

幌延深地層研究計画 令和7年度調査研究計画

Horonobe Underground Research Laboratory Project
Investigation Program for the Fiscal Year 2025

中山 雅 石井 英一 早野 明 青柳 和平
村上 裕晃 大野 宏和 武田 匡樹 望月 陽人
尾崎 裕介 木村 駿 出井 俊太郎 佐久間 圭佑
田村 友識 岩井 亮 加藤 祥成 藤枝 大吾

Masashi NAKAYAMA, Eiichi ISHII, Akira HAYANO, Kazuhei AOYAGI
Hiroaki MURAKAMI, Hirokazu OHNO, Masaki TAKEDA, Akihito MOCHIZUKI
Yusuke OZAKI, Shun KIMURA, Shuntaro DEI, Keisuke SAKUMA
Tomonori TAMURA, Ryo IWAI, Yoshinari KATO and Daigo FUJIEDA

幌延深地層研究センター

Horonobe Underground Research Center

September 2025

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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 7 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

中山 雅, 石井 英一, 早野 明, 青柳 和平, 村上 裕晃, 大野 宏和,
武田 匡樹, 望月 陽人, 尾崎 裕介, 木村 駿, 出井 俊太郎, 佐久間 圭佑, 田村 友識,
岩井 亮, 加藤 祥成, 藤枝 大吾

(2025 年 5 月 21 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 7 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」および「処分概念オプションの実証」について、引き続き調査研究を行う。

令和 7 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原位置試験を対象とした解析検討の準備を行う。

「処分概念オプションの実証」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ついて、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の整理を行う。500 m 調査坑道において先行ボーリング調査を行い、岩石の強度や岩盤の透水性などのデータを取得するとともに、トモグラフィ調査による試験坑道周辺の掘削損傷領域の広がりに関するデータを取得する。埋め戻し材や止水プラグの施工については、原位置施工試験に向けた計画検討を進める。深度 500 m の坑道掘削に伴う湧水量を観測するとともに、解析において予測された湧水量の範囲に収まるかどうかを確認する。500 m 調査坑道で施工予定のピット周辺の掘削損傷領域の広がりについて原位置における掘削損傷領域の把握のための試験計画を検討する。また、割れ目からの湧水量やピット周辺の掘削損傷領域の広がりについて調査・評価手法の整理を進める。

地下施設の建設・維持管理では、令和 6 年度に引き続き西立坑と 500 m 調査坑道の掘削を行い、令和 7 年度末に施設整備を完了する予定である。

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 2025

Masashi NAKAYAMA, Eiichi ISHII, Akira HAYANO, Kazuhei AOYAGI,
Hiroaki MURAKAMI, Hirokazu OHNO, Masaki TAKEDA, Akihito MOCHIZUKI,
Yusuke OZAKI, Shun KIMURA, Shuntaro DEI, Keisuke SAKUMA, Tomonori TAMURA,
Ryo IWAI, Yoshinari KATO and Daigo FUJIEDA

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

(Received May 21, 2025)

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 2025, we continue R&D on “Study on near-field system performance in geological environment” and “Demonstration of repository design options”. 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.

As for “Demonstration of repository design options”, the investigation, design, and evaluation techniques are to be systemized at various scales, from the tunnel to the pit, by means of an organized set of evaluation methodologies for confinement performance at these respective scales. Preliminary borehole investigations will be conducted within a 500 m gallery, with the objectives of obtaining rock strength and rock permeability data, as well as surveying the extent of the excavation damaged zone surrounding the test tunnel via tomographic analysis. A planning study for the in-situ construction test will be conducted to investigate the construction of backfill material and watertight plugs. The volume of water inflow associated with the excavation of the 500 m gallery will be observed, and its magnitude will be compared with the range of water inflow predicted in the analysis. The test plan to determine the extent of the excavation damaged zone around the pit, which is planned to be constructed in the 500 m gallery, will be studied to determine the in-situ excavation damaged zone. In addition, the investigation and evaluation methods for the amount of water inflow from fractures and the extent of the excavation damaged zone around the pit will be organized.

Concerning the construction and maintenance of the subsurface facilities, excavation of the West Access Shaft and the 500 m gallery will continue. It is anticipated that the construction of the facilities will be completed by the end of the fiscal year 2025.

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 2025

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6年度の成果および令和7年度の計画の概要.....	7
3.1	令和6年度の成果の概要.....	7
3.2	令和7年度の計画の概要.....	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.....	16
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）等の限界の条件下での人工バリア性能確認試験.....	40
6.	地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証.....	44
6.1	水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化.....	44
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.....	50
8.	地下施設の建設・維持管理.....	51
9.	環境調査	52
9.1	排水量および水質調査.....	52
9.2	研究所用地周辺の環境影響調査.....	52
10.	安全確保の取り組み	53
11.	開かれた研究	54
11.1	国内機関との研究協力.....	54
11.2	国外機関との研究協力.....	55
12.	用語集	56
	参考文献	64
	付録	71

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 2024 R&D results and fiscal year 2025 R&D plans.....	7
3.1	Overview of fiscal year 2024 R&D results	7
3.2	Overview of fiscal year 2025 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.....	16
5.	Demonstration of repository design options	23
5.1	Demonstration of engineering feasibility of repository technology	23
5.2	Evaluation of engineered barrier system behaviour over 100 °C	40
6.	Understanding of buffering behaviour of sedimentary rocks to natural perturbations...	44
6.1	Evaluation of intrinsic buffering against endogenic and exogenic processes.....	44
7.	Acquisition of data necessary for addressing key R&D challenges	50
8.	Construction and management of the subsurface facilities	51
9.	Environmental study	52
9.1	Monitoring drainage water and water property	52
9.2	Environmental impact study around the Horonobe Underground Research Center	52
10.	Safety measures.....	53
11.	Collaboration with other research organizations	54
11.1	Domestic collaborations	54
11.2	International collaborations	55
12.	Glossary.....	56
	References	64
	Appendix.....	71

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	地下施設イメージ図	6
図 3	地下施設周辺の地質断面図	6
図 4	250 m 調査坑道における主な調査研究の実施場所	12
図 5	350 m 調査坑道における主な調査研究の実施場所	12
図 6	500 m 調査坑道における主な調査研究の実施場所	12
図 7	研究所用地における主な施設と観測装置の配置	13
図 8	ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所	13
図 9	研究所用地周辺の地質断面図（図 8 の A-A'断面）	14
図 10	人工バリア性能確認試験の概念図	15
図 11	人工バリア性能確認試験の計測データの一例	16
図 12	ブロックスケールにおける物質移行のイメージ	17
図 13	トレーサー試験の再現解析結果	18
図 14	縦方向分散長と評価スケールの関係性	18
図 15	原位置試験の装置概念図および試験手順	19
図 16	原位置試験におけるランタン（La）濃度の時間変化	20
図 17	室内試験における希土類元素添加後の 0.2 μm ろ過試料中のランタン（La）濃度の時間変化	20
図 18	DI と水みちのつながり方の次元の関係	22
図 19	ブロックスケールを対象としたトレーサー試験結果の再現解析	22
図 20	坑道壁面から採取した吹付けコンクリート試料の中性化深さと経過時間の関係	24
図 21	坑道壁面から採取した HFSC 吹付けコンクリート試料の空隙径分布	24
図 22	EDZ シーリング試験の試験領域内の透水係数の経時変化	26
図 23	吹付けコンクリートの影響を考慮しない既存の解析手法と改良手法による弾性波速度分布の推定結果	27
図 24	埋め戻し材ブロックの製作	28
図 25	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）	29
図 26	トレーサー試験結果	30
図 27	処分場の閉鎖段階のイメージ図	31
図 28	試験坑道 8、9 における原位置調査のイメージ図	31
図 29	坑道の埋め戻し材と止水プラグの施工試験の概略図	32
図 30	透水試験の試験区間と透水係数分布	33
図 31	埋め戻し材の地上吹付け試験	33
図 32	試験坑道 4 で掘削した試験孔周辺の EDZ の解析結果	35
図 33	緩衝材の膨潤に伴う EDZ の割れ目の開きにくさの検討結果	35
図 34	稚内層中の割れ目の代表的な透水性と DI の関係	40
図 35	試験体の設置概略図	40
図 36	緩衝材中の温度の計測結果	41
図 37	試験体の解体状況	41
図 38	緩衝材ブロック内での飽和度の分布	42
図 39	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（幌延地下水と同程度の塩濃度の水を浸潤させた場合）	42
図 40	水圧擾乱試験および透水試験で認められた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	44
図 41	水圧擾乱試験で認められた稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元と断層のずれの関係	45
図 42	水圧擾乱試験を行った断層	46

図 43	HDB-5 孔、HDB-6 孔および HDB-9 孔付近の地下水移行時間の深度分布	48
図 44	地下水移行時間の解析結果の例	48
図 45	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	50
図 46	水質調査の様子	52
図 47	環境影響調査の様子	52
図 48	安全パトロールの様子	53
図 49	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	55

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 7 年度の主な調査研究の実施内容	11
表 3	割れ目の発達する堆積岩（単層）の地質学的な分類と地下深部における割れ目の開口 幅の調査・評価手法	37
表 4	割れ目の発達する堆積岩（単層）の地質学的な分類と地下深部の割れ目の代表的な透 水性の調査・評価手法	39
表 5	掘削工事のスケジュール（令和 7 年度）	51

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ています。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7年2月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、高レベル放射性廃棄物については、「最終処分の実現に向け、特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針に基づき、国が前面に立ち取り組む。」との考え方が示され、「地層処分の技術的信頼性の更なる向上に向け、引き続き、国、NUMO^{*4}、JAEA^{*5}等の関係機関が、全体を俯瞰して技術開発を着実に進め、最新知見を定期的に反映するとともに、その専門的な評価が国民に十分に共有されることが重要である。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。

また、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）が定められており、この第4期中長期目標を達成するために、原子力機構は、「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500 m）に坑道を展開して

※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、研究開発に係るものを主要な業務として、中長期的（5年～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健全な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および第7条に基づき、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。

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当たっては、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、地下水の流れが非常に遅い領域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7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および500m調査坑道の掘削を継続します。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}（図2）。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。

幌延深地層研究センターの地下施設で研究対象としている地層は、声問層と稚内層であり（図3）、声問層は稚内市声問付近、稚内層は稚内市街によく認められたことから、それぞれの地名が地層名として古くから与えられています。声問層（珪藻質泥岩）は、主に海底に降り積もった珪

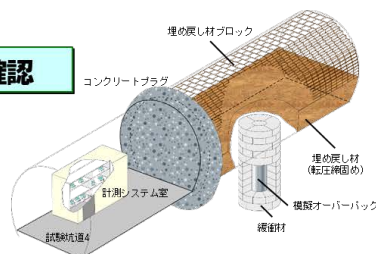
^{*7}: 地下施設で火災が発生した際に、換気立坑から煙や有毒ガスなどを排気し、東立坑もしくは西立坑からの避難を可能とするため、立坑を3本掘削するレイアウトを採用しています。これは、幌延の地下水にはメタンガスが含まれているため、地下水から湧出するメタンガスの発火・爆発の可能性を考慮して、速やかに地上まで避難することを想定しているためです。

藻と呼ばれる植物プランクトンの遺骸から構成され、地下施設周辺の堆積年代は、約 400 万年前～200 万年前と推定されます^(1, 2, 3)。一方、稚内層は、声問層と同様の珪藻の遺骸が堆積の進行に伴ってより深くに埋没することで地温の影響などを受けて溶解し、新たな鉱物として再沈殿⁽²⁾してできた、声問層より硬い岩石（珪質泥岩）からなる地層です。地下施設周辺の稚内層の堆積年代は、約 700 万年前～400 万年前と推定されます^(1, 2, 3)。

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。

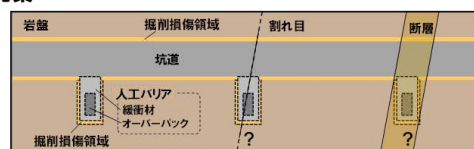


閉鎖技術オプションの整理

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）

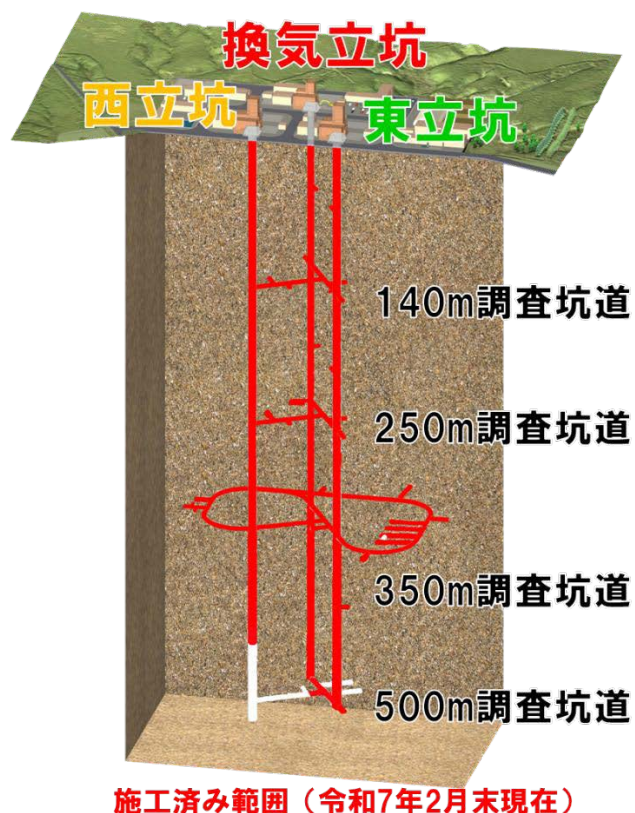
表 1 幌延深地層研究計画の令和 2 年度以降のスケジュール

		第4期中長期目標期間									
		第3期		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、達成モデルの適用性確認 国際プロジェクトにおける解析	達成モデルの適用性確認 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										
	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									
		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】											

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きます。
坑道掘削の工程は今後の施工計画策定や工事進捗に応じて見直していきます。

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。



施工済み範囲（令和7年2月末現在）

図 2 地下施設イメージ図

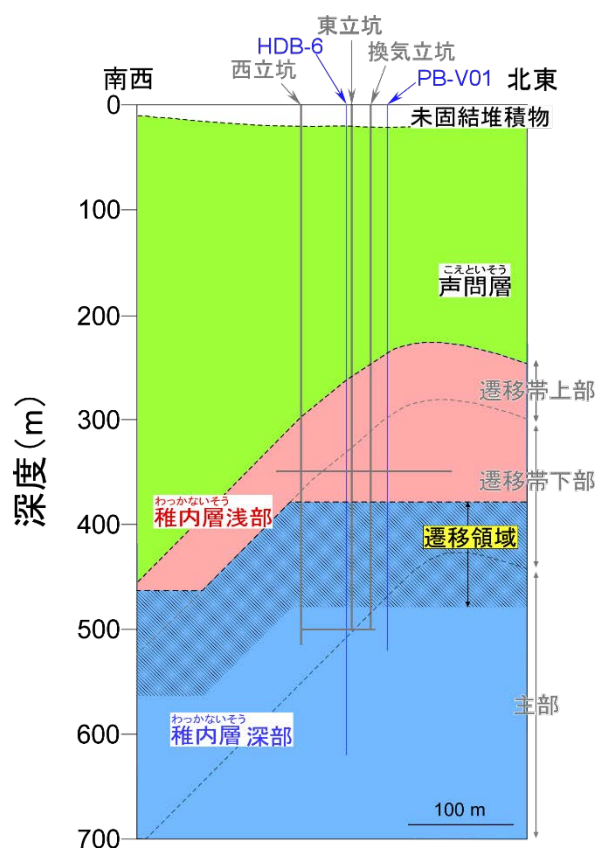


図 3 地下施設周辺の地質断面図

3. 令和6年度の成果および令和7年度の計画の概要

3.1 令和6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、解体試験までの状態を把握するために既設の自動計測機器でのデータ取得を継続しました。

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詳細な解析を行い、一次元的に連続する移行経路を仮定した解析手法で評価することで、掘削損傷領域の割れ目中の物質の移行挙動を評価する上で重要なパラメータを適切に評価できました。また、有機物・微生物・コロイド*の影響を考慮した物質移行試験では、溶存有機物・微生物・コロイドと希土類元素*の相互作用について室内試験および原位置試験*の結果を整理し、地下深部の環境における希土類元素の挙動の変化を定量的に評価することができました。また、地下水中の有機物・微生物・コロイドの特性に関する知見やその評価手法を、幌延の地下水を事例としたこれまでの試験・分析により整備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、循環機能を備えた試験区間を設けた試験装置を用いることで、複数の経路を移動したトレーサーの挙動を評価することが可能となりました。また、稚内層深部の断層を対象とした透水試験およびトレーサー試験の解析評価を行い、稚内層（稚内層深部）と同様な堆積岩中の物質移行経路をモデル化することができました。

(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、坑道の支保*に用いられる低アルカリ性コンクリートについて、350 m 調査坑道に定置した試験体および 350 m 調査坑道の壁面から採取した吹付けコンクリートに対して実施してきた試験・分析の結果を取りまとめました。その結果、中性化*および地下水による溶出が生じた領域では空隙構造が粗くなるなどの変化が認められるものの、約 10 年間の坑道開放期間ではこの変化に伴う強度の低下は生じていないことなどが分かり、低アルカリ性コンクリート支保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コンクリート支保に隣接する坑道周辺岩盤の長期変化の評価について、坑道掘削から坑道埋め戻し後の再飽和過程の解析手法を整備することができました。

閉鎖技術の実証については、止水プラグの一部を模擬した粘土止水壁について、構築後 5 年が経過した時点においても、構築直後と同等に透水係数が低く保たれていることを確認しました。また、掘削損傷領域の調査技術の高度化について、弾性波*トモグラフィ*や比抵抗*トモグラフィの解析手法を止水プラグの施工試験を予定している試験坑道周辺の調査に適用し、周辺岩盤の調査手法としての適用性を検討しました。さらに、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した。

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*の構築については、埋め戻し材の施工方法として、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ました。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、各工法の施工方法としての見込みを示すことができました。また、緩衝材の定置方法として、堅置き処分孔に設置した緩衝材の流出挙動について、緩衝材の総流出量を評価できるベースモデルを整備するとともに、過年度に実施した原位置試験の結果を用いて、整備したベースモデルの適用性を確認することができました。

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ついて、「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」に関しては、250 m 調査坑道から掘削されたボーリング孔において、声問層中で割れ目の水理学的連結性*が確認された試験区間を対象にトレーサー試験を実施し、良好な試験結果を取得することができました。

「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」に関しては、500 m 調査坑道における原位置調査に先立ち、坑道周辺の掘削損傷領域の広がりや坑道・ピットへの湧水量を予測しました。その結果、掘削損傷領域の広がり、深度 350 m と比べて大きく、また、湧水量の自然低下量は、深度 350 m と比べて、さらに大きいことが予測されました。350 m 調査坑道における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に先立ち、埋め戻し材や止水プラグの設計に必要となる坑道周辺の掘削損傷領域の広がりや水理特性について、ボーリング調査による割れ目の観察や透水試験による坑道周辺の透水係数の評価を行いました。また、吹付け工法による埋め戻し材の施工性を確認するために地上吹付け試験を実施して、施工後の乾燥密度^{*}や施工性へ及ぼす影響を確認しました。

「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」に関しては、地下水压や湧水量の観測データを用いて、地下施設からの定常的な湧水量に関する予測手法を整備するとともに、近接する複数の湧水箇所間の水压干渉を考慮した湧水量を予察的に評価しました。また、350 m 調査坑道で実施している人工バリア性能確認試験で掘削した試験孔周辺の掘削損傷領域の広がりを解析と原位置試験により確認するとともに、緩衝材の膨潤^{*}に伴って掘削損傷領域の割れ目が開きにくくなることを示しました。

「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」に関しては、過年度に実施した試験結果などを用いて、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5年度に開始した原位置試験のモニタリングを継続するとともに、一組の試験体を解体しました。その結果、緩衝材ブロックのヒーター接触部ではひび割れが生じるものの、緩衝材の鉱物組成や化学組成には顕著な変化は認められないことを確認しました。この原位置試験の結果ならびにひび割れが生じた緩衝材に対する浸潤挙動を確認する室内試験の結果などから、短期的に100℃を超えた場合に緩衝材に生じる変質や、人工バリアおよびその周辺に発生する現象を評価する手法について整備することができました。

(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^{*}に与える影響の把握手法の整備および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を目的として、過年度に実施した断層の水圧擾乱試験^{*}の結果の詳細な解析や、割れ目の水理学的連結性の指標となる水みちのつながり方の次元^{*}と DI の関係を理解するための数値シミュレーションなどを行いました。その結果、稚内層に類似する地層の場合、地殻変動が地層の透水性に与える影響は、断層や割れ目の水理学的特性と DI との関係により評価できることが分かりました。また、水圧擾乱試験による断層の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詳細な解析を行いました。その結果、断層の力学的な安定性を表す指標のひとつであるせん断^{*}変形のしにくさを水圧擾乱試験により原位置で適切に評価できることが確認できました。

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、広域スケール（十数 km×十数 km）の領域を対象に地下水移行時間を解析し、割れ目に沿って地下水が流れている場合の堆積岩の水理学的有効間隙率^{*}の適切な与え方を示すことができました。そして、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してモデル化する技術を取りまとめました。

(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、東京大学、京都大学、幌延地圏環境研究所^{*8}、電力中央研究所^{*9}などの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では、令和4年度に開始した幌延国際共同プロジェクト（Horonobe International Project、以下、HIP）^{*}を継続しました。HIPでは3つのタスクを設定して研究活動を進めています。タスクA（物質移行試験）では250 m 調査坑道でトレーサー試験を実施するとともに、試験計画の検討や、過去に取得したデータに基づく数値解析を行いました。タスクB（処分技術の実証と体系化）では500 m 調査坑道の試験坑道の掘削前における地質状況や掘削損傷領域、湧水量の予測解析と原位置調査の計画検討を実施しました。タスクC（実規模の人工バリアシステム解体試験）では人工バリア性能確認試験の解体試験計画を検討しました。また、これらの実施計画や進捗状況、結果について、管理委員会や3つのタスクごとの会合において議論しました。さらに、令和6年6月に合同タスク会合を幌延深地層研究センターで開催し、坑道の整備状況や試験の準備状況について確認しました。なお、HIPは令和4年度後半から令和6年度までをフェーズ1、令和7年度から令和10年度までをフェーズ2に分けて実施することとしており、令和6年度はフェーズ1の研究成果を取りまとめました。フェーズ1には原子力機構を含めて国内外の11機関^{*10}が参加しました。

以上のように、令和6年度は計画していた調査研究を着実に進めて、想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6年度の調査研究成果報告書に取りまとめます。

3.2 令和7年度の計画の概要

(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ついて、解体試験までの状態を把握するためにデータ取得を自動計測機器により継続します。また、解体試験計画の具体化や室内試験を対象とした解析検討を継続するとともに、原位置試験を対象とした解析検討の準備を行います。

(2) 処分概念オプションの実証

坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化では、以下の4つの課題について調査研究を進めます。

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

令和6年度に実施したトレーサー試験結果の解析評価を行いつつ、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の整理を進めます。

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

500 m 調査坑道において先行ボーリング調査を行い、岩石の強度や岩盤の透水性などのデータを取得します。また、試験坑道の掘削と地質観察による地質/地質構造データや、トモグラフィ調査による試験坑道周辺の掘削損傷領域の広がりに関するデータを取得します。これらの結果に基づき、令和6年度に実施した予測手法の妥当性確認と手法の更新を行います。埋め戻し材や止水プラグの設計に必要となる坑道周辺の掘削損傷領域の広がりや水理特性について、ボーリング調

^{*8}: 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。

^{*9}: 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。

^{*10}: 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（CRIEPI、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。

査による割れ目の観察やトモグラフィ調査、水理試験などを継続して原位置におけるデータを取得します。また、埋め戻し材と止水プラグの施工については、地下坑道における施工を想定した条件での吹付け試験を実施して、350 m 調査坑道における原位置施工試験に向けた検討を行い、計画検討を進めます。

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

近接する複数の湧水箇所間の水圧干渉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に関して、深度 500 m の坑道掘削に伴う湧水量を観測するとともに、解析において予測された定常湧水量の範囲に収まるかどうかを確認します。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に関しては、500 m 調査坑道において施工予定のピット周辺の掘削損傷領域の広がりに関する予測解析を実施するとともに、原位置における掘削損傷領域の把握のための試験計画を検討します。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に関しては、湧水量の減少速度を予測するための手法整備に向けた解析を実施します。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に関しては、断層や既存割れ目を対象として割れ目の開きにくさを評価するための試験計画を検討します。

④ 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理

割れ目の開口幅とその開きにくさなどに関する調査・評価手法の整理を拡充するとともに、割れ目からの湧水量やピット周辺の掘削損傷領域の広がりについて調査・評価手法の整理を進めます。

(3) 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・岩盤力学に関す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、坑道掘削の影響を調査するため、地表や坑道に設置した計測器を用いて、岩盤の微小な変形の観測を継続するとともに、地上および地下施設での地震観測を継続します。

(4) 地下施設の建設・維持管理

西立坑および 500 m 調査坑道の掘削を継続し、令和 7 年度末に施設整備を完了する予定です。掘削に当たっては、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。

(5) 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。

(6) 安全確保の取り組み

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。

(7) 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、幌延国際共同プロジェクト（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、フェーズ 2 の研究に着手するとともに、令和 6 年度に取りまとめたフェーズ 1 の研究成果の報告書を公開します。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。なお、令和 7 年 4 月時点で、HIP には原子力機構を含めて国内外の 9 機関^{*11}が参加しています。

令和 7 年度に地下施設、研究所用地および幌延町内で行う主な調査研究の実施内容を表 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 4、図 5 および図 6 に、研究所用地における主な施設と観測装置の配置を図 7 に、幌延町内における主なボーリング孔および観測装置の配置を図 8 に示します。さらに、図 8 に示した A-A'断面の地質断面図を図 9 に示します。

表 2 令和 7 年度の主な調査研究の実施内容

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	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
	処分概念オプションの実証	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	- 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となる情報の整理	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、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、上幌延地区など
地下施設の建設・維持管理			西立坑および500 m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

*11: 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(CRIEPI、日本)、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。

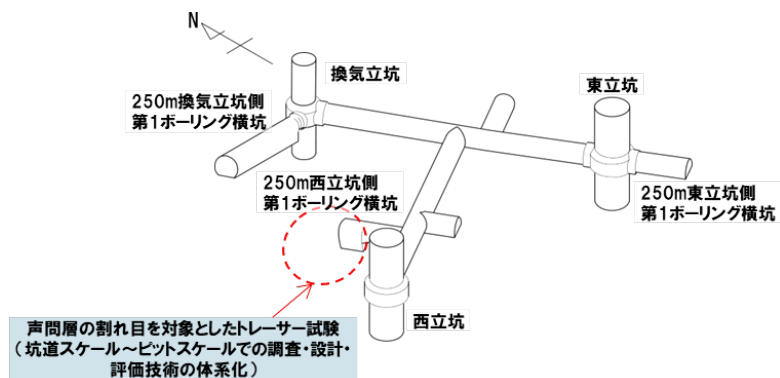


図 4 250 m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

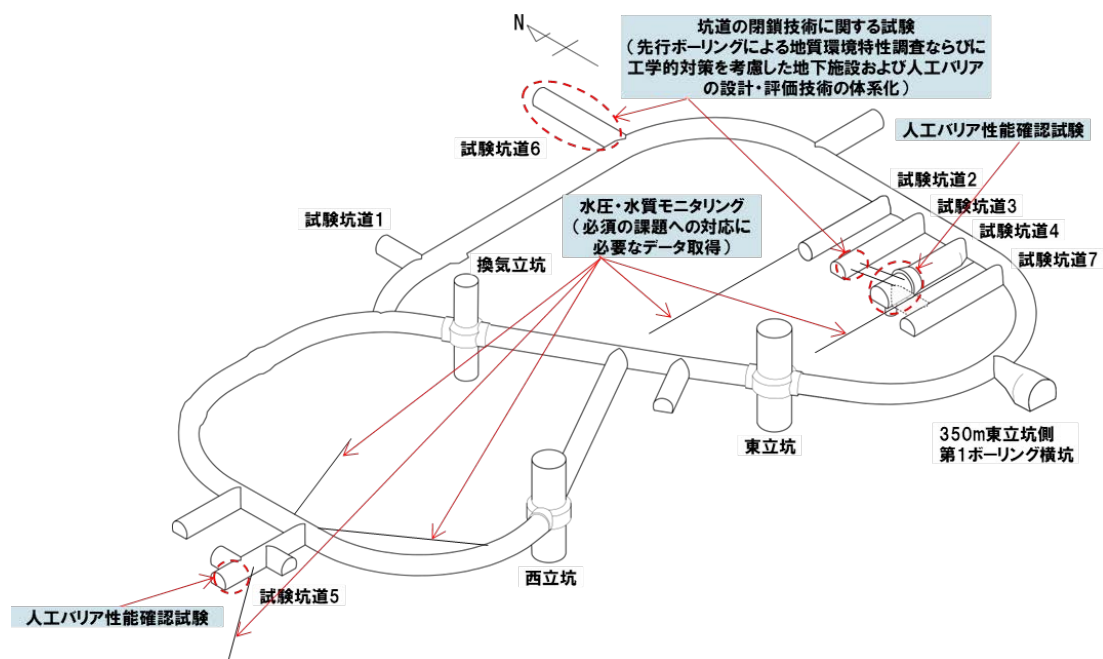


図 5 350 m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

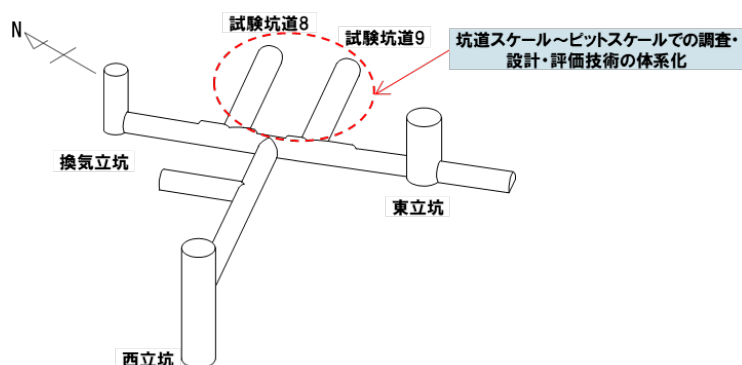


図 6 500 m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

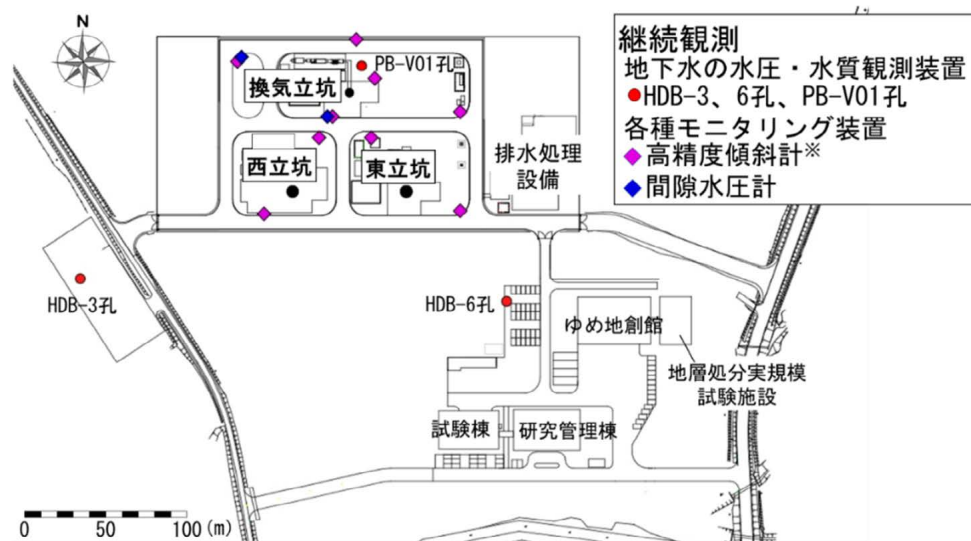


図 7 研究所用地における主な施設と観測装置の配置

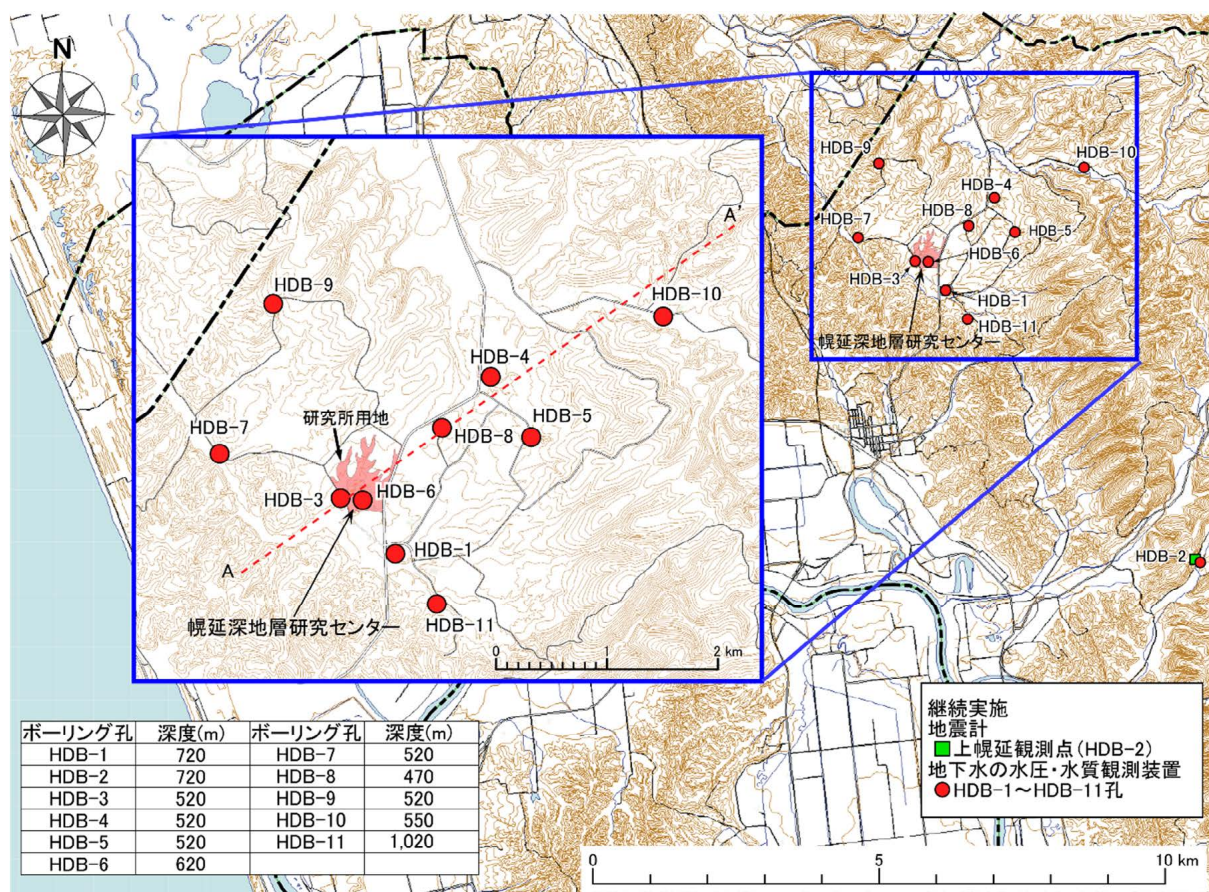
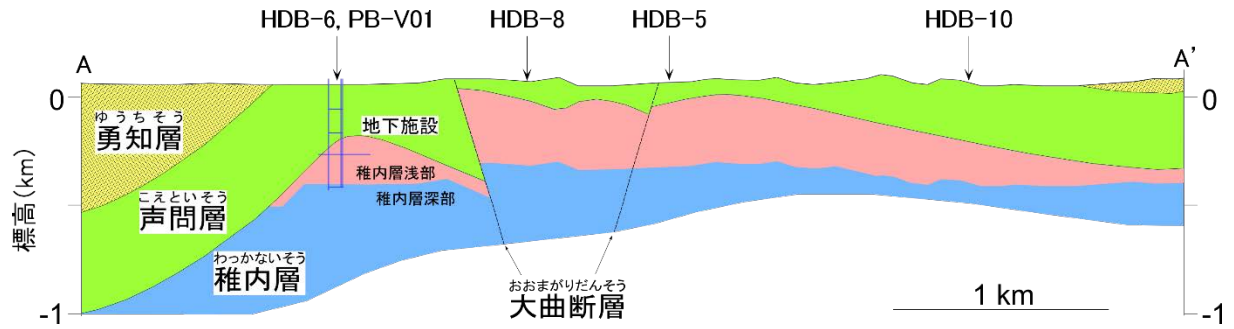


図 8 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所

国土地理院の基盤地図情報（基本項目）を加工して作成



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試験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試験により、オーバーパック、緩衝材、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試験については、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試験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6年度は、人工バリア性能確認試験（図10）の解体試験までの状態を把握するために既設の自動計測機器によるデータ取得を継続しました。緩衝材中の計測データの一例を図11に示します。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、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することで、緩やかに増加しており、令和5年度と同様の傾向が継続していることが確認できました。

また、幌延国際共同プロジェクト（HIP）のタスクC（実規模の人工バリアシステム解体試験）においても、解体試験や解体試験のデータを使用した解析検討に向けた準備として、参加機関の間で試験計画の具体化に向けた議論や、これまでの室内試験で得られた緩衝材中の浸潤挙動や膨潤挙動などのデータを活用した解析検討を実施しました。

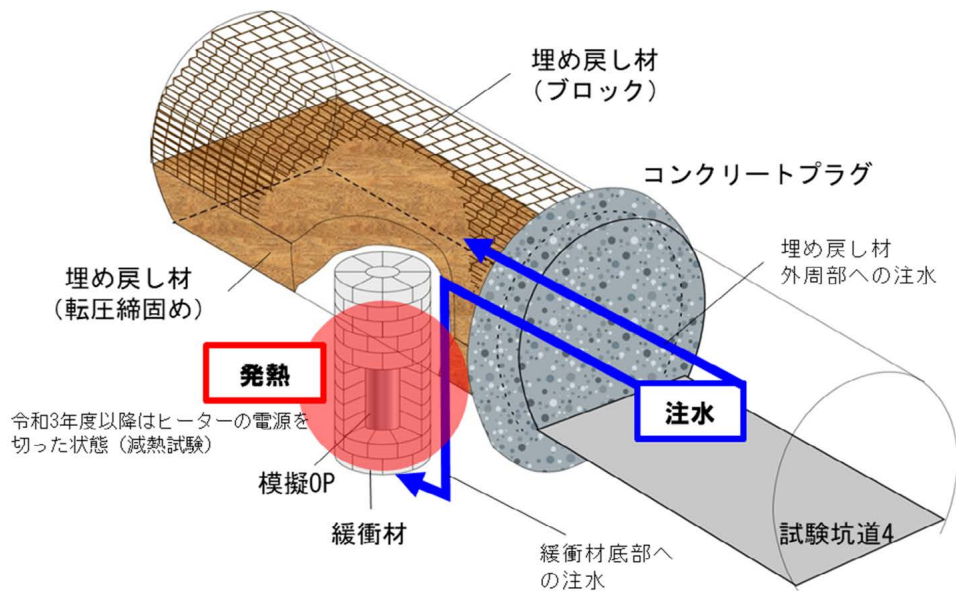


図10 人工バリア性能確認試験の概念図

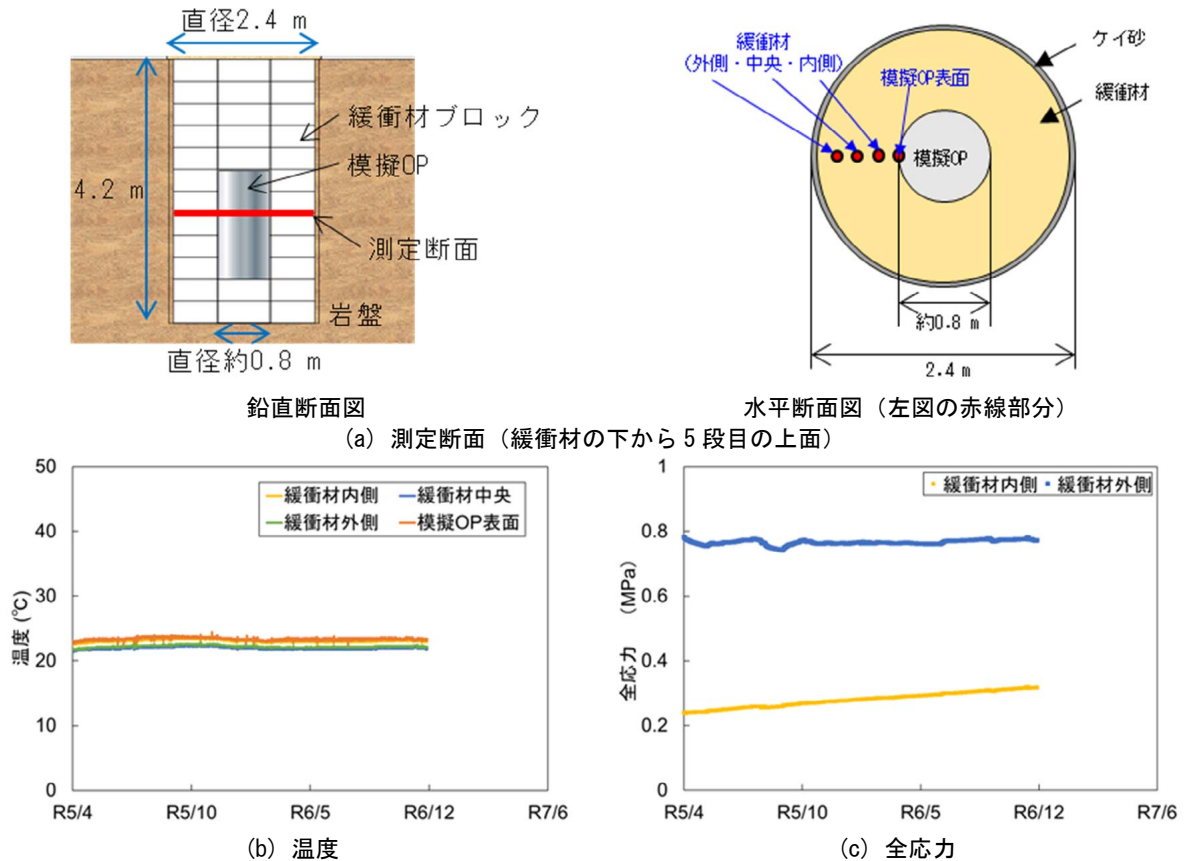


図 11 人工バリア性能確認試験の計測データの一例

令和 7 年度は、解体試験までの状態を把握するために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 の参加機関の間で解体試験計画の具体化や室内試験を対象とした解析検討を継続するとともに、解体試験を対象とした解析検討の準備を行います。

また、「5.2 高温（100 °C 以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験」において設置した一組の試験体については、熱－水理－力学－化学連成現象の評価のための参考情報として、既設の自動計測機器でのデータ取得を継続します。

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 12）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。

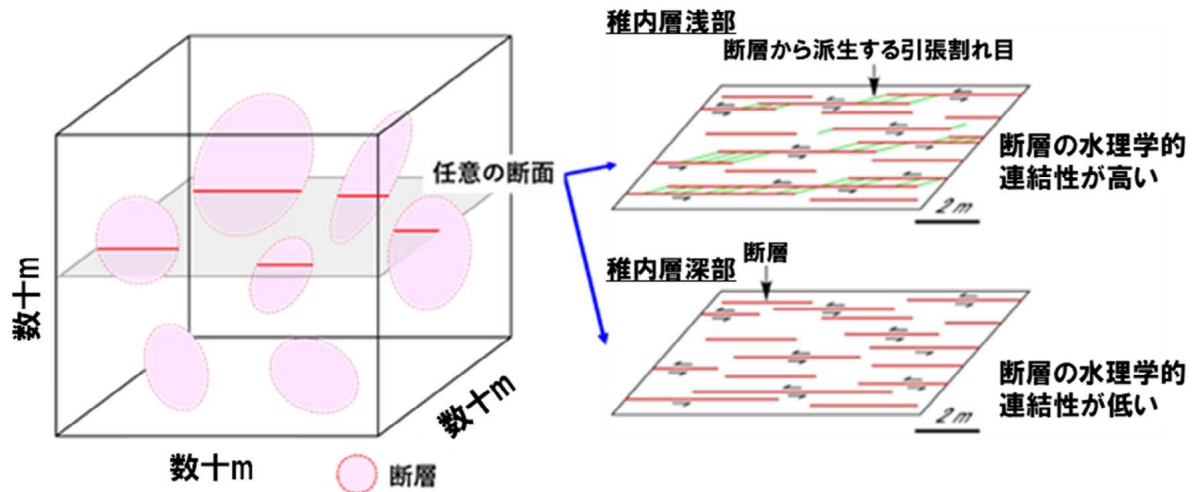


図 12 ブロックスケールにおける物質移行のイメージ

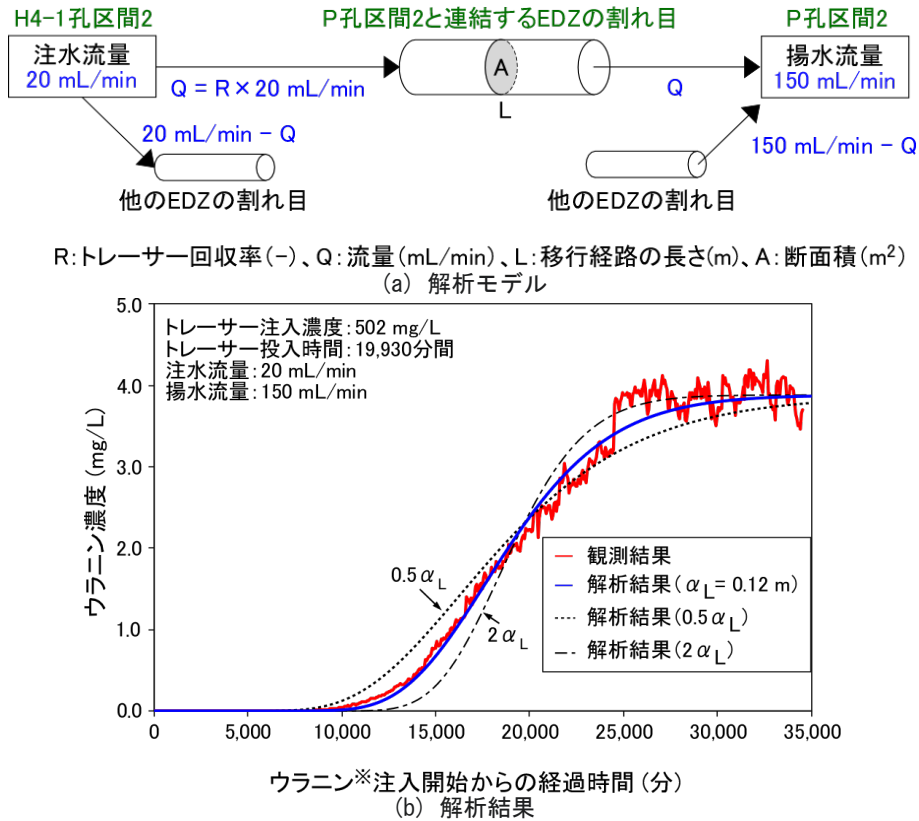
(1) 掘削損傷領域を対象とした物質移行試験

令和 6 年度は、掘削損傷領域（Excavation Damaged Zone、以下、EDZ）の物質移行特性のうち、これまでに知見の得られていない重要な特性である EDZ の割れ目中の縦方向分散長^{*}の評価手法の整備を目的に、過年度に実施した試験坑道 4（図 5 参照）周辺の EDZ を対象としたトレーサー試験^(4, 5, 6)の詳細な解析を行いました。一次元的に連続する移行経路を仮定した解析手法を適用した結果（図 13(a)）、EDZ の割れ目中の物質移行に関わる縦方向分散長を評価できることを確認しました^(5, 6)（図 13(b)）。EDZ の割れ目以外の天然の割れ目や健岩部において評価された縦方向分散長と比較すると、今回評価された縦方向分散長は評価スケール（トレーサーの移行経路の長さ）の 100 分の 1 から 10 分の 1 の回帰式の間にプロットされることから（図 14）、EDZ の割れ目においても天然の割れ目や健岩部と同程度の縦方向分散が生じることが分かりました⁽⁶⁾。これらのことから、EDZ の割れ目中の縦方向分散長は、EDZ の割れ目を対象にトレーサー試験を実施し、EDZ の割れ目中の物質の移行を一次元的に連続する移行経路を仮定した解析手法で適切に評価できることを確認しました⁽⁶⁾。

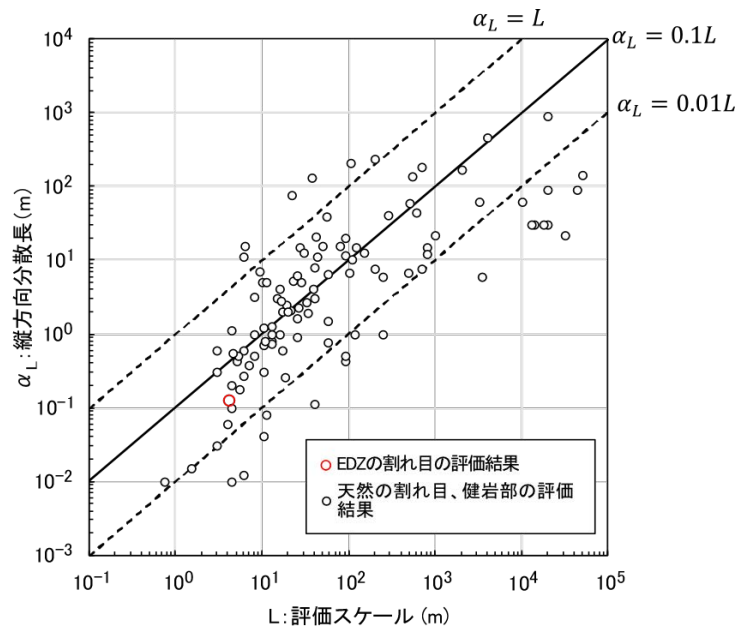
令和 6 年度までの成果の概要

令和 2 年度から令和 6 年度にかけて EDZ の割れ目を対象にトレーサー試験を実施し、EDZ の物質移行特性を評価するためのデータを取得するとともに、これらの結果について解析評価を行ってきました。その結果、一次元的に連続する移行経路を仮定することにより EDZ の割れ目中の縦方向分散長を適切に評価できることが確認できました。これにより、EDZ における物質移行のモデル化・解析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つた場合に追加で試験や解析を実施します。

図 13 トレーサー試験の再現解析結果⁽⁶⁾

(a) 解析モデルでは H4-1 孔の区間 2 と P 孔の区間 2 とを水理学的に連結させる EDZ の割れ目を一次元のチューブ (長さ: $L=4.2 \text{ m}$) で仮定しています。また、本解析では注水流量 (20 mL/min) のうち、トレーサー回収率※ (R) に相当する割合の流量 (Q) のみが H4-1 孔の区間 2 から P 孔の区間 2 につながる EDZ の割れ目に流れる条件を仮定しています。(b) 解析結果には、縦方向分散長と解析結果との感度を示すために、観測結果の再現性が最も良い縦方向分散長 (α_L) の値を 0.5 倍、2 倍とした解析結果も示しています。

図 14 縦方向分散長と評価スケールの関係性⁽⁶⁾

○は EDZ の割れ目の評価結果、○は既存の天然の割れ目、健岩部での評価結果⁽⁷⁾をプロットしています。本検討で評価した EDZ の割れ目の縦方向分散長 ($\alpha_L=0.12 \text{ m}$) は評価スケール (トレーサーの移行経路の長さ: L) に対して 100 分の 1 から 10 分の 1 の回帰式の間にプロットされます。

(2) 有機物・微生物・コロイドを対象とした物質移行試験

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ために、地下水中に含まれる溶存有機物・微生物・コロイド（地下水コロイド）と地下水にトレーサーとして添加した希土類元素との相互作用を把握するための原位置試験および室内試験を実施しました。なお、コロイドのサイズは一般的に $1\text{ nm} \sim 1\text{ }\mu\text{m}$ または $1\text{ nm} \sim 0.2\text{ }\mu\text{m}$ と考えられていますが、ここでは、 3 kDa^* 限外ろ過^{*}でフィルターを通過する大きさの成分（数 nm 未満）を溶存態、 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下のサイズのフィルターを通過し溶存態より大きい成分をコロイドと見なします。 10 kDa 限外ろ過フィルターを通過する大きさの成分は大部分が溶存態と想定されますが、幌延の地下水中に含まれる腐植物質⁽⁸⁾を一部含むと考えられます。各試験では、添加した希土類元素が地下水コロイドに吸着することにより形成された擬似コロイドの挙動を把握することを想定しています。

原位置試験について、令和 5 年度は、350 m 調査坑道に掘削したボーリング孔内の地下水に希土類元素などのトレーサーを添加し、その濃度変化を最長 2 週間まで観察する試験（図 15）⁽⁹⁾を実施しました。令和 6 年度は、より長期的な挙動を観察するために、試験期間を約 4 か月間に延長して同様の原位置試験を行いました。

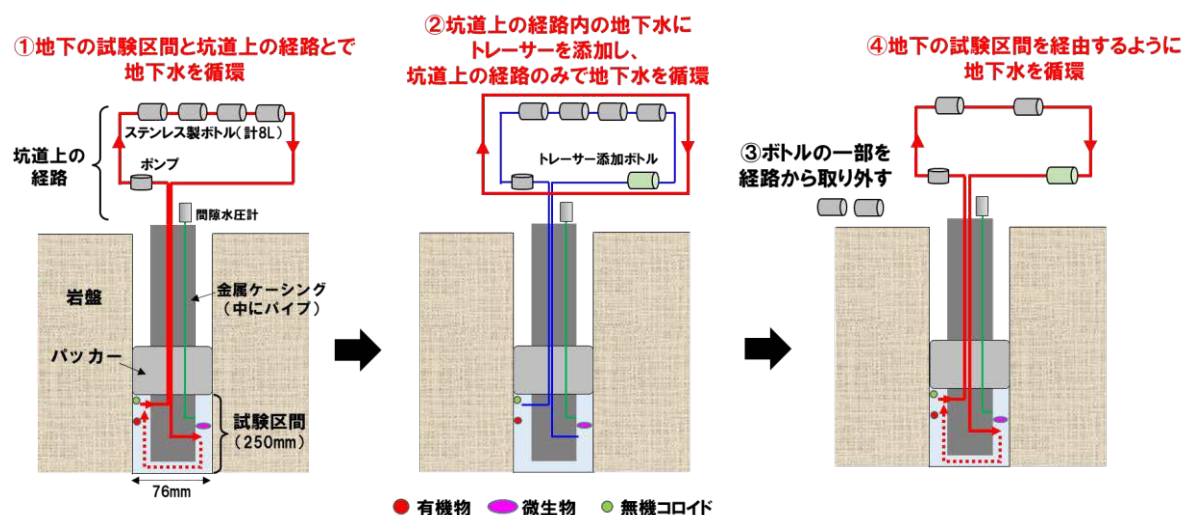


図 15 原位置試験の装置概念図および試験手順

③はトレーサーと地下水中の有機物・微生物・コロイドとの反応を調べるための試料、④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。

得られた結果の一例を図 16 に示します。添加した希土類元素の濃度は概ね時間とともに減少し、この濃度減少の程度は、原子量の小さい希土類元素ほど大きいことが分かりました。これは、添加した希土類元素の一部が、幌延の地下水中に含まれるリン酸イオンと錯体^{*}を形成して沈殿したためと考えられます^(10, 11)。

岩盤内の試験区間を循環させずに調査坑道上で保管した地下水と、岩盤内の試験区間を循環させた地下水のいずれにおいても、希土類元素濃度は、未ろ過試料 $>1\text{ }\mu\text{m}$ ろ過試料 $\approx 0.2\text{ }\mu\text{m}$ ろ過試料の関係にありました。この結果から、添加した希土類元素の一部がコロイドよりも大きいサイズの粒子（懸濁粒子^{*}など）に吸着（またはコロイドよりも大きいサイズで沈殿）していること、および $0.2\text{ }\mu\text{m} \sim 1\text{ }\mu\text{m}$ のサイズの地下水コロイドと希土類元素との相互作用は小さいことが示唆されます。

$0.2\text{ }\mu\text{m}$ ろ過試料と 10 kDa 限外ろ過試料の希土類元素濃度に着目すると、希土類元素を添加して数十日が経過し濃度変化が落ち着いた時点で、調査坑道上で保管した地下水では $0.2\text{ }\mu\text{m}$ ろ過試料 $\approx 10\text{ kDa}$ 限外ろ過試料の関係が認められました。一方、岩盤内の試験区間を循環させた地下水では $0.2\text{ }\mu\text{m}$ ろ過試料 $>10\text{ kDa}$ 限外ろ過試料の関係が認められました。調査坑道上で保管した地下水では希土類元素が $10\text{ kDa} \sim 0.2\text{ }\mu\text{m}$ のサイズの地下水コロイドに吸着していないのに対し、岩盤内の試験区間を循環させた地下水中では、 $10\text{ kDa} \sim 0.2\text{ }\mu\text{m}$ のサイズの地下水コロイドに吸着していたことが示唆されます。

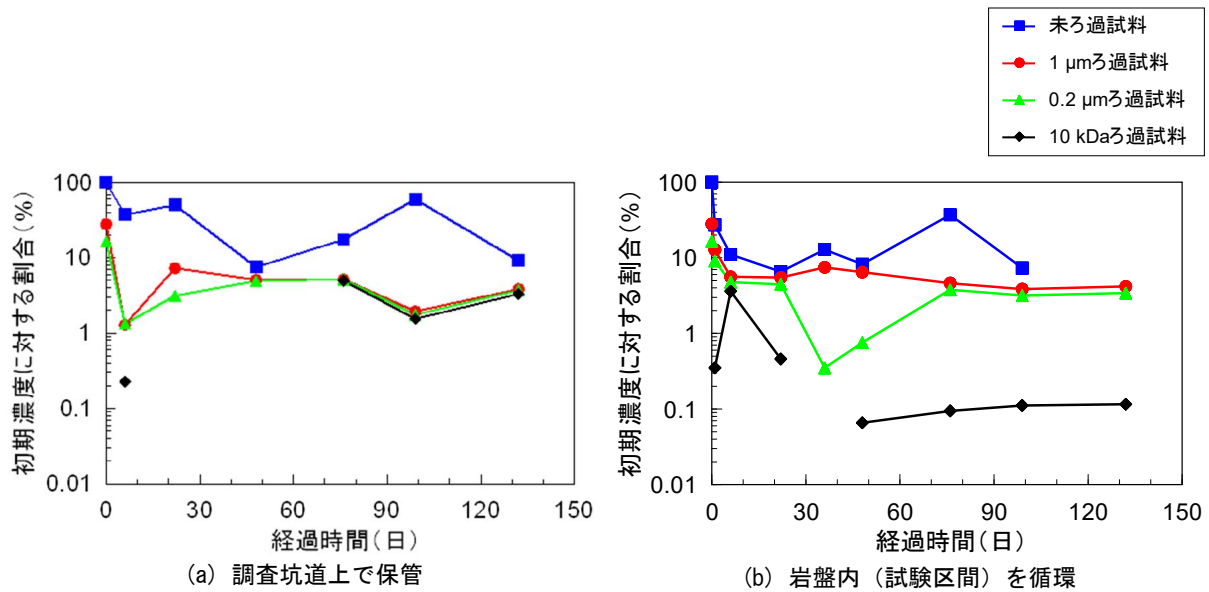


図 16 原位置試験におけるランタン（La）濃度の時間変化

縦軸は、希土類元素を添加した直後の未ろ過試料中の濃度を 100 % とし、その値に対する各試料の濃度の割合を示しています。

室内試験については、過年度に実施した、350 m 調査坑道のボーリング孔内から採取した原位置の地下水に希土類元素を添加する試験^(5, 9)の結果を整理しました（図 17）。原位置の地下水にそのまま希土類元素を添加した場合（図 17 の「地下水コロイドあり」）の最終的な希土類元素濃度（0.2 μm ろ過試料中）は、原位置の地下水中に含まれる地下水コロイドを除去するために 3 kDa のフィルターで限外ろ過してから希土類元素を添加した場合（図 17 の「地下水コロイドなし」）の約 10 倍でした。この結果は、地下水中に地下水コロイドが含まれる場合、それらとの相互作用のために、添加した希土類元素の沈殿量や試験容器への吸着量が少なくなり、より高い濃度で希土類元素が地下水中に存在するようになったことを示唆しています。

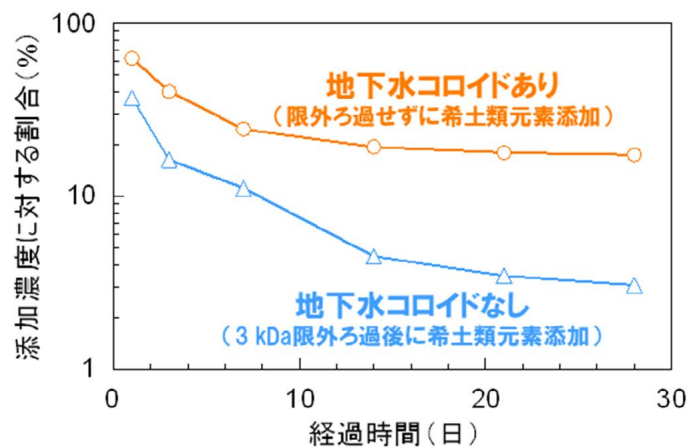


図 17 室内試験における希土類元素添加後の 0.2 μm ろ過試料中のランタン（La）濃度の時間変化

縦軸は、希土類元素を添加した直後の未ろ過試料中の濃度を 100 % とし、その値に対する各試料の濃度の割合を示しています。

また、地下に存在する微生物が物質移行に及ぼす影響を明らかにするために、調査坑道から掘削されたボーリング孔を用いて、深度 350 m までの地下水中の微生物群集組成とそれらの代謝機能について詳細な調査を行いました⁽¹²⁾。地下環境には未だかつて培養されたことのない未知の微生物が豊富に存在しており、地下でののはたらきは未解明な部分が多く残されているため、環境中

のすべての遺伝子を網羅的に解析する手法（メタゲノム解析）によって、地下水中の微生物のモニタリングを行いました。その結果、幌延の地下環境では、未知微生物も含めて、水素代謝、炭酸固定、メタン代謝、硫黄代謝反応などが主な微生物代謝反応であることが分かりました。また、深度の異なる地下空間であっても、ほぼ同一のゲノムが全体の約 3 分の 1 の割合で検出されました（同一のゲノムは大陸の異なる米国の地下環境からも検出されています）。このことは、幌延の地下浅部では、最終氷期の比較的水の流れが速かった時代^(13, 14)に水の流れとともに移動・分散^{*}した微生物が、最終氷期から現在までの水の流れが緩慢な環境下^(13, 14)では長期にわたって動きが制限された可能性を示唆しています。

令和 6 年度までの成果の概要

令和 2 年度から 5 年間にわたり、地下水中の有機物・微生物・コロイド（地下水コロイド）との相互作用が物質移行に与える影響を評価するために、主として希土類元素をトレーサーに用いた室内試験および原位置試験を行ってきました。その結果、室内試験により地下水コロイドとの相互作用による希土類元素の挙動の変化を（図 17）⁽⁹⁾、原位置試験により希土類元素と地下水コロイドに加えて地下深部の岩盤が存在する環境下での挙動の変化を（図 16）、それぞれ定量的に見積もることができました。また、地下水コロイドの影響評価において必要となり得る、地下水中の有機物・微生物・コロイドの特性に関する知見やその評価手法について、幌延を事例とした試験・分析^(11, 12, 15, 16, 17, 18, 19)により整備することができました。これらにより、地下水中の有機物・微生物・コロイドが物質移行に与える影響を定量的に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。

(3) ブロックスケールを対象とした物質移行試験

令和 6 年度は、ブロックスケールを対象とした原位置トレーサー試験装置の高度化を目的に、250 m 西立坑側第 1 ボーリング横坑（図 4 参照）から掘削した 2 本のボーリング孔（250-MIG1-2 孔、250-MIG1-5 孔）で、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した。本適用試験では、従来の試験手法⁽²⁰⁾、すなわち、2 本のボーリング孔を使ったトレーサー試験における注入区間と回収区間の 2 区間においてトレーサー濃度の経時変化を観測する方法に加え、他の複数の試験区間でも区間内の流体を循環させることでトレーサー濃度の経時変化を同時観測可能な試験装置を適用しました。その結果、2 本のボーリング孔を用いたトレーサー試験において、多地点でのトレーサー濃度の経時変化の観測が可能なが確認できました。これにより、2 本のボーリング孔を用いたトレーサー試験を実施する際に、循環機能を備えたトレーサー回収区間を設けることで、複数の経路を移動するトレーサーの挙動を評価可能な試験装置を構築できることを確認しました。

ブロックスケールにおける割れ目中の移行経路の特性として、これまでに知見に乏しい深部堆積岩中の割れ目中の移行経路のモデル化手法の整備を目的に、過年度に実施した稚内層深部の断層を対象とした孔間透水試験およびトレーサー試験⁽⁴⁾の詳細な解析を実施しました。その結果、孔間透水試験の水理解析から、断層の水理学的連結性は低く、一次元的かつ非常に長く曲がりくねって連続した水みちを仮定することにより、得られた試験結果を再現できることが分かりました⁽²¹⁾。この結果は、既往研究⁽²²⁾で示されたダクティリティインデックス（DI）と水みちのつながり方の次元の関係と整合しています（図 18）。また、水理解析と同様に、一次元的に連続する非常に長い物質の移行経路を仮定したモデルに基づきトレーサー試験結果の再現解析を行った結果、トレーサー試験で観測されたトレーサーの濃度変化をよく再現できることが分かりました⁽²¹⁾（図 19）。これらにより、稚内層深部のような断層や割れ目の水理学的連結性が低い堆積岩（5.1.2 (4) の表 4 の分類 I-a の堆積岩の DI>2 の領域）では、一次元的かつ非常に長く曲がりくねって連続した移行経路を仮定することにより物質の移行経路を適切にモデル化できることが確認できました。

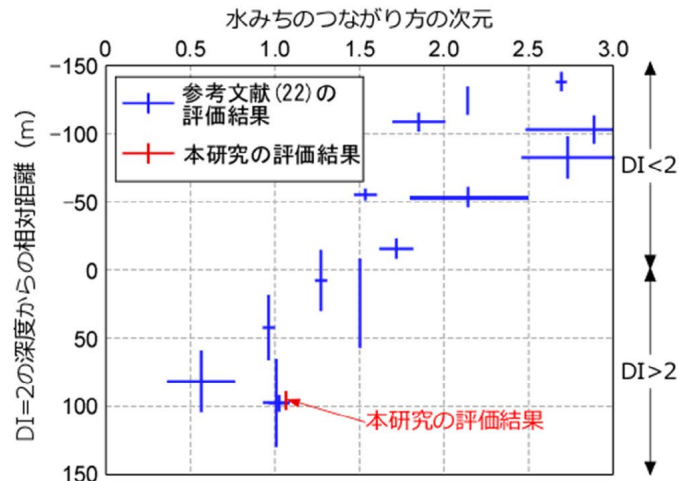


図 18 DI と水みちのつながり方の次元の関係⁽²¹⁾

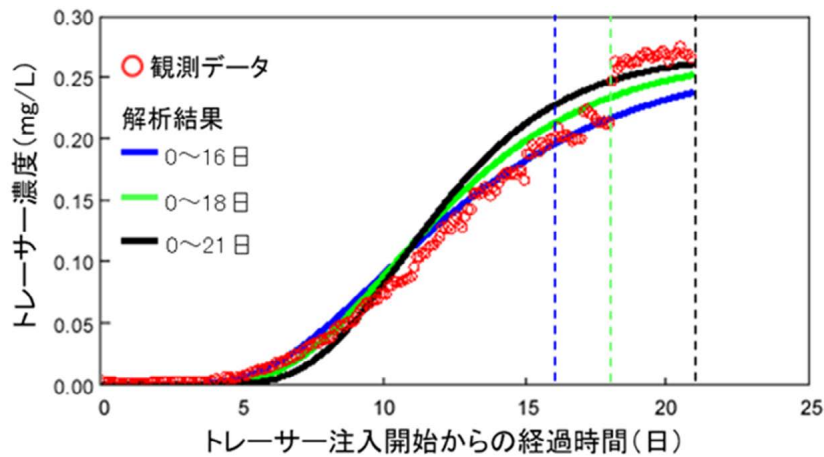


図 19 ブロックスケールを対象としたトレーサー試験結果の再現解析⁽²¹⁾

トレーサーが移行する経路の半径などについて、試験中の濃度変化を最も良く再現できる条件を観測値と解析値をフィッティングさせることにより検討しました。図中○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 年度までの成果の概要

令和 2 年度以降の検討から、稚内層深部を対象としたブロックスケールでの原位置トレーサー試験によるデータ取得、その結果のモデル化/解析手法の整備を通じて、ブロックスケールの物質移行特性を把握するための一連の手法を提示することができ、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。

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。

「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」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。

(1) 搬送定置・回収技術の実証

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目的として、吹付けコンクリート支保の特性や坑道周辺の地質環境の長期的な変化を調査しました。

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、令和 2 年度より、処分坑道に施工される低アルカリ性セメント（HFSC^{*}）を用いた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^{*}を継続してきました。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 HFSC コンクリートの試験体を、坑道内における大気条件下および浸潤条件下に定置し、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^(23, 24)。また、令和 5 年度には、地下施設に施工後約 10 年が経過した HFSC 吹付けコンクリートを坑道壁面から採取して、定置試験体と同様の分析を行いました^(9, 24)。令和 6 年度は、これらの結果ならびに過去に実施された HFSC および普通ポルトランドセメント（OPC）を用いた吹付けコンクリートの分析結果⁽²⁵⁾を踏まえて、坑道表面および岩盤接触部で生じている吹付けコンクリートの変質を評価しました。

定置試験体と坑道壁面から採取した試料のいずれにおいても、大気との接触部においては、大気中の二酸化炭素が拡散^{*}によりコンクリート内に侵入することによる中性化が進行していました。坑道表面の吹付けコンクリートの中性化は、OPC よりも HFSC の方が速く進行していることが分かりました（図 20）。この違いは、セメント水和物（ケイ酸カルシウム水和物（C-S-H）^{*}、エトリンガイト^{*}など）の組成が OPC と HFSC とで異なることによるものと考えられます。すなわち、OPC が中性化した場合には主に水酸化カルシウムが分解され、より径の大きな炭酸カルシウムに変化するために、空隙率が減少⁽²⁶⁾して空隙構造が密になります。これに対し、HFSC は水酸化カルシウムがほぼ含まれていないために中性化により C-S-H が分解され、空隙構造が粗くなり⁽²⁶⁾、二酸化炭素がコンクリート内に侵入しやすくなるためと考えられます。

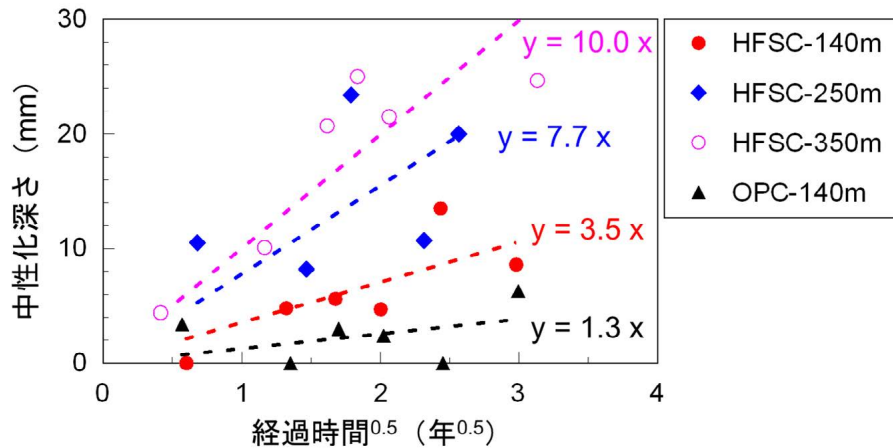


図 20 坑道壁面から採取した吹付けコンクリート試料の中性化深さと経過時間の関係
 中性化の深さは一般的に経過時間 (t) の平方根 ($t^{0.5}$) に比例するため、図の横軸を経過時間の平方根 (経過時間 $^{0.5}$) で示しています。

定置試験体と坑道壁面から採取した試料のいずれにおいても、HFSC の中性化領域では、中性化していない領域と比べてカルシウムや硫黄の濃度が減少していること、直径 $0.2 \mu\text{m}$ 以下の空隙の割合が増加していることが分かりました。以上の結果は、大気中の二酸化炭素との反応により、カルシウムや硫黄を含むセメント水和物が分解し、空隙径が大きくなったと解釈されます。しかしながら、過年度に報告しているように⁽⁹⁾、施工後約 10 年が経過し中性化が進行した坑道壁面からの採取試料においても、一軸圧縮強度に顕著な変化は認められませんでした。

HFSC 吹付けコンクリートの岩盤接触部から約 6 mm の領域においては、非変質領域と比べて直径 $0.003 \mu\text{m} \sim 0.07 \mu\text{m}$ の空隙の割合が増加しており (図 21)、カルシウム・硫黄濃度の減少ならびにナトリウム・マグネシウム濃度の増加が認められました。岩盤から供給された地下水により C-S-H やエトリンガイトなどのセメント水和物が溶解して空隙径が増加するとともに、地下水中に高濃度で含まれるナトリウムやマグネシウムの濃度が増加していると解釈されます。

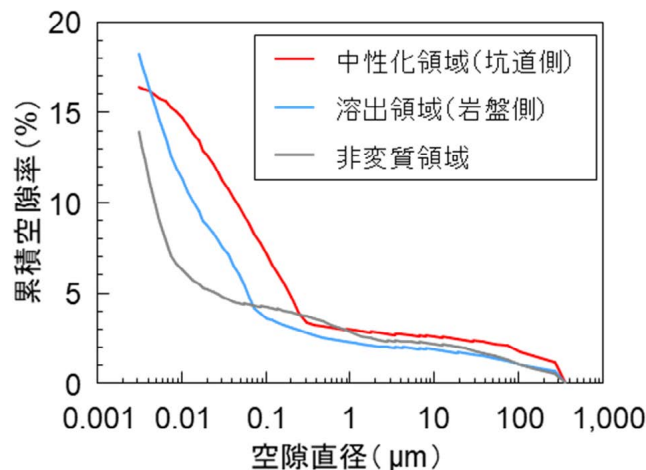


図 21 坑道壁面から採取した HFSC 吹付けコンクリート試料の空隙径分布^(5, 24)

また、過年度に報告しているように⁽⁹⁾、坑道壁面から採取した HFSC コンクリートに対してアウトプット法⁽²⁷⁾および変水位法⁽²⁷⁾を適用したところ、中性化領域を含む坑道側ではいずれの方法でも $10^{-13} \text{ m/s} \sim 10^{-11} \text{ m/s}$ 程度、溶出領域を含む岩盤側では変水位法で $10^{-13} \text{ m/s} \sim 10^{-12} \text{ m/s}$ 程度の透水係数が得られました。中性化領域を含む試料でやや透水性が高い傾向にあるものの、いずれの値も中性化の進行していない定置試験体の透水係数の平均値 (10^{-10} m/s 程度) より低く、中性化によるコンクリートの透水性の増加は生じていないことが示唆されました。

以上に示すように、坑道内でのコンクリート試験体の暴露試験と坑道壁面から採取した吹付けコンクリートの分析の両面から、坑道壁面の大気接触条件と、岩盤との接触界面の湿潤条件での挙動を整合的に把握できました。HFSC 吹付けコンクリートは、OPC に比べて中性化がより速く進行し（図 20）、中性化および地下水による溶出が生じた領域ではセメント水和物の分解により空隙構造が粗くなる（図 21）と考えられます。しかしながら、約 10 年間の坑道開放期間では、中性化に起因するコンクリートの透水性の増加や強度の低下は生じていないことが示唆されました。さらに、中性化の進行速度は HFSC においても OPC と同様に中性化深さと経過時間との一般的な関係（図 20）から予測可能であり、このような関係式から長期的な変質の影響範囲を見積もることが可能であると考えられます。

令和 2 年度から令和 4 年度にかけて、コンクリート支保について、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坑道周辺岩盤の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。解析による予測では、坑道掘削後の 300 年間程度を坑道開放期間とした条件において、周辺岩盤の透水性や飽和度分布が変化するものの、これらが顕著に変化する領域は坑道壁面から 1 m～2 m 程度の範囲であることが示されました。また、坑道埋め戻しから 100 年経過後にはこの領域を除いた周辺岩盤は、ほぼ飽和状態に戻ることが分かりました⁽²³⁾。

また、既存の研究では岩石の飽和度は岩盤の長期的力学特性であるクリープ*特性に影響することが確認されています⁽²⁸⁾。令和 5 年度および令和 6 年度は飽和度が異なる岩石試料を用いて、載荷速度を変化させた一軸圧縮試験および多段階クリープ試験を実施しました。得られたデータを基に解析を行い、飽和度の異なる岩石試料の相対的なクリープ寿命を評価したところ、岩石の飽和度が低い場合には飽和度が高い場合と比較してクリープ寿命が延びる結果が得られました。この結果から、坑道周辺岩盤の飽和度が掘削直後の高い状態から変化をしていない条件での長期的な力学変化の解析による評価は、坑道開放条件下において坑道の変形が過小評価されない安全側の結果であることを確認しました。

令和 6 年度までの成果の概要

回収可能性を考慮することにより処分坑道内の空間が長期間にわたって開放された場合に生じ得る、吹付けコンクリート支保の化学状態や空隙構造の変化およびそれらに伴う長期的な物性変化の評価に必要な知見と調査手法を整備することができました。また、コンクリート支保に隣接する坑道周辺岩盤について、坑道掘削から坑道埋め戻し後の再飽和過程の解析手法を整備することができました。さらに、緩衝材や埋め戻し材の状態に応じた除去技術オプションの整理については、過去に実施した機械的除去方式および流体式除去方式⁽²⁹⁾などの技術開発の整備や要素試験に基づくそれら技術の高度化⁽²³⁾により、現実的な時間内で一連の回収・除去作業が実現可能な見通しが得られています。より合理的に人工バリアを回収するための手法の提示についても、1 体の廃棄体を対象とした一連の回収・除去の作業時間の試算方法を整備するとともに、その短縮に資する技術的方策なども提示できました⁽²³⁾。これらの結果により、搬送定置・回収技術の実証について、各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つた場合に追加で試験や解析を実施します。

(2) 閉鎖技術の実証

将来の処分場の閉鎖後に掘削した坑道やその周辺の岩盤が放射性物質の移行経路となることを防ぐための埋め戻し材や止水プラグについて、期待される性能の具体化や設計評価技術の改良・高度化を目的とした数値解析や室内試験、原位置での実証的な試験を実施するとともに、これまでの成果を取りまとめました。

掘削損傷領域（EDZ）の連続性を遮断するための施工技術の実証について、試験坑道 3（図 5 参照）の底盤に坑道拡幅部における止水プラグを縮小して模擬した粘土止水壁を構築し、EDZ を含むように設定した試験領域を対象に、透水係数を指標として地下水移行抑制機能を評価してきました⁽⁹⁾。令和 6 年度は、透水試験を継続し、粘土止水壁の構築後に試験領域の透水係数が時間の経過とともにどのように変化するか調査しました。図 22 にこれまでの試験で得られた試験領域内の透水係数を示します。粘土止水壁の構築前後に実施した透水試験において、構築前の透水係数は約 2×10^{-6} m/s の値を、構築後の透水係数は約 3×10^{-9} m/s の値を示し、粘土止水壁を構築することで試験領域内の透水性が低下することを確認しています。また、粘土止水壁を構築して 5 年が経過した時点においても試験領域の透水係数は 10^{-9} m/s 以下の値を示し、試験領域の透水係数は構築直後と同等に低く保たれていることを確認しました。

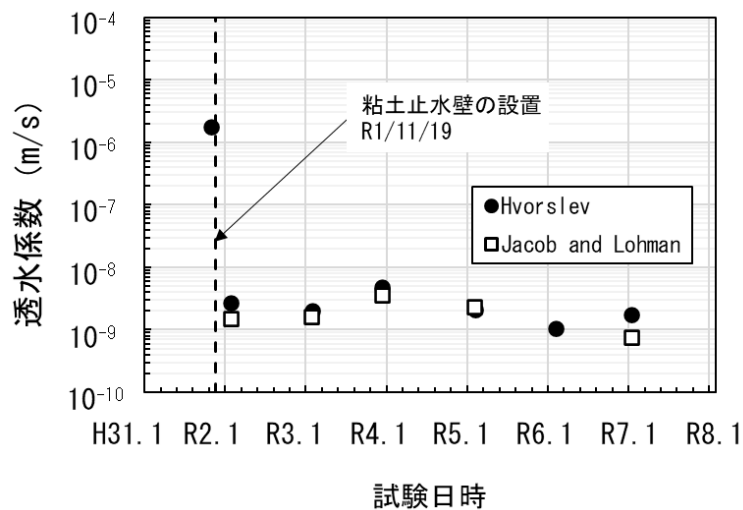
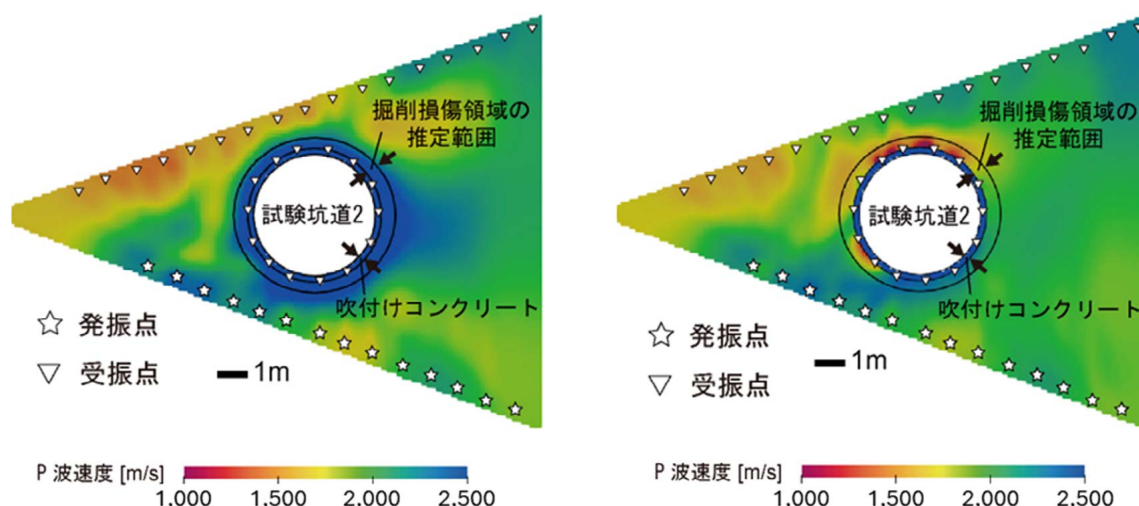


図 22 EDZ シーリング試験の試験領域内の透水係数の経時変化

透水試験では、EDZ を含むように設定した EDZ-1 孔の区間（令和 3 年度まで：深度 0.31 m～深度 1.70 m、令和 4 年度以降：深度 0.22 m～深度 1.61 m）から注水して粘土止水壁で区切られた内側の領域を対象としました。透水試験で得られたデータは定常解析（Hvorslev の式⁽³⁰⁾）と非定常解析（Jacob and Lohman の方法⁽³¹⁾）により評価しました。

止水プラグの構造を設計する上では、坑道周辺の EDZ の広がりを把握することが必要となります。EDZ の調査技術の高度化について、令和 4 年度までに調査手法や解析技術の開発を目的として、350 m 東周回坑道や試験坑道 2 および試験坑道 4（図 5 参照）周辺で弾性波トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィ調査を実施するとともに解析手法の改良を行いました^(32, 33, 34)。

坑道内で弾性波トモグラフィによる弾性波速度の測定を実施し、既存の手法を適用して解析した場合、泥岩のように弾性波速度が遅い岩盤では、弾性波速度の速い坑道壁面や底盤のコンクリートによる弾性波の屈折の影響により、岩盤の物性値を適切に推定できない場合があります。この問題を解決するために、解析時にコンクリートの存在を設定条件として入力可能な解析コードを開発しました。図 23 は、試験坑道 2 で測定した弾性波トモグラフィの解析結果です。図 23(a) に示すとおり、既存の解析手法ではコンクリートによる影響で弾性波速度が速い領域が坑道周辺に広く推定されてしまいましたが、開発した手法では、EDZ の存在が想定される領域に弾性波速度が遅い領域を検出することができました（図 23(b)）。さらに、解析時に時系列情報を付与することでモニタリングにも利用できるタイムラプス解析に拡張しました。



(a) 吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合 (b) 吹付けコンクリートの影響を考慮した場合
図 23 吹付けコンクリートの影響を考慮しない既存の解析手法と改良手法による弾性波速度分布の推定結果

令和 6 年度は令和 4 年度までに開発した弾性波トモグラフィや比抵抗トモグラフィの解析手法を、止水プラグの施工試験の実施を予定している試験坑道 6 (図 5 参照) 周辺の調査において適用することにより、止水プラグの周辺の岩盤の調査手法としての適用可能性を検討しました。

また、令和 5 年度までに得られた埋め戻し材と止水プラグに関する成果と合わせて整理して、閉鎖技術に関する取りまとめを行いました。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、縦置き処分孔に設置される緩衝材と埋め戻し材との相互作用の影響の把握を目的とした縮尺模型試験を実施してきました^(4・5・9)。それらの結果より、埋め戻し材を設置した場合には、設置しない場合と比較して、緩衝材の上方への変形が 1/10 以下に抑制されていることが確認できました⁽⁵⁾。また、乾燥密度は埋め戻し材に近い緩衝材上部が低くなるような不均一な分布を示しており、埋め戻し材に近い緩衝材の上部で膨潤による変形が生じている可能性が示唆されました⁽⁵⁾。

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、これまで着目してき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し、水平坑道や立坑が放射性物質の主要な移行経路となるシナリオ (以下、本シナリオ) に関し、想定されるプロセスが将来的に生じる可能性や、仮に生じた場合の安全機能への影響を評価してきました^(35・36)。その結果、核種の閉じ込め性能に及ぼす影響は限定的であるとともに⁽³⁴⁾、現時点で取得可能な情報に基づく、本シナリオは想定しにくいシナリオであると評価できました。

これらの埋め戻し材と止水プラグに関する個別要素の技術開発で得られた成果を整理しました⁽³⁴⁾。また、埋め戻し材の要求性能を設定する上で「設置される人工バリアと埋め戻し材との相互作用の影響」を考慮する必要があることや移行抑制に効果的な止水プラグの形状検討を行う上で必要となる「EDZ の範囲や物性 (経時変化も含む)」の調査手法として適用可能な技術など設計項目とそれに関連する情報についても整理しました⁽³⁴⁾。

さらに、処分場の閉鎖段階では、調査で利用したボーリング孔自体の閉鎖も求められる可能性があり、ここでは、坑道内から水平に近い向きに掘削されるボーリング孔の閉塞技術について、ベントナイトブロックを用いる手法を対象に室内実規模試験および原位置試験を実施しました^(5・37)。その結果、ベントナイトブロックをボーリング孔の任意の深度に設置することが可能であること、また、設置したベントナイトブロックにより閉塞が可能となる見通しを得ることができました。一方で、ボーリング孔内の地下水の流入状況によってはベントナイトブロックの膨潤が進まないことも明らかとなり、今後の技術開発に必要となる知見として整理することができました。

令和 6 年度までの成果の概要

令和 2 年度から令和 6 年度にかけて「閉鎖技術の実証」として、埋め戻し材や止水プラグについて、期待される性能の具体化や設計評価技術の改良・高度化を目的とした数値解析や室内試験、原位置での実証的な試験を通じて、埋め戻し材や止水プラグの施工方法の原位置環境への適用性・実現性を確認するとともに、個別の技術開発で得られた成果を実際の設計・検討に活用できる設計フローとして提示することができ、「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」という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つた場合に追加で試験や解析を実施します。

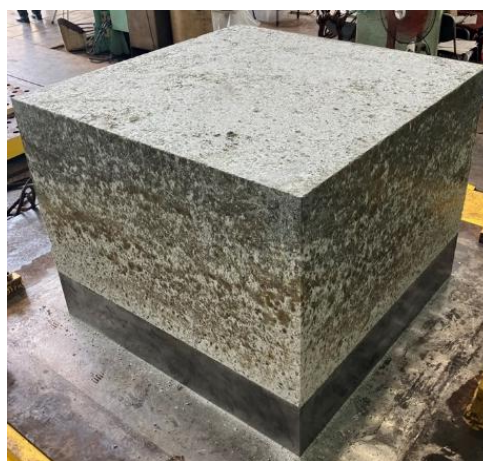
(3) 人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いによる品質保証体系の構築

埋め戻し材の施工方法については、既存の施工機械を用いた撒き出し・転圧工法や吹付け工法では、施工に時間がかかるという課題があります。そこで、原子力環境整備促進・資金管理センター^{*12}（以下、原環センター）との協力の下で、埋め戻し材の施工効率の向上が期待できるブロック工法、斜め転圧工法およびスクリュウ工法について地上の研究施設を利用した要素試験などを実施して適用可能な材料の配合の範囲や施工品質など品質保証体系の構築に必要なデータを取得しています⁽⁹⁾。

令和 6 年度は、ブロック工法について、ベントナイト混合率と成型圧力をパラメータとした静的締固め試験により成型可能な材料の範囲を把握した上で⁽⁹⁾、スケールアップした埋め戻し材ブロックを試作し、製作性に関する知見やデータを取得しました。埋め戻し材ブロックの製作状況および試作した埋め戻し材ブロックの外観を図 24 に示します。埋め戻し材ブロックは模擬掘削土として最大粒径 20 mm の碎石・砕砂を使用しており、ベントナイト混合率は 30 %です。1 m 規模の埋め戻し材ブロック（縦 1 m×横 1 m×高さ 60 cm）でも想定していた成型圧力内で目標とする有効粘土密度^{*}1.4 Mg/m³以上の品質を満足できることが確認できました。



(a) 製作状況



(b) 埋め戻し材ブロックの外観

図 24 埋め戻し材ブロックの製作

斜め転圧工法では、材料仕様および撒き出し角度を設定するための予備試験方法（案）を整備するとともに⁽⁹⁾、予備試験により設定した材料・施工仕様（最大粒径 20 mm の碎石・砕砂、ベントナイト混合率 15 %、撒き出し角度 35°）で施工試験を実施し、施工性や施工品質に関するデータを取得しました。施工試験の結果、空間的制約のない坑道部分（既存の転圧機械における施工可能範囲）であれば、水平転圧と同等の施工品質（乾燥密度、ばらつきなど）を達成できるこ

^{*12}：公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターは、放射性廃棄物処理処分等に関する調査研究開発機関として設立されました。現在は、原子力発電環境整備機構（NUMO）を通して積み立てられる最終処分積立金の管理などを行う資金管理業務も実施しています。

とが分かりました。スクリー工法では、埋め戻し材に含まれる碎石・砕砂の最大粒径、ベントナイト混合率およびスクリーの設置位置をパラメータとした充填試験を実施し、適用可能な材料・施工仕様を検討するためのデータを取得しました。さらに、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、乾燥密度や水の浸潤状況の把握のために、光ファイバーなどを用いた技術の適用性についての検討も進めました。

令和 6 年度までの成果の概要

令和 2 年度以降の検討により、ブロック工法、斜め転圧工法およびスクリー工法について、要素試験および施工試験の結果より、各工法の埋め戻し材の施工方法としての見込みを示すことができました。また、転圧工法と吹付け工法の実証試験⁽³⁴⁾で得られたデータと併せて埋め戻し材の施工方法として 5 つの工法の適用範囲および施工品質などの項目について、埋め戻し材の施工方法を選択する際の基盤情報として整備することができました。さらに、緩衝材の定置方法として、圧縮成型したブロックを廃棄体の周りに定置する施工方法を対象に、原環センターと協力して、試験坑道 5（図 5 参照）の試験孔において緩衝材流出試験を実施してきました^(4, 5, 38)。その結果より、堅置き処分孔に設置した緩衝材の「隙間未充填」と「ケイ砂充填」の施工方法の違う 2 つの技術オプションについて、原位置で把握が可能なパラメータ（試験孔内外水頭差、試験孔内湧水量）を評価項目とした判断指標の考え方を整理して緩衝材の総流出量を評価できるベースモデルを整備することで、より現実的に総流出量が評価できる見通しが得られました^(39, 40)。

以上の結果から、坑道閉鎖および緩衝材の施工方法に関する技術オプションの実証について、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。

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

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 25）。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。

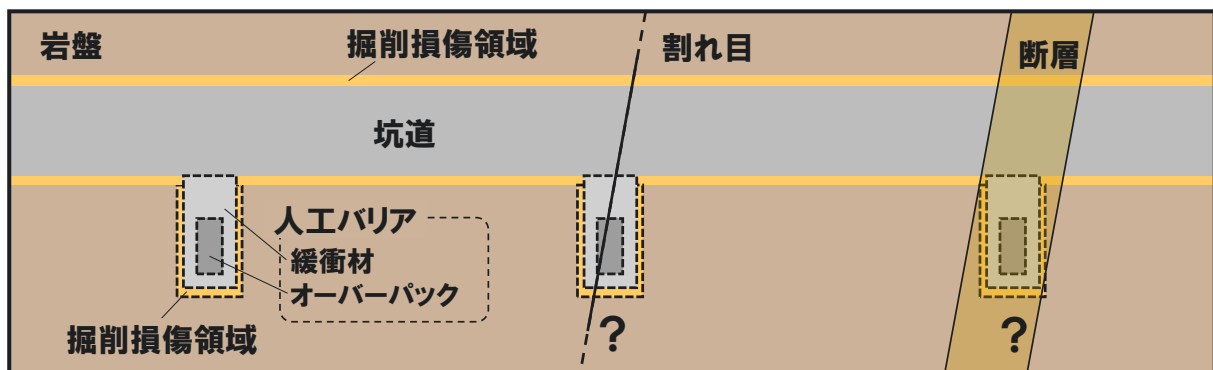


図 25 人工バリアやそれを定置する坑道の周辺において想定される地質構造の特徴を示すイメージ図（鉛直断面）

(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当たっては、緩衝材やオーバーパ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、堆積岩の閉じ込め性能の評価手法に関する体系化に向け、物質移行のデータに乏しい声間層に位置する 250 m 西立坑側第 1 ボーリング横坑（図 4 参照）から掘削した 2 本のボーリング孔（250-MIG1-2 孔および 250-MIG1-5 孔）⁽⁴⁾を対象にトレーサー試験を 2 回実施しました。その結果、両試験ともに試験条件に対して良好な試験結果を取得することができました（図 26）。なお、本トレーサー試験は幌延国際共同プロジェクト（HIP）のタスク A（物質移行試験）の課題として設定しています。

令和 7 年度は、令和 6 年度に実施したトレーサー試験結果の解析評価を行いつつ、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の整理を進めます。

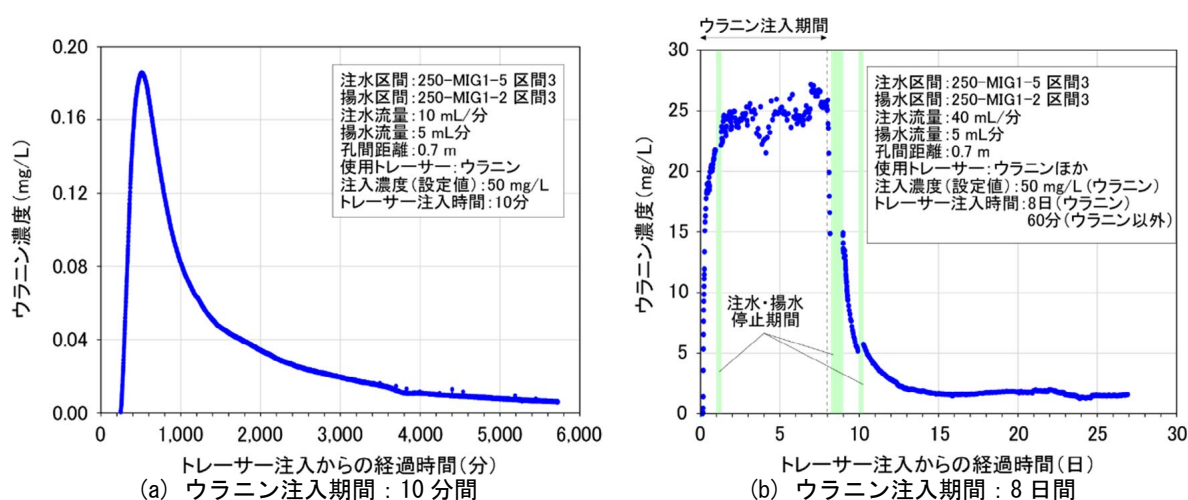


図 26 トレーサー試験結果

(b) の試験ではトレーサーの種類に応じた拡散や収着^{*}挙動の違いを評価するため、非収着性トレーサーとして、重水素、アミノ G 酸、ヨウ素、臭素、モリブデンを、収着性トレーサーとして、セシウム、ストロンチウム、ニッケル、コバルト、ユウロピウムをウランと同時に 60 分間注入しています。また、割れ目内を流れるトレーサーが健岩部の方向にどの程度拡散するかを評価するために、本試験中に 3 回、注水・揚水を停止しています。

(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（EDZ）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、令和 7 年度に整備される 500 m 調査坑道の試験坑道 8 および試験坑道 9（図 6 参照、以下、試験坑道 8、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。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 350 m 調査坑道の試験坑道 6（図 5 参照）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、埋め戻し材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 27）。これらの研究は、HIP のタスク B（処分技術の実証と体系化）の課題として設定しています。

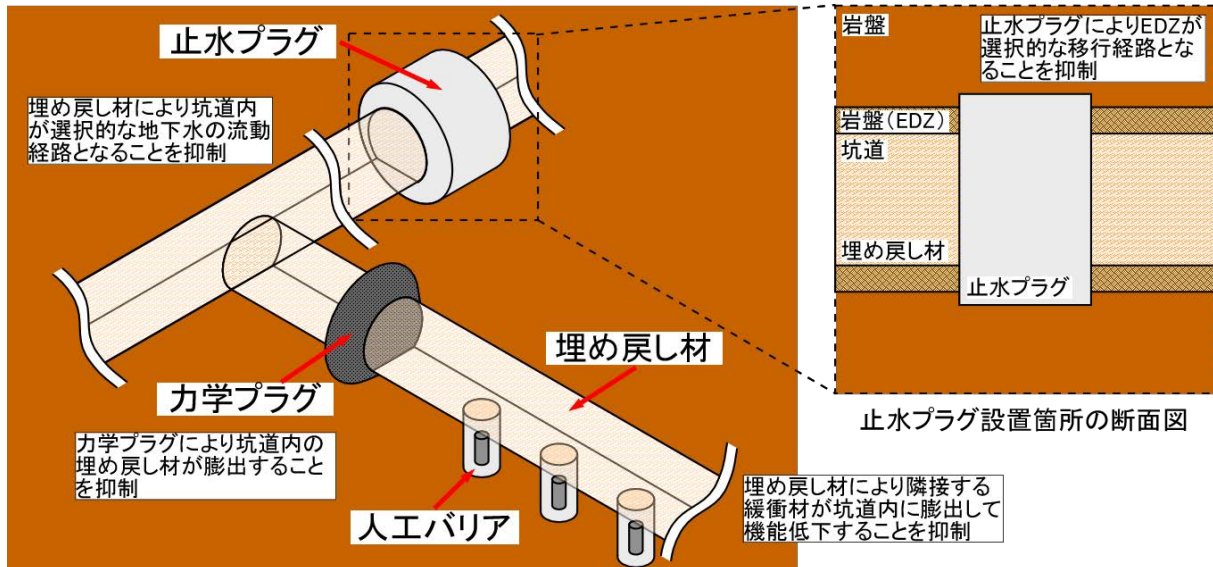


図 27 処分場の閉鎖段階のイメージ図

令和 6 年度は、試験坑道 8、9 における原位置調査に先立ち、坑道の配置や人工バリアを定置するピットの配置を設計する際に考慮する必要がある坑道周辺の EDZ の広がりや坑道・ピットへの湧水量を予測しました。その際、350 m 調査坑道における調査において妥当性が確認された手法や概念を適用し、深度 350 m の特徴との違いを確認しました。その結果、試験坑道 9 の EDZ の広がり⁽⁴¹⁾は、試験坑道 3⁽⁴²⁾ (図 5 参照) よりも大きいと予測しました。また、地上からのボーリング調査により把握された水みちのつながり方の次元の関係⁽⁴³⁾に基づき湧水量を予測した結果、深度 500 m は深度 350 m と比較して水みちの連結性がさらに低く^(21、43)、坑道掘削後の湧水量の自然低下量がさらに大きくなると予測しました⁽²²⁾。試験坑道 8、9 の原位置調査では、これらの予測結果の妥当性を確認するために、ボーリング調査、坑道内での地質観察、物理探査（トモグラフィ調査）、湧水量計測を含む原位置調査を計画しました（図 28）。そして、令和 7 年 2 月に、試験坑道 8、9 における最初の原位置調査として先行ボーリングの掘削を開始しました。

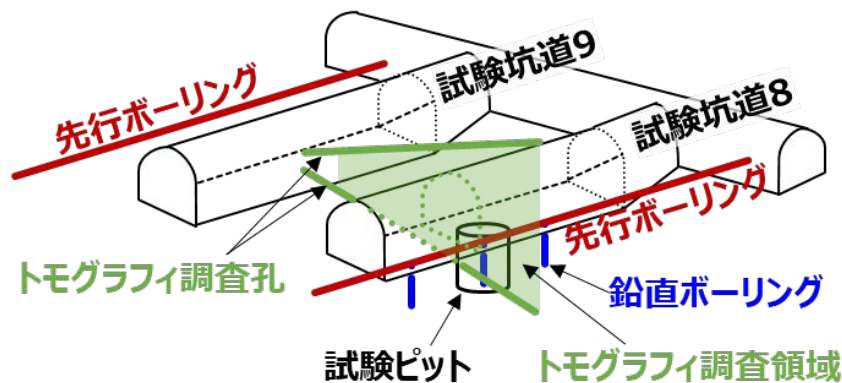


図 28 試験坑道 8、9 における原位置調査のイメージ図

先行ボーリング調査では、岩石の強度や岩盤の透水性などのデータを取得します。試験坑道 9 を先に掘削した後、試験坑道 8 の掘削前後でトモグラフィ調査を行い、坑道掘削による EDZ の広がりを把握します。坑道掘削後の坑道湧水量をモニタリングし、湧水量の経時変化データを取得します。湧水や EDZ の広がりの評価に重要となる地質/地質構造データも取得します。これらの調査結果を用いて予測結果を適宜更新し、調査開始前の予測結果と比較することで、予測手法の妥当性を検証します。なお、鉛直ボーリングおよび試験ピットの位置は、先行ボーリングなどの結果に基づき決定するため、最終的なレイアウトはこのイメージ図と異なる可能性があります。

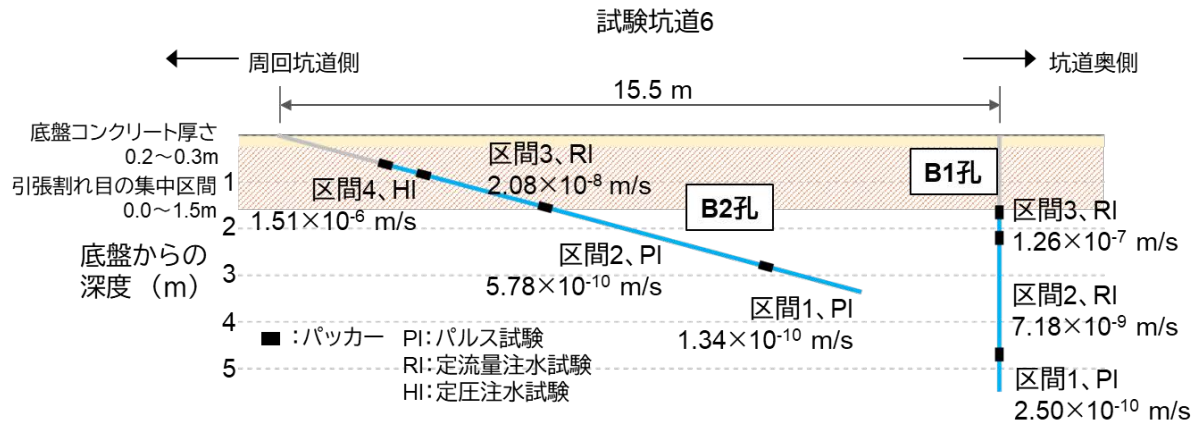


図 30 透水試験の試験区間と透水係数分布

止水プラグの設置位置はボーリング調査や水理試験などの結果や施工方法の検討結果などを踏まえて、今後決定する予定です。図は参考文献(46)を一部改変しています。

坑道の埋め戻しと止水プラグの施工においては、地下水移行抑制機能などの要求性能を満たすために、要求される品質（乾燥密度など）で確実に施工できる方法の整備が必要となります。原位置施工試験では、埋め戻し材の施工方法のひとつとして吹付け工法に着目しました。令和6年度は、幌延の泥岩とベントナイトを混合した埋め戻し材の施工性を確認するために、約0.5 m四方の型枠を対象とした地上吹付け試験を実施しました（図31）。地上吹付け試験では、令和5年度に実施した350 m調査坑道の掘削の際に取得した幌延の泥岩を用いて、埋め戻し材の材料配合や初期含水比を変化させ、施工後の乾燥密度や施工性へ及ぼす影響を確認しました。

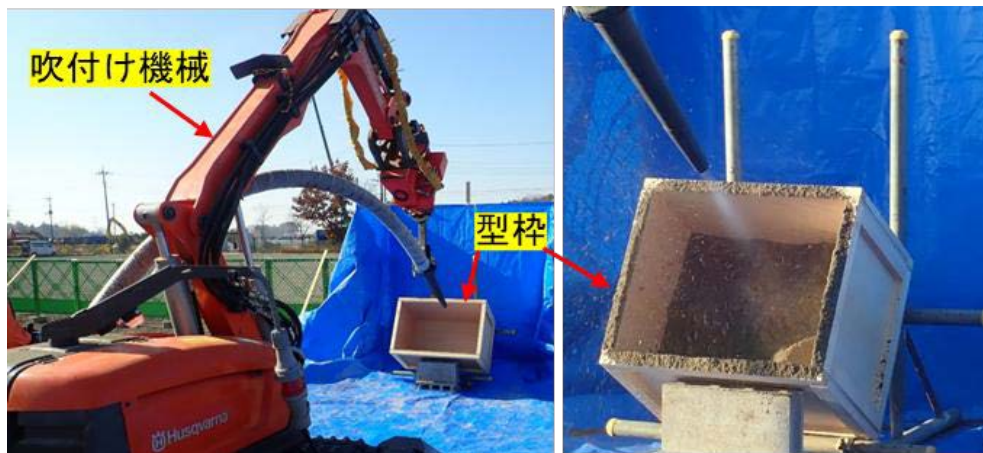


図 31 埋め戻し材の地上吹付け試験

令和7年度は、先行ボーリング調査における岩石の強度や岩盤の透水性などのデータ取得、試験坑道の掘削と地質観察による地質/地質構造データの取得、トモグラフィ調査による試験坑道周辺のEDZの広がりに関するデータの取得を行います。これらの結果に基づき、令和6年度に実施した予測手法の妥当性確認と手法の更新を行います。また、ボーリング調査による割れ目の観察やトモグラフィ調査、水理試験などの原位置における調査・試験を継続して、坑道周辺のEDZの広がりや水理特性を評価します。坑道の埋め戻しと止水プラグの施工については、地下坑道での施工を想定し、坑道の形状を模擬した型枠を対象とした条件や止水プラグとの境界面を想定した条件で吹付け試験を実施します。さらに、これらの調査・試験の結果を踏まえて坑道の埋め戻しと止水プラグの設計を行うとともに、試験坑道6における原位置施工試験のレイアウトや作業手順などの計画検討を進めます。

(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

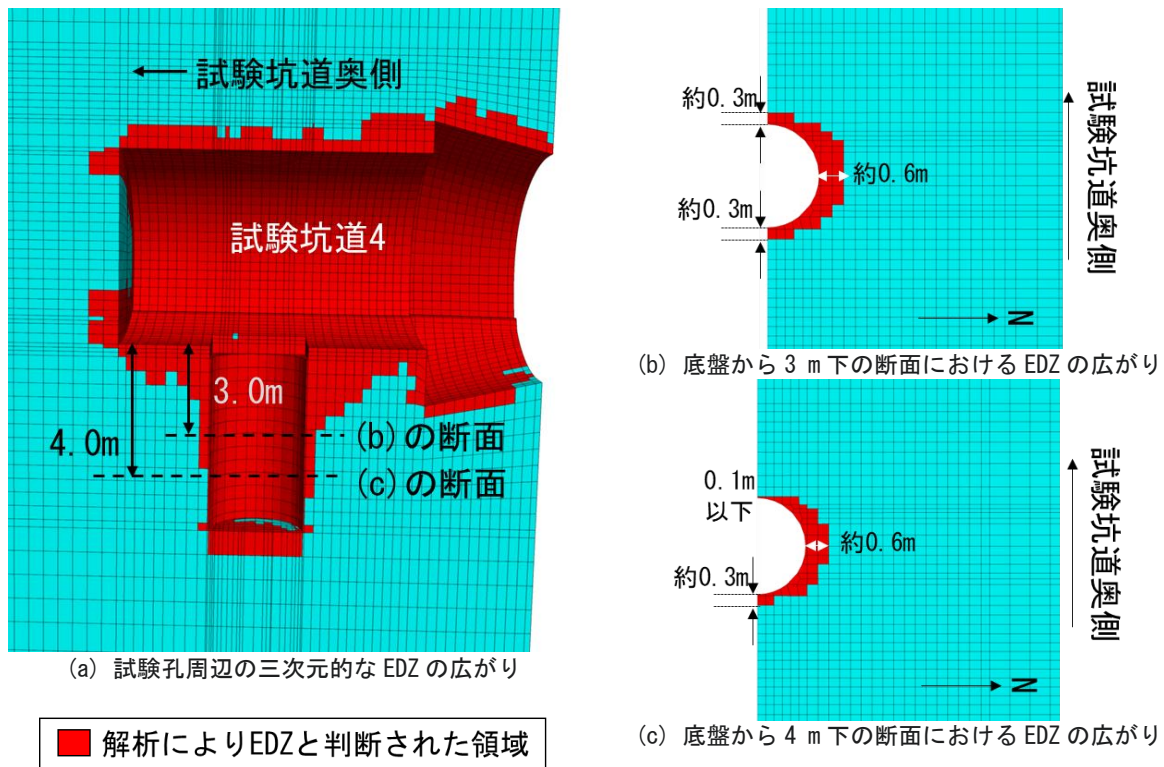
処分事業では、断層や割れ目からの湧水が少ないことや岩盤の力学的強度が高いことが緩衝材設置の観点から重要となります。本研究では、多連接坑道のピットに人工バリアを設置する場合を想定し、原位置調査で得られたデータを用いて、以下のことを実施します。

- ① 多連接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干渉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

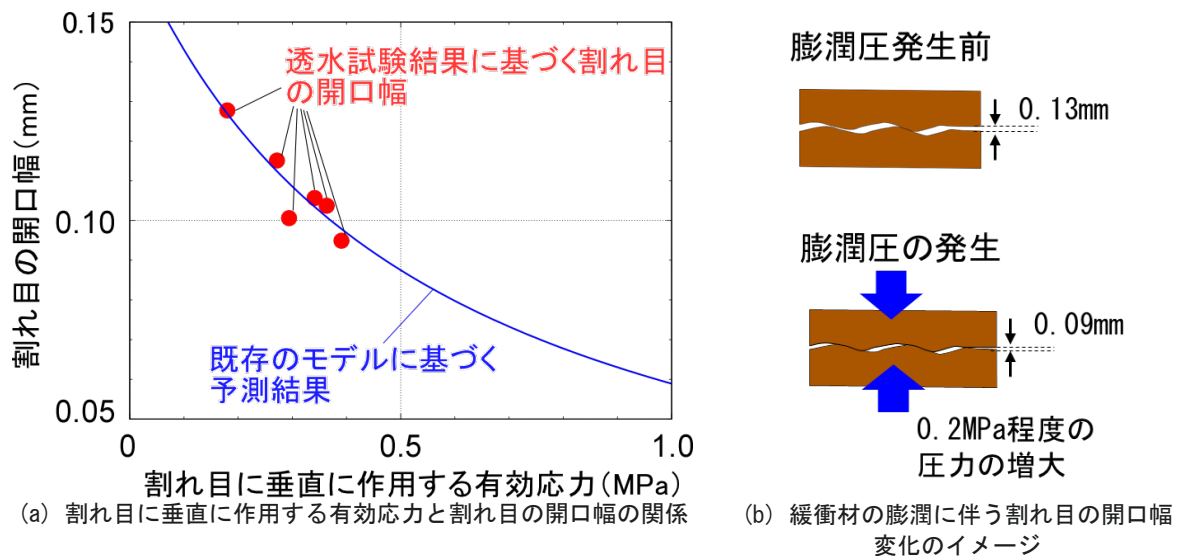
令和 6 年度は、①および③に関して、断層や割れ目からの湧水の定常的な発生量を予測するため、約 14 年間にわたって観測された地下施設全体の湧水量（以下、坑内湧水量）と地下施設周辺のボーリング孔の地下水压の経時変化を再現するシミュレーションを行いました。その結果、岩盤の代表的な透水性の分布を断層の水理学的連結性を考慮して設定し、定常的な坑内湧水量に寄与する湧水箇所を換気立坑の稚内層浅部の深度 255 m～深度 300 m と仮定することで、立坑/坑道掘削に伴う定常的な坑内湧水量や地下施設周辺の地下水压の変化を再現できました⁽⁴³⁾。また、断層の局所的な透水性と水みちのつながり方の次元の深度変化を考慮して、断層の代表的な透水性を導出した結果、その深度変化の傾向は岩盤の代表的な透水性のそれとよく一致するとともに、深度 400 m 以深では代表的な透水性が低い断層のみに遭遇し、断層からの湧水量は坑内湧水量と比べてわずかであると示唆されました。これらの解析結果から、深度 380 m から深度 500 m まで坑道を掘削しても、坑内湧水量は大きく増加しないと予測されました⁽⁴³⁾。

一方で、解析結果とは異なり、実際には地上から深度 380 m までの立坑および調査坑道を掘削する間に換気立坑の深度 255 m～深度 300 m 以外からも地下水が坑道内に流入し、坑内湧水量が一時的に大きく増加しました⁽⁴³⁾。しかし、この流入は数年で無視できるレベルまで減少しており、最終的には換気立坑の深度 255 m～深度 300 m までの坑内湧水量で説明できる湧水量に落ち着いています。このような湧水量の急激な減少は、坑道内の隣接する湧水点同士の局所的な水圧干渉によるものと考えられます⁽⁴³⁾。

②のピット周辺の掘削損傷領域（EDZ）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に関しては、350 m 調査坑道の試験坑道 4（図 5 参照）で実施している人工バリア性能確認試験で掘削した試験孔周辺の EDZ について、試験坑道、試験孔および坑道拡張部（プラグ設置箇所）の掘削を三次元で再現する数値解析により確認しました（図 32）⁽⁴⁷⁾。その結果、試験孔浅部の EDZ は、坑道底盤の EDZ の影響を受けて大きく広がることなどが分かりました。この結果は、試験孔近傍で実施した弾性波トモグラフィ調査により推定された EDZ の広がりとも整合しました。これにより、解析的に試験孔周辺の EDZ の広がりを予測できることを示しました⁽⁴⁷⁾。

図 32 試験坑道 4 で掘削した試験孔周辺の EDZ の解析結果⁽⁴⁷⁾

④の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に関しては、試験坑道 4 で掘削した試験孔周辺の EDZ の割れ目を対象として定期的な実施した透水試験結果に基づき、緩衝材の膨潤による開口幅の変化を分析しました。図 33(a)に、緩衝材の膨潤によって引き起こされる、割れ目に垂直に作用する有効応力の変化と割れ目の開口幅の変化の傾向を示します。本図に示すとおり、緩衝材の膨潤により割れ目に垂直に作用する有効応力が 0.2 MPa 程度増大すると、それによって割れ目の開口幅が 0.13 mm から 0.09 mm まで小さくなること示されました⁽⁴⁸⁾。このことから、図 33(b)に概念的に示すように、緩衝材の膨潤によって周辺の EDZ の割れ目は少しずつ閉じていく傾向を示すこと、すなわち、緩衝材の膨潤によって割れ目は開きにくくなることを定量的に示すことができました。

図 33 緩衝材の膨潤に伴う EDZ の割れ目の開きにくさの検討結果⁽⁴⁸⁾

令和 7 年度は、①の近接する複数の湧水箇所間の水圧干渉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に関して、深度 500 m の坑道掘削に伴う湧水量を観測するとともに、坑内湧水量の観測を継続し、シミュレーションにおいて予測された定常湧水量の範囲に収まるかどうかを確認します。②のピット周辺の EDZ 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に関しては、500 m 調査坑道において施工予定のピット周辺の EDZ の広がりに関する予測解析を実施するとともに、原位置における EDZ の把握のための試験計画を検討します。③の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に関しては、坑道および断層や割れ目からの湧水量の減少速度を予測するための手法整備に向けた解析を実施します。④の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に関しては、350 m 調査坑道周辺の断層や既存割れ目を対象として割れ目の開きにくさを評価するための試験計画を検討します。

(4) 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理

廃棄体の設置の判断や間隔の設定に当たっては、緩衝材やオーバーパックスの機能、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、ピット周辺に存在する割れ目の開口幅とその開きにくさ、および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した。ピット周辺に存在する割れ目の開口幅は、緩衝材の長期的な健全性を評価する上で重要な情報です。緩衝材は岩盤の割れ目と接していると、膨潤に伴って割れ目内に侵入し、その先端部から水の流れや重力により失われることで、ピット内の緩衝材の量が徐々に減少し、密度低下とともに緩衝材の透水性が増加する可能性があります⁽⁴⁹⁾。このような現象はこれまでに多くの研究が行われており^(50・51・52・53)、ピット内の緩衝材の損失速度は割れ目の開口幅が大きいほど速くなることが指摘されています⁽⁵³⁾。

そこで、割れ目の開口幅の調査・評価手法を整理するために、割れ目の発達する堆積岩をいくつかの地質学的な情報に基づいて分類しました。堆積岩中に存在する割れ目の開口幅は、岩石中に含まれている粘土鉱物の膨潤による割れ目の自己閉塞、鉱物充填による割れ目の自己閉塞、および割れ目に充填された鉱物の溶解に影響を受けます^(54・55)。これらの自己閉塞や溶解の情報に基づいて堆積岩をⅠ～Ⅳの 4 つに分類しました（表 3）。稚内層および声問層の泥岩は自己閉塞や溶解がほとんど認められないため、表 3 のうち分類Ⅰに区分されます。したがって、稚内層や声問層を対象とした既存の割れ目の開口幅に関する検討結果は、分類Ⅰの堆積岩に主に反映可能と考えられます。

表 3 割れ目の発達する堆積岩（単層）の地質学的な分類と地下深部における割れ目の開口幅の調査・評価手法^(54, 55)

分類	粘土鉱物の膨潤による割れ目の自己閉塞	鉱物充填による割れ目の自己閉塞	割れ目充填鉱物の溶解	地層例	割れ目の開口幅 ^g の最大値と岩石の強度・応力状態との相関性	割れ目の開口幅 ^g の最大値	割れ目の開口幅 ^g の調査・評価手法
I	限定的	限定的	限定的	稚内層泥岩 ^a 、声間層泥岩 ^b 、パルfris泥岩 ^c （スイスウェレンベルグ）	強い ^h	大～小	水理試験などから得られる原位置データに加えて、DI との関係性や Barton-Bandis のモデルから推定可能 ^{a、b、c}
II			強い	セントビーズ砂岩 ^d （英セラフィールド）	弱い	大	水理試験などから得られる原位置データより推定可能 ^{d、e、f}
III		強い	－	トアキアーンドメリアン泥岩 ^e （仏トゥルヌミール）		小	
IV		強い		－			

a：参考文献(42、48、55、56、57、58、59)に基づく

b：参考文献(59、60)に基づく

c：参考文献(55、61、62、63)に基づく

d：参考文献(54、64、65、66)に基づく

e：参考文献(67、68、69、70、71、72、73、74)に基づく

f：参考文献(70、72、75、76、77、78)に基づく

g：水理学的な開口幅と仮定

h：割れ目の開口幅と DI が一定の関係で相関し、その関係を Barton-Bandis のモデル⁽⁷⁹⁾で再現可能

これまでに稚内層、声問層および他の分類 I の堆積岩から得られた試験結果に基づく、割れ目の開口幅が場所によって大きく変化することが考えられます。一方で、割れ目の開口幅の最大値は岩石の強度・応力状態、つまり DI に依存することが分かっています。DI の空間分布と割れ目の開口幅の最大値との関係は、地層ごとに原位置データから構築することも、既存の経験式^{*}を用いることも可能と考えられます⁽⁵⁵⁾。したがって、DI の空間分布と既存の経験式を利用することにより、ピット周辺の割れ目の開口幅の推定の信頼性向上が可能と考えられます^(42, 55)。

ピット周辺の割れ目では、緩衝材の膨潤圧の増大によって割れ目を開く力がはたらくと割れ目の開口幅が増加する可能性があります。この増加量は割れ目の開きにくさに依存し、その開きにくさは DI との関係から評価することも⁽⁵⁵⁾、割れ目に垂直にかかる力を人為的に低下させる原位置試験から評価することも可能です^(48, 57, 58)。また、割れ目に沿ってずれが発生した場合も、開口幅が増加する可能性があります。この可能性については既存の解析方法⁽⁷⁹⁾により評価することも、坑道近傍の割れ目に対する樹脂注入試験により評価することも可能です⁽⁵⁶⁾。

次に、ピット周辺の地下水の流れにくさは、ピット周辺の岩盤の閉じ込め性能を評価する上で重要な情報です。地下水の流れにくさは、岩盤中の地質構造に依存し、割れ目が発達する堆積岩の場合は、割れ目の透水性に支配されます⁽⁶²⁾。しかし、割れ目内の隙間が不均質に存在する場合、原位置試験で得られる割れ目内の局所的な透水性は必ずしも割れ目の代表的な透水性を表すとは限らず、地下水の流れにくさを正しく評価するためには、割れ目の代表的な透水性を推定する必要があります^(43, 63)。

そこで、割れ目の代表的な透水性の調査・評価手法を整理するために、割れ目の発達する堆積岩をいくつかの地質学的な情報に基づいて分類しました。堆積岩中に存在する割れ目の代表的な透水性は、割れ目の局所的な透水性と割れ目の水理学的連結性に依存し、割れ目の局所的な透水性については表 3 と同じ 3 つの要素に、割れ目の水理学的連結性については岩石の透水性に影響を受けます^(43, 55, 80)。これらの 4 つの要素に基づいて、地層を I-a～IV の 5 つに分類しました（表

4)。稚内層は分類 I-a に、声間層は分類 I-b に区分されます。したがって、稚内層および声間層で得られた試験結果はそれぞれの分類の堆積岩に主に反映可能と考えられます。

これまでに稚内層および他の同分類の堆積岩から得られた試験結果に基づくと、割れ目の開口幅と同様に、表 4 の分類 I-a の堆積岩は割れ目の代表的な透水性が場所により大きく変化することが考えられます。一方で、割れ目の代表的な透水性は DI に依存し、DI は空間分布の推定が可能であることが分かっています。したがって、DI の空間分布と、割れ目の代表的な透水性との関係を利用してピット周辺の割れ目の代表的な透水性を推定することにより、推定の信頼性を向上させることが可能と考えられます^(43, 55, 80)。DI と割れ目の代表的な透水性の関係は地層ごとに原位置データから構築することも、既存の関係式(図 34 の曲線)を用いることも可能です。推定した割れ目の代表的な透水性は、地下水の水圧や水質、年代、あるいは坑道掘削時における坑道周辺の水圧の変化によりさらに検証することが可能です^(13, 14, 62, 82, 83, 85, 86, 88)。ピット周辺の DI は坑道埋め戻し後の水圧の変化や地層の隆起侵食などによって変化しますが、その際の割れ目の代表的な透水性の変化量は DI との関係(図 34 の曲線)や水圧擾乱試験により評価することが可能です^(55, 80)。水圧変化や地殻変動に伴って割れ目のずれが生じる場合の割れ目の透水性の変化量についても DI との関係(図 34 の曲線)や水圧擾乱試験により評価することが可能です^(55, 57, 80, 84)。

令和 7 年度は、(1)～(3)で実施する調査・研究の進捗に応じて、割れ目の開口幅とその開きにくさ、ピット周辺の地下水の流れにくさに関する調査・評価手法の整理を拡充するとともに、割れ目からの湧水量やピット周辺の EDZ の広がりについても、調査・評価手法の整理を進めます。

表 4 割れ目の発達する堆積岩（単層）の地質学的な分類と地下深部の割れ目の代表的な透水性の調査・評価手法^(43, 54, 55, 80)

分類	粘土鉱物の膨潤による割れ目の自己閉塞	鉱物充填による割れ目の自己閉塞	割れ目充填鉱物の溶解	岩石（健康部）の透水性	地層例	主要な水みち割れ目の局所的な透水性と岩石の強度・応力状態との相関性	主要な水みち割れ目の水理学的連結性と岩石の強度・応力状態との相関性	主要な水みち割れ目の代表的な透水性	主要な水みち割れ目の代表的な透水性の調査・評価手法
I-a	限定的	限定的	限定的	小	稚内層泥岩 ^b 、 パルフレリス泥岩 ^c （ス イスウェレンベルグ）	強い ^h	強い ⁱ	大～小	水理試験などから得られる原位置データに加えて、DI と割れ目の局所的な透水性や水理学的連結性との関係から推定可能 ^{b, c}
I-b									
II				大 ^a	セントビーズ砂岩 ^e （英セラフィールド） トアキアンードメリア ン泥岩 ^f （仏トゥルヌ ミール） オパリス泥岩 ^g （スイスモンテリ）	弱い	弱い	大	水理試験などから得られる原位置データより推定可能 ^{d, e, f, g}
III									
IV									

a：原位置透水試験において割れ目を含む区間と健康部の透水性の差が3桁未満⁽⁸¹⁾

b：参考文献(13、14、43、55、59、80、82、83、84、85)に基づく

c：参考文献(55、61、62、63、82、86、87、88)に基づく

d：参考文献(22、43、59、60、80、81、82、83、85、89、90、91)に基づく

e：参考文献(54、64、65、66、92、93)に基づく

f：参考文献(67、68、69、70、71、72、73、74、94、95)に基づく

g：参考文献(70、72、75、76、77、78、96、97、98)に基づく

h：割れ目の開口幅とDIが一定の関係で相関し、その関係をBarton-Bandisのモデル⁽⁷⁹⁾で再現可能i：DI<2.0の領域で水理学的連結性が高く（流れの次元が1.5以上、動水勾配が相対的に小さい）、DI>2.0の領域で水理学的連結性が低い（流れの次元が1.5未満、動水勾配が相対的に大きい、若い外部由来の地下水がない）^(80, 82)

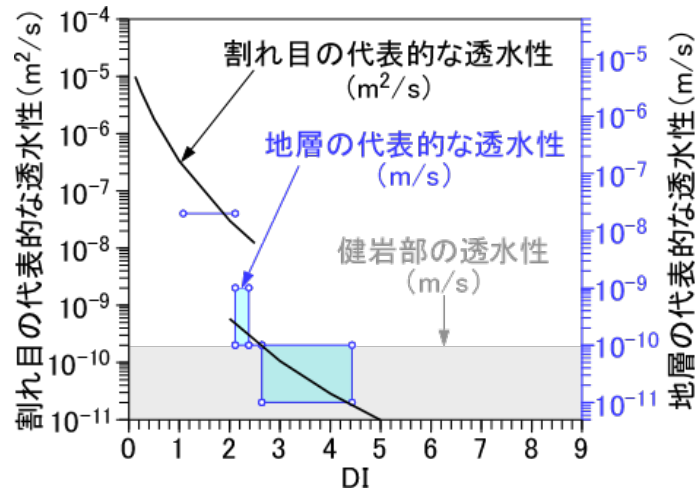


図 34 稚内層中の割れ目の代表的な透水性と DI の関係^(43, 55, 80)

割れ目の代表的な透水性を表す曲線は、割れ目の局所的な透水性と DI の関係⁽⁵⁵⁾、割れ目の水理学的連結性と DI の関係^(80, 85)、割れ目の局所的な透水性と水理学的連結性および代表的な透水性の関係⁽⁴³⁾から導出したものです。同曲線の DI に対する透水性の変化傾向は、別のデータから推定される実際の地層の代表的な透水性^(43, 63)の変化傾向とよく一致することから、同曲線の信頼性は高いと考えられます。DI が 2 よりも大きくなると、地層の透水性は健岩部相当の透水性 (10^{-11} m/s 以下) まで低下します。

5.2 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

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 年度までに、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、試験坑道 5（図 5 参照）に掘削されている 2 つの既存孔に、形状（ドーナツ型および半割）および初期含水比（10.5%および 15%）の異なる緩衝材ブロック、温度や孔内水位などが測定可能な計測センサーならびに緩衝材を加熱するためのヒーターを設置し、ヒーター温度 140℃での加熱を開始しました（図 35）^(9, 24)。

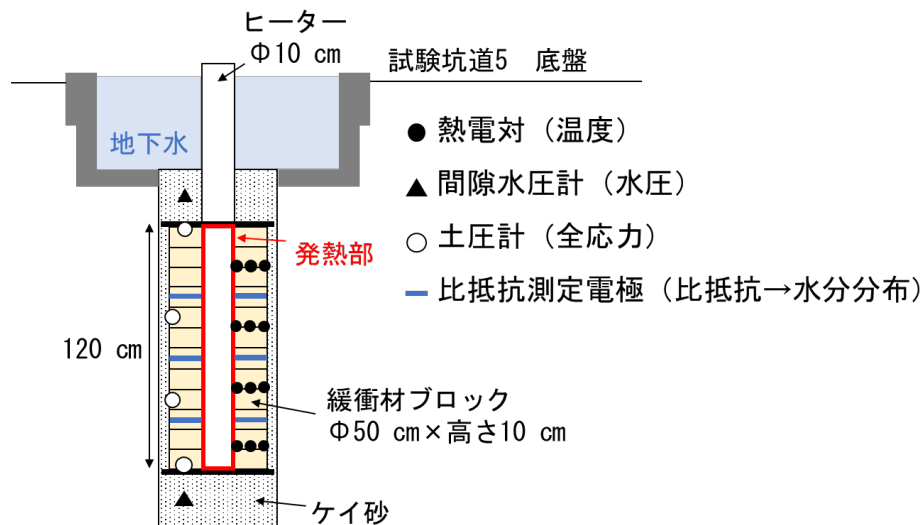


図 35 試験体の設置概略図

令和 6 年度は、令和 5 年度に設置した二組の試験体に対して加熱期間中の温度などの変化をモニタリングしました(図 36)。温度の時間変化が小さくなったことを確認したのち加熱を停止し、その後ただちに、一組の試験体を取り出して解体しました。解体時に試験体を観察した結果、12 段の緩衝材ブロックのうち上から 3 段目～12 段目のヒーター接触部において、厚さ 1 cm 程度のひび割れが認められました(図 37(a))。また、緩衝材ブロックのヒーター接触部から外側に向かって約 8 cm 程度までの距離において色調の変化が認められました(図 37(b))。これらは、100 °C を超えるヒーター温度での加熱による水分移動により生じたものと考えられます。

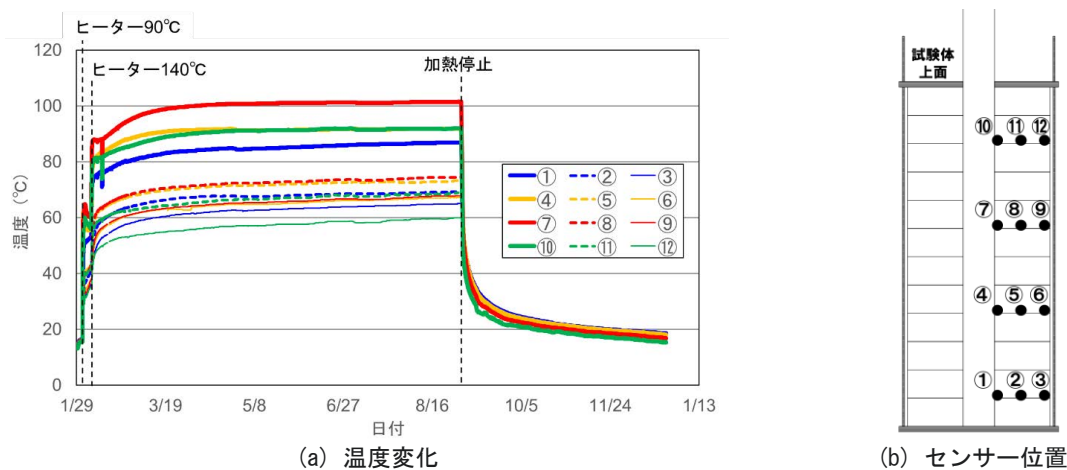


図 36 緩衝材中の温度の計測結果

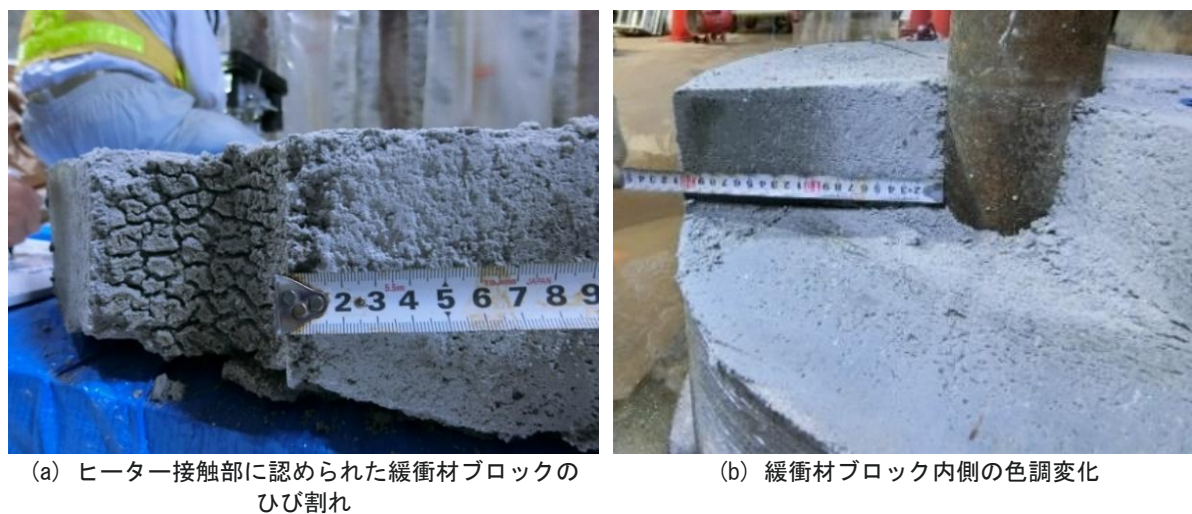


図 37 試験体の解体状況

解体により採取した緩衝材ブロックのうち、100 °C を超える温度が観測された部分を中心に、その特性の変化を明らかにするための分析を行いました。緩衝材の飽和度は、ヒーター接触部から 2 cm～7 cm で採取した試料で約 65 % (含水比約 12 %)、それより外側を含む試料で 81 %～94 % (含水比 16 %～21 %) の値を示しました(図 38)。この結果は、上記の色調変化の観察結果とも整合的であり、緩衝材外側からの地下水の浸潤とヒーターでの加熱による水分の移動により、緩衝材内側の水分量が相対的に低くなったことによるものと考えられます。また、ヒーター接触部から約 0 cm～7 cm の位置で採取した試料は、同じ飽和度と乾燥密度で温度履歴を受けていない緩衝材と比べて一軸圧縮強度が半分程度に低下し、同じ乾燥密度で温度履歴を受けていない緩衝材と比べて透水係数が 1 桁程度高いことが分かりました。一方、鉱物組成や化学組成などには、加熱の有無による顕著な違いはないことが分かりました。

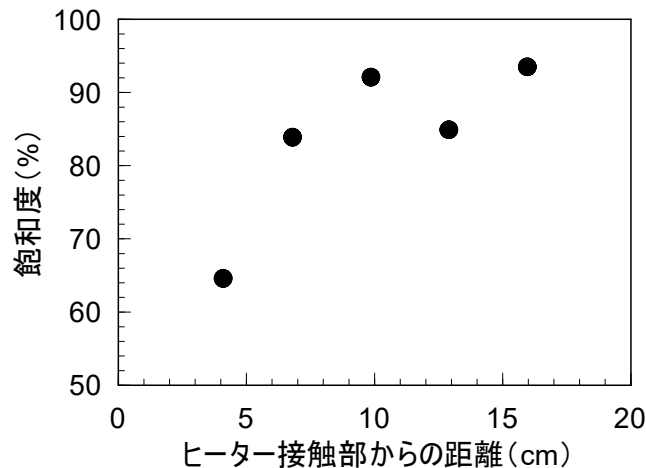


図 38 緩衝材ブロック内での飽和度の分布

緩衝材ブロックから採取した直径 5 cm の円柱状の試料を使用して飽和度を測定しました。図の各点は採取した試料の中心を示しています。

図 36 に示した温度の計測結果は、試験の設計段階で実施した予測解析結果⁽⁶⁾よりも 20 °C ～ 30 °C ほど低かったため、この違いを検討するための再現解析を実施しました。再現解析では、予測解析では考慮していなかったヒーターと緩衝材ブロックの間の数 mm の隙間、試験坑道 5 の坑道換気、周辺岩盤からの地下水流入による冷却効果を追加し、緩衝材中の温度分布へ与える影響を調査しました。その結果、ヒーターと緩衝材ブロック間の隙間の有無が緩衝材の最高温度に及ぼす影響が最も大きいことが分かりました。再現解析では、隙間の影響に加えて試験坑道 5 の坑道換気、周辺岩盤からの地下水流入による冷却効果を追加することで、緩衝材中の温度分布を再現できることが分かりました。

また、高温条件下での緩衝材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。試験は、初期含水比の異なる直径 5 cm、高さ 5 cm の円柱形の 2 つの試験体（加熱前の乾燥密度 1.4 Mg/m³）を 140 °C で加熱した後、試験体の下端から水を浸潤させ、一定時間ごとに X 線 CT 撮影を行いました。令和 5 年度は、加熱後に蒸留水を浸潤させた場合、ひび割れが優先的な水みちとなるような浸潤挙動は確認されないこと、生じたひび割れが蒸留水の浸潤により閉塞されることを明らかにしました⁽⁹⁾。令和 6 年度は、蒸留水の代わりに 350 m 調査坑道で採取される地下水と同程度の塩濃度の水（1.5 % の NaCl 溶液）を浸潤させましたが、その場合の水の浸潤やひび割れの閉塞の挙動（図 39）は、蒸留水の場合と同様であることが分かりました。

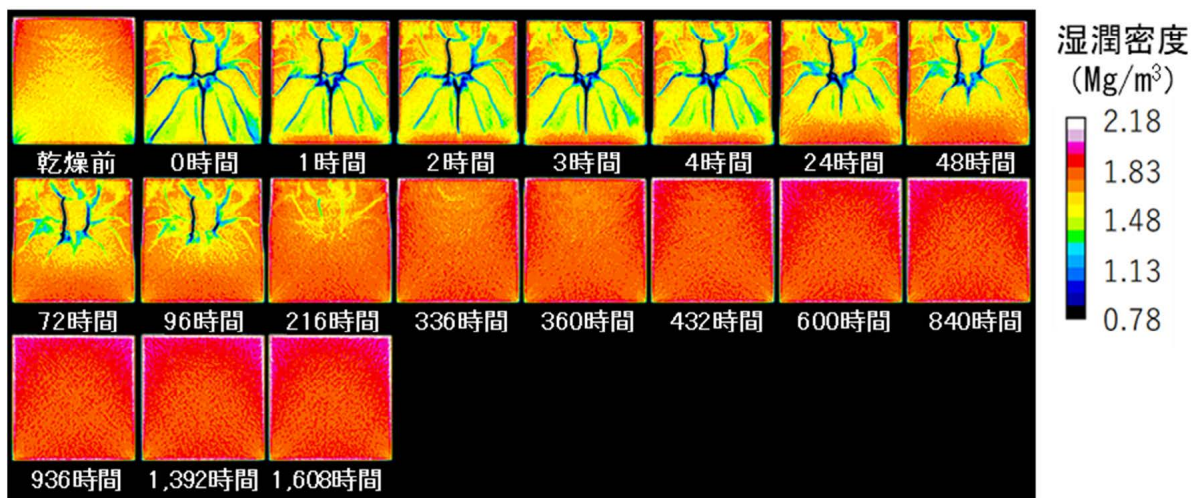


図 39 X 線 CT を活用した緩衝材試料の湿潤に関する室内試験結果
（幌延地下水と同程度の塩濃度の水を浸潤させた場合）

なお、残りの一組の試験体については、「4.1 人工バリア性能確認試験」において、熱－水理－力学－化学連成現象の評価のための参考情報として既設の自動計測機器でのデータ取得を継続します。

令和 6 年度までの成果の概要

令和 2 年度から 5 年間にわたり、高温条件において人工バリア周辺で生じる現象の整理と課題の抽出、抽出された課題に基づく室内試験ならびに原位置試験を行ってきました。原位置試験の解体調査の結果から、100℃を超えるヒーター温度での加熱により緩衝材ブロックのヒーター接触部ではひび割れが生じることが確認され（図 37(a)）、その近傍の緩衝材では、温度履歴を受けていない緩衝材と比べて一軸圧縮強度が低く透水係数が高い傾向が確認されました。一方で、室内試験の結果から、高温での加熱により緩衝材にひび割れが生じてもそれらが優先的な水みちとはならず、また生じたひび割れは、蒸留水を浸潤させた場合および塩水を浸潤させた場合（図 39）のいずれも閉塞することが示されました⁹⁾。さらに、比較的長期間で緩衝材特性に影響を及ぼし得ると考えられるイライト（雲母鉱物）化に関して令和 3 年度ならびに令和 4 年度に机上検討を行い、緩衝材に許容される上限温度について、より現実的な温度履歴や反応速度式・地下水の化学組成などの不確かさを反映して見積もることができました⁽⁴⁾⁽⁵⁾。これらにより、実際の岩盤中で、短期的に 100℃を超えた場合に緩衝材に生じる変質や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。

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 6 年度は地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握手法の整備を目的として、過年度に実施した断層の水圧擾乱試験の結果を用いて断層の水理学的連結性を詳細に解析しました。地層中に断層が発達する場合、地層の透水性を理解するためには断層の水理学的連結性を把握することが重要となります。断層の水理学的連結性の指標となる水みちのつながり方の次元が水圧擾乱試験中にどのように変化したかを調べた結果、水みちのつながり方の次元は DI と連動して変化し、その両者の関係は透水試験により地層中に広く認められる水みちのつながり方の次元と DI の関係とよく一致することが分かりました（図 40）。DI が変化しない状態で断層のずれが水みちのつながり方の次元に与える影響についても調べた結果、断層のずれは水みちのつながり方の次元にほとんど影響を与えないことが確認できました（図 41）。これらのことから、地殻変動によって断層にかかる力が変化したり断層がずれたりしても、断層の水理学的連結性の変化は常に DI との関係により推定することができ、その関係は水圧擾乱試験により検証できることが確認できました^(80・84)。この結果と、断層内の隙間の大きさと DI の関係に関する既存の研究成果を踏まえると、稚内層に類似する地層（5.1.2(4)で示した表 4 の分類 I-a）の場合、地殻変動が地層の透水性に与える影響は、断層の水理学的特性と DI との関係により評価できることが分かりました^(55・57・80・84)。

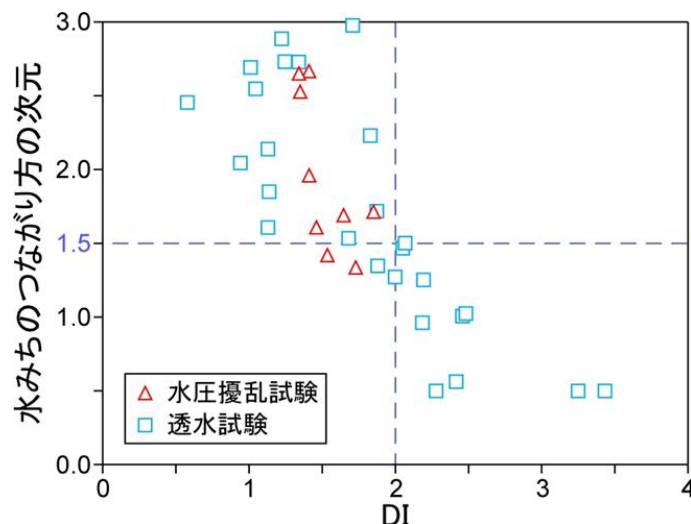


図 40 水圧擾乱試験および透水試験で認められた稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元と DI の関係⁽⁸⁰⁾

水圧擾乱試験は断層沿いの割れ目の発達幅が数 cm 程度の規模の断層の試験結果を、透水試験は様々な規模の断層の試験結果を示しています。

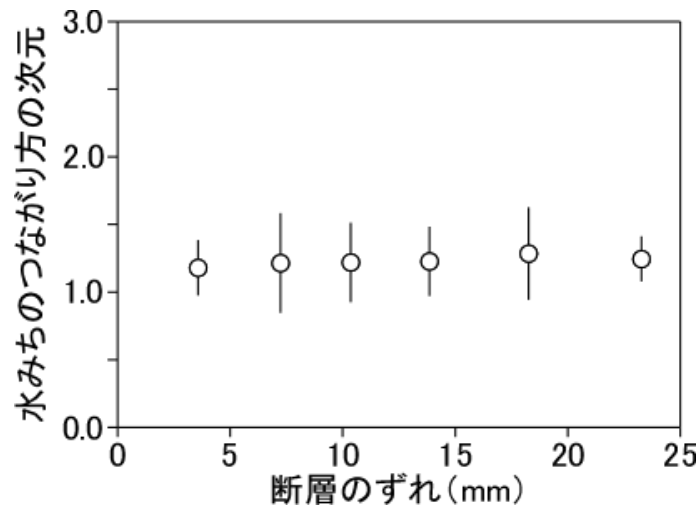


図 41 水圧擾乱試験で認められた稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元と断層のずれの関係⁽⁸⁰⁾

断層沿いの割れ目の発達幅が数十 cm 程度の規模の断層の試験結果を示しています。

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を目的として、割れ目の水理学的連結性の指標となる水みちのつながり方の次元と DI の関係を理解するための数値シミュレーションを行いました。その結果、これまで稚内層や類似の地層（表 4 の分類 I-a）で経験的に認められていた関係、すなわち DI が 2 より大きくなると水みちのつながり方の次元が概ね 1.5 以下になる関係（図 40）は DI の変化に伴う割れ目内の隙間の開閉により説明できることが確認できました⁽⁸⁰⁾。さらに、この関係が地層の透水性に与える影響についても検討した結果、地層内の割れ目の代表的な透水性と DI の関係は理論的な計算により 5.1.2(4) で示した図 34 の曲線のように表すことができ、同曲線の DI に対する透水性の変化傾向は、別のデータから推定される地層の代表的な透水性の変化傾向とよく一致することが分かりました（図 34）。これらのことから、稚内層に類似する地層（表 4 の分類 I-a）の場合、割れ目の代表的な透水性や隆起侵食などの地殻変動に伴う透水性の変化量は、図 34 の曲線で表されるような透水性と DI の関係を用いて評価できることが分かりました^(43, 55, 80)。このような手法を適用することにより、透水性の推定の信頼性を向上させることが可能と考えられます。

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詳細な解析を行いました。その結果、断層の力学的な安定性を表す指標のひとつであるせん断剛性（せん断変形のしにくさ）が比較的規模の大きな断層（図 42 の断層 A）では 0.1 MPa/mm 以下の低い値が算出されるのに対し、小規模な断層（図 42 の断層 B）では 1 MPa/mm 以上の高い値が算出されました⁽⁹⁹⁾。断層 A のせん断剛性は既往の室内実験で示される断層や割れ目のせん断剛性（ 10^{-3} MPa/mm～0.1 MPa/mm）と同程度で、断層 B は断層内の一部が固結した状態にあったことが確認されています。したがって、いずれのせん断剛性も妥当な値と考えられます。これらのことから、水圧擾乱試験により断層や割れ目のせん断剛性を原位置で適切に評価できることが確認できました⁽⁹⁹⁾。

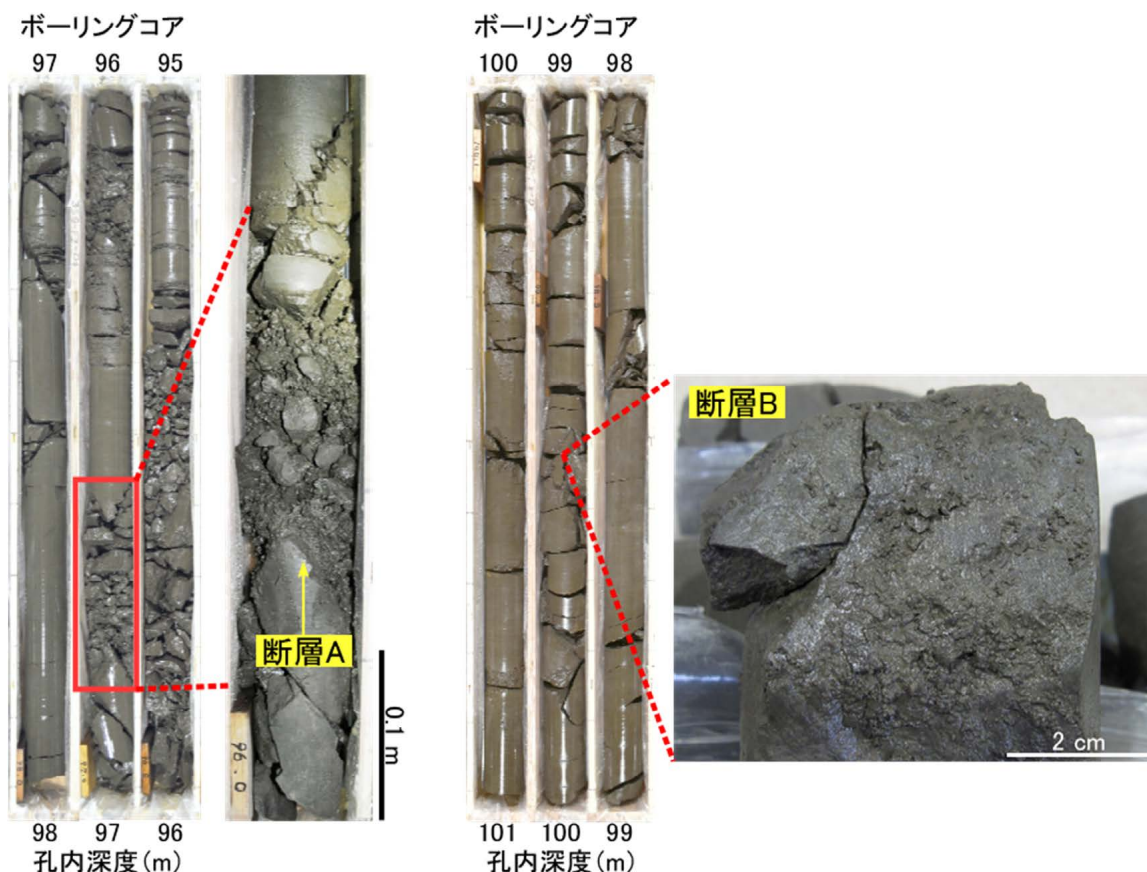


図 42 水圧擾乱試験を行った断層⁽⁹⁹⁾

断層 A は割れ目の発達幅が数十 cm 程度で、厚さ数 cm の断層破砕物を伴います。断層 B は割れ目の発達幅が数 cm 程度で、厚さ数 mm 以下の断層破砕物を伴います。

令和 6 年度までの成果の概要

令和 2 年度から 5 年間にわたり、①地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握手法の整備、②DI 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および③水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法の整備を目的に、断層の水圧擾乱試験などを行ってきました。その結果、①および②については、稚内層と類似する地層（表 4 の分類 I-a）の場合、断層や割れ目の代表的な透水性と DI の関係（図 34 の曲線）や水圧擾乱試験を適用することにより、地殻変動の影響を考慮した地層の長期的な透水性を評価できることが分かりました^(43・55・57・80・84)。③については、断層の力学的な安定性を表す指標のひとつであるせん断剛性を水圧擾乱試験により原位置で適切に評価できることが確認できました⁽⁹⁹⁾。以上のように、上記 3 点について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つた場合に追加で試験や解析を実施します。

6.1.2 地下水の流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」(44、100)を評価する際に役立ちます。

地下水の流れが非常に遅い領域(化石海水領域)の三次元分布を推定する手法の検討のために、幌延深地層研究センターを含む約 3 km 四方を調査範囲として、令和 2 年度に高密度電磁探査※(38、101)を実施し、令和 3 年度から令和 4 年度にかけてボーリング調査(HFB-1 孔)を実施しました(102、103、104)。そして、これらの調査結果だけでなく幌延地域における既存の調査結果を基に、数十 km 四方の調査範囲から調査し、その結果に基づいて数 km 四方に調査範囲を絞り込み、その範囲における化石海水の三次元分布を推定する手法を構築しました(104、105)。化石海水は海水に由来するため、塩化物イオン濃度(Cl⁻濃度)はその有無を確認するひとつの指標となります。幌延地域では、地下水の Cl⁻濃度と地下の比抵抗が強く相関しており(106)、検討した手法では、広範囲に地下の比抵抗分布を推定できる電磁探査が有効な調査となります。また、地下水の水質データから化石海水の有無を確認する必要があるため、ボーリング調査では、地下水採水と化学分析により地下水の Cl⁻濃度だけでなく他の指標(例えば水の安定同位体比※)も取得します。ボーリング調査により取得されたこれらの指標は、電磁探査で推定された比抵抗分布と組み合わせて地球統計学的解析を用いることにより、空間分布を推定することができます。この手法により酸素同位体比※の三次元分布を推定し、最適なボーリング調査地点の位置と数を検討した結果、化石海水の三次元分布を把握する際、電磁探査の結果に基づきボーリング調査地点を選定することが重要であることを示すことができました(5、104)。

また、化石海水の理解を深めるために、幌延地域に分布する化石海水の水質形成機構を明らかにするための数値解析を実施しました(107)。具体的には、地層の埋没続成作用※に伴う間隙率の減少による上昇流と、生物起源シリカ※および粘土鉱物の相変化に伴う脱水を考慮した数値モデルを構築し解析しました。その結果、地表水との混合がなくても、海水と比べて最大で約 80 %低い値の Cl⁻濃度の地下水が形成され得ることを示すことができました。幌延地域では、水の安定同位体比を指標とした場合に化石海水と判別できる地下水であっても、海水と比べて最大で約 80 %低い値の Cl⁻濃度の地下水が存在しています(108、109)。この解析結果は、このような地下水が現在の地質環境下での地表水との混合ではなく、100 万年単位の長い時間をかけて起こった埋没続成作用による変質によって形成された可能性を示唆しています。すなわち、幌延地域の化石海水が分布する領域が地下水の流れが非常に遅い地域であるという解釈と整合しています。

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あるとともに、ボーリング調査において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遅いことを確認することも重要です。そこで、割れ目と岩石間隙中の地下水の水質の違いから地下水の流れの有無を評価し(13)、地下水の放射性炭素(¹⁴C)年代から得られた情報を組み合わせることで、地下水の流動状態の長期的な変遷を推定する手法を構築し、地表水が流れた履歴のある領域において、浅部では最終氷期以降(後氷期: 約 1 万年前以降)に浸透した地表水が割れ目に沿って流動していること、深部では最終氷期に浸透した地表水が現在は滞留していることを明らかにしました(14)。

このような地下水の流れの概念は数値解析により定量的に確認することも重要です。令和 6 年度は、広域スケール(十数 km×十数 km)を対象とした水理・物質移行解析(地下水移行時間解析)手法の整備を目的として、地下水移行時間に対して感度の高いパラメータである岩盤の水理学的有効間隙率の与え方に着目した水理解析を行いました(83)。解析では、幌延深地層研究センター周辺の陸域から日本海の海域にかけてのおよそ 60 km(東西)×30 km(南北)×10 km(深さ)の広域スケールで定常浸透流解析を実施し、得られた地下水移行時間と環境トレーサー(地下水の ¹⁴C やトリチウム※)から推定される地下水移行時間とを比較しました。その結果、地表水が主に割れ目を介して流れている地下浅部の領域では、健岩部の間隙率(声間層 0.5、稚内層 0.4)よりも小さい、割れ目の開口幅に対応する有効間隙率 0.0001~0.01 を与えると両者の移行時間が整合することが確認できました(図 43)。一方、図 44 に示すとおり、稚内層深部における地下水移行時間は 100 年以上と非常に長い結果となりました。化石海水中の ³⁶Cl や ⁴He を用いた地下水年代評価から、稚内層深部では 130 万年前~100 万年前から始まった地層の隆起侵食以降、停滞状態にあったことが示唆されており(108)、得られた解析結果自体は矛盾していません。これら

のことから、割れ目と岩石間隙中の水質に差があり、地表水が割れ目に沿って流動していることが示唆される領域では、亀裂の開口幅に基づいて算出した岩盤の有効間隙率を与えることが適切であることが分かりました。

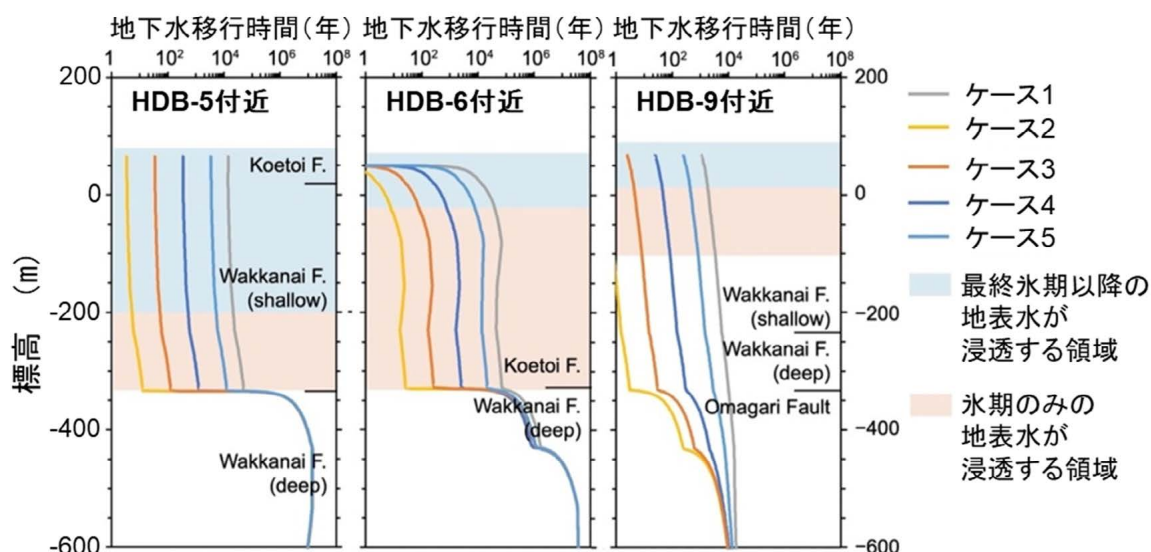


図 43 HDB-5 孔、HDB-6 孔および HDB-9 孔付近の地下水移行時間の深度分布⁽⁸³⁾

ケース 1 は健岩部の間隙率（声間層 0.5、稚内層 0.4）、ケース 2～ケース 5 は割れ目の開口幅に対応する有効間隙率（それぞれ 0.0001、0.001、0.01、0.1）を用いて解析しています。地表水が浸透する領域の深度は、参考文献(13)に基づいています。HDB-5 孔の浅部の地表水が流れている領域の割れ目水では、約 6,500 年前～約 4,400 年前の ^{14}C 年代が得られており⁽¹⁴⁾、HDB-9 孔の浅部では、トリチウム濃度と電気伝導度^{*}が地表付近の地下水と同程度であると報告されていることから⁽¹⁰⁹⁾、地下水移行時間は 10 年未満と推定されます。HDB-5 孔付近の最終氷期以降の地表水が浸透する領域（水色領域）における地下水移行時間の解析結果は、数百年～数万年のケース 1、4、5 が ^{14}C 年代を踏まえた観測結果と整合的です。HDB-9 孔付近の最終氷期以降の地表水が浸透する領域（水色領域）における地下水移行時間の解析結果は、数十年以下のケース 2、3、4 がトリチウム濃度を踏まえた観測結果と同程度に小さいです。よって、HDB-9 孔付近での検討結果に基づく有効間隙率の与え方としてはケース 2、3、4 が適切であり、HDB-5 孔近傍の結果も考慮するとケース 4 が適切であったと考えられます。

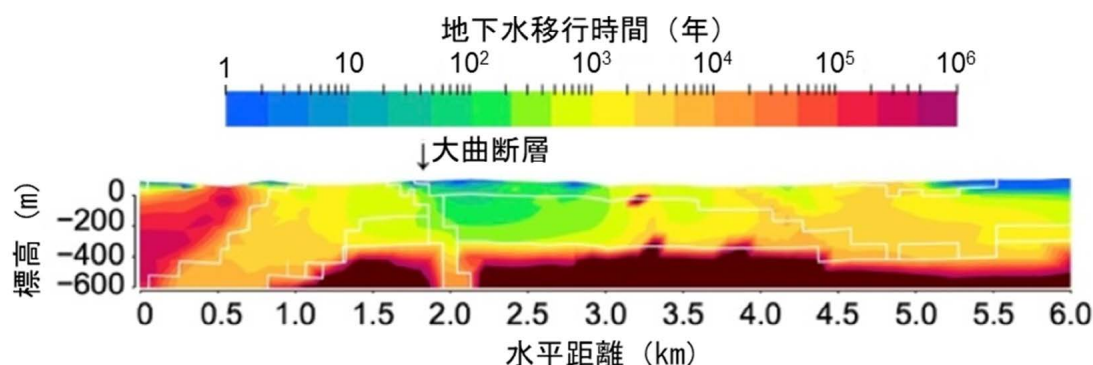


図 44 地下水移行時間の解析結果の例⁽⁸³⁾

幌延深地層研究センター周辺の陸域から日本海の海域にかけてのおよそ 60 km（東西）×30 km（南北）×10 km（深さ）の広域スケールを対象に実施した定常浸透流解析の結果に基づき、幌延深地層研究センター周辺の 6 km（水平）×0.6 km（深さ）の鉛直断面に着目して地下水移行時間を求めました。断面上の白線は水理地質構造区分の境界を示しています。ここでは、環境トレーサー（地下水の ^{14}C やトリチウム）から推定される地下水移行時間と整合する結果として、割れ目の開口幅に対応する有効間隙率を 0.01 とした場合の結果を示しています。

令和 6 年度までの成果の概要

令和 2 年度から 5 年間にわたる取り組みにより、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を実証することができ、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6年度におけるデータ取得例として、350 m 調査坑道に設置している水圧・水質モニタリング装置による観測結果のうち、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から得られた地下水圧（間隙水圧）のモニタリング結果を示します（図45）。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、大きな変動はみられませんでした。

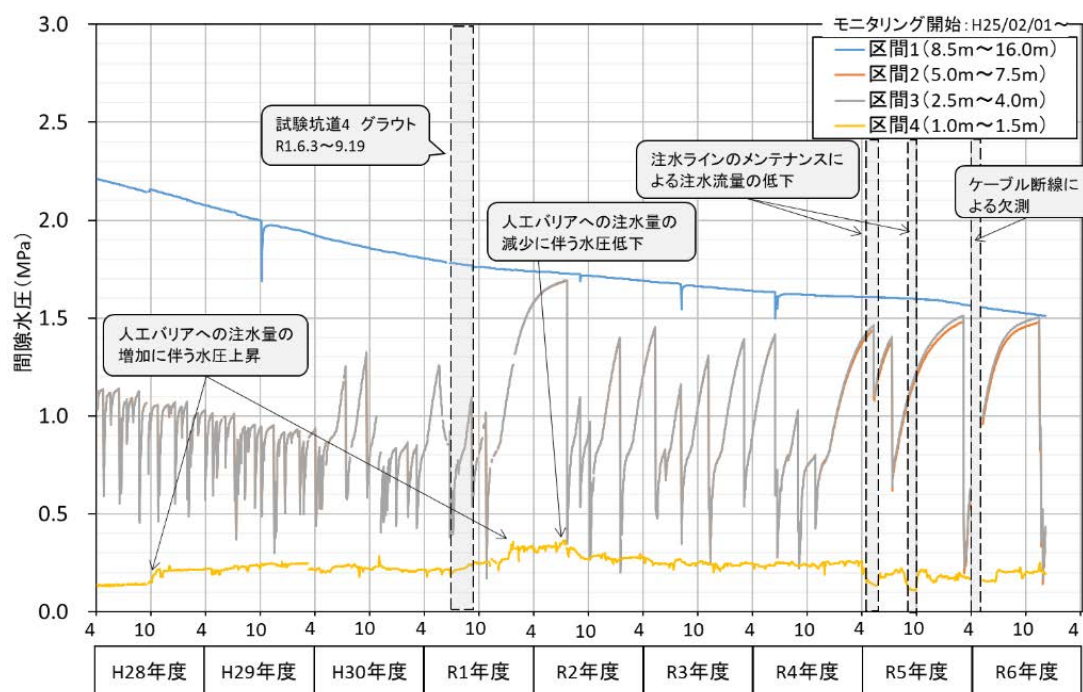


図 45 人工バリア性能確認試験の試験箇所周辺のボーリング孔（13-350-C08 孔）における水圧の経時変化

令和7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140 m、250 m および350 m 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地質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 7 年度は、令和 6 年度に引き続き、西立坑および 500 m 調査坑道の掘削を行います。500 m 調査坑道については、掘削後に路盤整備や昇降設備設置などの仕上げを行い、令和 7 年度末に施設整備を完了する予定です（表 5）。

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 5 掘削工事のスケジュール（令和 7 年度）

	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期
西立坑	掘削			
500 m調査坑道	掘削			仕上

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

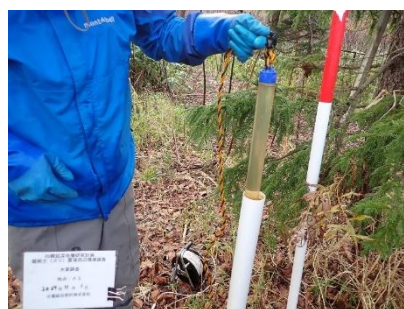
地下施設からの排水などの水質調査および研究所用地周辺の環境影響調査を実施します。

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、地下施設整備工事により発生する掘削土（ズリ）について土壌溶出量調査を行うとともに、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 46）。



(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 46 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 47）。



(a) 清水川の水質調査



(b) 清水川の魚類調査

図 47 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当たっては、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 48）。



図 48 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。また、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当たっては、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^{*13}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」に連載している、研究内容などを紹介する記事については、令和7年度も継続します。

11.1 国内機関との研究協力

○北海道科学大学

人工知能を用いた画像処理により坑道壁面の地質情報を取得する方法に関する研究

○東京大学

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

コンクリーション化充填剤を利用した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、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

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

○電力中央研究所

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

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

地層処分における核種移行性能に関する研究（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

○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

上記の他、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 49）。

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



図 49 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

令和 7 年度はフェーズ 2 の研究に着手します。タスク A では、250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑（図 4 参照）で実施したトレーサー試験結果の解析に取り組むとともに、試験箇所周辺で採取する岩石試料の分析を通じて、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の整理を進めます。タスク B では、試験坑道 8、9（図 6 参照）を対象に、断層などの割れ目の分布状況やそれらの割れ目からの湧水量、坑道掘削時の掘削損傷領域の広がりや水圧変化などのデータを取得します。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、一連の操業技術の実証に向けて、試験坑道 6（図 5 参照）において、掘削損傷領域の広がりを把握するとともに、原位置での坑道埋め戻しと止水プラグの設計や試験レイアウトの計画検討を進めます。タスク C では、人工バリア性能確認試験の解体試験計画の具体化に向けた議論や解析検討を継続するとともに、原位置の複雑な現象を対象とした解析検討に向けた準備を各機関で開始します。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ならびに管理委員会を実施します。また、フェーズ 1（令和 4 年度後半から令和 6 年度）の研究成果を取りまとめた報告書を公開します。本活動については、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。

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。

12. 用語集

【英数字】

BTV

BTV（ボアホールテレビューア）は、ボーリング孔内にテレビカメラを内装した装置を挿入し、連続的に撮影することで、ボーリング孔壁面の状況を目視する方法です。

Da（ダルトン）

Da は質量を表す単位であり、質量数 12 の炭素原子の質量の 1/12 と定義されていますが、限外ろ過に用いられるフィルターサイズの指標としても用いられます。10 kDa（キロダルトン）のろ過フィルターサイズとは、10 kDa（10,000 Da）より小さな質量の分子が通ることのできる孔径（数 nm 程度）の指標を意味します。

HFSC

原子力機構が開発した低アルカリ性セメント：Highly Fly-ash contained Silicafume Cement の略で、通常のセメントに、地殻に最も多く含まれる物質のひとつである石英を含む物質を、多量に加えて組成を変えることで間隙水の pH を低下させたセメントのことです。

【あ行】

アウトプット法

コンクリート材料の透水性を調べる方法のひとつで、試験体に水を圧入し、試験体を通過した水の量から透水係数を求めます。

埋め戻し材

処分場において、廃棄体を定置した後の処分坑道、アクセス坑道や連絡坑道を埋め戻す際に使用する材料です。埋め戻した後の坑道内が選択的な水みちとならないように、埋め戻し材に要求される性能のひとつとして、透水性が低いことが挙げられます。処分場の建設では、坑道の掘削に伴い、大量の掘削土が発生することから、埋め戻し材には掘削土を利用することが合理的であり、透水性を低くするために掘削土にベントナイトを混合して、埋め戻し材とすることが検討されています。

ウラニン

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 $C_{20}H_{10}Na_2O_5$ で表されます。トレーサー試薬としての利用の他、入浴剤の着色料などとしても利用されています。

エトリンガイト

セメント水和物のひとつで、化学式 $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ で表される鉱物です。

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。

拡散

拡散とは、物質の濃度の違いによって物質が散らばり広がる現象を言います。

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

人工バリアの構成要素のひとつです。オーバーパックを包み込むように設置され、地下水の浸入と放射性物質の溶出・移動を抑制する機能が期待されています。さらに岩盤の変形を物理的に緩衝するクッションのはたらきや、地下水の水質の変化を化学的に緩衝して抑制するはたらきを持ちます。候補材料はベントナイトなどの粘土材料です。

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。

クリープ

クリープとは、一定加重または応力が作用している状態で時間の経過とともに材料の変形(ひずみ)が進行する現象のことです。

経験式

理論的根拠は明らかではないものの、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。

ケイ酸カルシウム水和物 (C-S-H)

コンクリートに含まれる主要な水和物のひとつであり、カルシウムやシリカを含みます。含まれるカルシウムやシリカの物質量の比によって組成や性質が異なります。

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。

限外ろ過

コロイド粒子などの、通常のろ過方法では分離できない微細な粒子をろ過する方法で、約 1 kDa～1,000 kDa の分子を分離することができます。

懸濁粒子

水中に浮遊して溶解しない粒子の総称です。浮遊物質とも呼ばれます。

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伴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

幌延深地層研究センターでの実習について（ANEC 北海道大学拠点）

令和 6 年度：<https://caren.eng.hokudai.ac.jp/anec/event/2351/>

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

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】

錯体

有機物と希土類元素や金属元素が配位結合や水素結合することで形成される化合物の総称です。

酸素同位体比

酸素同位体比とは、質量数 16 の酸素に対する質量数 18 の酸素の割合を指します。幌延地域では、表層水で-10%前後、深部地下水で 0%前後の値を示すことが分かっています。

支保

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

地下水中にある元素が、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。

シリカ

二酸化ケイ素（ SiO_2 ）とも呼ばれます。石英の主成分であり、地殻に最も豊富に含まれる物質のひとつです。

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。

水理学的有効間隙率

本計画書では、岩盤中の間隙部分のうち、水が通らないほど小さいか孤立した間隙を除いた部分の間隙の割合、すなわち水の移動に有効な間隙の割合のことです。

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。

せん断

岩盤などの内部の任意の面に対して平行方向に力が作用してずれが生じることを言います。

【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、軟らかくなります。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）をその健全部の引張強度（岩石の引張破壊に対する強度）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。

縦方向分散長

本計画書では、「機械的分散」を単に分散と表現しています。分散は流れの速さに依存する形で表現することができ、簡単に一次元方向の流れのみを考慮する場合、以下の式で表現することが可能です。

$$D = \alpha \cdot u$$

ここで、 D ：分散係数（ m^2/s ）、 α ：分散長（ m ）、 u ：流速（ m/s ）を表します。分散係数は流れの方向に対して同じ方向、直行方向、垂直方向にそれぞれ定義することができ、流れの方向と同じ方向の分散係数は以下の式で表現することが可能です。

$$D_L = \alpha_L \cdot u$$

この時の分散長（ α_L ）を縦方向分散長と言います。

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。

電気伝導度

電気の通しやすさを表す値で、電気伝導度が大きい（電気を通しやすい）ほど地下水に溶けているイオンの量が多いことを表します。

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。

同位体比

同じ種類の原子であっても重さ（質量数）が違ふものがあり、その割合のことを同位体比と言います。例えば、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。

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 ）、 k ：透水係数（ m/s ）、 A ：断面積（ m^2 ）、 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。

トリチウム

質量数が 3 である水素の放射性同位体で、三重水素とも呼ばれます。地球上で実施された過去の核実験の影響などにより環境中に微量に存在しますが、幌延地域の地下深部の地下水のような古い地下水には含まれていません。

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。

トレーサー回収率

本計画書においては、「投入区間から注入したトレーサーの単位時間当たりの量」に対する「回収区間で観測されたトレーサー濃度が概ね一定となった期間におけるトレーサーの単位時間当たりの量」の比を指します。

【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。

プラグ

ベントナイトなどを原料とする緩衝材や埋め戻し材が移動・膨出するのを防ぐ、あるいは掘削影響を受けた領域の地下水の移動を抑制するために、処分坑道の両端やその周辺に設けられる構造物です。なお、本計画書で記載のある「止水プラグ」は、掘削損傷領域の地下水の移動を抑制するためにベントナイトを混ぜた材料で構築するものを指します。

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生じ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、濃度が減少します。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ます。ベントナイトの膨潤により緩衝材や埋め戻し材の透水性が低下したり、ベントナイトに放射性核種が吸着されたりして、放射性核種の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。

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

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

【ま行】

埋没続成作用

泥や砂などの堆積物は、長い年月をかけて厚く堆積し地下深くに埋没すると、圧力と地温上昇の影響によって、鉱物粒子の隙間が圧密により減少したり、粒子同士の結びつきが鉱物の溶解・沈殿により強くなったりして、堆積物が固結化していきます。このような埋没の過程で生じる物理・化学的な現象を埋没続成作用と総称します。

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つながり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、隙間同士のつながりが限定的で、一次元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】

有効粘土密度

緩衝材や埋め戻し材に含まれるケイ砂や掘削土の体積を除いた、ベントナイトのみの乾燥密度を計算したものです。

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) 石井英一，安江健一：幌延町における鮮新世～前期更新世のテフラ層序と FT 年代，JNC TN5400 2005-006，2005，52p.
- (2) Ishii, E., Sanada, H., Iwatsuki, T., Sugita, Y. and Kurikami, H.: Mechanical strength of the transition zone at the boundary between opal-A and opal-CT zones in siliceous rocks. *Engineering Geology*, vol.122, 2011, pp.215-221.
- (3) 石井英一，安江健一，大平寛人，古澤明，長谷川健，中川光弘：北海道北部，大曲断層近傍の背斜成長の開始時期，*地質学雑誌*，vol.114，no.6，2008，pp.286-299.
- (4) 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.
- (5) 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 2023-032，2023，147p.
- (6) 武田匡樹，石井英一：原位置トレーサー試験による堆積岩中の掘削損傷領域内の移流分散評価，*原子力バックエンド研究*，vol.31，no.1，2024，pp.3-10.
- (7) Gelhar, L. W., Welty, C. and Rehfeldt, K. R.: A Critical Review of Data on Field-Scale Dispersion in Aquifers. *Water Resources Research*, vol.28, no.7, 1992, pp.1955-1974.
- (8) Kimuro, S., Kirishima, A., Nagao, S., Saito, T., Amano, Y., Miyakawa, K., Akiyama, D. and Sato, N.: Characterization and thermodynamic study of humic acid in deep groundwater at Horonobe, Hokkaido, Japan, *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol.55, no.5, 2018, pp.503-515.
- (9) 中山雅（編）：幌延深地層研究計画 令和 5 年度調査研究成果報告，JAEA-Review 2024-042，2024，111p.
- (10) Kirishima, A., Kuno, A., Amamiya, H., Kubota, T., Kimuro, S., Amano, Y., Miyakawa, K., Iwatsuki, T., Mizuno, T., Sasaki, T. and Sato, N.: Interaction of rare earth elements and components of the Horonobe deep groundwater, *Chemosphere*, vol.168, 2017, pp.798-806.
- (11) Kirishima, A., Terasaki, M., Miyakawa, K., Okamoto, Y. and Akiyama, D.: Deep groundwater physicochemical components affecting actinide migration, *Chemosphere*, vol.289, 2022, 133181.
- (12) Amano, Y., Sachdeva, R., Gittins, D., Anantharaman, K., Lei, S., Valentin-Alvarado, L. E., Diamond, S., Beppu, H., Iwatsuki, T., Mochizuki, A., Miyakawa, K., Ishii, E., Murakami, H., Jaffe, A. L., Castelle, C., Lavy, A., Suzuki, Y. and Banfield, J. F.: Diverse microbiome functions, limited temporal variation and substantial genomic conservation within sedimentary and granite rock deep underground research laboratories. *Environmental Microbiome*, vol.19, 2024, 105.
- (13) 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.
- (14) 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.
- (15) Terashima, M., Endo, T. and Miyakawa, K.: Determination of humic substances in deep groundwater from sedimentary formations by the carbon concentration-based DAX-8 resin isolation technique, *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol.57, no.4, 2020, pp.380-387.
- (16) 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, *ES&T Water*, vol.3, no.12, 2023, pp.4103-4112.

- (17) 望月陽人, 笹本広, 馬場大哉, 生垣加代子: 少量試料に適用可能な簡易分析法に基づく深部地下水中の溶存有機物の特性評価, 陸水学雑誌, vol.81, no.2, 2020, pp. 153-166.
- (18) Nishimura, H., Kouduka, M., Fukuda, A., Ishimura, T., Amano, Y., Beppu, H., Miyakawa, K. and Suzuki, Y.: Anaerobic methane-oxidizing activity in a deep underground borehole dominantly colonized by *Ca. Methanoperedenaceae*, Environmental Microbiology Reports, vol.15, no.3, 2023, pp.197-205.
- (19) Hirota, A., Kozuka, M., Fukuda, A., Miyakawa, K., Sakuma, K., Ozaki, Y., Ishii, E. and Suzuki, Y.: Biofilm formation on excavation damaged zone fractures in deep neogene sedimentary rock, Microbial Ecology, vol.87, 2024, 132.
- (20) 武田匡樹, 石井英一, 大野宏和, 川手訓: ガスが溶存した地下水を含む泥岩中の割れ目を対象とした原位置トレーサー試験条件の設定に関する検討, 原子力バックエンド研究, vol.25, no.1, 2018, pp.3-14.
- (21) Ohno, H., Ishii, E. and Takeda, M.: Modelling transport pathways of faults with low hydraulic connectivity in mudstones with low swelling capacity, Geoenergy, vol.2, no.1, 2024, geoenergy2023-047.
- (22) 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, 2023, pp.893-911.
- (23) 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係る技術開発事業[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.
- (24) 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, 電力中央研究所: 令和5年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業[JPJ007597]地層処分安全評価確証技術開発ニアフィールド長期環境変遷評価技術開発報告書, 2024.
- (25) 中山雅: 幌延 URL における低アルカリ性セメント系材料の劣化および周辺環境への影響調査, JAEA-Data/Code 2020-009, 2020, 98p.
- (26) Ngala, V. T. and Page, C. L.: Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes, Cement and Concrete Research, vol.27, no.7, 1997, pp.995-1007.
- (27) 地盤工学会: 低透水性材料の透水試験方法, JGS0312-2018, 2018, 30p.
- (28) Hashiba, K., Fukui, K., Kataoka, M. and Chu, S. Y.: Effect of water on the strength and creep lifetime of andesite, International journal of rock mechanics and mining sciences, vol.108, 2018, pp.37-42.
- (29) 中山雅, 雑賀敦(編): 幌延深地層研究計画 令和元年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2020-042, 2021, 116p.
- (30) Hvorslev, M. T.: Time lag and soil permeability in ground-water observations, U.S. Army Waterways Experiment Station, Bull no.36, 1951, 50p.
- (31) Jacob, C. J. and Lohman, S. W.: Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer, Trans. American geophysical Union, vol.33, no.4, 1952, pp.559-569.
- (32) Ozaki, Y.: First-arrival traveltime tomography for monitoring the excavation damaged zone in the Horonobe Underground Research Laboratory, Rock Mechanics Bulletin, vol.2, no.3, 2023, 100057.
- (33) Ozaki, Y., Aoyagi, K., Ohno, H. and Kimura, S.: Variation of electrical resistivity distribution around the opened and backfilled tunnel in the Horonobe Underground Research Laboratory, Proceedings of CouFrac2024, - The 4th International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media: Observation, Modeling, and Application, 2024.
- (34) 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係る技術開発事業[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.

- (35) 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.
- (36) 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 2 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]地層処分施設閉鎖技術確証試験報告書，2021.
- (37) 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]地層処分施設閉鎖技術確証試験報告書，2022.
- (38) 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 2021-053，133p.
- (39) 菊池広人，宇田俊秋，林大介，江守稔，木村駿：縦置き・ブロック方式における緩衝材の流出量評価手法の検討，原子力バックエンド研究，vol.31，no.1，2024，pp.11-20.
- (40) 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.
- (41) Aoyagi, K., Ozaki, Y., Tamura, T. and Ishii, E.: Transmissivity prediction of the Excavation Damaged Zone fracture around the gallery at 500 m at the Horonobe Underground Research Laboratory, Proceedings of CouFrac2024 - The 4th International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media: Observation, Modeling, and Application, 2024.
- (42) 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.
- (43) Ozaki, Y. and Ishii, E.: Relationship between fault transmissivity, flow dimensions and effective hydraulic conductivity in siliceous mudstone of the Wakkanaï Formation around the Horonobe Underground Research Laboratory in Japan, Geoenergy, vol.2, 2024, geoenergy2023-056.
- (44) 原子力発電環境整備機構：包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築－，NUMO-TR-20-03，2021，807p.
- (45) 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 5 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]地層処分施設施工・操業技術確証試験報告書，2024.
- (46) 木村駿，早野明，佐藤菜央美，田村友識，八木啓介：幌延の堆積岩における止水プラグの原位置施工試験の概要（1）全体概要と坑道周辺の水理条件の把握，日本原子力学会 2024 年秋の大会，2024.
- (47) 青柳和平，尾崎裕介，大野宏和，石井英一：堆積軟岩を対象とした高レベル放射性廃棄物模擬処分孔掘削時の岩盤損傷の発達状況，第 16 回岩の力学国内シンポジウム講演集（インターネット），2025，pp.269-274.
- (48) 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.98, 2024, s12665-023-11416-x.
- (49) Posiva and SKB: Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository, Posiva SKB Report 01, 2017.
- (50) 石川博久，菅野毅，松本一浩：ベントナイト緩衝材の流出特性の評価（I），PNC TN8410 97-313，1997，32p.
- (51) Birgersson, M., Börgesson, L., Hedström, M., Karnland, O. and Nilsson, U.: Bentonite erosion. Final report, SKB Technical Report TR-09-34, 2009, 171p.

- (52) Neretnieks, I., Moreno, L. and Liu, L.: Clay erosion - impact of flocculation and gravitation, SKB Technical Report TR-16-11, 2017, 81p.
- (53) Neretnieks, I. and Moreno, L.: Revisiting bentonite erosion understanding and modelling based on the BELBaR project findings, SKB Technical Report TR-17-12, 2018, 52p.
- (54) 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, 2015, pp.2220-2241.
- (55) 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.
- (56) 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, 2022, pp.1855-1869.
- (57) 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.
- (58) 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.
- (59) 山本卓也, 下茂道人, 藤原靖, 服部弘通, 田所照夫, 岩間彦衛, 名合牧人, 熊本創: 幌延深地層研究センターにおける試錐調査 (HDB-1 孔), JNC TJ1400 2002-010, 2002, 921p.
- (60) Ishii, E.: Estimation of the highest potential transmissivity of discrete shear fractures using the ductility index, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol.100, 2017, pp.10-22.
- (61) Mazurek, M.: Evolution of gas and aqueous fluid in low-permeability argillaceous rocks during uplift and exhumation of the central Swiss Alps, *Applied Geochemistry*, vol.15, 1999, pp.211-234.
- (62) Mazurek, M., Lanyon, G. W., Vomvoris, S. and Gautschi, A.: Derivation and application of a geologic dataset for flow modeling by discrete fracture networks in low-permeability argillaceous rocks, *Journal of Contaminant Hydrology*, vol.35, 1998, pp.1-17.
- (63) NAGRA: Geosynthese Wellenberg 1996 – Ergebnisse der Untersuchungsphasen I und II, Nagra NTB 96-01, 1997, 511p.
- (64) Gutmanis, J. C., Lanyon, G. W., Wynn, T. J. and Watson, C. R.: Fluid flow in faults: a study of fault hydrogeology in Triassic sandstone and Ordovician volcanoclastic rocks at Sellafield, north-west England, *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, vol.52, 1998, pp.159-175.
- (65) Medici, G., West, L. J., Mountney, N. P. and Welch, M.: Permeability of rock discontinuities and faults in the Triassic Sherwood Sandstone Group (UK): insights for management of fluvio-aeolian aquifers worldwide, *Hydrogeology Journal*, vol.27, 2019, pp.2835-2855.
- (66) Milodowski, A. E., Gillespie, M. R., Naden, J., Fortey, N. J., Shepherd, T. J., Pearce, J. M. and Metcalfe, R.: The petrology and paragenesis of fracture mineralization in the Sellafield area, west Cumbria, *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, vol.52, 1998, pp.215-241.
- (67) Boisson, J.-Y., Bertrand, L., Heitz, J.-F. and Golvan, Y. M.-L.: In situ and laboratory investigations of fluid flow through an argillaceous formation at different scales of space and time, Tournemire tunnel, southern France, *Hydrogeology Journal*, vol.9, 2001, pp.108-123.

- (68) Donzé, F.-V., Tsopela, A., Guglielmi, Y., Henry, P. and Gout, C.: Fluid migration in faulted shale rocks: channeling below active faulting threshold, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol.27, 2023, pp.2587-2601.
- (69) Guglielmi, Y., Elsworth, D., Cappa, F., Henry, P., Gout, C., Dick, P. and Durand, J.: In situ observations on the coupling between hydraulic diffusivity and displacements during fault reactivation in shales, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.120, 2015, pp.7729-7748.
- (70) Guglielmi, Y., Nussbaum, C., Cappa, F., De Barros, L., Rutqvist, J. and Birkholzer, J.: Field-scale fault reactivation experiments by fluid injection highlight aseismic leakage in caprock analogs: implications for CO₂ sequestration, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol.111, 2021, 103471.
- (71) Lefèvre, M., Guglielmi, Y., Henry, P., Dick, P. and Gout, C.: Calcite veins as an indicator of fracture dilatancy and connectivity during strike-slip faulting in Toarcian shale (Tournemire tunnel, Southern France), *Journal of Structural Geology*, vol.83, 2016, pp.73-84.
- (72) OECD/NEA: Clay club catalogue of characteristics of argillaceous rocks: 2022 update, NEA No. 7249, 2022, 242p.
- (73) Savoye, S., Cabrera, J. and Matray, J.-M.: Different hydraulic properties of single fractures in argillaceous medium: the case of the IRSN Tournemire site (France), *Proceedings of the IAH Conference of Groundwaters in Fractured Rocks*, 2003, pp.383-384.
- (74) Su, X., Nguyen, S., Haghighat, E., Pietruszczak, S., Labrie, D., Barnichon, J.-D. and Abdi, H.: Characterizing the mechanical behaviour of the Tournemire argillite, *Geological Society, London, Special Publications*, vol.443, 2017, pp.97-113.
- (75) Gautschi, A.: Safety-relevant hydrogeological properties of the claystone barrier of a Swiss radioactive waste repository: An evaluation using multiple lines of evidence, *Grundwasser*, vol.22, 2017, pp.221-233.
- (76) Giger, S. and Marschall, P.: Geomechanical properties, rock models and in-situ stress conditions for Opalinus Clay in Northern Switzerland, *Nagra NAB 14-01*, 2014, 86p.
- (77) Guglielmi, Y., Nussbaum, C., Rutqvist, J., Cappa, F., Jeanne, P. and Birkholzer, J.: Estimating perturbed stress from 3-D borehole displacements induced by fluid injection in fractured or faulted shales, *Geophysical Journal International*, vol.221, 2020, pp.1684-1695.
- (78) Jeanne, P., Guglielmi, Y., Rutqvist, J., Nussbaum, C. and Birkholzer, J.: Permeability variations associated with fault reactivation in a claystone formation investigated by field experiments and numerical simulations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.123, 2018, pp.1694-1710.
- (79) Barton, N., Bandis, S. and Bakhtar, K.: Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol.22, 1985, pp.121-140.
- (80) Ishii, E., Ozaki, Y., Aoyagi, K. and Sugawara, K.: Rock strength and stress dependence of local flow-path connectivity within faults or fractures: a preliminary overview of virtual and in-situ hydraulic tests, *Hydrogeology Journal*, vol.33, 2025, pp.63-85.
- (81) Ishii, E., Sanada, H., Funaki, H., Sugita, Y., and Kurikami, H.: The relationships among brittleness, deformation behavior, and transport properties in mudstones: an example from the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, *Journal of Geophysical Research*, vol.116, 2011, B09206.
- (82) Ishii, E.: Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single-borehole investigations, *Water Resources Research*, vol.54, 2018, pp.3335-3356.
- (83) 宮川和也, 石井英一, 今井久, 平井哲, 大野宏和, 中田弘太郎, 長谷川琢磨: 亀裂性堆積岩を対象とした地下水流動解析における有効間隙率の与え方: 北海道幌延に分布する声間層と稚内層浅部の事例, *原子力バックエンド研究*, vol.31, no.2, 2024, pp.82-95.

- (84) 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.
- (85) 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.
- (86) Mazurek, M.: Geological, hydrogeological and hydrochemical field evidence for fault sealing in marls from Wellenberg, Switzerland, *Proceedings of the self-healing topical session of the IGSC working group on measurement and physical understanding of groundwater flow through argillaceous media (Clay Club)*, OECD/NEA, 2001, pp.31-34.
- (87) Neuzil, C. E.: Interpreting fluid pressure anomalies in shallow intraplate argillaceous formations, *Geophysical Research Letters*, vol.42, 2015, pp.4801-4808.
- (88) Vomvoris, S., Scholtis, A., Waber, H.N., Pearson, F.J., Voborny, O., Schindler, S., Vinard, P.: Lessons learned from the use of hydrochemical data for the evaluation of groundwater flow models developed within the Swiss L/ILW programme, *Use of hydrogeochemical information in testing groundwater flow models*, OECD/NEA, 1999, pp.107-117.
- (89) Arthur, R., Sasamoto, H., Alt-Epping, P. and Tachi, Y.: Paleoclimatic controls on natural tracer profiles in biogenic sedimentary formations of the Horonobe area, Japan, *Applied Geochemistry*, vol.155, 2023, 105707.
- (90) Kurikami, H., Takeuchi, R. and Yabuuchi, S.: Scale effect and heterogeneity of hydraulic conductivity of sedimentary rocks at Horonobe URL site, *Physics and Chemistry of the Earth* vol.33, 2008, pp.S37-S44.
- (91) Miyakawa, K., Nohara, T., Tokiwa, T. and Yamazaki, M.: Seven-year history of vertical hydraulic diffusivity related to excavation around an underground facility, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol.70, 2014, pp.332-342.
- (92) Nirex: Sellafield geological and hydrogeological investigations: the derivation of freshwater and environmental heads, hydraulic conductivity and borehole chloride values with uncertainty limits for use in Nirex 97 groundwater modelling, *Nirex report SA/97/065*, 1997.
- (93) Streetly, M. J., Heathcote, J. A. and Degnan, P. J.: Estimation of vertical diffusivity from seasonal fluctuations in groundwater pressures in deep boreholes near Sellafield, NW England, *Geological Society Special Publication*, vol.263, 2006, pp.155-167.
- (94) Savoye, S., Michelot, J.-L., Bensenouci, F., Matray, J.-M. and Cabrera, J.: Transfers through argillaceous rocks over large space and time scales: Insights given by water stable isotopes, *Physics and Chemistry of the Earth*, vol.33, 2008, pp.S67-S74.
- (95) Tremosa, J., Gonçalves, J. and Matray, J.-M.: Natural conditions for more limited osmotic abnormal fluid pressures in sedimentary basins, *Water Resources Research*, vol.48, 2012, W04530.
- (96) Gonçalves, J., Matray, J.-M. and Yu, C. J.: Assessing relevant transport processes in Opalinus Clay at the Mont Terri rock laboratory using excess-pressure, concentration and temperature profiles, *Applied Clay Science*, vol.242, 2023, 107016.
- (97) Mazurek, M., Alt-Epping, P., Bath, A., Gimmi, T., Waber, H.N., Buschaert, S., De Cannière, P., De Craen, M., Gautschi, A., Savoye, S., Vinsot, A., Wemaere, I. and Wouters, L.: Natural tracer profiles across argillaceous formations, *Applied Geochemistry*, vol.26, 2011, pp.1035-1064.
- (98) Yu, C., Matray, J.-M., Gonçalves, J., Jaeggi, D., Gräsle, W., Wiczorek, K., Vogt, T. and Sykes, E.: Comparative study of methods to estimate hydraulic parameters in the hydraulically undisturbed Opalinus Clay (Switzerland), *Swiss Journal of Geosciences*, vol.110, 2017, pp.85-104.
- (99) Ishii, E.: Constant-head step-injection tests using a conventional straddle-sliding-packer system for investigating the shear capabilities of minor faults, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol.57, 2024, pp.8861-8878.

- (100) 総合資源エネルギー調査会：最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価―地質環境特性および地質環境の長期安定性について―，総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術 WG，2014.
- (101) 日本原子力研究開発機構，電力中央研究所：令和 2 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]岩盤中地下水流動評価技術高度化開発報告書，2021.
- (102) 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 2023-009，103p.
- (103) 日本原子力研究開発機構，電力中央研究所：令和 3 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]岩盤中地下水流動評価技術高度化開発報告書，2022.
- (104) 日本原子力研究開発機構，電力中央研究所：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]岩盤中地下水流動評価技術高度化開発報告書，2023.
- (105) 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.
- (106) 水野崇，岩月輝希，松崎達二：ボーリング孔を利用した比抵抗検層結果に基づく地下水水質の推定方法に関する検討，応用地質，vol.58, no.3, 2017, pp.178-187.
- (107) Miyakawa, K., Kashiwaya, K., Komura, Y., and Nakata, K.: Evolution of porewater in a Neogene sedimentary formation in the Horonobe area, Hokkaido, Japan: Modeling of burial diagenesis, GEOCHEMICAL JOURNAL, vol. 57, no.5, 2023, pp.155-175.
- (108) Nakata, K., Hasegawa, T., Oyama, T., Ishii, E., Miyakawa, K. and Sasamoto, H.: An evaluation of the long-term stagnancy of porewater in the Neogene sedimentary rocks in northern Japan, Geofluids 2018, 7823195.
- (109) 天野由記，山本陽一，南條功，村上裕晃，横田秀晴，山崎雅則，國丸貴紀，大山隆弘，岩月輝希：幌延深地層研究計画における地下水，河川水および降水の水質データ（2001～2010 年度），JAEA-Data/Code 2011-023，2012，312p.

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

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	R7の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
・実際の地盤環境下における処分坑設置方式を対象とした熱-水-応力-化学連成現象(ガラス固化体設置以降の加熱時の熱・注水時から浸潤時・減熱時を模擬した現象)に関する試験をとおして、設計や連成挙動評価手法の適用性の確認(人工バリアの解体試験および緩衝材の飽和度の確認を含む)ならびに施工方法など、工学的事実性の明示等を行う、設計、施工および評価・解析といった一連の技術に関する基礎情報を整備する ・これらをととして、廃棄体埋設後において、廃棄体周辺で起こる現象の理解を深め、安全評価において前提としている環境条件が達成されていること確認するとともに、その予測技術を確認すること、人工バリアの設計に反映する	③④ 熱-水-応力-化学連成現象(ガラス固化体設置以降の加熱時の熱・注水時から浸潤時・減熱時を模擬した現象)に関する試験をとおして、設計や連成挙動評価手法の適用性の確認(人工バリアの解体試験および緩衝材の飽和度の確認を含む)ならびに施工方法など、工学的事実性の明示等を行う、設計、施工および評価・解析といった一連の技術に関する基礎情報を整備する	④浸潤時・減熱時のデータを含む、ガラス固化体設置以降の加熱時の熱・注水時から浸潤時・減熱時を模擬したデータに基づく熱-水-応力-化学連成現象のモデルの高度化および浸潤時の実際の飽和度などの確認(解体試験による)	④-1 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(浸潤時・減熱時)を取得、連成モデルの適用性確認	R7は実施しない	前半					後半				
					前半					後半				
					前半					後半				
					前半					後半				
国際プロジェクト(DECORVALEX等)における解析コード間の比較検証、改良・高度化			国際プロジェクト(DECORVALEX等)における解析コード間の比較検証、改良・高度化	R7は実施しない	前半					後半				
					前半					後半				
					前半					後半				
					前半					後半				
④-2 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する			④-2 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する	R7は実施しない	前半					後半				
					前半					後半				
					前半					後半				
					前半					後半				

※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。

1.2 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	R7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断層等の構造性の割れ目が分布することから、岩盤割れ目と岩盤基質部（＝健全部）における物理的・化学的・生物学的な物質移行特性（物質移動速度や岩盤の割れ目・隙間の開口率・分岐率など）の移行経路や形態と関係が考えられる ・ 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関係が考えられる ・ 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 ・ そのために、幌延の泥岩を事例として、岩盤基質部（＝健全部）および割れ目の双方を対象とした原位置トレーサ試験等を実施し、それぞれの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の割れ目を対象としたトレーサ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 岩盤基質部（＝健全部）を对象とした物質移行特性（物質移動速度や岩盤の割れ目・隙間の開口率・分岐率など）の評価手法の検証 ② 割れ目を対象とした物質移行特性（物質移動速度や岩盤の割れ目・隙間の開口率・分岐率など）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（物質移動速度や岩盤の割れ目・隙間の開口率・分岐率など）の評価手法の検証	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の構築 ⑥ 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（物質移動速度や岩盤の割れ目・隙間の開口率・分岐率など）の評価手法の検証	④ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑤ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑥ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得	④ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑤ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑥ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得	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 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	後半 令和6年度までに得られる成果 ○原位置試験データ（非吸着性/吸着性トレーサー）の取得 ○FDZにおけるモデル化/解析評価手法の提示
	① 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ② 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ③ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得	④ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑤ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑥ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得	④ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑤ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑥ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得	④ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑤ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑥ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得	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 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（非吸着性/吸着性トレーサー）の取得 ○FDZにおけるモデル化/解析評価手法の提示
	① 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ② 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ③ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得	④ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑤ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑥ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得	④ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑤ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑥ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得	④ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑤ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑥ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得	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 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（非吸着性/吸着性トレーサー）の取得 ○FDZにおけるモデル化/解析評価手法の提示
	① 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ② 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ③ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得	④ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑤ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑥ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得	④ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑤ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑥ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得	④ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑤ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得 ⑥ 掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得	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 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（非吸着性/吸着性トレーサー）の取得 ○FDZにおけるモデル化/解析評価手法の提示

※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 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

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

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	R7の実施内容	前半					後半	研究期間						
① 処分場の操業（廃棄体の搬送定置・回収、処分場の閉鎖を含む）に関わる人工バリアの搬送・回収、処分場の閉鎖を含む工学技術の体系化の実証を目的として、順延の地下施設を事例に、原位置試験を実施し、人工バリアの搬送定置・回収技術および閉鎖技術を実証する			① 処分場の操業（廃棄体の搬送定置・回収、処分場の閉鎖を含む）に関わる人工バリアの搬送・回収、処分場の閉鎖を含む工学技術の体系化の実証を目的として、順延の地下施設を事例に、原位置試験を実施し、人工バリアの搬送定置・回収技術および閉鎖技術を実証する	④ 廃棄体の設置方法等の実証試験	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	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	研究期間		
							前半											後半	
							前半											後半	
							前半											後半	
							前半											後半	
② 個別の要素技術の実証試験			④ 廃棄体の設置方法等の実証試験	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
③ 埋め戻し材、プラグに関する設計手法、製作・施工および品質管理手法の確立			④ 廃棄体の設置方法等の実証試験	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
④ 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			④ 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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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	④-1 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	前半										後半	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	研究期間
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
							前半										後半		
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			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	人工バリアの品質を踏まえ、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための以下を実施	④-1 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														

※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。

2.2 高温度(100℃超)等の境界的条件下での人工バリア性能確認試験

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	R7の実施内容	研究期間										
								前半	後半									
・人工バリア設置環境の強度依存性を考慮し、種々の処分概念オプシンの工学的実現性を検証し、多様な地質環境条件に対し柔軟な処分場設計を行うことを支援する技術オプシンの提供 ・実際の処分事業では、オーバーバックが100℃以下になってから処分することが基本であるが、想定外の要因によって100℃を超えた状態になることを想定して、人工バリアシステムの安全裕度を検証する				① 100℃超の高温での境界環境が人工バリアに与える影響と上質環境条件に對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ンの提供	① 高温度(100℃以上)などの境界条件下での人工バリア性能確認試験の実施	人工バリアシステムの安全裕度の検証に向け、緩衝材が100℃超になった状態を想定した解析手法を開発するため以下を実施 ①-1 高温度(100℃以上)などの境界的条件下での人工バリア性能確認試験	R7は実施しない	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	
								海外での先行研究事例に基づき、高温条件下での人工バリア性能確認試験の解析・検体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施										
								海外での先行研究事例に基づき、高温条件下での人工バリア性能確認試験の解析・検体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施										
								①-1 境界的条件下での人工バリア性能確認試験の解析・検体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施										
								①-2 100℃超になった際にニアフィールドにおいて発生する現象の整理										
								①-2 100℃超になった際にニアフィールドにおいて発生する現象の整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										
								①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示する現象を整理										

※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。

3.1.1 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	R7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模式に大きく依存する。脆性的な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、断層の変形模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）が可能なら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 地殻変動が断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）を実証するため、以下の検討や試験を実施する	R7は実施しない	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
			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						
			②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握							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 ○ポ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	②-1 地殻変動が断層の透水性に与える影響の把握（ポーリング孔を用いた水圧擾乱試験）	R7は実施しない	より大型の水圧擾乱試験やシミュレーションの結果に基づきモデルを改善し、断層内の水みちのつながりや地殻変動の力学的影響を定量的に評価する		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		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					
				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	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	R7は実施しない	割れ目の水圧擾乱試験やシミュレーションの結果に基づきモデルを改善し、断層内の水みちのつながりや地殻変動の力学的影響を定量的に評価する		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					
							より大型の断層を対象とし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		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		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					

※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

[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 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	R7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 地盤の安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）のひび割れの自己治癒能力の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）のひび割れへの自己治癒能力の検証	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 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	R7は実施しない	前半の5年程度で実施 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	後半 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
	② 人工バリアの自己治癒能力（ひび割れの修復）を実証		試料観察に水圧露点試 EDZ の透水性に基づき、EDZ 検査やシミュレーションモデルの整合性の確認 口状況を定量的に把握 を改良	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 令和4年度までに得られる成果 ODI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 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	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 令和4年度までに得られる成果 ODI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。						

