

幌延深地層研究計画
令和8年度調査研究計画

令和8年4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

本資料に関するお問い合わせは、下記へお願いいたします。

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 総務・共生課

〒098-3224 北海道天塩郡幌延町字北進432番地2

TEL : 01632-5-2022

FAX : 01632-5-2033

目次

1.	はじめに	1
2.	令和2年度以降の幌延深地層研究計画に示した研究課題	3
	(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認	3
	(2) 処分概念オプションの実証	3
	(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証	4
3.	令和7年度の成果および令和8年度の計画の概要	9
3.1	令和7年度の成果の概要	9
	(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認	9
	(2) 処分概念オプションの実証	9
	(3) 地下施設の建設・維持管理	11
	(4) 国内外の資金や人材の活用	11
3.2	令和8年度の計画の概要	12
	(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認	12
	(2) 処分概念オプションの実証	13
	(3) 令和2年度以降の必須の課題への対応に必要なデータ取得	14
	(4) 地下施設の管理、環境調査および安全確保の取り組み	15
	(5) 開かれた研究	15
4.	実際の地質環境における人工バリアの適用性確認	19
4.1	人工バリア性能確認試験	19
5.	処分概念オプションの実証	23
5.1	人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験	23
5.1.1	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 ..	23
	(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 ..	25
	(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	32
	(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	38
	(4) 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要なとなる情報の整理	45
6.	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	51
7.	地下施設の管理	52
8.	環境調査	53
8.1	排水量および水質調査	53
8.2	研究所用地周辺の環境影響調査	53
9.	安全確保の取り組み	54
10.	開かれた研究	55

10.1 国内機関との研究協力	56
10.2 国外機関との研究協力	57
11. 用語集	59
参考資料.....	64
参考文献.....	73

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）と最終処分施設建設地としての適性を見定める地下研究施設（サイトスペシフィックな地下研究施設）の2つの種類があります。このうち、幌延深地層研究センターの地下施設は、ジェネリックな地下研究施設に該当します。

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

※ このマークがついた用語は、11.用語集に説明を掲載しています。

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

*2：第4期中長期目標の期間は、令和4年4月1日～令和11年3月31日の7年間です。

*3：令和2年度以降の研究期間は9年間であり、その期間を通じて必要な成果を得て研究を終了できるように取り組むこととしています（https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/press/31/press_1206.html）。

なお、令和7年2月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、高レベル放射性廃棄物については、「最終処分の実現に向け、特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針に基づき、国が前面に立ち取り組む。」との考え方が示され、「地層処分の技術的信頼性の更なる向上に向け、引き続き、国、NUMO^{*4}、JAEA^{*5}等の関係機関が、全体を俯瞰して技術開発を着実に進め、最新知見を定期的に反映するとともに、その専門的な評価が国民に十分に共有されることが重要である。この際、幌延の深地層研究施設等における研究成果を十分に活用していく。」ことが示されました。

また、文部科学省、経済産業省および原子力規制委員会により「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が達成すべき業務運営に関する目標（中長期目標）^{*6}」（以下、第4期中長期目標）が定められており、この第4期中長期目標を達成するために、原子力機構は、「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の中長期目標を達成するための計画（中長期計画）（令和4年4月1日～令和11年3月31日）」（以下、第4期中長期計画）を策定しました。第4期中長期計画では、幌延深地層研究計画について、「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」で示した3つの研究課題を進めること、「研究の実施に当たっては、稚内層深部（深度500m）に坑道を展開して研究に取り組むとともに、更なる国内外の連携を進め、研究開発成果の最大化を図る」こととしています。

幌延深地層研究センターは、「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」を、これまでと同様に、放射性廃棄物を持ち込むことや使用することなく、また最終処分場とはしないことを約束した「幌延町における深地層の研究に関する協定書」の遵守を大前提に、安全を最優先として研究を進めます。研究開発を進めるに当たっては、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。

*4：原子力発電環境整備機構（Nuclear Waste Management Organization of Japan）の略称です。NUMOは、原子力発電所で使い終えた燃料（使用済燃料）を再処理する過程で発生する高レベル放射性廃棄物および関連して発生する長半減期核種の濃度が高い低レベル放射性廃棄物（地層処分相当低レベル放射性廃棄物）の地層処分を行う実施主体です。

*5：原子力機構（Japan Atomic Energy Agency）の略称です。

*6：原子力機構は、原子力基本法第2条に規定する基本方針および第7条に基づき、原子力に関する基礎的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。

2. 令和2年度以降の幌延深地層研究計画に示した研究課題

「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」では、必須の課題のうち、引き続き研究開発が必要と考えられる以下の課題（令和2年度以降の必須の課題^{*}）に取り組んでいます（図1、表1、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^{*}などの確認を実施します。

また、令和元年度までの物質移行試験により、トレーサー^{*}試験手法を確立することができました。ただし、これまでの研究結果から、幌延の堆積岩において、有機物や微生物が、放射性物質の岩盤への吸着を妨げ、閉じ込め効果を低下させる可能性が確認されており、令和2年度以降は、確立した試験手法を用いて掘削損傷領域^{*}での物質移行に関するデータ取得を実施するとともに、有機物や微生物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

令和元年度までの試験では、実際の環境下において、坑道の埋め戻し方法の違い（締固め、ブロック方式など）による埋め戻し材^{*}の基本特性（密度や均一性）を把握しましたが、緩衝材の施工方法や坑道閉鎖に関する様々なオプションの検討には至っていません。令和2年度以降は、人工バリア性能確認試験において、注入する地下水の圧力や量を増加させ、緩衝材に十分に水を浸潤させた状態を確保して施工方法の違い（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、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に対する安全裕度の検証に向けて、緩衝材が100℃超になった状態を想定した解析手法を開発します。

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

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

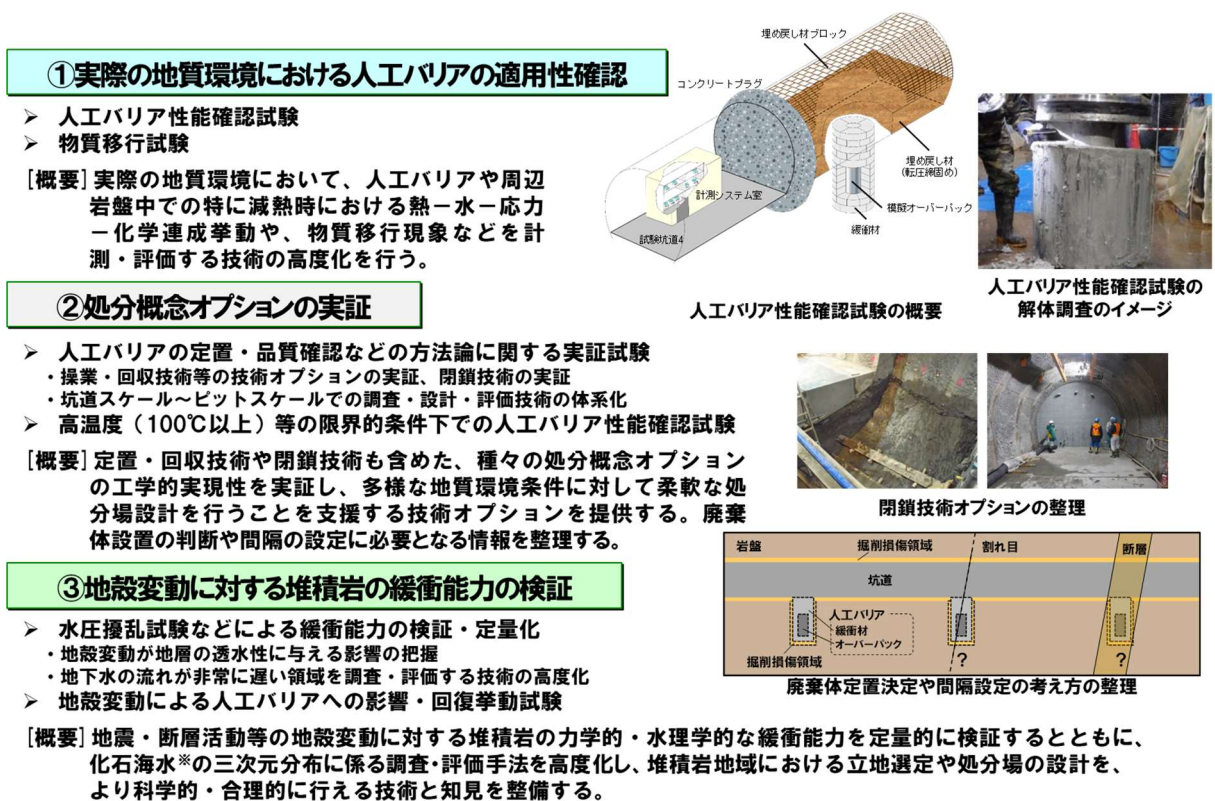


図 1 令和2年度以降に取り組むべき研究課題
(令和2年度以降の必須の課題)

表 1 幌延深地層研究計画の令和 2 年度以降のスケジュール

		第3期中長期目標期間			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		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		解体試験のデータ取得、連成モデルの適用性確認						
1.1	人工バリア性能確認試験									
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 人工バリアの設置・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						
		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				・深度に応じた堆積岩の水理・物質移行特性の違いの実証 ・掘削損傷領域や人工バリア/処分坑道の設計(仕様やレイアウトなど)も考慮した閉じ込め性能の評価手法の整理 ・人工バリアを定置するピットの配置位置や坑道の間隔を設計するための調査・設計・評価の一連の技術の体系化 ・高地圧下での坑道掘削や、実規模スケールでの埋め戻し/止水プラグの設計から施工までの一連の技術の実証 ・複数の坑道やピットを施工する際の湧水抑制対策や支保技術の整備 ・緩衝材の流出現象や岩盤への侵入現象を評価・抑制する技術の整備 ・廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要なピット周辺の割れ目からの湧水量や掘削損傷領域の広がりなどの調査・評価手法について、他の堆積岩との比較による体系的整理				
		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						
【施設計画】		掘削準備		350m調査坑道		換気立坑				
坑道掘削				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。実施する場合には年度当初に示す計画書にて記載する。

表 1 に示したように、令和 2 年度以降の必須の課題のうち、令和 6 年度までに多くの課題を終了し、成果の取りまとめを行いました⁽¹⁾。また、令和 6 年度から、「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」（以下、体系化の研究）に着手しています。さらに、令和 2 年度以降の必須の課題に取り組むに当たって、成果を最大化する観点から、OECD/NEA*⁷の協力のもと、令和 4 年度から幌延国際共同プロジェクト（Horonobe International Project、以下、HIP）*を活用しています。

体系化の研究には、令和 6 年度までに終了した課題の成果を反映しつつ取り組んでいます。これらの課題の位置付けや成果の反映先を明らかにする観点で、実際の処分事業における時間スケールを横軸に、体系化の研究で対象としている空間スケールを縦軸に、令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画で取り組んでいる課題の全体像を整理して図 2 に示します。

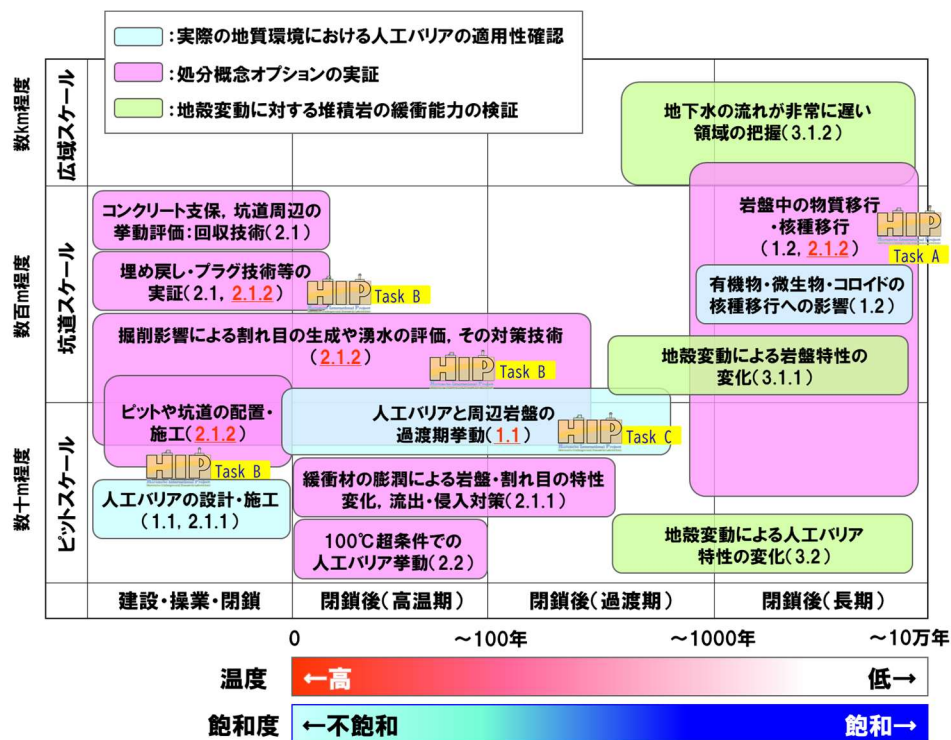


図 2 令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画における研究課題の全体像 () 内の番号は表 1 に対応しており、赤字は本計画書で記載のある項目です。HIP の各タスクとの対応もあわせて示します。

*7: OECD/NEA（経済協力開発機構/原子力機関）は、安全かつ環境的にも受け入れられる経済的なエネルギー資源としての原子力エネルギーの発展に貢献することを目的として、原子力政策、技術に関する情報・意見交換、行政上・規制上の問題の検討、各国法の調査および経済的側面の研究などを実施しています。

なお、上記に挙げた令和 2 年度以降の必須の課題に対応するために、地下施設の深度 500 m に調査坑道を整備しました。地下施設は、図 3(a) に示すように 3 本の立坑と 4 つの深度の調査坑道からなり、立坑は各深度へのアクセスならびに地下施設の換気のための役割を担っています*8。また、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（図 3(b)）、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^(2, 3, 4)。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⁽³⁾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^(2, 3, 4)。

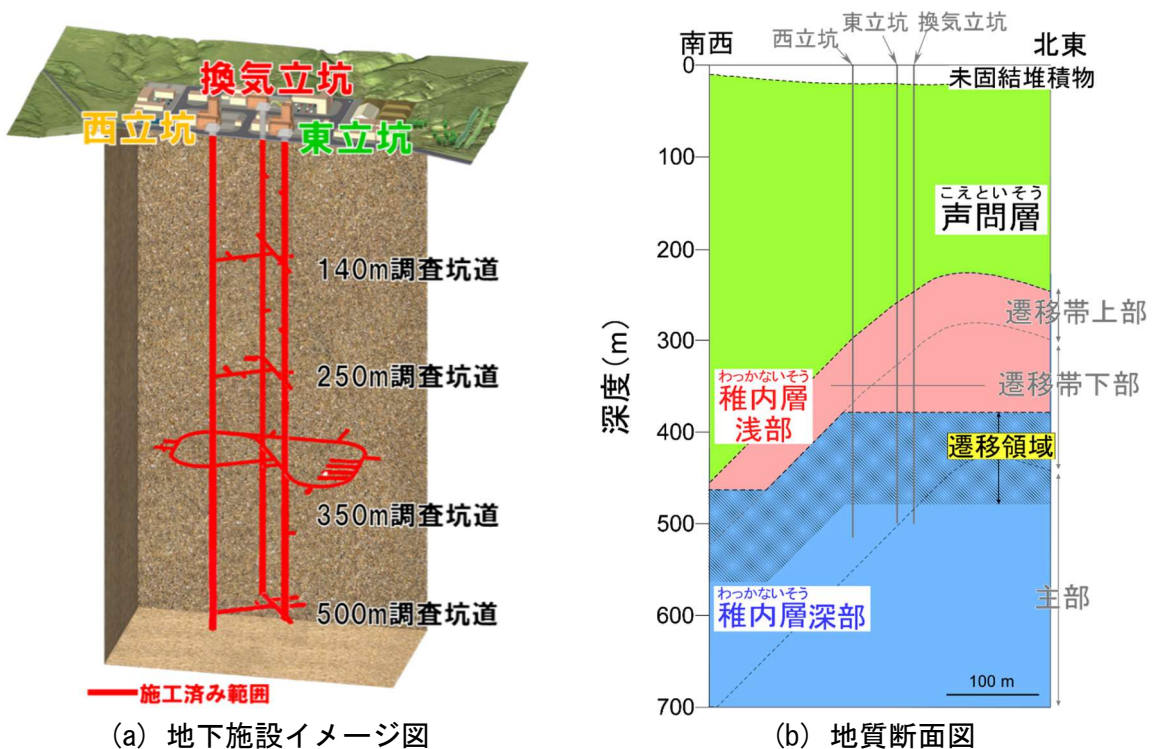
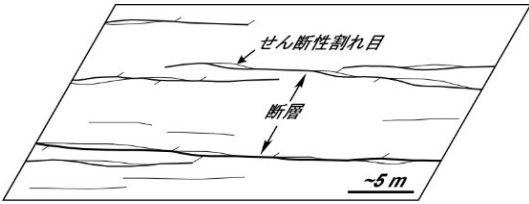
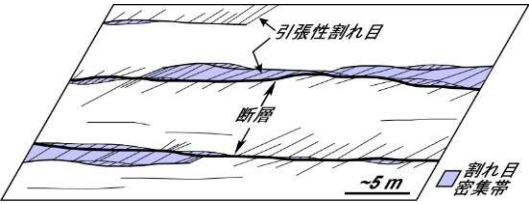
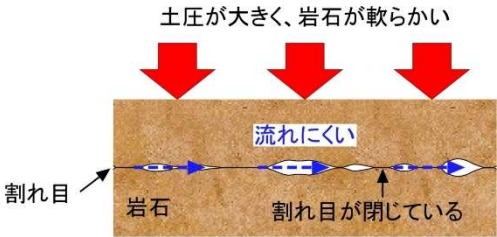
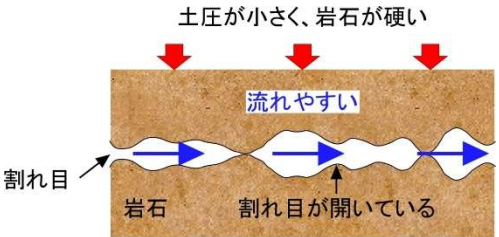


図 3 地下施設イメージ図および地下施設周辺の地質断面図

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

稚内層は、図 3(b)に示すように地質環境の特徴から浅部と深部に分けられます。稚内層深部である深度 500 m の地質環境については、稚内層浅部である深度 350 m と比べて土圧や地下水圧が高く、地下水や物質の動きが極めて緩慢であるという特徴があります⁽¹⁾。深度 500 m (稚内層深部) と深度 350 m (稚内層浅部) の地質環境の特徴を表 2 に示します。

表 2 深度 500 m と深度 350 m の地質環境の特徴

	深度 500 m (稚内層深部)	深度 350 m (稚内層浅部)
分布する割れ目の特徴	 <p>断層沿いに割れ目の発達が乏しく、断層内を水が流れにくい</p>	 <p>断層沿いに多数の割れ目が発達し、断層内を水が流れやすい</p>
割れ目の開口状況	<p>土圧が大きく、岩石が軟らかい</p>  <p>割れ目が閉じており、水が流れにくい</p> <p>---> 水の動き(遅い)</p>	<p>土圧が小さく、岩石が硬い</p>  <p>割れ目が開いており、水が流れやすい</p> <p>—> 水の動き(速い)</p>
土圧 地下水圧	土圧が大きく、岩石が軟らかい 地下水圧が高い	土圧が小さく、岩石が硬い 地下水圧が低い

3. 令和7年度の成果および令和8年度の計画の概要

3.1 令和7年度の成果の概要

(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

人工バリア性能確認試験では、解体試験までの状態を把握するためのデータ取得を自動計測機器により継続しました。また、解体試験計画の具体化や室内試験を対象とした解析検討を継続するとともに、原位置試験※における埋め戻し材や緩衝材中の水分量や密度などを解析するための準備を行いました。これらの取り組みは、HIPのタスクC（実規模の人工バリアシステム解体試験）の一環として実施しています。

(2) 処分概念オプションの実証

坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化について、以下の4つの課題に取り組みました。

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

坑道スケールにおける岩盤の閉じ込め性能評価では、既存の研究結果に基づき、断層の代表的な透水性※と亀裂ネットワークモデル※を組み合わせ、岩盤の平均的な水の通しやすさの指標である有効透水係数※を推定しました。HIPのタスクA（物質移行試験）の課題として複数の割れ目が関与していると考えられる場においてトレーサー試験を実施し、多様な水理・力学条件の影響を受ける場合でも既存の装置を用いてトレーサー試験を成立させることが可能であることを示しました。

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

坑道とピットの配置に関する調査・評価・施工技術について、500m調査坑道で実施した先行ボーリング調査で得られたコア試料と孔壁画像の観察を通じて、500m試験坑道8および500m試験坑道9（以下、500m試験坑道8・9）に出現する断層を予測し、坑道を掘削した後の底盤観察の結果と比較しました。その結果、先行ボーリング調査によって、坑道に出現する断層を事前に捉えられることや、断層の走向・傾斜や分布頻度の傾向を把握できることが示唆されました。また、500m試験坑道8・9の掘削時

の湧水量は少なく、先行ボーリング調査時における湧水の程度と整合する結果を得ました。さらに、500m 試験坑道 9 を掘削した後に、ボーリング調査により掘削損傷領域（以下、EDZ）の広がりとその透水性を確認した結果、500m 試験坑道 9 の側壁面では最大 3.1 m 程度まで坑道掘削に起因する割れ目が発達しており、その領域では割れ目のない領域と比較して透水性が高いことが分かりました。

坑道の埋め戻しと止水プラグの設置の調査・設計・施工技術について、原位置施工試験に先立ち、350m 試験坑道 6 の周辺の EDZ の広がりと同周辺岩盤の透水性の変化を調査した結果、坑道掘削後に坑道周辺で形成されたと解釈される引張割れ目が発達する領域では、割れ目の少ない領域に比べて透水性が高くなる傾向を確認しました。坑道の埋め戻しと止水プラグの施工において、地上での吹付け試験を実施し、施工手順や施工品質を確認し、350m 試験坑道 6 における原位置施工試験計画の具体化を進めました。

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

350m 調査坑道における湧水量の減少速度を、地上からのボーリング調査から推定した断層や割れ目内の水みちのつながり方の次元^{*}に基づいて予測した結果、近接する複数の湧水箇所間の水圧干渉を考慮することで、湧水量の長期的な減少速度を予測できることを実証しました。

500m 調査坑道における試験ピットの掘削に先立ち、掘削に伴う EDZ の広がりを予測する解析を実施した結果、坑道底盤部付近で EDZ の広がりが大きく、深度が深くなるにつれて小さくなることが分かりました。

断層の代表的な透水性と亀裂ネットワークモデルを組み合わせることで、岩盤の水の通しやすさを推定する手法を開発しました。この手法を用いることで、断層や割れ目からの湧水の定常的な発生量をより適切に予測できるようになりました。

350m 調査坑道において既存の割れ目と断層を対象として水圧擾乱試験^{*}を実施しました。その結果、破砕物を伴わないせん断^{*}性の割れ目に

についても、水圧擾乱試験や既存のモデルを適用することにより割れ目の開きにくさを定量的に調査できることを確認しました。

④ 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理

坑道やピット周辺に存在する割れ目のずれにくさに関する評価手法の整備に向けて、透水試験用パッカーの圧力変化を活用して割れ目のずれる量を推定する手法を過年度に構築しましたが、その手法の信頼性を向上させるために、原位置試験の条件により近い室内試験方法を新たに構築しました。地下水の流れにくさ（物質の動きにくさ）については、水みちのつながり方の次元が低く、割れ目内の水みち同士の連結が少ない岩盤でも、地層の代表的な透水性を適切に求めることができる計算手法を構築しました。また、EDZの広がりや坑道壁面の安定性の指標となる地山強度比⁽⁵⁾※に相関性があることを確認しました。このことから、これまでに幌延深地層研究センターで実施してきたEDZの広がりに関する調査や解析的な評価手法は、他の岩盤に対しても適用可能と推定しました。

(3) 地下施設の建設・維持管理

令和5年度から再開した掘削工事などの施設整備業務は、令和7年5月に西立坑が深度500mに到達するとともに、令和7年9月には500m調査坑道の掘削が完了しました。その後、路盤の整備や機器の設置を行い、当初の予定より約3か月早く、令和8年1月に完了しました。

(4) 国内外の資金や人材の活用

国内機関との研究協力として、北海道科学大学、東京大学、京都大学、幌延地圏環境研究所^{*9}、電力中央研究所^{*10}などの大学や研究機関との共同研究を実施するとともに、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業などを活用して研究を推進しました。国外機関との研究協力では、令和4年度に開始したHIPを継続し、フェーズ1（令和4年度～令和6年度）の成果を取りまとめました⁽⁶⁾。HIPは令和7年度からフェーズ2として進めており、フェーズ1に引き続き3つのタスクを設定して研究活動を進めて

*9：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。

*10：一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。

います。タスク A (物質移行試験) では、多様な水理・力学条件で試験を成立させることを目的として、揚水区間、注水流量、揚水流量、トレーサー注入時間などの条件を変えたトレーサー試験を、250m 調査坑道で実施しました。タスク B (処分技術の実証と体系化) では、500m 調査坑道掘削前の先行ボーリング調査結果に基づき、断層の分布と坑道掘削時の湧水量を予測し、坑道掘削後の観察・計測結果と比較しました。その結果、予測の妥当性が確認できました。また、埋め戻し材・止水プラグの施工手順や施工品質を地上試験で確認し、原位置試験計画に反映しました。タスク C (実規模の人工バリアシステム解体試験) では人工バリア性能確認試験の解体試験計画を検討するとともに、原位置試験を対象とした解析検討の事前準備として、過去の室内試験の再現解析を各機関で連携して進めました。また、これらの実施計画や進捗状況、結果について、管理委員会や3つのタスクごとの会合において議論しました。さらに、令和7年12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、主にタスク A とタスク B において各深度で実施している原位置試験の進捗状況について確認しました。なお、HIP には、令和8年3月末現在、原子力機構を含めて国内外の11機関^{*11}が参加しています。

以上のように、令和7年度は計画していた調査研究を着実に進めて、想定していた成果を得ることができました。詳細については令和7年度の調査研究成果報告書に取りまとめます。

3.2 令和8年度の計画の概要

(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

人工バリア性能確認試験では、地下に設置した人工バリアや埋め戻し材などのサンプルを取得するための解体試験を実施します。サンプリングした試料を用いて、埋め戻し材や緩衝材中の水分量や密度、模擬オーバ

*11: 原子力機構の他、オーストラリア放射性廃棄物機関 (ARAWA、オーストラリア)、連邦放射性廃棄物機関 (BGE、ドイツ)、英国地質調査所 (BGS、英国)、電力中央研究所 (CRIEPI、日本)、韓国原子力研究所 (KAERI、韓国)、韓国原子力環境公団 (KORAD、韓国)、原子力発電環境整備機構 (NUMO、日本)、原子力テクノロジー国営会社 (RATEN、ルーマニア)、原子力環境整備促進・資金管理センター (RWMC、日本)、国営放射性廃棄物会社 (SERAW、ブルガリア) です。

一パック※の鏝の深さや成分など、各材料がどのように変化しているかを、分析します。また、原位置試験における埋め戻し材や緩衝材中の水分量や密度などを対象とした解析検討を継続します。

(2) 処分概念オプションの実証

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

① 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化

坑道スケールの岩盤の閉じ込め性能については、令和7年度に引き続き、250m 調査坑道周辺においてトレーサー試験を実施します。また、高精度なモデル化や評価手法の構築を目的として、試験実施場所の周辺での岩石試料を採取、分析し、分析結果を反映した解析を実施します。ピットスケールの岩盤の閉じ込め性能については、500m 調査坑道においてEDZを対象としたトレーサー試験を実施します。既存の研究結果やこれら調査結果を用いて、坑道スケールからピットスケールにおける岩盤の閉じ込め性能の評価手法の整理を進めます。

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

坑道とピットの配置に関する調査・評価・施工技術に関して、500m 試験坑道8を掘削した後のEDZの広がりや透水性の変化について、取得したデータに基づき検討します。また、令和7年度までに実施した500m 試験坑道8・9(図6参照)に対する先行ボーリング調査と底盤観察の結果を踏まえ、試験ピット掘削の候補地点において底盤から鉛直ボーリング孔(予定では3孔)を掘削します。これにより、EDZの広がりや湧水量を把握した上で、試験ピットの掘削地点を1箇所に絞り込みます。坑道の埋め戻しと止水プラグの設置の調査・設計・施工技術に関しては、350m 試験坑道6(図5参照)の埋め戻しを行い、埋め戻しの手順や施工品質の管理方法などを確認するとともに、施工後の埋め戻しの状態を確認するため、土圧や水分量を計測するセンサーなどを設置します。

③ 多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備

ピット周辺の EDZ の範囲を評価するための解析手法と支保設計への反映方法に関して、試験ピットの施工方法や、試験ピット掘削中の岩盤の安定性の計測計画を検討します。断層や割れ目からの湧水の定常的な発生量や湧水量の減少速度の予測手法と緩衝材の流出抑制対策への反映方法の整備に関して、令和7年度に整備した排水システムを用いて深度500mにおける各坑道の湧水量を詳細に把握するとともに、手法の整備に向けた解析を継続します。また、ピット周辺の割れ目の開きにくさの評価手法と緩衝材の侵入抑制対策への反映方法の整備に関して、350m調査坑道で実施した水圧擾乱試験結果を整理して、割れ目に作用する応力が変化したときの既存割れ目や断層の開きにくさの定量的な評価手法の整備を進めます。

④ 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理

割れ目のずれにくさに関して、立坑掘削前のグラウト^{*}施工時に断層部で確認されたずれの情報を用いた分析を進めるとともに、350m調査坑道で実施した水圧擾乱試験で得られたデータの解析を進め、既存の割れ目や断層のずれにくさの検討を進めます。また、坑道やピット周辺に存在する割れ目の開口幅とその開きにくさ、ずれにくさ、割れ目からの湧水量、地下水の流れにくさ、EDZの広がり、調査・評価手法について、堆積岩における適用可能性に関する整理を継続して実施します。特に、ピット周辺の地下水の流れにくさについては堆積岩以外の岩盤についても整理を行い、ピット周辺の地下水の流れにくさに関わる岩盤分類のためのフローチャートの構築を検討します。

(3) 令和2年度以降の必須の課題への対応に必要なデータ取得

地質環境特性データとして、地質構造・岩盤の水理・地下水の地球化学・岩盤力学に関するデータ取得などを継続します。また、坑道掘削の影響を調査するため、地表や坑道に設置した計測器を用いて、岩盤の微小な変形の観測を継続するとともに、地上および地下施設での地震観測を継続します。

(4) 地下施設の管理、環境調査および安全確保の取り組み

地下施設の設備運転監視や保守点検などの維持管理業務を実施します。また、地下施設からの排水および掘削土（ズリ）置場の浸出水は、これまでと同様に、排水処理設備において適切に処理した上で天塩川に放流します。

環境調査として、坑道内および掘削土（ズリ）置場で発生する排水の水質調査、天塩川の水質調査ならびに研究所用地周辺における水質・魚類に関する調査を継続します。

安全確保の取り組みとして、作業員などに対する安全教育や訓練の実施、定期的な安全パトロールなどの活動を継続します。

(5) 開かれた研究

幌延深地層研究計画で実施する地下深部の地質環境を対象とした研究は、地球科学の幅広い分野にわたり、学術研究の発展にも寄与することから、国内外の関連する研究機関の専門家の参加を得ながら進めていきます。また、国内外の資金や人材を活用することについて、引き続き大学などとの共同研究を行うとともに、HIP を継続し、研究を進めます。HIP では、設定した3つのタスクについて、原位置試験や室内試験、解析を進めるとともに、タスク会合や管理委員会を定期的で開催して各機関との議論を進めます。さらに、参加機関の理解促進のための現場状況の確認や、各機関の研究進捗の確認、議論のための合同タスク会合を現地開催します。

令和8年度に地下施設、研究所用地および幌延町内で行う主な調査研究の実施内容を表3に示します。また、表3に示した調査のうち、地下施設での主な調査の実施場所を図4、図5および図6に、研究所用地における主な施設と観測装置の配置を図7に、幌延町内における主なボーリング孔および観測装置の配置を図8に示します。さらに、図8に示したA-A'断面の地質断面図を図9に示します。

表 3 令和 8 年度の主な調査研究の実施内容

実施項目		実施内容	実施場所
令和 2 年度以降の必須の課題	実際の地質環境における人工バリアの適用性確認	解体試験の実施	研究所用地、地下施設など
	処分概念オプションの実証	坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化 <ul style="list-style-type: none"> 先行ボーリングによる地質環境特性調査ならびに工学的対策を考慮した地下施設および人工バリアの設計・評価技術の体系化 多接続坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理 	研究所用地、地下施設など
令和2年度以降の必須の課題へ対応するためのデータ取得		地質構造に関する調査、分析、岩盤の水理に関するデータ取得・モニタリング、分析、解析、地下水の地球化学に関する分析、岩盤力学に関するデータ取得、解析、地震観測、および計測手法の妥当性評価と必要に応じた調査技術・機器の改良など	研究所用地、地下施設、HDB-1～11孔、上幌延地区など
地下施設の管理		地下施設の設備運転や保守点検などの維持管理、排水処理設備の運転	研究所用地、地下施設など
環境調査		地下施設からの排水などの水質調査、水質・魚類に関する調査	研究所用地、天塩川、清水川など

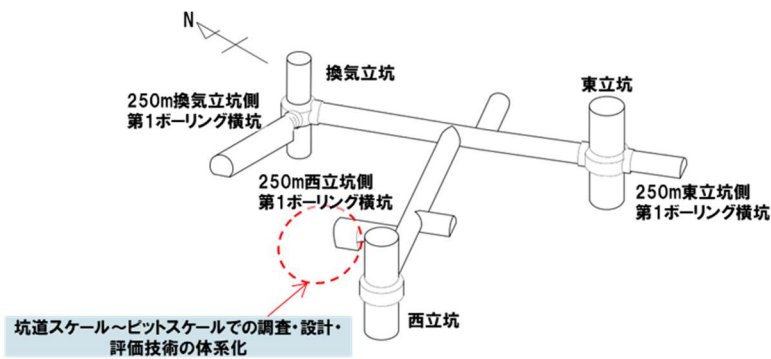


図 4 250m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

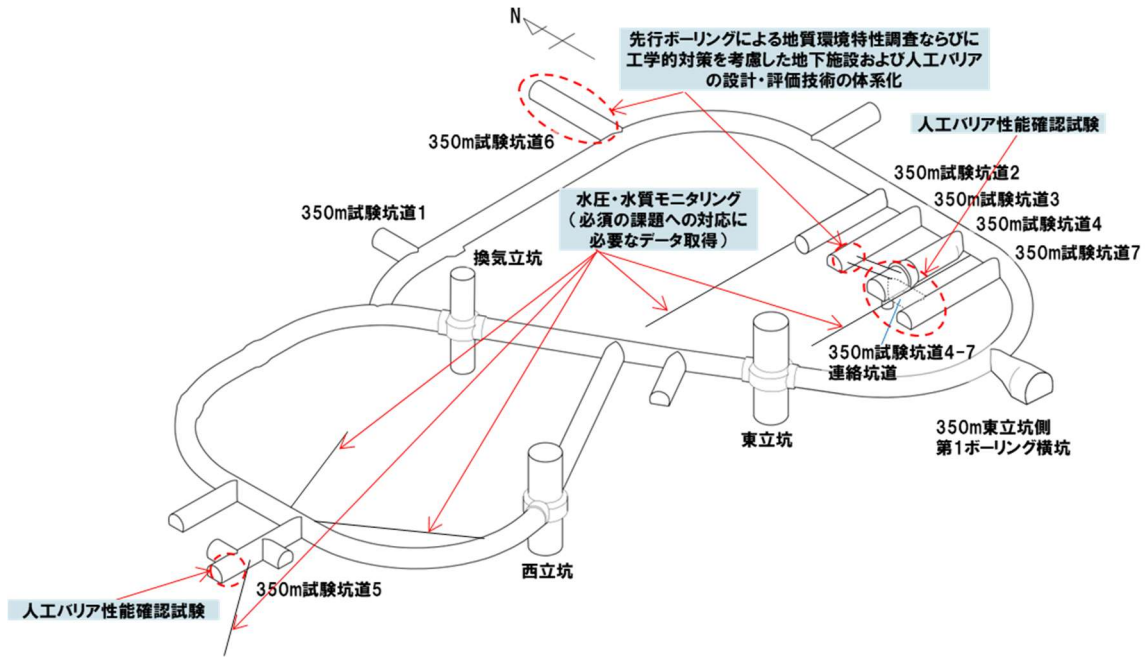


図 5 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

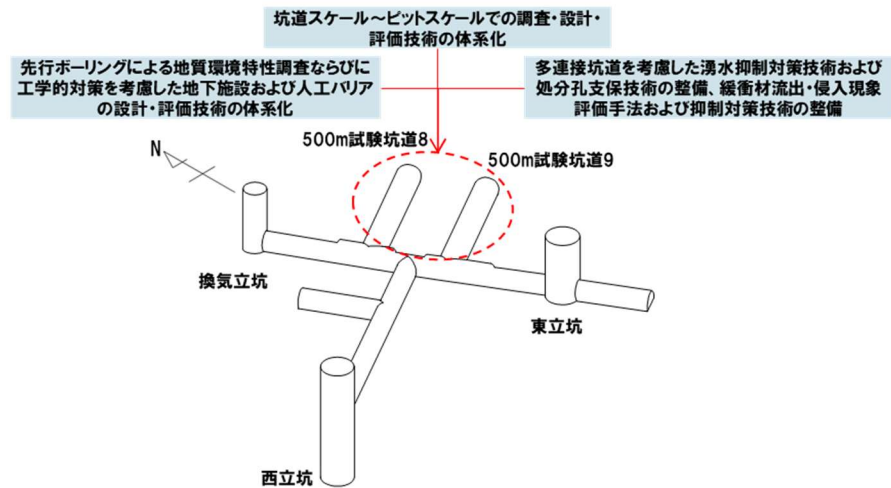


図 6 500m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

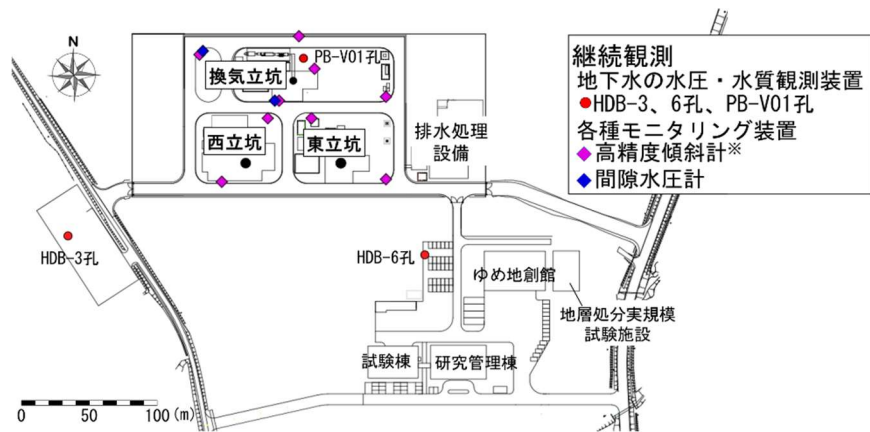


図 7 研究所用地における主な施設と観測装置の配置

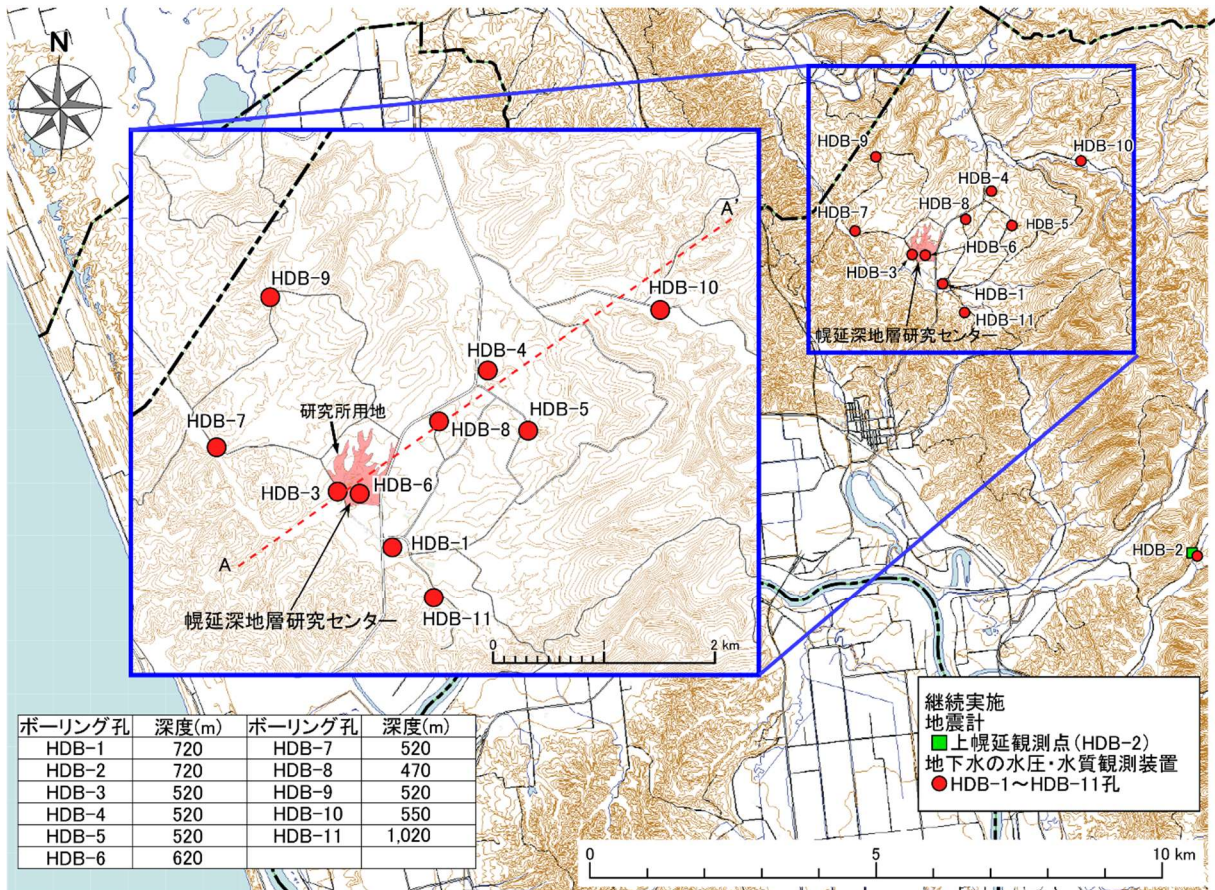


図 8 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所

国土地理院の基盤地図情報（基本項目）を加工して作成

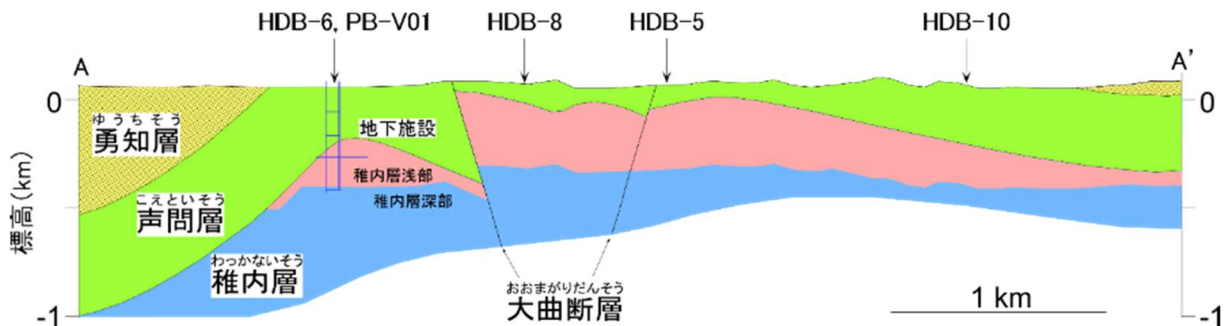


図 9 研究所用地周辺の地質断面図（図 8 の A-A' 断面）

4. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

4.1 人工バリア性能確認試験

令和 2 年度以降は、ガラス固化体設置直後の廃棄体の発熱過程に加えて、減熱過程を模擬した原位置試験データや解体試験により得られる、より詳細なデータに基づく熱－水理－力学－化学連成現象^{*}の評価モデルの高度化が課題となります。そのため、人工バリア性能確認試験で設置しているヒーターの温度を下げた試験（減熱過程を模擬した原位置試験）を行い、熱－水理－力学－化学連成現象に係るデータを取得します。また、減熱試験終了後は解体試験により、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試験については、適用する施工方法の検証を行うために事前に試験施工を行います。設置したセンサーや解体試験により得られるデータを基に、熱－水理－力学－化学連成解析を行い、評価モデルの高度化や適用性の確認を行います。このような人工バリア周辺で起こる現象の理解は、地層処分後の安全評価における初期状態の把握やオーバーパック（以下、OP）の寿命を評価する際の人工バリア周辺の環境条件の設定に役立ちます。

令和 7 年度は、人工バリア性能確認試験（図 10）の解体試験までの状態を把握するために既設の自動計測機器によるデータ取得を継続しました。緩衝材中の計測データの一例を図 11 に示します。図 11(b) に示す緩衝材中の温度分布は、模擬 OP 内部に設置したヒーターの加熱に伴い温度が上昇し、加熱開始から 2,315 日経過後にヒーターを停止した後は地下環境下の温度（約 23℃）で一定になることが確認できます。図 11(c) は比抵抗^{*}トモグラフィ^{*}測定により算出された緩衝材中の比抵抗分布を飽和度に換算した結果を示します。

人工バリア性能確認試験で設置した緩衝材の初期の飽和度は 57.6 %（初期含水比 10.5 %）であり、加熱 2 日前のデータは初期の飽和度からほとんど変化していないことが確認できます。ヒーターの加熱開始後は、模擬 OP に近い緩衝材内側では、加熱に伴って乾燥することで飽和度が低下していることが確認できます。一方、緩衝材外側では、岩盤側からの地

下水浸潤によって飽和度が徐々に増加していく傾向が確認できます。減熱試験を開始した後は、加熱により乾燥した内側の緩衝材の飽和度が徐々に増加傾向にあることが確認できます。このような温度変化に伴う飽和度変化の計測データは、連成解析に使用するモデルの適用性を確認する上で重要となります。HIP のタスク C (実規模の人工バリアシステム解体試験) においては、解体試験や解体試験のデータを使用した解析検討に向けた準備として、参加機関の間で試験計画の具体化に向けた議論や、室内試験を対象とした解析検討を継続するとともに、原位置試験における埋め戻し材や緩衝材中の水分量や密度などを対象とした解析検討に着手しました。

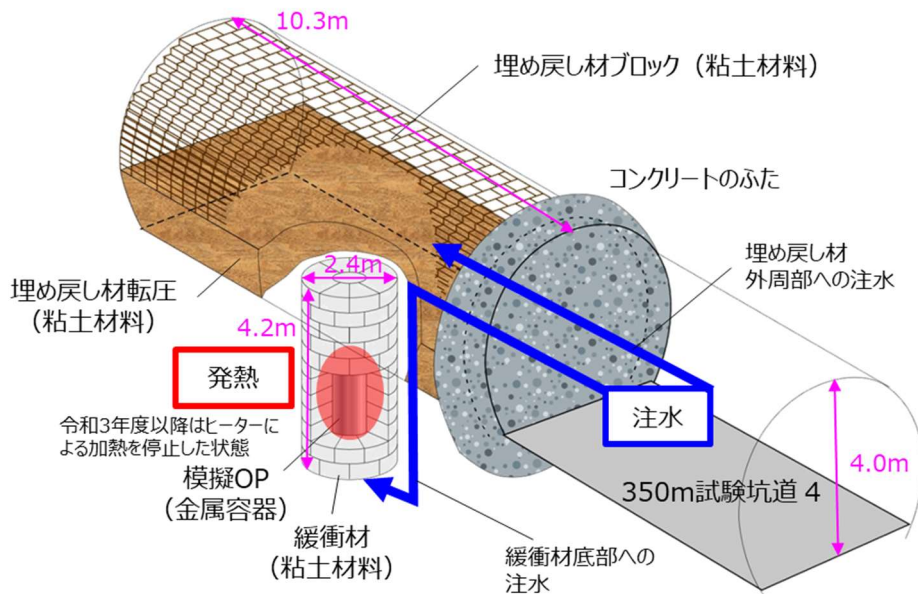
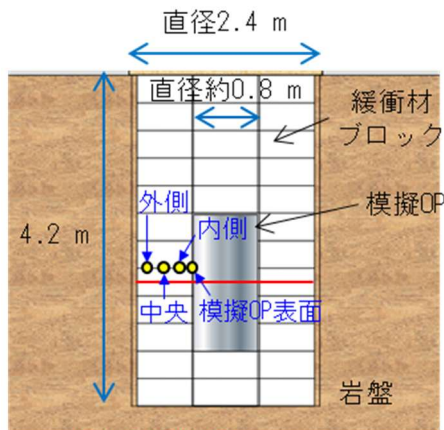
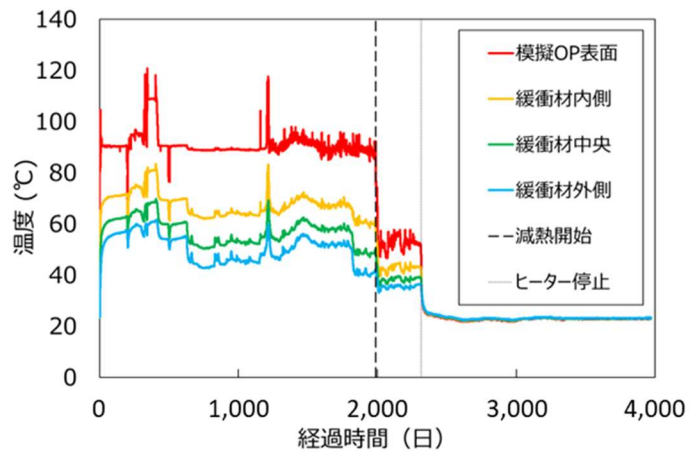


図 10 人工バリア性能確認試験の概念図

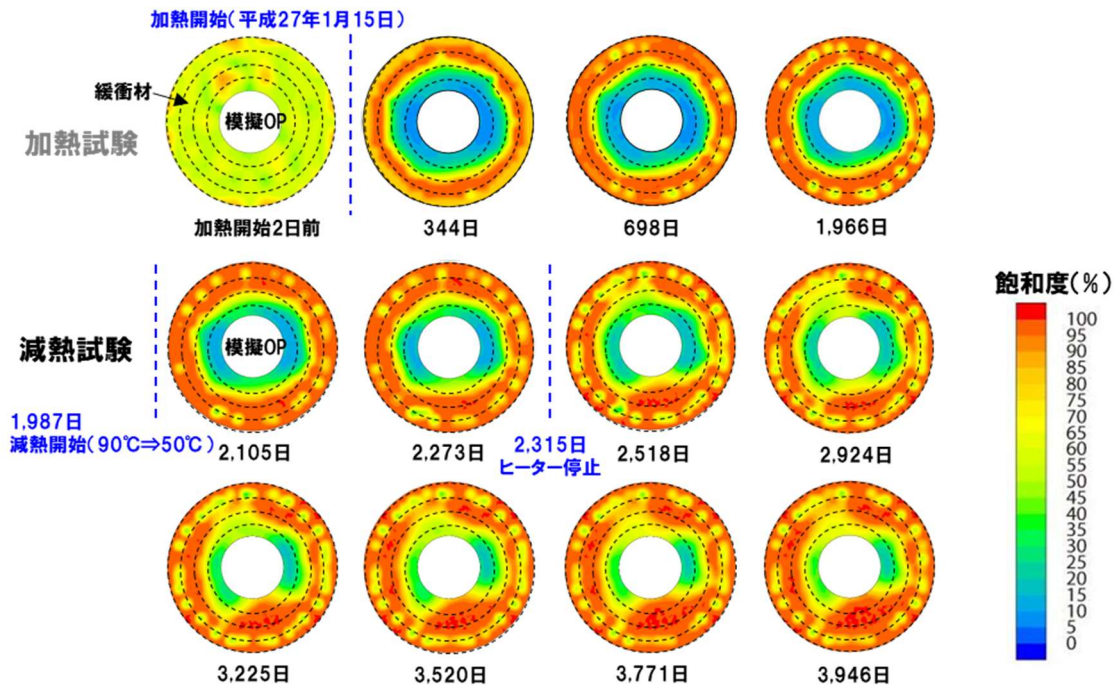


● 温度計測位置
 — 比抵抗トモグラフィ測定断面

(a) 測定位置
 (緩衝材の下から5段目付近)



(b) 温度



(c) 比抵抗トモグラフィ測定による飽和度分布の推定結果

図 11 人工バリア性能確認試験の計測データの一例

令和 8 年度は、地下に設置した人工バリアや埋め戻し材などのサンプルを取得するための解体試験を実施します。図 12 に解体試験のイメージ図を示します。解体試験では、350m 試験坑道 4 の埋め戻し部や試験孔部に設置した埋め戻し材や人工バリア（緩衝材、模擬 OP）のサンプリングを行います。その他にも、コンクリートプラグ、埋め戻し部の吹付けコンクリートや、岩盤と吹付けコンクリートの境界面を調査するためのサンプリングも実施します。採取したサンプルを用いて、埋め戻し材や緩衝材

中の水分量や密度、模擬 OP の錆の深さや成分など、各材料がどのように変化しているかを、地上の施設で分析します。

解体試験は、HIP のタスク C の参加機関の間で議論した結果も踏まえて実施していきます。また、タスク C の参加機関の間で原位置試験における埋め戻し材や緩衝材中の水分量や密度などを対象とした解析検討を継続し、解析に使用する評価モデルの高度化や適用性の確認を進めます。

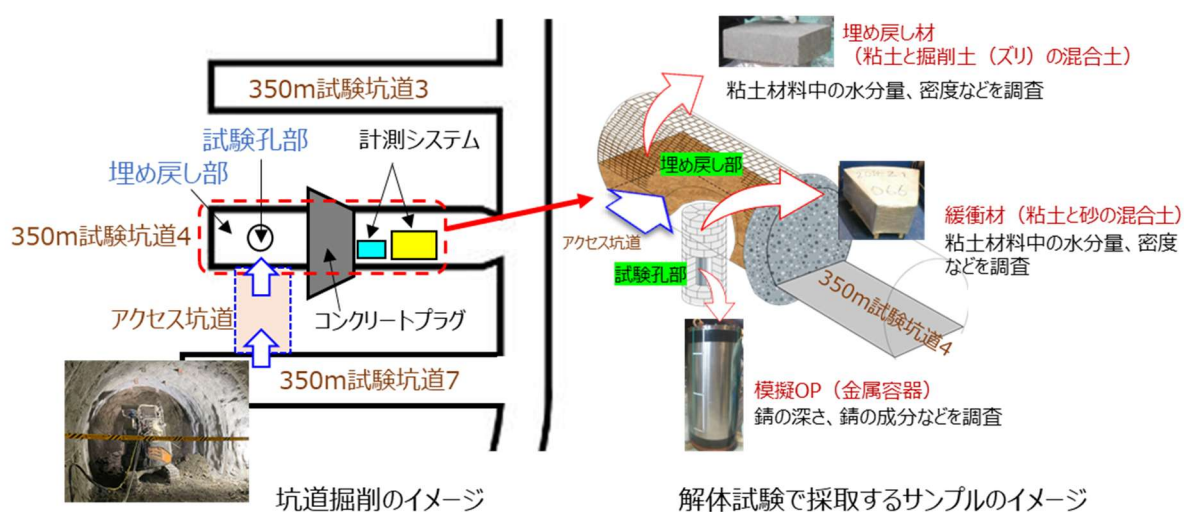


図 12 解体試験のイメージ図

また、令和 6 年度までに 350m 試験坑道 5 (図 5 参照) において実施していた「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」において設置した一組の試験体については、熱-水理-力学-化学連成現象の評価のための参考情報として、既設の自動計測機器でのデータ取得を継続します。

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 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化

処分事業では、坑道あるいはピット（処分孔）内に流入する地下水の量や、岩盤中の断層や割れ目の力学的な強度などを把握し、ピットの掘削や人工バリアの施工の可否あるいは工学的対策の必要性などを判断することが重要です（図 13）。このため、実際の地質環境において廃棄体の設置方法などの実証試験を通じた坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化に取り組みます。これまでに構築・確認してきた各要素技術を体系的に適用し、坑道やピットの配置に係る考え方、人工バリア材料などの設置方法、それらの閉じ込め性能を評価する方法を体系的に整理します。具体的には、先行ボーリングによる地質環境特性調査ならびに工学的対策技術を考慮した地下施設および人工バリアの設計・評価技術、多接続坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術、緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術、廃棄体設置の判断や間隔などの設定に必要な情報の整理を行い、坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術として体系化します。

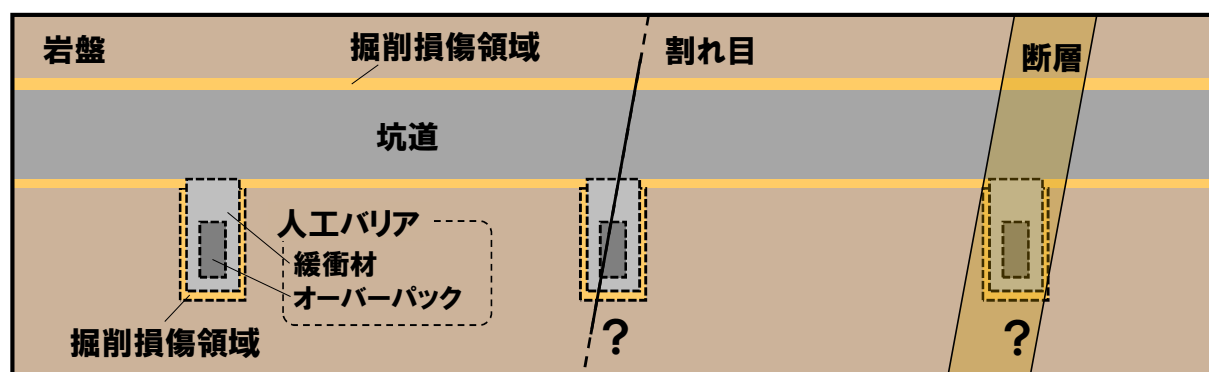


図 13 人工バリアやそれを定置する坑道の周辺において想定される地質構造の特徴を示すイメージ図（鉛直断面）

処分場の設計では、図 14 に示すフローの通り、廃棄体特性、地質環境モデルおよび要求事項に基づいて処分概念および処分施設（人工バリア・地下施設・地上施設）の仕様や操業方法、安全対策なども含めて段階的に

設定されます。設計後には、閉鎖前および閉鎖後長期の安全評価が実施され、その結果に基づき必要に応じて設定・設計内容が再検討されます。あわせて、設計で顕在化した不確実性が次段階で低減されるよう、地質環境調査・評価計画へ情報がフィードバックされます⁽⁷⁾。

体系化で実施する 4 つの課題と処分場の設計フローの関係を図 14 に示します。具体的な実施内容は以下の通りです。

課題(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」では、幌延の地質環境を事例に、各種調査に応じて得られる情報を基に地質環境モデルを構築・更新し、物質移行解析を実施することで、閉じ込め性能の評価手法を体系的に整理します。

課題(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」では、人工バリアおよび地下施設の設計として、人工バリアを定置するピットや坑道の配置を評価する際に、地質環境モデルから必要となる情報（断層・割れ目分布やEDZの特徴（図 13））を整理し、これまでに構築した調査・解析手法を適用することにより、それらが評価可能であることを実証します。さらに、坑道埋め戻しと止水プラグの設置についても、必要な調査・設計・施工上の要点を整理し、掘削後に得られる調査結果との比較により評価の妥当性を検証して、必要な情報と取得方法、ならびに調査計画・解析条件の最適化に資する知見を取りまとめます。

課題(3)「多接続坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備」では、断層や割れ目からの湧水量や岩盤の力学的強度などの地質環境の調査・評価を行い、多接続坑道のピットに人工バリアを設置する場合の地下施設の設計に反映可能な地質環境の調査・評価手法を整備します。

課題(4)「廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理」では、坑道やピット周辺に存在する割れ目の開きにくさやずれにくさ、割れ目からの湧水量、地下水の流れにくさ（物質の動きにくさ）、およびEDZの広がりなどの地質環境の調査・評価を行い、地下施設の設計や岩盤の閉

じ込め性能の評価を含めて、地下施設設置深度を評価するための地質環境の調査・評価手法を整備します。

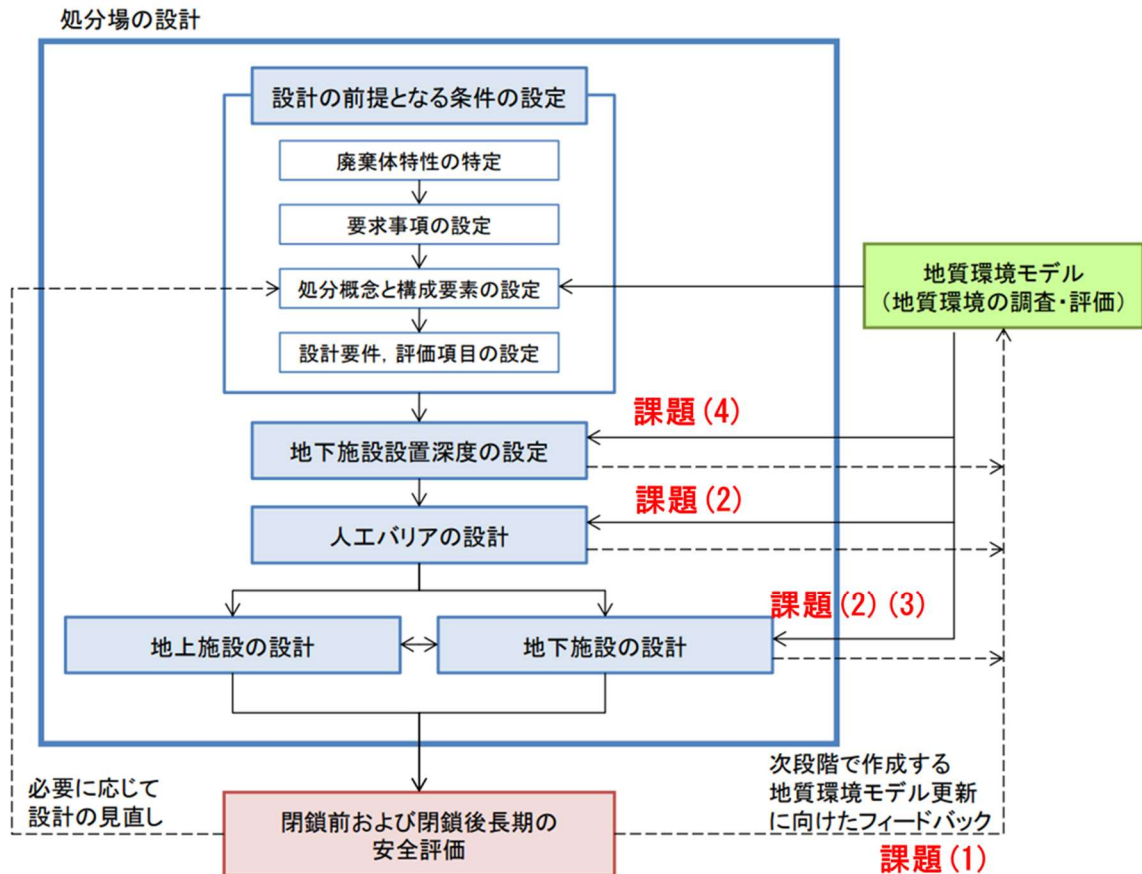


図 14 処分場の設計フローと体系化で実施する課題の関係⁽⁷⁾

(1) 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化

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

令和 7 年度は、坑道スケールの岩盤の閉じ込め性能の評価手法の体系化を目的として、既存の研究結果に基づいて数値解析による評価に必要なパラメータである岩盤の有効透水係数を推定しました。令和 6 年度に課題(3)において実施した数値解析では、約 14 年間にわたって観測された地下施設全体の湧水量や地下施設周辺のボーリング孔の地下水圧変化の観測結果から岩盤の有効透水係数を推定しています^(8, 9)。その深度分布から、稚内層における断層の代表的な透水性は、断層の局所的な透水性と水みちのつながり方の次元に影響されることが示されています。これまでの研究⁽¹⁰⁾や、令和6年度に実施した課題(4)における情報の整理⁽⁸⁾から、亀裂の局所的な透水性はダクティリティインデックス（以下、DI）*と関連することが示されています。加えて、水みちのつながり方の次元も DI と関連することが示されており、稚内層におけるその深度分布が推定されています^(10, 11)。これらの研究結果に基づいて、DI と断層の局所的な透水性の関係および水みちのつながり方を考慮して計算した断層の代表的な透水性と、亀裂ネットワークモデル(以下、DFN モデル)を組み合わせることで岩盤の有効透水係数を推定しました⁽¹²⁾。本手法による岩盤の有効透水係数と、地下施設全体の湧水量や地下施設周辺のボーリング孔の地下水圧変化から推定した岩盤の有効透水係数を比較しました。その結果、本手法を用いた方が従来手法を用いるよりも湧水量や地下水圧変化から推定した岩盤の有効透水係数を適切に推定することができました。令和 6 年度に分類した 5 つの地層（表 4）⁽⁸⁾の分類 I-a における岩盤の有効透水係数を評価する有効な手法を提示することができました(図 15)。

表 4 割れ目の閉塞/充填状況と岩石の透水性に応じた地層の分類と割れ目の代表的な透水性の調査・評価手法^(9、10、11、13)

分類	粘土鉱物の膨潤*による割れ目の自己閉塞	鉱物充填による割れ目の自己閉塞	割れ目充填鉱物の溶解	岩石（健岩部）の透水性	地層例	主要な水みち割れ目の局所的な透水性と岩石の強度・応力状態との相関性	主要な水みち割れ目の水理学的連結性*と岩石の強度・応力状態との相関性	主要な水みち割れ目の代表的な透水性	主要な水みち割れ目の代表的な透水性の調査・評価手法
I-a	限定的	限定的	限定的	小	稚内層 ^b （珪質泥岩/新第三紀堆積岩類；幌延）、パルプリス層 ^c （石灰質泥岩/先新第三紀堆積岩類；スイスウェレンベルグ）	強い ^h	強い ⁱ	大～小	水理試験などから得られる原位置データに加えて、DI と割れ目の局所的な透水性や水理学的連結性との関係から推定可能 ^{b、c}
I-b				大 ^a	声間層 ^d （珪藻質泥岩/新第三紀堆積岩類；幌延）				
II			強い	セントビーズ砂岩層 ^e （砂岩/先新第三紀堆積岩類；英セラフィールド）	弱い	弱い	大		
III	強い	トアキアードメリアン頁岩層 ^f （石灰質泥岩/先新第三紀堆積岩類；仏トゥルヌミール）	小	水理試験などから得られる原位置データより推定可能 ^{d、e、f、g}					
IV	強い	—			オパリナス粘土層 ^g （粘土質泥岩/先新第三紀堆積岩類；スイスモンテリ）				

a：原位置透水試験において割れ目を含む区間と健岩部の透水性の差が3桁未満⁽¹⁴⁾

b：参考文献(9、10、11、15、16、17、18、19、20、21)に基づく

c：参考文献(10、18、22、23、24、25、26、27)に基づく

d：参考文献(9、11、14、17、18、19、21、28、29、30、31、32)に基づく

e：参考文献(13、33、34、35、36、37)に基づく

f：参考文献(38、39、40、41、42、43、44、45、46、47)に基づく

g：参考文献(41、43、48、49、50、51、52、53、54)に基づく

h：割れ目の開口幅とDIが一定の関係で相関し、その関係をパートナーバンディスのモデル⁽⁵⁵⁾で再現可能

i：DI<2.0の領域で水理学的連結性が高く（水みちのつながり方の次元が1.5以上、動水勾配*が相対的に小さい）、DI>2.0の領域で水理学的連結性が低い（水みちのつながり方の次元が1.5未満、動水勾配が相対的に大きい、若い外部由来の地下水がない）^(11、18)

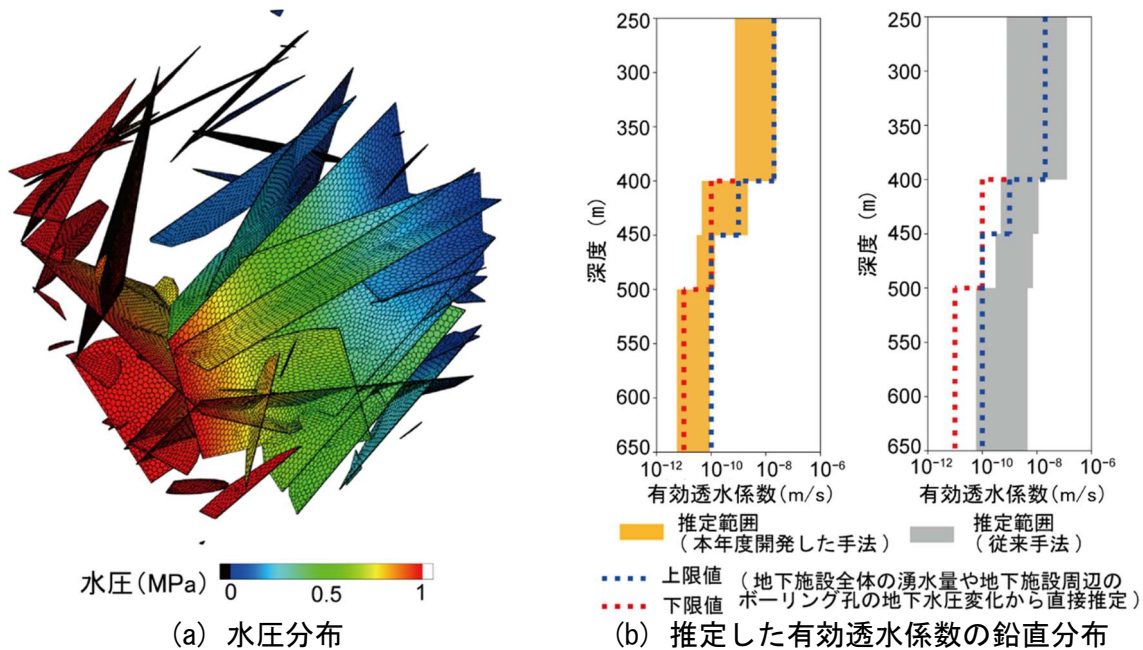


図 15 DFN モデルの各亀裂に亀裂の代表的な透水量係数を与えて地下水流動解析を行った場合に得られた水圧分布結果の一例と推定した有効透水係数の鉛直分布⁽¹²⁾

有効透水係数の鉛直分布の推定結果 (b) では、左図に令和 7 年度に開発した手法による推定結果を、右図に従来手法により推定した結果を示しています。

これまで幌延深地層研究センターでは主に表 4 の分類 I-a に相当する稚内層を対象として、350m 調査坑道や東立坑底盤 (試験当時の深度 380 m) から掘削した 2 本のボーリング孔を用いて、深度 350 m および深度 500 m の岩盤を対象にトレーサー試験を実施してきました^(56, 57)。これらの深度は、それぞれ、DI が 2 より小さく割れ目内の水みち同士の連結が多い領域と、DI が 2 より大きく割れ目内の水みち同士の連結が少ない領域に分類することができます⁽⁹⁾。特に過年度に稚内層深部 (深度 500 m) を対象に行ったトレーサー試験結果に対して令和 6 年度に実施した解析では、割れ目内の水みち同士の連結が少なく、一次元的かつ非常に長く曲がりくねって連続した割れ目内の水みちを仮定することにより物質移行を再現できることが示されており、DI やその値から評価される割れ目内の水みちのつながり方の次元に対応したモデルを用いることで適切に物質移行を評価できることが示されています⁽⁵⁷⁾。一方で、表 4 の分類 I-b に相当する領域における物質移行のデータは乏しいことから、声問層の位置する 250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑 (図 4 参照) において、HIP のタ

スク A (物質移行試験) の課題としてトレーサー試験を実施しています。タスク A では、令和 6 年度までにトレーサー試験の準備として透水試験などを実施するとともに、離隔距離を約 70 cm とした比較的小さなスケールでトレーサー試験が成立することを確認しました⁽⁸⁾。令和 7 年度は、揚水区間、注水流量、揚水流量、トレーサー注入時間などの試験条件を変更し複数の割れ目が関与していると考えられる区間においてトレーサー試験を実施しました(図 16)。幌延深地層研究センター付近の地下水にはガスが多く含まれており、長期的なトレーサー試験を実施するためにはガスの発生を抑制する必要があります。加えて声問層の岩盤は軟らかく変形しやすいことから水圧が上昇しすぎないように流量を抑制する必要があります。通常のトレーサー試験では揚水を行うためにポンプを使用しますが、このような環境下においてトレーサー試験を成立させるために、ポンプを使用する代わりに試験区間から揚水するためのバルブを開放することで発生する自然湧水を利用したトレーサー試験を実施しました。この結果、図 16(c)に示す通り、バルブを適切に調整することによりポンプでは制御が困難な 1 mL/min 以下の揚水を 20 日以上継続することができ、揚水箇所における水圧を一定に保つことができました。このように地質環境が多様な水理・力学条件の影響を受ける場合においても、既存の設備を用いてトレーサー試験を成立させることができました。

岩盤の透水性に加え、物質の化学状態や移行しやすさに影響を与える地下水の水質 (pH、酸化還元電位*など) や微生物・有機物などの地下水コロイドとの相互作用も、岩盤の閉じ込め性能を評価するに当たり重要な情報のひとつです。令和 7 年度は、これまでに実施してきた深度 350 m までの調査坑道を利用した水質観測 (6 章参照) に加えて、500m 調査坑道から新たに掘削したボーリング孔を利用した水質観測も実施しました。その結果、地下水の pH は 6.6、酸化還元電位は-220 mV であるとの結果が得られ、深度 350 m までと同様に中性・還元的な地下水が分布していることが確認できました。また、幌延を含む国内外の深部地下水を対象とした pH や酸化還元電位の測定・評価方法を整理して取りまとめました⁽⁵⁸⁾。

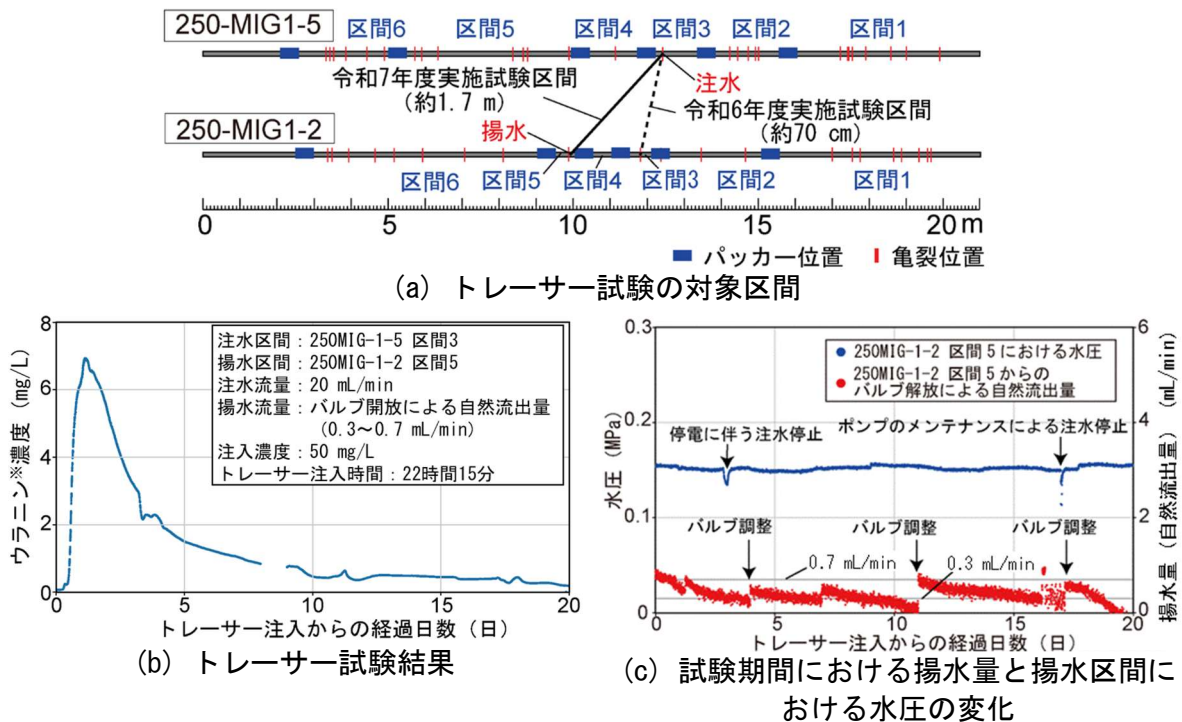


図 16 令和 7 年度に実施したトレーサー試験結果

ピットスケールにおける岩盤の閉じ込め性能の評価では、人工バリアから流出した核種が坑道の周囲に形成される EDZ を介して、割れ目や断層を含む岩盤中に移行することを想定します。その際の核種の移行評価には、EDZ の物質移行特性に関する条件を設定する必要があります^(7, 59)。令和 6 年度までの研究では、深度 350 m における EDZ の物質移行特性に関するデータを取得しました⁽⁶⁰⁾。一方で、後述する課題(2)では、深度 500 m では深度 350 m と比較して EDZ の広がりが大きくなることが予測されており^(8, 61)、ピットスケールにおける岩盤の閉じ込め性能も深度に応じて異なることが想定されます。これらの結果を踏まえ、深度 500 m における EDZ を対象としたトレーサー試験に着手しました。

令和 8 年度は、坑道スケールの岩盤の閉じ込め性能の評価手法の体系化のために、表 4 の分類 I-b に相当する領域における物質移行特性の把握を目的として、引き続き 250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑周辺において異なる種類のトレーサーを使用したトレーサー試験を実施します。試験では、令和 6 年度までに深度 350 m で実施した微生物・有機物・コロイド影響試験⁽⁸⁾の手法をもとに、トレーサーのサイズ分布などについても確認する予定です。また、トレーサー試験による物質移動の詳細な評価

を目的として、試験実施場所の周辺における岩石試料を採取し、トレーサーの分布などを分析する予定です（図 17）。モデル化・評価手法の構築を目的として、これらから得られた結果を反映した解析を実施します。ピットスケールにおける岩盤の閉じ込め性能の評価では、EDZ を対象とした核種の移行評価における物質移行特性の条件設定の信頼性向上を目的に、500m 試験坑道 8（図 6 参照）の EDZ を対象に 2 本のボーリング孔を掘削し、トレーサー試験を実施します。得られた試験結果に基づき、先行研究⁽⁷⁵⁹⁾における EDZ の条件設定の妥当性を検証します。

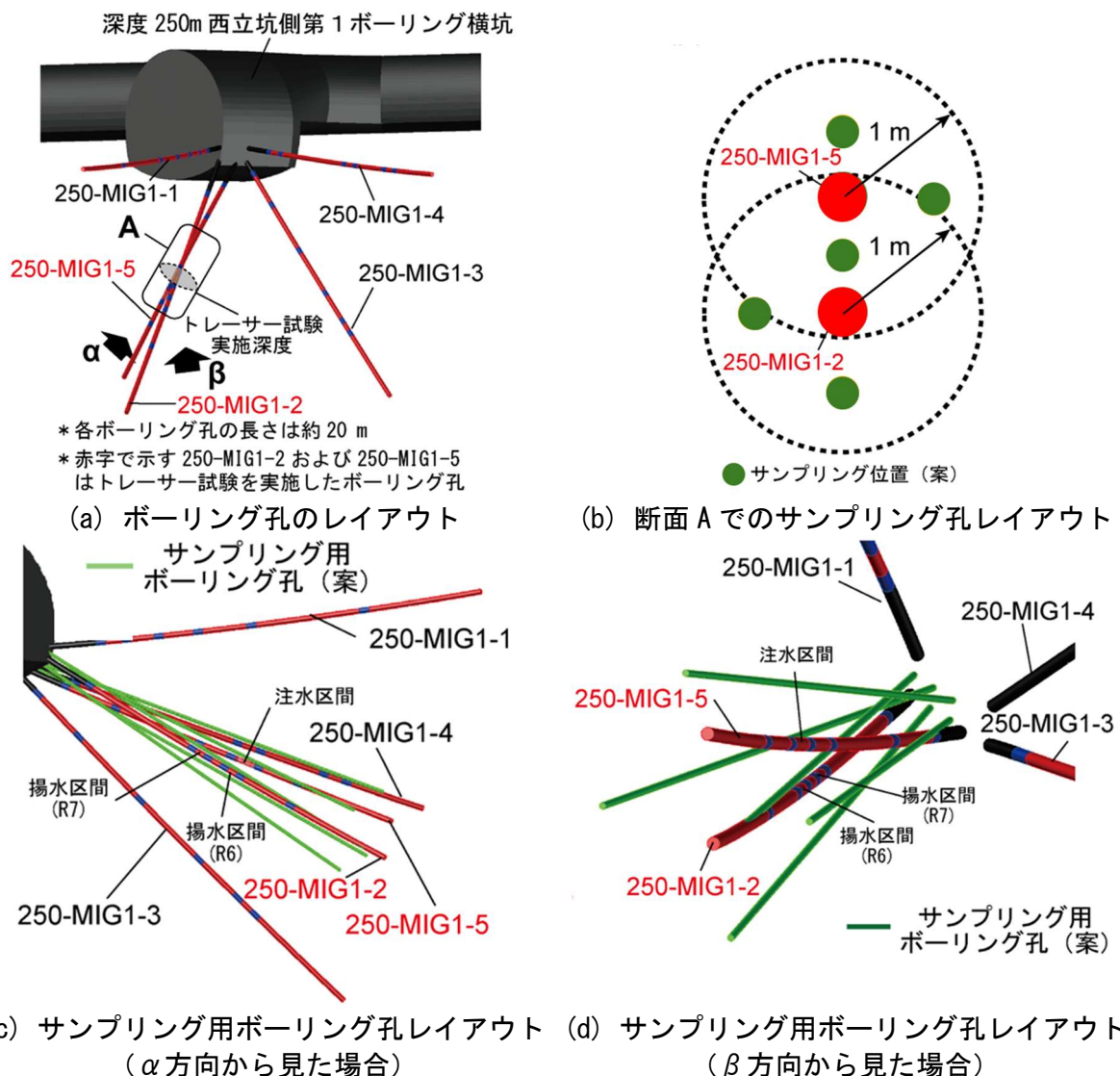


図 17 トレーサー試験実施箇所近傍における岩石試料のサンプリング計画案

岩石試料のサンプリング計画では、トレーサー試験を実施した付近でトレーサー試験に使用したボーリング孔から半径約 1 m の範囲で岩石試料を採取する計画です。

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

坑道やピットを掘削したり、埋め戻し材や人工バリアを施工したりする際には、坑道・ピット内への湧水が多くなる条件や、断層や割れ目の密集により局所的に岩盤の力学的強度が低下する条件を事前に把握することが重要です（図 13）。そうした条件下でも必要な設計条件を満たせることを確認し、施工の成立性を判断する必要があります。幌延深地層研究センターの地下施設周辺の岩盤には断層や割れ目が分布し、掘削に伴って坑道周囲には EDZ が形成され、これらが湧水量や坑道の安定性に影響します。本課題では、以下の技術を実証します。

- ・ 坑道とピットの配置に関する調査・評価・施工技術
- ・ 坑道の埋め戻しと止水プラグの設置の調査・設計・施工技術

これらの実証は、HIP のタスク B（処分技術の実証と体系化）の課題として設定しています。

坑道とピットの配置に関する調査・評価技術の実証では、500m 試験坑道 8・9（図 6 参照）において、先行ボーリングや物理探査などの原位置での地質環境特性の調査を実施します。図 18 に示す通り、主に先行ボーリングからの調査データとこれまでに構築してきた解析手法が、坑道の間隔とピットの配置（位置・間隔）の評価に適用可能であることを実証します。調査では、国内外の処分事業における処分場の設計の考え方^{例えば、(7, 62)}を踏まえ、掘削により坑道・ピット周辺に生じる EDZ の広がりや湧水量に着目します。EDZ の広がりや湧水量は岩盤の力学的強度の低下を引き起こし、坑道やピットの安定性に影響を与えます。特に、隣り合う坑道同士で EDZ の範囲が重なり合うことは好ましくないため、EDZ の広がりや湧水量は坑道・ピット間隔を設定する上で重要な情報です。一方、掘削中の大量湧水は、坑道やピットの施工を困難にする恐れがあり、さらに人工バリア定置後には緩衝材の流出などその品質を低下させる可能性もあることから、湧水量も坑道やピットの配置の判断に必要な情報です。これらの調査結果を踏まえ、後述する課題(3)で必要に応じて実施する湧水抑制対策、ピットの掘削などの技術の適用を通じて、人工バリアを定置するピットの配置位置や坑道の間隔を設計するために必要な情報とその情報の取得方法を整

理します。さらに、先行ボーリングおよび解析手法に基づく評価結果を、500m 試験坑道 8・9 の掘削以降に得られる調査結果と比較して妥当性を検証し、データ取得条件や解析条件の適切性を確認するとともに、調査計画および解析手法の最適化に資する知見と留意点を整理します。

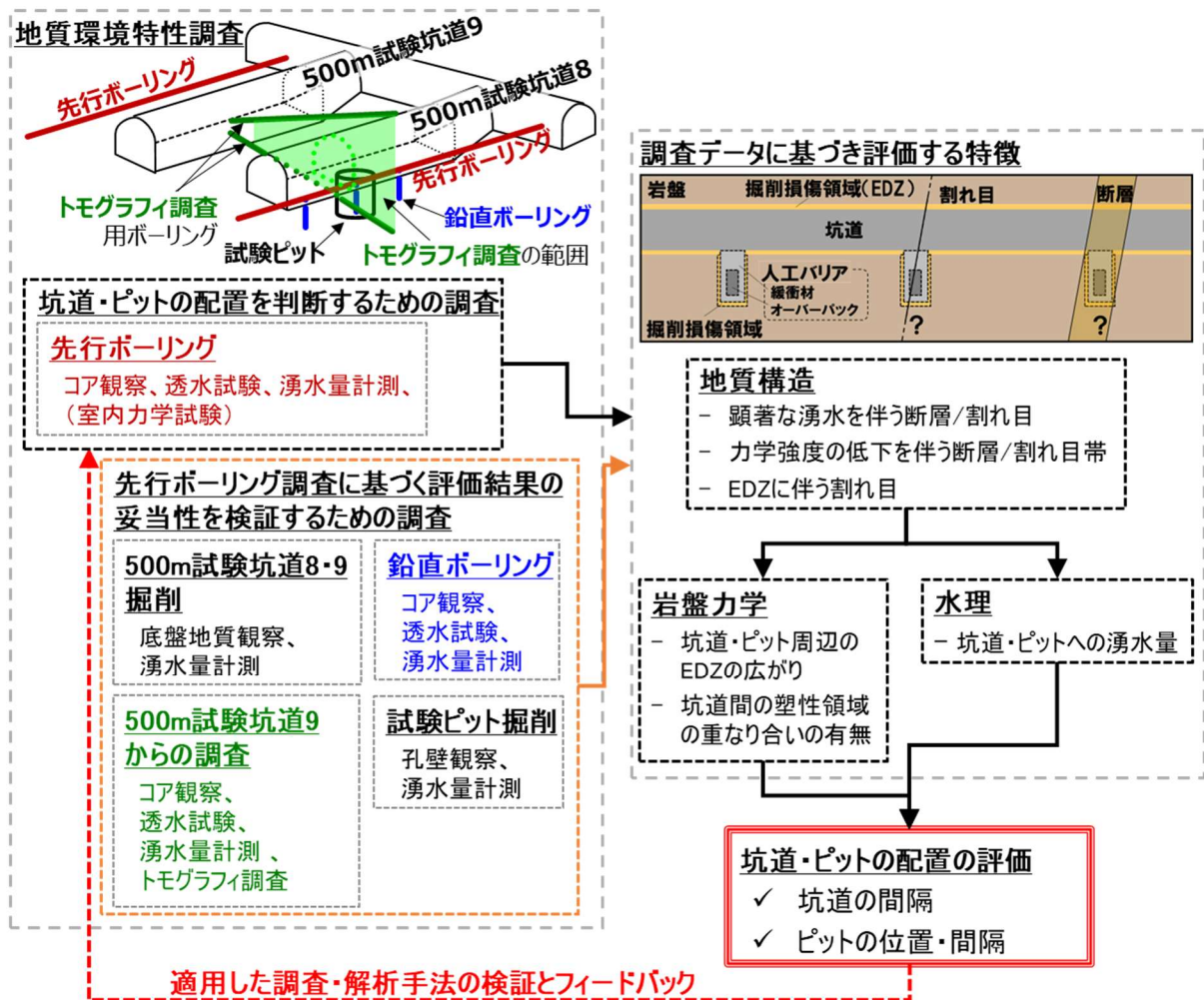


図 18 地質環境特性調査に基づく坑道とピットの配置の評価を示すフロー図

令和 7 年度は、先行ボーリング調査で得られたコア試料と孔壁画像を観察し、500m 試験坑道 8・9 内に出現する断層の予測を行いました。その後、500m 試験坑道 8・9 を実際に掘削して坑道の底盤を観察し、事前予測と比較しました。その結果、先行ボーリング調査によって、坑道に出現する断層を事前に捉えられることを確認するとともに（図 19）、断層の走

向・傾斜や分布頻度の傾向を把握できることが示唆されました。また、透水試験の結果、透水性の高い断層は確認されず、ボーリング孔からの湧水量もわずかであったことから、500m 試験坑道 8・9 の掘削に伴う湧水量は多くないと見込まれました。実際に、掘削前後で全坑道の湧水量は大きく変化しなかったため、両坑道からの湧水量は少なかったと考えられます。これは、先行ボーリングの結果と整合するものでした。



図 19 500m 試験坑道 9 における地質調査の結果の例

(a) で、赤い線は断層を、赤い点線は、先行ボーリング調査で確認された断層の走向・傾斜に基づき外挿した位置を示します。

さらに、500m 試験坑道 9 を掘削した後の原位置試験として、図 20 に示すように 500m 試験坑道 9 から 3 本のボーリング孔を 500m 試験坑道 8 に向けて掘削しました。得られたボーリングコアの観察や、ボーリング孔内にカメラを挿入した割れ目分布の観察、弾性波※トモグラフィ調査により、EDZ の広がりを確認しました。その結果、500m 試験坑道 9 の側壁面では、壁面から最大 3.1 m 程度まで坑道掘削に起因する割れ目 (EDZ 割れ

目)が発達していることが分かりました。なお、350m 調査坑道では、側壁面の EDZ の広がり は 1.0 m 程度であったことから^(63, 64)、深度 500 m では掘削の影響が大きいことが分かりました。さらに、上記の割れ目の発達状況を踏まえ、500m 試験坑道 9 周辺の EDZ を対象とした透水試験を、図 20 に示すレイアウトを設定した上で実施しました。図 21 に示す通り、EDZ では、割れ目のない領域と比較して 4 桁ほど高い透水性（透水量係数※）が得られました。

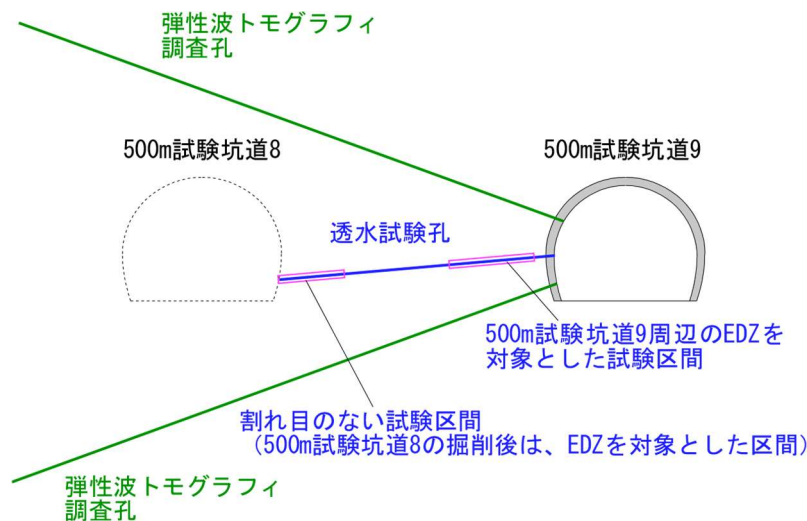


図 20 500m 試験坑道 9 から掘削したボーリング孔と透水試験のレイアウト

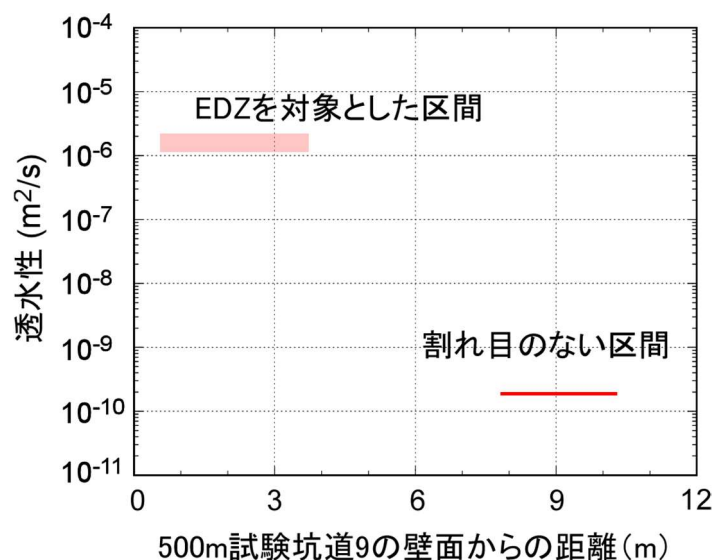


図 21 透水試験結果

透水性を算出する解析において、条件によって算出される値が異なってくることから、ここでは幅を持たせた値として EDZ の透水性を示しています。

処分場の閉鎖段階では、「坑道およびその周辺が卓越した放射性物質の移行経路になることの抑制」を確保するため、適切な材料で坑道を埋め戻すとともに、閉鎖を確実にするために止水プラグを設置することが検討されています（図 22）⁽⁷⁾。そこで、坑道の埋め戻しと止水プラグの設置の施工技術の実証では、350m 試験坑道 6（図 5 参照）において、実規模スケールの坑道の埋め戻しと止水プラグ設置の施工試験（以下、原位置施工試験）を実施し、埋め戻し材と止水プラグの設計から施工に至るまでの一連の技術が成立することを確認します。

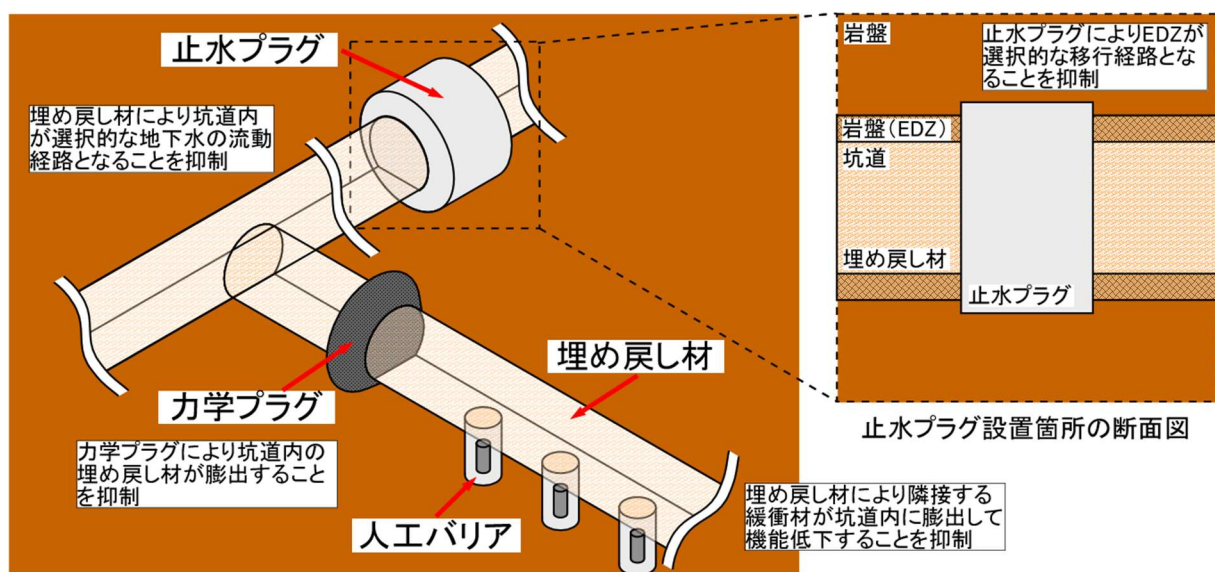


図 22 処分場の閉鎖段階のイメージ図

令和 7 年度は、原位置施工試験に先立ち、設計に必要な情報を取得するために、350m 試験坑道 6 の底盤、側壁および天端からボーリング孔を掘削した調査を継続しました。その調査では坑道周辺の EDZ の広がりや周辺岩盤の透水性の変化を把握するため、コア試料の観察、ボーリング孔内にカメラを挿入した割れ目分布観察、および透水試験を実施しました。その結果、坑道掘削後に坑道周辺で形成されたと解釈される引張割れ目が発達する領域では、割れ目の少ない領域に比べて透水性が高くなる傾向を確認しました。

坑道の埋め戻しと止水プラグの施工において、吹付け工法を適用することを想定し、坑道と切欠き部の一部（天端）の形状を実寸で模擬した型

枠を用いた地上吹付け試験を実施しました（図 23）。この試験では、これまでの試験結果^(64, 65)を踏まえて設定した配合（表 5）の埋め戻し材料と止水プラグの材料を用いて、施工手順や施工品質（乾燥密度※など）を確認しました。坑道の部分は 2 つに区間を分けて、埋め戻し材料と止水プラグの材料のそれぞれを施工し、切欠き部の天端は止水プラグの材料を施工しました。試験後に、型枠に吹付けられた材料の乾燥密度やリバウンド材（付着せずに跳ね返って落ちた材料）の量などを調査しました。調査の結果、施工後の平均乾燥密度は、埋め戻し材・止水プラグともに目標値を上回ることが確認できました。さらに、上向きに吹付けを行う止水プラグの切欠き部の天端ではリバウンド材の量が多くなる傾向が見られました。これらの調査・試験の結果を踏まえて 350m 試験坑道 6 における原位施工試験計画の具体化を進めました。



図 23 地上吹付け試験の実施状況

表 5 地上吹付け試験における材料の条件

材料名	配合 (%)	施工含水比 (wt%)	目標乾燥密度 (Mg/m ³)
埋め戻し材	ベントナイト※：40 幌延の泥岩：60	32.5	1.30
止水プラグ	ベントナイト：70 ケイ砂：30	18.6	1.43

令和 8 年度は、坑道とピットの配置に関する調査・評価・施工技術に関して、500m 試験坑道 8 を掘削した後の EDZ の広がりや透水性の変化につ

いて、取得したデータに基づき検討します。また、令和7年度までに実施した500m試験坑道8・9に対する先行ボーリング調査と底盤観察の結果を踏まえ、試験ピット掘削の候補地点において底盤から鉛直ボーリング孔（予定では3孔）を掘削します。これにより、EDZの広がりや湧水量を把握した上で、試験ピットの掘削地点を1箇所絞り込みます。坑道の埋め戻しと止水プラグの設置の調査・設計・施工技術に関しては、策定した試験計画を基に350m試験坑道6の奥側から数mの範囲をブロック工法と吹付け工法を組み合わせる埋め戻しを行います。原位置施工試験では、埋め戻しの手順や施工品質の管理方法などを確認するとともに、施工後の埋め戻しの状態を確認するため、土圧や水分量を計測するセンサーなどを設置する予定です。

(3) 多接続坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備

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

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

令和7年度は、①の近接する複数の湧水箇所間の水圧干渉を考慮した湧水量あるいはその減少速度の予測手法と湧水抑制対策への反映方法の

整備に関しては、350m 調査坑道の複数の湧水箇所について湧水量の減少速度の予測手法の整備を行いました⁽⁶⁶⁾。具体的には、350m 調査坑道を地層の分布に基づいて南西側領域および北東側領域に区分し、各領域における掘削時の主要な湧水箇所（図 24）の総湧水量の減少速度を、地上から掘削したボーリング孔の調査結果より推定した断層や割れ目内の水みちのつながり方の次元に基づいて予測しました。さらに、掘削当時および掘削から 10 年後に実測した湧水量のデータを用いて各領域における総湧水量の長期的な減少率（以下、実測減少率）を計算し、予測される減少率（以下、予測減少率）と比較しました。その結果、南西側領域では実測減少率が予測減少率の範囲内でしたが（図 25(a)）、北東側領域では実測減少率が予測減少率の最大値よりも最大で 4 倍程度高い可能性が分かりました（図 25(b)）。ここで、南西側領域および北東側領域に分布する複数の湧水箇所間で水圧干渉が生じていると想定すると、南西側領域および北東側領域の予測減少率は、水圧干渉に伴いそれぞれ最大で 3 倍および 5 倍となると算出され、この効果を考慮するとどちらも実測減少率と矛盾しない値となります。すなわち、350m 調査坑道では坑道内に複数の湧水箇所が存在するため、近接する湧水箇所間で水圧干渉が発生し、湧水箇所が単独の場合と比べて湧水量がより速く減少したと考えられます。

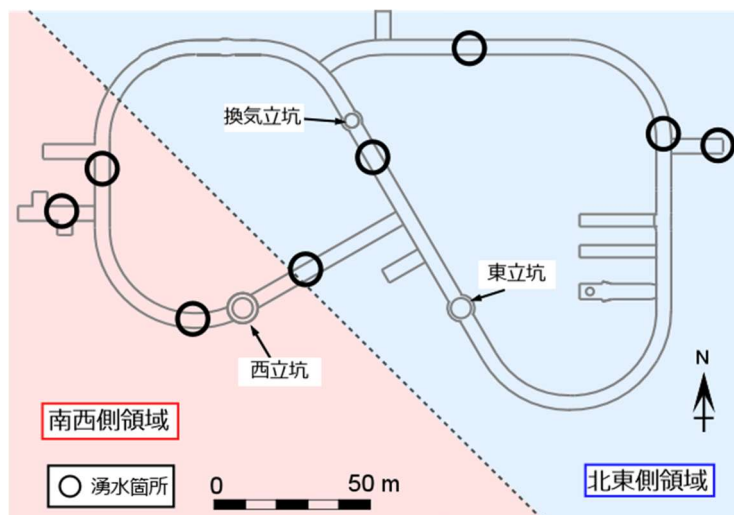


図 24 350m 調査坑道における掘削当時の主要な湧水箇所⁽⁶⁶⁾

地層の分布に基づき、350m 調査坑道を南西側領域（赤色；遷移帯上部）および北東側領域（青色；遷移帯下部）に区分し、各領域の境界を破線で示しています。350m 調査坑道における掘削時の主要な湧水箇所は、掘削中の坑内湧水量の経時観察や掘削中の岩盤の地質観察の結果から、南西側領域で 3 箇所、北東側領域で 5 箇所、確認されています。

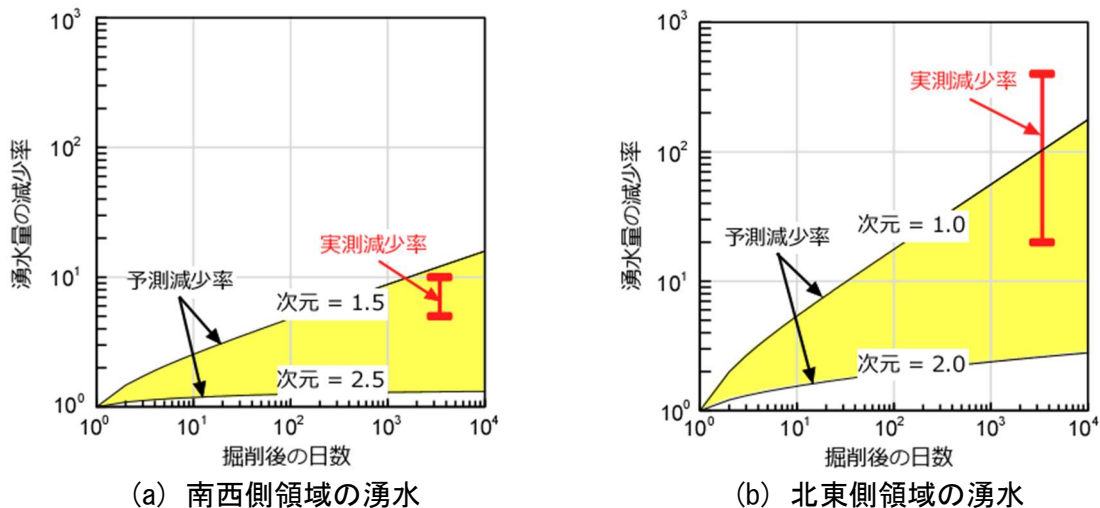


図 25 350m 調査坑道内における湧水量の予測減少率と実測減少率の計算結果の一例⁽⁶⁶⁾

湧水量の減少率は、掘削当時の湧水量を 1 とし、掘削後の任意の時間の湧水量をその逆数として計算しました。赤の線は実測減少率の範囲を、黒の曲線内の黄色の領域は予測減少率の範囲をそれぞれ示します（推定誤差を考慮するために値を範囲で示しています）。予測減少率を算出するための解析では、既存のボーリング調査結果に基づき、水みちのつながり方の次元を図 24 の南西側領域で 1.5～2.5、北東側領域で 1.0～2.0 と設定して計算しました。

以上のように、断層や割れ目内の水みちのつながり方の次元を用いるとともに、近接する複数の湧水箇所間の水圧干渉を考慮することで、湧水量の長期的な減少速度を予測できることを実証しました⁽⁶⁶⁾。この結果、複数の湧水箇所間の水圧干渉が想定される場合は湧水量の減少速度の加速が見込めるため、湧水抑制対策の要否を検討する上で重要な判断材料を提供できるようになりました⁽⁶⁶⁾。具体的には、湧水断層が密集する場合の湧水量予測に必要な解析手法を整備し、図 26 に示すような湧水抑制対策の判断手順を提示することができました。このように、①の多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術に関する知見を整理できたことから、所期の目標を達成できました。今後、湧水量に関する検討は③の「緩衝材の流出現象を評価/抑制する技術として、断層や割れ目からの湧水の定常的な発生量や湧水量の減少速度の予測手法と流出抑制対策への反映方法の整備」の中で実施します。

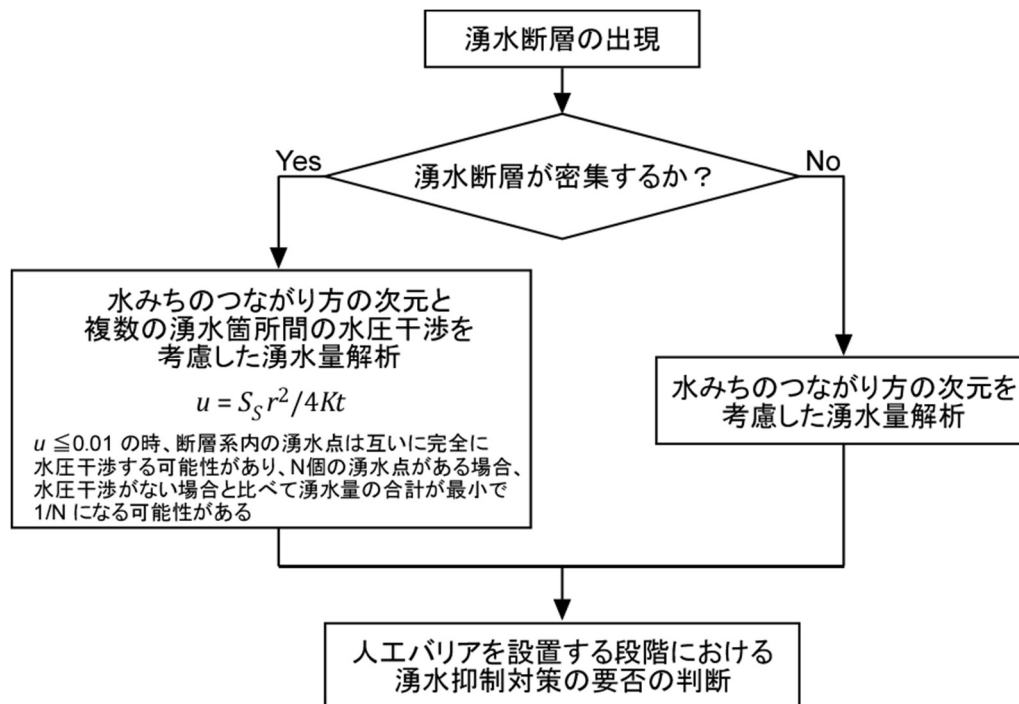


図 26 近接する複数の湧水箇所間の水圧干渉を考慮した湧水量解析と湧水抑制対策の判断手順

図中の式で、 K/S_s は水頭拡散率 (m^2/s ; 水圧の伝搬速度を表す指標)、 r は湧水点間の距離 (m)、 t は時間 (s) を表します⁽⁶⁷⁾。

②のピット周辺の EDZ の範囲を評価するための解析手法と支保設計への反映方法に関しては、500m 調査坑道における試験ピットの掘削に先立ち、掘削に伴って EDZ がどのくらいまで広がるかを予測する解析を実施しました。結果として、深度 350 m の人工バリア性能確認試験で掘削した試験孔の EDZ の広がりの評価結果⁽⁶⁸⁾と同様に、坑道底盤部付近で EDZ の広がりが大きく、深度が深くなるにつれて小さくなることが分かりました。また、試験ピット掘削中の EDZ の広がりを調査するための計測計画を検討した結果、岩盤損傷時の振動 (AE*) の計測が最も有効であることが分かりました。そこで、実際に 500m 調査坑道で AE を計測するための準備として、図 27 に示すように、岩盤に与えた振動がどの程度の距離まで伝わるかを調べるための試験を、500m 試験坑道 8 で実施しました。この試験では、岩盤に振動を受振するセンサーを設置した上で、岩盤に直接打撃を与えて、その打撃の振動がどの程度まで伝わるかを、振動の波形を見ながら確認しました。これらの予測解析と原位置試験結果を踏まえて、AE 計測のレイアウトを検討しました。



(a) 試験実施場所の様子

(b) 取得した波形

図 27 岩盤に与えた振動がどの程度の距離まで伝わるかを調べるための試験の様子

③の断層や割れ目からの湧水の定常的な発生量や湧水量の減少速度の予測手法と流出抑制対策への反映方法の整備に関しては、断層の代表的な透水性と DFN モデルを組み合わせることで有効透水係数を推定する手法を開発しました⁽¹²⁾。この手法を用いることで、断層や割れ目からの湧水の定常的な発生量をより適切に予測できるようになりました。さらに、500m 調査坑道において断層や湧水の調査を行うとともに、地下施設全体の湧水量（以下、坑内湧水量）を継続して観測しました。調査の結果、500m 調査坑道において複数の断層が確認されました（図 28(a)）。また、事前に断層や割れ目内へのグラウト注入を行わなかったにも関わらず、500m 調査坑道の掘削中に坑内湧水量の定常的な増加が認められませんでした（図 28(b)）。この結果は、500m 調査坑道における定常的な坑内湧水量に関する事前の予測結果⁽⁹⁾や上記の DFN モデルによる推定結果と調和的でした。さらに、深度 500 m における各坑道の湧水量を詳細に観測するための排水システムを整備しました（図 29）。

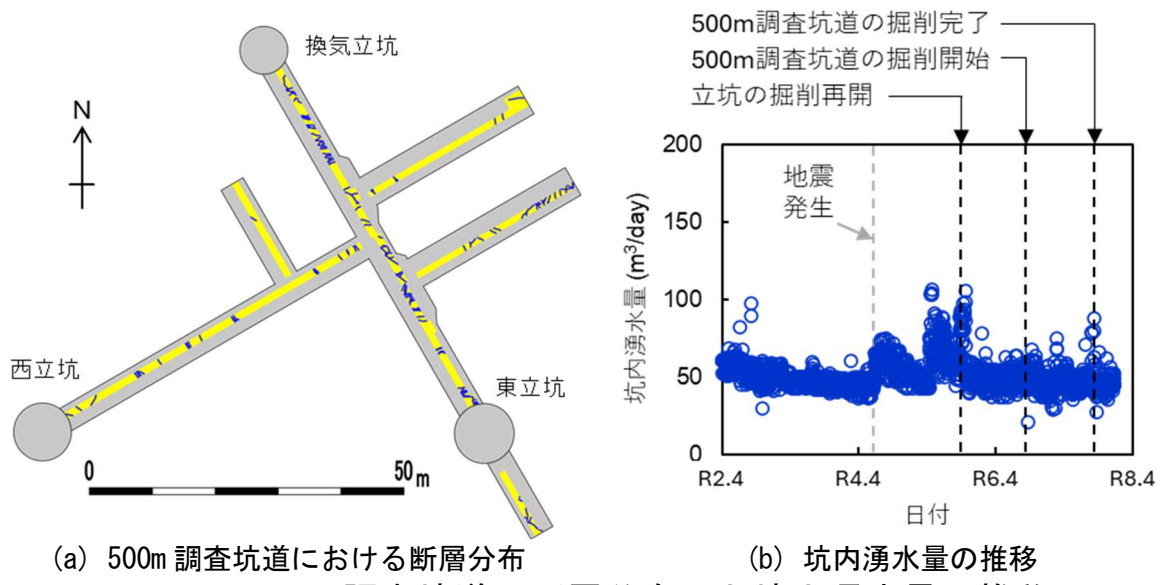


図 28 500m 調査坑道の断層分布図と坑内湧水量の推移
 (a)における青い線は断層を示します。地質観察は黄色で示した範囲の底盤（床面）において実施しました。

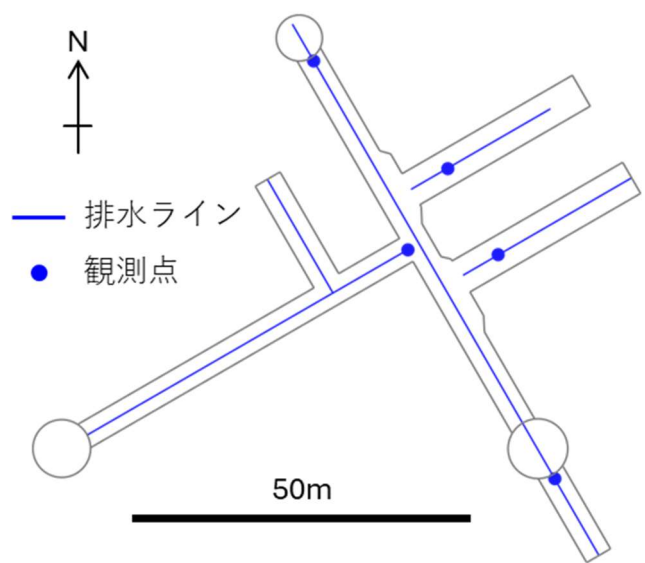


図 29 500m 調査坑道において整備した排水システムの流路図
 坑道内に湧き出した地下水は排水ラインを通して各観測点に集まります。観測点に流れ込む地下水の流量を定期的に計測することで、湧水量の変化を把握します。

④のピット周辺の割れ目の開きにくさの評価手法と緩衝材の侵入抑制対策への反映方法の整備に関しては、350m 東立坑側第 1 ボーリング横坑（図 5 参照）において、せん断割れ目と断層（破砕物を伴う割れ目）を対象として水圧擾乱試験を実施しました。これまでは断層や掘削損傷割れ目（引張性の割れ目）を対象とした試験を実施し、割れ目の開きにくさ

の評価をしてきましたが、今回は破砕物を伴わないせん断性の割れ目を対象とした試験を実施しました。試験では、割れ目を確認した深度をパッカーで区切り、そこに水を注水して圧力(区間圧力)を上げていきながら、注水した流量の変化を見ることで、割れ目がどの程度開いたかを確認しました。その結果の一例を図 30 に示します。区間圧力を 2.6 MPa から 0.2 MPa ずつ、注水流量を調整しながら増大させました。その結果、区間圧力を 4.6 MPa に増大させた時に注水流量が急激に増大し始めました。この試験結果と既存のモデル^(69, 70)に基づき、割れ目の開口幅の変化と割れ目に垂直に作用する力の関係を図 31 に整理しました。割れ目に垂直に作用する力が大きい状態では割れ目の開口幅は 0.02 mm 程度と非常に小さいですが、力が 1.6 MPa 以下となった時点、すなわち区間圧力が 4.6 MPa になった時点から割れ目の開口幅が顕著に増大することを確認しました。このことから、破砕物を伴わないせん断性の割れ目についても、水圧擾乱試験や既存のモデルを適用することにより割れ目の開きにくさを定量的に調査できることを確認しました。さらに、この結果は、既存のモデルの適用性が広がる可能性を示唆しています。

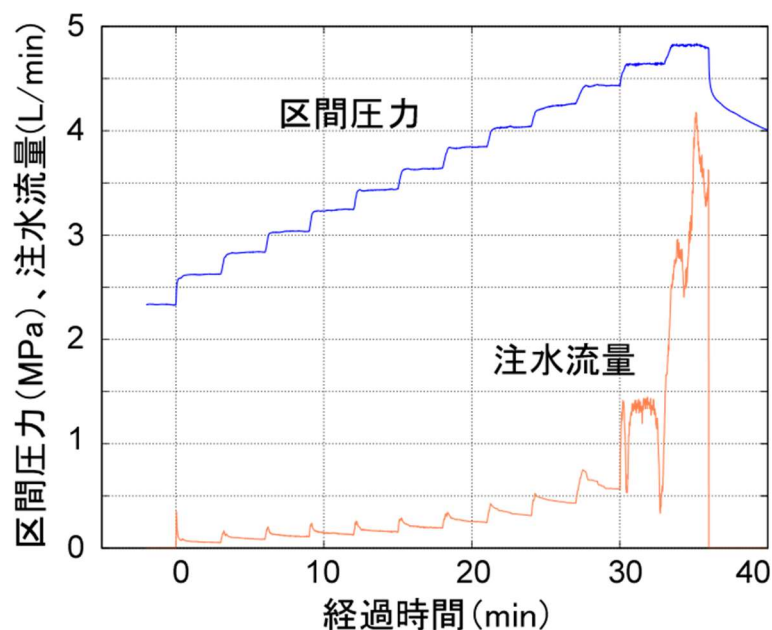


図 30 せん断割れ目を対象とした水圧擾乱試験の結果

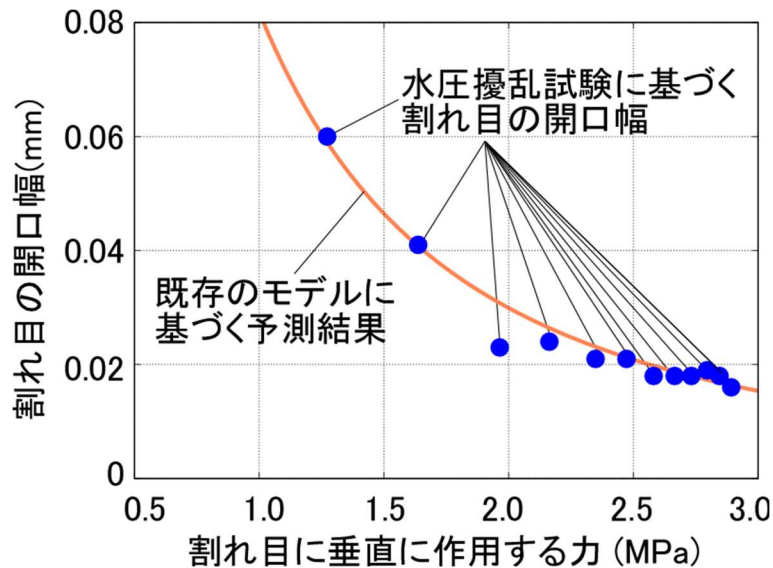


図 31 せん断割れ目を対象とした割れ目の開口幅と割れ目に垂直に作用する有効応力の関係

令和 8 年度は、②のピット周辺の EDZ の範囲を評価するための解析手法と支保設計への反映方法に関して、EDZ の広がり予測解析結果と岩盤の振動が伝わる距離の情報に基づき、試験ピット掘削中の EDZ の広がりを計測するための計画を立案します。また、EDZ の広がり予測解析結果に基づき、試験ピットの施工方法や支保設置に関して検討を進めます。③の断層や割れ目からの湧水の定常的な発生量や湧水量の減少速度の予測手法と緩衝材の流出抑制対策への反映方法の整備に関しては、令和 7 年度に整備した排水システム（図 29）を用いて深度 500 m における各坑道の湧水量を詳細に把握するとともに、緩衝材の流出量評価に必要な湧水量の予測手法の整備に向けた解析を継続します。④のピット周辺の割れ目の開きにくさの評価手法と緩衝材の侵入抑制対策への反映方法の整備に関しては、350m 調査坑道で実施した水圧擾乱試験結果（図 30 など）を整理して、割れ目に作用する応力が変化したときの割れ目や断層の開きにくさの定量的な評価手法の整備を進め、割れ目への緩衝材の侵入に対する留意点を検討します。

(4) 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理

廃棄体の設置の判断や間隔の設定に当たっては、緩衝材やオーバーパックの機能、坑道やピットの安定性および廃棄体周辺の岩盤の閉じ込め

性能を担保するために必要な情報を整理することが重要となります。例えば、坑道やピット周辺に存在する割れ目の開きにくさやずれにくさ、割れ目からの湧水量、地下水の流れにくさ（物質の動きにくさ）、EDZの広がりなどの情報を取得することが重要となります。本課題では、廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の調査・評価手法について、実際に幌延で適用した調査・評価手法を体系的に整理します。

令和7年度は、坑道やピット周辺に存在する割れ目のずれにくさに関する評価手法の整備に向けて、過年度に構築した透水試験用パッカーの圧力変化を活用した割れ目のせん断変位量の推定手法の信頼性を向上させるために、関連する室内試験の方法を見直しました。室内試験では、透水試験で得られるパッカーの圧力変化から、2つのパッカーで区切られた孔内試験区間の長さの変化量を算出するための関係式を構築します。今回、原位置試験の条件により近い室内試験の方法を新たに構築しました(図32)⁽⁷¹⁾。室内試験の結果、過年度の方法はせん断変位量を1.2倍～1.5倍もしくは0.6倍～0.9倍に過大もしくは過小評価する可能性があることが分かりました(図33)。また、パッカー圧が小さいほど両者の結果の違いが大きくなることが分かりました(図33)。今回得られた知見は、今後実施する原位置試験における割れ目のずれにくさの評価に反映していきます。

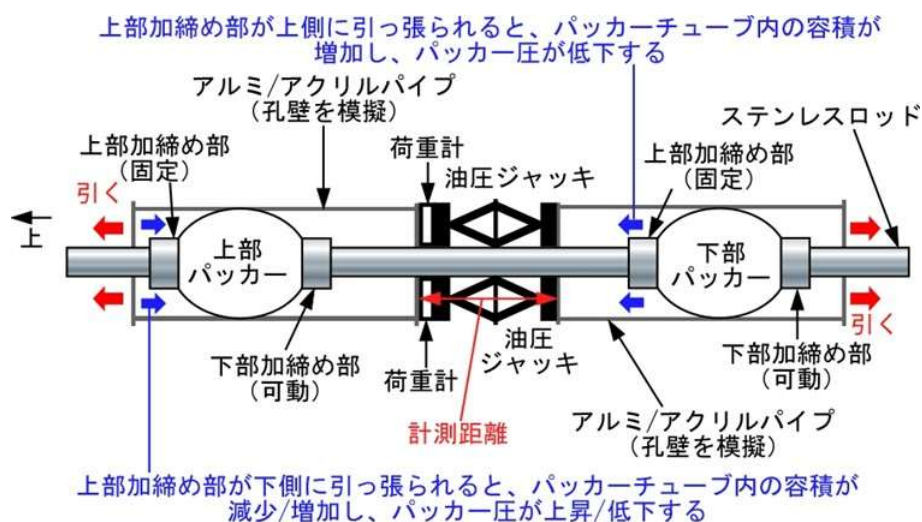


図 32 新たに構築した室内試験方法の概要⁽⁷¹⁾

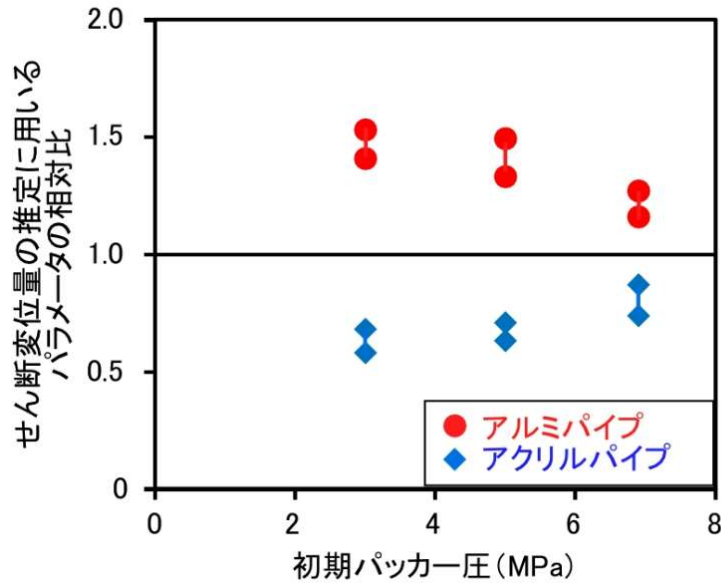


図 33 室内試験の結果⁽⁷¹⁾

縦軸のせん断変位量の推定に用いるパラメータの相対比は、今回の室内試験結果に対する過年度の室内試験結果として計算しました。このパラメータの相対比が、そのまません断変位量の推定値の相対量になります。室内試験では、初期パッカー圧を 3 MPa、5 MPa、6.9 MPa と設定しました。

坑道やピット周辺に存在する割れ目の開きにくさについては、課題(3)の④に記載した通り、割れ目に垂直に作用する有効応力と割れ目の開口幅の関係に関わる原位置試験データの拡充を進めました。

坑道やピット周辺の地下水の流れにくさ(物質の動きにくさ)については、この評価に必要となる、地層の代表的な透水性の計算方法を新たに構築しました⁽¹²⁾。この方法では、はじめにボーリング調査や坑道掘削時の地質観察などで得られる割れ目分布のデータから割れ目の地質学的なつながり方をモデル化し、DFN モデルを作成します。次に、それぞれの割れ目に代表的な透水性を与え、複数の割れ目を含む領域の地下水の流れをシミュレーションすることで地層の代表的な透水性を計算します。この時、本方法では、割れ目内の水みちのつながり方の次元を考慮して割れ目の代表的な透水性を決定します(課題(1)を参照)。これにより、水みちのつながり方の次元が低く、割れ目内の水みち同士の連結が少ない岩盤(例えば表 4 の分類 I-a に属する岩盤の一部)でも地層の代表的な透水性を適切に求めることができるようになりました。この地層の代表的な透水性は、ピット周辺に存在する割れ目からの湧水量の予測に必要です。

課題(3)の③に記載したように、本方法により求められる地層の代表的な透水性は500m調査坑道掘削時の坑内湧水量と整合することが確認できています。

坑道やピット周辺のEDZの広がりの評価手法の整備に向けて、土木分野におけるトンネル設計において壁面の安定性を検討する際に用いられる地山強度比と呼ばれる指標に着目した検討を行いました。地山強度比は、岩盤の安定性を評価するための基本的な指標のひとつです。一般的に地山強度比が2よりも小さい場合は坑道の変形が大きくなり、周辺岩盤の安定性に影響を及ぼすと言われていています。そこで、幌延深地層研究センターの地下施設や、これまでに様々な岩種を対象として掘削された地下研究施設において調査されたEDZの広がり、地山強度比との関係を整理・分析しました。その結果、図34に示すように、地山強度比とEDZの広がりには相関性があり、地山強度比が2より小さくなるとEDZの広がりが顕著に大きくなることを確認しました。このことから、EDZの広がりは、坑道を掘削する深度の応力状態や岩盤の強度に依存することが分かります。

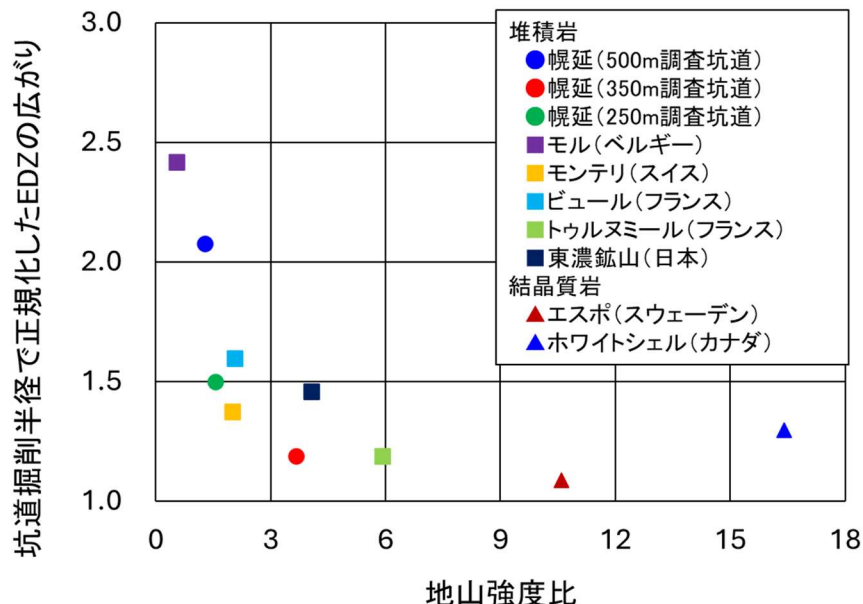


図 34 EDZ の広がり と 地山強度比 の関係

それぞれの施設で掘削された坑道の大きさが異なることから、グラフの縦軸は、坑道の中心からEDZの外側までの距離を、坑道掘削半径で除した値(正規化した値)として示しています。

さらに、これまでに幌延深地層研究センターや他の地下研究施設などで実施されてきた EDZ の広がり を把握するための調査事例を基に、図 35 のように坑道掘削前から掘削後にかけて EDZ の広がり を調査・評価するためのフローチャートを作成しました。上記より、EDZ の広がり は地山強度比に依存することから、このフローチャートは様々な岩盤に対して適用可能であると考えられます。なお、課題(2)ではこのフローチャートに則って 500m 試験坑道 8・9 の EDZ の広がり を評価しており、今後の調査の進展を踏まえ必要に応じてこのフローチャートを更新していきます。

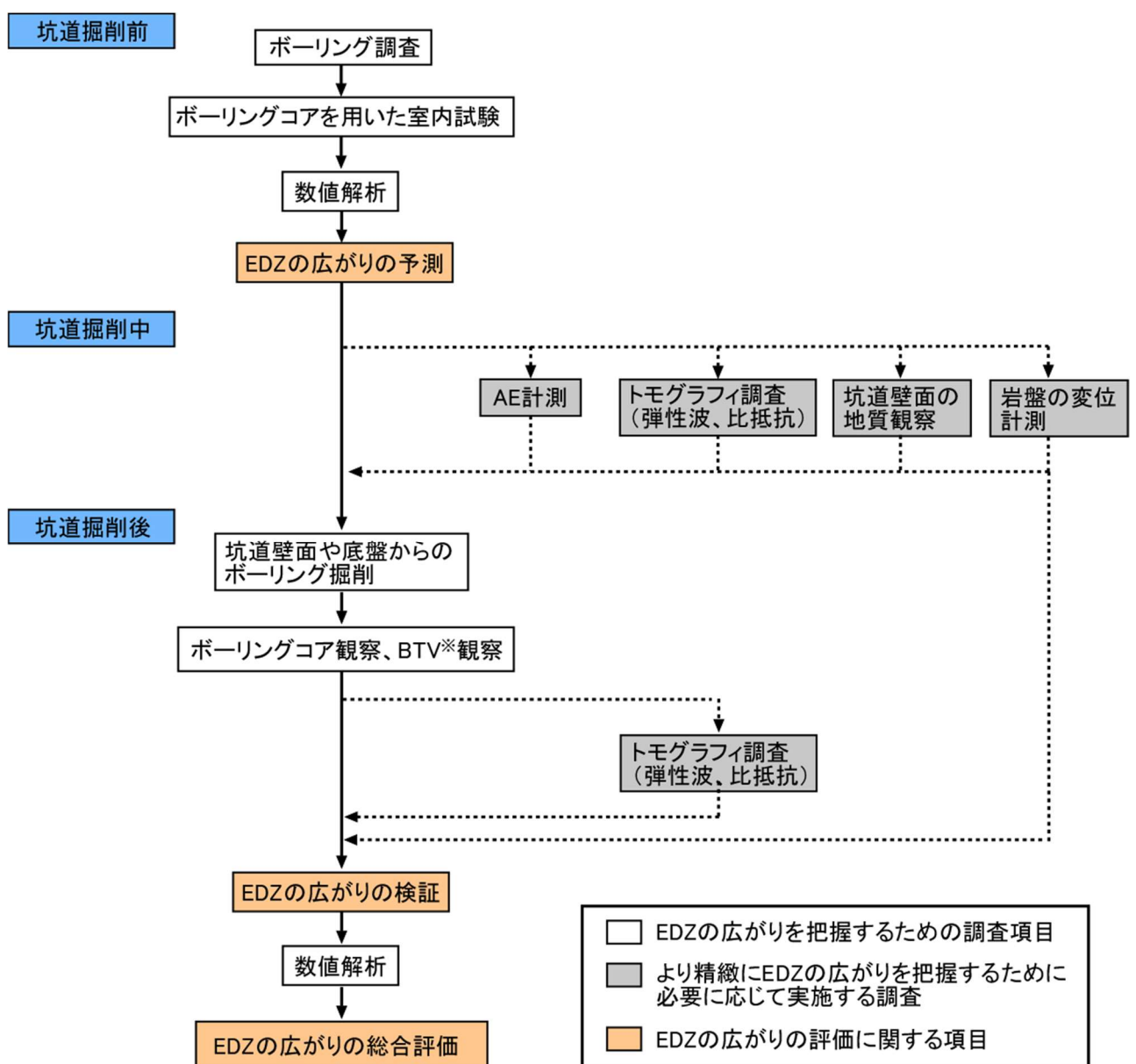


図 35 坑道周辺の EDZ の広がり を調査・評価するためのフローチャート (61、63、69、72、73、74)

令和 8 年度は、立坑掘削前のグラウト施工時に断層部で確認されたずれの情報を用いた分析を進めるとともに、透水試験用パッカーの圧力変化を活用した割れ目のせん断変位量の推定手法を活用して、350m 調査坑道で実施した水圧擾乱試験で得られたデータの解析を進め、既存の割れ目や断層のずれにくさの検討を進めます。また、課題(1)～(3)で実施する調査・研究の進捗に応じて、坑道やピット周辺の割れ目の開口幅とその開きにくさ、割れ目のずれにくさ、割れ目からの湧水量、地下水の流れにくさ、および EDZ の広がりに関する調査・評価手法に関して、堆積岩における適用可能性に関する整理を継続して実施します。なお、令和 7 年度までは、表 4 に示すように坑道やピット周辺の地下水の流れにくさについて、堆積岩を対象とした整理を行ってきましたが、令和 8 年度は堆積岩以外の岩盤についても整理を行うとともに、坑道やピット周辺の地下水の流れにくさに関わる岩盤分類のためのフローチャートの構築を検討します。

6. 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的设计・施工や安全評価に関わる基礎情報、例えば、岩盤の水の流れやすさや岩石の鉱物組成や化学組成、地下水のpHや化学組成などのデータの取得などについては、令和2年度以降の必須の課題への対応に必要なことから、引き続き必要最低限のデータを取得し、処分システム的设计・施工や安全評価に関する研究を行う試験場所の地質環境特性を明確にし、それらの手法の評価に用いることとなります。なお、処分システム的设计・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7年度におけるデータ取得の例として、350m調査坑道に設置している水圧・水質モニタリング装置で取得した観測結果のうち、人工バリア性能確認試験の試験箇所周辺のボーリング孔から得られた地下水の水質モニタリング結果を示します(図36)。pHおよび酸化還元電位は、これまでの測定値とおおむね同様の傾向を示しており、水質に大きな変動はみられませんでした。

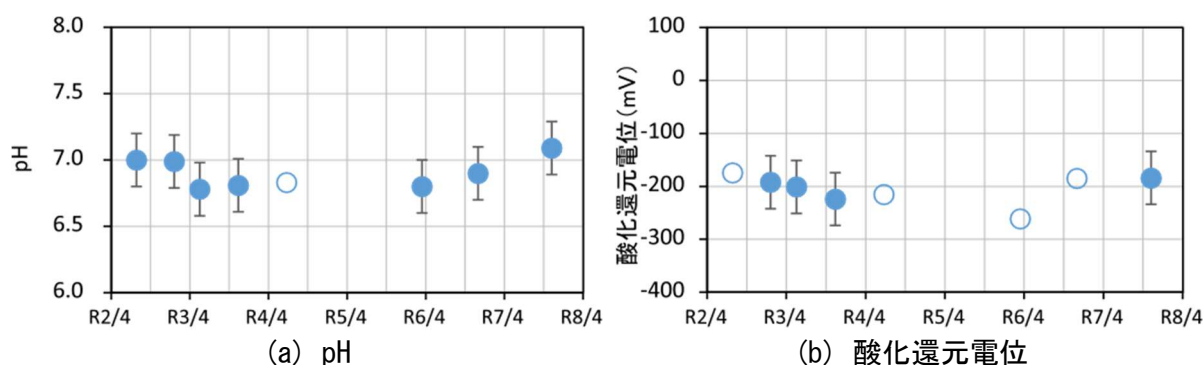


図 36 人工バリア性能確認試験の試験箇所周辺のボーリング孔における水質の経時変化

白抜きのデータ(○)は、電極の劣化や表面への汚れ・気泡の付着などの影響により、信頼性が劣る可能性のあるデータを示します。

令和8年度は、地質環境特性データとして、既存のボーリング孔や140m、250m および 350m 調査坑道を利用した地質構造・岩盤の水理・地下水の地球化学・岩盤力学に係るデータ取得などを継続するとともに、500m 調査坑道においてもこれらのデータ取得を行います。地質構造に関しては、ボーリング調査や坑道掘削時の地質観察で得られた地質データに基づいた地層および割れ目の空間的分布に関する特徴の整理を継続します。岩盤の水理に関しては、坑道掘削後の地質環境の変化を把握するため、地上から掘削された既存のボーリング孔での水圧観測を行います。地下水の地球化学に関しては、既存のボーリング孔を対象に地下水の採水調査を行うとともに、地下水の水質分布や水質の時間的な変化を把握します。また、坑道掘削の影響については、地表や坑道に設置した高精度傾斜計および坑道に設置した地中変位計などを用いて、岩盤の微小な変形の観測を継続します。さらに、上幌延観測点（HDB-2）（図 8 参照）と地下施設での地震観測を継続します。

7. 地下施設の管理

令和5年度から再開した掘削工事などの施設整備業務が令和8年1月に完了したため、令和8年度は、地下施設の設備の運転監視や保守点検などの維持管理業務を実施します。

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。

8. 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。

8.1 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 37）。



(a) 天塩川の水質調査



(b) 掘削土（ズリ）置場周辺での水質調査

図 37 水質調査の様子

8.2 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 38）。



(a) 清水川の水質調査



(b) 清水川の魚類調査

図 38 環境影響調査の様子

9. 安全確保の取り組み

調査研究に関わる作業の実施に当たっては、安全確保を最優先とした取り組みを行います。具体的には、作業計画時における安全対策の確認を徹底するとともに、作業者に対する安全教育や訓練の実施、定期的な安全パトロールなどを通じて安全確保に努めます（図 39）。



図 39 安全パトロールの様子

10. 開かれた研究

幌延深地層研究計画で実施する地下深部を対象とした研究は、地球科学の幅広い分野にわたり、学術研究の発展にも寄与します。このため、国内外の大学・研究機関との研究協力を積極的に行うとともに、国際交流施設^{*}などを利用して国内外の専門家と意見・情報交換を行いながら、研究を進めていきます。また、幌延深地層研究センターの施設や研究フィールドを、国内外の関連する研究機関に広く開放していきます。また、経済産業省資源エネルギー庁などが進めるプロジェクトなどに協力していきます。研究開発を進めるに当たっては、当初の計画の研究対象の範囲内において、国内外の機関との協力を進めます。

地層処分や研究開発に関する国民との相互理解を促進するため、幌延深地層研究センターのホームページ^{*12}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 40）。また、令和 2 年度から幌延町広報誌「ほろのべの窓」に連載している、研究内容などを紹介する記事については、令和 8 年度も継続します。



図 40 地下施設見学会の様子

^{*}12 : 幌延深地層研究センターホームページ ; <https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/>

10.1 国内機関との研究協力

○北海道科学大学、大成建設

人工知能を用いた画像処理により坑道壁面の地質情報を取得する方法に関する研究

○東京大学

微生物を指標とした堆積岩中の水みち調査手法の開発

○名古屋大学

コンクリーション化充填剤を利用した地下空洞掘削影響領域および水みち割れ目の自己シーリングに関する研究

○京都大学

稚内層岩盤に生じる掘削損傷領域の割れ目の力学挙動の検討

○京都大学、東北大学

地下水中の微量元素と有機物を対象とした地球化学研究

○幌延地圏環境研究所

堆積岩を対象とした岩盤力学や微生物などに関する研究

○電力中央研究所

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

○原子力規制庁

地層処分における核種移行性能に関する研究（原子力機構 安全研究センターが実施する共同研究への協力）

○大林組

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

上記の他、大学や研究機関などとの研究協力を進めます。また、原子力や地層処分に関する人材育成のための講習やトレーニングの企画に協力します（図 41）。

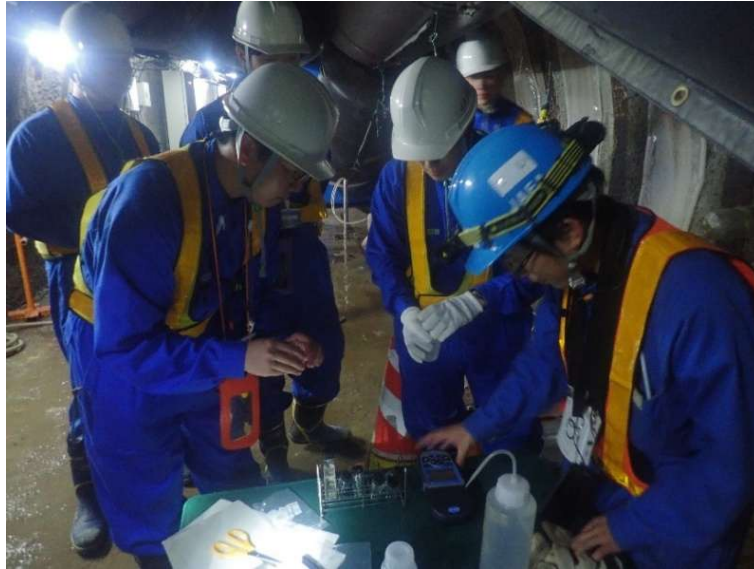


図 41 ソウル国立大学の学生を対象とした実習の様子

10.2 国外機関との研究協力

○幌延国際共同プロジェクト（Horonobe International Project : HIP）
令和2年度以降の必須の課題のうち、実際の地質環境における人工バリアの適用性確認および処分概念オプションの実証に関わる以下の3つのタスクを設定しています。

タスク A：物質移行試験

タスク B：処分技術の実証と体系化

タスク C：実規模の人工バリアシステム解体試験

令和8年度は、令和7年度から開始したフェーズ2の研究を継続します。タスク A では、250m 調査坑道におけるトレーサー試験を継続するとともに、試験実施箇所では岩石試料を採取、分析して、物質の移動の詳細な評価のためのデータを取得します。さらに、物質移行試験の解析を実施し、他機関との解析結果の比較により、これまで構築してきたモデルの適用性に関して議論を進めます。タスク B では、500m 調査坑道の EDZ の広がりや湧水量の評価結果の妥当性を確認するための原位置試験や解析を実施します。また、350m 試験坑道 6（図 5 参照）の数 m の範囲をブロック工法と吹付け工法を組み合わせる埋め戻しを行い、埋め戻しの手順や施工品質の管理方法などを確認します。タスク C では、人工バリア性能確認試験の解体試験を実施して、得られた試

料の分析を進めます。また、人工バリアの内部や周辺で起こり得る複雑な現象を解明するための解析検討を継続し、解析に使用する評価モデルの高度化や適用性の確認を進めます。さらに、参加機関の理解促進のための現場状況の確認や、研究成果の取りまとめ方針などについて議論することを目的としたタスク会合ならびに管理委員会を実施します。本活動については、活動状況や参加機関が地下施設を訪問した場合の対応状況などについてホームページで適宜、情報発信を行います。

上記の他、国外の研究機関などとの研究協力や地下施設における原位試験などに関わる情報交換を進めます。

11. 用語集

【英数字】

AE

Acoustic Emission (アコースティックエミッション) の略で、岩盤の内部で微小破壊が生じる際に出る音を意味しており、この破壊音の測定が、構造物や岩盤の破壊現象の監視や岩盤にかかっている力の測定に応用されています。

BTV

BTV (ボアホールテレビビューアー) は、ボーリング孔内にテレビカメラを内装した装置を挿入し、連続的に撮影することで、孔内の状況を視覚的に確認する方法です。

【あ行】

埋め戻し材

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

ウラニン

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

オーバーパック

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

【か行】

回収方法

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

化石海水

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

緩衝材

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

緩衝材流出・侵入現象

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

乾燥密度

乾燥密度とは、ある体積に含まれる土粒子のみの質量を考えた場合の密度のことを言います。

亀裂ネットワークモデル

岩盤中の地下水の流れや物質の移動現象を評価するために、対象とする領域に亀裂を統計的に配置したモデルです。

掘削損傷領域

本計画書における掘削損傷領域とは、岩盤が掘削により損傷した領域のことで、坑道の周りに形成されます。具体的には、地下空洞掘削時の周辺岩盤に生じる応力集中の影響で坑道周辺岩盤に割れ目が発達することにより、岩盤の変形特性が変化したり透水性が増大したりします。また、空気の侵入により地下水の酸化などの化学的な変化が生じます。なお、掘削損傷領域を含むより広い領域で坑道への地下水排水などにより地下水の水圧や岩盤に作用する力が変化する領域のことを掘削擾乱領域と言います。掘削擾乱領域では坑道埋め戻し後、変化した地下水圧などが元の状態に回復すると想定されます。掘削損傷領域および掘削擾乱領域は、広義に掘削影響領域と表現されます。

グラウト

水みちとなる岩盤の割れ目の中にセメントなどの固化材を圧入し、充填することにより、湧水を止める技術のことです。

原位置試験

地下で採取された試料を用いて行う室内試験に対して、実際の地下環境下で行う試験のことです。

減熱過程

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

高精度傾斜計

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

坑道スケール

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

国際交流施設

国内外の研究者の交流活動の拠点および地域の方々との交流を目的とした施設です。

<https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/kokusai/index.html>

【さ行】

酸化還元電位

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

支保

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。

地山強度比

トンネルの設計に当たって、トンネル周辺岩盤のゆるみ（EDZ）の広がりや、吹付けコンクリートなどの支保にかかる力、トンネルの変形のしやすさを事前に評価するための指標です。地山強度比は、岩盤の強さを表す指標（岩盤の一軸圧縮強度）と、坑道を掘削する深さに応じて地山に作用する圧力（自重による鉛直応力）との比として表されます。

地山強度比 = (岩盤の一軸圧縮強度) / (坑道掘削深度に作用する鉛直応力)

この値が小さいほど、掘削に伴う岩盤のゆるみ（EDZ）が広がりやすくなり、トンネルの安定性を確保するための支保の重要性が高まる傾向があります。

処分概念オプション

幌延深地層研究計画における処分概念オプションとは、地下深くの岩盤中に高レベル放射性廃棄物を埋設するという、地層処分の概念を実現するための色々な方法のことです。例えば、廃棄体や人工バリアを縦置きにするのか横置きにするのか、人工バリアのひとつである緩衝材をブロックで積み上げるのか現場で固めるのか、といった処分方法、埋め戻し方法の違いおよび搬送定置・回収方法などについての選択肢のことを指します。

人工バリア

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

水圧擾乱試験

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

水理学的連結性

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

せん断

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

【た行】

堆積岩の緩衝能力

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

ダクティリティインデックス (DI)

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

弾性波

岩盤の中を伝わる振動のことを指します。地震など自然に発生する振動や岩盤を叩くなどして人工的に与えた振動が伝わる速度を弾性波速度と呼び、これは岩盤の状態によって変化しま

す。様々な場所での弾性波速度の分布を調べるにより坑道周辺の岩盤の状態を知ることができます。

動水勾配

地下水の動きを決める要因のひとつで、地下水が流れる方向の水圧の差で表されます。地下水は、水圧の高い方から低い方へ移動します。動水勾配が大きいほど地下水が流れやすくなります。

透水性

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

$$Q=KAh/l$$

ここで、Q：流量 (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。

透水量係数

透水量係数はある厚さをもった地層や亀裂が、単位幅当たりどの程度の量の水を流すことができるのかを表す指標です。以下の式で定義され、単位は面積/時間 (m²/s) になります。

$$T=k \cdot d$$

ここで、T：透水量係数 (m²/s)、k：透水係数 (m/s)、d：地層や亀裂の厚さ (m) を表します。

トモグラフィ

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

トレーサー

本計画書では、地下水中に溶存する物質が地層中を移行する際の経路や収着・拡散といった挙動などを調査するために、地下水に添加する物質をトレーサーと呼びます。幌延深地層研究計画では、トレーサーとしてウラニン（蛍光染料）やヨウ素などを用いています。これらは、いずれも放射性物質ではありません。なお、幌延深地層研究計画では放射性のトレーサーを用いた試験を行うことはありません。

【な行】

熱－水理－力学－化学連成現象

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

【は行】

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。

比抵抗

岩石の電気の流れにくさを表すもので、一般的には、粘土やシルト岩などは比抵抗が低く（電気が流れやすく）、頁岩や泥岩などは特に低い比抵抗を示す傾向があります。また、砂・礫混じりの地層は比抵抗が高い（電気が流れにくい）傾向があります。

プラグ

ベントナイトなどを原料とする緩衝材や埋め戻し材が移動・膨出するのを防ぐ、あるいは掘削影響を受けた領域の地下水の移動を抑制するために、処分坑道の両端やその周辺に設けられ

る構造物です。なお、本計画書で記載のある「止水プラグ」は、掘削損傷領域の地下水の移動を抑制するためにベントナイトを混ぜた材料で構築するものを指します。

ベントナイト

モンモリロナイトを主成分とする粘土の一種です。地層処分では、緩衝材や処分坑道の埋め戻し材の原料として用いられます。ベントナイトの膨潤により緩衝材や埋め戻し材の透水性が低下したり、ベントナイトに放射性核種が吸着されたりして、放射性核種の移行を抑制する効果があります。

膨潤

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

飽和度

土や岩盤などの間隙に含まれる水の体積と間隙の体積との比を表す値です。

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

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

【ま行】

水みちのつながり方の次元

地下水の通り道となる岩盤中の割れ目同士のつながり具合を表す指標です。割れ目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、割れ目同士のつながりが限定的で、一次元的なチャンネルを形成する場合は一次元となります。

【や行】

有効透水係数

岩盤の透水性は亀裂の有無により局所的に大きく変化しますが、有効透水係数はある着目する領域における平均的な透水性を表す指標です。

ゆめ地創館

幌延深地層研究センターで行われている高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発について、紹介する施設です。

<https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/yumechisoukan/index.html>

【ら行】

令和2年度以降の必須の課題

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

- ・実際の地質環境における人工バリアの適用性確認
- ・処分概念オプションの実証
- ・地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

参考資料

令和2年度以降の研究工程

1.1 人工バリア性能確認試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R8の実施内容	研究期間														
					前半					後半									
					前半の5年程度で実施														
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10						
<p>実際の地質環境下における処分孔設置方式を対象とした熱-水-応力-化学連成現象（ガラス固化体設置以降の加熱時から浸潤時・減熱時を模擬した現象）に関する試験をとおして、設計や連成挙動評価手法の適用性の確認（人工バリアの解体試験および緩衝材の飽和度の確認を含む）、ならびに施工方法など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</p> <p>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</p>	<p>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</p>	<p>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(解体試験による)</p>	<p>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</p>	<p>④-1: 解体試験直前までのデータ取得の継続(評価モデルを検証するためのデータ取得)</p>	<p>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</p>														
					<p>令和4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</p>					<p>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</p>					<p>発熱がおさまった条件での試験を継続、評価モデルを検証するためのデータ取得</p>				
					<p>国際プロジェクト(DECOWALEX等)における解析コード間の比較検証、改良・高度化</p>					<p>R8は実施しない</p>					<p>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</p>				
					<p>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</p>					<p>④-2: 解体試験によるサンプルの取得および分析(評価モデルを検証するためのデータ取得)</p>					<p>④-2 人工バリアの解体作業、緩衝材の飽和度の確認</p>				
<p>令和4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</p>					<p>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、注水開始</p>					<p>試験施工の解体を行い、緩衝材の解体方法や模擬オーバーパックの取り出し手法を確認</p>									
<p>令和9年度までに得られる成果 ○人工バリア周辺における連成現象の実データの取得</p>					<p>令和9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</p>					<p>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</p>									
<p>国際プロジェクト(DECOWALEX等)における解析コード間の比較検証、改良・高度化</p>					<p>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</p>					<p>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</p>									

※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~ビ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~ビ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。

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

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	R8の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
<p>・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</p> <p>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</p> <p>② 個別の要素技術の実証試験</p> <p>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</p>	<p>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</p> <p>② 個別の要素技術の実証試験</p> <p>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</p>	<p>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</p>	<p>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。</p> <p>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）</p> <p>② 閉鎖技術（埋め戻し方法：プラグ等）の実証</p>	<p>R8は実施しない</p> <p>R8は実施しない</p> <p>R8は実施しない</p>	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 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	乾燥および湿潤条件下でのコンクリートの中性化の程度を確認	乾燥および湿潤条件下でのコンクリートの中性化の程度を確認	地下施設に実際に施工されている低アルカリ性吹付けコンクリートの物性・化学特性データを取得	R5年度までに取得した定置コンクリートおよび吹付けコンクリートの物性・化学特性データの整理・取りまとめ	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				
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・原位置試験を実施					解析検討・室内試験・原位置試験の結果を整理し、適用した技術の有効性や技術的な課題を整理					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 ○ED2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よ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 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					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	流量による影響に着目した緩衝材の流出試験を実施	隙間へのゲイ砂充填による緩衝材流出抑制の効果を確認	埋め戻し材の各工法に適用可能な材料範囲や施工品質に関するデータを取得	埋め戻し材の各工法に適用可能な材料範囲や施工品質に関するデータを取得・整理	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。

2.1 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験

2.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R8の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
<p>・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</p> <p>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</p> <p>② 個別の要素技術の実証試験</p> <p>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</p>	<p>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</p>	<p>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</p>	<p>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</p>	<p>坑道スケールでの物質移行特性などの評価を目的とした坑道周辺岩盤を対象とした調査 ピットスケールでの物質移行特性などの評価を目的としたEDZを対象とした調査 これら試験結果に基づいた解析手法の整理</p>	-					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				
					<p>令和10年度までに得られる成果</p> <p>○深度に応じた堆積岩の水理・物質移行特性の違いの実証</p> <p>○掘削損傷領域や人工バリア/処分坑道の設計（仕様やレイアウトなど）も考慮した閉じ込め性能の評価手法の整理</p>					<p>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</p>				
					<p>令和10年度までに得られる成果</p> <p>○人工バリアを定置するピットの配置位置や坑道の間隔を設計するための調査・設計・評価の一連の技術の体系化</p> <p>○高地圧下での坑道掘削や、実規模スケールでの埋め戻し/止水プラグの設計から施工までの一連の技術の実証</p>					<p>④-2 地下施設及び人工バリアの設計・評価技術の体系化</p>				
					<p>令和10年度までに得られる成果</p> <p>○複数の坑道やピットを施工する際の湧水抑制対策や支保技術の整備</p> <p>○緩衝材の流出現象や岩盤への侵入現象を評価/抑制する技術の整備</p>					<p>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</p>				
					<p>令和10年度までに得られる成果</p> <p>○廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要なピット周辺の割れ目からの湧水量や掘削損傷領域の広がりなどの調査・評価手法について、他の堆積岩との比較による体系的整理</p>					<p>④-4 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理</p>				

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「2.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」）に統合して実施する。
 「2.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

2.2 高温(100℃超)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R8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
<p>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</p> <p>実際の処分事業では、オーバーバックが100℃以下になってから処分することが基本であるが、想定外の要因によって100℃を超えた状態になることを想定して、人工バリアシステムの安全裕度を検証する</p>	<p>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</p>	<p>① 高温(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</p>	<p>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</p> <p>①-1 高温(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</p>	R8は実施しない	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	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							
				海外での原位置試験の情報（試験条件、手法等）を入手	先行研究事例の調査結果を踏まえた課題の抽出	調査事例に基づく課題の抽出、原位置試験の概念検討・計画策定	高温条件下での人工バリアの挙動に関する原位置試験を開始	モニタリング継続、試験体の解体・分析、結果の取りまとめ	令和6年度までに得られる成果 ○高温(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									
				シナリオの検討に着手（水分移動、物質移動特性）	先行研究事例の調査（緩衝材の鉱物・性能変化）	100℃超での人工バリアの基特性に係るシナリオ整理、ニアフィールドを対象とした熱解析	シナリオの整理、緩衝材の膨潤・浸潤挙動を確認するための試験の実施	ひび割れが生じた緩衝材に対する塩水の膨潤、浸潤挙動の確認試験、結果の取りまとめ	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									
①-2 100℃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	R8は実施しない	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	R8は実施しない	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	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								
海外での原位置試験の情報（試験条件、手法等）を入手	海外での原位置試験の情報（試験開始時のデータ等）を入手	海外での原位置試験の情報（最高温度での加熱時のデータ等）を入手	海外での原位置試験の情報（加熱に伴う水分量変化のデータ等）を入手	温度履歴等の不確かさを考慮した上限温度の見積もり、取りまとめ	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													
①-3 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）	R8は実施しない	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）	R8は実施しない	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	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								
海外での原位置試験の情報（試験条件、手法等）を入手	海外での原位置試験の情報（試験開始時のデータ等）を入手	海外での原位置試験の情報（最高温度での加熱時のデータ等）を入手	海外での原位置試験の情報（加熱に伴う水分量変化のデータ等）を入手	温度履歴等の不確かさを考慮した上限温度の見積もり、取りまとめ	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。

3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R8の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
<p>岩盤中には大小様々な断層が存在するが、小規模なも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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>	<p>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</p> <p>②水圧擾乱試験によるパラメータの有効性の検証</p>	<p>② 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握</p>	<p>断層の幅が数十 cm の断層における断層のずれが断層内の地下水の流れに与える影響に関して、堆積岩の緩衝能力（自己治癒能力）を実証するために、以下の検討や試験を実施する</p> <p>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）</p>	<p>R8は実施しない</p>	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				
					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				
					より大型の断層を対象とした水圧擾乱試験を実施し、データを取得	水圧擾乱試験やシミュレーションの結果に基づきモデルを改良	大型の断層の水圧擾乱試験の良モデルの整合性を確認	断層内の水みちのつながり方の次元とDIの定量的な関係性を確認	水圧擾乱試験による地殻変動の水理学的な影響評価手法を整備	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（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					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				
					割れ目の水理学的連続性・領域区分に遷移領域を追加	水圧擾乱試験やシミュレーションの結果に基づきモデルを改良	割れ目の水理学的連続性と水圧観測結果の整合性を確認	断層内の水みちのつながり方の次元とDIの定量的な関係性を確認	DIを用いた断層/割れ目の代表的な透水性の推定手法を整備	令和6年度までに得られる成果 ○DIを用いた透水性評価手法の高度化				
					②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法の整備					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					より大型の断層を対象とした水圧擾乱試験を実施し、データを取得	断層の活動性（力学的な安定性）評価に係る既存情報を取得	大型の断層の水圧擾乱試験に係るデータを整理	断層を対象とした水圧擾乱試験による原位置の地圧の推定手法を構築	水圧擾乱試験による断層の力学的な安定性の評価手法を整備	令和6年度までに得られる成果 ○水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法の整備				

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

※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。

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

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	R8の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
・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	R8は実施しない	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				
					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					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し、比抵抗分布を推定					電磁探査により推定した化石海水の三次元分布の妥当性を確認するためのボーリング調査を実施 R3に掘削したボーリング孔の延長による水質などのデータ追加とR2に推定した化石海水分布の妥当性確認 R4までの成果の整理と、地球化学的な観点も含めた方法論の検討				
					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					物理探査とボーリング調査のデータの組み合わせにより化石海水分布を推定する方法の検討 地球統計学的解析による化石海水領域の三次元分布推定に係る一連の手法を整理 R4までの成果に基づく化石海水の三次元分布を調査・評価する一連の方法論の検討				
					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)					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					化石海水領域に影響する古水理地質学的変遷に関する因子を抽出する感度解析を実施 地球統計学的解析による化石海水領域の三次元分布推定に係る一連の手法を整理 これまでの成果に基づく古水理地質学的変遷を考慮した広域スケールの解析手法の整理 広域スケールの地下水移行時間解析の結果を基にパラメータ設定の考え方を整理									

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

※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。

3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R8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	
・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	① 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	R8は実施しない	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				
			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	試料観察に基づき、EDZの割れ目開口状況を定量的に把握	水圧擾乱試験やシミュレーションの結果に基づきモデルを改良	EDZの透水性と改良モデルの整合性を確認	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	R8は実施しない	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				
			試料観察に基づき、EDZの割れ目開口状況を定量的に把握	坑道埋め戻し後の割れ目のずれがEDZの透水性に与える影響を確認	埋め戻し材の膨潤圧がEDZの透水性に与える影響の評価手法を構築	令和4年度までに得られる成果 ○坑道埋め戻し後のEDZの透水性を予測するモデルの構築								

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

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「2.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」）に統合して実施する。
 「2.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

参考文献

- (1) 中山雅, 石井英一, 青柳和平, 早野明, 大野宏和, 尾崎裕介, 望月陽人, 武田匡樹, 木村駿: 幌延深地層研究計画における地下施設での調査研究段階(第3段階: 令和2年度以降の必須の課題2020-2024年度)研究成果報告書, JAEA-Research 2025-016, 2026, 140p.
- (2) 石井英一, 安江健一: 幌延町における鮮新世~前期更新世のテフラ層序とFT年代, JNC TN5400 2005-006, 2005, 52p.
- (3) Ishii, E., Sanada, H., Iwatsuki, T., Sugita, Y. and Kurikami, H.: Mechanical strength of the transition zone at the boundary between opal-A and opal-CT zones in siliceous rocks. *Engineering Geology*, vol.122, 2011, pp.215-221.
- (4) 石井英一, 安江健一, 大平寛人, 古澤明, 長谷川健, 中川光弘: 北海道北部, 大曲断層近傍の背斜成長の開始時期, *地質学雑誌*, vol.114, no.6, 2008, pp.286-299.
- (5) 土木学会: 2016年制定トンネル標準示方書[共通編]・同解説/[山岳工法編]・同解説, 丸善出版, 2016, 419p.
- (6) NEA: NEA Horonobe International Project – HIP Interim report for Phase 1 (February 2023 – March 2025), NEA/NE(2025)20, 2025, 118p.
- (7) 原子力発電環境整備機構: 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築—, NUMO-TR-20-03, 2021, 807p.
- (8) 中山雅, 石井英一, 青柳和平, 早野明, 村上裕晃, 大野宏和, 武田匡樹, 深津勇太, 望月陽人, 尾崎裕介, 木村駿, 出井俊太郎, 佐久間圭佑, 田村友識, 岩井亮, 加藤祥成, 藤枝大吾: 幌延深地層研究計画 令和6年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2025-042, 2025, 136p.
- (9) Ozaki, Y. and Ishii, E.: Relationship between fault transmissivity, flow dimensions and effective hydraulic conductivity in siliceous mudstone of the Wakkanai Formation around the Horonobe Underground Research Laboratory in Japan, *Geoenergy*, vol.2, 2024, geoenergy2023-056.
- (10) Ishii, E.: The highest potential transmissivities of fractures in fault zones: reference values based on laboratory and in situ hydro-mechanical experimental data, *Engineering Geology*, vol.294, 2021, 106369.
- (11) Ishii, E., Ozaki, Y., Aoyagi, K. and Sugawara, K.: Rock strength and stress dependence of local flow-path connectivity within faults or fractures: a preliminary overview of virtual and in-situ hydraulic tests, *Hydrogeology Journal*, vol.33, 2025, pp.63-85.
- (12) 尾崎裕介, 石井英一: Landau-Lifshitz-Matheron の式による亀裂内の不均質性を考慮した有効透水量係数と亀裂ネットワークモデルを用いた有効透水係数の推定, *材料*, vol.75, no.3, 2026.
- (13) 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.
- (14) Ishii, E., Sanada, H., Funaki, H., Sugita, Y., and Kurikami, H.: The relationships among brittleness, deformation behavior, and transport properties in mudstones: an example from the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, *Journal of Geophysical Research*, vol.116, 2011, B09206.
- (15) Mochizuki, A. and Ishii, E.: Assessment of the level of activity of advective transport through fractures and faults in marine deposits by comparison between stable isotope compositions of fracture and pore waters, *Hydrogeology Journal*, vol.30, 2022, pp.813-827.
- (16) Mochizuki, A. and Ishii, E.: Paleohydrogeology of the Horonobe area, Northern Hokkaido, Japan: groundwater flow conditions during glacial and postglacial periods estimated from chemical and isotopic data for fracture and pore water, *Applied Geochemistry*, vol.155, 2023, 105737.
- (17) 山本卓也, 下茂道人, 藤原靖, 服部弘通, 田所照夫, 岩間彦衛, 名合牧人, 熊本創: 幌延深地層研究センターにおける試錐調査(HDB-1孔), JNC TJ1400 2002-010, 2002, 921p.

- (18) Ishii, E.: Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single-borehole investigations, *Water Resources Research*, vol.54, 2018, pp.3335-3356.
- (19) 宮川和也, 石井英一, 今井久, 平井哲, 大野宏和, 中田弘太郎, 長谷川琢磨: 亀裂性堆積岩を対象とした地下水流動解析における有効間隙率の与え方: 北海道幌延に分布する声間層と稚内層浅部の事例, *原子力バックエンド研究*, vol.31, no.2, 2024, pp.82-95.
- (20) Ohno, H. and Ishii, E.: Effect of fault activation on the hydraulic connectivity of faults in mudstone, *Geomechanics for Energy and the Environment*, vol.31, 2022, 100317.
- (21) Ozaki, Y., Ishii, E. and Sugawara, K.: Variation in fault hydraulic connectivity with depth in mudstone: an analysis of poroelastic hydraulic response to excavation in the Horonobe URL, *Geomechanics for Energy and the Environment*, vol.31, 2022, 100311.
- (22) Mazurek, M.: Evolution of gas and aqueous fluid in low-permeability argillaceous rocks during uplift and exhumation of the central Swiss Alps, *Applied Geochemistry*, vol.15, 1999, pp.211-234.
- (23) Mazurek, M., Lanyon, G. W., Vomvoris, S. and Gautschi, A.: Derivation and application of a geologic dataset for flow modeling by discrete fracture networks in low-permeability argillaceous rocks, *Journal of Contaminant Hydrology*, vol.35, 1998, pp.1-17.
- (24) NAGRA: Geosynthese Wellenberg 1996 – Ergebnisse der Untersuchungsphasen I und II, *Nagra NTB 96-01*, 1997, 511p.
- (25) Mazurek, M.: Geological, hydrogeological and hydrochemical field evidence for fault sealing in marls from Wellenberg, Switzerland, *Proceedings of the self-healing topical session of the IGSC working group on measurement and physical understanding of groundwater flow through argillaceous media (Clay Club)*, OECD/NEA, 2001, pp.31-34.
- (26) Neuzil, C. E.: Interpreting fluid pressure anomalies in shallow intraplate argillaceous formations, *Geophysical Research Letters*, vol.42, 2015, pp.4801-4808.
- (27) Vomvoris, S., Scholtis, A., Waber, H. N., Pearson, F. J., Voborny, O., Schindler, S. and Vinard, P.: Lessons learned from the use of hydrochemical data for the evaluation of groundwater-flow models developed within the Swiss L/ILW programme, *Use of hydrogeochemical information in testing groundwater flow models*, OECD/NEA, 1999, pp.107-117.
- (28) Ishii, E.: Effects of flow dimension in faulted or fractured rock on natural reductions of inflow during excavation: a case study of the Horonobe Underground Research Laboratory site, Japan, *Hydrogeology Journal*, vol.31, 2023, pp.893-911.
- (29) Ishii, E.: Estimation of the highest potential transmissivity of discrete shear fractures using the ductility index, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol.100, 2017, pp.10-22.
- (30) Arthur, R., Sasamoto, H., Alt-Epping, P. and Tachi, Y.: Paleoclimatic controls on natural tracer profiles in biogenic sedimentary formations of the Horonobe area, Japan, *Applied Geochemistry*, vol.155, 2023, 105707.
- (31) Kurikami, H., Takeuchi, R. and Yabuuchi, S.: Scale effect and heterogeneity of hydraulic conductivity of sedimentary rocks at Horonobe URL site, *Physics and Chemistry of the Earth* vol.33, 2008, pp.S37-S44.
- (32) Miyakawa, K., Nohara, T., Tokiwa, T. and Yamazaki, M.: Seven-year history of vertical hydraulic diffusivity related to excavation around an underground facility, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol.70, 2014, pp.332-342.
- (33) Gutmanis, J. C., Lanyon, G. W., Wynn, T. J. and Watson, C. R.: Fluid flow in faults: a study of fault hydrogeology in Triassic sandstone and Ordovician volcanoclastic rocks at Sellafield, north-west England, *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, vol.52, 1998, pp.159-175.
- (34) Medici, G., West, L. J., Mountney, N. P. and Welch, M.: Permeability of rock discontinuities and faults in the Triassic Sherwood Sandstone Group (UK): insights for management of fluvio-aeolian aquifers worldwide, *Hydrogeology Journal*, vol.27, 2019, pp.2835-2855.

- (35) Milodowski, A. E., Gillespie, M. R., Naden, J., Fortey, N. J., Shepherd, T. J., Pearce, J. M. and Metcalfe, R.: The petrology and paragenesis of fracture mineralization in the Sellafield area, west Cumbria, *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, vol.52, 1998, pp.215-241.
- (36) Nirex: Sellafield geological and hydrogeological investigations: the derivation of freshwater and environmental heads, hydraulic conductivity and borehole chloride values with uncertainty limits for use in Nirex 97 groundwater modelling, Nirex report SA/97/065, 1997.
- (37) Streetly, M. J., Heathcote, J. A. and Degnan, P. J.: Estimation of vertical diffusivity from seasonal fluctuations in groundwater pressures in deep boreholes near Sellafield, NW England, *Geological Society Special Publication*, vol.263, 2006, pp.155-167.
- (38) Boisson, J.-Y., Bertrand, L., Heitz, J.-F. and Golvan, Y. M.-L.: In situ and laboratory investigations of fluid flow through an argillaceous formation at different scales of space and time, Tournemire tunnel, southern France, *Hydrogeology Journal*, vol.9, 2001, pp.108-123.
- (39) Donzé, F.-V., Tsopele, A., Guglielmi, Y., Henry, P. and Gout, C.: Fluid migration in faulted shale rocks: channeling below active faulting threshold, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol.27, 2023, pp.2587-2601.
- (40) Guglielmi, Y., Elsworth, D., Cappa, F., Henry, P., Gout, C., Dick, P. and Durand, J.: In situ observations on the coupling between hydraulic diffusivity and displacements during fault reactivation in shales, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.120, 2015, pp.7729-7748.
- (41) Guglielmi, Y., Nussbaum, C., Cappa, F., De Barros, L., Rutqvist, J. and Birkholzer, J.: Field-scale fault reactivation experiments by fluid injection highlight aseismic leakage in caprock analogs: implications for CO₂ sequestration, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol.111, 2021, 103471.
- (42) Lefèvre, M., Guglielmi, Y., Henry, P., Dick, P. and Gout, C.: Calcite veins as an indicator of fracture dilatancy and connectivity during strike-slip faulting in Toarcian shale (Tournemire tunnel, Southern France), *Journal of Structural Geology*, vol.83, 2016, pp.73-84.
- (43) OECD/NEA: Clay club catalogue of characteristics of argillaceous rocks: 2022 update, NEA No. 7249, 2022, 242p.
- (44) Savoye, S., Cabrera, J. and Matray, J.-M.: Different hydraulic properties of single fractures in argillaceous medium: the case of the IRSN Tournemire site (France), *Proceedings of the IAH Conference of Groundwaters in Fractured Rocks*, 2003, pp.383-384.
- (45) Su, X., Nguyen, S., Haghghat, E., Pietruszczak, S., Labrie, D., Barnichon, J.-D. and Abdi, H.: Characterizing the mechanical behaviour of the Tournemire argillite, *Geological Society, London, Special Publications*, vol.443, 2017, pp.97-113.
- (46) Savoye, S., Michelot, J.-L., Bensenouci, F., Matray, J.-M. and Cabrera, J.: Transfers through argillaceous rocks over large space and time scales: Insights given by water stable isotopes, *Physics and Chemistry of the Earth*, vol.33, 2008, pp.S67-S74.
- (47) Tremosa, J., Gonçalves, J. and Matray, J.-M.: Natural conditions for more limited osmotic abnormal fluid pressures in sedimentary basins, *Water Resources Research*, vol.48, 2012, W04530.
- (48) Gautschi, A.: Safety-relevant hydrogeological properties of the claystone barrier of a Swiss radioactive waste repository: An evaluation using multiple lines of evidence, *Grundwasser*, vol.22, 2017, pp.221-233.
- (49) Giger, S. and Marschall, P.: Geomechanical properties, rock models and in-situ stress conditions for Opalinus Clay in Northern Switzerland, Nagra NAB 14-01, 2014, 86p.
- (50) Guglielmi, Y., Nussbaum, C., Rutqvist, J., Cappa, F., Jeanne, P. and Birkholzer, J.: Estimating perturbed stress from 3-D borehole displacements induced by fluid injection in fractured or faulted shales, *Geophysical Journal International*, vol.221, 2020, pp.1684-1695.

- (51) Jeanne, P., Guglielmi, Y., Rutqvist, J., Nussbaum, C. and Birkholzer, J.: Permeability variations associated with fault reactivation in a claystone formation investigated by field experiments and numerical simulations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.123, 2018, pp.1694-1710.
- (52) Gonçalves, J., Matray, J.-M. and Yu, C. J.: Assessing relevant transport processes in Opalinus Clay at the Mont Terri rock laboratory using excess-pressure, concentration and temperature profiles, *Applied Clay Science*, vol.242, 2023, 107016.
- (53) Mazurek, M., Alt-Epping, P., Bath, A., Gimmi, T., Waber, H. N., Buschaert, S., De Cannière, P., De Craen, M., Gautschi, A., Savoye, S., Vinsot, A., Wemaere, I. and Wouters, L.: Natural tracer profiles across argillaceous formations, *Applied Geochemistry*, vol.26, 2011, pp.1035-1064.
- (54) Yu, C., Matray, J.-M., Gonçalves, J., Jaeggi, D., Gräsle, W., Wieczorek, K., Vogt, T. and Sykes, E.: Comparative study of methods to estimate hydraulic parameters in the hydraulically undisturbed Opalinus Clay (Switzerland), *Swiss Journal of Geosciences*, vol.110, 2017, pp.85-104.
- (55) Barton, N., Bandis, S. and Bakhtar, K.: Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol.22, 1985, pp.121-140.
- (56) 武田匡樹, 石井英一, 大野宏和, 川手訓: ガスが溶存した地下水を含む泥岩中の割れ目を対象とした原位置トレーサー試験条件の設定に関する検討, *原子力バックエンド研究*, vol.25, no.1, 2018, pp.3-14.
- (57) Ohno, H., Ishii, E. and Takeda, M.: Modelling transport pathways of faults with low hydraulic connectivity in mudstones with low swelling capacity, *Geoenergy*, vol.2, no.1, 2024, geoenergy2023-047.
- (58) 望月陽人: 地表水および深部地下水におけるウランの動態と酸化還元環境, *陸水学雑誌*, 印刷中
- (59) 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, 1999, 529p.
- (60) 武田匡樹, 石井英一: 原位置トレーサー試験による堆積岩中の掘削損傷領域内の移流分散評価, *原子力バックエンド研究*, vol.31, no.1, 2024, pp.3-10.
- (61) Aoyagi, K., Ozaki, Y., Tamura, T. and Ishii, E.: Transmissivity prediction of the Excavation Damaged Zone fracture around the gallery at 500 m at the Horonobe Underground Research Laboratory, *Proceedings of the 4th International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media: Observation, Modeling, and Application (CouFrac2024)*, 2024, 10p.
- (62) Svensk Kärnbränslehantering AB: Post-closure safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report, PSAR version, SKB TR 21-01, 2022.
- (63) Aoyagi, K. and Ishii, E.: A Method for Estimating the Highest Potential Hydraulic Conductivity in the Excavation Damaged Zone in Mudstone, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol.52, no.2, 2019, pp.385-401.
- (64) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 日本原子力研究開発機構: 令和6年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]地層処分施設施工・操業技術確証試験報告書, 2025.
- (65) 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター: 令和3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業[JPJ007597]地層処分施設閉鎖技術確証試験報告書, 2022.
- (66) Sakuma, K., Ishii, E. and Murakami, H.: Predicting the long-term natural decay of inflow from faults or fractures encountered during excavation of deep underground tunnels using the flow dimension, *Environmental Earth Sciences*, vol.84, 2025, 663.
- (67) Mishra, S.: Methods for analyzing single-and multi-well hydraulic data. In: Vomvoris S, Freig B (eds) *Grimsel test site: interpretation of crosshole hydraulic tests and a pilot fluid*

- logging test for selected boreholes within the BK site. NAGRA technical report, NTB 91-09, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Wettingen, Switzerland, 1992, pp 8-27
- (68) 青柳和平, 尾崎裕介, 大野宏和, 石井英一: 堆積軟岩を対象とした高レベル放射性廃棄物模擬処分孔掘削時の岩盤損傷の発達状況, 第16回岩の力学国内シンポジウム講演集(インターネット), 2025, pp.269-274.
- (69) Aoyagi, K. and Ishii, E.: Evaluation of temporal changes in fracture transmissivity in an excavation damaged zone after backfilling a gallery excavated in mudstone, *Environmental Earth Sciences*, vol.83, no.98, 2024, s12665-023-11416-x.
- (70) Ishii, E.: Constant-head step injection tests to quantify the stress dependence of fracture transmissivity in an excavation damaged zone: a case study from the Horonobe Underground Research Laboratory, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol.159, 2022, 105229.
- (71) 佐久間圭佑, 石井英一, 青柳和平, 田村友識: スライド式パッカーを用いた孔内軸変位計測における室内校正実験方法の改善, *材料*, vol.75, no.3, 2026.
- (72) 青柳和平, 津坂仁和, 窪田健二, 常盤哲也, 近藤桂二, 稲垣大介: 幌延深地層研究所の250m調査坑道における掘削損傷領域の経時変化に関する検討, *土木学会論文集 C(地圏工学)*, vol.70, no.4, 2014, pp.412-423.
- (73) 青柳和平, 石井英一, 石田毅: 幌延深地層研究センターの350m調査坑道における掘削損傷領域の破壊様式の検討, *Journal of MMIJ*, vol.133, no.2, 2017, pp.25-33.
- (74) Hata, K., Niunoya, S., Aoyagi, K. and Miyara, N.: Evaluation of excavation-damaged zones (EDZs) in Horonobe Underground Research Laboratory (URL), *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol.16, no.2, 2024, pp.365-378.