JAEA-Review
2021-009
DOI:10.11484/jaea-review-2021-009

JAEA-Review

幌延深地層研究計画　令和３年度調査研究計画

Horonobe Underground Research Laboratory Project
Investigation Program for the 2021 Fiscal Year

（編）中山 雅

(Ed.) Masashi NAKAYAMA

核燃料・バックエンド研究開発部門
幌延深地層研究センター
深地層研究部

Horonobe Underground Research Department
Horonobe Underground Research Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

July 2021

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　研究連携成果展開部　研究成果管理課
〒 319-1195　茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, 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 (include data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Intellectual Resources Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2021

JAEA-Review 2021-009

幌延深地層研究計画　令和 3 年度調査研究計画

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

（編）中山　雅

（2021 年 5 月 6 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ものである。

令和 3 年度は、「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、引き続き調査研究を行う。

令和 3 年度に実施する主な調査研究は以下の通りである。「実際の地質環境における人工バリアの適用性確認」については、人工バリア性能確認試験において発熱の影響を無くした条件での試験に移行するとともに、人工バリアの試験体を取り出すための試験施工の解体調査を実施する。「処分概念オプションの実証」については、搬送定置・回収技術の実証として、地下環境におけるコンクリートの劣化に関する試験、分析を継続する。閉鎖技術の実証として、坑道及び周辺岩盤の長期変遷が安全評価に有意な影響を及ぼす条件の詳細化を図るとともに、プラグの施工性や性能確認のための工学規模試験や埋め戻し材と緩衝材との相互作用を検討するための室内試験等を継続する。「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」については、水圧擾乱試験の結果の解析を行うとともに、稚内層中の断層/割れ目の水理的不連結性に関する検討を継続する。地下水の流れが非常に遅い領域（以下、化石海水領域）を調査・評価する技術の高度化として、化石海水領域の三次元分布を確認するためのボーリング調査を実施する。

幌延深地層研究センター：〒098-3224　北海道天塩郡幌延町字北進 432 番地 2

JAEA-Review 2021-009

Horonobe Underground Research Laboratory Project Investigation Program for the 2021 Fiscal Year

(Ed.) Masashi NAKAYAMA

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

(Received May 6, 2021)

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

In fiscal year 2021, JAEA continue to conduct research on "Demonstration of engineered barrier system (EBS) in geological environment", "Demonstration of disposal concept", and "Validation of buffer capacity of the sedimentary rock to tectonism", which are the important issues shown in the Horonobe underground research plan from fiscal year 2020.

The main studies to be conducted in fiscal year 2021 are as follows. As "Demonstration of EBS in geological environment", we will shift to the test under the condition that the influence of heating is eliminated in the full scale EBS experiment, and dismantle the mock-up plug, backfilling material and engineered barrier in the full scale dismantling test. As "Demonstration of disposal concept", we will continue experiment and analysis of concrete deterioration in the underground environment as a demonstration of remote technique for emplacement and retrievable. As a demonstration of the closure techniques, it details the conditions under which long-term transitions in the tunnel and surrounding bedrock have a significant impact on safety assessments. And we will continue engineering scale experiment to confirm the workability and performance of plugs and laboratory tests to examine the interaction between backfilling materials and buffer materials. As "Validation of buffer capacity of the sedimentary rock to tectonism", we will analyze the results of the hydraulic disturbance test and continue to study the hydraulic disconnection of faults/fissures in the Wakkanai Formation. As an advancement of technology for investigating and evaluating areas where the flow of groundwater is extremely slow, a boring exploration will be conducted to confirm the three-dimensional distribution of the fossil seawater area.

Keywords: Horonobe URL Project, High-level Radioactive Waste, Geological Disposal Technology

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基づく研究課題 3
2.1　研究課題 3
2.2　令和 2 年度の成果の概要 6
3.　令和 3 年度の主な業務内容 8
4.　実際の地質環境における人工バリアの適用性確認 13
4.1　人工バリア性能確認試験 13
4.2　物質移行試験 16
5.　処分概念オプションの実証 19
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 19
5.2　高温度（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験 24
6.　地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証 26
6.1　水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化 26
6.2　地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験 31
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 33
8.　地下施設の管理 35
9.　環境調査 36
9.1　排水量および水質調査 36
9.2　研究所用地周辺の環境影響調査 36
10.　安全確保の取り組み 37
11.　開かれた研究 38
11.1　国内機関との研究協力 38
11.2　国外機関との研究協力 40
12.　用語集 41
参考文献 44
付録 参考資料 45

Contents

1. Introduction 1
2. Research subject based on the Horonobe Underground Research Project after 2020 fiscal year 3
2.1 Research subject 3
2.2 Summary of results in the 2020 fiscal year 6
3. Outline of the investigation program for the 2021 fiscal year 8
4. Demonstrations of EBS in geological environment 13
4.1 Full scale engineered barrier system experiment (dismantling) 13
4.2 Mass transport experiment 16
5. Demonstration of disposal concept 19
5.1 Demonstration of remote technique for emplacement and retrievable 19
5.2 EBS behaviour over 100 ℃ 24
6. Validation of buffer capacity of the sedimentary rock to tectonism 26
6.1 Hydro-mechanical buffering against long-term geological events such as fault reactivation / up-lift 26
6.2 Self sealing behaviour of EDZ arround EBS after backfilling 31
7. Acquisition of data necessary for addressing the important issues after 2020 33
8. Management of the underground facilities 35
9. Environmental study 36
9.1 Monitoring of drainage water and water property 36
9.2 Environmental impact study around the Horonobe Underground Research Center 36
10. Safety efforts 37
11. Collaboration with other research organizations 38
11.1 Collaboration with domestic research organizations 38
11.2 Collaboration with overseas research organizations 40
12. Glossary 41
References 44
Appendix 45

1. はじめに

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

平成 26 年 4 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の問題の解決に向け、国が前面に立って取り組む必要がある」との考え方が示され、そのために「地層処分の技術的信頼性について最新の科学的知見を定期的かつ継続的に評価・反映する」ことが示されました。これを踏まえて、文部科学省、経済産業省および原子力規制委員会により「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が達成すべき業務運営に関する目標（中長期目標）*2」（以下、第 3 期中長期目標*3）が定められ、この第 3 期中長期目標を達成するために、「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の中長期目標を達成するための計画（中長期計画）（平成 27 年 4 月 1 日～令和 4 年 3 月 31 日）」を策定しました。

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

なお、令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画では、これまでと同様に、放射性廃棄物を持ちこ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

※ このマークがついた用語は、用語集に説明を掲載しています。

*1：独立行政法人通則法の改正（平成 27 年 4 月 1 日施行）により新たに設定された分類の一つで、研究開発に係る業務を主要な業務として、中長期的（5～7 年）な目標・計画に基づき行うことにより、わが国の科学技術の水準の向上を通じた国民経済の発展その他の公益に資するため研究開発の最大限の成果を確保することを目的とする法人に対する名称です。原子力機構は、平成 27 年 4 月 1 日に「独立行政法人日本原子力研究開発機構」から「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構」に名称変更しています。

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

*3：第 3 期中長期目標の期間は、平成 27 年 4 月 1 日～令和 4 年 3 月 31 日の 7 年間です。

*4：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おります（https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/press/31/press_1206.html）。

めるにあたっては、当初の計画の研究対象の範囲内において、国内外の関係機関の資金や人材を活用することを検討します。

2. 令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画に基づく研究課題

2.1 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 参考資料）。

(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、微生物や有機物が、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、ブロック方式等）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、ブロック方式等）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（プラグの有無等）・回収方法※による埋め戻し材の品質の違いを実証試験で明らかにします。さらに、人工バリアの品質を踏まえて、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための実証試験を行います。また、人工バリアシステムの安全裕度の検証に向けて、緩衝材が 100℃超になった状態を想定した解析手法を開発します。

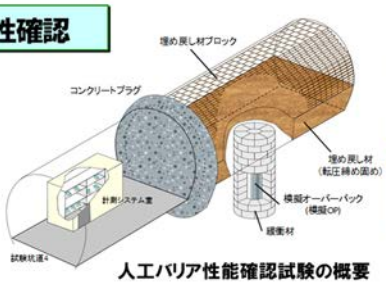
(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

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

①実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

- 人工バリア性能確認試験
- 物質移行試験

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



人工バリア性能確認試験の概要

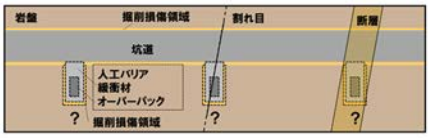
人工バリア性能確認試験の解体調査のイメージ

②処分概念オプションの実証

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

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

閉鎖技術オプションの整理



廃棄体定置決定や間隔設定の考え方の整理

③地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

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

[概要] 地震・断層活動等の地殻変動に対する堆積岩の力学的・水理学的な緩衝能力を定量的に検証するとともに、化石海水の三次元分布に係る調査・評価手法の高度化し、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。

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

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

※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。

■ 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。

2.2　令和 2 年度の成果の概要

(1)　実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

人工バリア性能確認試験において、廃棄体の減熱過程を模擬した試験を開始したことにより、緩衝材中の温度や間隙圧（隙間の空気と水の圧力の和）が低下し、緩衝材内側への地下水浸潤が進んだことを設置センサーにより確認しました。

国際共同研究DECOVALEX※では、室内試験結果を対象に、共同解析を行うための解析モデルや解析条件を設定するとともに、各国間の解析コードの違いを確認しました。また、空気の移動等を考慮した熱－水理－力学連成現象に関する室内試験については、事前解析結果を基に浸潤挙動や膨潤挙動に及ぼす空気の影響を確認し、試験条件の設定を行いました。

人工バリアの試験体を取り出すための試験施工では、埋め戻し材の設置、プラグの施工、試験孔の掘削を行うとともに、模擬オーバーパックおよび緩衝材の設置を開始しました。

物質移行試験では、掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験を行い、掘削損傷領域の水理・物質移行特性を評価するためのデータが取得できました。また、微生物・有機物・コロイド※を対象としたトレーサー試験に先立ち、既存孔を利用した予察的な原位置試験の計画立案を行うとともに、地表水および地下水中の溶存有機炭素濃度、有機物の分子サイズ分布データ等を取得しました。さらに、ブロックスケール（数m～100m規模）を対象としたトレーサー試験の準備作業を完了しました。

(2)　処分概念オプションの実証

搬送定置・回収技術の実証として、人工バリア性能確認試験等のデータを利用して、竪置き・ブロック式における回収作業において考慮すべき条件の整理を行いました。また、回収可能性が維持される期間における吹付けコンクリートの経年劣化の把握を目的にコンクリート試験体の暴露試験※の準備を行うとともに、坑道開放条件下において岩盤内部で生じうる事象の整理等を行いました。

閉鎖技術の実証として、埋め戻し材の長期的な性能に関わる現象について、埋め戻し材の変質挙動に関する解析やベントナイト※の流出挙動に関する室内試験計画の立案等を行うとともに、埋め戻し材の設計に必要となる膨潤変形挙動に関するデータを取得し整理しました。また、閉鎖後に水みちとなることが想定される掘削損傷領域を遮断するための施工技術の構築や高度化に向けて、ベントナイトの吹付け施工試験を行い、材料の種類や配合の違いによる吹付けベントナイトの品質の違いを把握するとともに、掘削損傷領域の物性値を高精度に探査する試験装置の開発と掘削損傷領域の連続性を評価する上で必要となる物性値を取得しました。さらに、ボーリング孔を閉塞する際の材料や閉塞方法に関する技術的な課題等を整理しました。

人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築として、緩衝材の流出挙動に係る試験を継続し、自然湧水が0.4 L/minの環境では緩衝材が膨潤し、隙間が埋まるに従って排水される水の量は減少し、緩衝材が流出しなくなることを確認しました。

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として、緩衝材の最高温度が100℃を超えた状態で発生しうる現象の検討に着手し、海外で実施されている緩衝材の最高温度が100℃を超えた状態を模擬する原位置試験（スイスのHotBENT※プロジェクト）について、試験条件、試験手法、計測機器の選定・配置等に関する情報を入手しました。

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握として、過年度に実施した水圧擾乱試験※のデータの解析や、稚内層における割れ目の水理的連結性に関する既存の知見やデータの見直しを実施し、稚内層の水理特性分布に関わる統一的な説明が可能となりました。さらに、幅数十cmのより大型の断層を対象とした水圧擾乱試験を実施しました。

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、物理探査および地質構造との関係性の検討を実施するとともに、既存の水理解析結果に基づく深度、地質・地質構造分布、気候などの条件の違いが地下水移行時間に与える影響の整理を行いました。

地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動を検討するための基礎的な知見として、まずは岩盤を対象として、原位置で樹脂を注入後に採取した掘削損傷領域の割れ目試料の詳細な観察を行い、せん断変位量（割れ目に沿ったずれ幅）と割れ目の開口幅との相関が小さいことを確認しました。

国内外の資金や人材を活用することについては、令和2年度から人工バリア性能確認試験をタスクの一つとする国際共同研究DECOVALEXに参画するとともに、環太平洋地域における国々で地下研究施設を活用した国際協力*5の憲章を締結し、国際研究拠点化を推進しました。

以上のように、令和2年度は計画していた調査研究を進めて、ほぼ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2年度の成果報告書にとりまとめます。

*5 環太平洋地域における地下研究所（URL）を活用した国際協力に関する枠組みで、以下の研究機関が参加しています。日本原子力研究開発機構（JAEA）、韓国原子力研究所（KAERI）、米国サンディア国立研究所（SNL）、オーストラリア連邦科学産業研究機構（CSIRO）、台湾工業技術研究院（ITRI）。

3. 令和 3 年度の主な業務内容

令和 3 年度においては、「実際の地質環境における人工バリアの適用性確認」として、人工バリア性能確認試験において発熱の影響を無くした条件での試験に移行し、データを分析・評価するとともに、人工バリアの試験体を取り出すための試験施工の解体調査を行います。また、物質移行試験について、掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価や、微生物・有機物・コロイドが物質移行特性に与える影響の現象理解を進めるとともに、稚内層深部のブロックスケールを対象としたトレーサー試験を実施します。

「処分概念オプションの実証」については、搬送定置・回収技術の実証として、地下環境におけるコンクリートの劣化に関する試験、分析を継続します。閉鎖技術の実証として、数値解析を通じた連成解析や水理・物質移行解析を通じ、坑道および周辺岩盤の長期変遷が安全評価に有意な影響を及ぼす条件の詳細化を図るとともに、プラグの施工性や性能確認のための工学規模試験や埋め戻し材と緩衝材との相互作用を検討するための室内試験等を継続します。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係る品質保証体系の構築として、緩衝材ブロックと岩盤の間に隙間がある場合の緩衝材流出挙動を確認し、緩衝材流出の観点から、施工方法の適用性を評価するための試験を行います。高温度（100℃超）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験として、限界的条件下での現象の解析手法の高度化計画の策定やシナリオの整理を行います。また、それに資する海外での原位置試験に関する情報等を引き続き入手します。

「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」については、地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握として、令和 2 年度に実施した水圧擾乱試験の結果の解析を行うとともに、稚内層中の断層/割れ目の水理的不連結性に関する検討を継続します。地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）を調査・評価する技術の高度化として、化石海水領域の三次元分布を確認するためのボーリング調査を実施するとともに、化石海水領域を効率的に把握するための方法論の検討を継続します。また、緩衝材や坑道埋め戻し材の膨潤圧が掘削損傷領域の亀裂の透水性（あるいは開口幅）に与える影響について、令和 2 年度に実施した観察結果や既往の掘削損傷領域の透水試験結果などを用いて坑道埋め戻し後の掘削損傷領域の透水性を推定するモデルの構築を進めるとともに、掘削損傷領域の透水性を予測する既存モデルの再検証を行います。

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

地下施設の管理においては、試験坑道1における工事を行うとともに、施設内の機械設備や電気設備などの維持管理（設備運転や保守点検など）を継続実施します。地下施設からの排水および掘削土（ズリ）置場の浸出水は、排水処理設備において適切に処理した上で天塩川に放流します。

環境調査においては、研究所用地周辺における水質・魚類に関する調査、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、天塩川の水質調査を継続します。

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

なお、幌延深地層研究計画で実施する地下深部の地質環境を対象とした研究は、地球科学の幅広い分野にわたり、学術研究の発展にも寄与することから、国内外の関連する研究機関の専門家の参加を得ながら進めていきます。また、国内外の資金や人材を活用することについて、DECOVALEX や環太平洋地域における地下研究施設を活用した国際協力を継続するとともに、

国内外の研究機関や実施主体に働きかけを行い、国際連携を進め、幌延深地層研究センターの地下施設を活用して効率的に研究を進めていきます。

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

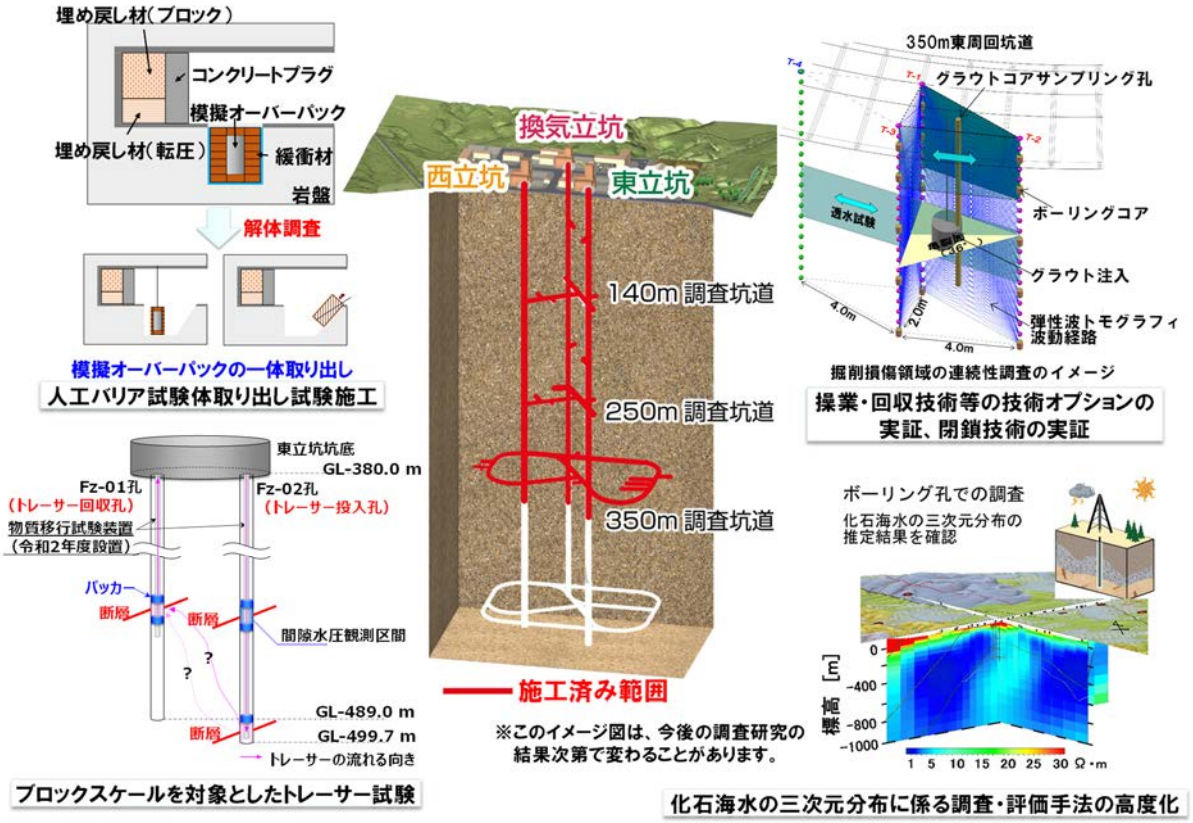


図 2　令和 3 年度の主な調査研究

表 2　令和 3 年度の主な業務の実施内容

実施項目			実施内容	実施場所
令和2年度以降の必須の課題	実際の地質環境における人工バリアの適用性確認	人工バリア性能確認試験	人工バリア性能確認試験において発熱の影響をなくした条件での試験に移行、国際共同研究による連成挙動の共同解析、評価モデルの検証、気相を考慮した熱ー水理ー力学連成挙動に関する室内試験の開始、人工バリアの試験体を取り出すための試験施工の解体調査	研究所用地、地下施設など
		物質移行試験	掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価、微生物・有機物・コロイドが物質移行特性に与える影響の現象理解および予備的な原位置試験の検討、稚内層深部のブロックスケールを対象としたトレーサー試験	研究所用地、地下施設など
	処分概念オプションの実証	人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験	地下環境におけるコンクリートの劣化に関する試験、分析を継続、閉鎖システム（埋め戻し材やプラグなど）に関する基盤情報の整備を目的とした解析検討、閉鎖技術を実証するための工学規模試験および室内試験等の継続、緩衝材流出の抑制に関する試験	研究所用地、地下施設など
		高温度（100℃以上）などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験	限界的条件下での現象の解析手法の高度化計画の策定やシナリオの整理、海外での原位置試験に関する情報等の継続入手	研究所用地、地下施設など
	地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証	水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化	水圧擾乱試験の結果の解析、稚内層中の断層/割れ目の水理的不連結性に関する検討の継続、既存の室内試験結果や水圧擾乱試験結果を用いた既存モデルの再検証 化石海水領域の三次元分布を把握するためのボーリング調査、海上物理探査、化石海水領域を効率的に把握するための方法論の検討、地下水移行時間評価や塩濃度三次元分布評価の解析方法の改良	研究所用地および周辺、地下施設、HDB-1～11孔、浜里地区など
		地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験	坑道埋め戻し後の掘削損傷領域の透水性を推定するモデルの構築 掘削損傷領域の透水性を予測する既存モデルの再検証	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、浜里地区など
地下施設の管理			施設内の機械設備や電気設備などの維持管理、排水処理設備の運転	研究所用地、地下施設など
環境調査			地下施設からの排水などの水質調査、水質・魚類に関する調査	研究所用地、天塩川、清水川など

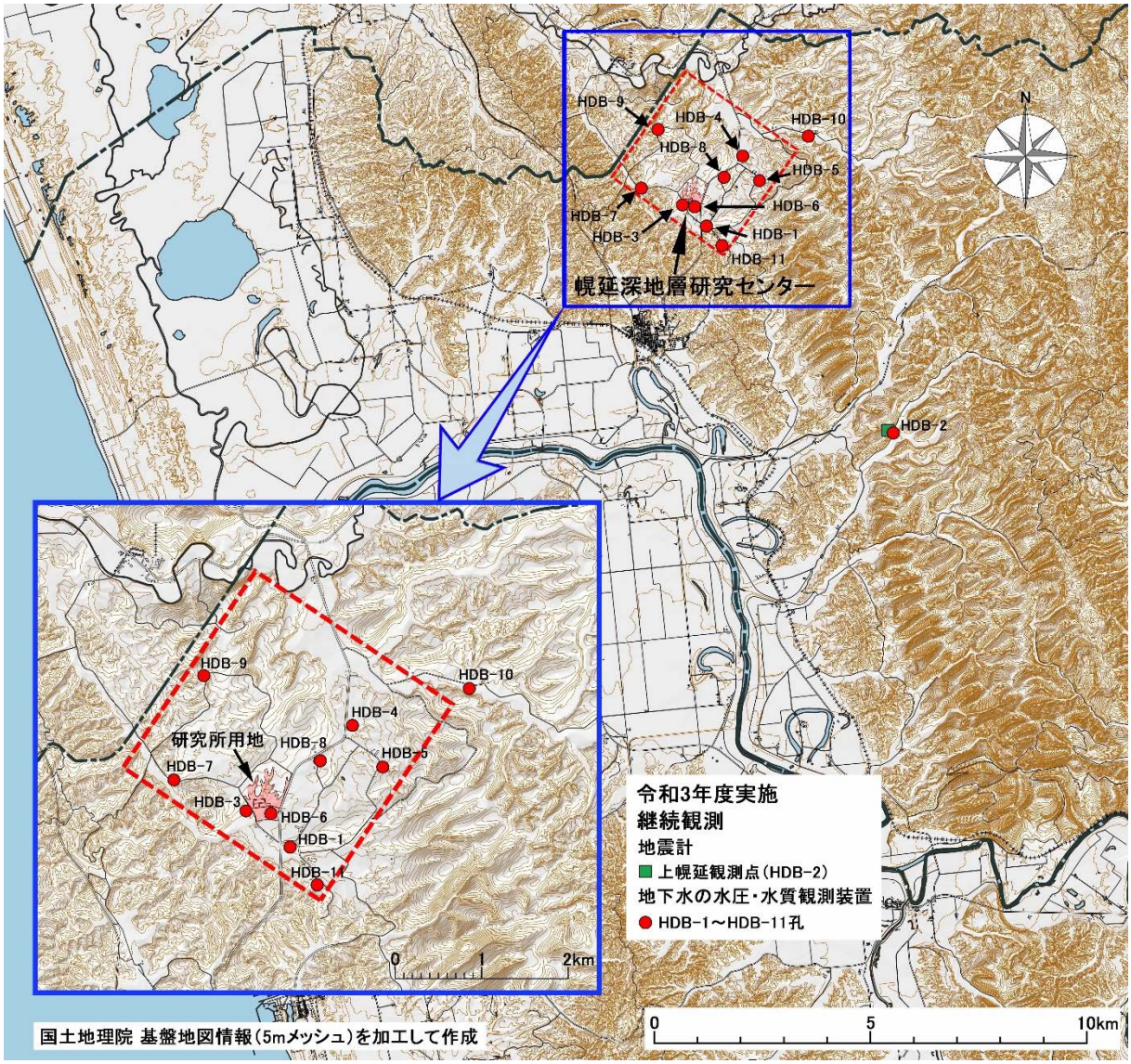


図 3　ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所

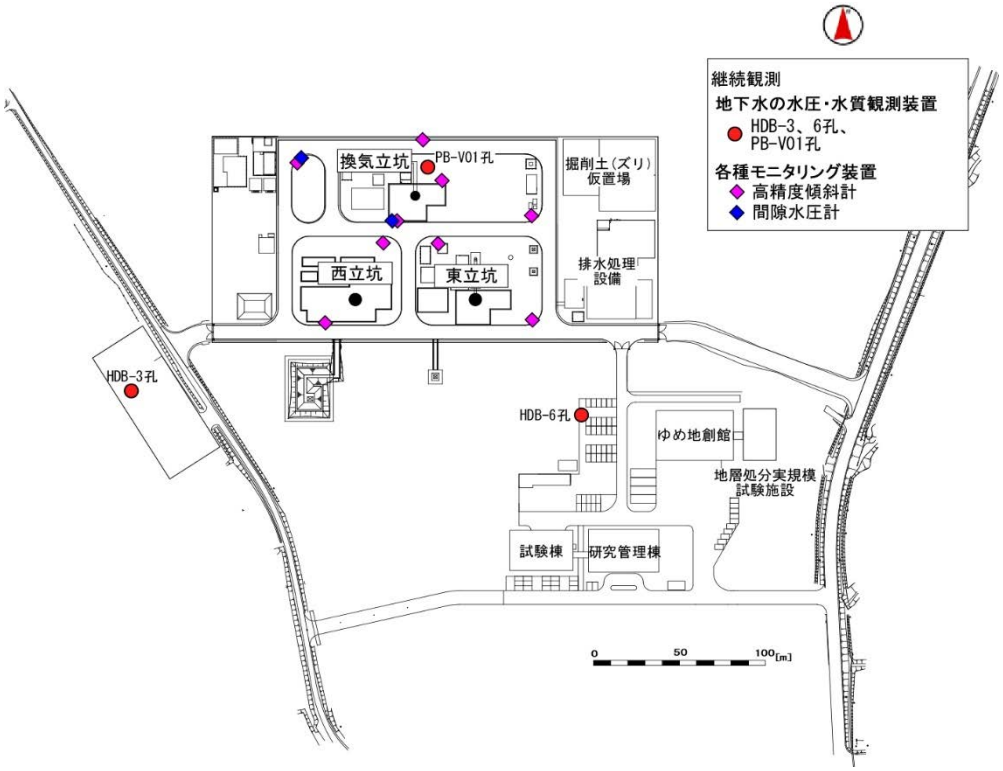


図 4　研究所用地における主な施設と観測装置の配置

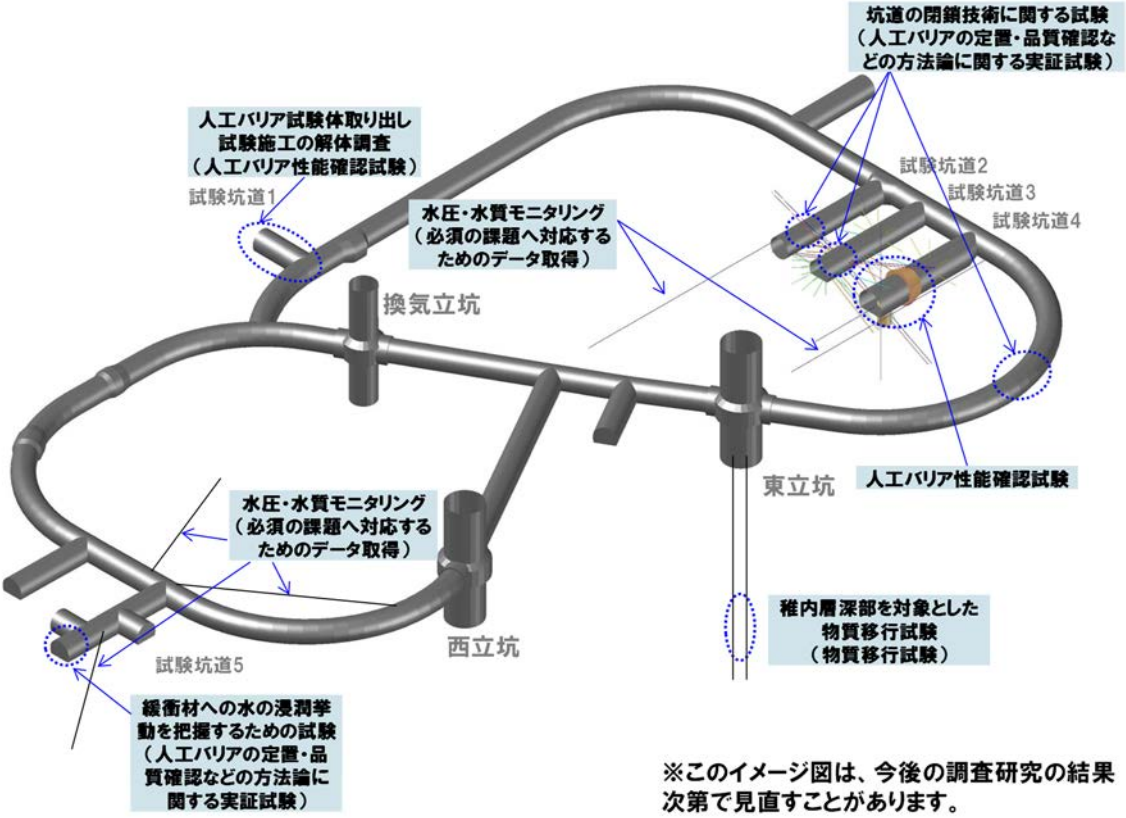


図 5　350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

4. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

4.1 人工バリア性能確認試験

令和 2 年度以降は、ガラス固化体設置直後の廃棄体の発熱過程に加えて、減熱過程を模擬した原位置試験データや解体調査により得られるより詳細なデータに基づく熱－水理－力学－化学連成現象※の評価モデルの高度化が課題となります。そのため、人工バリア性能確認試験で設置しているヒーターの温度を下げた試験（減熱過程を模擬した原位置試験）を行い、熱－水理－力学－化学連成現象に係るデータを取得します。また、減熱試験終了後は解体調査により、人工バリア、埋め戻し材、コンクリート、周辺岩盤やそれらの境界面のサンプリングや分析を行います。人工バリア性能確認試験の解体調査については、適用する施工方法の検証を行うために事前に試験施工を行います。設置したセンサーや解体調査により得られるデータを基に、熱－水理－力学－化学連成解析を行い、評価モデルの高度化や適用性の確認を行います。このような人工バリア周辺で起こる現象の理解は、地層処分後の数万年以上の間の安全評価における初期状態の把握やオーバーパック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 2 年度は、人工バリア性能確認試験（図 6）のヒーターの設定温度を約 90℃から 50℃に変更し、廃棄体の減熱過程を模擬した試験を開始しました。ヒーターの表面温度を低くしたことにより、緩衝材中の温度や間隙圧が低下し、緩衝材内側への地下水浸潤が進んだことを設置センサーにより確認しました（図 7、図 8）。加えて、国際共同研究 DECOVALEX では、室内試験結果を対象に、共同解析を行うための解析モデルや解析条件を設定するとともに、各国間の解析コードの違いを確認しました。また、空気の移動等を考慮した熱－水理－力学連成挙動に関する室内試験については、事前の解析結果を基に浸潤挙動や膨潤挙動に及ぼす空気の影響を確認し、粘土材料の乾燥密度、設定温度、センサー（温度、水分量、応力、間隙圧）の設置位置、試験期間などの試験条件の設定を行いました。

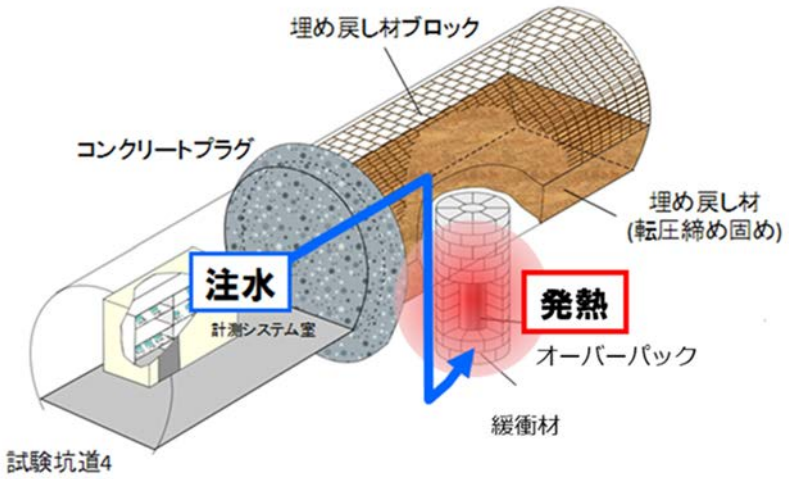


図 6 人工バリア性能確認試験の概念図

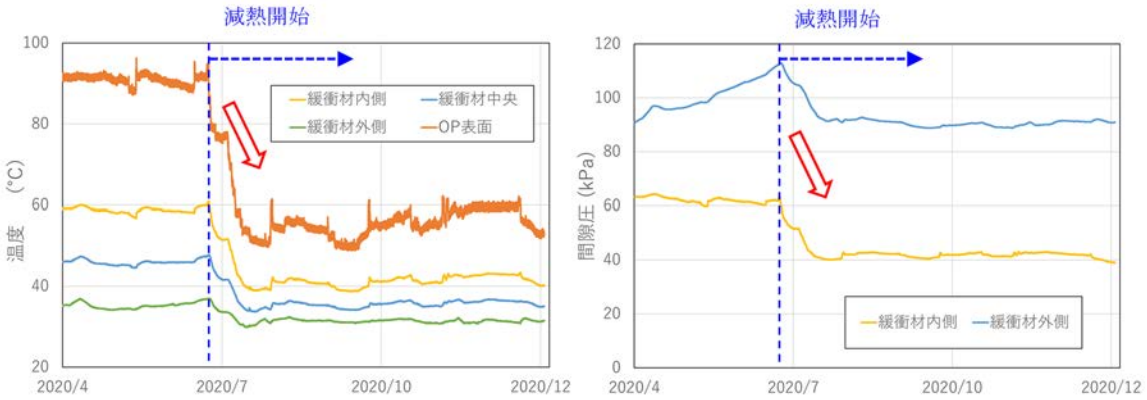


図 7　緩衝材 5 段目の計測データ（左：温度、右：間隙圧）

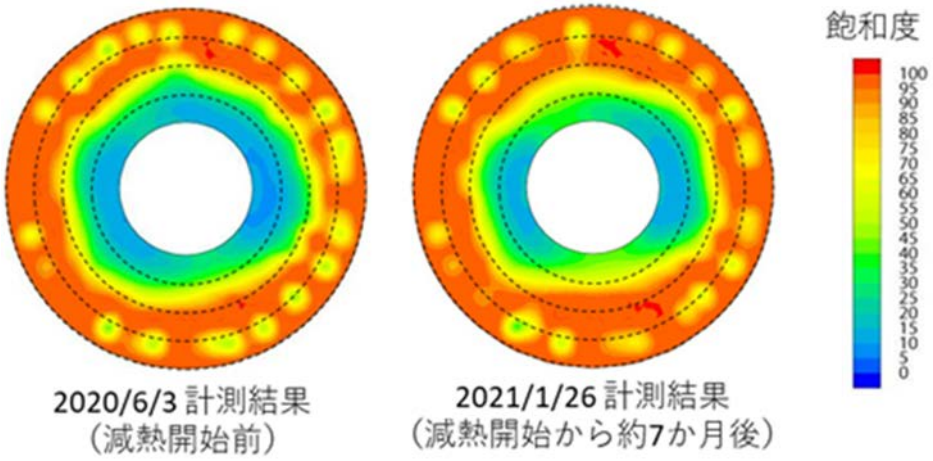


図 8　緩衝材 5 段目の計測データ（飽和度）

解体調査に先立って実施している試験施工（図 9）のうち、埋め戻し部については埋め戻し材の転圧、埋め戻し材ブロックの設置、プラグの施工を行い、人工注水を開始しました。試験孔部（人工バリアを設置する試験孔）については、試験孔の掘削を行い、人工バリア（緩衝材、模擬オーバーパック）の設置を開始しました（図 10）。

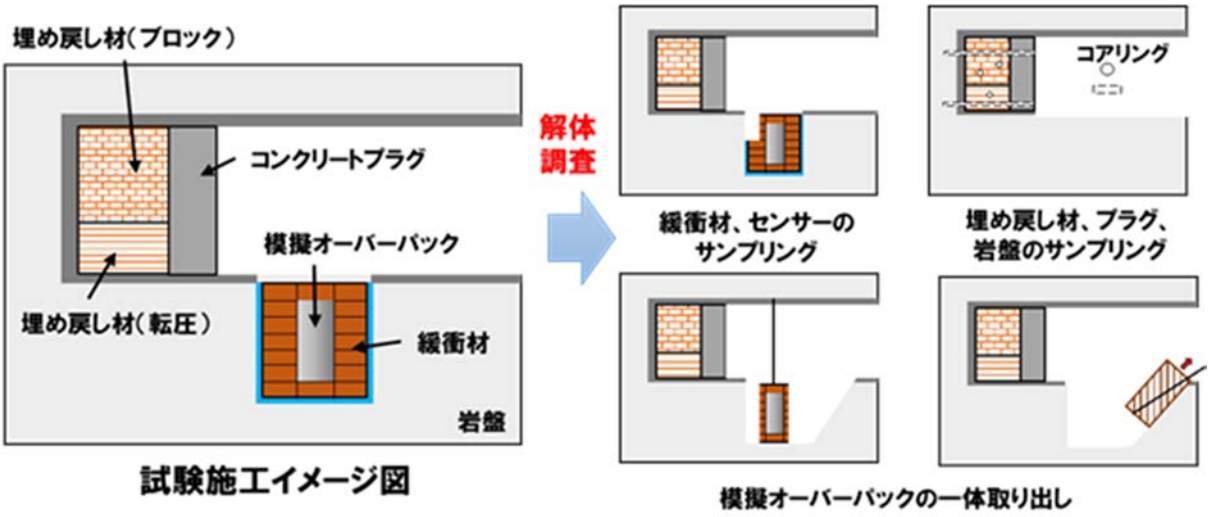


図 9　人工バリア解体試験施工の概念図

図 10　人工バリア解体試験施工の施工状況

令和 3 年度は、人工バリア性能確認試験のヒーターの電源を切り、発熱による影響を無くした条件での試験に移行します。連成解析については、国際共同研究 DECOVALEX において令和 2 年度に設定した解析条件を基に共同解析を行い、解析コード間の比較検証を行い、評価モデルの検証を行います。空気の移動等を考慮した熱－水理－力学連成挙動に関する室内試験については、令和 2 年度に設定した条件下での試験を開始します。

試験施工では、解体調査を実施し、緩衝材、模擬オーバーパック、埋め戻し材、コンクリート、岩盤、設置したセンサー等のサンプリング手法や各種材料の境界面を一体化した状態でサンプリングする手法の適用性の確認を行います。

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、微生物・有機物・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、微生物・有機物・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、微生物・有機物・コロイドの物質移行特性に与える影響を考慮した上で、割れ目を有する堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むブロックスケール（数 m～100m 規模）（図 11）における遅延性能評価手法の整備を行います。これらの成果は、処分事業で堆積岩を対象とする場合に、核種移行モデルを構築する際の基盤情報となるものです。

令和 2 年度は試験坑道 3 の既存孔（H4-1、H4-2、P 孔）において掘削損傷領域を対象としたトレーサー（非収着性）試験を行い、同領域の物質移行特性を評価するためのモデル化／解析手法を検討するためのデータ取得を行いました（図 12）。また、微生物・有機物・コロイドを対象としたトレーサー試験に先立ち、既存孔を利用した予察的な原位置試験計画の検討を行いました。また、地下水中の溶存有機物をその構造や化学特性に応じて複数の物質群に分けるとともに、各物質群の溶存有機炭素（DOC）濃度や分子サイズ分布等を取得しました。その結果、地下水中の溶存有機物は主に腐植物質※（DOC 濃度の約 60%）と親水性物質※（約 35%）からなり、親水性物質は腐植物質に比べて相対的に分子サイズが小さい有機物を多く含むことが示唆されました（図 13）。物質移行特性の評価にあたっては、元素と有機物との結合に関する評価のほか、このような有機物のサイズ分布が移行挙動に与える影響も考慮する必要があると考えられます。さらに、ブロックスケールにおける物質移行特性を評価するためのトレーサー試験の準備作業として、物質移行試験装置の設置を行いました。

令和 3 年度は、掘削損傷領域に分布する割れ目を介した物質の移行挙動のモデル化／解析手法を検討するために、令和 2 年度に実施したトレーサー試験箇所の周辺岩盤の水理・物質移行特性の評価を継続するとともに、必要に応じ、水理・物質移行に関する追加の情報取得を行います。また、微生物・有機物・コロイドが核種移行に及ぼす影響について室内試験等による現象理解を継続して進めるとともに、微生物・有機物・コロイドの影響を考慮した物質移行概念モデルを構築するための予備的な原位置試験に着手します。さらに、令和 2 年度に準備した、ブロックスケールにおける物質移行特性を評価するためのトレーサー試験を実施し（図 14）、稚内層深部において推定されている物質の移行経路の水理学的連結性について、物質移行の観点から検証を行う予定です。

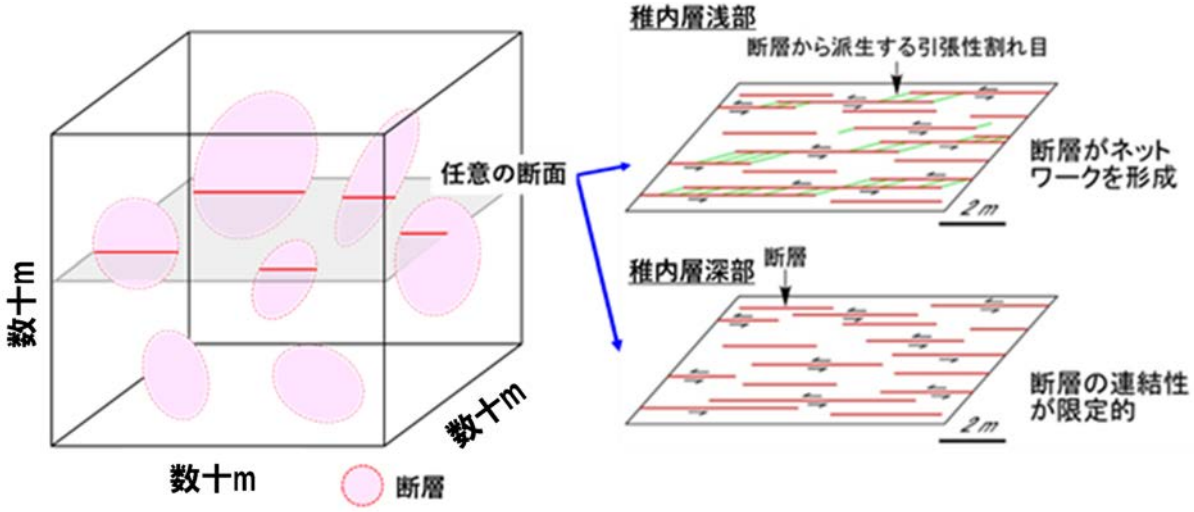


図 11　ブロックスケールにおける物質移行のイメージ

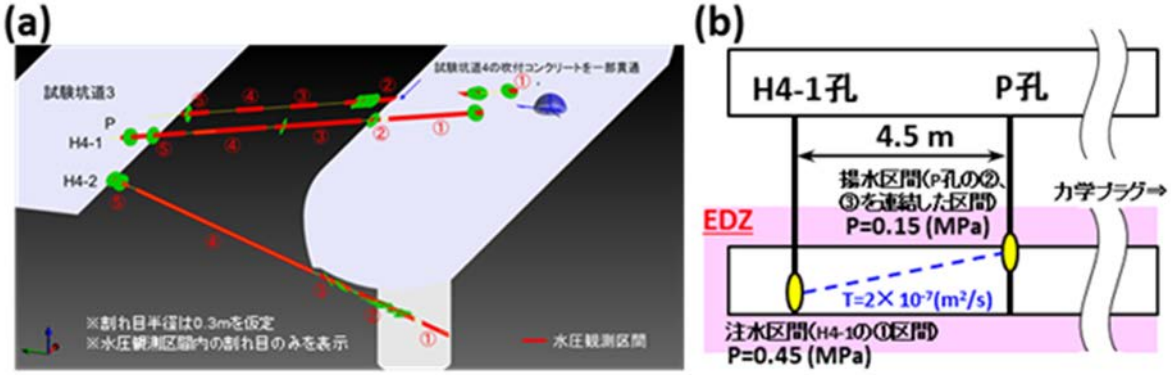


図 12　掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験箇所における割れ目の分布(a)と試験区間の水理特性(b)

(a)は試験対象とした試験孔のレイアウト、(b)試験区間と水理特性を示しています。(b)中のPは間隙水圧、試験区間の間の透水量係数を示します。

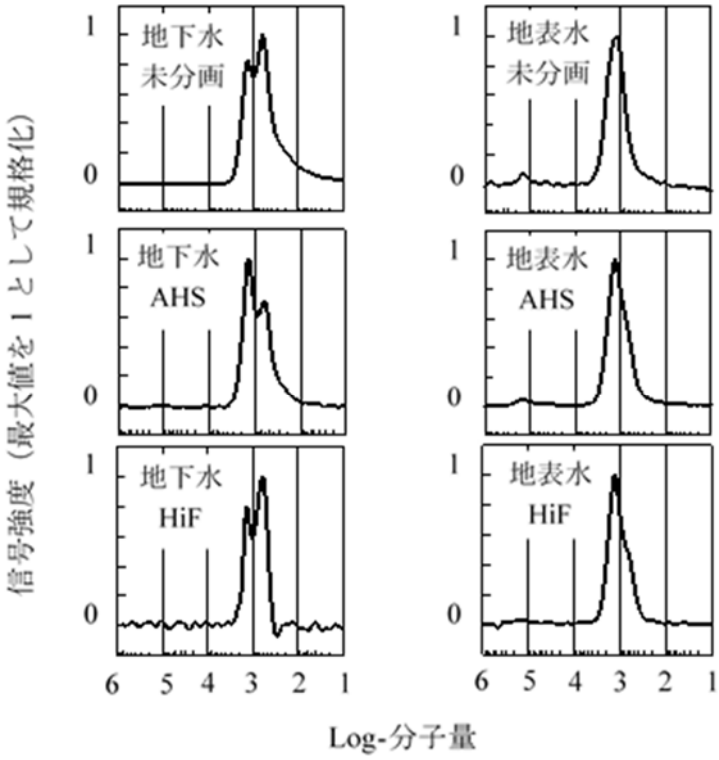


図 13　地下水（深度 140m）および地表水中の有機物のサイズ分布
AHS：腐植物質、HiF：親水性物質

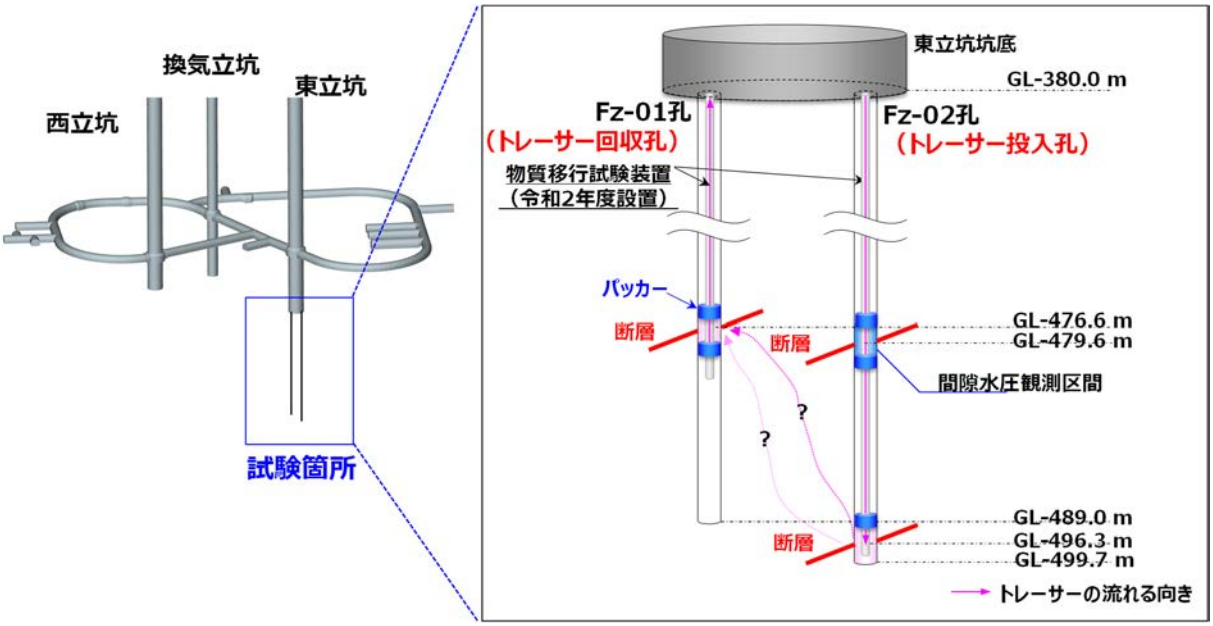


図 14　ブロックスケールを対象としたトレーサー試験箇所（左）および試験レイアウト（右）

5. 処分概念オプションの実証

5.1 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験

5.1.1 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証

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

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

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

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

①埋め戻し材やプラグ等の長期的な性能の考え方の提示

②埋め戻し材の設計評価に必要となる緩衝材膨出抑制機能の把握

③掘削損傷領域を遮断するための施工技術の実証

④掘削損傷領域調査技術の高度化

⑤坑道内から掘削されたボーリング孔の閉塞技術の実証

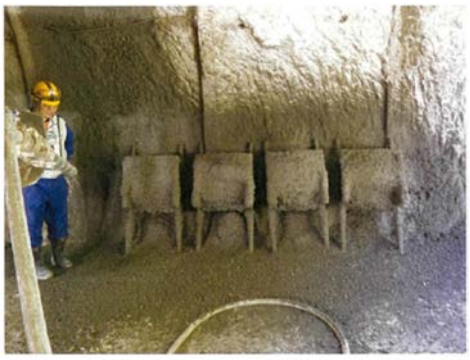
人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築については、人工バリア性能確認試験において、注入する地下水の圧力や量を増加させ、緩衝材に十分に水を浸潤させた状態で得られる情報等に基づき、埋め戻し材の施工方法（締固め、ブロック方式等）に応じた緩衝材の品質の違いを把握します。また、埋め戻し方法（プラグの有無等）・回収方法による埋め戻し材の品質の違いを把握します。

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

令和 2 年度は、搬送定置・回収技術の実証としては、4.1 節の人工バリア性能確認試験等のデータを利用して、竪置き・ブロック式における回収作業において考慮すべき条件の整理を行いました。加熱試験開始から約 6 年が経過した人工バリア性能確認試験では、緩衝材の外周部はほぼ飽和しているものの、模擬オーバーパック近傍の緩衝材内側では廃棄体の発熱を模擬したヒーターの加熱により、定置時から飽和度が低下していることが確認されています。実際の処分場においても廃棄体定置後の数十年間は、廃棄体の発熱の影響を受け続けることが想定されます。これにより、例えば廃棄体近傍では緩衝材の飽和度が低く、この結果緩衝材と廃棄体の密着性は小さくなるため、廃棄体を回収するうえで必要となる緩衝材と廃棄体との密着部の除去が比較的容易と

なる可能性があります。このように、回収作業においては解析等により緩衝材の状態を予測した上で、適した回収技術を選定することが必要であると考えられます。また、安全に回収作業を行うためには、処分坑道内の空間が保たれていることが必要となります。そこで、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の準備を行いました。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試験体を作成し（図 15）、地下坑道の吹付けコンクリートと同等の特性を有することを確認しました（図 16）。試験体は、坑道内における大気条件下および浸潤条件下に定置し、今後、約 4 年間にわたり暴露試験を継続します。また、幌延でみられる岩盤の変形挙動や脱ガス現象に着目し、坑道開放条件下において岩盤内部で生じうる事象を整理・モデル化し、シミュレーションを実施しました。

閉鎖技術の実証としては、①埋め戻し材やプラグ等の長期的な性能の考え方の提示については、埋め戻し材の変質に影響を及ぼすと考えられるコンクリート成分の溶出に起因する現象を考慮した連成解析を行うとともに、坑道内の水理・物質移行現象に及ぼす影響の程度とその条件について整理を行いました。その結果、設計要件を満たすように埋め戻し材が施工された場合、埋め戻し材の変質は長期的にほとんど進行しない可能性が示唆されました。また、埋め戻し材の性能を変化させる要因となり得るベントナイトの流出挙動を把握するための室内試験の計画を立案しました。②埋め戻し材の設計評価に必要となる緩衝材膨出抑制機能の把握については、緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた縮尺模型試験を実施しました。その結果から、緩衝材と埋め戻し材の力学的な相互作用を考慮した膨潤変形挙動の評価に必要な膨潤変形量と膨潤圧のデータを整理しました。③掘削損傷領域を遮断するための施工技術の実証については、350m 調査坑道の試験坑道 3 の底盤に構築した粘土系材料を用いた止水壁を対象とした透水試験を実施し、止水壁を含む領域の透水係数を評価しました。また、ベントナイトの吹付けによる施工方法について予備試験を実施しました（図 17）。その結果、吹付けに用いるベントナイト材料の種類や配合によって生じる品質の違いとして、吹付け後のベントナイトの乾燥密度に生じるばらつきを整理しました。④掘削損傷領域調査技術の高度化については、掘削損傷領域の物性値を高精度に探査する試験装置を開発し、幌延の堆積岩への適用性を確認しました。また、350m 調査坑道において、透水試験やトモグラフィ調査による、掘削損傷領域の連続性を評価する上で必要となる初期値を取得しました。さらに、250m 調査坑道、350m 調査坑道の試験坑道 2 および試験坑道 4 の周辺に分布する掘削損傷領域を対象にトモグラフィ調査を実施し、坑道の周辺岩盤の物性値の経時変化について評価しました。⑤坑道内から掘削されたボーリング孔の閉塞技術の実証については、令和 3 年度以降に計画している原位置試験の計画検討を行いました。ボーリング孔を閉塞する際の材料の種類や配合を決定するための考え方や、閉塞方法に関する技術的な課題を抽出・整理しました。



吹付けコンクリート施工状況

コアサンプリング

図 15　吹付けコンクリート試験体作成状況

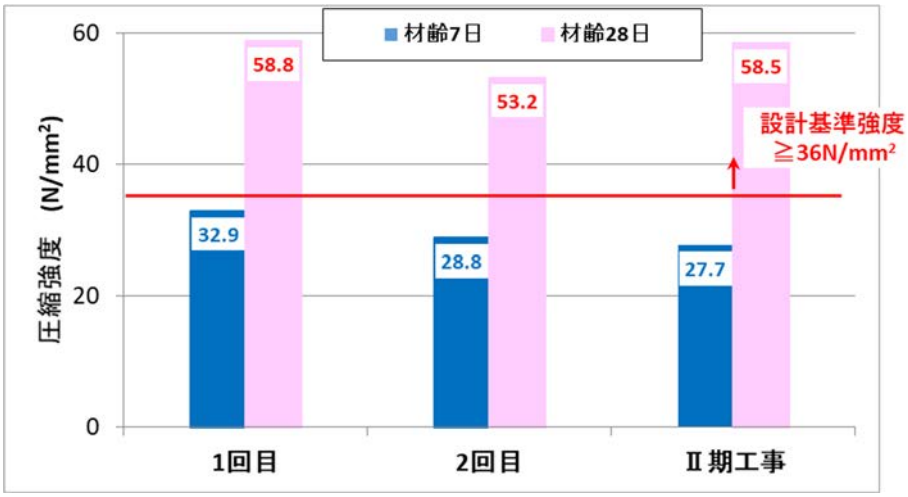


図 16　試験体の圧縮強度の確認

ベントナイト材料の吹付け状況

サンプリングの実施状況

図 17　ベントナイトの吹付けによる施工方法の予備試験実施状況

人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築については、品質保証体系を構築するために必要となる緩衝材の流出挙動を把握するための試験を継続しました。具体的には、緩衝材試験体と岩盤の間の隙間に何も充填しない状態での試験を行い、試

験孔上部へ排水される地下水の量、排水中の緩衝材の量、緩衝材に地下水が浸潤して発生する膨潤圧、試験孔にかかる水圧等を計測しました。その結果、自然湧水環境（湧水量：0.4 L/min）では初期に緩衝材の流出が見られたものの、緩衝材が膨潤し、隙間が埋まるに従って上部に排水される水の量は減少し、約 40 日後には完全に閉塞して緩衝材が上部に流出しなくなることを確認しました。

令和 3 年度は、搬送定置・回収技術の実証に関する試験については、令和 2 年度に製作したコンクリート試験体の暴露試験を継続するとともに、定期的に試験体の分析を行い、地下環境でのコンクリートの劣化挙動に係るデータの取得を進めます。

閉鎖技術の実証としては、①埋め戻し材やプラグ等の長期的な性能の考え方の提示については、令和 2 年度に実施した連成解析に引き続き、連成解析や水理・物質移行解析を通じ、過年度に設定したシナリオが生起する条件の詳細化を進めます。また、坑道および周辺岩盤の長期変遷が安全評価に有意な影響を及ぼす条件の詳細化を図るとともに、過年度に設定したシナリオが生起する条件の詳細化を図ります。また、令和 2 年度に計画した埋め戻し材の流出現象の発生条件を把握するための室内試験などに着手します。②埋め戻し材の設計評価に必要となる緩衝材膨出抑制機能の把握については、令和 2 年度に実施した埋め戻し材と緩衝材の力学的相互作用を考慮した縮尺模型試験を継続し膨潤変形挙動に係るデータの拡充を図ります。③掘削損傷領域を遮断するための施工技術の実証については、令和 2 年度に実施した予備試験結果を踏まえ、350m 調査坑道において側壁部へのベントナイトの吹付けによる施工方法を検証するための工学規模試験を実施します。④掘削損傷領域調査技術の高度化については、令和 2 年度に構築した実験サイトでグラウト注入を行い、ボーリングコア採取、室内試験およびトモグラフィ調査を実施します（図 18）。また、トモグラフィ調査の中で、令和 2 年度に開発した高精度の物理探査技術の適用性も確認します。⑤坑道内から掘削されたボーリング孔の閉塞技術の実証については、令和 2 年度に抽出・整理したボーリング孔の閉塞方法に関する技術的な課題に基づき、粘土系材料のもつ閉塞に係る特性を把握するための室内試験などに着手します。

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係る品質保証体系の構築については、湧水量が多い試験孔（湧水量：約 1.0 L/min）で緩衝材ブロックと岩盤の間に隙間がある施工方法での緩衝材流出試験を行います。令和 2 年度に実施した湧水量が 0.4 L/min の試験孔で流出が止まった試験と比較しながら、湧水量に対しての施工方法の適用範囲を確認します。

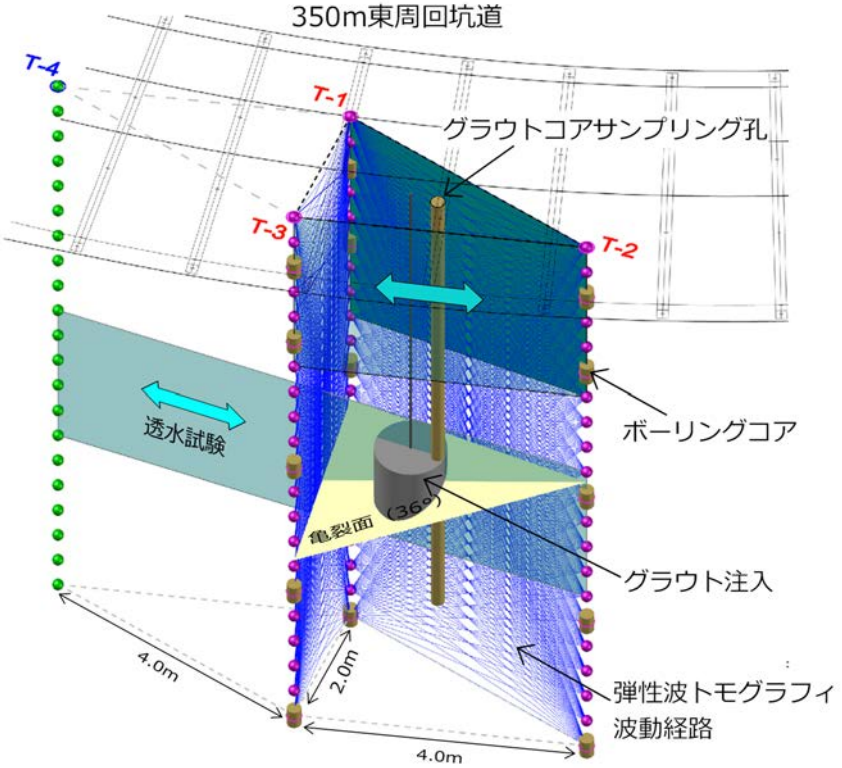


図 18　掘削損傷領域の連続性調査の概念図

プラグを施工する際、掘削損傷領域中の割れ目の連続性や空間分布を把握することは、プラグの設計（厚さや深さなど）をする上で重要な知見となります。この調査では割れ目の連続性や空間分布をより適切に把握するための技術を開発することを目的としています。

5.1.2　坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化

令和 2 年度以降は、廃棄体の設置方法等の実証試験を通じた坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化が課題となります。そのため、人工バリアに要求される品質を踏まえて、要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認します。具体的には、坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化、先行ボーリングによる地質環境特性調査ならびに工学的対策技術を考慮した地下施設および人工バリアの設計評価技術の体系化、多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・浸入現象評価手法および抑制対策技術の整備、廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要となる情報の整理を行います（図 19）。本研究については、「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画」の研究期間の後半に実施します。

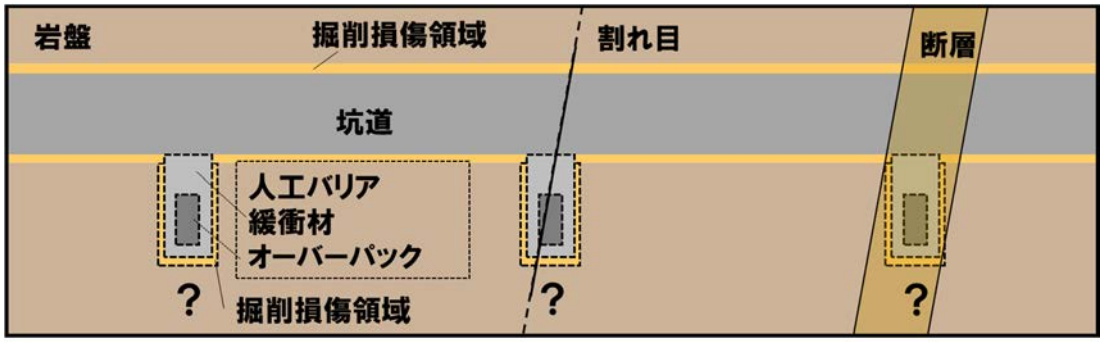


図 19　坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化の概念図

5.2　高温度（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

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

令和 2 年度は、緩衝材の最高温度が 100℃を超えた状態で発生しうる現象の検討に着手しました。その結果、緩衝材の最高温度が 100℃を超えた場合に緩衝材の挙動に与える影響が大きい特性として、蒸発による水分移動特性ならびに物質移動特性が挙げられました。この影響を定量的に見積もるために、蒸発による水分移動特性を把握するための室内試験の実施ならびに蒸発や水蒸気による水分の移動を考慮可能な解析手法の整備の必要性が確認されました。

また、海外で実施されている緩衝材の最高温度が 100℃を超えた状態を模擬する原位置試験について、試験条件、試験手法、計測機器の選定・配置等に関する情報を入手しました。スイスのグリムゼル試験場では、地下施設を使用して、緩衝材の温度を最高 200℃程度まで上昇させることを想定した人工バリア試験が実施されており（HotBENT プロジェクト）、令和 2 年度は、廃棄体を模擬したヒーターや緩衝材であるベントナイトの試験坑道への設置が開始されました（図 20）。ベントナイトの種類（米国産およびチェコ産）や形状（ブロックおよびペレット）、ヒーターの加熱温度（175℃および 200℃）などの試験条件を変化させることにより、異なる条件下での人工バリアの挙動が検証される予定です。また、100℃を超えた状態で人工バリアにおいて生じる現象を観測するために、全圧力、水圧、水分量、飽和度、相対湿度、温度、変位、ガス組成およびガス圧の計測が可能なセンサーが、各ヒーターの周囲やベントナイトの内部、および試験坑道の周囲に配置されています。今後、ヒーターの加熱が開始され、100℃を超えた状態での各パラメータの変化に関するデータが取得される予定です。

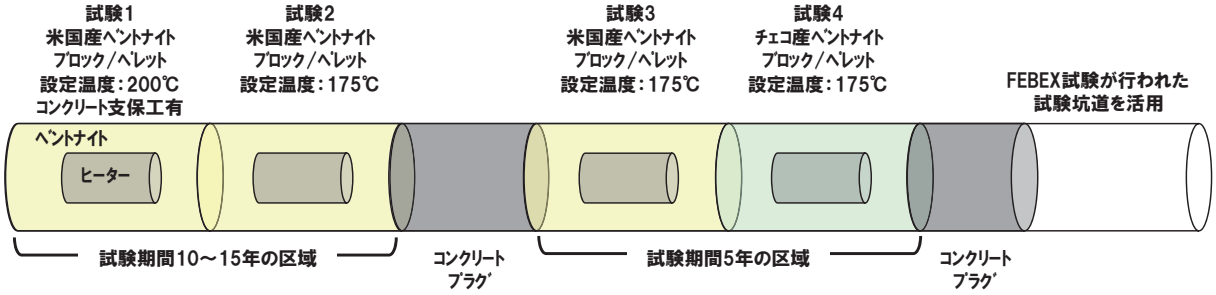


図 20　高温度における人工バリア性能確認試験の概念図
（海外での研究事例）

令和 3 年度は、100℃を超えた状態における現象等の調査事例に基づく課題の抽出、データ取得や解析手法の高度化の計画の策定を行うとともに、100℃を超えた状態での人工バリアの基本特性やニアフィールドでの熱－水理－力学－化学に係る連成現象に関する試験や解析の事例、100℃を超えた状態で発生しうる現象の検討事例等を調査します。例えば図 21 に示すように、ガラス固化体からの発熱により人工バリア周辺に生じうる現象に対して、100℃を超えた状態での挙動や特性の変化等に着目した調査を行います。これらの調査結果に基づき、わが国の処分概念や設計オプションを想定して発生しうる現象を整理します。また、海外での原位置試験に関する情報を引き続き入手します。

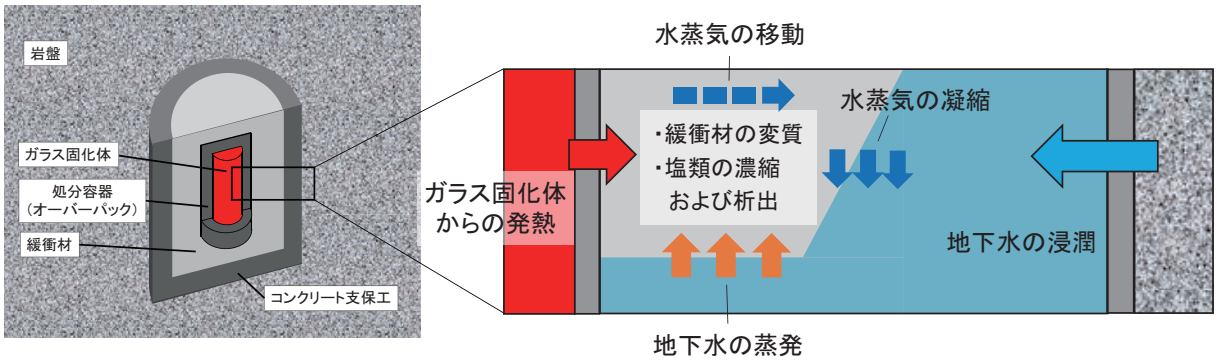


図 21　ガラス固化体からの発熱により人工バリア周辺に生じると想定される現象の概念図

6. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

6.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

6.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

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

令和 2 年度は、地層の透水性を評価する上で重要となる割れ目の水理的連結性について、これまでに稚内層で得られてきている知見やデータの見直しを行いました。稚内層中の割れ目の水理的連結性については、平成 30 年度に DI の概念を用いて、割れ目内に隙間ができやすく、断層同士の連結も促されやすい DI＜2 の領域（稚内層浅部）と、割れ目内に隙間ができにくく、断層同士の連結が促されにくい DI≧2 の領域（稚内層深部）に区分し、浅部が水理的連結性の高い領域である一方で深部が水理的連結性の低い領域であることを透水試験・水圧観測・水質分析結果から示しました(1)(2)。さらに平成 30 年度～令和元年度に、この結果と立坑掘削時に HDB-6 孔で観測された水圧応答との整合性を検討し、同孔の深度 500m 以深で観測された継続的な水圧上昇が割れ目の水理的連結性の低さを表すことを明らかにしました(2)(3)(4)。しかし、稚内層深部の深度 500m 以浅では立坑掘削時に水圧低下が一部に認められており、十分な整合性がとれていませんでした(4)。令和 2 年度に既存データの見直しと解析を行った結果、稚内層浅部と稚内層深部の境界から深度方向に 100m ほどの領域に、割れ目の水理的連結性が高い部分と低い部分が共存する遷移領域を仮定することにより、得られているデータを統一的に説明できることが分かりました（図 22、図 23）。この結果に基づけば、地下施設における深度 500m 以深の領域はこの遷移領域を超えた深度領域に相当することが考えられます（図 23）。

令和 2 年度はさらに、既往の水圧擾乱試験(5)前後の透水試験時に得られた水圧データを解析し、水圧擾乱試験中の高圧注水が断層の水理的不連結性にどのような影響を与えたかを検討しました。その結果、高圧注水によって断層の水理的連結性が一時的に高くなるものの、水圧が元の状態に戻ると水理的連結性も数日の時間差を置いた後に元の低い状態に戻ることが確認できました(6)。この結果は、断層の水理的不連結性が断層面に垂直に掛かる力に支配されていることを示唆しており(6)（図 24）、このようなメカニズムは断層の水理的不連結性をもたらす普遍的な要因として考えられることから、今後も引き続き検討する必要があります。

令和 3 年度は、令和 2 年度に実施した水圧擾乱試験の結果の解析を行うとともに、稚内層中の断層/割れ目の水理的不連結性について、引き続き既存のデータを用いた検討を継続します（図 25）。また、DI を用いた透水性評価手法の高度化に向け、既存の室内実験結果や水圧擾乱試験結果を用いた既存の DI モデル(7)の再検証を行います。

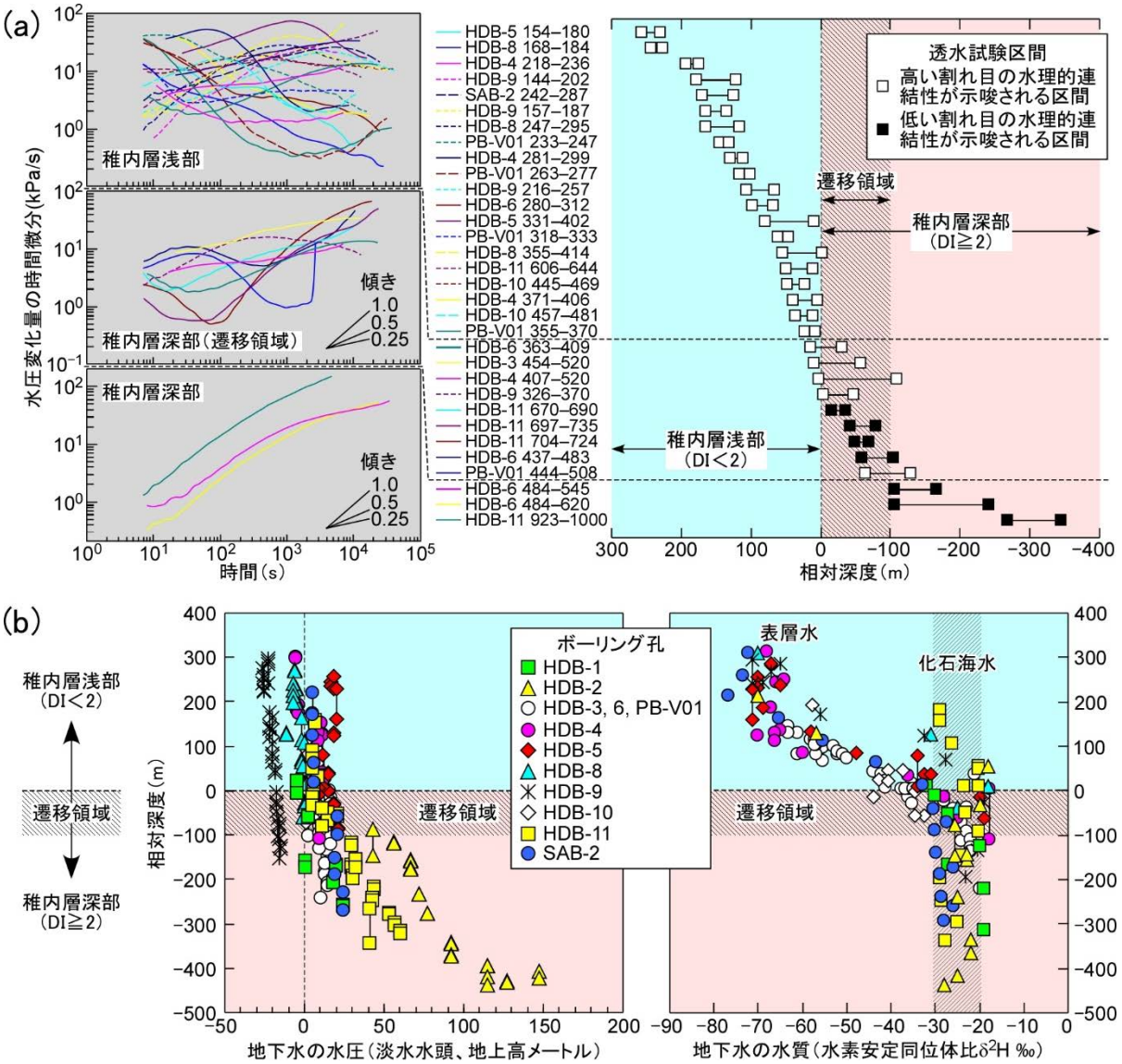


図 22（a）稚内層の割れ目を対象とした透水試験時の水圧変化（b）地下水の水圧と水質のボーリング孔における深度分布[1] に加筆

（a）透水試験の中～後半の時間帯で水圧の変化速度が一定若しくは小さくなる場合は割れ目の水理的連結性が高く、大きくなる場合は水理的連結性が低いことが示唆されます。稚内層浅部では前者の水圧挙動、稚内層深部（遷移領域）では両者の水圧挙動、そして稚内層深部では後者の水圧挙動が認められます。（b）稚内層深部（特に遷移領域より深い領域）は、淡水水頭が深度とともに変化することから、水を通しにくいことが示唆されます。さらに稚内層深部は、遷移領域では表層水の混入が認められるものの、化石海水が残っていることが確認できます。これらの水圧・水質情報は割れ目が水理的に連結していないことを示唆します。

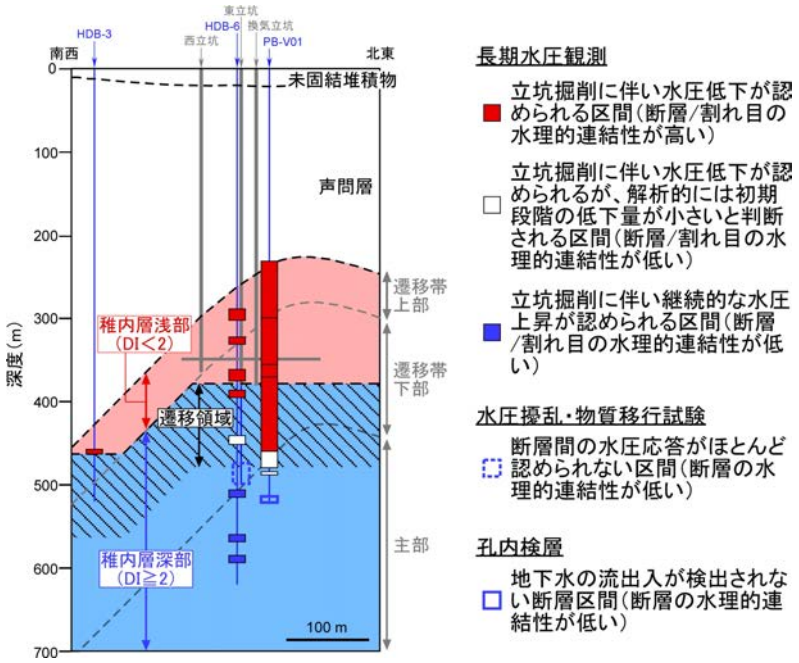


図 23　稚内層中の割れ目の水理的連結性に関する DI を指標とした領域区分とボーリング孔で得られた水理学的情報との比較

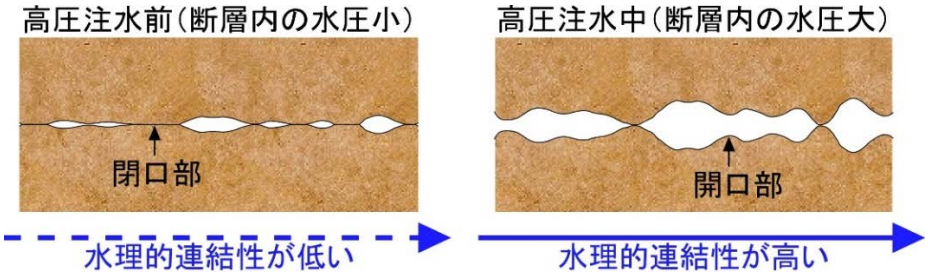


図 24　水圧上昇による断層内の開口部と水理的連結性の増加

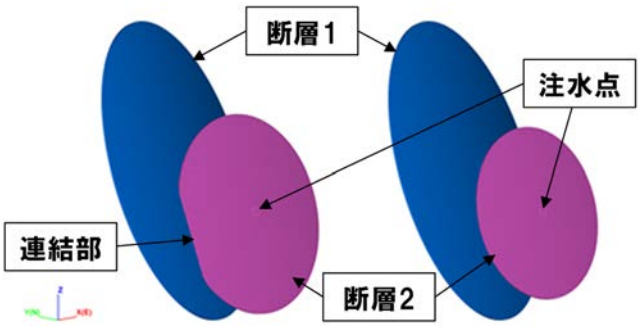


図 25　原位置試験から推定される断層の水理的連結性を複数のモデルを用いた水理解析により検証（左図：断層が一部で連結するモデルの例；右図：断層が連結しないモデルの例）

6.1.2　地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化

令和2年度以降は、地下水の流れが非常に遅い領域を調査･評価する技術の高度化が課題であり、このような地下水の流れが非常に遅い領域を調査してモデル化する技術の実証を行います。具体的には、化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証、広域スケール（十数km×十数km）を対象とした水理・物質移動評価手法の検証（地下水滞留時間評価）のための水理解析、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一つとして挙げられている「放射性物質の移行を抑制する緩慢な地下水流動の水理場であること」を評価する際に役立ちます。本研究課題においては、化石海水が存在するような地下水の動きが非常に遅い環境を調査してモデル化する技術を実証するため、具体的には、以下を実施します。

①地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）の調査・評価技術の検証

②化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証

③広域スケール（十数km×十数km）を対象とした水理・物質移動評価手法の検証（地下水滞留時間評価）のための水理解析および塩濃度分布評価のための水理・物質移動解析

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

令和2年度は、①化石海水領域の調査・評価技術の検証については、化石海水の分布を推定するために、地下の電気の流れやすさ（比抵抗）を調査するための電磁探査を実施しました。また、化石海水の分布と地下の地層や断層の分布との関係性を調べるために、反射法地震探査も同時に実施しました。令和2年度の物理探査では、既往の物理探査よりも三次元的かつより深部への拡がりが推定可能な手法を適用しました。その結果、既往の電磁探査では、より狭い範囲の推定であり、さらに深度400～500mまでの推定が限界でしたが、令和2年度の電磁探査では、それよりも深い部分の範囲も含め三次元的な比抵抗の拡がりを推定することができました（図 26(a)）。さらに、電磁探査から推定した比抵抗分布から地下水の塩濃度の分布を推定した結果、幌延深地層研究センターの周辺を境に、南西側で塩濃度が高く、また、北東側で低くなっていることが分かりました（図 26(b)）。②化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証については、化石海水の三次元分布を効率的に理解するための地上からのボーリング調査の位置・本数を検討しました。③広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の検証（地下水滞留時間評価）のた

めの水理解析および塩濃度分布評価のための水理・物質移動解析については、これまでに実施した既存の水理解析結果に基づき、深度、地質・地質構造分布、気候などの条件の違いが解析結果である地下水移行時間に与える影響を整理しました。

令和 3 年度は、①化石海水領域の調査・評価技術の検証については、令和 2 年度の電磁探査の結果から推定した塩濃度分布（図 27(a)）と既往のボーリングの水質データから推定した塩濃度分布（図 27(b)）を比較して誤差が大きい領域を把握するとともに、誤差が大きくなる領域の確からしさを、ボーリング調査により確認します。また、幌延町沿岸部の浅海域において海上物理探査を産業技術総合研究所*6との共同研究として実施します。②化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証については、物理探査とボーリング調査を組み合わせた効率的な手法を検討するために、令和 2 年度に実施した物理探査データを用いて、異なる調査数量条件で化石海水の三次元分布を推定し、それらを比較することで最適な調査数量を確認します。③広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の検証（地下水滞留時間評価）のための水理解析および塩濃度分布評価のための水理・物質移動解析については、地下水移行時間評価や塩濃度三次元分布評価に関して、観察事実と解析結果の相違点の要因を分析し、解析方法を改良します。

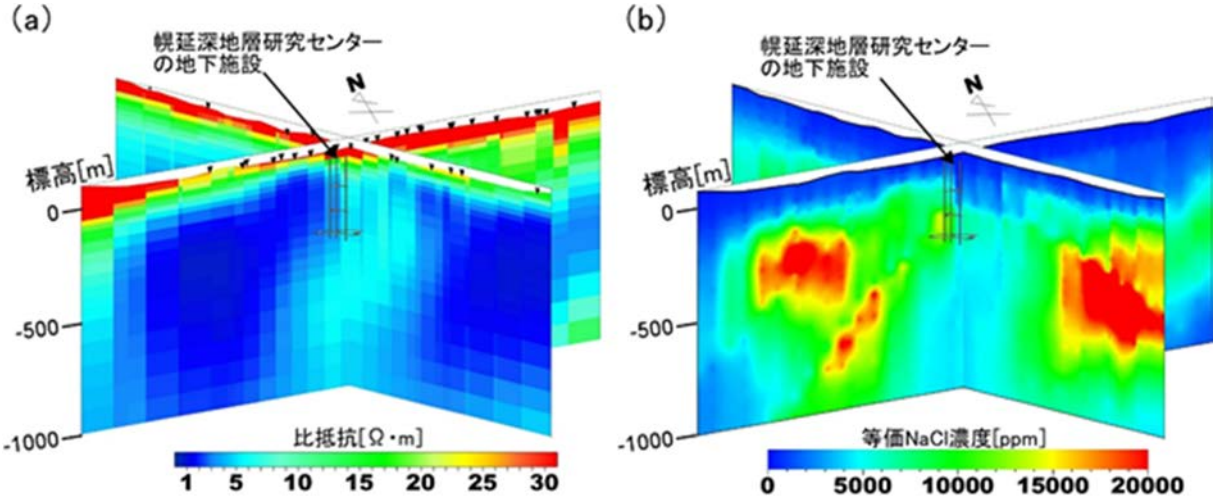


図 26　令和 2 年度の電磁探査の結果の一例(a)比抵抗の分布、(b)比抵抗から推定した塩濃度（等価 NaCl 濃度）の分布

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

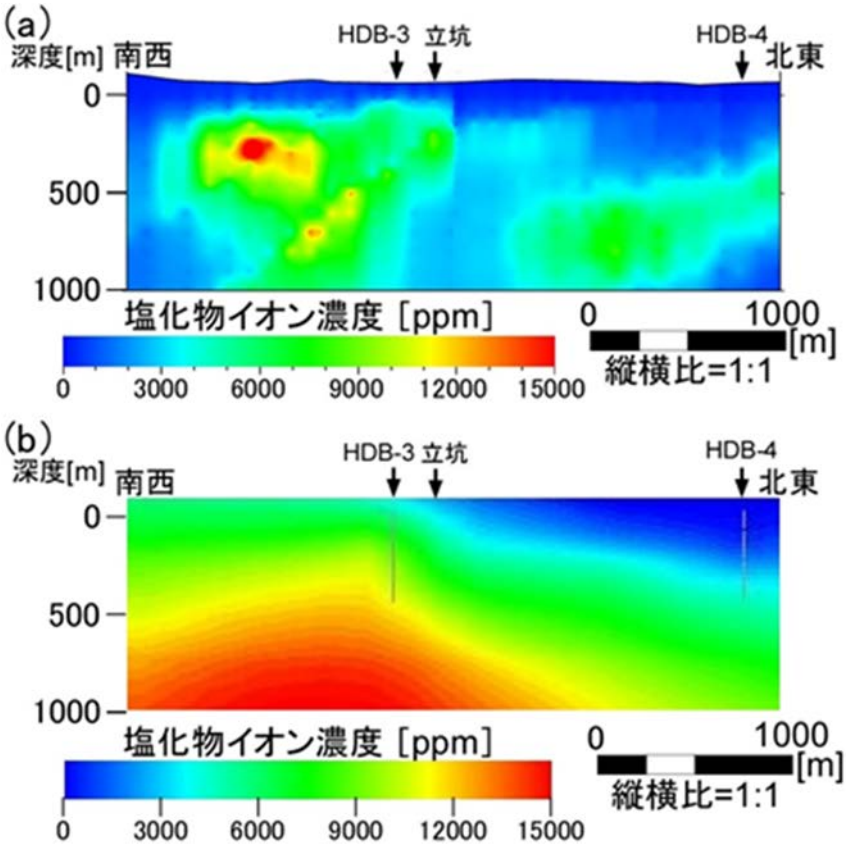


図 27　幌延深地層研究センター周辺における塩化物イオン濃度の分布(a)電磁探査により得られた比抵抗分布に基づき推定した結果、(b)既往のボーリング孔における水質データに基づき推定した結果

6.2　地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

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

令和 2 年度は、掘削損傷領域の割れ目の開口状況を定量的に把握するために、原位置で樹脂注入を行った後に採取した割れ目試料の詳細な観察を行いました。その結果、最大で 1 mm 程度のせん断変位が割れ目沿いに発生していることが確認できる一方で、そのせん断変位量と開口幅（0.2～0.3 mm）の相関性が小さいことが分かりました（図 28）。一般に、せん断変位とともに割れ目の開口幅が増加することが既往の室内実験により知られていますが、今回の結果では、そのような傾向は認められませんでした。この原因として、割れ目面に垂直に掛かる力が大きいために、せん断変位に伴う割れ目開口が抑制されている可能性が考えられます。今回の結果は、掘削損傷領域の割れ目の開口メカニズムを理解する上で重要であることから、引き続き検討を行う必要があります。

令和 3 年度は、令和 2 年度に実施した観察結果や既往の掘削損傷領域の透水試験結果などを用いて坑道埋め戻し後の掘削損傷領域の透水性を推定するモデルの構築を進めるとともに、DI を用

いた掘削損傷領域の透水性を予測する既存モデルの再検証を 6.1.1 の検討と合わせて行います。これらの結果を踏まえ、緩衝材や埋め戻し材の膨潤が掘削損傷領域の圧力状態（DI）を変化させることにより、同領域内の割れ目（ひび割れ）がどの程度閉塞し得るかを検討していく予定です。

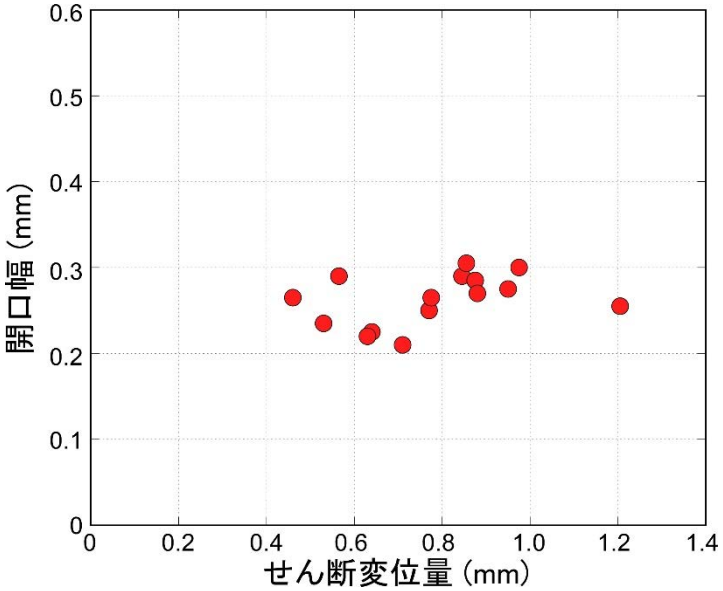


図 28　掘削損傷領域の割れ目で計測された開口幅とせん断変位量の関係

7. 令和 2 年度以降の必須の課題への対応に必要なデータ取得

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

令和 2 年度におけるデータ取得例として、ここでは地下水の pH や酸化還元電位、圧力などの物理化学パラメータのモニタリング結果を示します。地下施設の建設に伴う坑道周辺の地下水の水質変化を把握するため、既存のボーリング孔を対象に地下水の採水調査を行いました。地下水の pH や酸化還元電位などの物理化学パラメータについては、大気中の酸素との接触や圧力の低下などの影響を低減させた原位置の地下水の値を取得するために、350m 調査坑道に設置している水圧・水質モニタリング装置を用いて、物理化学パラメータを取得しています。人工バリア性能確認試験の試験箇所周辺のボーリング孔に設置した水圧・水質モニタリング装置から得られた結果では、pH や酸化還元電位について、令和元年度までと同様の結果が得られました。水圧については、人工バリア性能確認試験の注水量の変化に伴う水圧の変化が確認されました（図 29）。

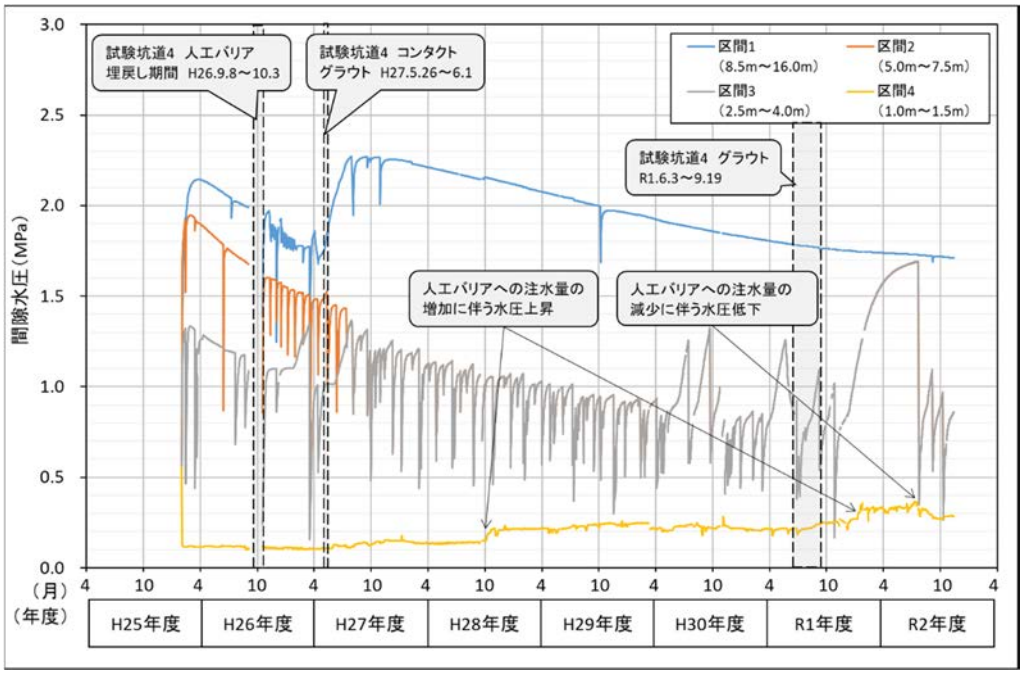


図 29 人工バリア性能確認試験の試験箇所周辺のボーリング孔（13-350-C08 孔）における水圧の経時変化

令和 3 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深度 140m、250m および 350m の各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します。地質構造に関しては、ボーリング調査や坑道掘削時の壁面観察で得られた地質データに基づいた地層および割れ目の空間的分布に関する特徴の整理を継続します。また、令和 2 年度以降の必須の課題の目的に応じて、地質構造や水理の特徴を踏まえた水理地質構造モデル※を構築します。岩盤の水理に関しては、坑道掘削後の地質環境の変化を把握するため、地上から掘削された既存のボーリング孔での水圧観測を行います。地下水の地球化学に関しては、既存のボーリング孔を対象に地下水の採水調査を行うとともに、地下水の水質分布や水質の時間的な変化を把握します。また、坑道掘削の影響については、地表や坑道に設置した高精度傾斜計※および坑道に設置した地中変位計などを用いて、岩盤の微小な変形の観測を継続します。さらに、地震に伴う地質環境特性の変化に関わるデータ取得のため、上幌延観測点（HDB-2）と 350m 調査坑道での地震観測を継続します。

8. 地下施設の管理

令和 2 年度に引き続き、試験坑道 1 における人工バリア解体試験施工に関連する工事を行うとともに、施設内の機械設備や電気設備などの維持管理（設備運転や保守点検など）を実施します（図 30）。

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、地下坑道内の換気を十分に行うとともに、防爆仕様の機器の使用やガス濃度の監視などの防爆対策を徹底します。

地下施設からの排水および掘削土（ズリ）置場の浸出水は、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。

図 30　工事および維持管理の様子

9. 環境調査

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

9.1 排水量および水質調査

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

図 31　水質調査の様子

9.2 研究所用地周辺の環境影響調査

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

図 32　環境調査および魚類調査の様子

10.　安全確保の取り組み

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

図 33　安全パトロールの様子

11. 開かれた研究

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

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

地層処分や研究開発に関する国民との相互理解を促進するため、幌延深地層研究センターのホームページ*7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（図 34）。また、令和 2 年度に幌延町広報誌の誌面をお借りして研究内容を紹介する記事の連載を始めましたが、令和 3 年度も継続して行います。

図 34　深度 350m 調査坑道での見学の様子

11.1　国内機関との研究協力

〇東京大学：

微生物を指標とした堆積岩中の水みち調査手法の開発

*7：https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/

○名古屋大学：

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

○京都大学、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

○山口大学、地層科学研究所：

立坑および水平坑道掘削における応力・水連成解析の適用性に関する研究

○幌延地圏環境研究所*8：

堆積岩を対象とした岩盤力学や微生物などに関する研究

○産業技術総合研究所：

岩盤の水理特性に係る力学連成現象に関する研究

海陸連続三次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータ取得手法の高度化

○電力中央研究所*9：

地下施設建設時の坑道掘削影響領域の調査技術に関する研究

○電力中央研究所、核燃料サイクル工学研究所

実地下水中のコロイドへの核種の収脱着メカニズムに関する研究

地下環境で生じる微生物腐食メカニズムに関する研究

○深田地質研究所、東京大学、東濃地科学センター

断層中のメタンガス高精度検出に関する共同研究

○株式会社 安藤・間

ボアホールジャッキ試験による岩盤の初期応力測定手法の適用性に関する研究

○原子力規制庁

坑道閉鎖措置に関わる研究（原子力機構 安全研究センターが原子力規制庁と実施する共同研究への協力）

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

*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。

11.2　国外機関との研究協力

○クレイクラブ（Clay Club）*10：

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

○モンテリ・プロジェクト*11（スイス）：

オパリナス粘土層の摩擦特性試験など

○DECOVALEX：

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

○環太平洋地域における地下研究施設（URL）を活用した国際協力：

各機関が課題とするテーマについて情報交換、解析技術の検討など

上記のほか、国外の研究機関などとの研究協力や地下施設における原位置試験などに関わる情報交換を進めます。また、韓国の研究者を対象として、地下施設で行っている調査研究の体験を目的とした実務トレーニングを進めます。国内外の研究機関や実施主体に働きかけを行い、国際連携を進めるとともに、幌延深地層研究センターの地下施設を活用して効率的に研究を進めていきます。

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

*11：堆積岩を対象とした地層処分研究に関する国際的な原位置試験プロジェクトです。スイスのモンテリ・トンネル内において地層処分に関連する各種の原位置試験が実施されています。

12. 用語集

【か行】

回収方法

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

化石海水

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

掘削損傷領域

岩盤が掘削により損傷し、初期の性質から変化する領域のことです。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、岩盤の変形特性の変化や透水性の増大が予想されます。また、空気の侵入により地下水の酸化還元電位などの化学的な変化が生じることが想定されます。なお、掘削損傷領域を含むより広い領域で坑道への地下水排水などにより地下水圧が低下する領域のことを掘削擾乱領域といい、掘削擾乱領域では坑道埋め戻し後、低下した地下水圧が元の状態に回復することが想定されます。掘削損傷領域と掘削擾乱領域は、広義に掘削影響領域と表現されます。

減熱過程

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

高精度傾斜計

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

コロイド

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

【さ行】

酸化還元電位

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

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。

親水性物質

ある条件下で樹脂に吸着しなかった物質群です。多糖類、タンパク質などを含みます。

水圧擾乱試験

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

水理地質構造モデル

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

【た行】

堆積岩の緩衝能力

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

ダクティリティインデックス（DI）

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

DECOVALEX

International co-operative project for the DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation（連成モデルの開発とその実験結果との検証に関する国際共同研究）の略称で、地層処分システムの性能評価において重要な課題の一つである熱－水理－力学－化学連成挙動モデルの開発・確証を目的とした国際共同研究です。

トレーサー

地下水の流れの方向や流れる時間などを調べるために、地下水に目印として混ぜる染料やその他の薬品を指します。塩化ナトリウム（食塩の主原料）が代表的なトレーサーとなりますが、調べたい地下水の化学成分が塩化ナトリウムに富む場合などにはヨウ化カリウムなどがあり、多種のトレーサーがあります。幌延深地層研究計画では放射性トレーサーを利用したトレーサー試験を行うことはありません。

【な行】

熱－水理－力学－化学連成現象

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

【は行】

暴露試験

材料及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・物理的性質及び性能の変化を調査する試験です。

腐植物質

ある条件下で樹脂に吸着した物質のうち、アルカリ性溶液で溶出される物質群です。特定の化学構造を持ちません。

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。放射性廃棄物の地層処分では、緩衝材や処分坑道の埋め戻し材の原料として用いられ、ベントナイトの膨潤により緩衝材の透水性が低下し、放射性核種が緩衝材に吸着され、移行を抑制する効果があります。

HotBENT

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

参考文献

(1) Ishii, E., Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single-borehole investigations, Water Resources Research, vol.54, 2018, pp.3335-3356.

(2) 雑賀敦, 幌延深地層研究計画　平成 30 年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2019-018, 2020, 122p.

(3) 中山雅, 雑賀敦, 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.

(4) Ozaki, Y., Ishii, E., Sugawara, K., Poroelastic response of fractured mudstone in the Horonobe URL: A possible indicator of fracture hydraulic disconnectivity, Proceedings of ISRM Specialized Conference CouFrac2020, GS11-04, 2020, pp.1-4.

(5) 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.

(6) Ohno, H., Takeda, M., Ishii, E., Does fault activation affect the hydraulic disconnectivity of faults in mudstone?, Proceedings of ISRM Specialized Conference CouFrac2020, GS11-03, 2020, pp.1-4.

(7) 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.

付録 参考資料

This is a blank page.

【令和2年度以降の研究工程】（1/8）

区分	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	R３の実施内容	研究期間（前半：R2～R6、後半：R7～R10）
1.1 人工バリア性能確認試験	・実際の地質環境下における処分孔竪置き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（人工バリアの解体調査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の工学的実現性の例示等を行い、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盤情報を整備する ・これらをとおして、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ることを確認するとともに、その予測技術を確立することで、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(③)から浸潤時・減熱時(④)を模擬した現象）の評価手法（モデル化・解析手法）の確立	④ 浸潤時・減熱時のデータを含め、ガラス固化体設置以降の加熱・注水時から浸潤時・減熱時を全て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、及び浸潤時の実際の飽和度などの確認（解体調査による）	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	④-1　人工バリア性能確認試験のヒーターの電源をOFFにし、発熱による影響を無くした条件での試験に移行し、データを分析・評価	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 R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10 ④-1 浸潤時・減熱時のデータ取得・連成モデルの適用性確認 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 緩衝材中の温度の低下や緩衝材内側の間隙圧の低下を確認 令和6年度までに得られる成果 ○緩衝材で生じる連成現象の把握 ○解析用パラメータの整理 ○熱－水理－力学連成解析モデルの適用性の確認
				国際プロジェクト（DECOVALEX等）における解析コード間の比較検証、改良・高度化	④-1　連成解析については、DECOVALEXで令和2年度に設定した解析条件を基に共同解析を行い、解析コード間の比較検証を行い、評価モデルの検証を実施。気相を考慮した熱－水理－力学連成挙動に関する室内試験については、令和2年度に設定した条件下での試験を開始	国際プロジェクトでの解析コード間の比較検証、改良・高度化 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 解析モデルや解析条件を設定 令和5年度までに得られる成果 ○各国の解析コード間の比較検証を通じた解析コードの有効性の確認
				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　試験施工では、解体調査を実施し、緩衝材、模擬オーバーパック、埋め戻し材、コンクリート、岩盤、設置したセンサー等のサンプリング手法や各種材料の境界面を一体化した状態でサンプリングする手法の適用性を確認	④-2 人工バリアの解体作業・緩衝材の飽和度確認 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 試験施工では、埋め戻し材、プラグ、試験孔、人工バリアを設置 令和6年度までに得られる成果 ○人工バリアの解体作業の方針及び施工手順・方法の決定 ○緩衝材の飽和度の実データの取得

※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。

■ 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。

【令和2年度以降の研究工程】（2/8）

区分	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	R３の実施内容	研究期間
1.2 物質移行試験	• 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が知られているため、岩盤基質部（＝健岩部）における拡散および割れ目（掘削損傷領域などの人為的な割れ目も含む）を介した移流・分散が主要な移行経路や形態として考えられる • 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（＝健岩部）および割れ目の双方を対象とした原位置トレーサー試験等を実施し、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ー試験手法を確立することも重要 • あわせて、有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に及ぼす影響を把握することが重要	① 岩盤基質部（＝健岩部）を対象とした物質移行特性（物質の移動速度や岩盤へのくっつきやすさ等）の評価手法の検証 ② 割れ目を対象とした物質移行特性（物質の移動速度や岩盤へのくっつきやすさ等）の評価手法の検証 ③ 泥岩中の割れ目を対象としたトレーサー試験手法の検証 ④ 掘削損傷領域などの人為的な割れ目を対象とした物質移行特性（物質の移動速度や岩盤へのくっつきやすさ等）の評価手法の検証 ⑤ 有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に及ぼす影響を把握 ⑥ 割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立	④ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立 ⑤ 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行モデル化手法の高度化 ⑥ 割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立	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が限定的であることを確認する。また、物質移行評価手法を高度化するため以下を実施 ④ 確立したトレーサー試験手法を用いた掘削損傷領域（EDZ)での物質移行に関するデータ取得 ⑤ 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行試験 ⑥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規模）における遅延性能評価手法の整備	④ 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の評価、試験箇所の水理・物質移行に関する情報取得を継続 ⑤ 微生物・有機物・コロイドが核種移行に及ぼす影響の現象理解の継続、予備的な原位置試験に着手 ⑥ 稚内層深部のブロックスケールを対象とした物質移行試験を実施	前半：前半の5年程度で実施 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 R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10 ④ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立 体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施 原位置試験データ(非収着性トレーサー)を取得 令和6年度までに得られる成果 ○原位置試験データ（非収着性／収着性トレーサー）の取得 ○EDZにおけるモデル化／解析評価手法の提示 ⑤ 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行モデル化手法の高度化 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 室内試験データ(地下水中の有機物のサイズ分布等)を取得 令和6年度までに得られる成果 ○室内試験データの拡充 ○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提示 ⑥ ブロックスケール（数m～100規模）における遅延性能評価手法の整備 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 原位置試験の準備作業として、物質移行試験装置を設置 令和6年度までに得られる成果 ○原位置試験データ（非収着性／収着性トレーサー）の取得 ○幌延を事例としたブロックスケールの評価手法の提示

※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。

【令和2年度以降の研究工程】（3/8）

区分	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	R３の実施内容	研究期間								
						前半					後半			
						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			
						R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
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**	・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・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証を目的として、幌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・回収技術及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・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証 ② 個別の要素技術の実証試験 ③ 埋め戻し材、プラグに関する設計手法、製作・施工及び品質管理手法の確立	①②③ 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	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、ブロック方式等）の違いによる緩衝材の品質の違いを把握する。また、埋め戻し方法（プラグの有無等）・回収方法による埋め戻し材の品質の違いを把握する。 ①搬送定置・回収技術の実証（緩衝材や埋め戻し材の状態に応じた除去技術の技術オプションの整理、回収容易性を考慮した概念オプション提示、回収維持の影響に関する品質評価手法の提示）	① 地下環境におけるコンクリートの劣化に関する試験、分析を継続	① 搬送定置・回収技術の実証					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			
						地下環境でのコンクリートの劣化に関する試験を開始					令和6年度までに得られる成果 ○実際の地下環境における支保部材の経年変化に係るデータ取得 ○坑道掘削・閉鎖後の地質環境変化に関する事象の把握			
				②閉鎖技術（埋め戻し方法：プラグ等）の実証	② 閉鎖システム（埋め戻し材やプラグなど）に関する基盤情報の整備を目的とした解析検討、室内試験および工学規模試験の継続	② 閉鎖技術（埋め戻し方法：プラグ等）の実証					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			
						閉鎖システムに関する基盤情報の整備を目的とした解析検討、室内試験、工学規模試験を実施					令和6年度までに得られる成果 ○シーリングシステムの長期性能評価に関する考え方の整理 ○緩衝材の膨潤挙動に影響を与える事象の整理 ○止水プラグの施工に関する重要技術の抽出 ○EDZ調査技術の評価・高度化 ○坑道内からのボーリング孔に対するシーリング技術の整備・実証			
				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係る品質保証体系の構築（(1)実際の地質環境における人工バリアの適用性確認のうち、人工バリア性能確認試験とあわせて実施）	③ 緩衝材流出の抑制に関する試験	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係る品質保証体系の構築					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施			
						自然湧水環境での緩衝材の流出状況を確認					令和6年度までに得られる成果 ○緩衝材の施工方法に関する技術オプションの実証 ○坑道閉鎖に関する技術オプションの実証			

※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。

【令和2年度以降の研究工程】（4/8）

区分	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	R３の実施内容	研究期間								
						前半				後半				
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**	・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・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証を目的として、幌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・回収技術及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・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証 ② 個別の要素技術の実証試験 ③ 埋め戻し材、プラグに関する設計手法、製作・施工及び品質管理手法の確立	④ 廃棄体の設置方法等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	人工バリアの品質を踏まえて、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 ④-2 先行ボーリングによる地質環境特性調査ならびに工学的対策技術を考慮した、地下施設及び人工バリアの設計評価技術の体系化 ④-3 多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術及び処分孔支保技術の整備、緩衝材流出・侵入現象評価手法及び抑制対策技術の整備 ④-4 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要となる情報の整理	後半の5年程度で実施するため、R3は実施しない	－				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				
						R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
										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				
										④-2 地下施設及び人工バリアの設計評価技術の体系化				
										④-3 多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術及び処分孔支保技術の整備、緩衝材流出・侵入現象評価手法及び抑制対策技術の整備				
										④-4 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要となる情報の整理				

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

【令和2年度以降の研究工程】（5/8）

区分	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	R３の実施内容	研究期間
2.2 高温度(100℃超)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験	・人工バリア設置環境の深度依存性を考慮し、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 ・実際の処分事業では、オーバーパックが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℃超の高温での限界環境が人工バリアに与える影響と上限温度設定の考え方の整備、解析的な検討	① 高温度(100℃以上)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験による緩衝材が100℃超になった状態を想定した解析手法の開発	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するため以下を実施 ①-1 高温度(100℃以上)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験 ①-2 100℃超になった際にニアフィールド（人工バリアとその周辺岩盤の領域）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（国際プロジェクト情報を収集し、発生する現象を整理）	①-1 100℃を超えた状態における現象等の調査事例に基づく課題の抽出、データ取得や解析手法の高度化の計画の策定 ①-2 100℃を超えた状態での人工バリアの基本特性やニアフィールドでの熱-水-応力-化学に係る連成現象に関する試験・解析およびシナリオ検討事例の調査、わが国の処分概念や設計オプションを想定したシナリオの整理 ①-3 海外の原位置試験に関する情報取得の継続	前半：前半の5年程度で実施 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 R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10 ①-1 限界的条件下での人工バリア性能確認試験の解析・検討 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 海外での原位置試験の情報(試験条件,手法等)を入手 令和6年度までに得られる成果 ○高温度(100℃以上)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験データの収集 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 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 シナリオの検討に着手（水分移動、物質移動特性） 令和6年度までに得られる成果 ○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 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 海外での原位置試験の情報(試験条件,手法等)を入手 令和6年度までに得られる成果 ○ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方の提示

※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。

【令和2年度以降の研究工程】（6/8）

区分	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	R３の実施内容	研究期間								
						前半					後半			
						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			
						R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
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**	・岩盤中には大小様々な断層が存在するが、小規模なものの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様式に大きく依存する。脆性的な変形が起こると断層の透水性は有意に上昇しやすいが、延性的な変形の場合は透水性が上昇しにくい。生じる変形が脆性的か延性的かは、変形時の岩石強度、応力などに依存する ・本研究では、地殻変動に対する緩衝能力が潜在的に高いことから堆積岩に重点を置き、断層の変形様式を支配する岩石の強度・応力状態を計測でき、かつマッピング（空間的な分布図を示すこと）が可能なパラメータで指標化することを試みる。そのようなパラメータと断層の透水性の潜在的な上限を関係付けることができれば処分場閉鎖後の断層の透水性について現実的な状態設定が可能となる ・断層は動いたとしても、その透水性は、地層の力学的な緩衝能力が働くことにより、一定の値を超えない。 この現象を定量的に示したい	①地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力を表現するパラメータ（指標）の提案 ②水圧擾乱試験によるパラメータの有効性の検証	② 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握	断層の幅が数十cmの断層における地震動や坑道掘削に伴う、割れ目における地下水の流れの変化に関して、堆積岩の緩衝能力（自己治癒能力）を実証するために、以下の検討や試験を実施する ②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握（ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験） ②-2 DI（ダクティリティ・インデックス：岩盤にかかる平均応力を引張強度で割った値）を用いた透水性評価の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備 ②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備	②-1～3 より大型の断層を対象とした水圧擾乱試験結果の解析 ②-1～3 稚内層中の断層／割れ目の水理的不連結性に関する検討の継続 ②-1～3 既存の室内試験結果や水圧擾乱試験結果を用いた既存のDIモデルの再検証	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			
						既往の水圧擾乱試験で得られた水圧データを解析					令和6年度までに得られる成果 ○ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験データの取得			
						②-2 DI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			
						割れ目の水理的連結性に関する既存データの見直し					令和6年度までに得られる成果 ○DIを用いた透水性評価手法の高度化			
						②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備					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を実施					令和6年度までに得られる成果 ○水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備			

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直していく。
※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

■ 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。

【令和2年度以降の研究工程】（7/8）

区分	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	R３の実施内容	研究期間								
						前半					後半			
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**	・地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域に相当と仮定）の分布を把握することは、処分事業における処分場選定の際に有用な情報になり得る。このため、地上からの調査により、化石海水の三次元分布を評価する既存技術の高度化を図る	③ 地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）を調査・解析・評価する手法の確立 ④ 三次元分布を調査・解析・評価する手法の確立	③④ 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化	地下水が動いていない環境を調査してモデル化する技術を実証するため以下を実施		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			
						R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
				③ 地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）の調査・評価技術の検証	③, ④-1 化石海水領域の三次元分布の推定結果の確からしさを確認するためのボーリング調査	③ 地下水の流れが非常に遅い領域の調査・評価技術の検証					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			
						化石海水領域を把握するための物理探査を実施					令和6年度までに得られる成果 ○化石海水領域の調査・評価技術の整備・高度化			
				④-1 化石海水の三次元分布に係る調査・評価手法の検証	④-1 物理探査データも含めた、調査の展開と評価結果の関係の分析	④-1 化石海水の三次元分布に係る調査・評価手法の検証					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			
						化石海水分布の把握に必要なボーリングの位置・本数等を検討					令和6年度までに得られる成果 ○化石海水の三次元分布に係る調査・評価技術の整備・高度化			
				④-2 広域スケール(十数km×十数km) を対象とした水理・物質移動評価手法の検証（地下水滞留時間）評価のための水理解析、塩濃度分布評価のための水理・物質移動解析）	④-2 調査データと水理解析結果の整合・不整合に関する要因の分析の継続ならびに不整合箇所を低減するための改良	④-2 広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の検証					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			
						広域スケールの地下水流動に深度・気候などが与える影響を整理					令和6年度までに得られる成果 ○広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の整備			

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直していく。
※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

■ 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。

【令和2年度以降の研究工程】（8/8）

区分	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	R３の実施内容	研究期間
						前半 / 後半
3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験	・地震・断層活動等の地殻変動に対する堆積岩の力学的・水理学的な緩衝能力（自己治癒能力）を定量的に検証し、堆積岩地域における立地選定や処分場の設計を、より科学的・合理的に行える技術と知見を整備する	① 人工バリアの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を評価する手法の確立 ② 人工バリアの自己治癒能力（ひび割れの修復）を実証	② 地殻変動による人工バリアの緩衝材や坑道埋め戻し材の掘削損傷領域（EDZ）への自己治癒能力の実証	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		前半の3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 R2 R3 R4 R5 R6 R7 R8 R9 R10
				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	②DIを用いたEDZの透水性を予測する既存モデルの再検証	②-1 DIを用いたEDZの透水性を予測する既存モデルの再検証 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 試料観察に基づく、EDZの割れ目開口状況を定量的に把握 令和4年度までに得られる成果 ○DIを用いたEDZの透水性を予測する既存モデルの再検証
				✓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坑道埋め戻し後のEDZの透水性を推定するモデルの構築	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 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 試料観察に基づく、EDZの割れ目開口状況を定量的に把握 令和4年度までに得られる成果 ○坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測するモデルの構築

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