JAEA-Review
2020-022
DOI:10.11484/jaea-review-2020-022

幌延深地層研究計画　令和２年度調査研究計画

Horonobe Underground Research Laboratory Project
Investigation Program for the 2020 Fiscal Year

（編）中山 雅　雑賀 敦

(Eds.) Masashi NAKAYAMA and Atsushi SAIGA

核燃料・バックエンド研究開発部門
幌延深地層研究センター
深地層研究部

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

November 2020

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（https://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

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.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository 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, 2020

JAEA-Review 2020-022

幌延深地層研究計画　令和２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、雑賀　敦

（2020 年 9 月 7 日受理）

幌延深地層研究計画（以下、本計画）は、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）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。

本計画は、「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進めることとしている。原子力機構の第 3 期中長期計画では、本計画について、「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重点的に取り組む。また、平成 31 年度末までに研究終了までの工程やその後の埋め戻しについて決定する。」としてきた。

これまでの研究の成果や外部委員会の評価、国内外の状況を踏まえて検討した結果、研究の継続が必要となったことから、令和元年 8 月 2 日に「幌延町における深地層の研究に関する協定書」（以下、三者協定）に基づき北海道および幌延町に協議の申し入れを行った。その後、協議の申し入れを行った「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画（案）」について、三者協定に基づき北海道および幌延町により設置された「幌延深地層研究の確認会議」において、研究の必要性や妥当性、三者協定との整合性を論点とした内容の精査が行われ、北海道および幌延町により「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画（案）」が受け入れられた。原子力機構は、これらの研究課題については、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、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すこととした。

本報告は、令和 2 年度に実施する調査研究計画について取りまとめたものである。

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 2020-022

Horonobe Underground Research Laboratory Project
Investigation Program for the 2020 Fiscal Year

(Eds.) Masashi NAKAYAMA and Atsushi SAIGA

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

(Received September 7, 2020)

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.

The investigations will be conducted in three phases, namely "Phase 1: Surface-based investigations", "Phase 2: Construction phase" (investigations during construction of the underground facilities) and "Phase 3: Operation phase" (research in the underground facilities).

According to the research plan described in the 3rd Mid- and Long- term Plan of JAEA, "Demonstration of EBS in geological environment", "Demonstration of disposal concept", and "Validation of buffer capacity of the sedimentary rock to tectonism" are important issues of the Horonobe URL Project, and schedule of future research and backfill plans of the URL will be decided by the end of 2019 Fiscal Year.

JAEA summarizes the research and development activities of the important issues carried out during the 3rd Mid- and Long-term Plan, and set out three important issues after 2020 fiscal year.

As the result of the research so far, the evaluation of the external committee, and the examination based on the situation in Japan and abroad, it became necessary to continue the research. Therefore, we requested the Hokkaido and Horonobe town for discussion. After consultation with Hokkaido and Horonobe town, JAEA formulated the Horonobe underground research plan after 2020 fiscal year within the 3rd and 4th Mid- and Long-term Plan.

This report summarizes the investigation program for the 2020 fiscal year (2020/2021).

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

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. 5
3.　令和 2 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 13
5.　処分概念オプションの実証 15
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. 15
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. 16
6.　地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証 17
6.1　水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化 17
6.2　地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験 18
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. 20
8.　地下施設の維持管理 22
9.　環境調査 23
9.1　排水量および水質調査 23
9.2　研究所用地周辺の環境影響調査 23
10.　安全確保の取り組み 24
11.　開かれた研究 25
11.1　国内機関との研究協力 25
11.2　国外機関との研究協力 26
12.　用語集 28
付録　参考資料 30

Contents

1. Introduction 1
2. Research subject based on the Horonobe Underground Research Project after 2020 fiscal year . 5
3. Outline of the investigation program for the 2020 fiscal year 8
4. Demonstration of EBS in geological environment 13
4.1 Full scale engineered barrier system experiment (dismantling) 13
4.2 Mass transport experiment 13
5. Demonstration of disposal concept 15
5.1 Demonstration of remote technique for emplacement and retrievable 15
5.2 EBS behaviour over 100 °C 16
6. Validation of buffer capacity of the sedimentary rock to tectonism 17
6.1 Hydro-mechanical buffering against long-term geological events such as fault reactivation / up-lift 17
6.2 Self sealing behavior of EDZ arround EBS after backfilling 18
7. Acquisition of data necessary for addressing the important issues after 2020 20
8. Maintenance of the underground facilities 22
9. Environmental study 23
9.1 Monitoring of drainage water and water property 23
9.2 Environmental impact study around the Horonobe Underground Research Center 23
10. Safety efforts 24
11. Collaboration with other research organizations 25
11.1 Collaboration with domestic research organizations 25
11.2 Collaboration with overseas research organizations 26
12. Glossary 28
Appendix 30

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。幌延深地層研究計画は、実際の地層処分事業とは明確に区別することを前提に、堆積岩を対象として実施している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）の計画です（図 1）。また、本計画では、「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進めることとしています。

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）」（以下、第 3 期中長期計画）を策定しました（図 2）。第 3 期中長期計画中の幌延深地層研究計画における研究開発としては、「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※の検証に重点的に取り組む。また、平成 31 年度末までに研究終了までの工程やその後の埋め戻しについて決定する。」としていました。

これに基づき、幌延深地層研究センターでは、平成 27 年度以降、第 3 期中長期計画に示した 3 つの必須の課題に重点を置いた研究開発を進めてきました。平成 30 年度には、研究開発成果の取りまとめに着手するとともに、研究開発の進捗状況等について外部専門家による評価を受けました。そして、これまでの研究の成果や外部委員会の評価、国内外の状況を踏まえて検討した結果、研究の継続が必要となったことから、令和元年 8 月 2 日に「幌延町における深地層の研究に関する協定書」（以下、三者協定）に基づき北海道および幌延町に協議の申し入れを行いました。その後、協議の申し入れを行った「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画（案）」について、三者協定に基づき北海道および幌延町により設置された「幌延深地層研究の確認会議」（以下、確認会議）において、研究の必要性や妥当性、三者協定との整合性を論点とした内容の精査が行われ、北海道および幌延町により「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画（案）」が受け入れられました。原子力機構は、これらの研究課題については、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みます[*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。また、これまでと同様に三者協定の遵守を大前提に、放射性廃棄物を持ちこむことや使用

※ 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、我が国の科学技術の水準の向上を通じた国民経済の発展その他の公益に資するため研究開発の最大限の成果を確保することを目的とする法人に対する名称です。原子力機構は、平成 27 年 4 月 1 日に「独立行政法人日本原子力研究開発機構」から「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構」に名称変更しています。

*2：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、我が国における原子力の研究、開発および利用を計画的に遂行するために原子力委員会が定める基本的考え方に則り、その業務を総合的、計画的かつ効率的に行うことが定められています。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29条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）。

することなく、また最終処分場とはしないこと、安全を最優先に研究を進めます。さらに、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、国内外の資金や人材を活用することを検討します。

なお、外部専門家による評価や確認会議と並行して実施していた令和元年度の研究については、以下の成果が得られました。

- 人工バリア性能確認試験では、加熱・注水試験による熱－水－応力－化学連成評価手法を整備（図 3、図 4）。
- オーバーパック腐食試験では、工学的スケールでの既往の腐食量評価手法の妥当性、適用性を確認。
- 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は、充填材の除去技術を実証し、搬送・定置装置の地下環境への適用性を確認（図 5）。

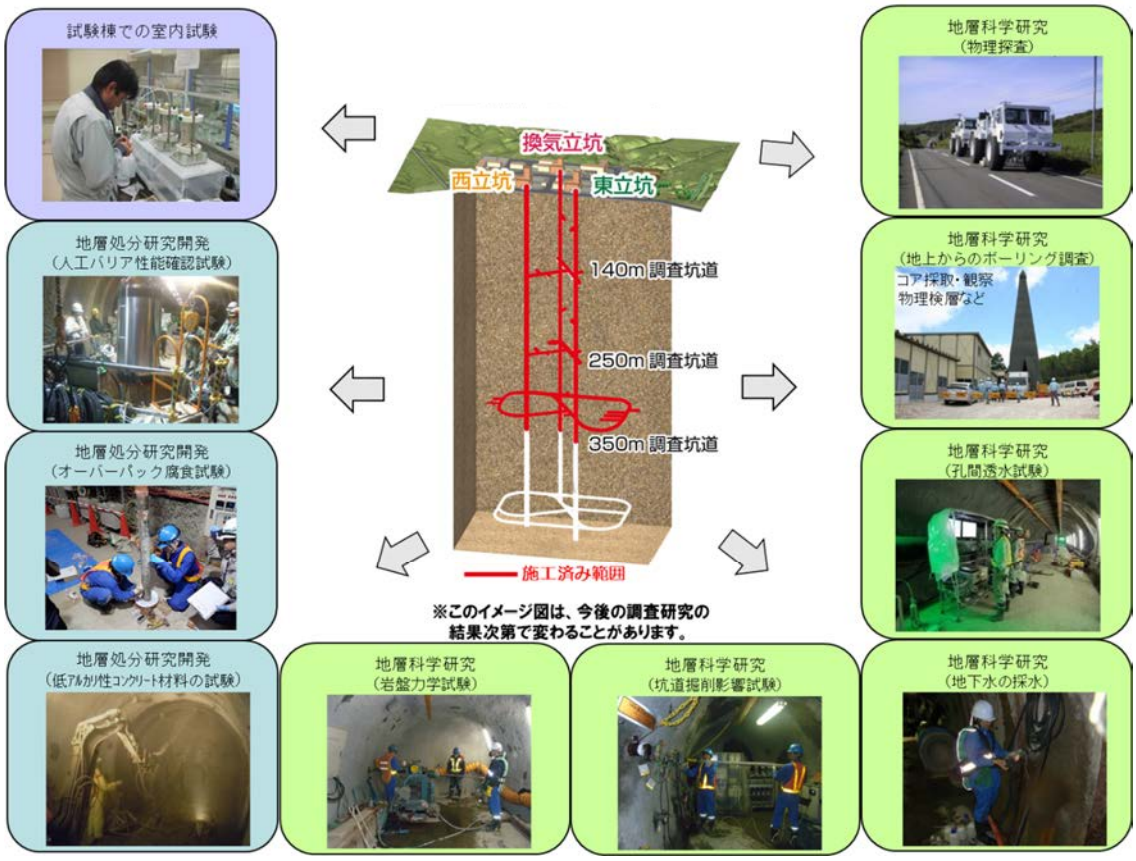
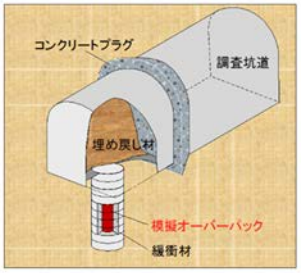


図 1　幌延深地層研究計画の全体イメージ

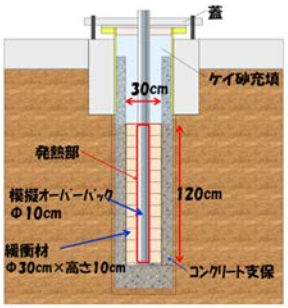
①実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

平成26年度から深度350m調査坑道で実施している人工バリア性能確認試験、オーバーパック腐食試験、物質移行試験を通して、実際の地質環境において、人工バリアや周辺岩盤中での熱-水-応力-化学連成挙動や物質移行現象などを計測・評価する技術の適用性を確認し、「精密調査後半」に必要となる実証試験の技術基盤を確立する。

- 人工バリア性能確認試験
- オーバーパック腐食試験
- 物質移行試験



人工バリア性能確認試験

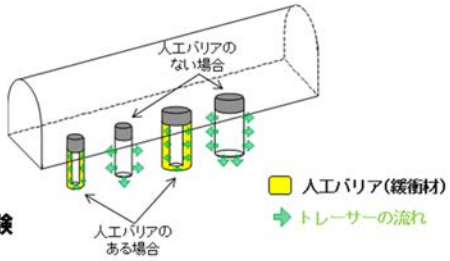


オーバーパック腐食試験

②処分概念オプションの実証

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。

- 処分孔等の湧水対策・支保技術などの実証試験
- 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
- 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



物質移行試験

③地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

地震・断層活動等の地殻変動に対する力学的・水理学的な緩衝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。

- 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化
- 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

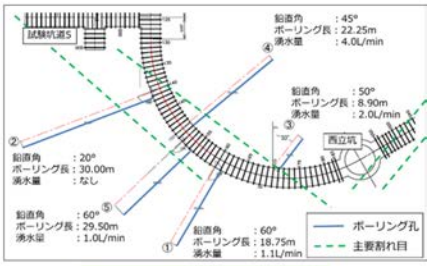
図 2　平成 27 年度に設定した必須の課題

○実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

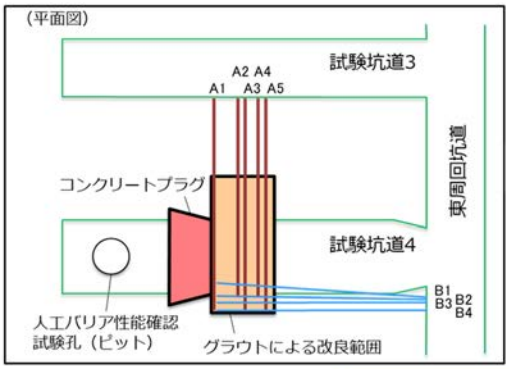
人工バリア性能確認試験

掘削影響領域を介した逸水を抑制するため、令和元年6月上旬から9月上旬にかけてグラウト施工(東周回坑道側からB断面(12区間)試験坑道3側からA断面(56区間))を実施

人工バリア性能確認試験に必要な水を確保するための給水用ボーリング孔(5孔)の掘削を実施



給水用ボーリング孔



グラウト施工箇所

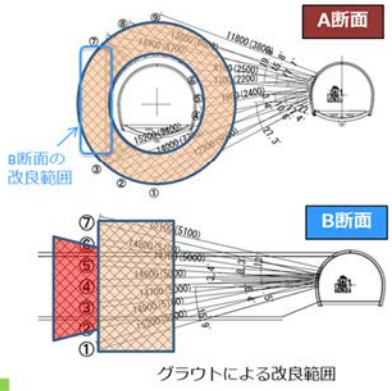
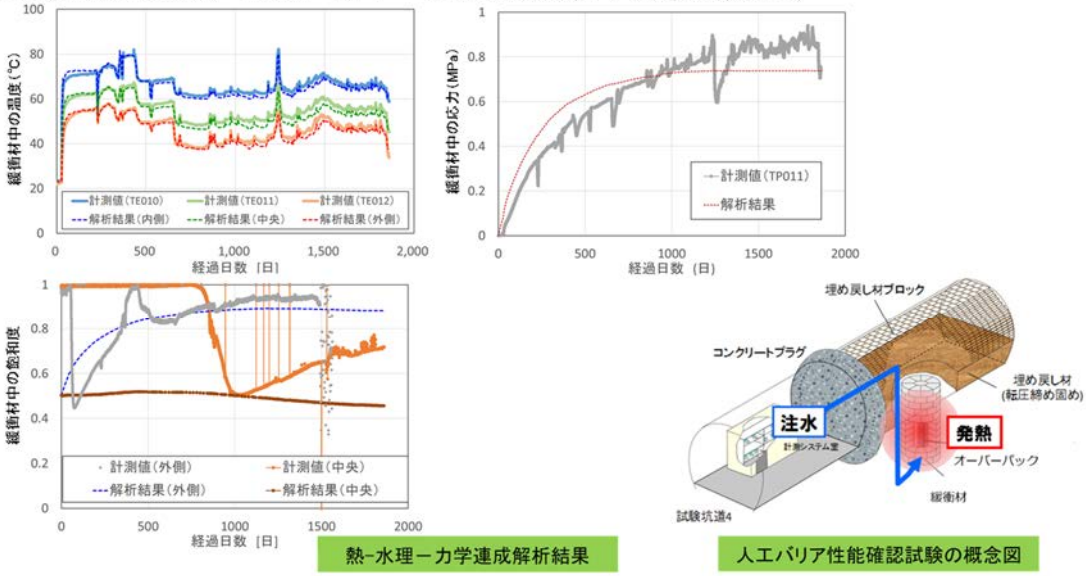


図 3　平成 31 年度/令和元年度に得られた主な研究成果 (1)

○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

室内試験による物性データの拡充等を行い、実現象に即したデータを用いた解析を実施し、解析コード（THAMES）による熱—水理—力学連成評価手法の適用性を確認した。これにより、加熱・注水試験による熱－水理－力学－化学連成評価手法を整備した。



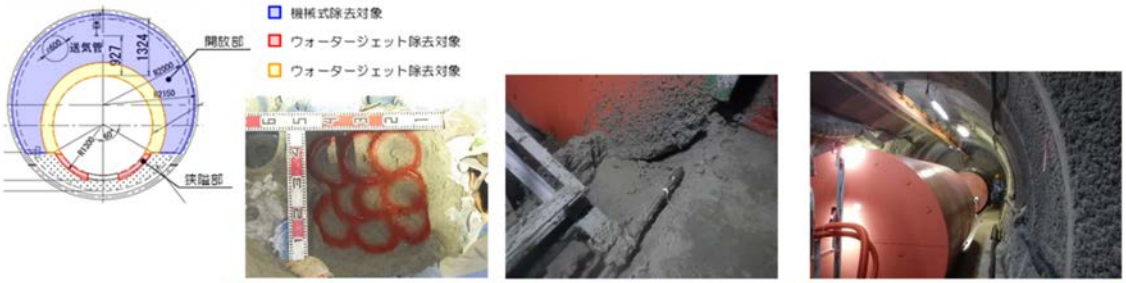
熱-水理－力学連成解析結果　　人工バリア性能確認試験の概念図

図 4　平成 31 年度/令和元年度に得られた主な研究成果（2）

○処分概念オプションの実証

搬送定置・回収技術に関する試験

・回収技術：PEM*–坑道間の隙間に対する、隙間充填材の除去技術（流体式除去：ウォータージェット、機械式除去：オーガ掘削）を実証した。
・搬送・定置技術：隙間充填材を除去した後の模擬PEMに対し、エアベアリング方式*を用いた搬送・定置装置（重量物の搬送技術）の地下環境への適用性を確認した。



オーガ掘削（左）とウォータージェット（右）による充填材の除去状況　　模擬PEMの回収試験状況

*PEM
鋼製の容器の中に、人工バリアであるオーバーパックや緩衝材を設置し、一体化したものです（Prefabricated Engineered barrier system Moduleの略）。
本試験では、オーバーパックと緩衝材を封入しない模擬PEMを使用しました。

*エアベアリング方式
圧縮空気を送り込み、床面との隙間にごく薄い空気の膜を形成することで摩擦を低減し、小さい力で重量物を搬送するための仕組みです。

図 5　平成 31 年度/令和元年度に得られた主な研究成果（3）

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

令和 2 年度以降は、「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画」に基づき、必須の課題のうち、引き続き研究開発が必要と考えられる以下の課題（令和 2 年度以降の必須の課題）に取り組むこととします（図 6、表 1、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

これ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加熱・注水時のデータを取得しましたが、浸潤時・減熱時※のデータが取得されていません。今後は、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、これ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、今後は、確立した試験手法を用いて掘削影響領域※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

これまでの試験では、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。今後は、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）を実証試験で確認します。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。

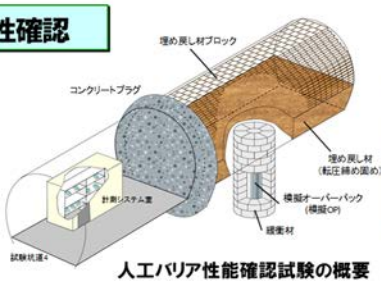
(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

これまでの検討では、まずは小規模な断層（幅数 cm）に着目し、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。今後は、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）の作用に関する実証試験を実施します。さらには、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

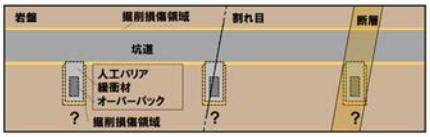
人工バリア性能確認試験の解体調査のイメージ

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 6　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10cm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。

3. 令和 2 年度の主な業務内容

上述した令和 2 年度以降の必須の課題に関する研究開発目標を達成していくため、令和 2 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の加熱・注水試験を継続し、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を開始します。また、物質移行試験について、掘削影響領域を対象とした物質移行試験、有機物、微生物、コロイド※が物質移行特性に与える影響を評価するための試験の条件設定やレイアウト等の検討、ブロックスケール（数 m～100m 規模）を対象とした物質移行試験の事前調査を実施します。

「処分概念オプションの実証」については、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数値解析的検討や、室内試験および工学規模試験を実施します。また、緩衝材の最高温度が 100℃を超えた状態を想定した場合の解析手法の開発に向けて、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の入手を行います。

「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、幅数十 cm のより大型の断層を対象とした水圧擾乱試験※や断層間の水理的連結性について断層の幾何形状や透水性をパラメータとした解析などを実施するとともに、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把握するための物理探査、化石海水領域を評価する水理解析手法の改良、地下水の塩濃度分布の推定を進めます。また、緩衝材や坑道埋め戻し材の膨潤圧が掘削影響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、同亀裂を対象に実施した既往の樹脂注入試験の結果の解析を実施します。

また、令和 2 年度以降の必須の課題への対応に必要なデータ取得を実施するとともに、今後の研究を進める上で原位置試験エリアの具体化なども検討します。

地下施設の維持管理においては、施設内の機械設備や電気設備などの維持管理（保守点検や修繕など）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。

令和 2 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 7、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 8 に、研究所用地における主な施設と観測装置の配置を図 9 に、深度 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所を図 10 に示します。

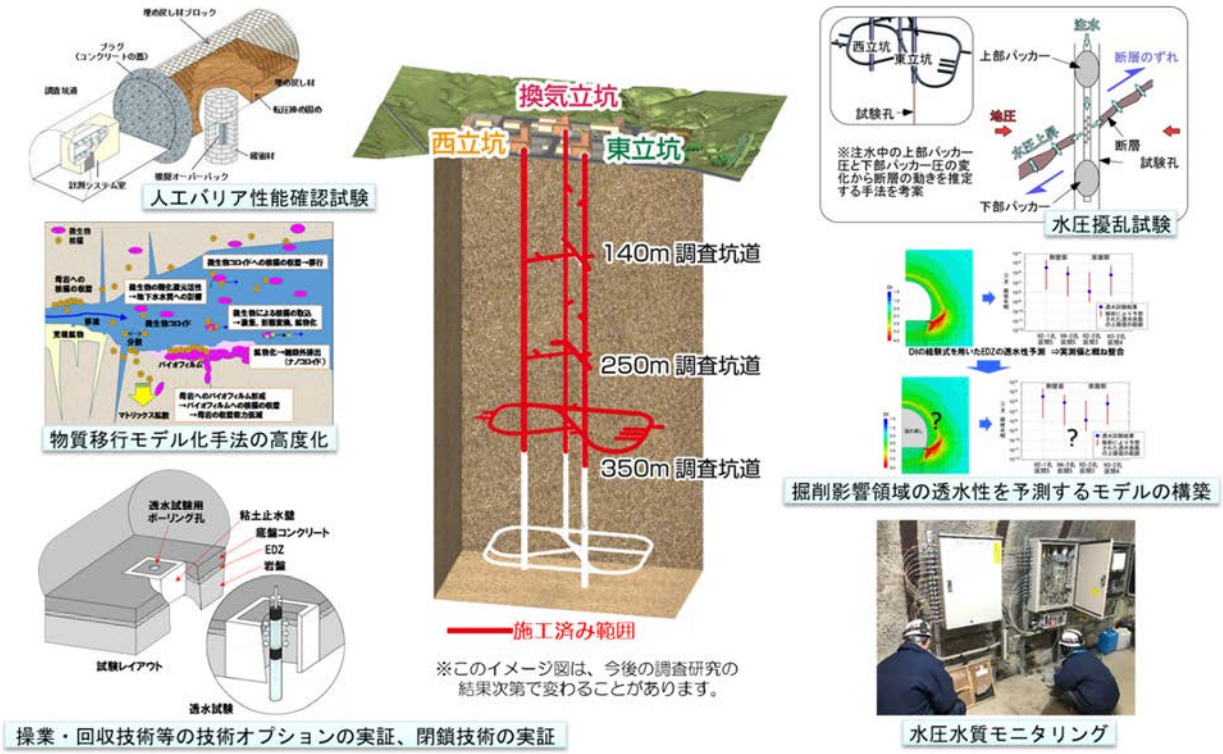


図 7　令和 2 年度の調査研究

表 2　令和 2 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（加熱・注水試験のデータの分析・評価）、熱－水理－力学－化学連成挙動の解析、連成解析モデルの改良、気相を考慮した熱－水－応力連成挙動の解析、室内試験、人工バリアの試験体を取り出すための試験施工	研究所用地、 地下施設など
		物質移行試験	掘削影響領域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特性に与える影響を評価するための試験の条件設定やレイアウト等の検討、物質の移動におよぼす影響のメカニズムを理解するために必要な水質分析、濃度・種類・微生物の代謝機能などを把握するための特性調査等、ブロックスケール（数m～100m規模）を対象とした物質移行試験の事前調査	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	緩衝材や埋め戻し材への地下水の浸潤が進んだ状態での回収において考慮すべき条件設定、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、搬送定置・回収技術の実証に関する試験や解析、緩衝材への水の浸潤挙動を把握するための試験	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	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の試験条件、試験手法、計測機器の選定・配置等に関する情報の入手、緩衝材の最高温度が100℃を超えた状態のシナリオの検討	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	幅数10cmのより大型の断層を対象とした水圧擾乱試験、これまでに実施した断層の水圧擾乱試験や透水試験の結果の詳細解析、試験中における断層間の水理的連結性について断層の幾何形状や透水性をパラメータとした解析 化石海水領域の三次元分布を把握するための物理探査、化石海水領域を評価する水理解析手法の改良、地下水の塩濃度分布の推定	研究所用地および周辺、地下施設、HDB-1～11孔
		地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験	緩衝材や坑道埋め戻し材の膨潤圧が掘削影響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亀裂を対象に実施した既往の樹脂注入試験の結果の解析	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
地下施設の維持管理			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

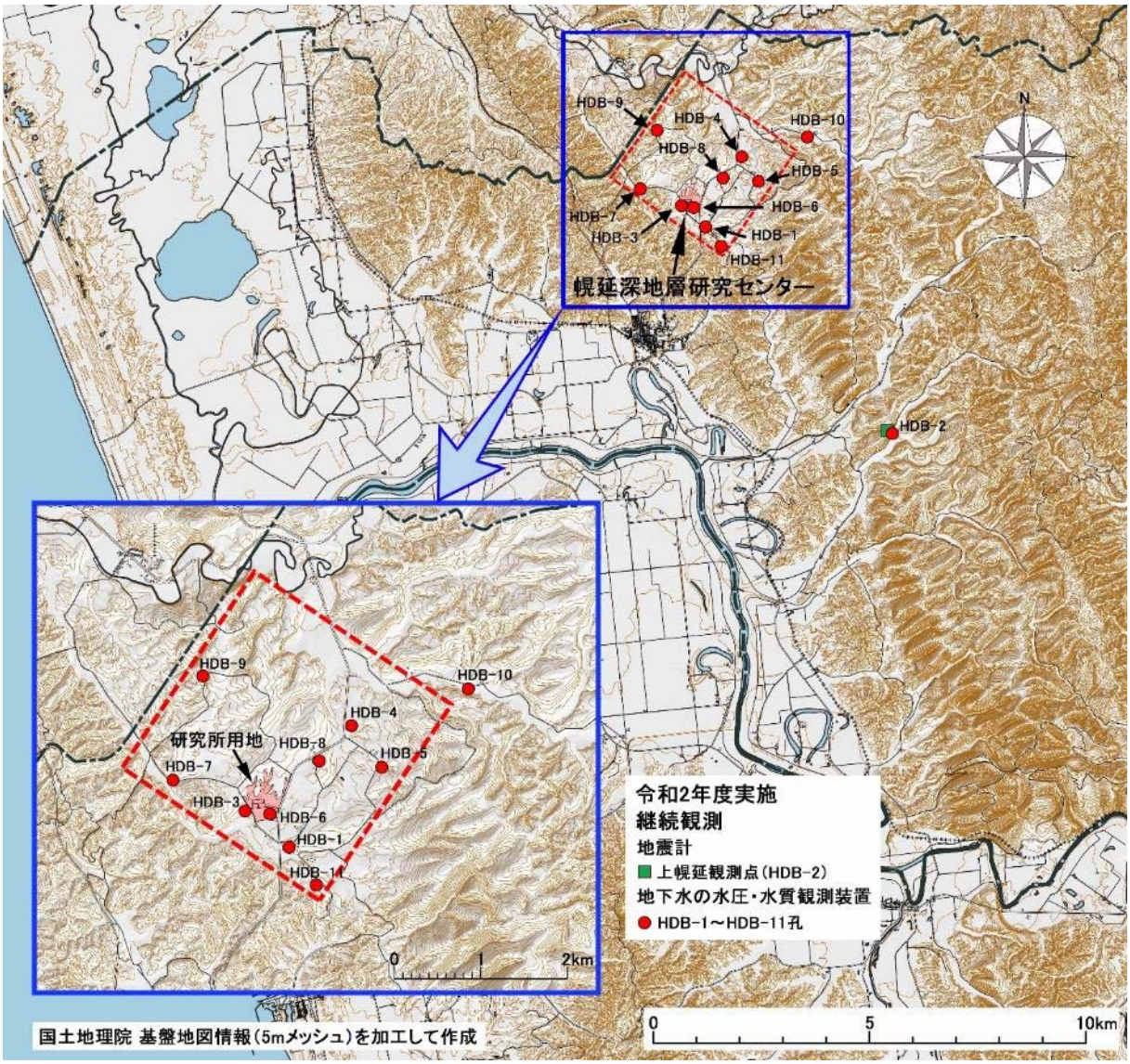


図 8　ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所

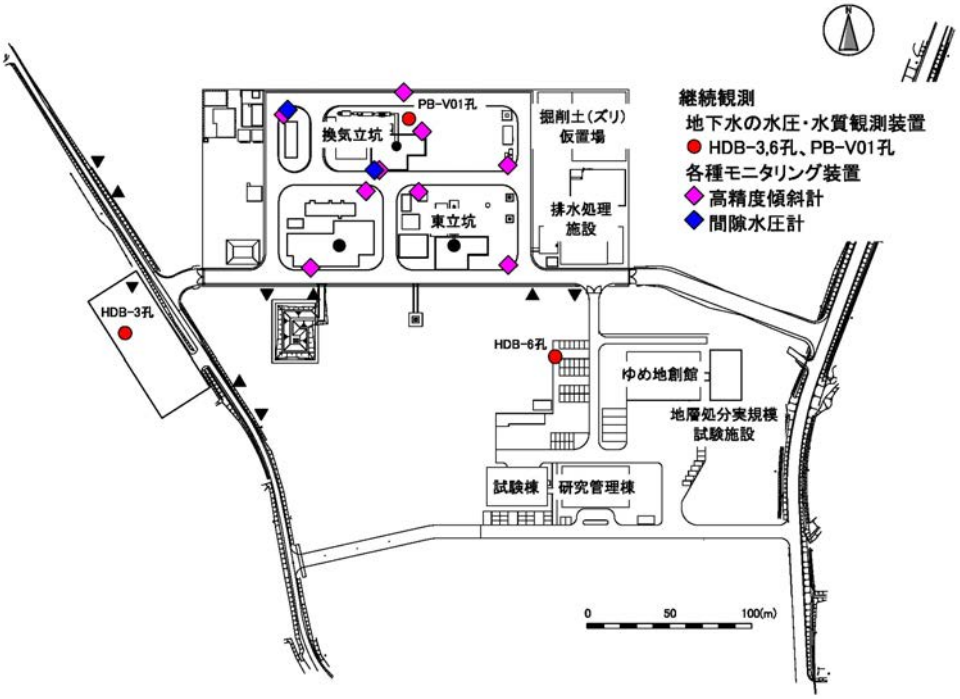


図 9　研究所用地における主な施設と観測装置の配置

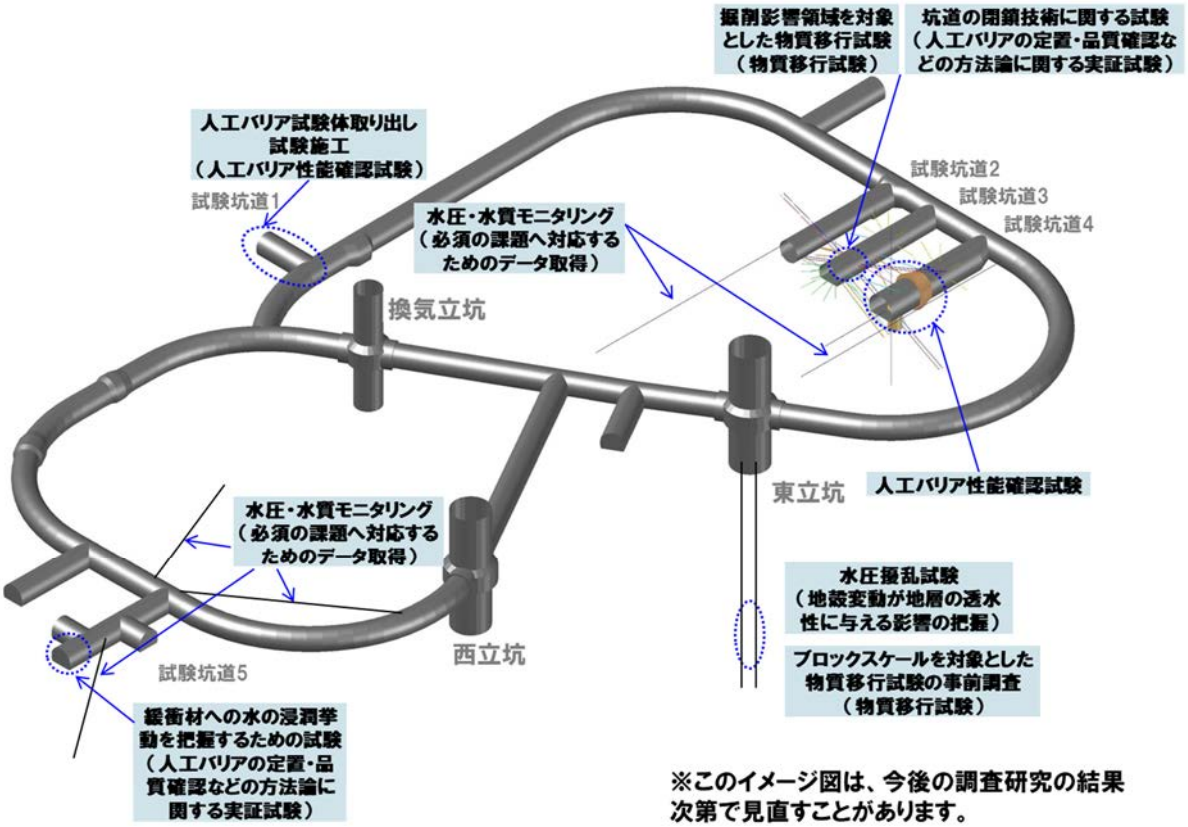


図 10　深度 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

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、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－水理－力学－化学連成現象※のモデルの高度化、および解体調査による浸潤時の緩衝材の実際の飽和度などの確認が課題となります。そのため、浸潤時・減熱時のデータを取得し、模擬オーバーパック、緩衝材および岩盤の間で発生する、熱－水理－力学－化学連成挙動モデルの適用性を確認します。また、人工バリア性能確認試験の解体作業を行い、緩衝材の飽和度などの確認を実施します。

今年度は、人工バリア性能確認試験（図 11）について、加熱・注水試験を継続し、データを分析・評価するとともに、模擬オーバーパック、緩衝材および岩盤の間で発生する熱－水理－力学－化学連成挙動に関わるデータを用いた解析を行います。解析においては、減熱時を想定した予測解析を行うとともに、国際共同研究 DECOVALEX※による共同解析等を通じて、連成解析モデルの改良を行います。さらに、気相を考慮した熱－水－応力連成挙動に関する室内試験を行い、連成解析を実施します。

また、現在試験を行っている人工バリア性能確認試験については、試験終了後、鉄筋コンクリート製の力学プラグの解体、大量のベントナイト※を含む緩衝材および模擬オーバーパックの取り出しなどを行い、緩衝材の飽和度などを確認する解体調査を行う予定です。そのため、解体調査に先立って、適用する施工方法の検証を行うため、人工バリアの試験体を取り出すための試験施工を開始します。

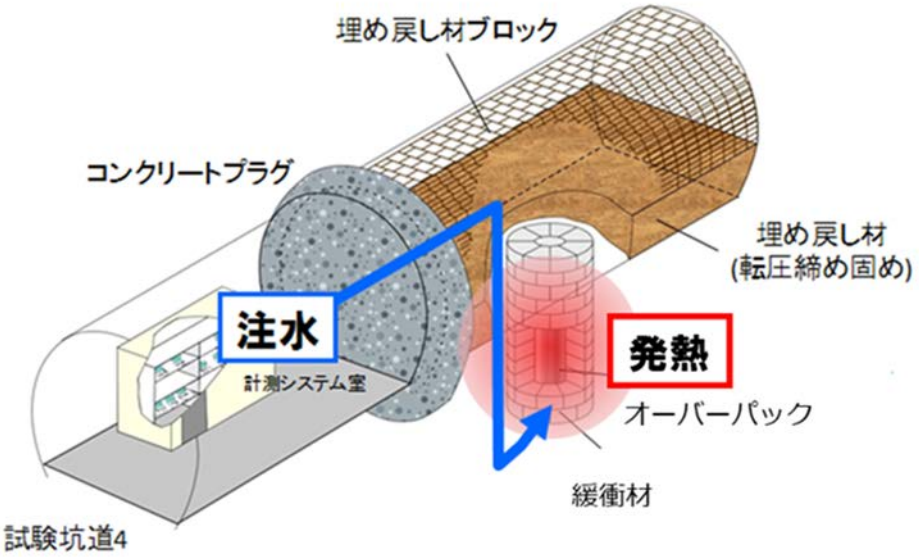


図 11 人工バリア性能確認試験の概念図

4.2 物質移行試験

令和２年度以降は、掘削影響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、掘削影響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（図 12）。また、掘削影響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影響領域を含むブロックスケール（数 m～100m 規模）における遅延性能評価手法の整備を行います。

今年度は、掘削影響領域を対象とした物質移行試験を行います。また、有機物、微生物、コロイドが物質移行特性に与える影響を評価するための試験の条件設定やレイアウト等の検討を行うとともに、物質の移動におよぼす影響のメカニズムを理解するために必要な水質分析や、濃度・種類・微生物の代謝機能などを把握するための特性調査等を進めます。

ブロックスケールを対象とした物質移行試験については、試験対象領域の断層の物質移行特性などを把握するためのトレーサー試験の事前調査を実施します。

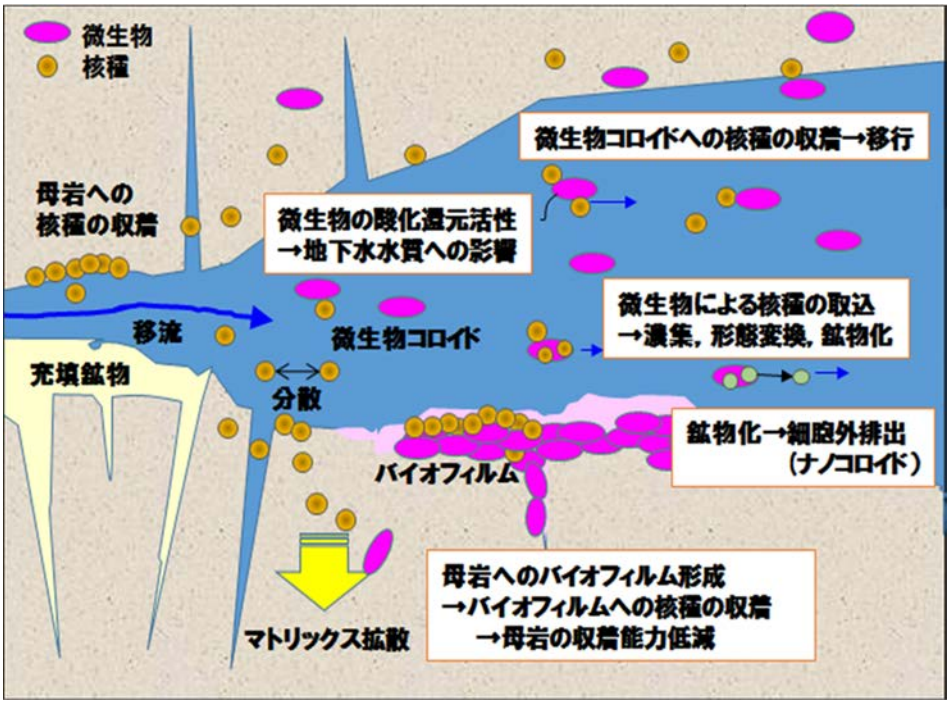


図 12　物質移行の概念（微生物の影響）

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。そのため、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。具体的には、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を行います。また、閉鎖に関する様々なオプションの実証を行います。さらに、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を行います。

今年度は、4.1 節の人工バリア性能確認試験のデータを活用して、人工バリア定置後の緩衝材や埋め戻し材への地下水の浸潤が進んだ状態での回収において考慮すべき条件設定を行います。また、将来の処分場で構築される閉鎖システム（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数値解析的検討、室内試験および工学規模試験を実施します（図 13）。さらに、搬送定置・回収技術の実証に関する試験や解析、緩衝材への水の浸潤挙動を把握するための試験などを実施します。

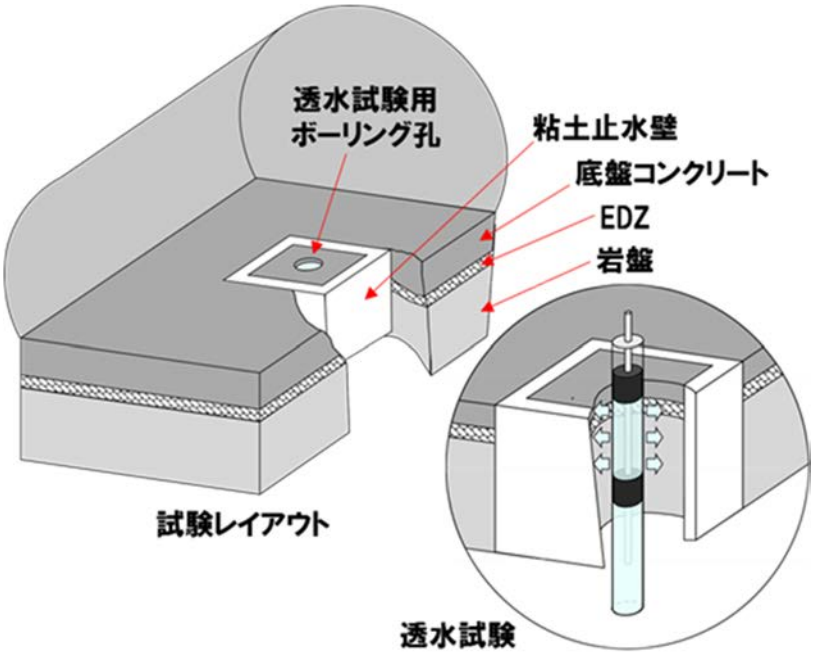


図 13 閉鎖技術の実証に関する試験の概念図

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、人工バリアの品質を踏まえて、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・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となる情報の整理を行います（図 14）。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。

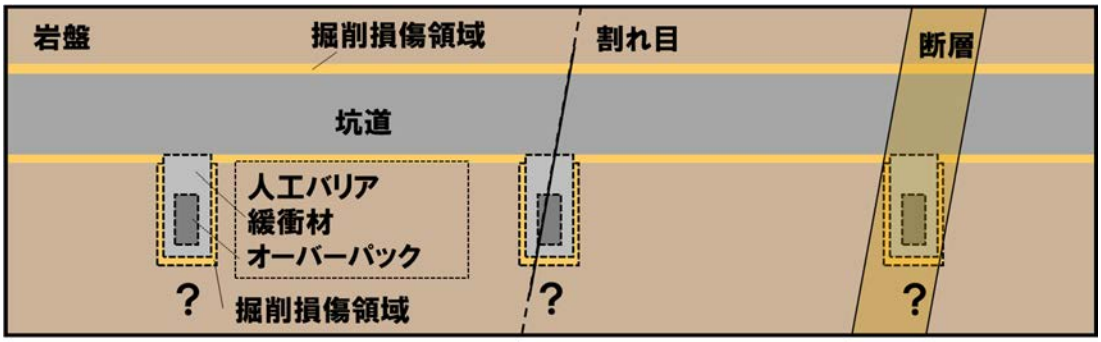


図 14　坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化の概念図

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、緩衝材が 100℃超になった状態などを想定した解析手法の開発が課題となります。そのため、人工バリアシステムの安全裕度の検証に向けて、人工バリアの構成要素である緩衝材の最高温度が 100℃を超えた状態などを想定した場合の解析手法の開発を行います。具体的には、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、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を行い、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。

今年度は、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す（図 15）。また、我が国において考えられる緩衝材の最高温度が 100℃を超えた状態のシナリオの検討に着手します。

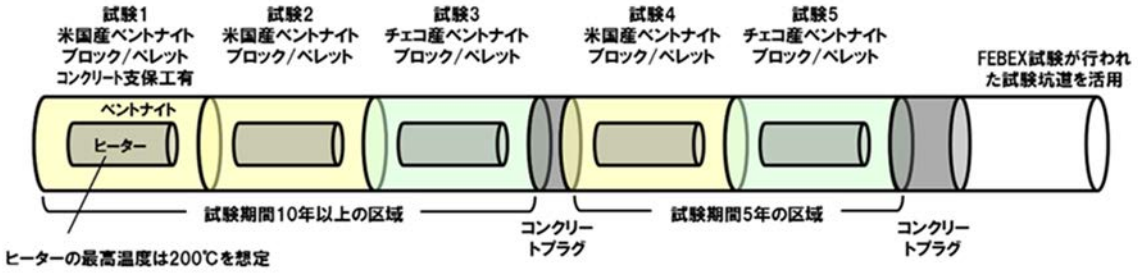


図 15　高温度における人工バリア性能確認試験の概念図（海外での研究事例）

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、断層の幅が数十 cm 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）の実証を行います。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。

今年度は、これまでに実施した断層の水圧擾乱試験や透水試験の結果の詳細解析を行うとともに、幅数 10cm 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す（図 16）。また、水圧擾乱試験のデータを用いて、試験中における断層間の水理的連結性について断層の幾何形状や透水性をパラメータとした解析を実施します。

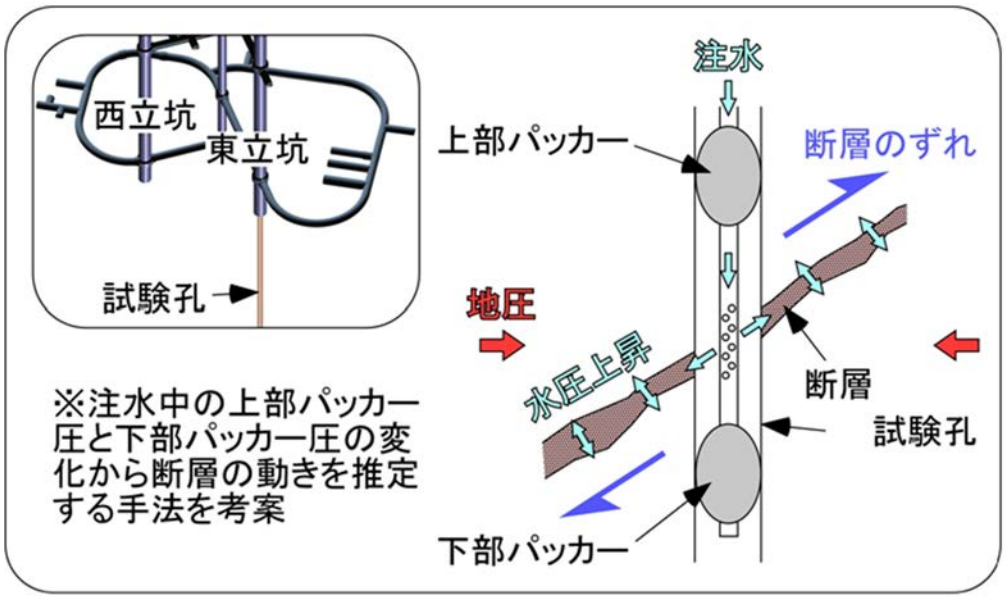


図 16 水圧擾乱試験の概念図（注水圧により断層をずらす試験）

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となります。そのため、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、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、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（10数km×10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・物質移動解析を行います。

今年度は、化石海水領域の三次元分布を地上から調査・評価する技術の高度化を進めます。調査技術の高度化としては、化石海水領域の三次元分布を把握するための物理探査を実施し、地質構造との関連性を再検討します。また、評価技術の高度化としては、化石海水領域を評価する水理解析手法の改良を行うとともに、水理・物質移動解析により地下水の塩濃度分布を推定し、調査結果との比較検討を進めます（図 17）。

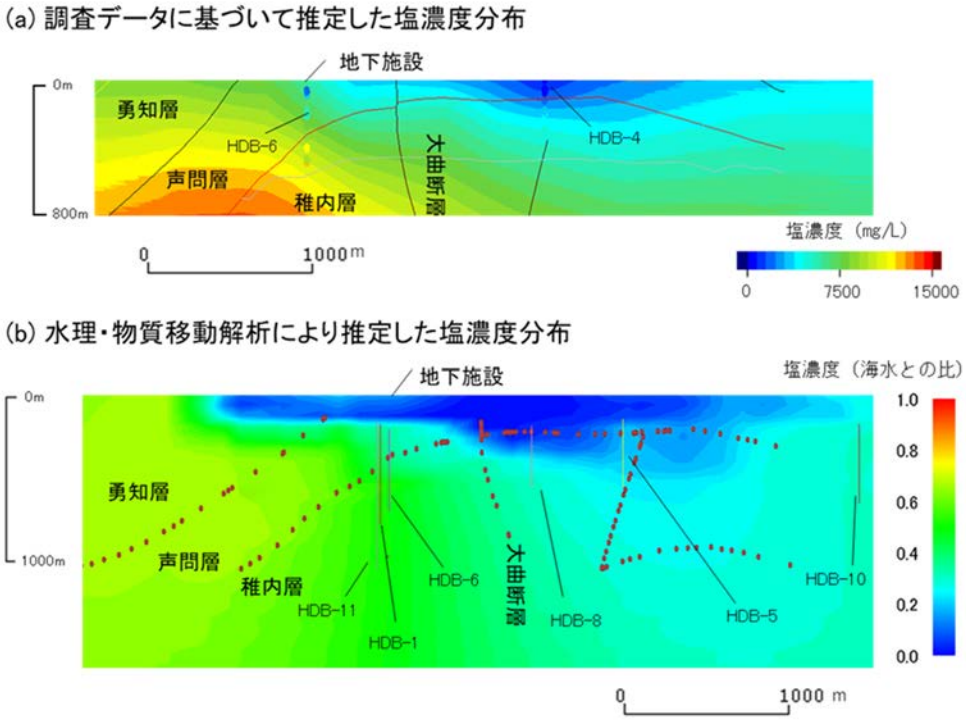


図 17　化石海水領域の三次元分布の推定例

(a)地下水の水質分析により得られた塩濃度分布と(b)水理・物質移動解析による塩濃度分布との比較例

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影響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、机上検討として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（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（図 18）。

今年度は、6.1.1 の検討と合わせて、緩衝材や坑道埋め戻し材の膨潤圧が掘削影響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、同亀裂を対象に実施した既往の樹脂注入試験の結果の解析を実施します。

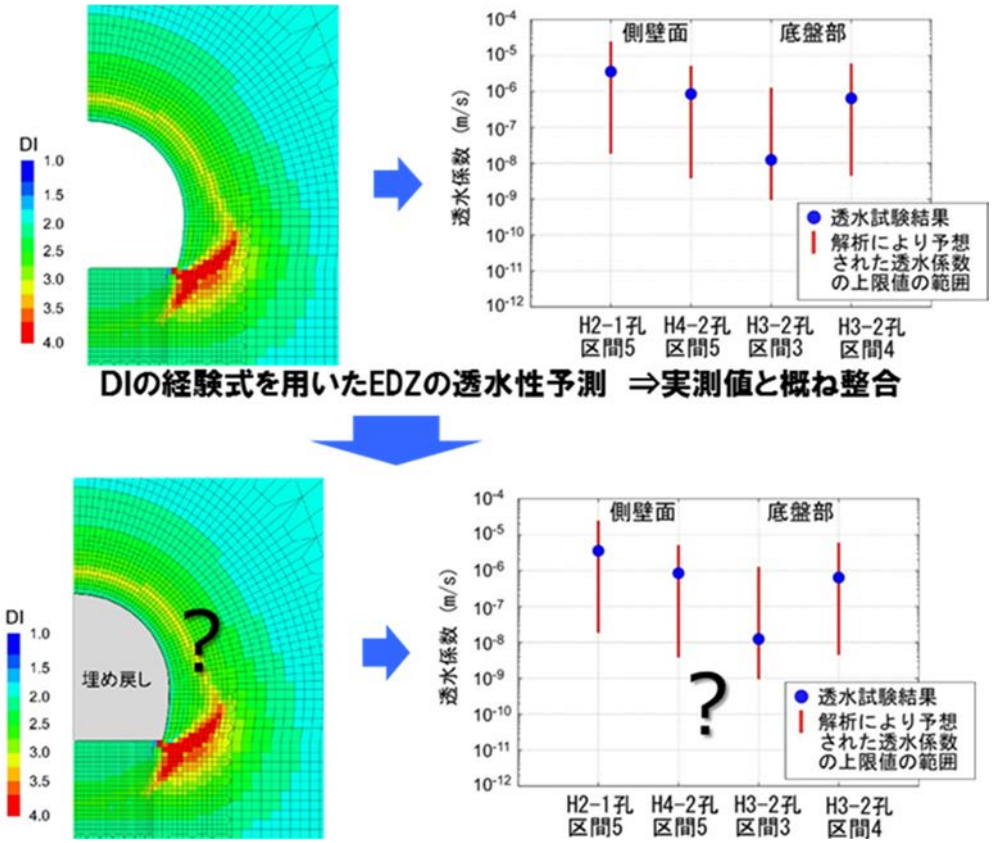


図 18　坑道埋め戻し後の掘削影響領域の透水性を予測するモデルの構築

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・施工や安全評価とリンクした形での指標活用が考えられる情報、例えば、岩盤の水の流れやすさや地球化学的特性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な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なため、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。

地質環境特性データとしては、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行います。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（図 19）。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）と深度350m調査坑道での地震観測を継続します（図 20）。

図 19　地下水の水圧・水質連続モニタリングの様子
（深度350m調査坑道）

図 20　地震観測装置メンテナンスの様子
（西立坑アクセスルーム）

8. 地下施設の維持管理

施設内の機械設備や電気設備などの維持管理（保守点検や修繕など）を実施します（図 21）。

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 21　機械設備の維持管理の様子

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（図 22）。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。

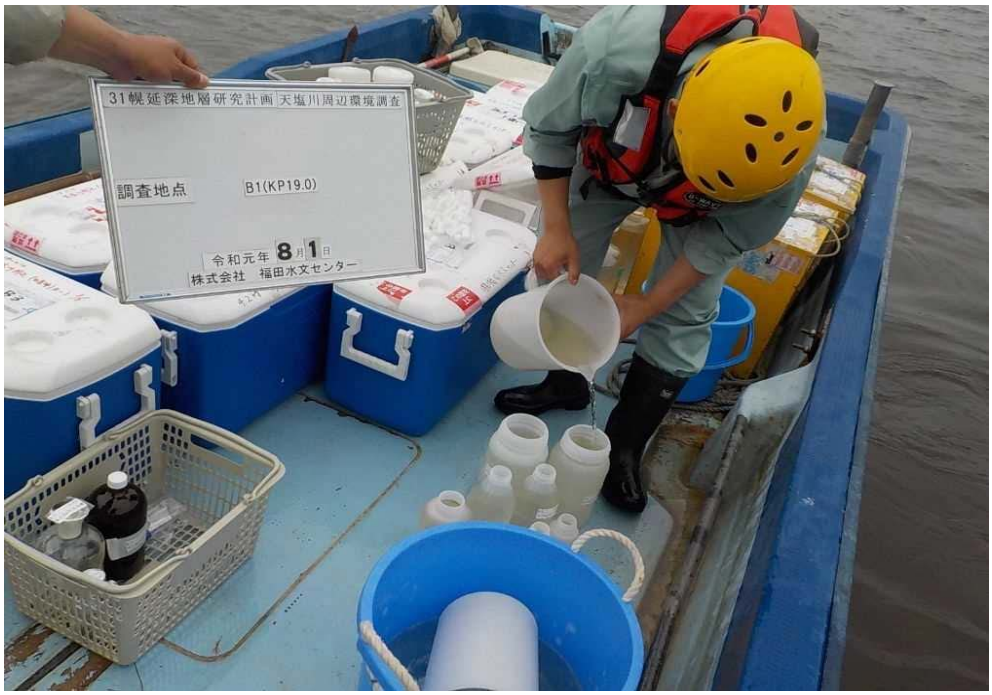


図 22 環境調査の様子（水質）

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。

10.　安全確保の取り組み

地下施設や研究所用地周辺などにおける調査研究にあたっては、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安全パトロール、訓練などを確実に実施するなど、安全確保を最優先に作業を実施します（図 23）。

図 23　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（図 24）。

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、令和 2 年度からの実施も視野に入れ、当初の計画の研究対象の範囲内において、国内外の機関との資金や人材の活用についての意見交換などを進めます。

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[*5]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 24　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

○東京大学：
　堆積軟岩の力学挙動評価の開発に関する研究

○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

○東京工業大学、サンコーコンサルタント：
　スパースモデリングとカルマンフィルターを用いた弾性波トモグラフィ解析手法の研究

---

*5：http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/

○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

○京都大学：
　堆積岩を対象としたEDZの透水性変化計測に関する研究

○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[*6]：
　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[*7]：
　岩盤の水理・化学・生物連成現象に関わる研究

　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[*8]：
　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

○国立環境研究所[*9]：
　地下水中の溶存有機物の特性評価に関する研究

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

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：

---

*6：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。

*7：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。

*8：一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。

*9：国立研究開発法人国立環境研究所は、国内外の環境問題に関するさまざまな研究開発を実施している研究組織です。

*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。

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

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。

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。

掘削影響領域

岩盤が掘削の影響を受け、初期の性質から変化する領域のこと。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る領域や、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る領域のことです。

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】

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。

浸潤時・減熱時

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。また緩衝材は、処分孔に設置した当初は乾燥していますが、坑道を埋め戻すと地下水が緩衝材に入ってきて、時間の経過とともに浸潤していきます。温度が下がれば、地下水が緩衝材に入りやすくなります。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時、浸潤時・減熱時の試験を行っています。

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（自己治癒能力）

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】

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。

This is a blank page.

付録

参考資料

幌延深地層研究計画の令和2年度以降のスケジュール

(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

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	研究期間	
					前半	後半
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。	①② 熱－水－応力－化学連成現象(ガラス固化体設置以降の加熱時(①)から浸潤時・減熱時(②)を模擬した現象)の評価手法(モデル化・解析手法)の確立	② 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)	②-1 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 ②-2 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。 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	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
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(掘削影響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 掘削影響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 掘削影響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影響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、物質移行評価手法の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影響領域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影響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	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

幌延深地層研究計画の令和2年度以降のスケジュール

(2) 処分概念オプションの実証

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	研究期間	
					前半	後半
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	・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。このため、以下を実施。 ① 閉鎖技術（埋め戻し方法：プラグ等）の実証 ② 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） 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）	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
			① 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。 ①-1 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 ①-2 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 ①-3 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 ①-4 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	ー	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
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）	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

幌延深地層研究計画の令和2年度以降のスケジュール

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

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	研究期間	
					前半	後半
水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化	・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10cm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	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
	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。	① 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 ② 三次元分布を調査・解析・評価する手法の確立	①② 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。 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 ②-1 化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証 ②-2 広域スケール（10数km×10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）	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
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影響領域（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影響領域（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。 ②人工バリアの緩衝材や坑道埋め戻し材が掘削影響領域(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 ✓ 坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測するモデルの構築	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

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の）　1	1
比透磁率[b]	（数字の）　1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ s\ A$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ s\ A$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ s\ A$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X 線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ s\ A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 $hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	1 L=1 l=1 $dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	1 t=10^3 kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10^{-19}J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10^{-27}kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10^{11}m

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10^5Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	1 b=100fm^2=$(10^{-12}cm)^2$=$10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デシベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10^{-7} J
ダイン	dyn	1 dyn=10^{-5}N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm^{-2}=0.1Pa s
ストークス	St	1 St =$1cm^2\ s^{-1}$=$10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm^{-2}=10^4cd m^{-2}
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm^{-2} =10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s^{-2}=$10^{-2}ms^{-2}$
マクスウエル	Mx	1 Mx = 1G cm^2=10^{-8}Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm^{-2} =10^{-4}T
エルステッド[a]	Oe	1 Oe ≙ $(10^3/4\pi)$A m^{-1}

(a) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10^{10}Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10^{-4}C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10^{-2}Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10^{-2}Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10^{-9}T
フェルミ		1 フェルミ=1 fm=10^{-15}m
メートル系カラット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10^{-4}kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー），4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年）