまとめを行い、モデル化/解析手法を整備します。有機物・微生物・コロイドの影響評価については、これまでに実施してきた試験の結果を比較しながら整理するとともに、反応時間や有機物濃度などが希土類元素の濃度に与える影響を確認する試験を実施し、有機物・微生物・コロイドが物質移行に与える影響を評価する方法を取りまとめます。また、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、声問層において、新たに製作したトレーサー試験装置の適用性確認を行うとともに、これまでの研究成果を踏まえて、ブロックスケールの物質移行に関する評価手法を取りまとめます。

(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、支保部材の経年変化や坑道掘削・閉鎖後の地質環境変化に関するこれまでの調査試験結果を整理し、取りまとめます。閉鎖技術の実証については、埋め戻し材やプラグなどの長期的な性能の考え方や掘削損傷領域の調査技術の高度化とともに、坑道内から掘削されたボーリング孔の閉塞技術の実証で実施してきたベントナイトブロックの設置方法について、これまでの調査試験結果を整理し、技術的な課題などの観点で取りまとめます。さらに、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、埋め戻し材の施工技術オプションの整備に向けた要素試験などの実施や施工品質管理などに関するデータを取得し、取りまとめを行います。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、(1)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、(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、(3)多連接坑道*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・侵入現象*評価手法および抑制対策技術の整備および(4)廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理の4項目について、調査・評価手法の整理や解析などを行います。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では、令和5年度に開始した原位置試験を継続するとともに、ひと組の試験体を解体して100℃を超える熱履歴を経た緩衝材の特性を確認します。また、緩衝材に浸潤させる水の組成などの条件を変えて室内試験を実施します。さらに、これまでに得られた成果を整理し100℃を超える条件下での人工バリアおよびその周辺に発生する現象ならびに人工バリアにおける上限温度設定の考え方について取りまとめます。

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

過年度に実施した水圧擾乱試験の結果の解析などを行い、断層/割れ目の水理学的連結性とDIの関係や断層の力学的な安定性に関する検討を行います。これらの検討や既往の検討の結果に基づき、地殻変動が地層の透水性に与える影響、DIを用いた透水性の評価手法・隆起侵食の影響の評価手法、および水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法について取りま

とめます。また、地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する方法について、令和 5 年度に引き続きこれまでに得られた結果に基づいて取りまとめを行います。

(4) 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

地質環境特性データとして、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活用します。また、岩盤の微小な変形の観測や地震観測を継続します。

(5) 地下施設の建設・維持管理

換気立坑および東立坑の掘削工事を継続するとともに、西立坑および 500m 調査坑道の掘削を開始する予定です。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。

(6) 環境調査

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。

(7) 安全確保の取り組み

作業員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。

(8) 開かれた研究

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、引き続き大学などとの共同研究を行うとともに、HIP を継続し、研究を進めます。HIP では、設定した 3 つのタスクについて、令和 5 年度に引き続き研究を進めます。さらに、参加機関の理解促進のための現場状況の確認や、研究成果の取りまとめ方針などについて議論するタスク会合を実施します。

令和 6 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表 2 に示します。また、表 2 に示した調査のうち、地下施設での主な調査の実施場所を図 2 に、研究所用地における主な施設と観測装置の配置を図 3 に、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 4 に示します。さらに、図 4 に示した A-A'断面および地下施設周辺の地質断面図を図 5 に示します。

表 2 令和6年度の主な業務の実施内容

実施項目		実施内容	実施場所
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	自動計測機器によるデータ取得の継続	研究所用地、地下施設など
	物質移行試験	掘削損傷領域における物質の移行挙動のモデル化/解析手法の整備、有機物・微生物・コロイドが物質移行に与える影響評価手法の取りまとめ、声間層に分布する割れ目を対象としたトレーサー試験装置の適用性の確認、既存の研究成果を踏まえたブロックスケールの物質移行の評価手法に関する取りまとめ	研究所用地、地下施設など
令和2年度以降の必須の課題	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	支保材材の経年劣化や坑道掘削・閉鎖後の地質環境変化に関する調査試験結果の整理・取りまとめ、坑道内から掘削されたポーリング孔の閉塞技術について適用性や技術的な課題の取りまとめ	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、先行ポーリングによる地質環境特性調査ならびに工学的対策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、多連接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・侵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	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	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℃を超えた状態での原位置試験の継続、試験体の解体および緩衝材の特性を確認する試験分析の実施、緩衝材に浸潤させる水の組成などの条件を変えた室内試験の実施、100℃を超える条件下における現象の整理などの取りまとめ	研究所用地、地下施設など
	水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化	水圧擾乱試験の結果の解析、透水性評価の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の取りまとめ、水圧擾乱試験による断層の活動性(力学的な安定性)の評価手法の取りまとめ、地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する手法の取りまとめ	研究所用地、地下施設など
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、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、上幌延地区など
地下施設の管理		立坑および500m調査坑道の掘削、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

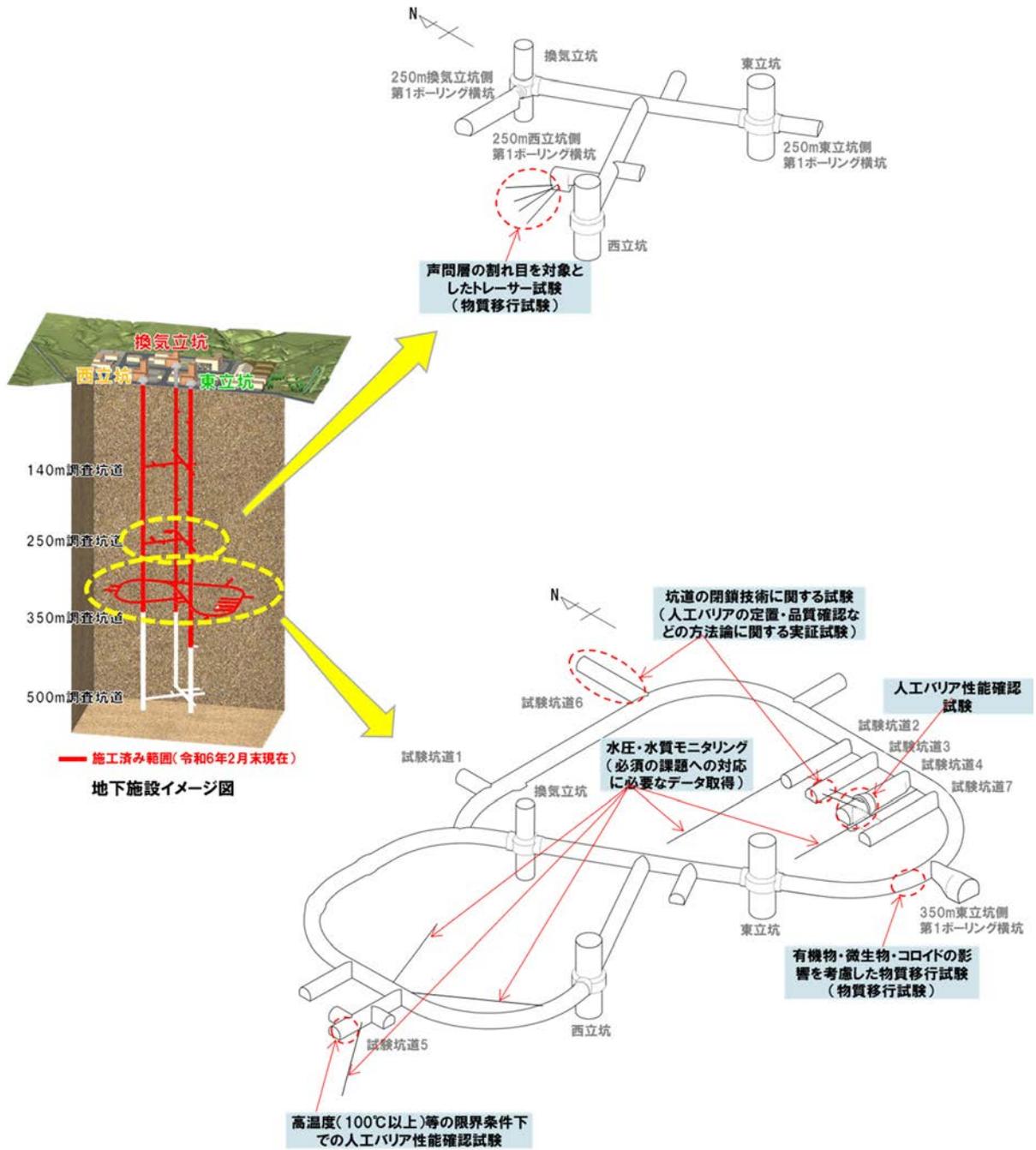


図 2 250m および 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所



図 3 研究所用地における主な施設と観測装置の配置

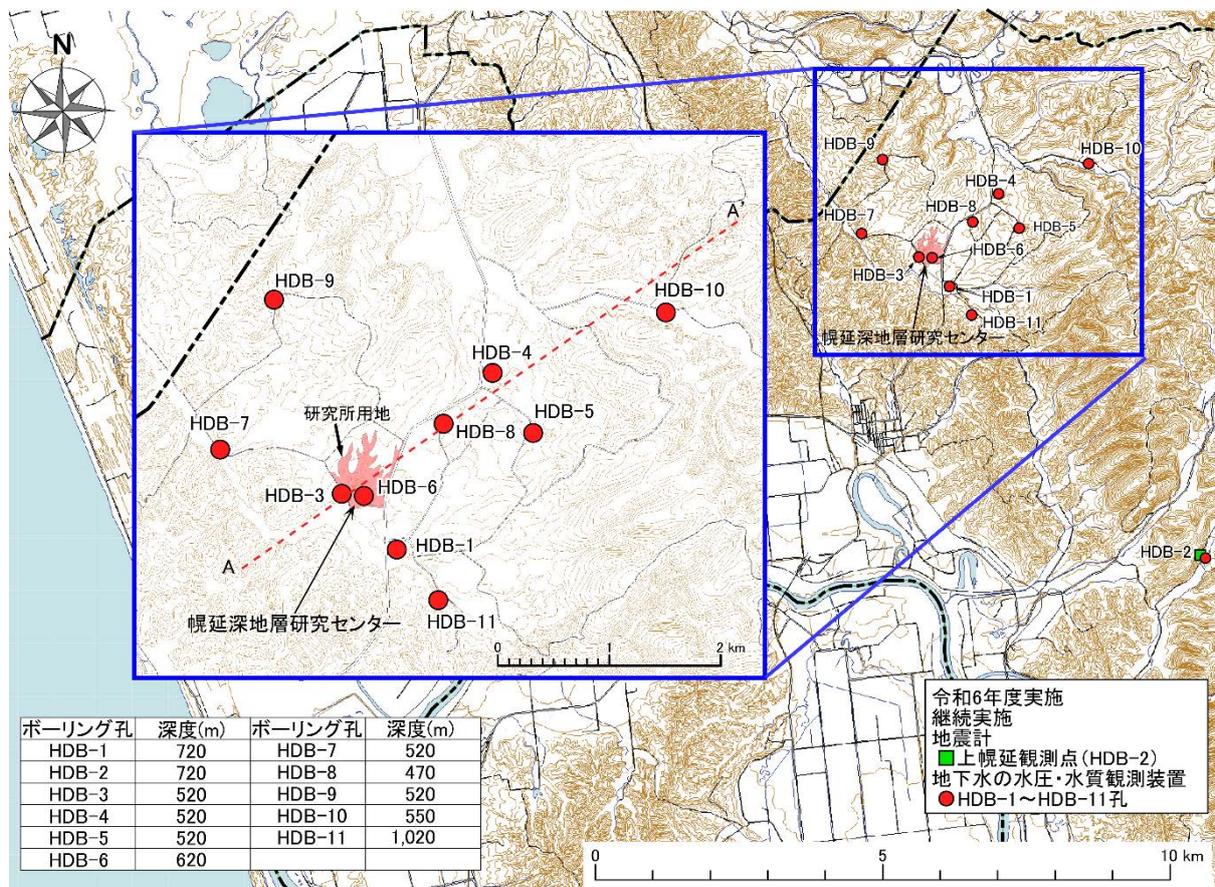


図 4 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所
 国土地理院の基盤地図情報（基本項目）を加工して作成

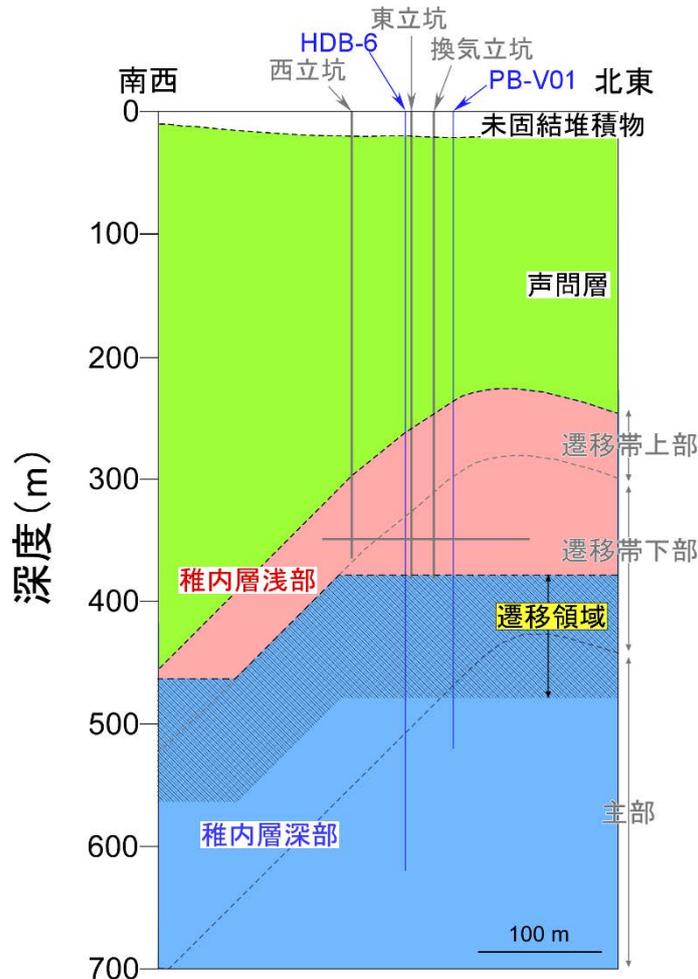
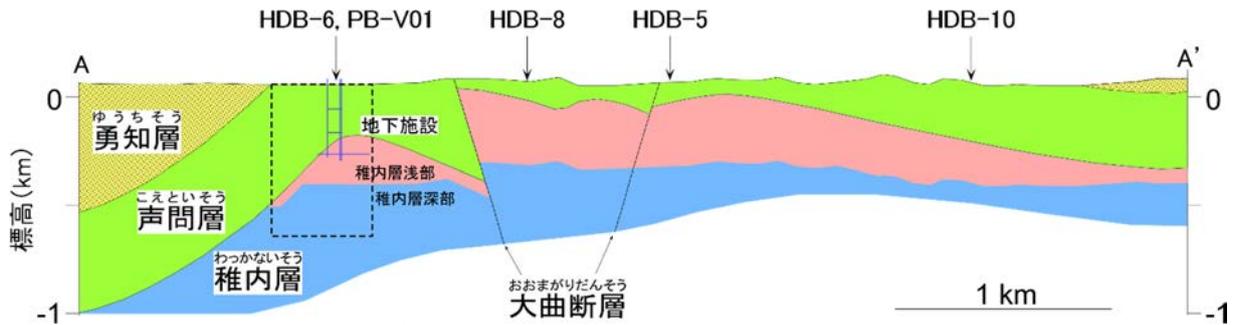


図 5 地質断面図

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5年度は、人工バリア性能確認試験（図6）について、既設の自動計測機器でのデータ取得を継続しました。また、人工バリア性能確認試験の解体調査に向けた準備として、試験坑道4の隣に試験坑道7を掘削しました（図7）。緩衝材中の計測データは、試験坑道7の掘削による影響はなく、温度分布は地下環境下の温度（約23℃）で一定であり、緩衝材内側の全応力は地下水の浸潤に伴い緩衝材が膨潤し、緩やかに増加していることが確認できました（図8）。

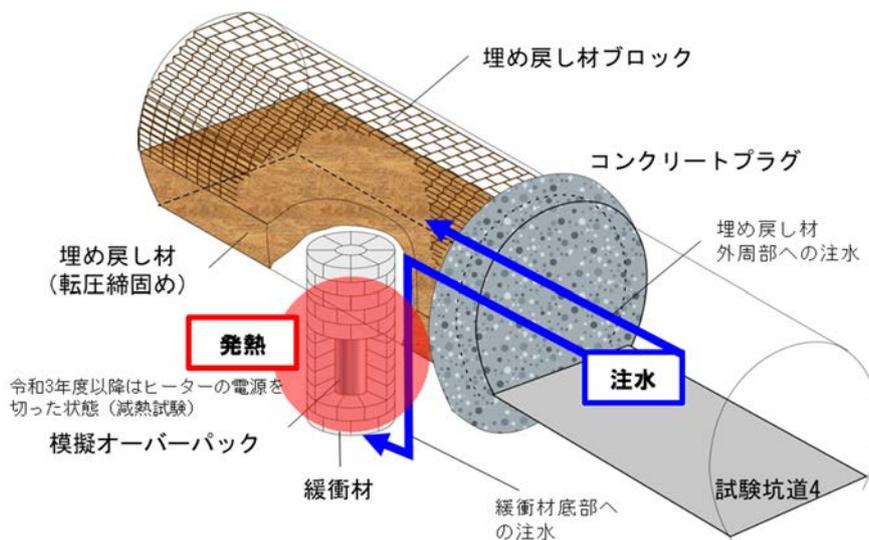


図6 人工バリア性能確認試験の概念図

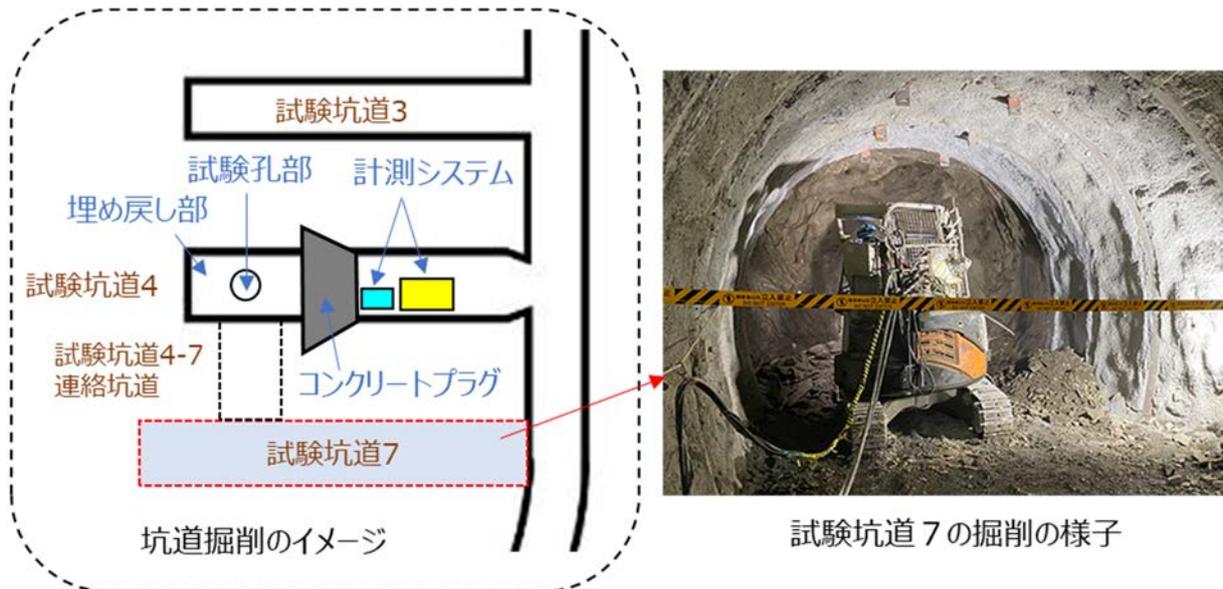
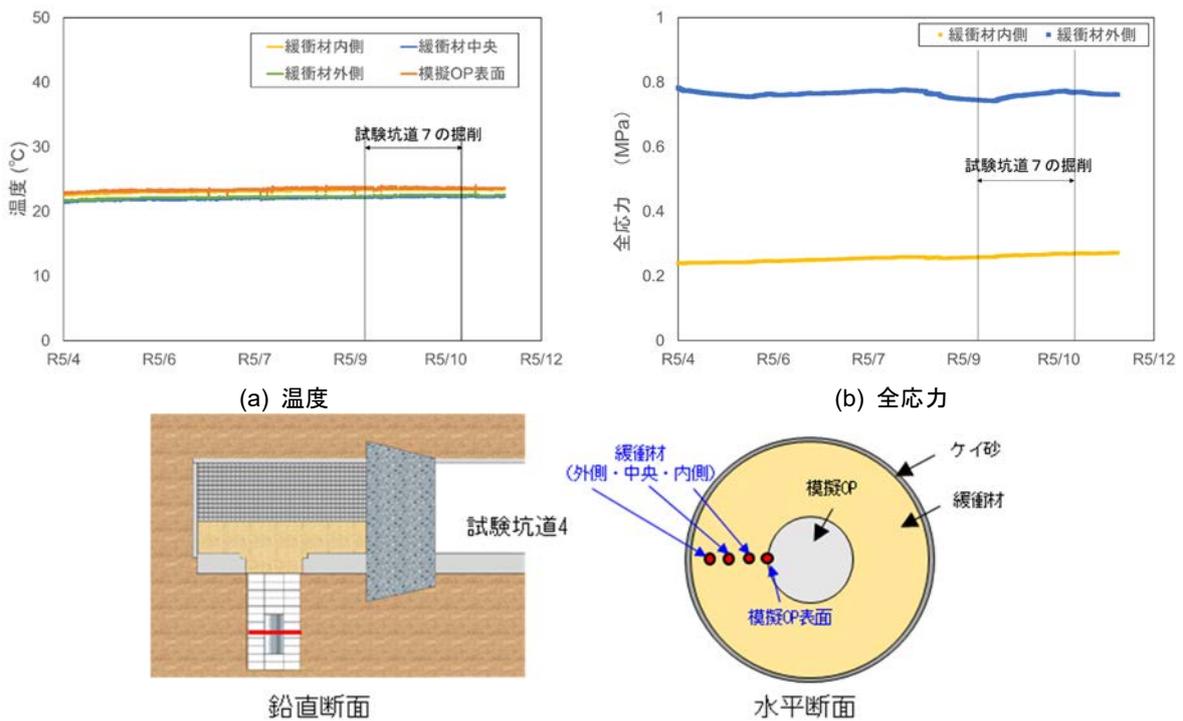


図 7 試験坑道 7 の掘削

試験坑道 7 は人工バリア性能確認試験の試験孔部や埋め戻し部に設置した材料を解体調査で取り出すために使用します。なお、試験坑道 4-7 連絡坑道は解体調査直前に掘削する予定です。



(c) 計測位置 (緩衝材 5 段目上面)
 図 8 人工バリア性能確認試験の計測データの一例

熱-水理-力学-化学連成現象に関する解析について、国際共同研究 DECOVALEX では、室内試験などから求められたパラメータを使用し、人工バリア性能確認試験の計測データ (温度、飽和度、全応力、変位) を対象とした熱-水理-力学連成解析を実施しました。室内試験および原位置試験の各機関の解析結果を比較した結果、浸潤挙動については、室内試験では良好な一致が見られたものの、原位置試験では特にヒーター近傍の飽和度の解析結果と緩衝材中の計測結果

に差が見られました。ヒーター近傍では、温度勾配による水分移動の影響が大きく、温度勾配水分拡散係数などのパラメータの設定などが重要であることが分かりました。応力や変位などの力学挙動については、室内試験および原位置試験ともに解析のアプローチによって解析結果が異なる結果となりました。温度勾配による水分移動の検証については、温度、初期飽和度、試験期間などの条件を変えた室内試験によって検証データを拡充すること、力学挙動の検証については、解体調査で取得する予定である緩衝材の乾燥密度分布や変位のデータを含めた検証が重要となります。

令和6年度は、人工バリア性能確認試験のデータ取得を自動計測機器により継続します。また、HIPのタスクCにおいて、解体試験計画の具体化や解析課題へ取り組んでいきます。

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～100m規模）（図9）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。

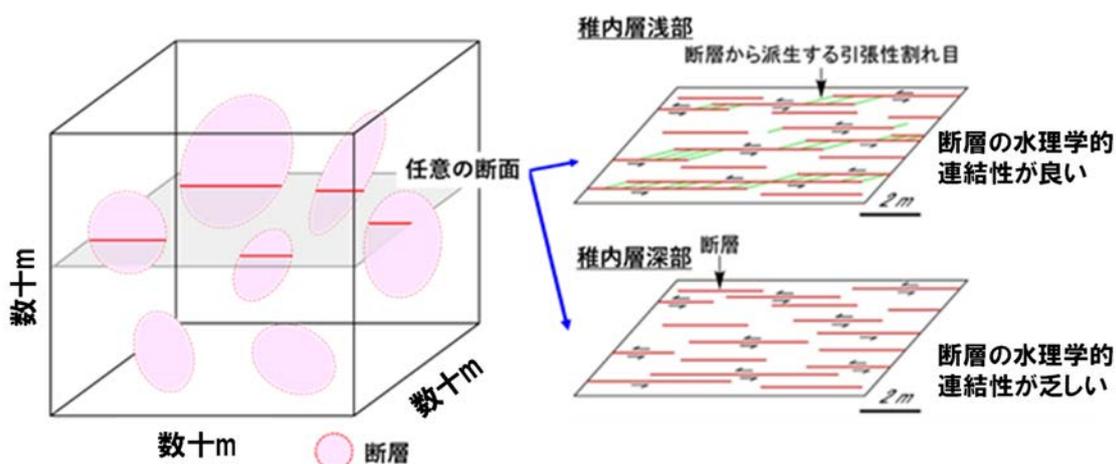


図9 ブロックスケールにおける物質移行のイメージ

令和5年度は、掘削損傷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^(1, 2)（図10）に基づき、一次元的に連続する移行経路を仮定した解析を行うとともに、掘削損傷領域に分布する割れ目の縦方向（水が流れる方向）の分散長を評価しました。掘削損傷領域の割れ目中を一次元の均一な流れが生じていることを仮定したモデルによってトレーサー試験の観測結果の再現を試みたところ、観測結果を良

く再現することができました（図 11）。このことから、既存の原位置トレーサー試験手法と一次元の解析モデルを掘削損傷領域の割れ目に適用することにより、堆積岩（泥岩）中の掘削損傷領域の割れ目の移流分散効果を評価できることが確認できました。

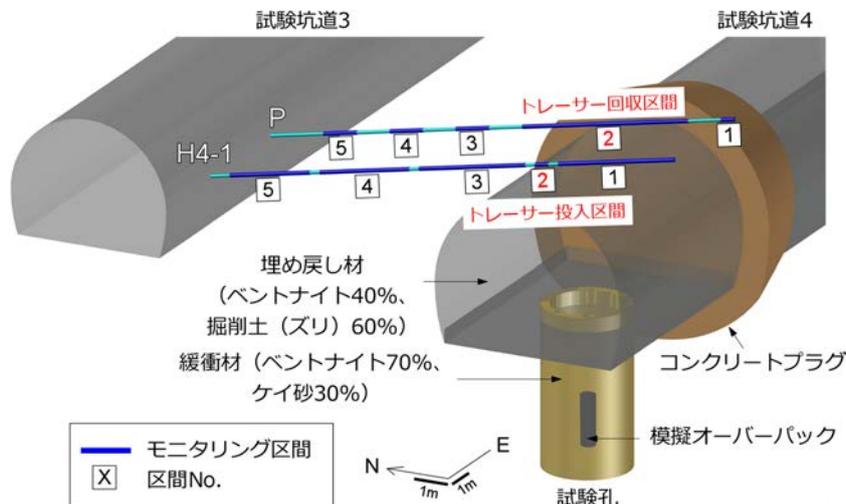


図 10 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験のレイアウト

H4-1 孔と P 孔は試験坑道 3 の南側壁面から試験坑道 4 に向かって斜め上向きに掘削されています。H4-1 孔の区間 2 をトレーサー投入区間、P 孔の区間 2 をトレーサー回収区間としています。

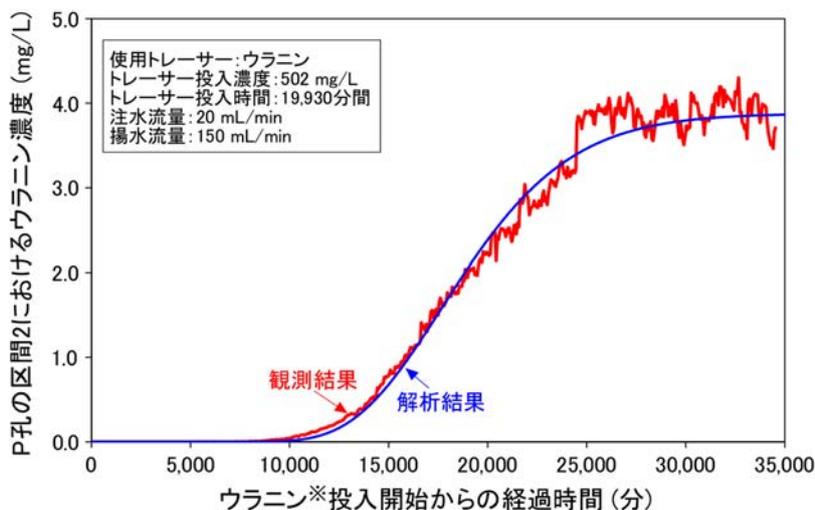


図 11 トレーサー試験の再現解析結果

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、有機物・微生物・コロイドを含む地下水中の元素とコロイド粒子との相互作用を把握するための試験を実施しました。令和 5 年度は、350m 調査坑道に掘削したボーリング孔⁽⁴⁾内の地下水に希土類元素などのトレーサーを添加し、その濃度変化を観察しました（図 12）。その結果、岩盤内（試験区間）を循環させた地下水の方が、岩盤内（試験区間）を循環させずに調査坑道で保管した地下水と比べて希土類元素の濃度の減少速度が大きいことが分かりました。一例として、図 13 に希土類元素のひとつであるランタン（La）の結果を示します。トレーサー添加前には岩盤内（試験区間）を経由するように地下水を循環させていたため、両者の地下水に含まれる有機物・微生物・コロイドの濃

度や組成には大きな差はないと考えられます。また、岩盤内（試験区間）を循環させた地下水で認められた希土類元素の濃度減少の速度は、これまでに実施した、地下施設から採取した地下水に希土類元素を添加する室内試験^②で得られた結果よりも速いことも分かりました。以上のように、原位置環境下で「元素－有機物・微生物・コロイド」の二元系と「元素－有機物・微生物・コロイド－岩盤」の三元系の試験データを取得することができました。

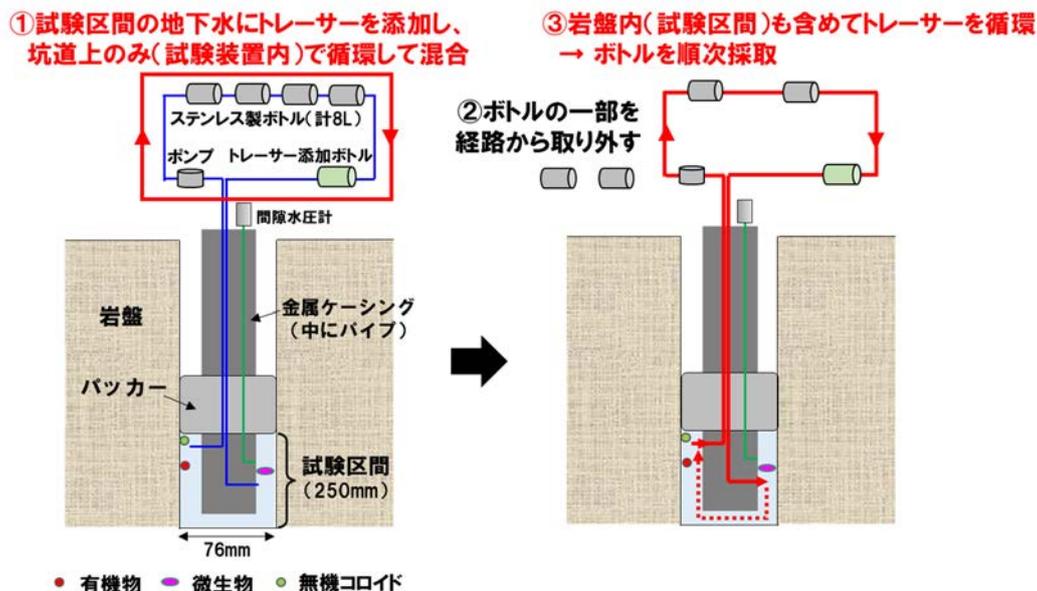


図 12 希土類元素添加試験の装置概念図および試験手順

②はトレーサーと地下水中の有機物・微生物・コロイドとの反応を調べるための試料、③はトレーサーと地下水中の有機物・微生物・コロイドとの反応に加えて、それらと岩盤との反応を調べるための試料です。

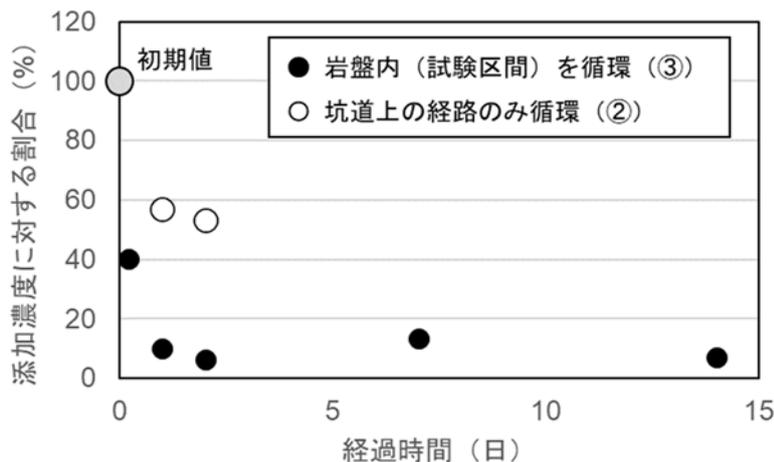


図 13 地下水に添加した希土類元素 (La) の濃度変化

また、このような希土類元素の収着^{*}挙動を規定する要因を明らかにするために、140m～350m 調査坑道から採取した地下水に希土類元素のひとつであるユウロピウムの 3 価の陽イオン (Eu³⁺) を添加し、地下水中の溶存有機物との親和性を調べました。Eu³⁺との結合による溶存有機物の蛍光強度の低下を調べ、地下水の水質や微生物群集の分析結果と合わせて多変量解析を実施するこ

とで、異なる蛍光特性を示す有機物の起源を推定しました。その結果、 Eu^{3+} は浅部地下水に見られる陸性腐植物質の特徴を示す溶存有機物と高い親和性を示す一方で、深部の化石海水中に見られる海洋性腐植物質の特徴を示す溶存有機物とは低い親和性を示すことが分かりました（図 14）⁽³⁾。このことは、化石海水と天水との混合の程度や微生物による有機物分解の程度により、溶存有機物への希土類元素の収着挙動が影響を受けることを示唆しています。

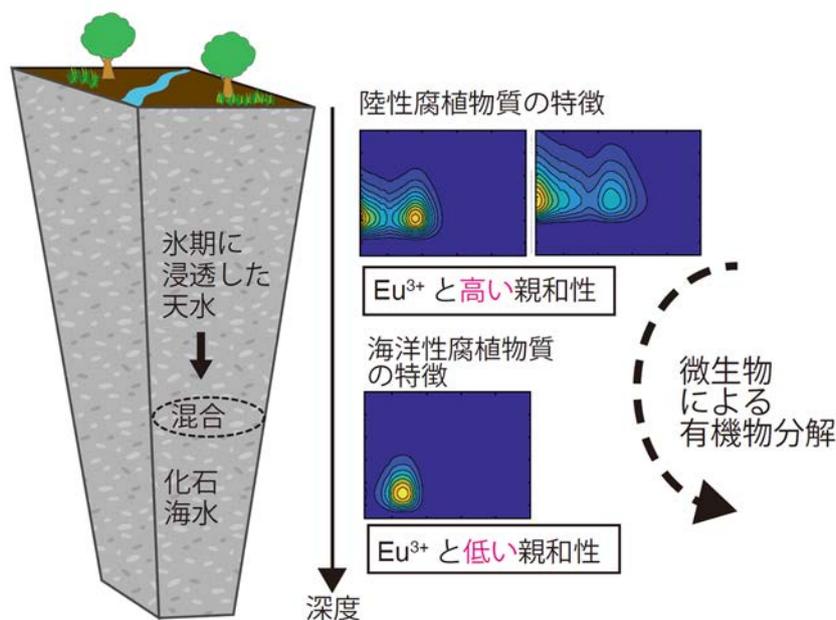


図 14 深度による溶存有機物の特徴と希土類元素 (Eu^{3+}) との親和性の違い
 右の図は励起蛍光マトリクスです。励起蛍光マトリクスとは、有機物の特徴を表す指標で、異なる起源の有機物ごとに特有の蛍光特性を表すことを利用したものです。横軸に蛍光を励起させる光の波長 (260 nm～500 nm)、縦軸に蛍光波長 (320 nm～600 nm) を取り、黄色ほど強い蛍光強度を示し、青色ほど弱い蛍光強度を示しています。 Eu^{3+} を添加した際の蛍光強度の変化から、地下水中の溶存有機物のうち陸性腐植物質の特徴を示すものは Eu^{3+} との親和性が高く、海洋性腐植物質の特徴を示すものは Eu^{3+} との親和性が低いことが分かりました。図は参考文献(3)を一部改変しています。

ブロックスケールを対象とした物質移行試験では、声間層については、250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑（図 2 参照）から掘削した 4 本のボーリング孔を対象に、割れ目の走向傾斜に関する情報や透水性、割れ目同士の水理学的連結性に関する情報を取得しました。また、稚内層深部については、令和 3 年度に実施した稚内層深部の断層を対象としたトレーサー試験⁽¹⁾に対し、孔間透水試験の解析結果から推定された、曲がりくねった非常に長いチューブ状の経路を仮定して、トレーサー試験の観測データを対象とした物質移行解析を実施しました。解析では、トレーサー試験の観測データに見られる急激な濃度変化が物質移行解析結果へ及ぼす影響についても確認しました。その結果、解析結果の曲線はその影響を考慮して設定した複数のケース間で差が見られましたが（図 15）、推定された流動経路の直径はほとんど変化せず、孔間透水試験で推定された流動経路の直径（数百 μm ）の数倍～数十倍（数 mm～数十 mm）であることが推定されました。孔間透水試験とトレーサー試験から推定された直径の違いは、一般的に指摘されている関係と整合しており、曲がりくねった非常に長いチューブ状の経路を仮定することによって、水理学的連結性が限定的な物質の移行経路を表現できることが分かりました。

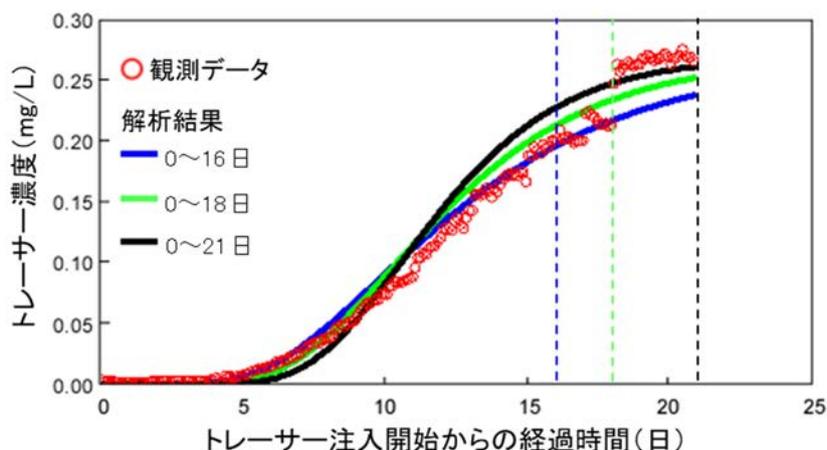


図 15 ブロックスケールを対象としたトレーサー試験結果の解析例

トレーサーが移行する流動経路の直径をパラメータとして試験中の濃度変化を再現できる条件を解析により検討しました。図中赤○は観測データを示します。解析結果はそれぞれ、試験開始から 16 日後まで（青線）、試験開始から 18 日後まで（緑線）、試験開始から 21 日後まで（黒線）の観測データを対象とした場合の解析結果を示します。

令和 6 年度は、掘削損傷領域を対象とした物質移行試験については、これまでの成果を掘削損傷領域におけるモデル化・解析評価手法として取りまとめます。有機物・微生物・コロイドの影響評価については、室内試験および原位置試験の結果を比較しながら整理するとともに、反応時間や有機物濃度などが希土類元素の濃度を与える影響を確認する試験を実施し、有機物・微生物・コロイドが物質移行に与える影響を評価する方法について取りまとめます。また、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、声問層において、新たに製作したトレーサー試験装置の適用性を確認します。さらに、これまでの研究成果を踏まえ、稚内層深部を例にブロックスケールを対象とした物質移行に関する評価手法を取りまとめます。

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。

- ・ 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
- ・ 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
- ・ 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
- ・ 掘削損傷領域の調査技術の高度化
- ・ 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 5 年度は、「搬送定置・回収技術の実証」として、安全な回収作業の実施に向けて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低アルカリ性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低アルカリ性コンクリート試験体を、坑道内における大気条件下および浸潤条件下に定置し⁽⁴⁾、その物性や化学状態の経時変化に関する分析を実施しました⁽¹⁾。その結果、大気条件下に定置した試験体の表面（大気接触部分）では約 3 mm/年の速度で中性化が進行していること、湿潤条件下に定置した試験体では中性

化の進行が遅く、水和反応の進行により構造が緻密化していることなどが分かりました⁽⁵⁾。また、地下施設に施工されて約 10 年が経過した低アルカリ性の吹付けコンクリートを試験坑道 5 (図 2 参照) の坑道壁面から採取して、暴露試験の試験体と同様の分析を実施しました。その結果、中性化の進行は大気と接触している坑道表面からは厚さ数 cm であり、暴露試験で得られた大気条件下での中性化速度と整合的である一方で、岩盤との接触部では厚さ数 mm であり、暴露試験の浸潤条件下での中性化速度よりもやや大きいことなどが分かりました (図 16)。以上のことから、コンクリート支保工が置かれる環境条件、特に水分量の違いによってコンクリートの空隙構造や化学状態が変化し、物理・力学・水理物性に影響を与えることが明らかとなりました。これらにより、低アルカリ性コンクリート支保工の長期的な物性変化の評価に必要な知見ならびに調査手法を整備することができました。

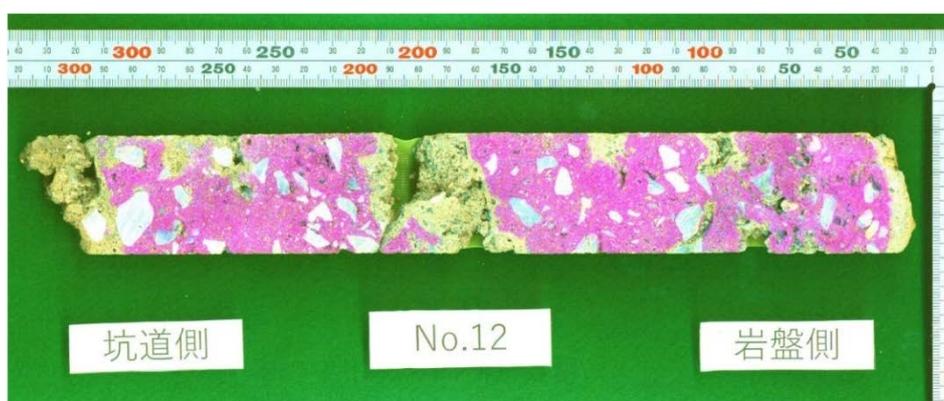


図 16 吹付けコンクリートの変質領域

坑道壁面から採取した吹付けコンクリート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、コンクリート支保工に隣接する坑道周辺岩盤においても、安全な回収作業が可能な条件の確認を目的として、坑道開放条件下における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^{*}を実施しました。加えて、坑道開放条件下における解析結果に基づいた坑道埋め戻し後の再飽和過程の解析を実施し、坑道の開放期間が坑道の埋め戻し後の再飽和過程に及ぼす影響の評価を行いました。図 17 に坑道掘削後の 50 年、100 年、300 年間開放条件を維持した後の周辺岩盤の透水性の変化、飽和度分布、各々の開放期間の結果に対して埋め戻しから 100 年経過後の飽和度分布の解析結果を示します。解析を実施した条件下では、透水性が顕著に変化する領域は坑道壁面から 1 m ~ 2 m 程度の範囲であり、埋め戻しから 100 年経過後にはこれらの領域を除き周辺岩盤ではほぼ飽和状態に戻ることが分かりました。これまで実施してきた一連のモデル化・解析により埋め戻し後の地質環境の回復状況の評価手法を整備できました。

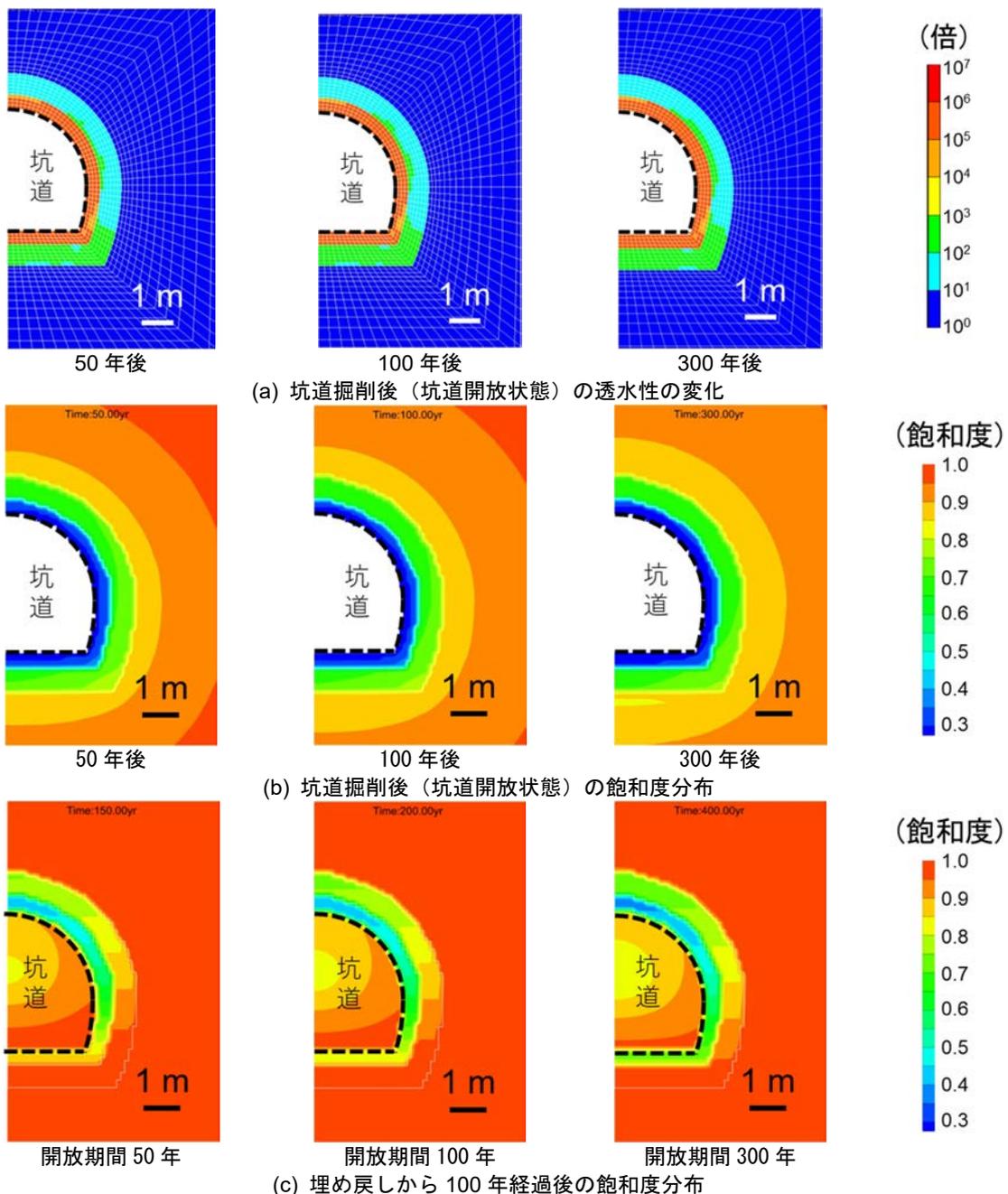


図 17 坑道掘削および埋め戻し後の坑道周辺岩盤の透水性および飽和度変化

「閉鎖技術の実証」としては、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、令和 5 年度は、先行研究⁽⁶⁾で着目したコンクリート系材料の溶脱成分に起因して埋め戻し材が変質するシナリオにおいて重要なプロセスとそれを回避するための方策について、分野（工学技術、安全評価）間、構成要素（坑道、埋め戻し材、支保工、プラグ）間の関連性に着目した整理を行い、埋め戻し材やプラグなどの性能を相互補完的に確保するための考え方を示すことができました。また、先行研究の成果⁽⁷⁾も踏まえ、埋め戻し材やプラグなどの長期的な性能の考え方の一例として取りまとめを行うとともに、室内試験により埋め戻し材に用いる掘削土（ズリ）の性質や地下水の水質などの埋め戻し材の長期的な性能に影響を及ぼし得る特性を把握するとともに、

埋め戻し材の透水係数や膨潤圧を測定することにより、埋め戻し材の仕様を検討するためのデータを整備することができました。

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、令和4年度までに実施してきた模型試験について、これまでの結果を整理し、緩衝材の膨潤後の乾燥密度と飽和度の分布から埋め戻し材と緩衝材の力学的相互作用下における浸潤挙動と膨潤挙動の理解を深めることができました。これらを踏まえて埋め戻し材の設計に対する考え方を整理して設計フロー⁽⁷⁾として整備しました。

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2参照）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、止水壁を構築して4年が経過した時点においても、試験領域内の透水係数が構築直後と同等に低く保たれていることが確認できました。また、令和4年度までに実施した止水壁を対象とした透水試験およびベントナイトの吹付け施工試験の結果を整理して、止水プラグの設計に対する考え方を設計フロー⁽⁷⁾として整備しました。

掘削損傷領域の調査技術の高度化については、令和4年度までに実施した坑道周辺における人工物が物理探査結果に与える影響についての調査結果に基づき、弾性波トモグラフィを用いた掘削損傷領域調査のための最適な観測点配置を検討しました。令和5年度に掘削した試験坑道6（図2参照）において検討結果に基づいた観測点配置を適用した弾性波トモグラフィ（図18）および比抵抗トモグラフィを実施しました。

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、令和4年度までに実施してきた室内試験および原位置試験の結果を整理しました。この整理を踏まえ、令和5年度は、ベントナイトブロックが膨潤してボーリング孔を閉塞する過程を理解するための室内試験を実施しました。その結果ベントナイトブロックが膨潤して閉塞した部分の密度が元のブロックの部分の密度に比べて低いことが確認でき、原位置試験の結果を解釈するためのデータを得ることができました。



図 18 試験坑道6における弾性波トモグラフィの実施状況

「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」における坑道の埋め戻しに関しては、施工効率の向上が期待できるスクリー工法、ブロック工法および斜め転圧工法による要素試験などを実施して、各工法に適用可能な材料の配合の範囲や施工品質などに関するデータを取得しました。また、埋め戻し材の施工品質を確認するための計測技術については、乾燥密度の測定精度の向上に向けて光ファイバーセンサーの設置方法を検討するとともに、埋め戻し材と坑道壁面の間に生じる可能性のある隙間を TDR（Time Domain Reflectometry：時間領域反射）法で検知するためのセンサーケーブルの有効な長さを把握しました。

令和 6 年度は、搬送定置・回収技術の実証については、支保部材の経年変化や坑道掘削・閉鎖後の地質環境変化について、これまでの調査試験結果を整理し、取りまとめを行います。閉鎖技術の実証については、埋め戻し材やプラグなどの長期的な性能の考え方、緩衝材膨出抑制機能や掘削損傷領域の調査技術の高度化などとともに、坑道内から掘削されたボーリング孔の閉塞技術の実証で行ってきた、ベントナイトブロックを設置する方法について、令和 2 年度以降実施してきた調査試験結果を整理し、適用した技術の有効性や技術的な課題を取りまとめます。さらに、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、埋め戻し材の施工技術オプションの整備に向けた要素試験などの実施や施工品質管理などに関するデータを取得し、取りまとめを行います。

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

地層処分事業では、坑道あるいはピット（処分孔）内に流入する地下水の量や、岩盤中の断層や割れ目の力学的な強度などを把握し、ピットの掘削や人工バリアの施工の可否あるいは工学的対策の必要性などを判断することが重要です（図 19）。このため、実際の地質環境において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・評価技術の体系化に取り組みます。これまでに構築・確認してきた各要素技術を体系的に適用し、坑道やピットの配置に係る考え方、人工バリア材料などの設置方法、それらの閉じ込め性能を評価する方法を体系的に整理します。具体的には、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、多連接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、緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術、廃棄体設置の判断や間隔などの設定に必要な情報の整理を行い、坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術として体系化します。

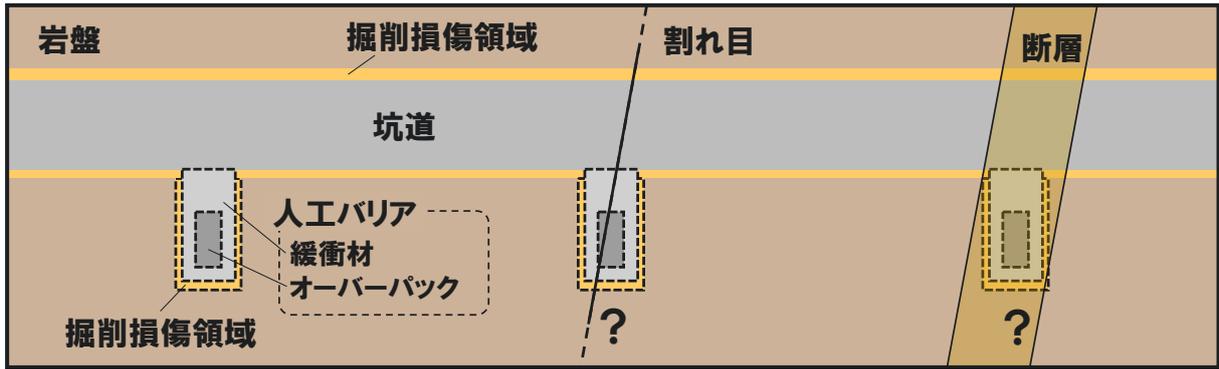
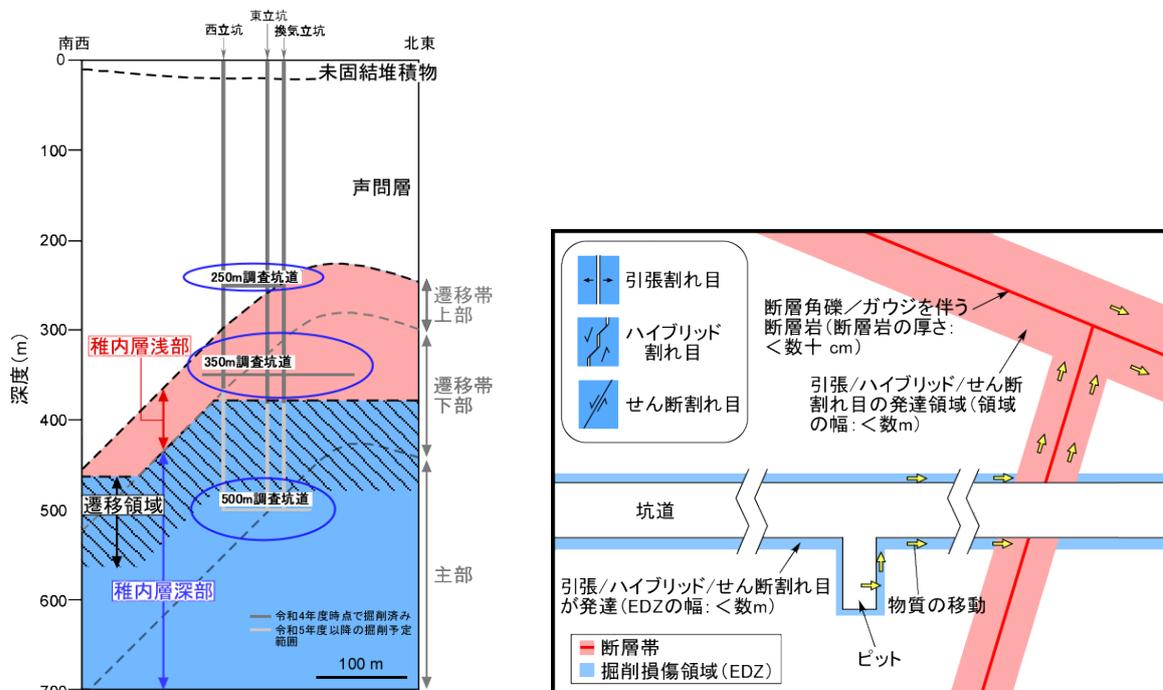


図 19 人工バリアやそれを定置する坑道の周辺において想定される地質構造の特徴を示すイメージ図（鉛直断面）

(1) 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

廃棄体の定置の判断にあたっては、緩衝材やオーバーバックといった人工バリアの機能、埋め戻し材やプラグの機能、坑道周辺岩盤の閉じ込め性能を評価することが重要となります。本研究項目では、既存の先行研究の情報、幌延における研究成果および後述する(2)～(4)の検討結果を用いて、調査により得られる水みちの水理特性や物質の移行特性に関する情報に加え、人工バリアや処分坑道の設計（仕様やレイアウトなど）も考慮した物質移行解析を通じ坑道スケール～ピットスケールにおける閉じ込め性能の評価手法を体系的に整理します。

令和6年度は、4.2節の検討結果や既存の検討結果を踏まえ、人工バリアや岩盤の閉じ込め性能に大きく影響を及ぼすピット周辺の水みちの水理特性や物質の移行特性に関わる評価手法などの整理を進めます（図 20）。



(a) 250m、350m および 500m 調査坑道周辺の水みちの水理特性や物質の移行特性の比較 (b) ピット周辺の水みちの水理特性や物質の移行特性の評価

図 20 水理・物質移行特性に関わる評価手法を検討するスケールのイメージ図（鉛直断面）

(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

ピットの掘削、人工バリアや埋め戻し材の施工の観点から、坑道あるいはピット内への湧水が多い条件や、断層や割れ目の密集により局所的に岩盤の力学的強度が低下する条件を把握し、その条件での施工の成立性を判断する必要があります。幌延深地層研究センターの坑道周辺の岩盤には断層や割れ目が分布し、坑道の周囲には掘削損傷領域が形成され、これらが湧水量や坑道の安定性に影響します。本研究では、今後整備される 500m 調査坑道の試験坑道 8 および試験坑道 9 において、先行ボーリング調査、物理探査といった原位置調査を行います（図 21）。これらの調査結果を受け、(3)で必要に応じて実施する湧水抑制対策、ピットの掘削などの技術の適用を通じて、人工バリアを定置するピットの配置位置や坑道の間隔を設計するために必要な情報とその情報の取得方法を整理します。加えて、坑道の埋め戻し、止水プラグの設置などについて 350m 調査坑道の試験坑道 6 において、実規模スケールの坑道の埋め戻しと止水プラグの施工試験を実施することにより、埋め戻しと止水プラグの設計から施工に至るまでの一連の技術を確認します（図 22）。

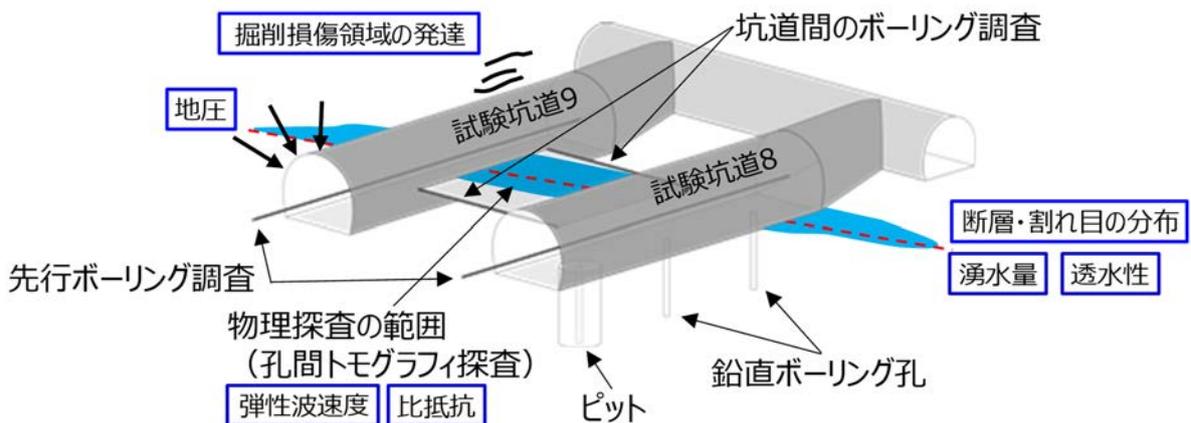


図 21 500m 調査坑道の試験坑道 8 および試験坑道 9 における原位置調査のイメージ図
 青い四角に示す特徴・特性は、原位置調査によって得られる情報の例を示しています。今後の調査・検討により原位置試験の計画を詳細化し、さらに原位置調査の結果に基づき鉛直ボーリング孔およびピットの位置を決定するため、実際のイメージはこのレイアウトと異なる可能性があります。図に示した水みちもイメージであり実際の分布を示すものではありません。

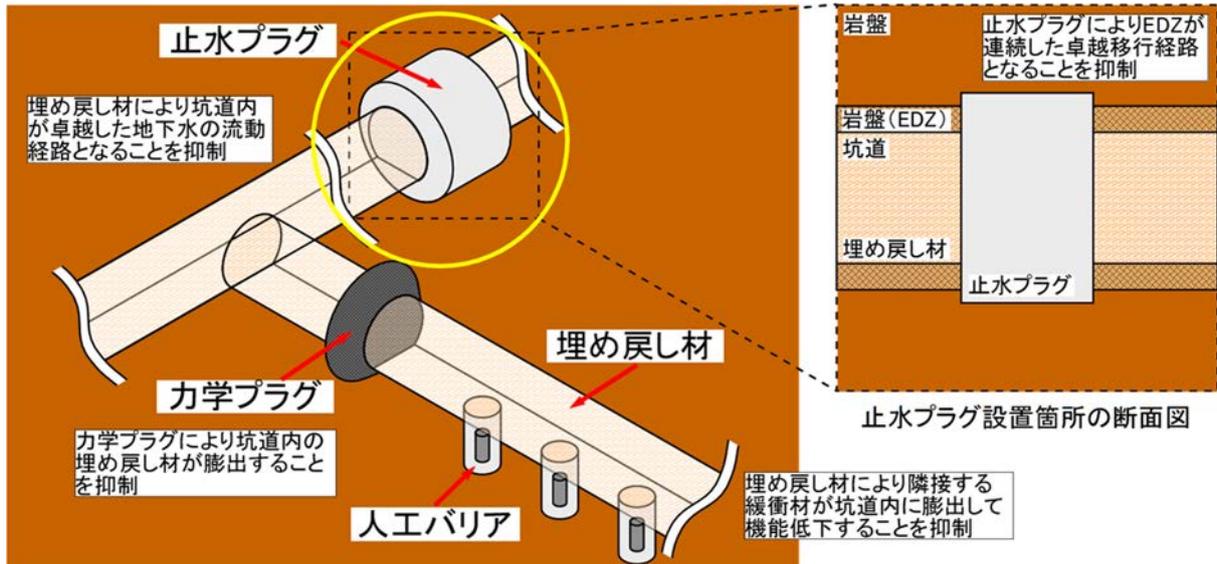


図 22 処分場の閉鎖段階のイメージ図

令和 6 年度は、500m 調査坑道における原位置調査に先立ち、坑道などへの湧水量や掘削損傷領域の発達範囲を予測するための解析を行い、原位置調査において取得すべきデータを検討します。また、坑道の埋め戻しや止水プラグの設計に必要な試験坑道 6 (図 2 参照) 周辺の掘削損傷領域の広がりや水理特性を調査するとともに、埋め戻しや止水プラグの材料特性を把握するための試験を実施します。加えて、調査・試験の進捗に応じて坑道の埋め戻しと止水プラグの設計を進めます。

(3) 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・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備

地層処分事業では、断層や割れ目からの湧水が少ないことや岩盤の力学的強度が高いことが緩衝材設置の観点から重要となります。本研究では、多接続坑道のピットに人工バリアを設置する場合を想定し、原位置調査で得られたデータを用いて、以下のことを実施します。

- ① 多接続坑道を考慮した湧水抑制対策技術として、近接する複数の湧水箇所間の水圧緩衝を考慮した湧水量あるいはその減少速度の予測手法と湧水抑制対策への反映方法の整備
- ② ピットの支保技術として、ピット周辺の掘削損傷領域の範囲を評価するための解析手法と支保設計への反映方法の整備
- ③ 緩衝材の流出現象を評価/抑制する技術として、断層や割れ目からの湧水の定常的な発生量や湧水量の減少速度の予測手法と流出抑制対策への反映方法の整備
- ④ 緩衝材の岩盤への侵入現象を評価/抑制するための技術として、ピット周辺の割れ目の開きにくさの評価手法と侵入抑制対策への反映方法の整備

令和 6 年度は、断層や割れ目から坑道内へ流入する地下水の量の減少速度に関する既往研究の成果 (図 23) など踏まえ、これまでに得られたデータや深度 500 m に向けた掘削過程で得られるデータを用いて、上記の①や③などの整備を進めます。

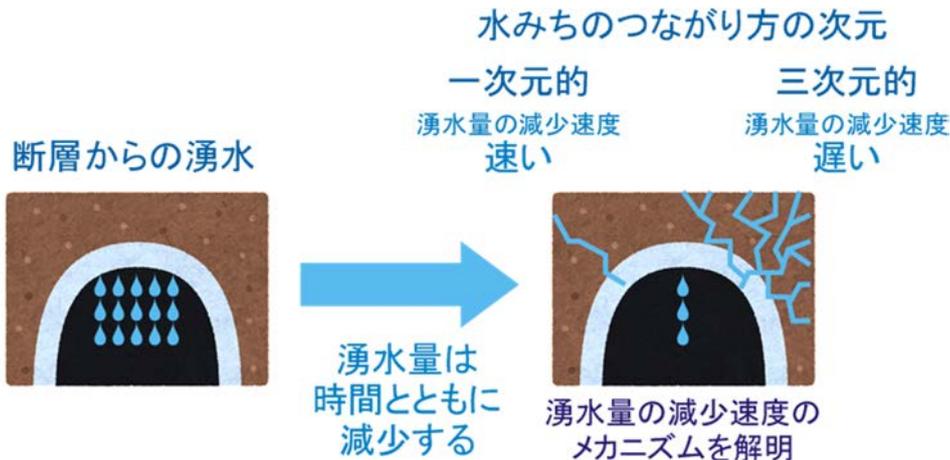


図 23 湧水量の減少速度を支配するメカニズムを表す概念図⁽⁸⁾

(4) 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要となる情報の整理

廃棄体の設置の判断や間隔の設定にあたっては、緩衝材やオーバーパックの機能、坑道やピットの安定性および廃棄体周辺の岩盤の閉じ込め性能を担保するために必要な情報を整理することが重要となります。例えば、ピット周辺に存在する割れ目の開きにくさやずれにくさ、割れ目からの湧水量、ピット周辺の地下水の流れにくさ（物質の動きにくさ）、ピットの掘削損傷領域の広がりなどの情報を取得することが重要となります。本研究項目では、廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の調査・評価手法について、実際に幌延で適用した調査・評価手法を体系的に整理します。

令和 6 年度は、人工バリア性能確認試験の試験孔周辺に発達した掘削損傷割れ目に対して過年度に実施した透水試験（図 24）の例などを用いて、幌延を事例としてピット周辺に存在する割れ目の開きにくさやピット周辺の地下水の流れにくさを把握するための調査・評価手法の整理を進めます。また、調査・研究の進捗に応じて、他の情報についての調査・評価手法の整理も進めます。

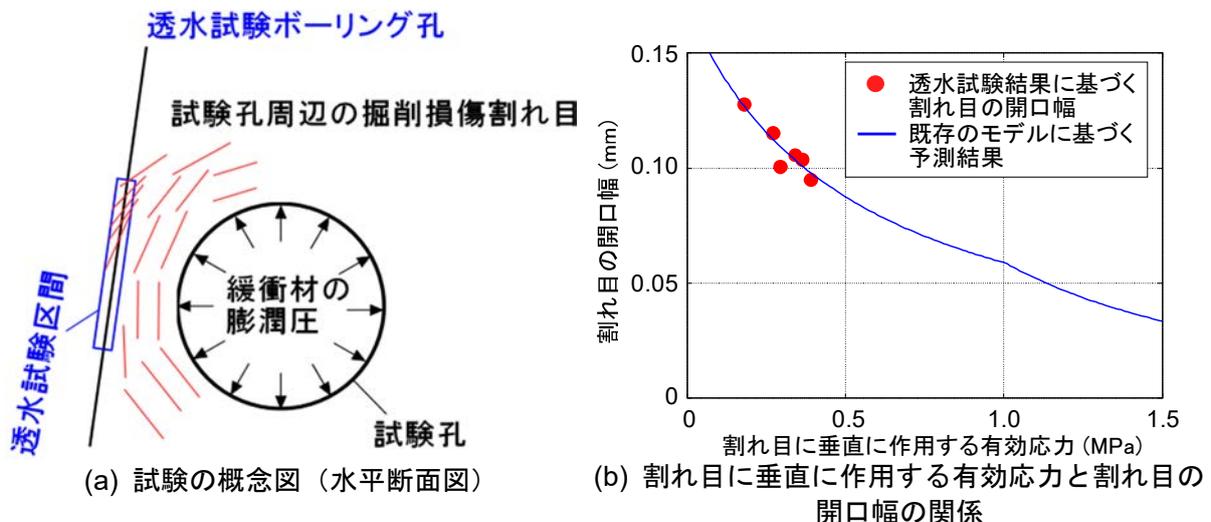


図 24 試験孔周辺に発達した掘削損傷割れ目を対象とした透水試験の概念図と割れ目に作用する有効応力と開口幅の関係⁽⁹⁾

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 年度までの調査では、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を抽出し、100℃以上の熱履歴や緩衝材に生じるひび割れが緩衝材に期待される特性に影響を与え得ることが示唆されました。令和 5 年度は、これらの現象が緩衝材の特性に与える影響を確認するための高温度条件下での原位置試験について、令和 4 年度に構築した試験概念⁽²⁾に基づき整備を進めました。具体的には、350m 調査坑道の試験坑道 5 に掘削されている 2 つの既存孔に、ヒーター、形状および初期含水比の異なる緩衝材ブロックおよび温度、孔内水位などが測定可能な計測センサーを設置しました（図 25）。さらに、オーバーパックスの耐食性への影響に関する室内実験データ⁽¹⁰⁾や令和 3 年度に実施した緩衝材の変質に関する既往研究の事例調査⁽¹¹⁾の結果に基づき、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 140℃での加熱を開始しました。



図 25 試験体設置の様子

また、これらの原位置試験に先立ち、高温条件下での緩衝材へのひび割れの発生ならびに閉塞挙動を確認するための室内試験を実施しました。これは、初期含水比の異なる直径 50mm、高さ 50mm の円柱形の 2 つの供試体を 140℃ でいったん加熱し、その供試体に蒸留水を浸潤させたときの内部の状態変化を X 線 CT で繰り返し撮影したものです。その結果、緩衝材の初期含水比に応じてひび割れの発生状況が異なるものの、生じたひび割れは 2,100 時間前後（約 90 日）で閉塞されることが分かりました（図 26）。

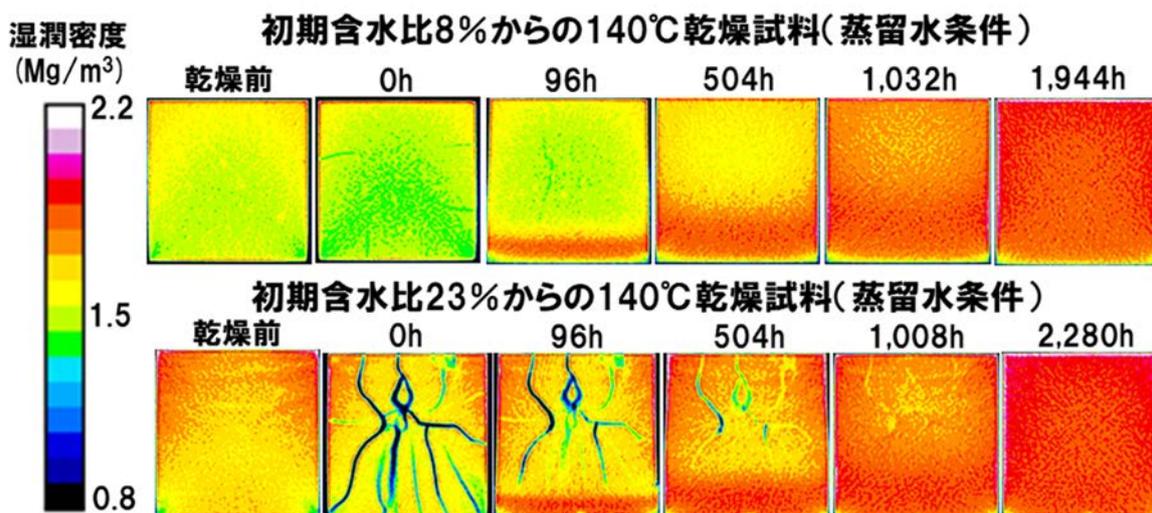


図 26 X 線 CT を活用した緩衝材試料の湿潤に関する室内試験結果

令和 6 年度は、令和 5 年度に開始した原位置試験を継続し、孔内の温度や水分分布などのモニタリングを実施します。その後、ひと組の試験体を解体し、100℃を超える熱履歴を経た緩衝材の特性を確認する試験・分析を実施します。また、緩衝材に浸潤させる水の組成などの条件を変えて室内試験を実施します。以上の試験の結果およびこれまでに得られた成果を整理し、短期的に 100℃を超える条件下で緩衝材に生じる力学的・化学的変質の有無および緩衝材の特性（膨潤・浸潤特性）に与える影響、100℃を超える条件下での人工バリアおよびその周辺に発生する現象ならびに人工バリア周辺における上限温度設定の考え方について取りまとめます。

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、断層沿いの割れ目の発達幅が数十 cm 程度のより大型の断層における断層のずれが断層内の地下水の流れに与える影響に関して、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（力学的な安定性）評価手法の整備を行います。

令和5年度は、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、断層の水理学的連結性とDIの関係に関する解析を行いました。断層の水理学的連結性は断層内の水みちのつながり方の次元として数値化することができ、次元の値が小さいほど、水理学的連結性が低いことを表します。これまで定性的に判定していた水みちのつながり方の次元について解析を実施し、定量的に次元を決定しました。図27に、ボーリング調査における断層を対象とした透水試験時の水圧変化や坑道掘削時に遭遇した断層からの湧水量変化から断層内の水みちのつながり方の次元を決定した例を示します。解析の結果、地下施設周辺の稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元とDIは相関していることが分かり、DIが2以上になると、水みちのつながり方の次元が1.5以下まで小さくなることが分かりました（図28）。このような情報は、図29に示すような断層/割れ目の水理学的連結性とDIの関係を定量的に理解する上で重要となります。

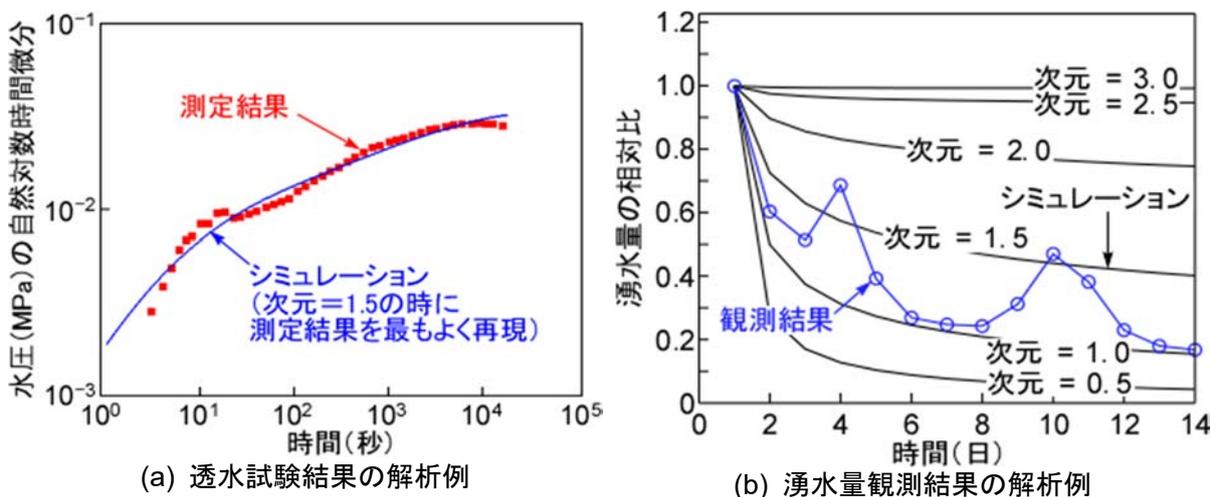


図 27 水みちのつながり方の次元の解析例⁽¹¹⁾
 水みちのつながり方の次元は(a)で 1.5、(b)で 1.0～1.5 と推定されます。

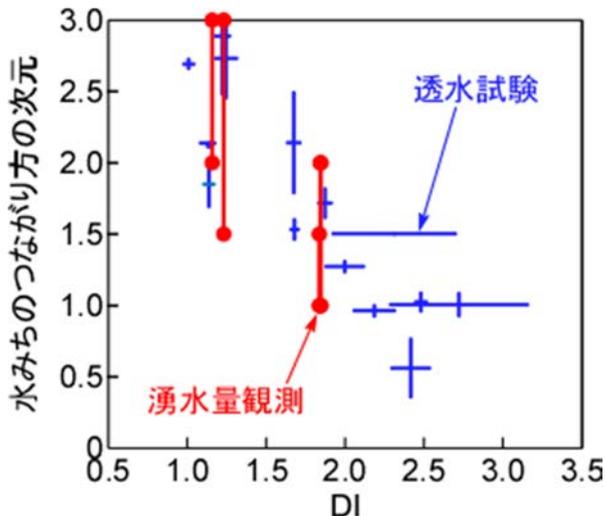


図 28 地下施設周辺の稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元と DI の関係⁽¹¹⁾

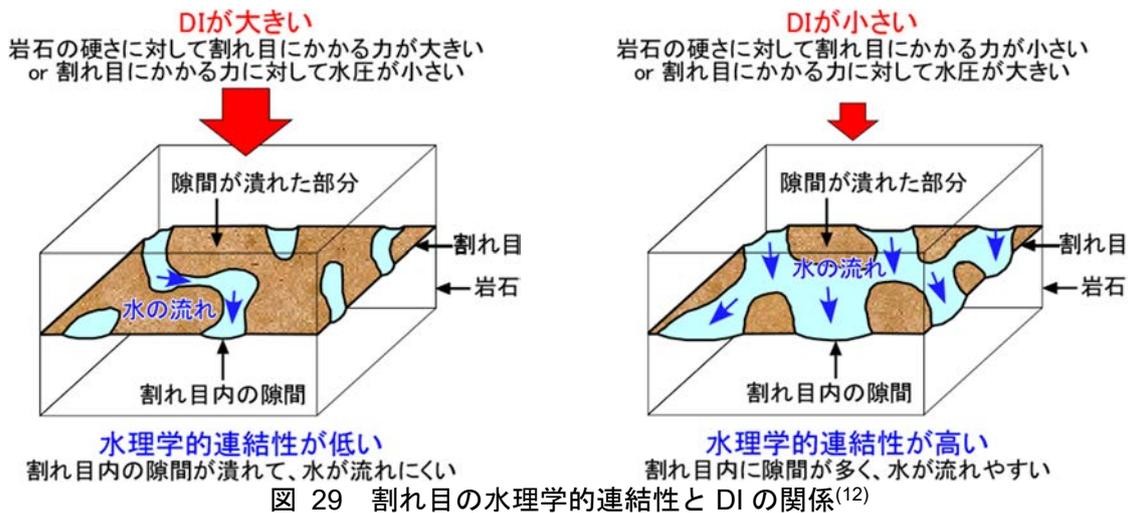


図 29 割れ目の水理学的連結性と DI の関係⁽¹²⁾

水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）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を行いました。解析では断層の力学的な安定性を評価する上で重要となる原位置の地圧の状態を水圧擾乱試験の結果から推定する方法を検討しました。いくつかの仮定のもと（鉛直方向の地圧＝土被り圧など）、水圧擾乱試験において発生した断層のずれの方向（図 30）を再現するような原位置の地圧の状態を求めた結果、鉛直方向の地圧、水平方向の最大地圧および水平方向の最小地圧の大きさの比が 1.0 : 0.8 : 0.7 もしくは 1.0 : 0.9 : 0.7 であることが推定されました。この結果は、近傍のボーリング孔で行われた既往の地圧試験の結果とよく一致しており（表 3）、水圧擾乱試験でも原位置の地圧の状態が推定できることが分かりました。

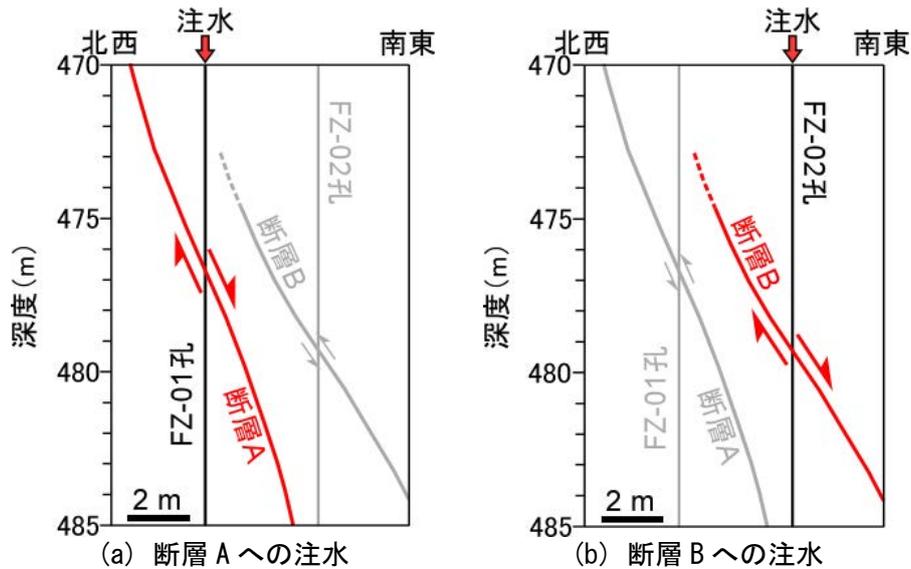


図 30 断層に注水した際に生じた断層沿いのずれの方向

断層 A は南東に傾斜、断層 B は南に傾斜しており、それぞれの断層に注水した際に断層の上盤側が下方にずれることが水圧擾乱試験で確認できました。

表 3 試験エリア（図 30）周辺で推定された地圧の状態

手法	鉛直方向の地圧、水平方向の最大および最小地圧の大きさの比
水圧擾乱試験	1.0 : 0.8 : 0.7 もしくは 1.0 : 0.9 : 0.7
地圧試験	1.0 : 0.9 : 0.7

令和 6 年度は、過年度に実施した水圧擾乱試験の結果の解析などを行い、図 28 に示す水みちのつながり方の次元と DI の関係の物理的な意味や、図 29 に示すような断層/割れ目の水理学的連結性と DI の関係、断層のずれが断層内の水みちのつながり方の次元に与える影響などを検討します。これらの検討や既往の検討の結果に基づき、地殻変動が地層の透水性に与える影響や、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について取りまとめます。さらに、表 3 に示す地圧の状態の検討結果を用いて水圧擾乱試験を実施した断層の力学的な安定性を事例的に評価するとともに、水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法について取りまとめます。

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ひと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。

本研究は、令和4年度まで、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する技術開発事業 [JPJ007597]：岩盤中地下水流動評価技術高度化開発）の一環として取り組み、その結果、幌延地域の地質環境を事例として、地上からの調査である物理探査とボーリング調査により地下水の流れが非常に遅い領域の三次元分布を推定する手順を示しました。さらに、地下水の流れが非常に遅い領域を総合的に理解する際に考慮すべき古水理地質学的変遷に関する因子を抽出するために、そのモデル化・解析手法の事例を示しました。令和5年度は、これまでの成果を踏まえた調査手順の整理として、数十km四方の範囲に調査を展開し、その結果に基づき数km四方に絞り込んだ調査範囲において化石海水の三次元分布を推定する手順を検討しました（図31）⁽¹³⁾。また、検討に用いたボーリングデータを研究開発報告書類としてまとめました⁽¹⁴⁾。

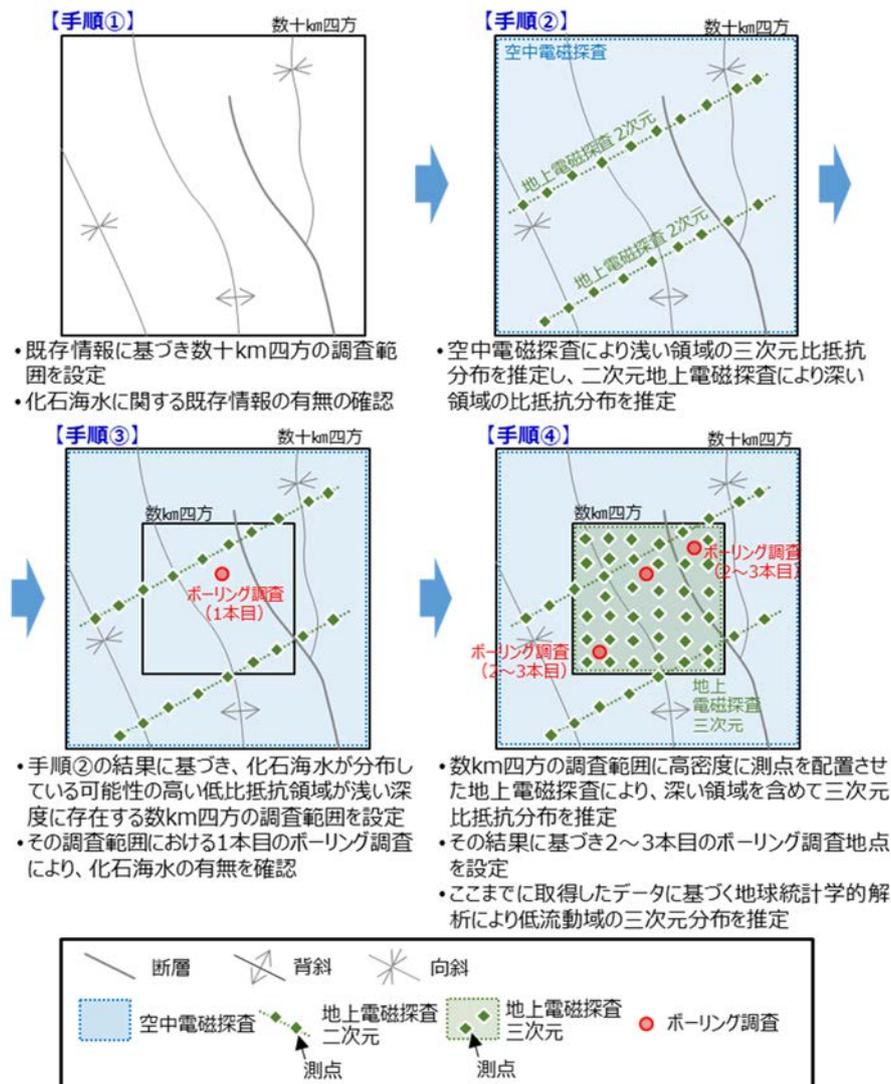


図 31 化石海水の三次元分布を推定するための電磁探査およびボーリング調査の手順⁽¹³⁾

地下水の流れが非常に遅い領域の三次元分布を調査する際には、電磁探査とボーリング調査を組み合わせた調査が有効ですが、この調査の前提として、ボーリング調査では地下水の水質や年代に基づく地球化学的な評価により地下水の流れが非常に遅いことを確認する必要があります。令和5年度は、割れ目と岩石の間隙における地下水の水質コントラストと¹⁴C年代を利用した地下水流動の評価手法を構築し、論文として取りまとめました⁽¹⁵⁾ (図32)。

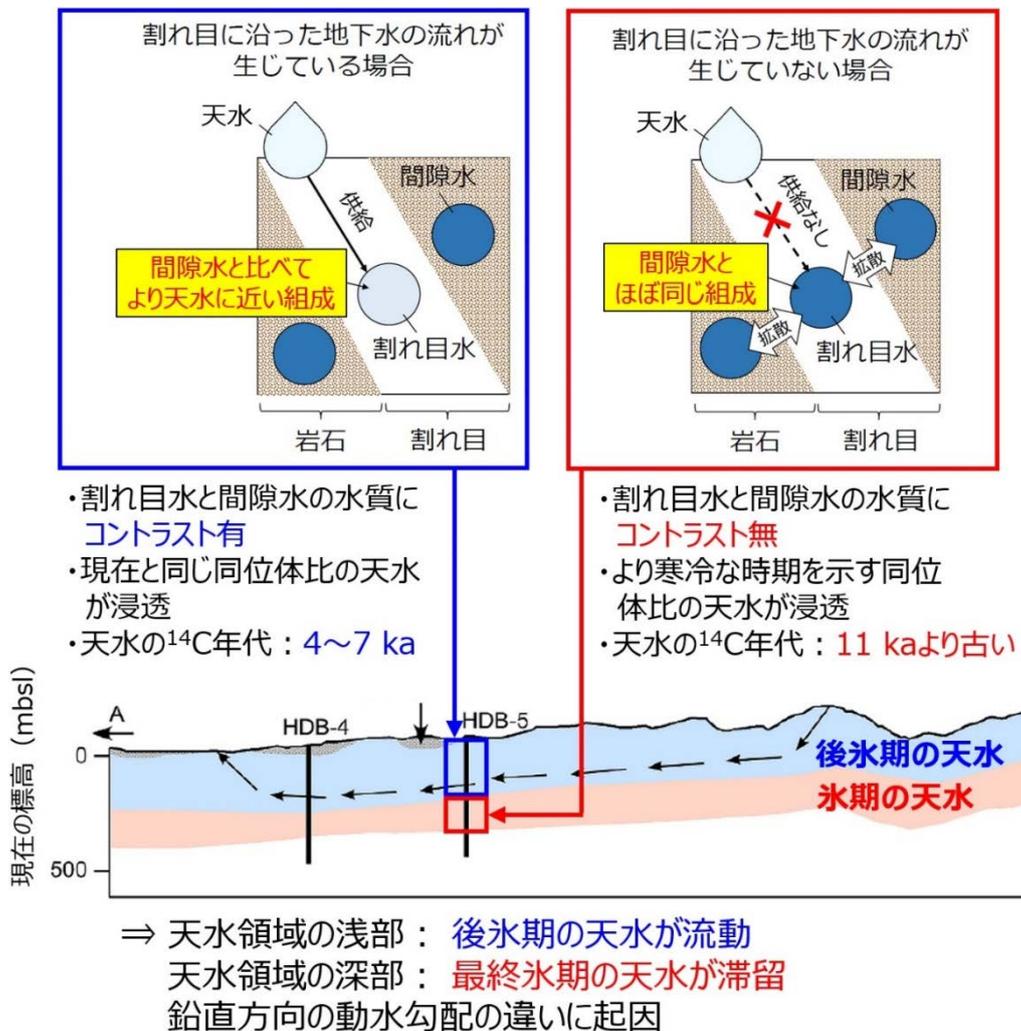


図32 割れ目水と間隙水のコントラストと地下水の¹⁴C年代に基づき解釈した地下水流動概念⁽¹⁵⁾

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からの物理探査と、調査孔を用いた地下温度測定を行いました。海上からの物理探査については令和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令和4年度と同じ測線を中心に調査を実施しました。その結果、探査に用いる音波（弾性波）の発振源を調整することで、より深い領域である海底下約1,000 mまでの地下構造を把握することができました。これにより、これまで探査が困難であった浅海域の地下構造のより詳細な情報を入手できることが確認できました。また、深部の地下水流動解析結果の検証データを取得するために、浜里地区に設置されている調査孔の深度350 mまでの地下

温度を測定しました。その結果、本測定により得られた地下温度プロファイルから、当該地域の地下深部の地下水の流れが非常に遅いことを確認することができました。この結果は、地下水流動解析の結果と整合しており、このことから、原位置データである地下温度プロファイルにより解析結果が妥当であることを確認できました。

令和6年度は、引き続きこれまでに得られた成果に基づき、地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する方法を取りまとめます。

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となります。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5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。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33）。水圧について、採水やメンテナンスに伴う急激な変化を除き、大きな変動は見られませんでした。

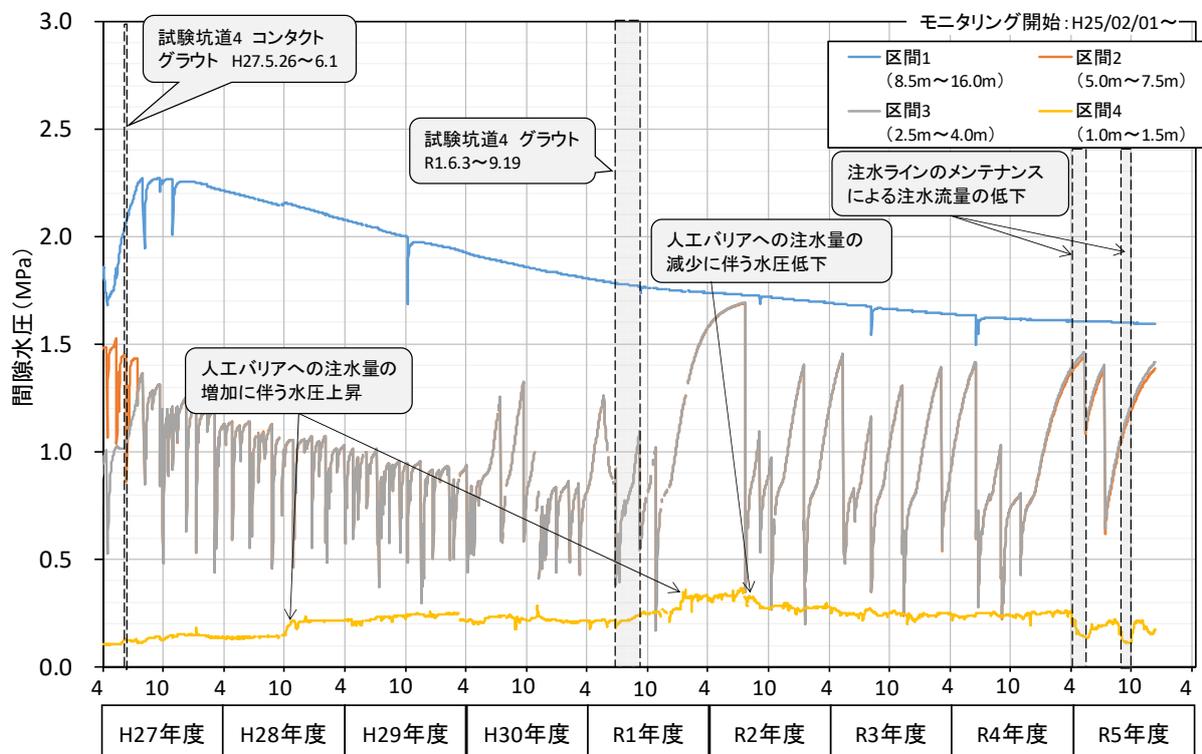


図 33 人工バリア性能確認試験の試験箇所周辺のボーリング孔（13-350-C08 孔）における水圧の経時変化

令和6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、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。

8. 地下施設の建設・維持管理

令和6年度は、令和5年度に引き続き、換気立坑および東立坑の掘削を行います。西立坑および500m調査坑道についても、湧水抑制対策を行った後、掘削準備を行い、掘削を開始する予定です（表4）。

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。

地下施設の掘削の進捗状況についてはホームページなどを利用して適宜、情報発信を行います。

表4 掘削工事のスケジュール（令和6年度）

	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期
換気立坑	掘削			
東立坑	掘削			
西立坑	湧水抑制対策			準備 掘削
500m調査坑道			準備 掘削	

本工程は今後の施工計画策定や工事進捗に応じて変更となる場合があります。

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 34）。



(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 34 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35)。



(a) 清水川の水質調査



(b) 清水川の魚類調査

図 35 環境影響調査の様子

10. 安全確保の取り組み

地下施設や研究所用地周辺における調査研究や地下施設整備工事など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 36）。



図 36 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*11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6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*12

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

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

*12：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。

○電力中央研究所*13

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

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）

堆積軟岩を対象とした掘削影響評価技術に関する基礎的研究

○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）

○大林組

光ファイバー式センサーを用いた坑道掘削時の掘削損傷領域と地下水流動のモニタリング

○地層科学研究所

幌延深地層研究センターの深度 500 m を対象とした広域水理・力学場の事前検証

○安藤・間、川崎地質

ボアホールジャッキ試験による変形係数・応力測定と掘削損傷領域評価に関する研究

上記のほか、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 37）。



図 37 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

*13：一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。

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、参加機関による管理委員会を開催するとともに、タスク A では、250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑（図 2 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走向傾斜や透水性、割れ目同士の連結性に関する情報を整理するとともに、トレーサー試験などを実施します。タスク B では、500m 調査坑道における原位置調査に先立ち、断層/割れ目からの湧水や掘削損傷領域の発達を予測するための解析を行うとともに、原位置調査で取得すべきデータの検討を行います。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、一連の操業技術の実証に向けて、埋め戻し材や止水プラグの材料特性の検討などを行います。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、解体調査の具体化に取り組みます。さらに、参加機関の理解促進のための現場状況の確認や、研究成果の取りまとめ方針などについて議論することを目的としたタスク会合を実施します。

HIP での活動については、活動状況や参加機関が地下施設を訪問した場合の対応状況などについてホームページで適宜、情報発信を行います。

○クレイクラブ（Clay Club）^{*14}

様々な粘土質媒体の特性の比較、粘土の物性・挙動や地下施設で実施される試験など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^{*15}

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。

*14 : 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（RWMC）・セーフティケース統合グループ（IGSC）の下で実施されているプロジェクトのひとつです。地層処分の実施・規制・研究機関などにより組織され、様々な粘土質媒体の特性の比較、粘土の物性・挙動や地下施設で実施される試験などに関する技術的かつ科学的情報の交換に加えて、サイト特性調査技術の詳細な評価も実施しています。

*15 : 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に関する枠組みです。参加機関は、原子力機構の他、オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO、オーストラリア）、工業技術研究院（ITRI、台湾）、韓国原子力研究所（KAERI、韓国）、サンディア国立研究所（SNL、米国）です。

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ひとつである熱－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。

【あ行】

移流

本計画書では、物質が地下水の流れによって移動する現象を指します。

ウラン

黄緑色の蛍光染料で、フルオレセインナトリウムとも言います。化学式は $C_{20}H_{10}Na_2O_5$ であり、知られています。トレーサー試薬としての利用のほか、入浴剤の着色料などとしても利用されています。

オーバーパック

人工バリアの構成要素のひとつです。ガラス固化体を包み込み、ガラス固化体に地下水が接触することを防止し、地圧などの外力からガラス固化体を保護する容器のことを言います。候補材料は炭素鋼などの金属です。

【か行】

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。

緩衝材流出・侵入現象

緩衝材が地下水の流れによって流される現象を流出現象、緩衝材に含まれる粘土が膨潤することで割れ目などの隙間に侵入する現象を侵入現象と呼びます。

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放射性核種と同様の化学的性質を示すことから、希土類元素を用いた試験を行うことにより、高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性核種の移行挙動などを推測することができます。

掘削損傷領域

本計画書における掘削損傷領域とは、岩盤が掘削により損傷した領域のことで、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の水圧や岩盤に作用する力が変化する領域のことを掘削擾乱領域と言い、掘削擾乱領域では坑道埋め戻し後、変化した地下水圧など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。

原位置試験

地下で採取された試料を用い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、ピット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。このような温度が下がっていく段階を、本計画書では減熱過程と言います。発熱している段階（加熱過程）では、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。減熱過程に入り、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。これらの坑道の配置を検討するために必要な評価範囲（数百 m 程度）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

実習について（ANEC 北海道大学拠点）

令和5年度：<https://caren.eng.hokudai.ac.jp/anec/event/1587/>

令和4年度：<https://caren.eng.hokudai.ac.jp/anec/event/391/>

令和3年度：<https://caren.eng.hokudai.ac.jp/anec/event/369/>

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方々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>

コロイド

大きさが1 nm～1 μm 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可能性が指摘されています。

【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。

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

地下水中に存在する元素が、岩盤などに取り込まれる現象です。

処分概念オプション

幌延深地層研究計画における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縦置きにするのか横置きにするのか、人工バリアのひと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。

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、断層の剛性（変形しにくさ）や強度（破壊しにくさ）を低下させることにより、断層をずらす試験のことを指します。

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言います。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、その隙間が二次元的あるいは三次元的に広くつながっている場合には、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いない場合は、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。

スクリー工法

本計画書では、埋め戻し材をスクリーコンベアを用いて充填する工法を指します。

【た行】**堆積岩の緩衝能力**

本計画書では、地殻変動（地震など）の影響により擾乱を受けた断層や割れ目の透水特性が、その岩盤の力学状態に応じて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を指します。

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あります。

多連接坑道

互いに近接して平行に掘削される複数の坑道のことであります。処分場では廃棄体を設置するための多数の坑道を平行に掘削する坑道配置が考えられています。

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。

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 (m³/s)、 A ：断面積 (m²)、 h ：水圧差 (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

本計画書では、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。

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、処分坑道に多数のピット (処分孔) が掘削されます。これらのピットの配置を検討するために必要な評価範囲 (数十 m 程度) のことを指します。

比抵抗

岩石の電気の流れにくさを表すもので、一般的には、粘土やシルト岩などは比抵抗が低く（電気が流れやすく）、頁岩や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

本計画書では、緩衝材や埋め戻し材に要求される性能を満足することを示す方法を品質保証としており、その緩衝材や埋め戻し材を設計・施工する過程までを含めた品質保証の枠組みを品質保証体系としています。

分散

水の流れに乗って物質が媒体を移動する場合、その媒体の構成物質の不均質性と構成物質と水の間に見える摩擦などによって、物質の移動速度に違いが生じます。その結果、物質が空間的に広がり、濃度が低下します。このようなプロセスは一般的に「機械的分散」と呼ばれますが、本計画書では単に「分散」と表現しています。

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などを防止するために、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。この現象を本計画書では膨出と呼びます。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も想定されます。

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、この現象を本計画書では膨潤と言います。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】

水みちのつながり方の次元

地下水の通り道となる隙間同士の間隔を具合を表す指標です。隙間同士が互いによくつながり、三次元的なネットワークを形成する場合は三次元、隙間同士の間隔が限定的で、一次的なチャンネルを形成する場合は一次元となります。

【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>

【ら行】

令和 2 年度以降の必須の課題

「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「令和 2 年度以降の必須の課題」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

参考文献

- (1) 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.
- (2) 中山雅 (編) : 幌延深地層研究計画 令和4年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2023-032, 2024, 159p.
- (3) Saito, T., Nishi, S., Amano, Y., Beppu, H. and Miyakawa, K. : Origin of dissolved organic matter in deep groundwater of marine deposits and its implication for metal binding, ACS ES&T Water, vol.3, no.12, 2023, pp.4103-4112.
- (4) 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.
- (5) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 日本原子力研究開発機構 : 令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]回収可能性技術高度化開発 3ヵ年取りまとめ報告書, 2023, 107p.
- (6) 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4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]地層処分施設閉鎖技術確証試験報告書, 2023.
- (7) 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4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]地層処分施設閉鎖技術確証試験5ヵ年取りまとめ報告書, 2023.
- (8) 日本原子力研究開発機構 : 坑道掘削時の断層からの湧水量の減少速度を支配するメカニズムを解明—トンネル工事現場や放射性廃棄物の地層処分場での湧水抑制対策に貢献—, 令和5年7月12日プレス発表, 2023, <https://www.jaea.go.jp/02/press2023/p23071201/> (参照 : 2024年3月1日)
- (9) Aoyagi, K. and Ishii, E. : Evaluation of temporal changes in fracture transmissivity in an excavation damaged zone after backfilling a gallery excavated in mudstone, Environmental Earth Sciences, vol.83, no.96, 2024.
- (10) 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.
- (11) Ishii, E. : Effects of flow dimension in faulted or fractured rock on natural reductions of inflow during excavation: a case study of the Horonobe Underground Research Laboratory site, Japan, Hydrogeology Journal, vol.31, no.4, 2023, pp.893-911.
- (12) 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 : 2024年3月1日)
- (13) 早野明, 佐藤菜央美 : 地下水の流れが非常に遅い領域の分布を推定するための調査手順の検討, 日本原子力学会北海道支部第41回研究発表会, 2024.
- (14) 宮川和也, 早野明, 佐藤菜央美, 中田弘太郎, 長谷川琢磨 : HFB-1孔調査データ集, JAEA-Data/Code 2023-009, 2023, 103p.
- (15) Mochizuki, A and Ishii, E. : Paleohydrogeology of the Horonobe area, Northern Hokkaido, Japan: Groundwater flow conditions during glacial and postglacial periods estimated from chemical and isotopic data for fracture and pore water, Applied Geochemistry, vol.155, 2023, 105737.

付録

令和 2 年度以降の研究工程

This is a blank page.

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	R6の実施内容		研究期間											
				前半	後半	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10			
・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如分場に取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モードに大きく依存する。断層の変形が起ると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、断層の変形モードを支配する岩石の強度・応力状態を計測でき、かつマップピング（空間的な分布図を示すこと）が可能なるパラメータを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関係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 ③ 断層の透水性に与える影響の把握（ポアリング孔を用いた水圧擾乱試験）	断層の幅が数10 cmの断層における断層のずれが断層内の地下水の流れに与える影響を把握し、堆積岩の緩衝能力（自己治癒能力）を裏証するため、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（ポアリング孔を用いた水圧擾乱試験）	②-1 既往の水圧擾乱試験の結果の解析と取りまとめ	②-2 DI（ダクティリティインデックス：岩盤にかかる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	②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法の整備	前半 前半の5年程度で実施	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	後半 体系化して取り組む課題（②）如分概念オプシジョンの実証のうち人工バリアの設置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施
				②-1 既往の水圧擾乱試験の結果の解析と取りまとめ ②-2 DI（ダクティリティインデックス：岩盤にかかる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	②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法の整備	令和6年度までに得られる成果 ○ポアリング孔を用いた水圧擾乱試験データの取得											
・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、断層の変形モードを支配する岩石の強度・応力状態を計測でき、かつマップピング（空間的な分布図を示すこと）が可能なるパラメータを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関係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 ③ 断層の透水性に与える影響の把握（ポアリング孔を用いた水圧擾乱試験）	断層の幅が数10 cmの断層における断層のずれが断層内の地下水の流れに与える影響を把握し、堆積岩の緩衝能力（自己治癒能力）を裏証するため、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（ポアリング孔を用いた水圧擾乱試験）	②-1 既往の水圧擾乱試験の結果の解析と取りまとめ	②-2 DI（ダクティリティインデックス：岩盤にかかる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	②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法の整備	前半 前半の5年程度で実施	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	後半 体系化して取り組む課題（②）如分概念オプシジョンの実証のうち人工バリアの設置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施
				②-1 既往の水圧擾乱試験の結果の解析と取りまとめ ②-2 DI（ダクティリティインデックス：岩盤にかかる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	②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）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											
・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、断層の変形モードを支配する岩石の強度・応力状態を計測でき、かつマップピング（空間的な分布図を示すこと）が可能なるパラメータを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関係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 ③ 断層の透水性に与える影響の把握（ポアリング孔を用いた水圧擾乱試験）	断層の幅が数10 cmの断層における断層のずれが断層内の地下水の流れに与える影響を把握し、堆積岩の緩衝能力（自己治癒能力）を裏証するため、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（ポアリング孔を用いた水圧擾乱試験）	②-1 既往の水圧擾乱試験の結果の解析と取りまとめ	②-2 DI（ダクティリティインデックス：岩盤にかかる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	②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法の整備	前半 前半の5年程度で実施	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	後半 体系化して取り組む課題（②）如分概念オプシジョンの実証のうち人工バリアの設置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施
				②-1 既往の水圧擾乱試験の結果の解析と取りまとめ ②-2 DI（ダクティリティインデックス：岩盤にかかる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	②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）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（力学的な安定性）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 坑道スケールレベ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。

3.2 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	研究期間	
				前半	後半
・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、堆積岩領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	① 人工バリアの縫合材や坑道の埋め戻し材による掘削損傷領域（EDZ）のひび割れの影響を評価する手法の確立 ② 人工バリアの自己治癒能力（ひび割れの修復）を実証	② 地殻変動による人工バリアの緩衝材や坑道埋め戻し材の掘削損傷領域（EDZ）への自己治癒能力の実証	R2 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の以下の机上検討を実施 ② 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	前半の5年程度で実施	体系化して取り組む課題（②）処分概念オプシジョ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
				R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10	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 ②-2 坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測するモデルの構築
			R6は実施しない	試験観察に水圧擾乱試に基づき、EDZの割れ目開口状況を定量的に把握を改良	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
			R6は実施しない	試験観察に坑道埋め戻し材に基づき、EDZの割れ目開口状況を定量的に把握	令和4年度までに得られる成果 ○坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測するモデルの構築

※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。

