

幌延深地層研究計画
令和5年度調査研究計画

令和5年4月

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	3
3.	令和4年度成果の概要および令和5年度計画の概要	7
3.1	令和4年度の成果の概要	7
3.2	令和5年度の主な業務内容	11
4.	実際の地質環境における人工バリアの適用性確認	18
4.1	人工バリア性能確認試験	18
4.2	物質移行試験	23
5.	処分概念オプションの実証	28
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	28
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	28
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	36
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	37
6.	地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証	41
6.1	水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化	41
6.1.1	地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握	41
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	45
6.2	地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験	50
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	55
8.	地下施設の建設・維持管理	57
9.	環境調査	58
9.1	排水量および水質調査	58
9.2	研究所用地周辺の環境影響調査	59
10.	安全確保の取り組み	60
11.	開かれた研究	61
11.1	国内機関との研究協力	61
11.2	国外機関との研究協力	63
12.	用語集	65
	参考資料	75
	参考文献	84

1. はじめに

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

幌延深地層研究センターでは、北海道および幌延町により受け入れられました、「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」で示した研究課題である、実際の地質環境における人工バリア^{*}の適用性確認、処分概念オプション^{*}の実証、地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力^{*}の検証について、令和2年度以降、第3期および第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、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、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1つで、研究開発に係る業務を主要な業務として、中長期的（5～7年）な目標・計画に基づき行うことにより、我が国の科学技術の水準の向上を通じた国民経済の発展その他の公益に資するため研究開発の最大限の成果を確保することを目的とする法人に対する名称です。原子力機構は、平成27年4月1日に「独立行政法人日本原子力研究開発機構」から「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構」に名称変更しています。

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

なお、令和 3 年 10 月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、引き続き、「高レベル放射性廃棄物については、国が前面に立って最終処分に向けた取組を進める」との考え方が示され、「国、NUMO^{*4}、JAEA^{*5}等の関係機関が、全体を俯瞰して、総合的、計画的かつ効率的に技術開発を着実に進める。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。これを踏まえて、文部科学省、経済産業省および原子力規制委員会により「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が達成すべき業務運営に関する目標（中長期目標）^{*6}」（以下、第 4 期中長期目標）が定められ、この第 4 期中長期目標を達成するために、「国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の中長期目標を達成するための計画（中長期計画）（令和 4 年 4 月 1 日～令和 11 年 3 月 31 日）」（以下、第 4 期中長期計画）を策定しました。第 4 期中長期計画では、幌延深地層研究計画について、「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画」で示した 3 つの研究課題を進めること、「研究の実施に当たっては、稚内層深部（深度 500 m）に坑道を展開して研究に取り組むとともに、さら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。

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

*4：原子力発電環境整備機構（Nuclear Waste Management Organization of Japan）の略称です。NUMO は、原子力発電所で使い終えた原子燃料を再処理する過程で発生する高レベル放射性廃棄物および関連して発生する長半減期の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）に取り組むこととしています（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*の確認を実施します。

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

(2) 処分概念オプションの実証

令和元年度までの試験では、実際の環境下において、坑道の埋め戻し方法の違い（締固め、ブロック方式など）による埋め戻し材の基本特性（密度や均一性）を把握しましたが、緩衝材の施工方法や坑道閉鎖に関する様々なオプションの検討には至っていません。令和 2 年度以降は、人工バリア性能確認試験において、注入する地下水の圧力や量を増加させ、緩衝材に十分に水を浸潤させた状態を確保して施工方法（締固め、ブロック方式など）の違いによる緩衝材の品質の違いを把握するとともに、埋め戻し方法（プラグの有無など）・回収方法*による埋め戻し材の品質の違いを実証試験で明らかにします。さらに、人工バリアの品質を踏まえて、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するための実証試験を行います。また、

人工バリアシステムの安全裕度の検証に向けて、緩衝材が 100℃超になった状態を想定した解析手法を開発します。

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

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

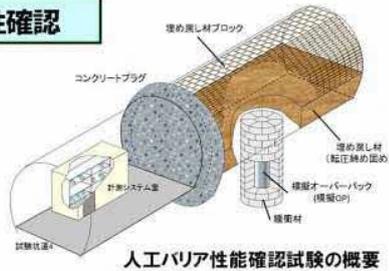
なお、令和 5 年度より、350m 調査坑道の拡張および 500m 調査坑道の整備に向けた立坑の掘削を行います。立坑は各深度へのアクセスならびに地下施設の換気のための役割を担っています*7。拡張する 350m 調査坑道では、操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証に関する試験を行い、500m 調査坑道では、坑道スケール※～ピットスケール※での調査・設計・評価技術の体系化に関する試験を行う計画です。

*7：立坑を3本としているのは、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です。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、地上まで避難することを想定しているためです。

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解体調査のイメージ

②処分概念オプションの実証

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

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

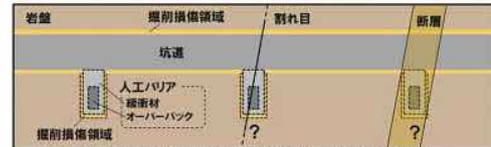


閉鎖技術オプションの整理

③地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

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

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



廃棄体定置決定や間隔設定の考え方の整理

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

表 1 幌延深地層研究計画の令和 2 年度以降のスケジュール

		第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設定に必要な情報の整理、等				
2.2	高温(100℃以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験		100℃超の際にニアフィールドにおいて発生する現象の整理 国際プロジェクト情報の収集・整理、等							
3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証										
3.1	水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化									
	3.1.1	地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握	数十cmの幅の断層を対象とした水圧擾乱試験 断層の活動性評価手法の整備、等							
		3.1.2 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化	地下水の流れが非常に遅い領域(化石海水領域)の調査・評価技術の検証、等							
3.2	地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験		人工バリアの緩衝材や坑道埋め戻し材が掘削影響領域の力学的・水理学的な緩衝能力に与える影響を把握する解析手法の開発							
【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】										

9

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4年度成果の概要および令和5年度計画の概要

3.1 令和4年度の成果の概要

(1) 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

人工バリア性能確認試験において、令和2年度から開始した減熱試験として、廃棄体の発熱が収まった状態を模擬した条件での試験を継続しました。緩衝材の温度分布は地下環境の温度で一定であること、緩衝材内側の飽和度は徐々に増加傾向にあることが確認できました。また、廃棄体の発熱が収まった状態における緩衝材中の温度・飽和度・応力分布の変化など、評価モデルを検証するためのデータが取得できました。熱－水理－力学－化学連成現象^{*}に関する解析については、令和3年度に実施した温度勾配のある環境下での緩衝材中の水分移動特性に関する室内試験などを再現した解析を行い、これまでデータの不足していた条件での水分移動特性に係るパラメータを取得しました。国際共同研究 DECOVALEX^{*}では、人工バリア性能確認試験を対象とした連成解析結果を比較検証するため、参加機関ごとに解析モデルの作成に着手しました。解体調査については、令和3年度に確認した個々のサンプリング手法を踏まえ、全体的な作業方針と施工手順、サンプリング対象と各種調査で主に取得する情報を決定しました。

物質移行試験では、過年度に実施した掘削損傷領域の割れ目を対象としたトレーサー試験結果の解釈を行いました。その結果、トレーサー試験中の水圧変化はトレーサーを瞬間的に投入するパルス試験および連続的に投入する定常試験への切り替え時に水みちの貯留性が変化したことなどが要因として考えられ、掘削損傷領域の物質移行の解析を行う上で考慮しなければならない事項が明らかになりました。また、有機物・微生物・コロイド^{*}の影響を考慮した原位置物質移行試験に着手しました。また、350m 調査坑道において実施する原位置試験^{*}に用いる地下水を対象に、有機物・微生物を含む地下水中の元素とコロイド粒子との相互作用を評価する試験を行いました。その結果、原位置試験結果と室内試験結果との比較検証を行う上で、有益な情報が取得できました。さらに、250m 調査坑道において声問層の割れ目を対象とした物質移行特性を評価するための

ボーリング調査に着手し、割れ目の空間分布の評価に関わるデータを取得しました。

(2) 処分概念オプションの実証

搬送定置・回収技術の実証として、回収可能性^{*}が維持される期間における吹付けコンクリートの経年劣化の把握を目的にコンクリート試験体の暴露試験^{*}を継続し、約1年9か月の暴露期間における大気条件下と湿潤条件下における中性化^{*}の程度の違いなどを把握しました。その結果、大気条件下の試験体では、令和3年度の結果に比べて中性化が進んでいることが確認できました。また、坑道開放条件下における長期変化を評価するために、令和3年度までの解析に基づいて、坑道埋め戻し後に埋め戻し材が再飽和する過程の解析を実施しました。その結果、坑道の周辺岩盤では埋め戻し後の数十年以内にほぼ飽和状態に達することが分かりました。

閉鎖技術の実証として、埋め戻し材の長期的な性能に関わる現象について、力学的な作用（地震動など）が埋め戻し材の変質に与える影響を評価する解析を行いました。その結果、坑道に使用されるコンクリートの溶出成分に起因した鉱物の沈殿などが埋め戻し材の変質を抑制する方向に作用することが示唆されました。埋め戻し材の設計評価に必要な緩衝材膨出^{*}抑制機能の把握については、緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた室内試験を継続し、緩衝材と埋め戻し材の力学的な相互作用を考慮した膨潤^{*}変形挙動の評価に必要なデータを整理しました。また、閉鎖後に水みちとなることが想定される、掘削損傷領域の連続性を遮断するための施工技術の実証として、令和3年度に坑道の切欠き部に吹付けたベントナイト^{*}のサンプリング調査を実施し、吹付けベントナイトの乾燥密度^{*}などの施工品質を確認しました。掘削損傷領域の調査技術の高度化として、弾性波^{*}トモグラフィ^{*}の調査結果に対して、新たに開発した吹付けコンクリートの影響を考慮した解析手法を適用することにより、既存の解析では検出が困難であった掘削損傷領域を可視化することができました。さらに、ボーリング孔の閉塞技術の実証について、250m 調査坑道から掘削したボーリング孔を閉塞する原位置試験を実施し、ボーリング孔内にベントナイトブロックを設置できることを確認しました。

人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系^{*}の構築に向けて、緩衝材ブロックと岩盤の間の隙間にケイ砂を充填する施工方法における緩衝材の流出挙動を確認するための試験を行い、緩衝材の流出量などを計測しました。また、緩衝材の流出量が、要求される品質を確保できる範囲となるかを推定する方法について、室内試験に基づいて流出量の評価モデルを検討し、緩衝材ブロックと岩盤の隙間からの緩衝材の流出量の評価モデルを構築するための基盤情報を整備することができました。

高温度（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験として、令和3年度の調査で示唆された、緩衝材の温度が100℃を超えた場合に生じ得る現象のうち、主としてひび割れの発生が緩衝材の特性に与える影響を確認するための原位置試験の概念について検討を行い、試験計画を立案しました。また、スイスで実施されている緩衝材の最高温度が100℃を超えた状態を模擬する原位置試験（HotBENT^{*}プロジェクト）について、模擬廃棄体（ヒーター）の加熱に伴う計測結果などに関する情報の入手を継続しました。

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

地殻変動が地層の透水性^{*}に与える影響を把握することを目的に、令和3年度に再検証したダクティリティインデックス（以下、DI）^{*}モデルと、令和2年度に実施した水圧擾乱試験^{*}の結果との比較検証を行いました。その結果、DIの経験式^{*(1)}と水圧擾乱試験中の断層の透水性の変化が整合することを確認することができました。また、DIを用いた透水性評価手法の信頼性向上などを目的として、これまでに得られた地下施設建設時における地下施設周辺のボーリング孔での水圧観測データから、DIと断層/割れ目の水理学的連結性^{*}の関係を検討しました。その結果、稚内層浅部（DIが2未満の領域）から深部（DIが2以上の領域）にかけて地層の数m～数十m以上のスケールで見した場合の透水性が断層/割れ目の透水性を反映する値から割れ目の無い健岩部の透水性を反映する値へと徐々に変化する様子を数値解析により再現することができました⁽²⁾。これにより、令和2年度概念モデル、すなわちDIが2未満の領域（断層/割れ目の水理学的連結性が高いと推定される領域）⁽³⁾とDIが2以上の領域

(断層/割れ目の水理的連結性が低いと推定される領域)⁽³⁾の間に断層/割れ目の水理的連結性が遷移的に変化する領域が存在するモデルの妥当性が確認できました。

地下水の流れが非常に遅い領域(化石海水*領域)を調査・評価する技術の高度化においては、令和3年度に引き続き、令和2年度の調査により推定した化石海水の三次元分布の推定結果およびその手法の妥当性を確認するためのボーリング調査を継続しました。その結果、化石海水かどうかを判断する指標としている塩化物イオン濃度と酸素・水素同位体比*の深度分布の特徴から、当初の計画の通り、化石海水の出現深度の変化が大きいうという情報を得ることができ、推定結果が妥当であることが確認できました。以上のことから、令和2年度に適用した電磁探査*が、化石海水領域の三次元分布の把握に有効な調査技術であることを実際のデータを基に示すことができました。

地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動の検討として、坑道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤が掘削損傷領域の透水性に与える影響の評価手法の構築を目的に、掘削損傷領域の割れ目を対象とした既往の段階注水試験(段階的に注水圧を増加させる注水試験)のデータ解析を行いました。その結果、掘削損傷領域の割れ目のDIを変化させた時の透水性の変化が、令和3年度に再検証したDIの経験式⁽¹⁾と整合的であることが確認できました⁽⁴⁾。これにより、坑道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤による掘削損傷領域の透水性の変化はDIの経験式により推定可能とした既報のモデル⁽⁵⁾の妥当性が確認できました。

(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、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として、令和3年度に引き続き、人工バリア性能確認試験をタスクの1つとする国際共同研究DECOVALEXなどに参加し、情報共有を図りました。また、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テーマを対象とした新たな国

際プロジェクトとして、OECD/NEA^{*8}の協力のもと、幌延国際共同プロジェクト（Horonobe International Project :HIP）^{*9}を立ち上げるべく、複数回の準備会合を開催しました。準備会合では、共同研究の内容や実施分担などについて議論を行い、令和4年10月にプロジェクトの協定書の内容について基本合意がなされました^{*10}。その後、令和5年2月8日に協定が発効し、プロジェクトを開始しました。なお、令和5年2月末日現在、原子力機構が把握している参加機関は、英国地質調査所（英国）^{*11}、原子力テクノロジー国営会社（ルーマニア）^{*12}および工業技術研究院（台湾）^{*13}です。

以上のように、令和4年度は計画していた調査研究を着実に進めて、予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4年度の調査研究成果報告書に取りまとめます。

3.2 令和5年度の主な業務内容

「実際の地質環境における人工バリアの適用性確認」として、国際共同研究 DECOVALEX にて人工バリア性能確認試験を対象とした連成解析を行い、異なる解析コード^{*}との比較検証を行います。また、物質移行試験に

*8：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。

*9：幌延国際共同プロジェクト（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/english/04/horonobe/IJP/HIP/index.html>)

*10：協定書の内容について基本合意をした機関は、英国地質調査所（英国）、オーストラリア連邦科学産業研究機構（オーストラリア）、韓国原子力研究所（韓国）、原子力環境整備促進・資金管理センター（日本）、原子力発電環境整備機構（日本）、工業技術研究院（台湾）、電力中央研究所（日本）、連邦放射性廃棄物機関（ドイツ）、国営放射性廃棄物会社（ブルガリア）、原子力研究所（ルーマニア）です。

*11：英国地質調査所：BGS（British Geological Survey）は、英国政府の研究機関で、公共の利益に焦点を当てつつ、地球上で生じる様々なプロセスなどに関する地球科学的研究に加え、客観的な地球科学的データや情報の社会への提供などの活動を行っています。

*12：原子力テクノロジー国営会社：RATEN（Regia Autonomă Tehnologii pentru Energia Nucleară）は、ルーマニアの原子力エネルギー分野の研究開発の調整および原子力エネルギー計画の科学的・技術的支援を行う国有企業の研究機関で、放射性廃棄物管理を含む原子力分野の幅広い研究開発を行っています。なお、準備会合には原子力研究所（RATEN ICN）が参加していましたが、協定書にはRATENが署名しました。

*13：工業技術研究院：ITRI（Industrial Technology Research Institute）は、台湾における応用研究と技術サービスを行う非営利の研究開発機関です。日本の様々な企業、大学と複数の国際共同研究などを行っています。

ついて、令和 4 年度に着手した声問層の割れ目を対象としたボーリング調査を継続し、調査エリア周辺の割れ目の水理的連結性や水理特性データを取得します。有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行試験の結果を踏まえ、350m 調査坑道において物質移行試験を実施するとともに、掘削損傷領域に分布する割れ目の物質の移行挙動のモデル化/解析手法の検討を継続します。

「処分概念オプションの実証」については、搬送定置・回収技術の実証として、コンクリート試験体の暴露試験ならびに試験体の分析を継続して、より長期の挙動を確認するとともに、地下施設に施工されている吹付けコンクリートの劣化挙動などについても調査を進めます。閉鎖技術の実証として、長期的な性能に及ぼし得る条件を考慮した上で、埋め戻し材の設計および施工方法を検討するための数値解析などに着手する予定です。また、埋め戻し材が緩衝材の膨出を抑制する機能について、これまでの室内試験結果を整理し、膨潤変形挙動を理解するための検討を行います。掘削損傷領域の連続性を遮断するための施工技術の実証については、実際に施工可能な止水プラグの形状や材料配合などを検討する数値解析や室内試験に着手します。掘削損傷領域の調査技術の高度化について、350m 調査坑道に新たに掘削する試験坑道周辺を対象とした物理探査を行い、掘削直後の掘削損傷領域の割れ目の連続性や分布などの初期状態を評価するとともに、これまでに開発した物理探査技術の適用性を確認します。さらに、坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化について、令和 6 年度からの実施に先立ち、断層、割れ目からの湧水や掘削損傷領域の発達に関する既存情報の収集・整理を行い、500m 調査坑道で想定される状況などについて検討します。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では、令和 4 年度に策定した試験計画に基づき、高温（100℃以上）が緩衝材の特性に与える影響を検証するための原位置試験を開始します。

「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」については、水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備や、DI を用いた透水性評価手法の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備を目的に、過年度に実施した水圧擾乱試験の結果の解析や、DI と断層/割れ目の水理的連結性の関係

に関する解析を令和 4 年度までの検討結果を踏まえて継続します。地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）を調査・評価する技術について、これまでに得られた成果の論文投稿や研究開発報告書類の整備に取り組めます。また、令和 4 年度に引き続き、産業技術総合研究所*14との共同研究として実施する海上物理探査の知見を参照しながら、海陸連続三次元地質環境モデルの検討を継続します。

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

地下施設の建設・維持管理においては、掘削工事を再開し、350m 調査坑道の拡張を行うとともに、深度 500 m に向けた立坑の掘削を開始します。掘削にあたっては、可燃性ガスの存在を考慮し、防爆仕様*の機器の採用や、ガス濃度の監視などにより防爆対策を行います。また、坑道掘削により発生した掘削土（ズリ）は掘削土（ズリ）置場に搬出し、有害物質の含有量などを定期的に確認します。

地下施設からの排水および掘削土（ズリ）置場の浸出水は、これまでと同様に、排水処理設備において適切に処理した上で天塩川に放流します。

環境調査においては、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においては、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。

なお、幌延深地層研究計画で実施する地下深部の地質環境を対象とした研究は、地球科学の幅広い分野にわたり、学術研究の発展にも寄与することから、国内外の関連する研究機関の専門家の参加を得ながら進めていきます。また、国内外の資金や人材を活用することについて、国際共同研究 DECOVALEX や環太平洋地域における地下研究施設を活用した国際協力を継続し、研究を進めるとともに、幌延国際共同プロジェクト（HIP）を開始します。HIP では、令和 2 年度以降の必須の課題のうち、実際の地

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

質環境における人工バリアの適用性確認および処分概念オプションの実証に関わる3つのタスクを設定して研究を進めます。具体的にはタスクA（物質移行試験）では、水理地質構造に関する情報を取得し、タスクB（処分技術の実証と体系化）では、既存情報の整理を行い、500m 調査坑道において想定される状況について検討するとともに、一連の操業技術の実証に向けた関連情報の整理や要素技術の試験を行います。また、タスクC（実規模の人工バリアシステム解体試験）では、これまでの取得情報をもとに、人工バリア性能確認試験の解体調査の詳細化に向けた検討を行います。

令和5年度に地下施設、研究所用地および周辺地域（幌延町内）で行う主な業務の実施内容を図2、表2に示します。また、表2に示した調査に関する地上からのボーリング孔の位置および観測装置の設置場所を図3に、研究所用地における主な施設と観測装置の配置を図4に、250m および350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所を図5および図6に示します。

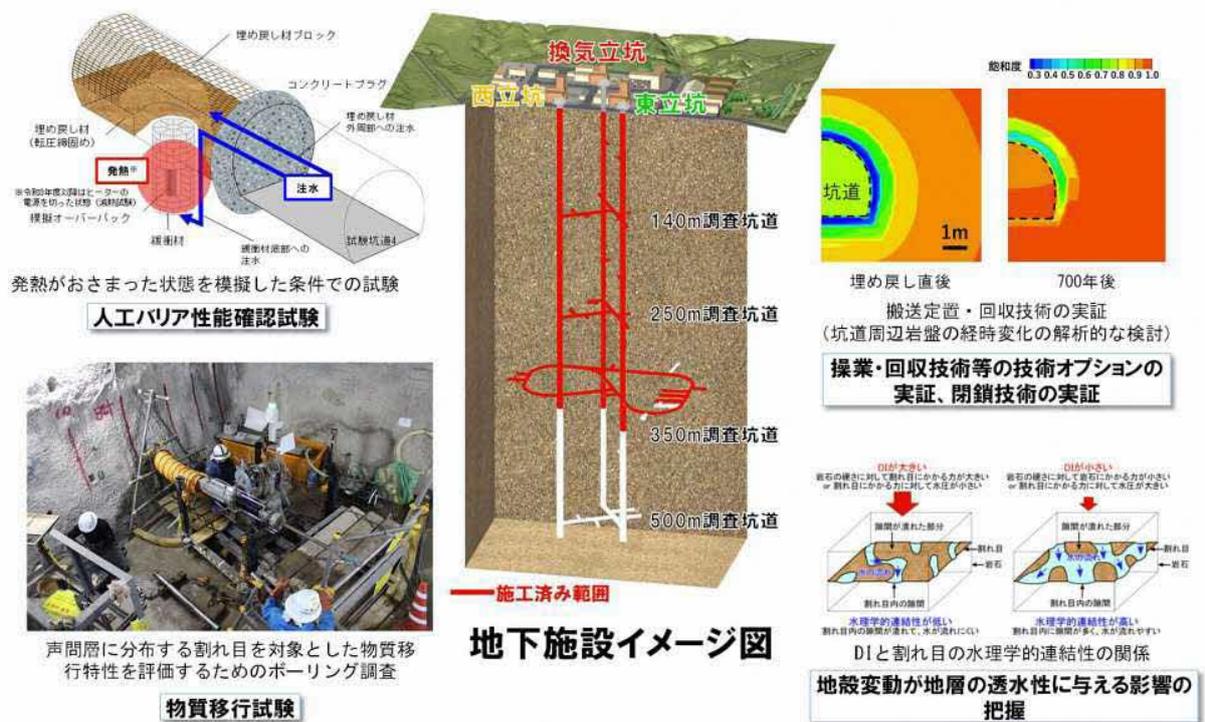


図2 令和5年度の主な調査研究

表 2 令和5年度の主な業務の実施内容

実施項目		実施内容	実施場所	
令和2年度以降の必須の課題	実際の地質環境における人工バリアの適用性確認	人工バリア性能確認試験	国際共同研究DECOVALEXによる連成挙動解析の比較検討	研究所用地、地下施設など
		物質移行試験	掘削損傷領域における物質の移行挙動のモデル化/解析手法の検討、有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行試験、声間層に分布する割れ目を対象としたボーリング調査の継続	研究所用地、地下施設など
	処分概念オプションの実証	人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験	地下環境におけるコンクリートの劣化に関する試験・分析を継続、坑道周辺岩盤の経時変化の解析的な検討、閉鎖システム（埋め戻し材やプラグなど）の設計および施工方法に関する数値解析や室内試験などに着手、新たに掘削する試験坑道周辺の掘削損傷領域を対象とした物理探査、坑道埋め戻し材の施工効率の向上に向けた要素試験などに着手、施工品質確認のための計測技術の高度化	研究所用地、地下施設など
		坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化	令和6年度からの開始に先立ち、割れ目からの湧水や掘削損傷領域の発達に関する既存情報の収集・整理	—
		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℃を超えた状態での原位置試験の開始、海外での原位置試験に関する情報などの継続入手	研究所用地、地下施設など
	地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証	水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化	水圧擾乱試験の結果の解析、断層/割れ目の水理学的連結性に関する解析、化石海水領域を調査評価する技術の高度化の成果公表、海陸連続三次元地質環境モデルの妥当性の検証のための海上物理探査	研究所用地および周辺、地下施設、HDB-1～11孔、浜里地区など
令和2年度以降の必須の課題へ対応するためのデータ取得		地質構造に関する調査、分析、岩盤の水理に関するデータ取得・モニタリング、分析、解析、地下水の地球化学に関する分析、岩盤力学に関するデータ取得、解析、地震観測、および計測手法の妥当性評価と必要に応じた調査技術・機器の改良など	研究所用地、地下施設、HDB-1～11孔、上幌延地区、浜里地区など	
地下施設の管理		350m調査坑道の拡張、立坑掘削、地下施設の設備運転や保守点検などの維持管理、排水処理設備の運転	研究所用地、地下施設など	
環境調査		地下施設からの排水などの水質調査、水質・魚類に関する調査	研究所用地、天塩川、清水川など	

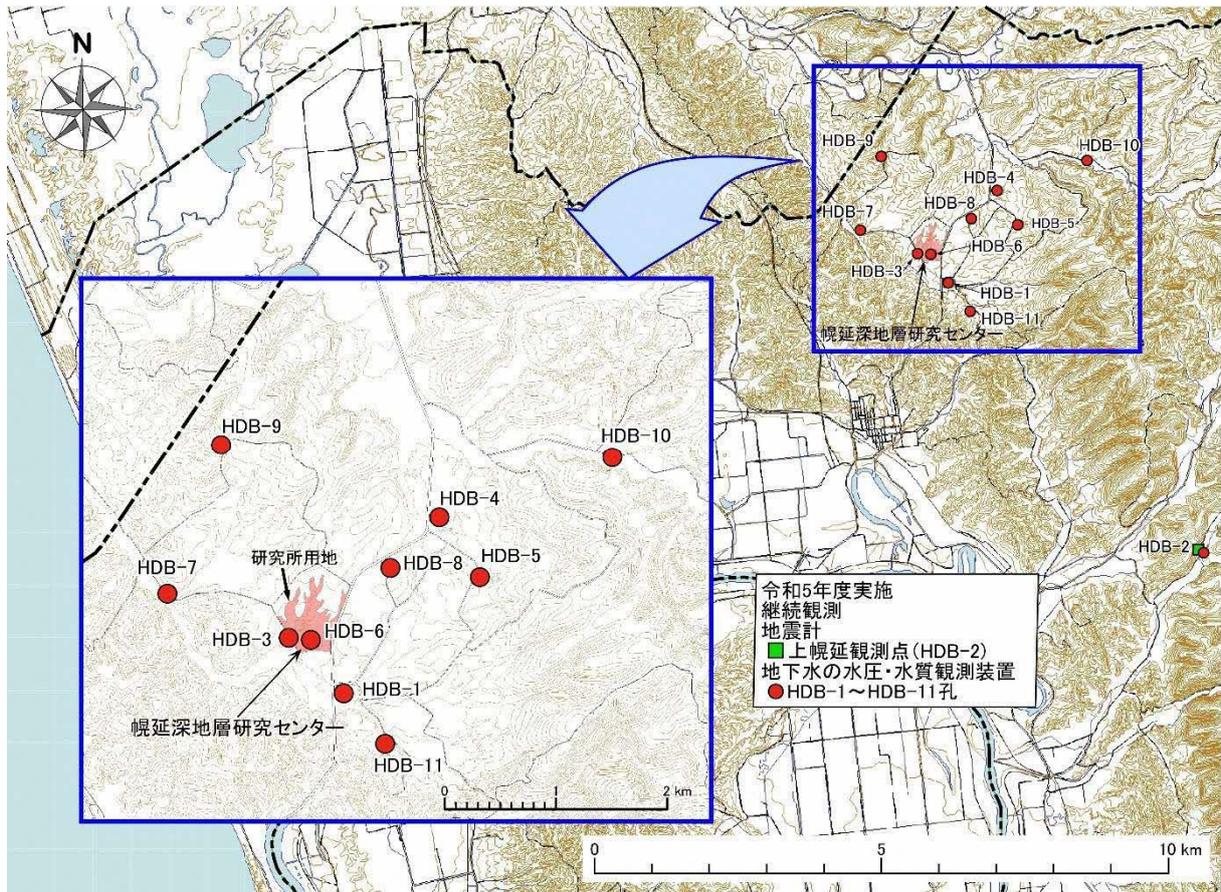


図 3 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所
 国土地理院の基盤地図情報（基本項目）を加工して作成



図 4 研究所用地における主な施設と観測装置の配置

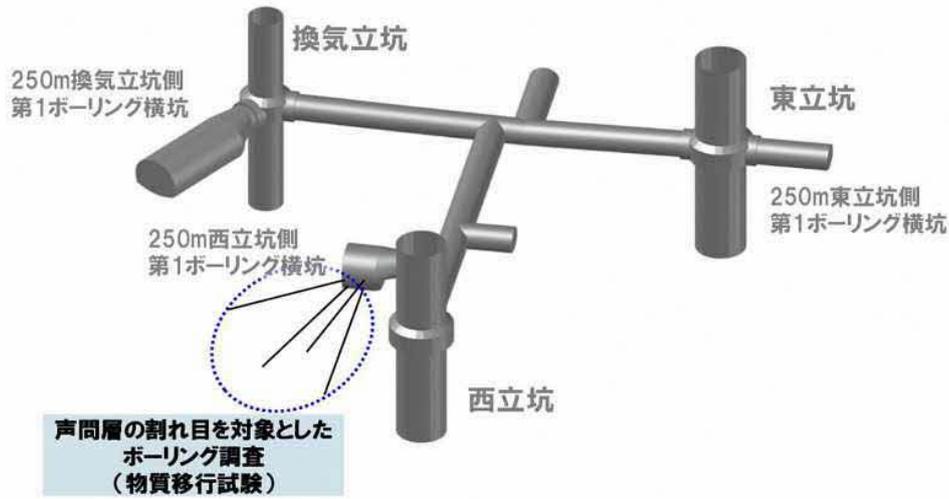


図 5 250m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

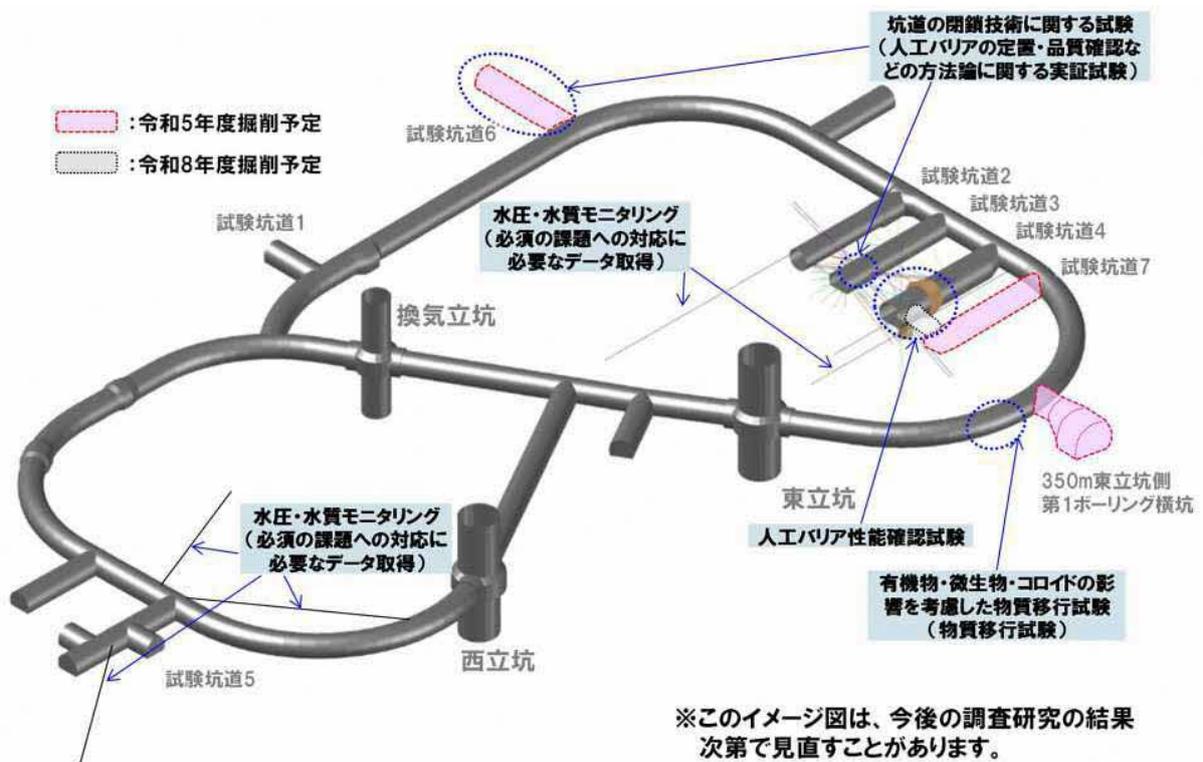


図 6 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

4. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

4.1 人工バリア性能確認試験

令和 2 年度以降は、ガラス固化体設置直後の廃棄体の発熱過程に加えて、減熱過程を模擬した原位置試験データや解体調査により得られるより詳細なデータに基づく熱－水理－力学－化学連成現象の評価モデルの高度化が課題となります。そのため、人工バリア性能確認試験で設置しているヒーターの温度を下げた試験（減熱過程を模擬した原位置試験）を行い、熱－水理－力学－化学連成現象に係るデータを取得します。また、減熱試験終了後は解体調査により、人工バリア、埋め戻し材、コンクリート、周辺岩盤やそれらの境界面のサンプリングや分析を行います。人工バリア性能確認試験の解体調査については、適用する施工方法の検証を行うために事前に試験施工を行います。設置したセンサーや解体調査により得られるデータを基に、熱－水理－力学－化学連成解析を行い、評価モデルの高度化や適用性の確認を行います。このような人工バリア周辺で起こる現象の理解は、地層処分後の数万年以上の間の安全評価における初期状態の把握やオーバーパック（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 4 年度は、人工バリア性能確認試験（図 7）について、廃棄体の発熱がおさまった状態を模擬した条件（ヒーターの電源を切ることにより再現）での試験を継続しました。注水流量については、埋め戻し材外周部からは約 300 mL/min、緩衝材底部からは約 400 mL/min で注水しています。設置してあるセンサーにより、緩衝材中の温度分布は地下環境下の温度（約 23℃）で一定であり、加熱試験時には低下していた緩衝材内側の飽和度が増加傾向にあることが確認できました（図 8）。これは、ヒーターの電源を切ったことにより、緩衝材中の温度差によって生じる緩衝材内側から外側方向への水分移動が解消されるためです。それに伴い中央部の水分が内側へ移動し、内側の飽和度が増加、中央部の飽和度が低下した可能性があります。これらの結果は、令和元年度に実施した予察解析結果と整合しています。令和 4 年度までのデータ取得により、ヒーターの温度低下に伴う緩衝材中の温度・飽和度・応力分布の変化など、評価モデルを検証するためのデータが取得できました。

熱-水理-力学-化学連成現象に関する解析については、令和3年度に実施した温度勾配のある環境下での緩衝材中の水分移動特性に関する室内試験(図9)と緩衝材中の空気の移動やそれに伴う空気圧の上昇に着目した解析を実施しました。一例として、図10に緩衝材中の水分移動特性に関する室内試験結果を再現した解析結果を示します。この解析では、図10のように試験結果を再現する解析を実施することで、これまで未取得であった緩衝材の乾燥密度を 1.8 Mg/m^3 (人工バリア性能確認試験の緩衝材の初期乾燥密度)としたときの温度勾配のある環境下における緩衝材中の水分移動特性に係るパラメータ(温度勾配水分拡散係数)を決定することができます。国際共同研究 DECOVALEX では、人工バリア性能確認試験を対象とした連成解析結果を比較検証するステップに進んでおり、参加機関ごとに解析モデルの作成に着手しました。

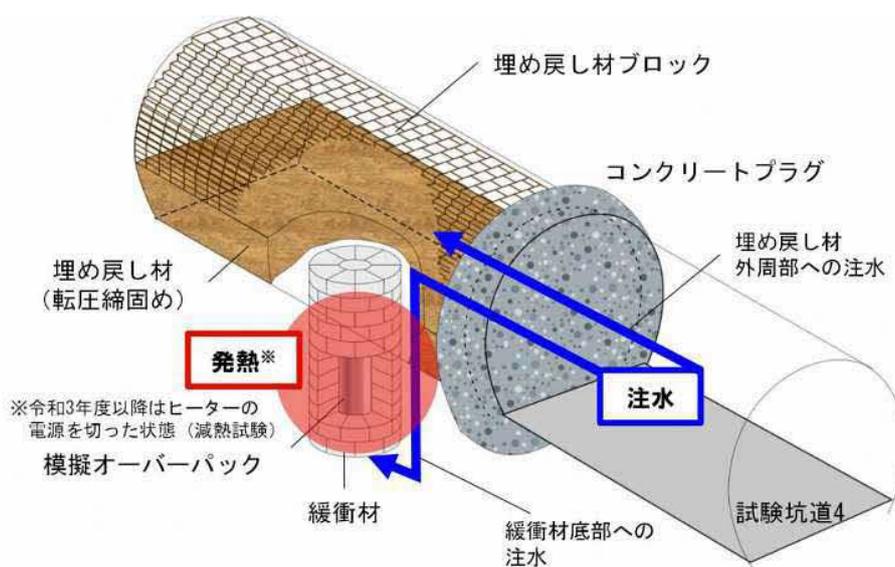
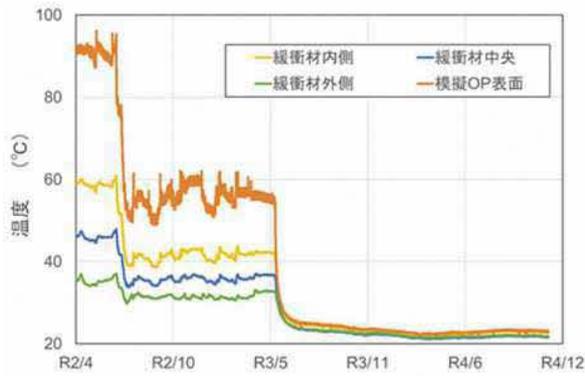
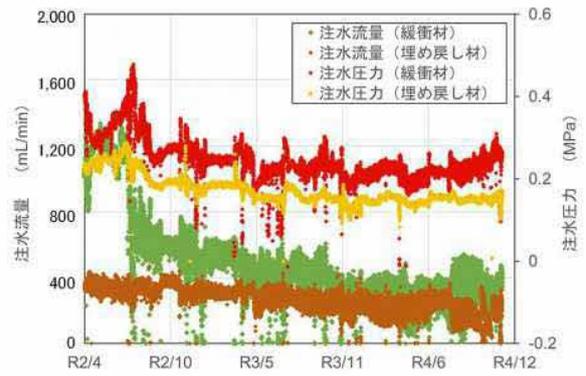


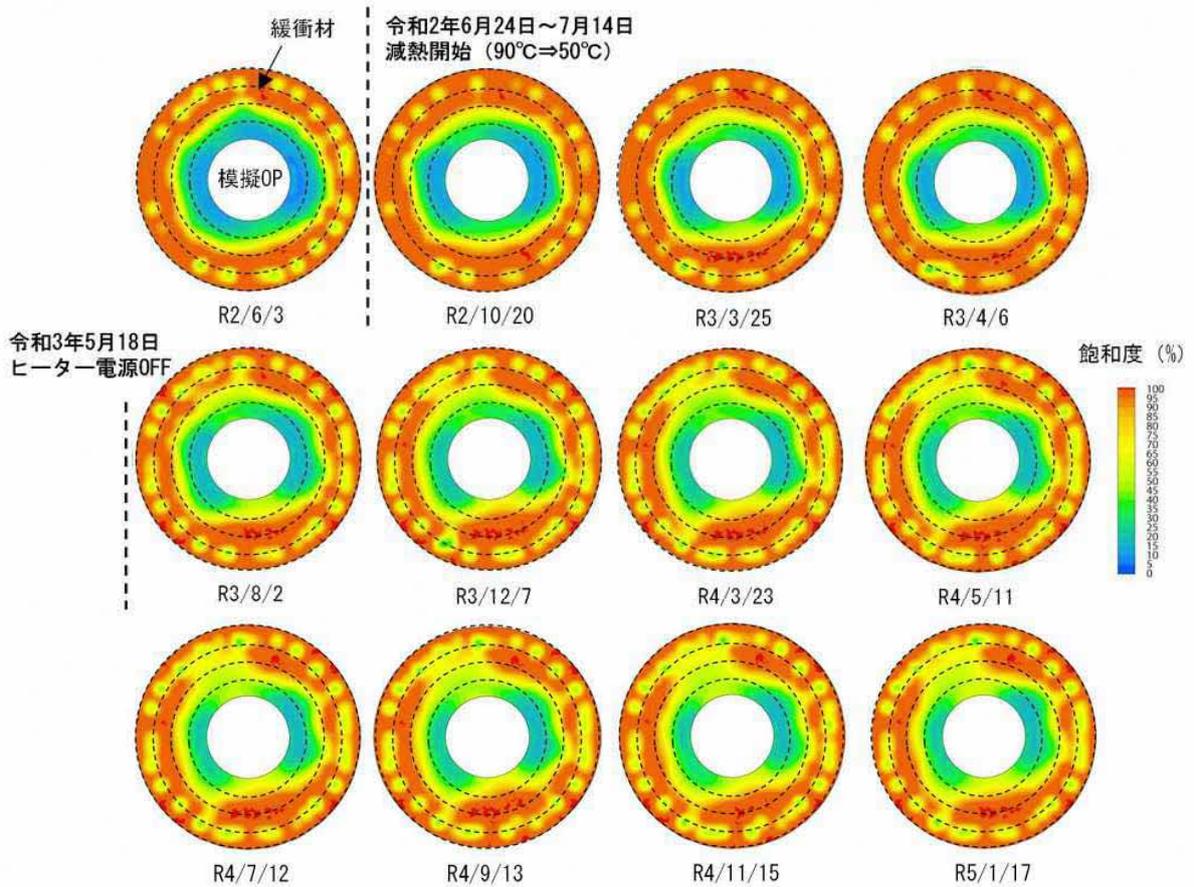
図7 人工バリア性能確認試験の概念図



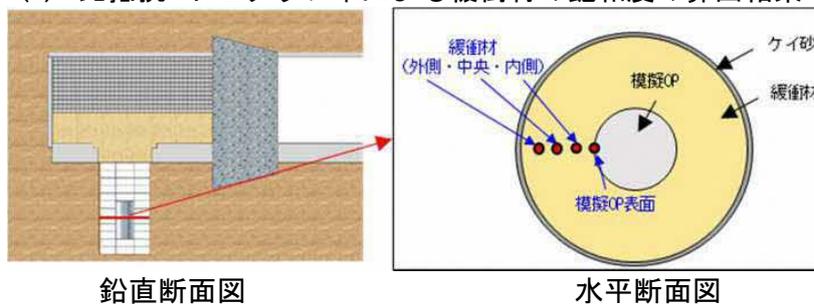
(a) 温度



(b) 注水流量と注水圧力



(c) 比抵抗^{*}トモグラフィによる緩衝材の飽和度の算出結果



(d) 計測位置 (緩衝材 5 段目)

図 8 人工バリア性能確認試験の計測データ

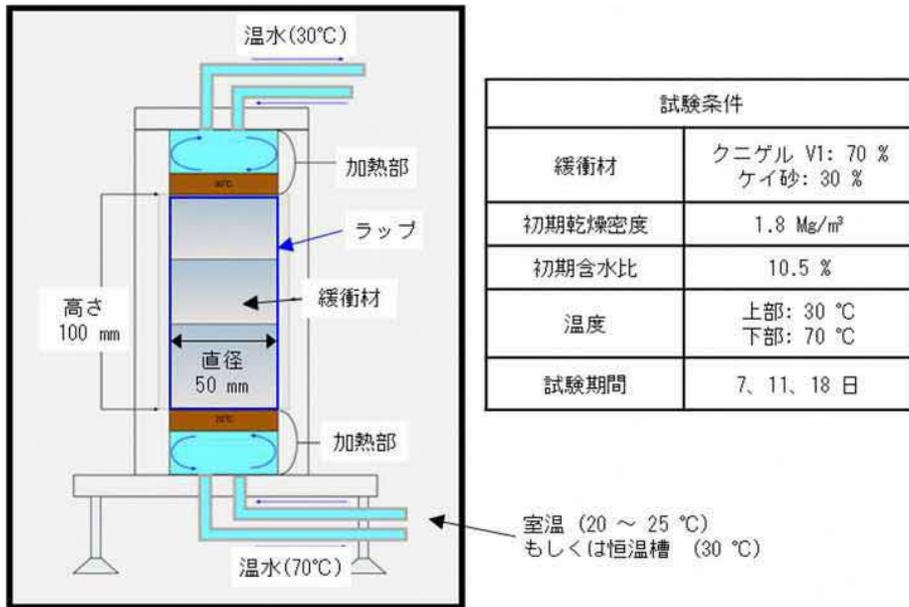


図 9 温度勾配のある環境下での緩衝材中の水分移動特性に関する試験の概念図と試験条件

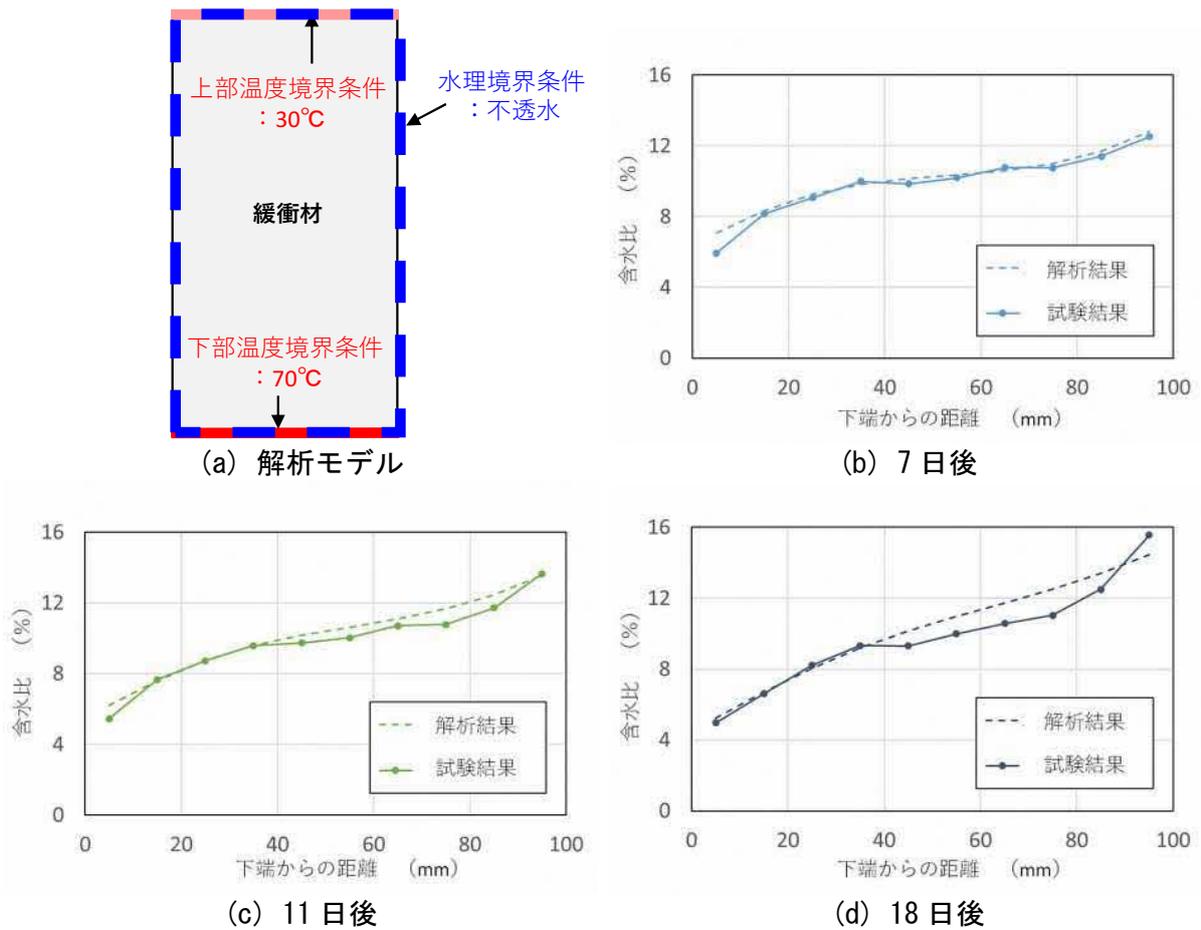


図 10 試験結果と解析結果の比較

人工バリア性能確認試験の解体調査計画について、試験施工で確認した個々のサンプリング手法を踏まえ全体的な作業方針と施工手順、実際のサンプリング対象と各種調査で主に取得する情報を整理しました。解体調査における作業方針および施工手順は、以下のとおりです。

- ・ 人工バリア性能確認試験を実施している試験坑道 4 の隣に、試験坑道 7 を掘削する
- ・ 試験坑道 7 から試験坑道 4（埋め戻し部）に向かって、解体作業用の連絡坑道（試験坑道 4-7 連絡坑道）を掘削する
- ・ 埋め戻し部のサンプリング、解体作業を行う
- ・ 試験孔部（緩衝材、模擬 OP など）のサンプリング、解体作業を行う

実際のサンプリング対象と各種調査で主に取得する情報を表 3 に示します。その際、令和 3 年度に検証したサンプリング手法を適用します。

表 3 解体調査で予定している主な取得情報

サンプリング対象	主な取得情報
模擬 OP	最大腐食深さ、平均腐食深さ
	腐食生成物
	腐食状況
	模擬 OP の位置、傾き (設置時からのずれ)
緩衝材 埋め戻し材	外観
	水分量、乾燥密度
	間隙水組成
	鉱物組成
	熱伝導率、熱容量
微生物相互作用	
埋め戻し材 転圧締固め部とブロックの接触面	接触面の状態
埋め戻し材と吹付けコンクリートの接触面	施工時の隙間の充填状況 埋め戻し材とコンクリート相互作用
緩衝材と埋め戻し材の接触面	緩衝材の膨出量
土留め壁と埋め戻し材の接触面	土留め壁の腐食状況
コンクリートプラグ	コンクリートの強度
コンクリートプラグ-岩盤接触面	密着状況 コンクリートと岩盤の相互作用

令和 5 年度は、国際共同研究 DECOVALEX を通して、人工バリア性能確認試験を対象とした連成解析を行い、異なる解析コードとの比較検証を行います。解析に使用する連成モデルは、参加機関ごとに異なり、必要となる解析パラメータもそれに応じて異なります。そこで、各機関が採用する熱-水理-力学連成モデルや室内試験をもとに各機関が推定した解析パラメータの違いが、緩衝材中の温度、飽和度、応力分布などの解析結果にどのような影響を及ぼすのかを確認します。さらに、人工バリア性能確認試験で取得したデータと比較することにより、人工バリア周辺での現象を再現するためには、どのような解析モデルが効果的かなどを検証します。なお、廃棄体の発熱が収まった状態を模擬した条件での人工バリア性能確認試験のデータについては、データ取得を自動計測機器により継続します。

4.2 物質移行試験

令和 2 年度以降は、掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立、有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行モデル化手法の高度化、割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立が課題となります。そのため、これまでに確立した物質移行特性評価手法の適用/高度化を図りつつ、掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得を行うとともに、有機物・微生物・コロイドが物質移行に与える影響を評価します。また、掘削損傷領域の物質移行特性に加え、有機物・微生物・コロイドの物質移行特性に与える影響を考慮した上で、割れ目を有する堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むブロックスケール（数 m～100 m 規模）（図 11）における遅延性能評価手法の整備を行います。これらの成果は、処分事業で堆積岩を対象とする場合に、核種移行モデルを構築する際の基盤情報となるものです。

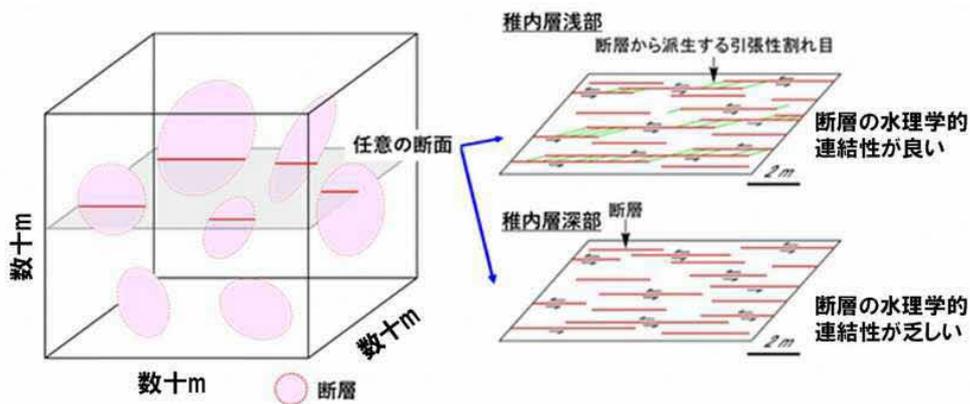


図 11 ブロックスケールにおける物質移行のイメージ

令和 4 年度は、掘削影響領域を対象とした物質移行試験については、令和 3 年度に試験坑道 4 周辺の掘削損傷領域を対象に実施したトレーサー試験結果(図 12)の解釈を行いました。この試験では、注入流量および揚水流量を一定としたパルス試験(瞬間的にトレーサーを投入する方法)および定常試験(連続的にトレーサーを投入する方法)を実施しました。その結果、両試験における注水孔(H4-1 孔)の間隙水圧の変化に違いがあることが分かりました(図 13)。この間隙水圧の変化は、パルス試験から定常試験への切り替え時に水みちの貯留性が変化したこと、この変化はメタンなどの気体の存在によって形成されていた水理境界が解消されたことが要因の 1 つとして考えられ、掘削損傷領域の物質移行モデルを構築し、解析を実施する上で考慮しなければならない事項が明らかになりました。

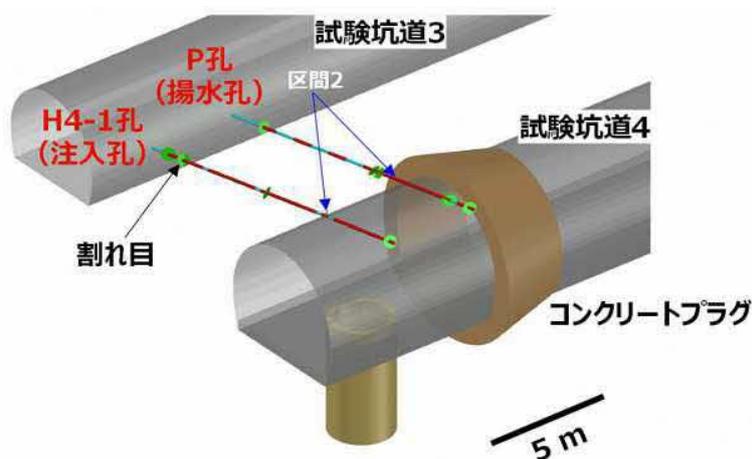


図 12 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験のレイアウト

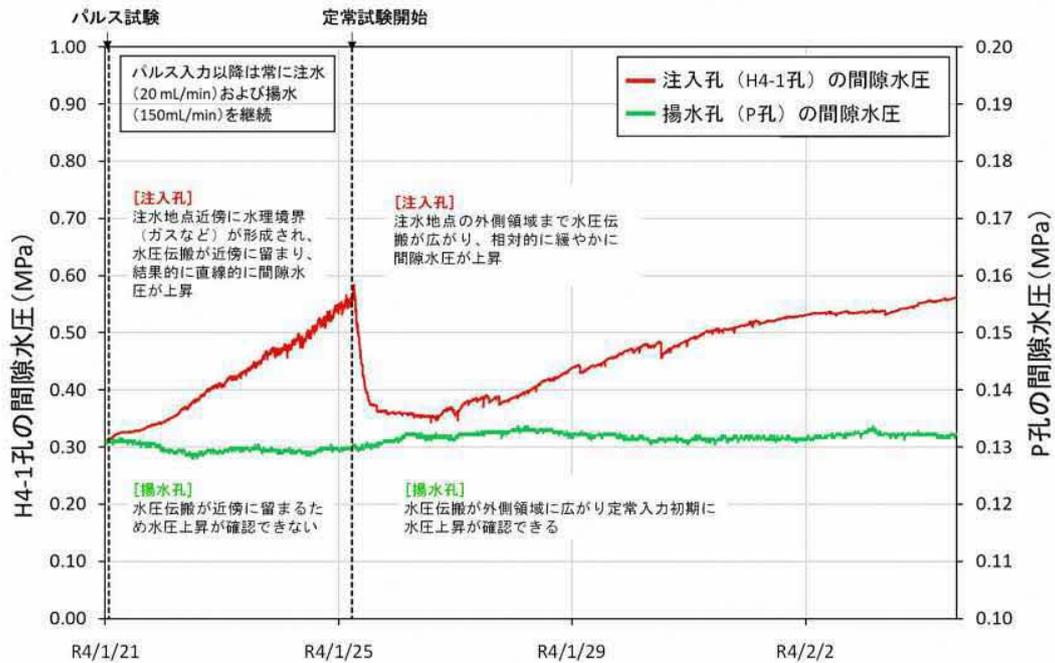


図 13 トレーサー試験中の間隙水圧測定結果

有機物・微生物・コロイドが物質移行に与える影響の評価については、令和3年度に350m調査坑道に掘削したボーリング孔などを利用して、有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行試験に着手しました。また、350m調査坑道において実施する原位置試験に用いる地下水を対象として、有機物・微生物を含む地下水中の元素とコロイド粒子との相互作用を評価する試験を実施しました。350m調査坑道から採取した地下水に希土類元素*を添加し、0.2 μm フィルターにて粒子を分画した後、0.2 μm 以上のサイズのコロイド粒子として存在する希土類元素の割合を算出しました。その結果、試験対象とした地下水中には、軽希土類元素の方が重希土類元素よりもコロイド粒子になりやすい傾向が認められるとともに、時間の経過にしたがい、その傾向が大きくなることが示され (図 14)、原位置試験結果と室内試験結果との比較検証を行う上で、有益な情報が取得できました。

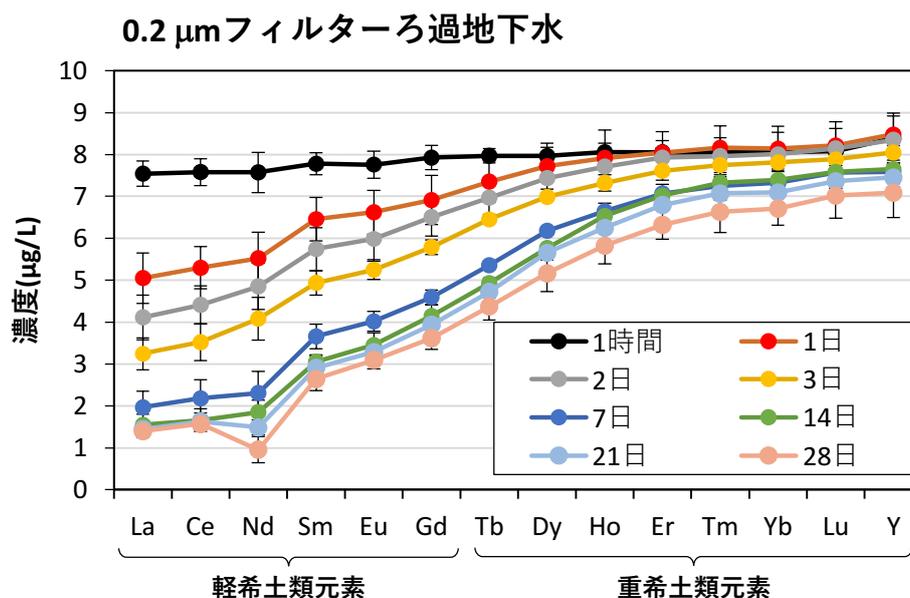


図 14 幌延の地下水（深度 350 m）中のコロイド粒子に対する希土類元素の相互作用

La : ランタン、Ce : セリウム、Nd : ネオジウム、Sm : サマリウム、Eu : ユウロピウム、Gd : ガドリニウム、Tb : テルビウム、Dy : ジスプロシウム、Ho : ホルミウム、Er : エルビウム、Tm : ツリウム、Yb : イッテルビウム、Lu : ルテチウム、Y : イットリウム

ブロックスケールを対象とした物質移行試験については、声問層に分布する割れ目を対象とした物質移行特性を評価するためのボーリング調査に着手しました。具体的には、250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑から西側に 4 本のボーリング孔を掘削し（図 5 参照）、水理的連結性や物質移行特性を評価する対象となる割れ目の分布などの情報を取得しました。

令和 5 年度は、過年度の稚内層深部で実施したブロックスケールを対象としたトレーサー試験結果の評価を継続するとともに、令和 4 年度に着手した 250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑でのボーリング調査を継続し、透水試験や間隙水圧測定などに基づき、割れ目の水理的連結性や、調査エリア周辺の間隙水圧分布などの水理特性データを取得します。また、令和 4 年度に着手した有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行試験の結果を踏まえ、350m 調査坑道に掘削したボーリング孔などを利用して、試験条件などを変化させて物質移行試験を実施していきます。さらに過年度に実施したトレーサー試験結果に基づき、第 2 次取りまとめ⁽⁶⁾の核種移行評価上、考慮されていなかった掘削損傷領域内の

核種移行（収着^{*}による遅延、割れ目沿いの分散など）の有無を評価するとともに、このような現象を表現可能な物質移行モデルの検討を継続します。

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 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証

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

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

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

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

- ① 埋め戻し材やプラグなどの長期的な性能の考え方の提示
- ② 埋め戻し材の設計評価に必要となる緩衝材膨出抑制機能の把握
- ③ 掘削損傷領域の連続性を遮断するための施工技術の実証
- ④ 掘削損傷領域の調査技術の高度化
- ⑤ 坑道内から掘削されたボーリング孔の閉塞技術の実証

人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築については、人工バリア性能確認試験において、注入する地下水の圧力や量を増加させ、緩衝材に十分に水を浸潤させた状態で得

られる情報などに基づき、埋め戻し材の施工方法（締固め、ブロック方式など）に応じた緩衝材の品質の違いを把握します。また、埋め戻し方法（プラグの有無など）・回収方法による埋め戻し材の品質の違いを把握します。

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

令和4年度は、搬送定置・回収技術の実証として、安全に回収作業を行うための処分坑道内の空間の安定性を評価するために、処分坑道に施工される吹付けコンクリートの経年劣化の把握を目的としたコンクリート試験体の暴露試験を継続しました。具体的には、地下坑道の吹付けコンクリートと同様の成分および施工方法で作製したコンクリート試験体を、令和2年度より坑道内における大気条件下および浸潤条件下に定置しています（図15）⁽⁷⁾。令和4年度は、定置から約1年9か月が経過した時点で一部の試験体を回収し、物性或化学状態を把握するための試験・分析を実施しました。その結果、大気条件下に定置した試験体は表面から約6mmの深さまで中性化の兆候が確認され、令和3年度（中性化深さは約3mm⁽⁸⁾）よりも中性化が進行しているのに対し、湿潤条件下に定置した試験体では令和3年度と同様に、中性化の領域がごくわずかであることなどが分かりました（図16）。

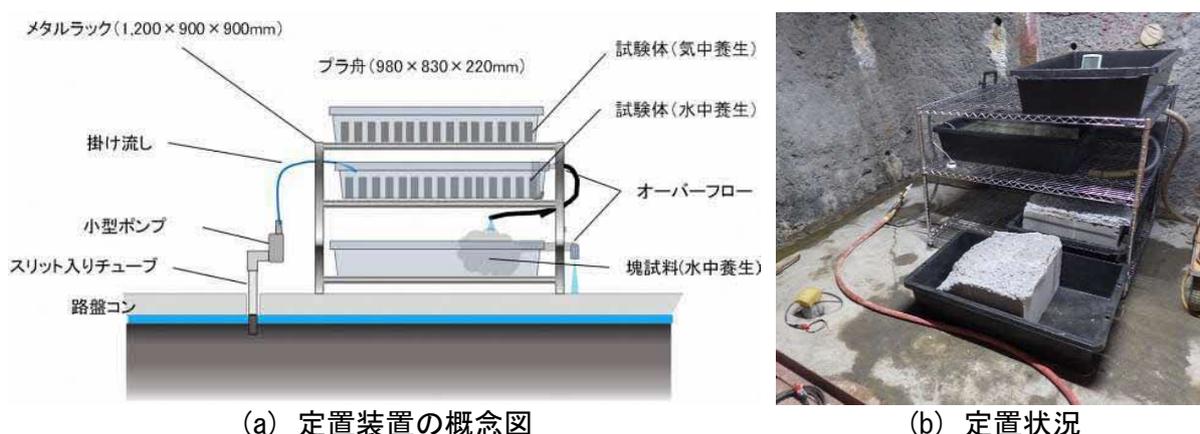
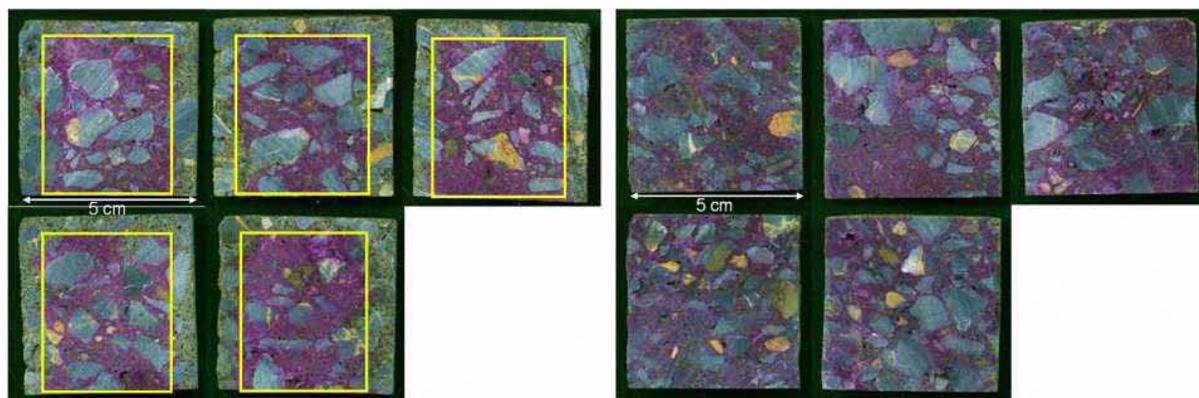


図 15 コンクリート試験体の暴露試験



(a) 大気条件下
呈色のみられない領域（黄色線の外側）
：表面から約 6 mm

(b) 湿潤条件下
呈色のみられない領域
：ごく一部に限定

図 16 コンクリート試験体の変質領域

試験体の半断面にフェノールフタレインを塗布し、色の変化が見やすいように色調を変化させた写真です。フェノールフタレインは pH がおよそ 8~12 の範囲で赤色を呈する試薬であり、中性化が進行して pH が低下した領域では、フェノールフタレインの呈色が見られなくなります。

また、坑道開放条件下における坑道周辺岩盤における長期変化を評価するために、長期的な力学的変化やそれに伴う透水性の変化を考慮した坑道周辺の二次元多相流解析*を令和 2 年度から実施しています。令和 3 年度までは、実施した解析の妥当性を検討するとともに、坑道掘削後の坑道が解放された条件下において坑道周辺の岩盤が飽和状態から不飽和状態に向かう過程に着目した解析を実施してきました。令和 4 年度は、これまでの解析に基づき、坑道を埋め戻した後の再飽和過程の解析を実施しました。一例として、図 17 に坑道掘削後に 300 年間解放条件を維持した後に埋め戻した場合の解析結果を示します。この飽和度分布の時間変化から、解析を実施した条件下では、坑道内部においては解析期間内では完全に飽和状態に戻ることはありませんでしたが、坑道壁面から 1 m から 2 m 程度離れた周辺岩盤においては埋め戻し後の数十年以内にはほぼ飽和状態に達することが示唆されました（図 17(a)~(c)）。

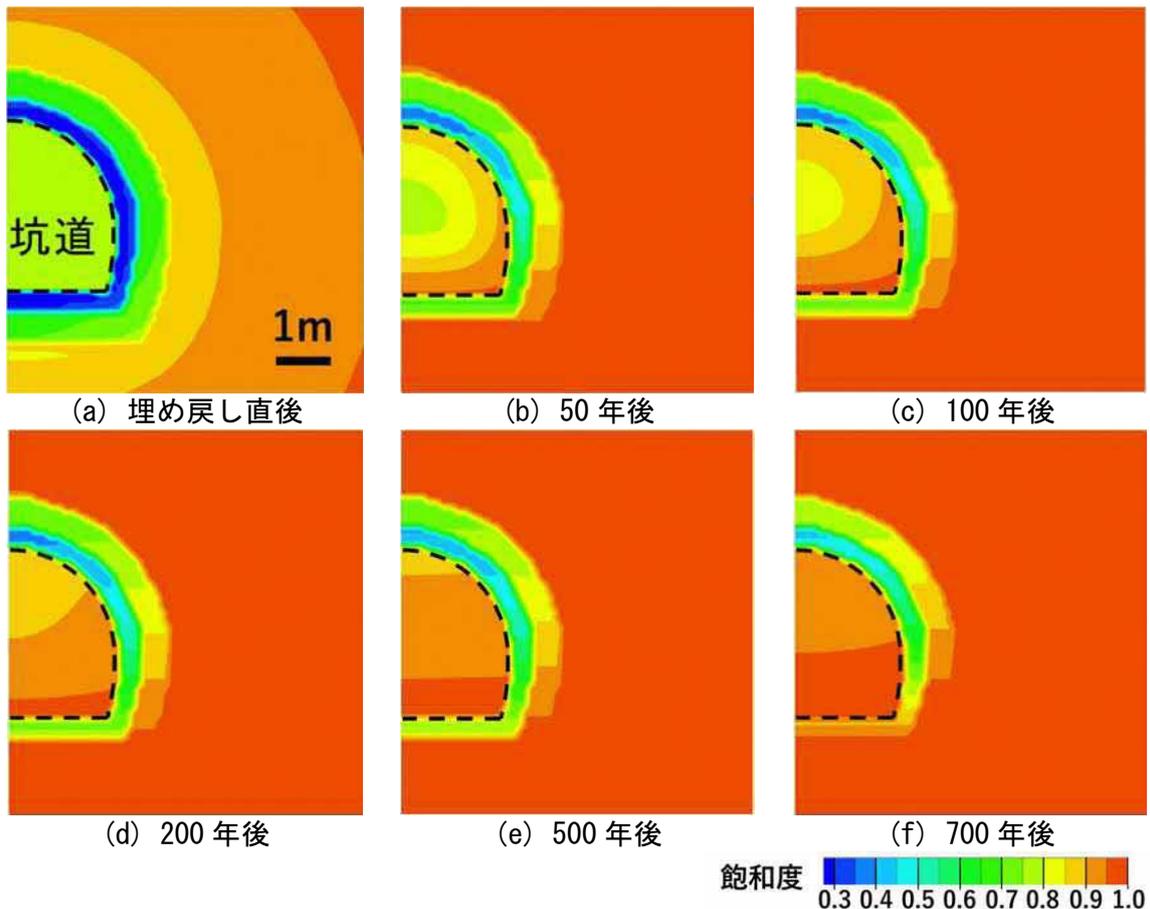


図 17 坑道埋め戻し後の飽和度変化

閉鎖技術の実証としては、①埋め戻し材やプラグなどの長期的な性能の考え方の提示について、力学的な作用（地震動もしくは埋め戻し材中のモンモリロナイト*の膨潤）が埋め戻し材の変質に与える影響を評価するために埋め戻し材の膨潤挙動解析を行いました。その結果、過年度に指摘した坑道の支保工*に使用されるコンクリートの溶出成分に起因した二次鉱物（カルサイト*など）の沈殿に加え、埋め戻し材の膨潤は、埋め戻し材の変質をより抑制する方向に作用することが示唆されました。また、埋め戻し材と支保工境界の初期状態に影響を及ぼし得るベントナイトの流出現象の発生条件を確認するための室内試験を継続しました。具体的には、令和 3 年度に実施した試験のうち、ベントナイトの流出が試験期間を通じて認められたケースに絞り、試験時間や注水方法を変化させた試験を実施しました。

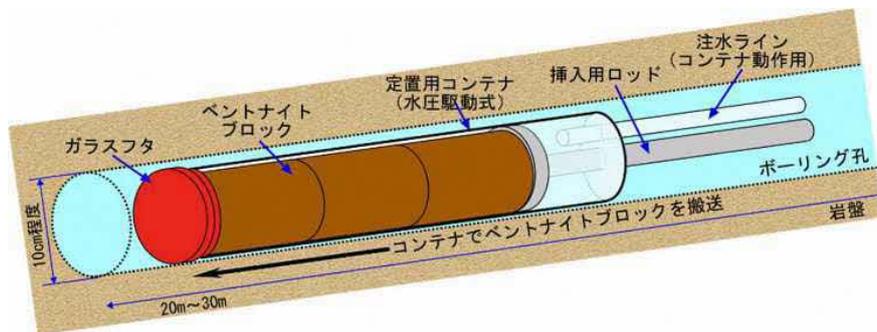
②埋め戻し材の設計評価に必要となる緩衝材膨出抑制機能の把握については、緩衝材と埋め戻し材を組み合わせた室内試験を継続して実施しました。試験結果から緩衝材と埋め戻し材の力学的な相互作用を考慮した膨潤変形挙動の評価に必要な膨潤変形量と膨潤圧のデータを整理しました。また、埋め戻し材の有無により、緩衝材の上方への膨潤変形がどの程度変化するか検討し、埋め戻し材の設置により緩衝材の膨潤変形が抑制されていることを確認しました。

③掘削損傷領域の連続性を遮断するための施工技術の実証については、試験坑道 3（図 6 参照）の底盤に構築した粘土系材料を用いた止水壁を対象とした透水試験を継続して実施し、止水壁を含む領域の透水係数を評価しました。その結果、止水壁を構築して 3 年が経過した時点においても、試験領域内の透水係数を構築直後と同等に低く保っていることが分かりました。また、令和 3 年度に試験坑道 2 の側面の切欠き部に吹付けたベントナイトのサンプリング調査を実施し、吹付けベントナイトの乾燥密度や含水比のばらつきなどの施工品質が吹付けから 1 年程度でどのように変化しているかを調査しました。その結果、吹付けの内側の部分で乾燥密度および含水比が維持されていることを確認しました。

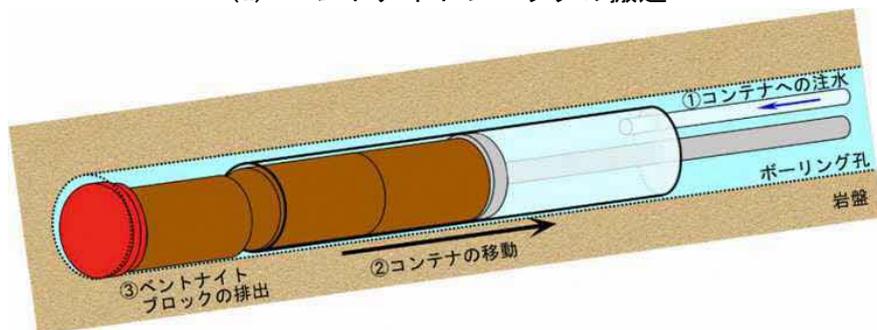
④掘削損傷領域の調査技術の高度化については、原位置における調査を継続するとともに解析技術の高度化を行いました。比抵抗トモグラフィでは、原位置調査において、岩盤内に塩水を注入した後に調査を実施することにより、注水箇所可視化を試みましたが、また、弾性波トモグラフィの調査結果に対して、新たに開発した吹付けコンクリートの影響を考慮した解析手法を適用することにより、既存の解析では検出が困難であった掘削損傷領域を可視化することができました。

⑤坑道内から掘削されたボーリング孔の閉塞技術の実証についてはボーリング孔にベントナイトブロックを設置する方法を対象として、250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑から北側に向かって、ほぼ水平に掘削したボーリング孔を閉塞する原位置試験を実施しました（図 18）。水平なボーリング孔内に定置用コンテナを用いてベントナイトブロックを設置できることを原位置において確認しました（図 19）。また、地下水が流入

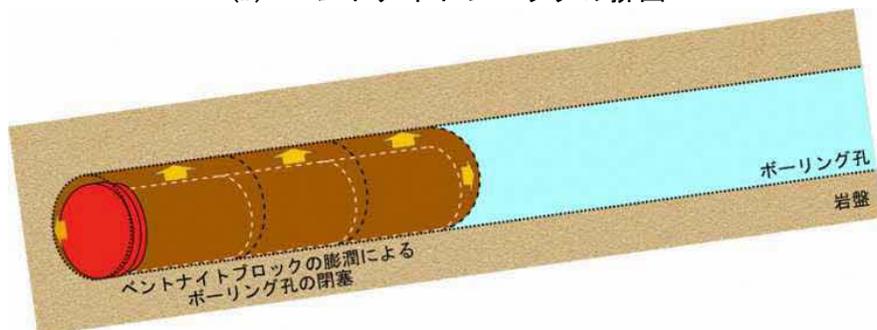
する状況を模擬するために、ボーリング孔へ人工的に注水し、設置したベントナイトブロックがどのように膨潤するかを確認しました。



(a) ベントナイトブロックの搬送



(b) ベントナイトブロックの排出



(c) 膨潤によるボーリング孔の閉塞

図 18 ボーリング孔閉塞の原位置試験の概念図

設置作業中にベントナイトブロックが地下水と接触することを防ぐために、ブロックをコンテナに収納してからボーリング孔内に挿入します。(a) ベントナイトブロックを収納して密閉されたコンテナをボーリング孔内の閉塞対象となる位置まで挿入します。(b) 注水ラインを通じてコンテナへ注水することでコンテナが移動してベントナイトブロックがフタとともにボーリング孔内に排出されます。(c) ボーリング孔内に排出されたベントナイトが地下水と接触して膨潤することで、ボーリング孔が閉塞します。



(a) 充填したベントナイトブロック



(b) ベントナイトブロックの充填作業

図 19 ボーリング孔閉塞の原位置試験の実施状況

人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築については、品質保証体系を構築するために必要となる緩衝材の流出挙動を把握するための試験を継続しました。緩衝材ブロックと岩盤の隙間にケイ砂を充填する施工方法において、5 か月程度の緩衝材の流出試験を実施して、緩衝材の流出量などを計測しました。令和 2 年度に 4 か月程度実施した、隙間に何も充填しない場合の試験と比較して、以下を確認しました。

- ・ 緩衝材の流出濃度が低い状態が維持されること
- ・ 緩衝材ブロックが地下水と接触して膨潤するときの膨潤圧が大きな値を示すこと
- ・ 試験孔にかかる水圧が試験期間中に変化せずにケイ砂充填領域内の隙間を地下水が流れ続けること

これらは、隙間にケイ砂を充填したことによって緩衝材ブロックの体積が変化しにくいことや、ケイ砂部分の空隙を地下水の優先的かつ均一化された一様な流路とすることで緩衝材の流出の要因の 1 つである地下水の流速が速くなる局所的な領域の発生が抑制されたことを示すものです。緩衝材の流出試験が終了した後、試験孔に設置した緩衝材ブロックを回収し、緩衝材ブロックの外観の観察や乾燥密度などの測定を行いました。その結果、地下水と接触していた緩衝材ブロックの外縁部から内部に地下水が均等に浸潤していることが色調の変化から観察できました。また、緩衝材ブロックの乾燥密度の測定結果から、ブロック外縁部で乾燥密度

が低下したことが確認されましたが、令和 2 年度に実施した隙間に何も充填しない場合の試験と比較して、乾燥密度が低下した範囲は限定的であることが確認されました。孔内湧水量と緩衝材流出量の関係から、孔内湧水量に対して、緩衝材の流出量が自己シール性、低透水性やコロイドろ過能などの設計要件を満足する品質を確保できる範囲となるかを推定する方法については、隙間の処理方法に応じた流出量の評価モデルが構築できるようにするため、室内試験に基づいた評価モデルを検討しました。原位置試験で得られた緩衝材流出量の試験結果により、室内試験方法や評価モデルに考慮すべき地質環境の要因などを整理しました。以上により、湧水による緩衝材ブロックと岩盤の隙間からの緩衝材の流出量の評価モデルを構築するための基盤情報を整備することができました。

令和 5 年度は、搬送定置・回収技術の実証に関する試験については、コンクリート試験体の暴露試験ならびに試験体の分析を継続して、より長期の挙動を確認するとともに、地下施設に施工されている吹付けコンクリートの現在の劣化挙動などに関しても調査を進めます。また、坑道周辺岩盤の経時変化の解析的な検討に関しても、解析条件の違いによる解析結果への影響の評価など、調査を進める予定です。

閉鎖技術の実証として、①埋め戻し材やプラグなどの長期的な性能の考え方の提示については、令和 4 年度までに得られた、埋め戻し材の変質によって立坑や坑道が水みちとなり得る水理、力学、化学条件を総合的に評価した上で埋め戻し材に求めるべき長期性能の考え方を整理します。また、坑道周辺岩盤の性質や地下水の水質など長期的な性能に及ぼし得る条件を考慮した上で、埋め戻し材の設計および施工方法を検討するために必要な数値解析や室内試験に着手する予定です。

②埋め戻し材の設計評価に必要となる緩衝材膨出抑制機能の把握については、令和 4 年度までに実施した室内試験の結果を整理し、緩衝材と埋め戻し材の力学的相互作用下で生じる膨潤変形挙動を理解するための検討を行います。また、緩衝材の膨出抑制の観点から埋め戻し材の設計に対する考え方を整理します。

③掘削損傷領域の連続性を遮断するための施工技術の実証については、これまで試験坑道 3 の底盤部で実施してきた透水試験を継続します。また、止水プラグの設計に対する考え方を提示することを目的として、坑道周辺岩盤の透水係数や力学的性質などから実際に施工可能な止水プラグの形状や材料配合などを検討する数値解析や室内試験に着手する予定です。

④掘削損傷領域の調査技術の高度化については、新たに掘削する試験坑道周辺の掘削損傷領域を対象とした物理探査を実施し、掘削直後の掘削損傷領域の割れ目の連続性や分布などの初期状態を評価するとともに、これまで開発してきた物理探査技術の適用性確認を行います。

⑤坑道内から掘削されたボーリング孔の閉塞技術の実証については、ボーリング孔の閉塞方法として令和 4 年度までに原位置試験などで具体的な手順などを確認したベントナイトブロックを設置する方法について、試験で得られたデータを整理して、その適用性や技術的な課題点について取りまとめを行います。

人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築における坑道の埋め戻しに関しては、施工環境や設計要件に応じて柔軟に施工方法を選択できるように複数の施工技術オプションの整備を進めるため、スクリー工法やブロック工法など複数の埋め戻し材施工技術について、施工効率の向上に向けた要素試験などに着手します。また、光ファイバーセンサーを用いた埋め戻し材の乾燥密度測定など、施工品質を確認するための計測技術の高度化に取り組みます。

5.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化

令和 2 年度以降は、廃棄体の設置方法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・評価技術の体系化が課題となります。そのため、人工バリアに要求される品質を踏まえて、要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認します。具体的には、坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化、先行ボーリングによる地質環境特性調査ならびに工学的対策技術を考慮した

地下施設および人工バリアの設計評価技術の体系化、多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、緩衝材流出・浸入現象評価手法および抑制対策技術の整備、廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理を行います（図 20）。本研究については、「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画」の研究期間の後半に実施します。

本課題に関する坑道内でのボーリング調査や坑道掘削といった原位置試験は、今後整備される 500m 調査坑道において、令和 6 年度から実施する予定です。それに先立ち、令和 5 年度はこれまでの調査研究で得られた断層/割れ目からの湧水や掘削損傷領域の発達に関する既存情報の収集・整理を行い、500m 調査坑道で想定される状況などについて検討します。

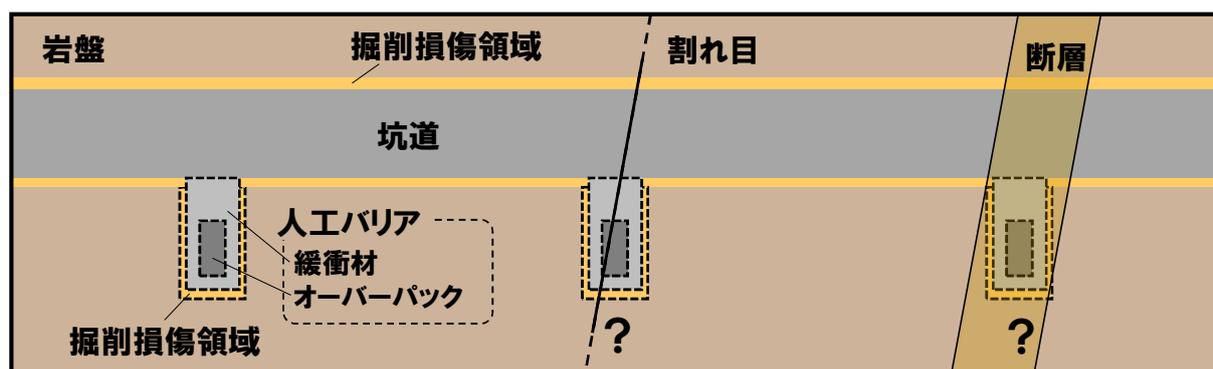


図 20 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化の概念図

5.2 高温（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

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

令和4年度は、令和3年度に実施した、緩衝材の温度が100℃を超えた状態で発生し得る現象に関する先行研究の事例調査を基に、重点的な調査が必要と考えられる現象に関する原位置試験の計画を策定しました。令和3年度の調査では、緩衝材の温度が100℃を超えた場合に変化が生じ得る影響要因として、イライト（雲母鉱物）化、熱履歴、塩濃縮、微生物影響、ガスの発生、鉄/ベントナイト相互作用、高pHおよび高Ca濃度地下水による影響、シリカセメンテーション*が抽出され、また、高温蒸気との反応ならびに緩衝材のひび割れも影響し得ることが示唆されました⁽⁸⁾。このうち、イライト化、微生物影響、高pHおよび高Ca濃度地下水による影響などの緩衝材の変質については、スイスのグリムゼル試験場で実施されている、緩衝材の温度を最高200℃程度まで上昇させる原位置人工バリア試験（HotBENTプロジェクト）でも重点的に考慮すべき項目として挙げられており、知見も得られています。一方、緩衝材のひび割れや熱履歴が緩衝材特性に与える影響については、原子力機構のこれまでの室内・原位置試験でも観測されていますが（図21）、これらの現象が緩衝材の特性に与える影響については明らかになっていません。

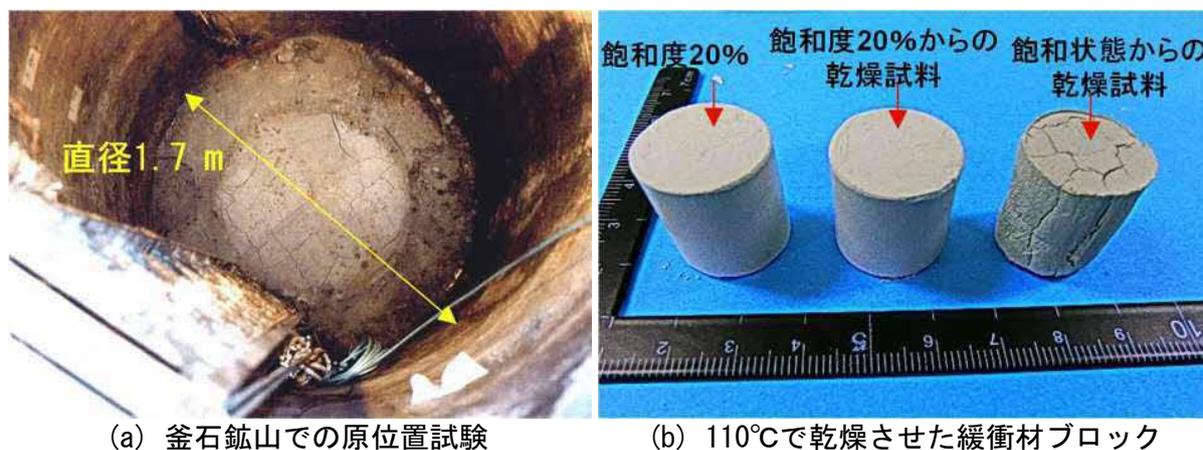


図 21 これまでの室内・原位置試験で確認された、100℃以上の温度で加熱された緩衝材に発生したひび割れ

(a) 釜石鉱山にて実施された炭素鋼の腐食に関する原位置試験（ヒーターの設定温度を100℃として257日間加熱）における、試験後の孔内の写真⁽⁹⁾。ヒーターと接していた孔底部の緩衝材にひび割れが認められます。(b) 異なる飽和度で成形した緩衝材ブロックについて、一部を110℃で加熱して乾燥させたもの⁽¹⁰⁾。飽和状態から乾燥させた試料のみ、ひび割れが認められます。

そこで、100℃を超えた熱履歴、特に緩衝材へのひび割れの発生などの現象が緩衝材の特性に与える影響を確認するための原位置試験概念について検討を行いました。具体的には、試験坑道 3 で実施されたオーバーパック腐食試験や試験坑道 5 で実施された緩衝材流出試験と同程度の工学的規模を想定し、試験坑道に掘削された深さ 1～2 m 程度、直径 0.6 m 程度の孔の中心にヒーター、その周囲に緩衝材ブロックを設置して、100℃以上の温度で加熱する試験の計画を立案しました。試験計画では、レイアウト、緩衝材の密度、飽和度などの初期条件、注水条件、加熱温度などについて検討しました。これらのうち、例えば温度については、オーバーパックの耐食性への影響に関する室内実験データ⁽¹¹⁾や令和 3 年度に実施した緩衝材の変質に関する研究事例の調査結果に基づき、人工バリア材料の高温による変質や劣化が顕在化しないと考えられる 120～140℃程度を最高温度の目安としました。熱解析の結果から、ヒーターの設定温度を 120℃および 140℃とした場合に、厚さ 0.3 m の緩衝材ブロックの外縁部が 100℃を超えるまでの期間は、それぞれ 11 日、5 日と計算され（図 22）、比較的短期間で緩衝材全体が 100℃を超えた状態に達すると推定されました。

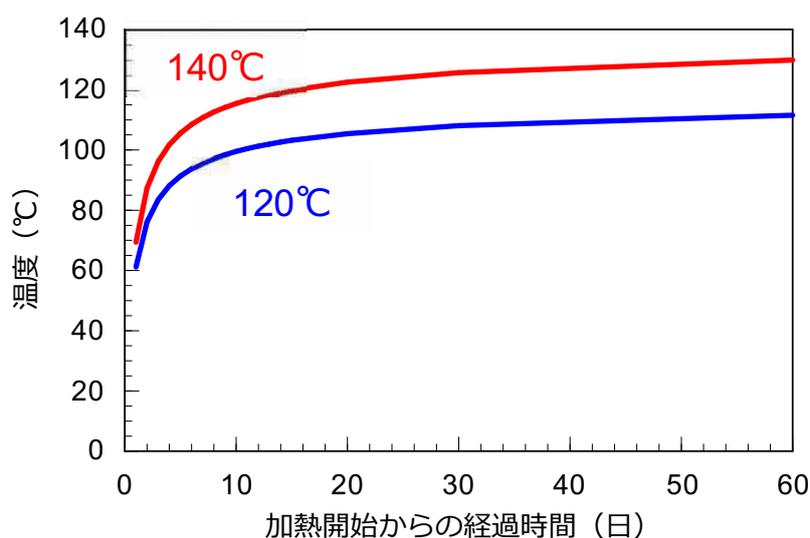


図 22 原位置試験における、緩衝材ブロック外縁部の温度変化に関する熱解析の結果

緩衝材ブロックの厚さを 0.3 m とし、中心部のヒーターにより 100℃を超える温度で加熱した場合に緩衝材ブロックの外側で生じる温度変化を解析により予測したものです。解析に用いた緩衝材および岩盤（軟岩）の物性値は、第 2 次取りまとめ⁽¹²⁾の値に基づいたものです。

令和 5 年度は、令和 4 年度に策定した試験計画に基づき、緩衝材の温度が 100℃を超えた後に徐々に低下する温度変化が緩衝材の特性に与える影響を検証するための原位置試験を開始します。試験は 350m 調査坑道の既存孔（深さ 1～2 m 程度、直径 0.6 m 程度）を利用し、中心にヒーター、その周囲に緩衝材ブロックを設置して、最高 140℃程度の温度で加熱する計画です。試験の実施にあたっては、海外での原位置試験の情報も適宜反映していきます。

6. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

6.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

6.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

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

令和 4 年度は、地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握を目的として、令和 3 年度に再検証した DI モデルと令和 2 年度に実施した水圧擾乱試験結果の比較検証を行いました。令和 3 年度に再検証した DI モデルは図 23 の近似曲線（経験式）として表され、この近似曲線は国内外の様々な堆積岩や結晶質岩中のボーリング孔の断層交差部で確認された地下水の主要な水みち割れ目の透水性と DI を表します。これらの割れ目はいずれも主要な水みち割れ目であることから、ある DI を持つ断層の透水性は断層がずれたとしてもこの近似曲線の誤差範囲（ $\pm 2\sigma$ ）を有意に超えないことが経験的に推定されます。この近似曲線と令和 2 年度に東立坑底盤から掘削したボーリング孔で実施した水圧擾乱試験の結果を比較した結果、次のことが分かりました。すなわち、同水圧擾乱試験では、幅数十 cm の断層内の水圧を 6 段階にわたって増加させ、最終的に数 mm 以上の断層のずれを発生させることができましたが⁽⁷⁾、各段階において算出した断層の透水性はほぼ変わらないことが今回の解析により分かりました。それらの透水性は図 23 の△で示され、近似曲線の誤差範囲の最大値付近（図中の $+2\sigma$ と表記した破線付近）に相当します。このように、近似曲線の誤差範囲に透水性が既に達している断層は、断層がずれたとしてもその透水性が有意に増加しないことが今回の試験により確認できました。同様なことは、既に幅数 cm 程度の小規模な断層を対象とした水圧

擾乱試験により確認できていましたが⁽¹³⁾、今回の試験により、より大規模な断層でも上記の考えを適用できることが確認できました。

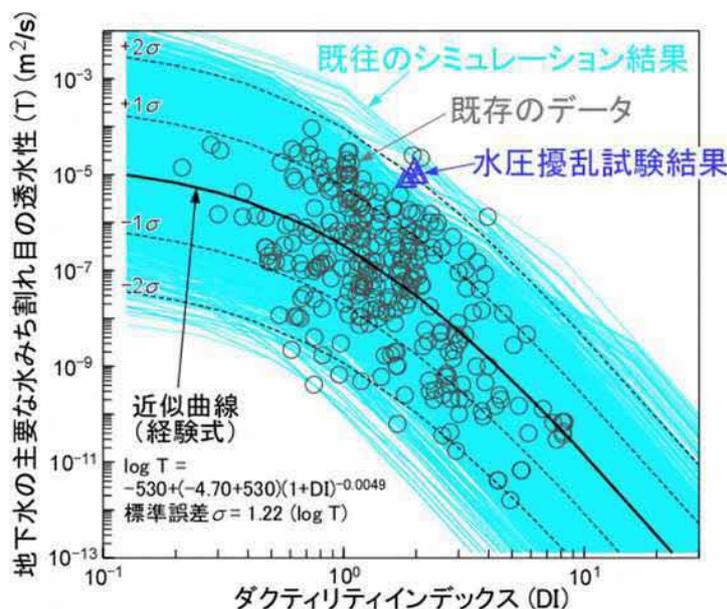


図 23 DI モデル（図中の実線と破線で示す近似曲線）と水圧擾乱試験結果の比較

図中の○は幌延、スイス、スウェーデン、フィンランド、イギリスの堆積岩や結晶質岩中のボーリング孔の断層交差部で確認された地下水の主要な水みち割れ目の透水性と DI を表します⁽¹⁴⁾。近似曲線は、これらのデータから既報の近似法により導出したもので、実線で示す曲線が代表的な推定値（データの対数平均値）を表し、破線で示す曲線はその推定誤差を表します⁽¹⁾。水色の曲線は、室内実験結果に基づくシミュレーション結果を示しており、近似曲線と同様な変化傾向を示すことから、近似曲線が妥当であることが示唆されます⁽¹⁾。△は今回解析した水圧擾乱試験の結果を表しており、6 段階にわたって水圧を上昇させた際の各段階の透水性と DI を表します。

DI を用いた透水性評価手法の信頼性向上などを目的に、これまでに得られた地下施設建設時における地下施設周辺のボーリング孔（HDB-6 孔および PB-V01 孔、図 4 参照）での水圧観測データを用いて、DI と断層/割れ目の水理学的連結性の関係に関する解析を行いました。HDB-6 孔および PB-V01 孔ではこれまでに孔内の複数の観測点で地下施設周辺の水圧を観測してきており、HDB-6 孔では稚内層で地下施設の建設に伴って数百 kPa の水圧低下あるいは数十 kPa の水圧上昇が観測されています。解析では、これらの水圧低下あるいは水圧上昇が地下施設の湧水量増加とともに顕著に生じ始めた、平成 20 年 10 月 9 日から 1 年間の水圧変化に着目し、

その水圧変化を再現できるような地層の透水性を水理・力学的な数値解析により検討しました。その結果、図 24 に示すような地層の透水性が求められ⁽²⁾、稚内層浅部 (DI が 2 未満の領域) の透水性 (約 2×10^{-8} m/s) は割れ目の無い健岩部の透水性 (1×10^{-11} m/s 程度) よりも有意に高い透水性であることが推定されました。一方で、稚内層深部 (DI が 2 以上の領域) では上位の浅部との境界から 100 m 程度の領域において $1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-9}$ m/s、それ以深の領域では健岩部の透水性に相当する $1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-10}$ m/s の透水性が推定されました。これらの透水性の深度変化は、DI が 2 未満の領域 (断層/割れ目の水理学的連結性が高い領域)⁽³⁾ から DI が 2 以上の領域 (断層/割れ目の水理学的連結性が低い領域)⁽³⁾ にかけて断層/割れ目の水理学的連結性が遷移的に変化する様子を表すものと考えられ⁽²⁾、令和 2 年度に推定した断層/割れ目の水理学的連結性が遷移的に変化する領域 (図 24 の遷移領域) の存在を裏付けています。図 24 に示す地層の透水性の妥当性は、平成 20 年 10 月 9 日から 10 年以上にわたる水圧変化の検討結果からも確認でき、その結果に従えば、今後、深度 500 m まで掘削が行われたとしても、その掘削領域 (稚内層遷移領域と深部領域) の断層/割れ目の水理学的連結性が低いために、地下施設周辺のボーリング孔の水圧はほとんど変化しないことが予想されます⁽¹⁵⁾。湧水量も一時的な増加は予想されますが、定常的な増加が発生する可能性は低いと考えられます⁽¹⁵⁾。DI と断層/割れ目の水理学的連結性の関係については、地下水の安定同位体比から推定される地下水の流れの有無との整合性も確認することができました。その結果によれば、地下水の流れが検出される領域は DI が 2 未満の領域に限られ、DI が 2 未満の領域でも、地下水を動かす駆動力 (動水勾配) が乏しいために、現在は地下水の流れが検出されないほど地下水の流れが非常に遅い領域が広く存在することなどが確認できました^(16, 17)。