

**幌延深地層研究計画
令和 6 年度調査研究成果報告
(概要版)**

令和 7 年 7 月

**国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
幌延深地層研究センター**

目次

1. はじめに.....	1
2. 令和2年度以降の幌延深地層研究計画に示した研究課題.....	2
3. 令和6年度の主な調査研究の成果.....	6
4. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認.....	9
4.1 人工バリア性能確認試験.....	9
4.2 物質移行試験.....	10
5. 処分概念オプションの実証.....	12
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.....	12
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.....	12
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.....	14
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.....	18
6.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化.....	18
6.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握.....	18
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.....	20
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.....	21
8. 地下施設の建設・維持管理.....	22
9. 環境調査.....	23
10. 安全確保の取り組み.....	24
11. 開かれた研究.....	25
12. 用語集.....	26

1. はじめに

幌延深地層研究計画は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センターが、北海道幌延町において実施している、堆積岩を対象とした深地層の研究施設計画です。地層処分に関わる地下研究施設には、最終処分場として使用しない施設で技術を磨く地下研究施設（ジェネリックな地下研究施設）と最終処分候補地の適性を見定める地下研究施設（サイトスペシフィックな地下研究施設）の2つの種類があります。このうち、幌延深地層研究センターの地下施設は、ジェネリックな地下研究施設に該当します。

幌延深地層研究センターでは、北海道および幌延町により受け入れられた、「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」で示した研究課題について、令和2年度以降、第3期および第4期中長期目標期間を目途に取り組むこととしました。令和6年度は、「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」に示した研究課題に対して、第4期中長期計画（令和4年4月1日～令和11年3月31日）に掲げた課題を達成していくための調査研究を実施しました。

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込むことや使用することなく、また最終処分場とはしないことを約束した「幌延町における深地層の研究に関する協定書」の遵守を大前提に、安全を最優先として研究を進めます。研究開発を進めるに当たっては、当初の計画の研究対象の範囲内において、国内外の関係機関の資金や人材を活用していきます。

2. 令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画に示した研究課題

「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」では、必須の課題のうち、引き続き研究開発が必要と考えられる以下の課題（令和2年度以降の必須の課題※）に取り組んでいます。

(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

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を行い、緩衝材の飽和度※などの確認を行います。

・ 物質移行試験

令和 2 年度以降は、これまでに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、有機物や微生物の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 2 年度以降は、人工バリア性能確認試験において、施工方法の違い（締固め、ブロック方式など）による緩衝材の品質の違いを把握するとともに、埋め戻し方法（プラグ※の有無など）・回収方法※による埋め戻し材※の品質の違いを実証試験で明らかにします。さらに、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の開発を行うとともに、人工バリアとその周辺岩盤の領域における上限温度の設定の考え方を提示します。

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力※の検証

令和 2 年度以降は、より大型の断層において、断層のずれが断層内の地下

※このマークの付いた用語は、本概要版の「12. 用語集」（p. 26～p. 28）をご参照ください。

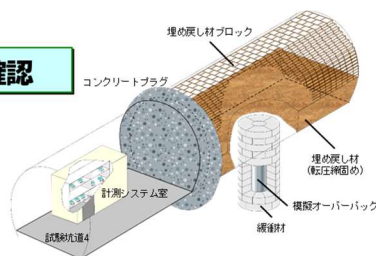
水の流れに与える影響に関して、堆積岩の緩衝能力（自己治癒能力）の作用に係る実証試験を実施します。さらに、地下水の流れが非常に遅い領域を調査してモデル化する技術を実証するとともに、人工バリアのひび割れに対する自己治癒能力を解析する手法を開発します。

幌延深地層研究センターの地下施設で研究対象としている地層は、こえといそう声問層と稚内層であり、声問層は稚内市声問付近、稚内層は稚内市の市街によく認められたことから、それぞれの地名が地層名として古くから与えられています。声問層（珪藻質泥岩）は、主に海底に降り積もった珪藻と呼ばれる植物プランクトンの遺骸から構成され、地下施設周辺の堆積年代は、約 400 万年前～200 万年前と推定されます。一方、稚内層（珪質泥岩）は、声問層と同様の珪藻の遺骸が堆積の進行に伴ってより深くに埋没することで地温の影響などを受けて溶解し、再沈殿してできた鉱物を主成分としており、声問層より硬いのが特徴です。地下施設周辺の稚内層の堆積年代は、約 700 万年前～400 万年前と推定されます。

①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 解体試験のイメージ

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～ビットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化
- **高温（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験**

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

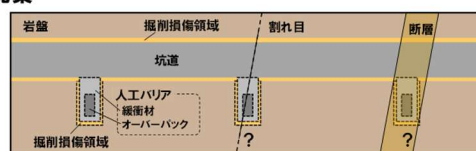


閉鎖技術オプションの整理

③地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

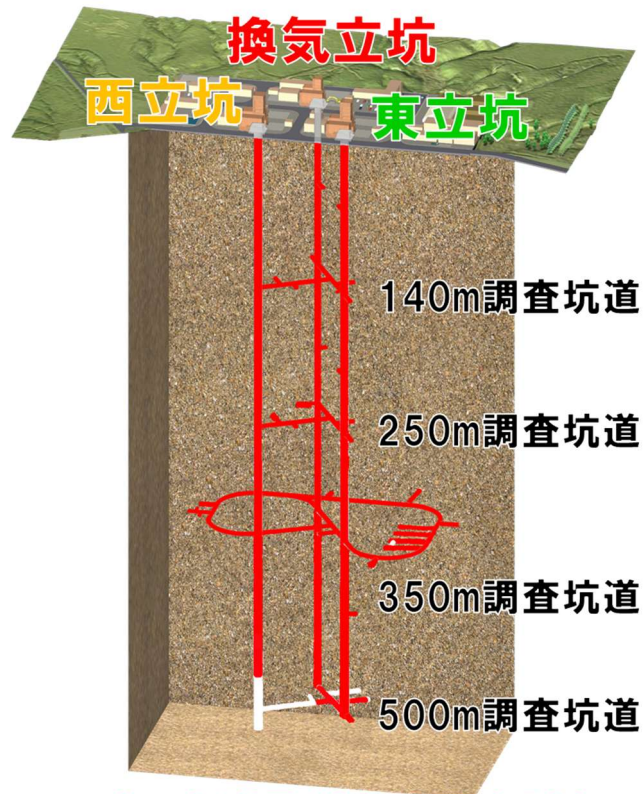
- 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化
 - ・地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握
 - ・地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化
- 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

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



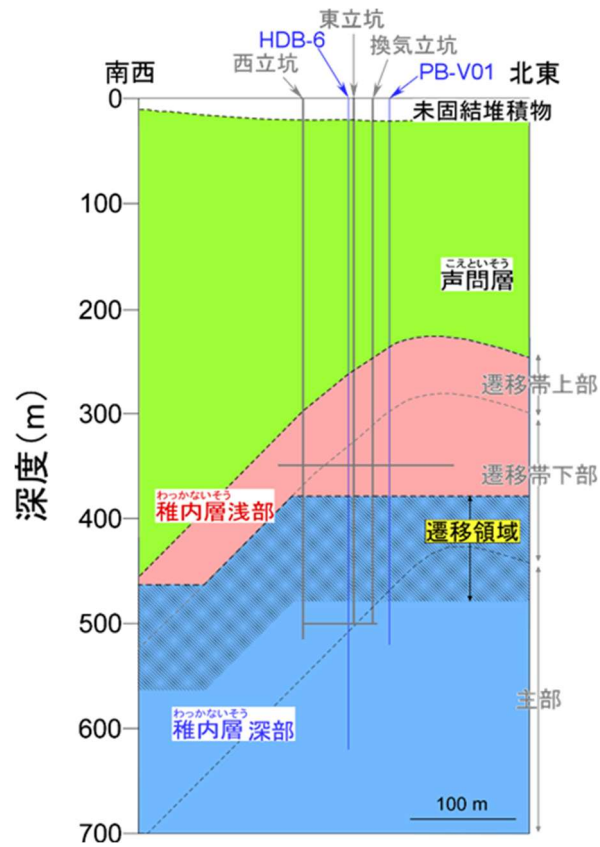
廃棄物定置決定や間隔設定の考え方の整理

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）



施工済み範囲（令和7年3月末現在）

地下施設イメージ図



地下施設周辺の地質断面図

幌延深地層研究計画の令和2年度以降のスケジュール

		第3期		第4期中長期目標期間						
		R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認										
1.1 人工バリア性能確認試験		浸潤時・減熱時のデータ取得、連成モデルの適用性確認 国際プロジェクトにおける解析コード間の比較検証、改良・高度化								
1.2 物質移行試験		掘削影響領域での物質移行に関するデータ取得 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行試験、等								
2. 処分概念オプションの実証										
2.1 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験										
2.1.1 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証		搬送定置・回収技術、閉鎖技術の実証								
2.1.2 坑道スケール〜ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化						坑道スケール〜ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化 廃棄体設置の判断や間隔の決定に必要な情報の整理、等				
2.2 高温度(100℃以上)等の限界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(化石海水領域)の調査・評価技術の高度化		地下水の流れが非常に遅い領域(化石海水領域)の調査・評価技術の検証、等								
3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験		人工バリアの緩衝材や坑道埋め戻し材が掘削影響領域の力学的・水理学的な緩衝能力に与える影響を把握する解析手法の開発								
【施設計画】										
坑道掘削			掘削準備	350m調査坑道	換気立坑					
				東立坑	西立坑	500m調査坑道				
【維持管理】										

本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直していきます。
坑道掘削の工程は今後の施工計画策定や工事進捗に応じて見直していきます。

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

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

3. 令和 6 年度の主な調査研究の成果

令和 6 年度は、「幌延深地層研究計画 令和 6 年度調査研究計画」にしたがって、令和 2 年度以降の必須の課題および地下施設の建設・維持管理などを実施しました。

(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
 - 解体試験までの状態を把握するために既設の自動計測機器でのデータ取得を継続し、減熱過程のデータを取得
- ・ 物質移行試験
 - 掘削損傷領域を対象とした物質移行試験、有機物・微生物・コロイド※を対象とした物質移行試験、ブロックスケール（数 m～100 m 規模）を対象とした物質移行試験について、原位置試験などを実施し、物質の移行挙動を適切に評価・モデル化できることを確認

(2) 処分概念オプションの実証

- ・ 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・回収技術の実証
 - ◇ 坑道に定置した低アルカリ性コンクリートの試験体および坑道壁面から採取した低アルカリ性吹付けコンクリートの分析結果を取りまとめ
 - ◇ 坑道開放条件下におけるコンクリートに隣接する坑道周辺岩盤の長期変化の評価について、坑道掘削から坑道埋め戻し後の再飽和過程の解析手法を整備
 - 閉鎖技術の実証
 - ◇ 令和 4 年度までに開発したトモグラフィ※調査結果の解析手法を 350m 試験坑道 6 周辺の調査に適用し、周辺岩盤の調査手法としての適用可能性を提示
 - 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
 - ◇ 転圧締固め工法、スクリー工法※などの各工法の埋め戻し材の施工方法としての見込みを提示

- ・ 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
 - ◇ 声問層を対象に、2本のボーリング孔において割れ目のつながりが確認された試験区間に対してトレーサー試験を実施し、良好な試験結果を取得
 - 先行ボーリングによる地質環境特性調査ならびに工学的対策を考慮した地下施設および人工バリアの設計・評価技術の体系化
 - ◇ 500m 試験坑道 8・9 における原位置調査に先立ち、坑道周辺の掘削損傷領域の広がりや坑道・ピットへの湧水量を予測
 - ◇ 350m 試験坑道 6 における実規模スケールの坑道の埋め戻しと止水プラグの施工試験に先立ち、ボーリング調査による割れ目の観察や透水試験による坑道周辺の透水係数を評価
 - 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
 - ◇ 地下水圧や湧水量の観測データを用いて、地下施設からの湧水の定常的な発生量を評価
 - 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理
 - ◇ ピット周辺に存在する割れ目の開きにくさやピット周辺の地下水の流れにくさを把握するための調査・評価手法を整理
- ・ 高温（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験
 - 原位置試験※のデータ観測や試験体の解体結果を基に、短期的に 100℃を超えた場合に緩衝材に生じる変質や人工バリアおよびその周辺で発生する現象を取りまとめ

(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
 - 稚内層に類似する地層の場合、地殻変動が地層の透水性に与える影響は、断層や割れ目の水理学的特性とダクティリティインデックス (DI) ※との関係により評価が可能であることを提示

- ・ 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
 - 広域スケール（十数 km×十数 km）の領域を対象に地下水移行時間を解析し、割れ目に沿って地下水が流れている場合の堆積岩の水理学的有効間隙率※の適切な与え方を提示
 - 地下水の流れが非常に遅い領域を調査してモデル化する技術を取りまとめ

（4）地下施設の建設・維持管理、環境調査

- ・ 東立坑および換気立坑の掘削を完了、西立坑および 500m 調査坑道の掘削を開始
- ・ 維持管理として、櫓設備や電気設備などの運転・点検保守および排水処理設備の運転・監視などを実施
- ・ 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行い、排水基準や協定値を超える排水がないことを確認

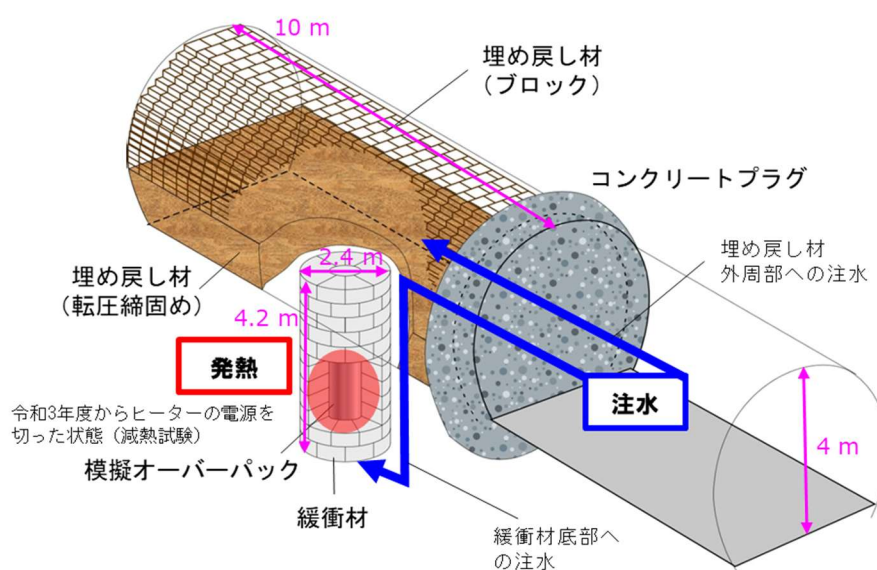
（5）開かれた研究・成果の発信

- ・ 国内機関との研究協力として、北海道科学大学や東京大学などの大学、幌延地圏環境研究所や電力中央研究所などの研究機関との共同研究を実施
- ・ 国外機関との研究協力として、幌延国際共同プロジェクト※を継続
 - 実施計画や進捗状況、結果について、管理委員会などで議論
 - 令和 6 年 6 月に合同タスク会合を幌延深地層研究センターで開催し、坑道の整備状況や試験の準備状況について確認
 - 令和 4 年度後半から令和 6 年度までのフェーズ 1 の研究成果を取りまとめ
- ・ 研究成果を国内外の学会や学術誌などを通じて広く公開

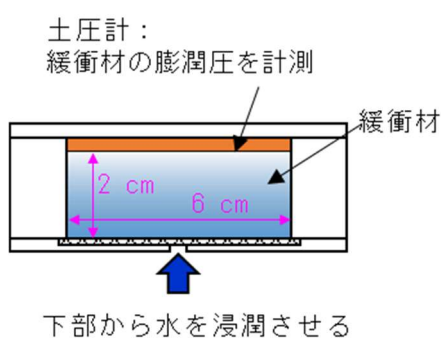
4. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

4.1 人工バリア性能確認試験 (p. 16～p. 18)

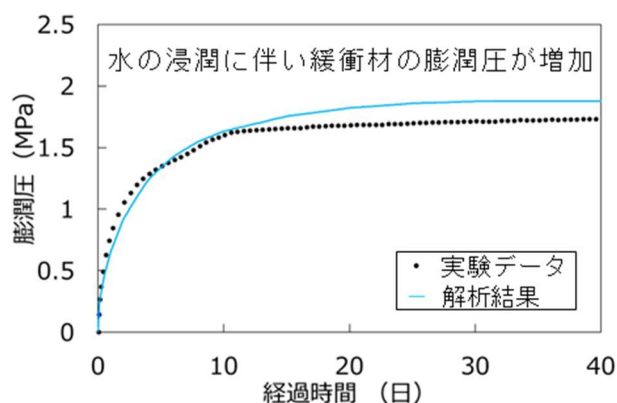
- ・ 廃棄体からの発熱が収まった状態を模擬した条件でのデータ取得を継続
- ・ 幌延国際共同プロジェクト (HIP) のタスク C (実規模の人工バリアシステム解体試験) において、原位置の複雑な現象を対象とした解析検討に向け、室内試験を対象とした解析検討を実施



人工バリア性能確認試験の概念図



(a) 膨潤圧試験のイメージ図



(b) 膨潤圧試験結果と解析結果の一例

膨潤^{*}圧試験結果を活用した解析検討の一例

4.2 物質移行試験 (p. 18～p. 31)

- 掘削損傷領域における物質移行

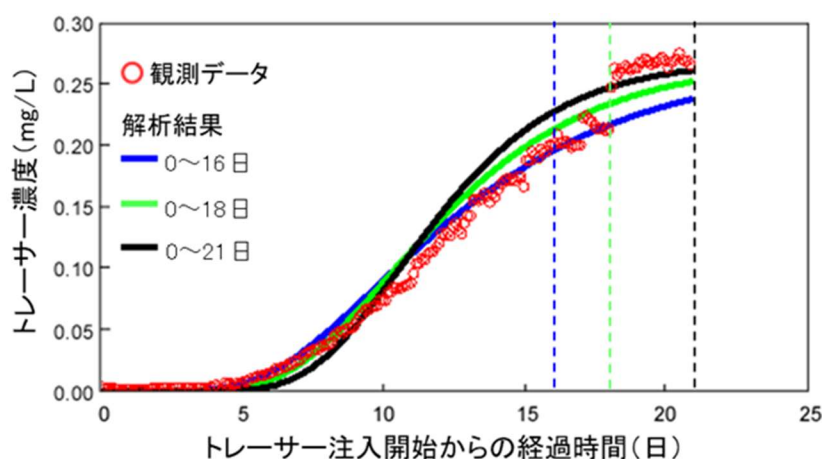
一次元の解析モデルを適用し、堆積岩中の掘削損傷領域の割れ目の物質の移行挙動を評価する上で重要なパラメータ（分散長）を適切に評価

- 有機物・微生物・コロイドの影響評価

原位置での長期の物質移行試験を実施し、地下水に添加した希土類元素の挙動の有機物などによる変化を定量的に評価

- ブロックスケール（数 m～100 m 規模）を対象とした物質移行試験

曲がりくねった非常に長いチューブ状の経路を仮定することで、水理学的連結性※が限定的な物質の移行経路を表現可能であることを提示



ブロックスケールを対象としたトレーサー試験結果の再現解析

令和 6 年度までの成果の概要

- 掘削損傷領域における物質移行

- 掘削損傷領域の割れ目中の物質移行挙動を適切に評価できることを確認
- ⇒ 掘削損傷領域における物質移行のモデル化・解析手法を整備することができ、所期の目標を達成

- 有機物・微生物・コロイドの影響評価

- 地下水中の有機物・微生物・コロイドの特性に関する知見や評価手法を整備
- ⇒ 地下水中の有機物・微生物・コロイドが物質移行に与える影響を定量的に評価する手法を整備することができ、所期の目標を達成

- ・ ブロックスケールを対象とした物質移行試験
 - 稚内層深部を対象とした原位置トレーサー試験によるデータ取得、その結果のモデル化/解析手法を整備
 - ⇒ ブロックスケールの物質移行特性を把握するための一連の手法を提示することができ、所期の目標を達成

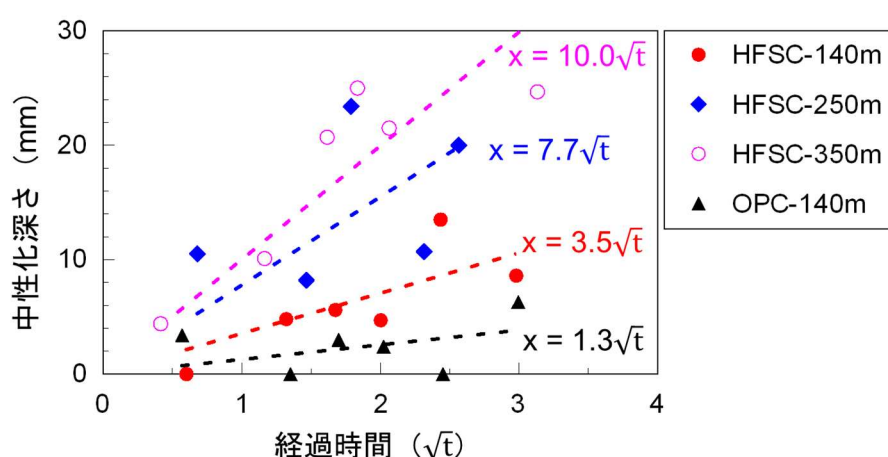
以上により、所期の目標である、堆積岩における物質移行現象の評価手法を整備できました。今後は令和 2 年度以降のスケジュールに示すとおり、「坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」を実施する中で、情報の不足などがあった場合に追加で試験や解析を実施します。

5. 処分概念オプションの実証

5.1 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験

5.1.1 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証 (p. 32～p. 46)

- ・ 搬送定置・回収技術の実証
 - 低アルカリ性セメントを用いたコンクリートの長期的な物性変化の調査手法を整備
 - 坑道開放条件下における坑道周辺岩盤の長期変化の解析手法を整備
- ・ 閉鎖技術の実証
 - トモグラフィ調査の解析手法を止水プラグの施工試験を予定している350m試験坑道6周辺の調査に適用し、周辺岩盤の調査手法としての適用可能性を検討



坑道壁面から採取した吹付けコンクリート試料の中性化深さと経過時間の関係

$$x = A\sqrt{t} \quad (x: \text{中性化深さ (mm)}, A: \text{定数 (mm}/\sqrt{\text{年}}), t: \text{経過時間 (年)})$$

令和6年度までの成果の概要

- ・ 搬送定置・回収技術の整備
 - 吹付けコンクリート支保の化学状態の変化などに伴う長期的な物性変化の評価に必要な知見と調査手法の整備、搬送定置・回収技術の実証について各手法の整備
 - ⇒ 緩衝材や埋め戻し材の状態に応じた除去技術オプション、回収容易性を考慮した概念オプション、品質評価手法の整備ができ、所期の目標を達成

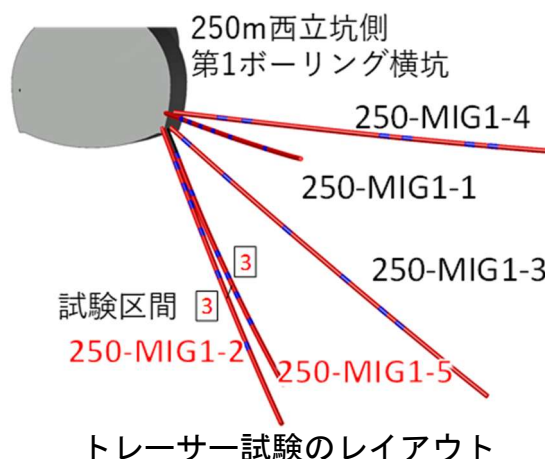
- ・ 閉鎖技術の実証
 - 埋め戻し材や止水プラグの施工方法の原位置環境への適用性・実現性を確認、個別の技術開発で得られた成果を実際の設計・検討に活用できる設計フローとして提示
 - ⇒ 埋め戻し材やプラグなどに期待される性能の具体化や設計評価技術の改良・高度化、という所期の目標を達成
- ・ 人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工の違いによる品質保証体系の構築
 - 埋め戻し材の工法について、適用範囲および施工品質などについて施工方法を選択する際の基盤情報を整備、緩衝材の流出挙動について、総流出量を評価できるベースモデルを整備
 - ⇒ 緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工に係る品質保証の仕組みや考え方を体系的に整理することができ、所期の目標を達成

以上により、所期の目標である、坑道の閉鎖技術や閉鎖システムの性能を担保する設計・施工技術の選択肢の整理ができました。今後は令和2年度以降のスケジュールに示すとおり、「坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」を実施する中で、情報の不足などがあった場合に追加で試験や解析を実施します。

5.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化 (p. 46～p. 66)

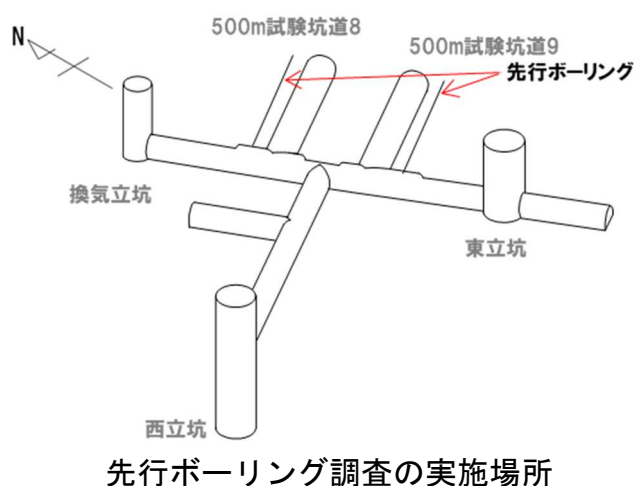
(1) 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化

- ・ 声問層を対象に、割れ目のつながりが確認された試験区間を対象に2回のトレーサー試験を実施し、良好な試験結果を取得

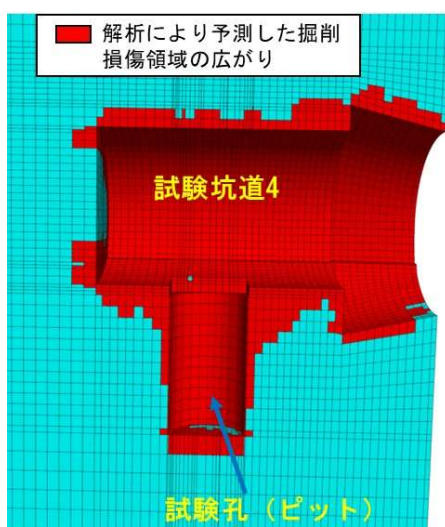


(2) 先行ボーリングによる地質環境特性調査ならびに工学的対策を考慮した地下施設および人工バリアの設計・評価技術の体系化

- ・ 500m 試験坑道 8・9 における原位置調査（ボーリング調査、地質観察、トモグラフィ調査、湧水量計測など）を計画、先行ボーリング調査を実施
- ・ 350m 試験坑道 6 における実規模スケールの坑道の埋め戻しと止水プラグの施工試験に向け、ボーリング調査による割れ目の観察や透水試験による坑道周辺の透水係数を評価

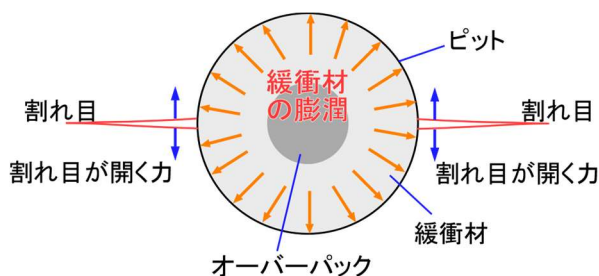


- (3) 多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備
- ・ 地下水圧や湧水量の観測データを用いて、地下施設からの湧水の定常的な発生量を評価
 - ・ 試験坑道の掘削により発生した掘削損傷領域に加え、ピットの掘削による影響も受けるため、ピットの浅い深度では掘削損傷領域が大きく広がることを確認
 - ・ ピット周辺の掘削損傷領域の割れ目の開口幅は、緩衝材の膨潤によって開きにくくなることを確認



350m 試験坑道 4 で掘削した試験孔周辺の EDZ の解析結果

- (4) 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理
- ・ 割れ目の発達する堆積岩を地質学的な情報に基づき分類し、ピット周辺の割れ目の開口幅の推定の信頼性向上が可能であることを確認
 - ・ ピット周辺に存在する割れ目の開きにくさやピット周辺の地下水の流れにくさを把握するための調査・評価手法を整理



緩衝材膨潤時のピット周辺に存在する割れ目の開口幅増大の概念図

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（p. 67～p. 74）

- ・ 令和5年度に開始した原位置試験のモニタリングを継続
- ・ 100℃を超えるヒーター温度での加熱により緩衝材ブロックのヒーター接触部ではひび割れが生じることを確認
- ・ ヒーター近傍の緩衝材の色調が変化した範囲では飽和度の低下を確認
- ・ ヒーター近傍の緩衝材では、温度履歴を受けていない緩衝材と比べて一軸圧縮強度が低く透水係数が高い傾向を確認



(a) ヒーター接触部に認められた
緩衝材ブロックのひび割れ



(b) 緩衝材ブロック内側の色調変化

試験体の解体状況

令和6年度までの成果の概要

- ・ 原位置試験
 - 100℃を超えるヒーター温度での加熱により緩衝材ブロックのヒーター接触部ではひび割れが生じることを確認
 - ヒーター近傍の緩衝材では、温度履歴を受けていない緩衝材と比べて一軸圧縮強度が低く透水係数が高い傾向を確認
- ・ 室内試験
 - 高温度での加熱により緩衝材にひび割れが生じてもそれらが優先的な水みちとなるような浸潤挙動がないことを確認
 - 生じたひび割れは、蒸留水を浸潤させた場合および塩水を浸潤させた場合のいずれも閉塞
 - スメクタイトのイライト（雲母鉱物）化^{*}割合の計算による見積もり

- ⇒ 短期的に 100℃を超えた場合に緩衝材に生じる変質や人工バリアおよびその周辺に発生する現象を把握するとともに、人工バリア周辺における上限温度設定の考え方を整備

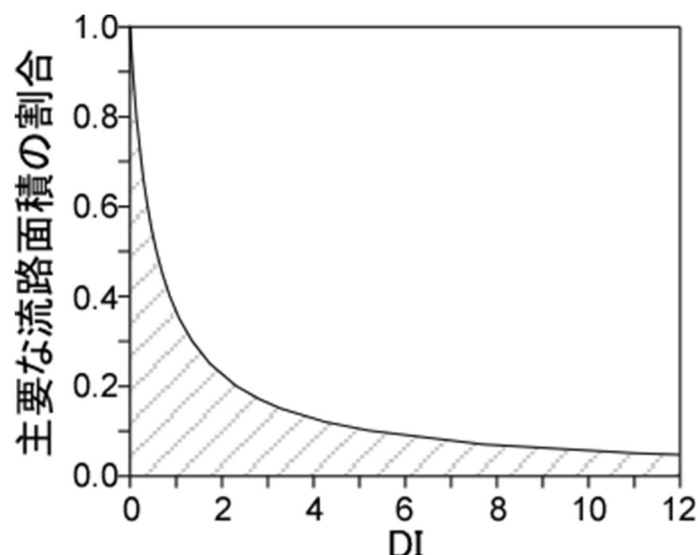
以上により、所期の目標である、想定外の要因により緩衝材温度が 100℃を超えた場合の挙動の確認を完了しました。今後は令和 2 年度以降のスケジュールに示すとおり、「坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」を実施する中で、情報の不足などがあった場合に追加で試験や解析を実施します。

6. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

6.1 水圧擾乱試験※などによる緩衝能力の検証・定量化

6.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握 (p. 75~p. 80)

- ・ 過年度に実施した断層の水圧擾乱試験の結果の詳細な解析
- ・ 割れ目の水理学的連結性の指標となる水みちのつながり方の次元※とダクティリティインデックス (DI) の関係を理解するための数値シミュレーションなどを実施
- ・ 稚内層に類似する地層の場合、地殻変動が地層の透水性に与える影響は、断層や割れ目の水理学的特性と DI との関係により評価可能であることを提示



割れ目内の隙間の開閉現象に関する理論的な計算により導出される割れ目内の主要な流路面積の割合と DI の関係

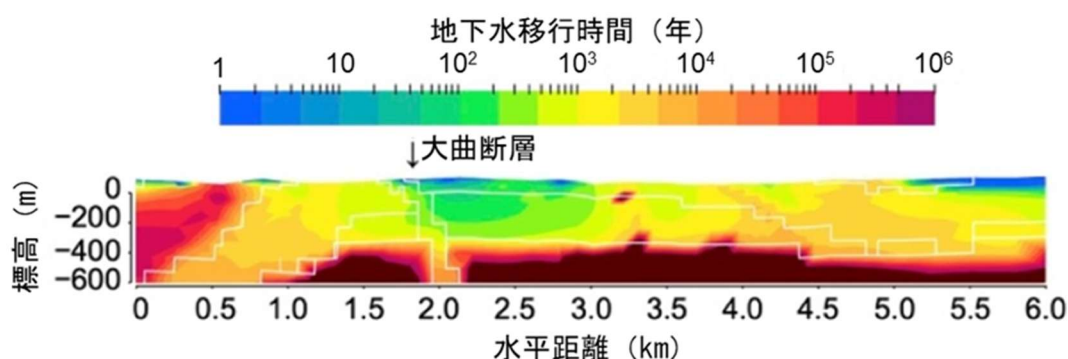
令和 6 年度までの成果の概要

- ・ 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については、稚内層と類似する地層の場合、断層や割れ目の代表的な透水性とダクティリティインデックス (DI) の関係や水圧擾乱試験を適用することにより、地殻変動の影響を考慮した地層の長期的な透水性を評価可能
- ・ 断層の力学的な安定性を表す指標のひとつであるせん断※剛性を水圧擾乱試験により原位置で適切に評価できることを確認

以上により、所期の目標である、地殻変動が透水性に与える影響を推測するための手法の整備を完了しました。今後は令和2年度以降のスケジュールに示すとおり、「坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」を実施する中で、情報の不足などがあった場合に追加で試験や解析を実施します。

6.1.2 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 (p. 80～p. 85)

- ・ 広域スケール(十数 km×十数 km)の領域を対象に地下水移行時間を解析し、割れ目に沿って地下水が流れている場合の堆積岩の水理学的有効間隙率の適切な与え方を提示
- ・ 地下水の流れが非常に遅い領域を調査してモデル化する技術を取りまとめ



地下水移行時間の解析結果の例

令和6年度までの成果の概要

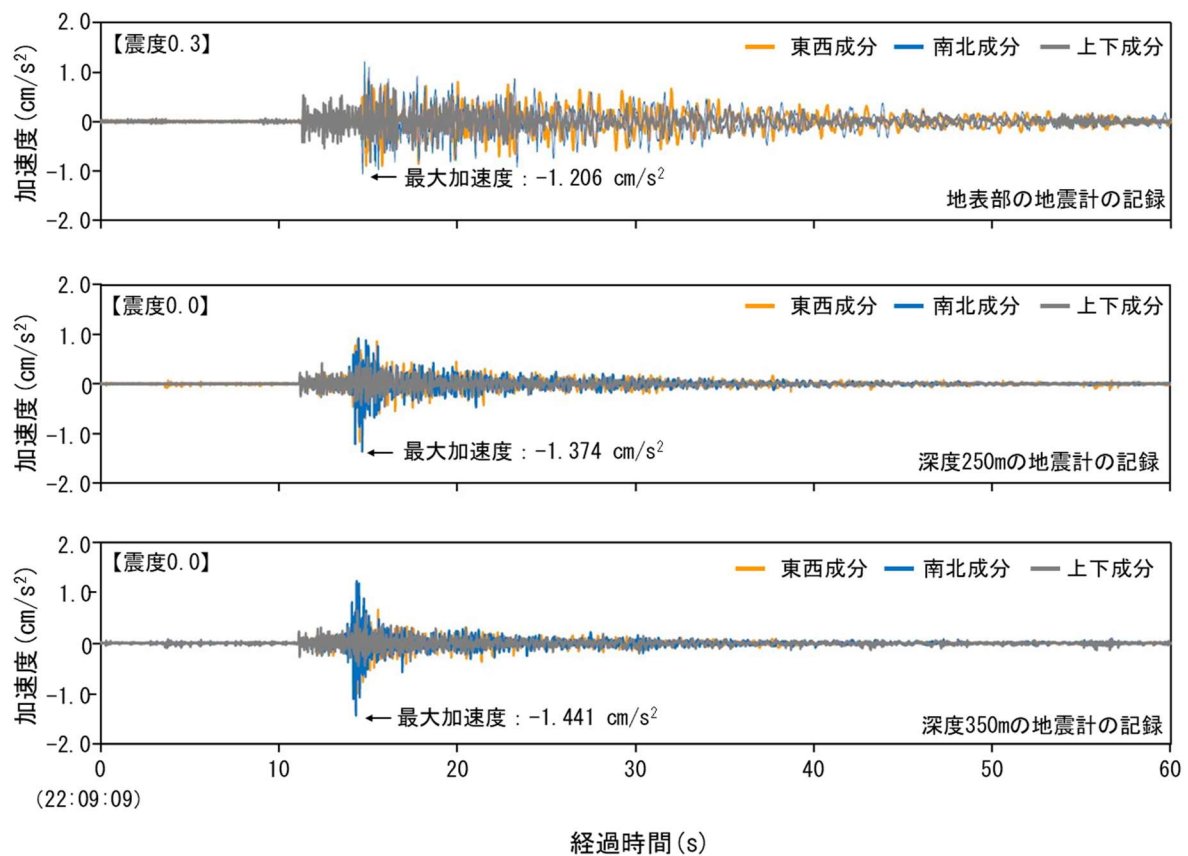
- ・ 化石海水の三次元分布を推定する以下の手順を提示
 - ① 数十km四方を対象とした電磁探査※
 - ② 数km四方を対象とした電磁探査
 - ③ 三次元比抵抗分布の推定結果とボーリング調査地点の選定
 - ④ 電磁探査結果に基づくボーリング調査地点の選定結果の妥当性確認
 - ⑤ 地球統計学的手法による酸素同位体比※の三次元分布の推定
- ・ 割れ目水と間隙水の水質コントラストおよび炭素年代測定を利用した地下水流動の評価手法を構築
- ・ 幌延地域の埋没続成作用※のモデル化と数値解析により化石海水の水質形成機構を定量的に理解
- ・ 広域スケールを対象とした地下水移行時間解析手法を整備

以上により、所期の目標である、地下水の流れが非常に遅い領域の分布を把握するための技術の構築を完了しました。今後は令和2年度以降のスケジュールに示すとおり、「坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」を実施する中で、情報の不足などがあった場合に追加で試験や解析を実施します。

7. 令和 2 年度以降の必須の課題への対応に必要なデータ取得

(4) 地震観測 (p. 93～p. 95)

- ・ 地下施設内の 4 台の地震計と地表の 1 台の地震計で地震観測を実施
- ・ 令和 6 年度に幌延町宮園で震度 1 以上を観測した地震は令和 6 年 9 月 24 日の 1 回、震源は留萌地方中北部、マグニチュード 3.7、最大震度 4（天塩町川口）
- ・ 地表に比べ地下では揺れ（震度）が小さい

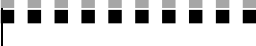


地下施設での観測波形（令和 6 年 9 月 24 日の地震）

8. 地下施設の建設・維持管理

- ・ 令和5年度の工事实績を反映した施設整備業務の計画工程のもと、東立坑および換気立坑の掘削が完了するとともに、東立坑の掘削完了時期の前倒しに伴い、当初の計画より早期に西立坑および500m調査坑道の掘削を開始
- ・ 令和7年3月31日時点における掘削進捗は、西立坑深度472 m、500m調査坑道112.9 m
- ・ 維持管理として、櫓設備や電気設備などの運転・点検保守および排水処理設備の運転・監視などを実施
- ・ 掘削土（ズリ）置場へ掘削土（ズリ）の搬入を継続
- ・ 地下施設からの排水と掘削土（ズリ）置場に設置している浸出水調整池の浸出水について、排水処理設備で処理を行い、排水基準値を超過していないことを確認した後、排水管路を通じて天塩川へ放流

地下施設整備の実績工程表（令和6年度）

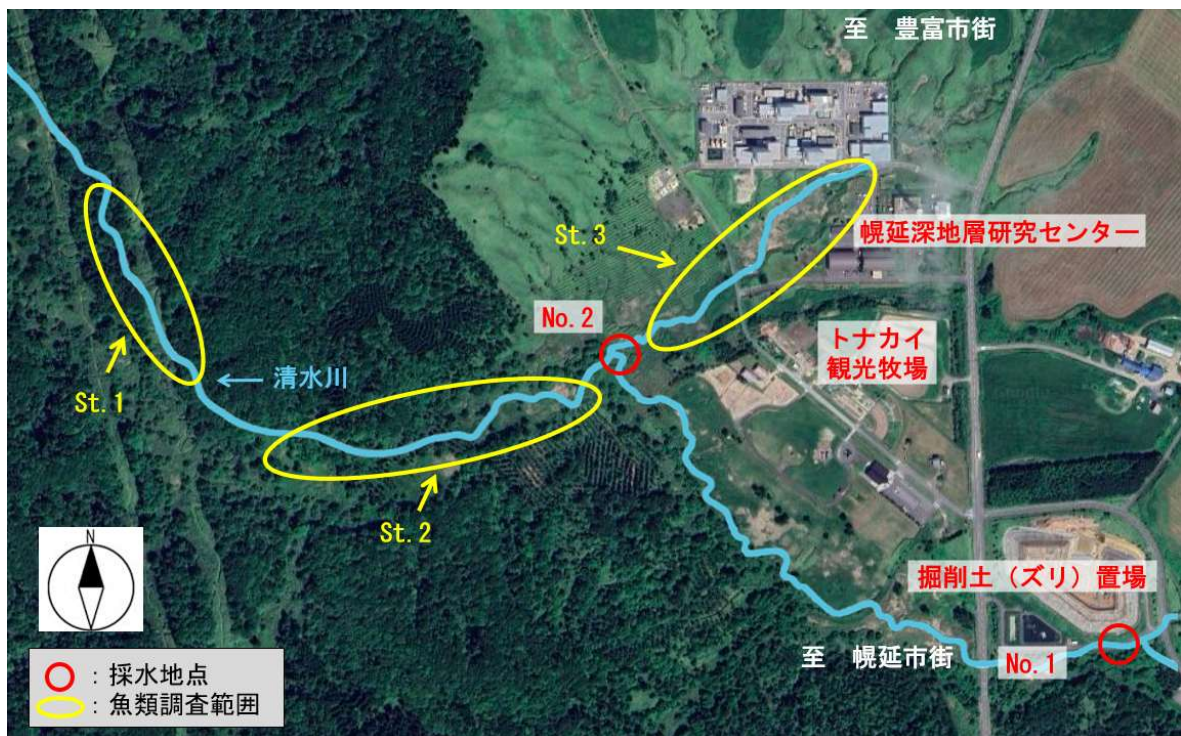
	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期
換気立坑	掘削 			
東立坑	掘削 			
西立坑	湧水抑制対策 			準備 掘削
500m調査坑道			準備 掘削 	

■ 令和6年度施設整備業務計画工程（令和6年3月公表）

■ 令和6年度実績

9. 環境調査

- ・ 排水処理設備から天塩川へ放流している排水量の監視を行うとともに、処理前後の排水の水質、天塩川の水質、浄化槽排水の水質調査を実施
- ・ 掘削土（ズリ）置場の周辺への影響を監視するため、掘削土（ズリ）置場周辺の地下水の水質調査を実施
 - 分析結果の詳細は、幌延深地層研究センターのホームページ*1で公開しており、環境への影響はないことを確認
- ・ 地下施設整備の再開に伴い、掘削土（ズリ）の土壌溶出量試験を実施
 - 分析の結果、すべての項目において、土壌汚染対策法の第2溶出量基準値以下であることを確認*2
- ・ 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
 - 各調査結果は、これまでと比較して大きな変化なし



環境調査実施場所

*1 : <https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/disclosure/suishitsu.html>

*2 : <https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/disclosure/dojyou.html>

10. 安全確保の取り組み

- ・ 直営作業、請負作業、共同研究作業では、作業の計画段階からリスクアセスメントを実施し、安全対策の妥当性の確認を実施
- ・ 所長や保安・建設課などによる定期的な安全パトロールを実施し、現場の安全確認や改善などを実施
- ・ 新規配属者や請負作業・共同研究作業の責任者などに対して安全教育を実施
- ・ 全国安全週間などの機会に、従業員のみならず請負企業も含めた安全行事を実施し安全意識を向上



安全行事の実施（安全大会：令和6年7月1日）

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、国内外の大学・研究機関との共同研究や研究協力をはじめ、広く関連する専門家の参加を得て進めています。

○国内機関との研究協力

➤ 北海道科学大学

人工知能を用いた画像処理により坑道壁面の地質情報を取得する方法に関する研究

➤ 東京大学

地下研究施設原位置における核種移行への有機物影響に関する研究
微生物を指標とした堆積岩中の水みち調査手法の開発

➤ 名古屋大学

炭酸カルシウムを主成分とするコンクリーション化※による、水みちとなる割れ目や透水性空隙の自己シーリングに関する研究

➤ 幌延地圏環境研究所

堆積岩を対象とした岩盤力学や微生物などに関する研究

➤ 電力中央研究所

地下微生物とニアフィールド構成材料の相互作用に関する研究
堆積軟岩を対象とした掘削影響評価技術に関する基礎的研究

など

○国外機関との研究協力

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

フェーズ1（令和4年度後半～令和6年度末）の各タスクの成果として、250m 調査坑道周辺の声問層における物質移行特性の理解、500m 調査坑道掘削時の湧水量や掘削損傷領域の広がりに関する解析、人工バリア性能確認試験の解体試験計画の提示などについて取りまとめた報告書を作成

など

12. 用語集

(五十音順)

埋め戻し材

処分場において、廃棄体を定置した後の処分坑道、アクセス坑道や連絡坑道を埋め戻す際に使用する材料です。埋め戻した後の坑道内が選択的な水みちとならないように、埋め戻し材に要求される性能のひとつとして、透水性が低いことが挙げられます。

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、地下水の流れや物質の移動が非常に遅いと考えられます。

緩衝材

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

緩衝材流出・侵入現象

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

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。

原位置試験

本報告書では、実際の地下環境下で行う試験のことを指します。

坑道スケール

実際の処分場では、地下深くに多数の坑道が掘削されます。これらの坑道の配置を検討するために必要な評価範囲（数百 m 程度）のことを指します。

コロイド

大きさが 1 nm～1 μ m の粒子が水などの液体中に浮遊し、容易に沈まない状態を指します。コロイドが地層中の放射性核種の移行に影響を及ぼす可能性が指摘されています。

コンクリーション化

地層中の砂や泥の粒子の間に鉱物が急速に析出・沈殿して隙間を充填し、コンクリートのような硬い状態になることです。

酸素同位体比

酸素同位体比とは、質量数 16 の酸素に対する質量数 18 の酸素の割合のことです。

支保

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

処分概念オプション

幌延深地層研究計画における処分概念オプションとは、地下深くの岩盤中に高レベル放射性廃棄物を埋設するという、地層処分の概念を実現するための色々な方法のことです。

人工バリア

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

水圧擾乱試験

注水により断層内の水圧を上昇させ、断層の剛性（変形しにくさ）や強度（破壊しにくさ）を低下させることにより、断層をずらす試験のことを指します。

水理学的有効間隙率

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

水理学的連結性

地下水の流れを評価する上で、断層や割れ目の中の隙間のつながり具合を水理学的連結性と言います。岩盤の中には、大小さまざまな断層や割れ目が存在し、これらは独立して存在したり、他とつながって存在したりします。岩盤の中での地下水の流路は、断層や割れ目内の隙間が主なものですが、その隙間が二次元的あるいは三次元的に広くつながっている場合には、水理学的連結性が高いと表現します。一方、断層や割れ目内の隙間が一部でしかつながっていない場合は、水理学的連結性が低いと表現します。

スクリー工法

本報告書では、スクリーコンベアを用いて埋め戻し材を充填する工法を指します。

スメクタイトのイライト化

スメクタイトおよびイライトはどちらも粘土鉱物の一種であり、スメクタイトは、一般に温度や圧力などの影響によってイライトに変化します。スメクタイトは人工バリアのひとつである緩衝材の材料であるベントナイトに含まれており、スメクタイトがイライトに変化することで、ベントナイトの透水性や核種の収着性などの特性が変化します。

せん断

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

堆積岩の緩衝能力

本報告書では、地殻変動（地震など）の影響により擾乱を受けた断層や割れ目の透水特性が、その岩盤の力学特性に応じて一定の範囲に留まろうとする能力、あるいは時間経過とともに元の状態に戻ろうとする能力のことを指します。

ダクティリティインデックス（DI）

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

多連接坑道

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

電磁探査

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

透水性

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

$$Q=kAh/l$$

ここで、Q：流量 (m³/s)、k：透水係数 (m/s)、A：断面積 (m²)、h：水圧差 (m)、l：長さ (m) を表します。

トモグラフィ

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

トレーサー

本報告書では、地下水中に溶存する物質が地層中を移行する際の経路や収着・拡散といった挙動を調査するために、地下水に添加する物質をトレーサーと呼びます。なお、幌延深地層研究計画では放射性のトレーサーを用いた試験を行うことはありません。

ピットスケール

廃棄体および人工バリアを垂直に設置する竖置き方式の場合には、処分坑道に多数のピット（処分孔）が掘削されます。これらのピットの配置を検討するために必要な評価範囲（数十 m 程度）のことを指します。

プラグ

ベントナイトやコンクリートなどが材料となって構成される、緩衝材や埋め戻し材が移動・膨出するのを防ぐため、あるいは掘削損傷領域の地下水の移動を抑制するために、処分坑道の両端やその周辺に設けられる構造物です。なお、本報告書で記載のある「止水プラグ」は、掘削損傷領域の地下水の移動を抑制するためにベントナイトを混ぜた材料で構築するものを指します。

膨潤

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

飽和度

土や岩盤などの間隙に含まれる水の体積と間隙の体積との比を表す値です。

幌延国際共同プロジェクト

幌延国際共同プロジェクト (Horonobe International Project: HIP) は、アジア地域の地層処分に関わる国際研究開発拠点として、幌延深地層研究センターの地下施設を利用した研究開発を国内外の機関で協力しながら推進し、我が国のみならず参加国における先進的な安全評価技術や工学技術に関わる研究開発の成果を最大化することを目的としています。(https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/status/hip/project_hip2.html)

埋没続成作用

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

水みちのつながり方の次元

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

令和 2 年度以降の必須の課題

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