

幌延深地層研究計画
令和4年度調査研究計画

令和4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3年度成果の概要および令和4年度計画の概要	6
3.1	令和3年度の成果の概要	6
3.2	令和4年度の主な業務内容	9
4.	実際の地質環境における人工バリアの適用性確認	16
4.1	人工バリア性能確認試験	16
4.2	物質移行試験	20
5.	処分概念オプションの実証	24
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	24
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	24
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	33
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	34
6.	地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証	38
6.1	水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化	38
6.1.1	地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握	38
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	43
6.2	地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験	48
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	51
8.	地下施設の管理	53
9.	環境調査	54
9.1	排水量および水質調査	54
9.2	研究所用地周辺の環境影響調査	55
10.	安全確保の取り組み	56
11.	開かれた研究	57
11.1	国内機関との研究協力	57
11.2	国外機関との研究協力	59
12.	用語集	61
	参考資料	67
	参考文献	76

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

*2：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。

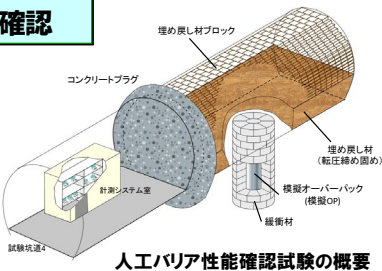
(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

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。


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特に減熱時における熱-水-応力-化学連成挙動や、物質移行現象などを計測・評価する技術の高度化を行う。



人工バリア性能確認試験の概要




人工バリア性能確認試験の解体調査のイメージ

②処分概念オプションの実証

- 人工バリアの位置・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。

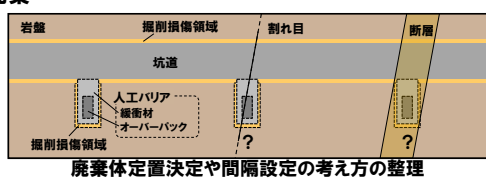


閉鎖技術オプションの整理

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

		R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
		第3期			第4期中長期目標期間					
1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認										
1.1 人工バリア性能確認試験	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	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	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準備、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	坑道掘削		掘削準備	350m調査坑道	立坑(西、東、換気)	500m調査坑道				
【維持管理】										

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

 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3年度成果の概要および令和4年度計画の概要

3.1 令和3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過程を模擬した試験の工程の1つとして、廃棄体の発熱がおさまった状態を模擬した条件での試験に移行し、緩衝材中の温度や間隙圧（隙間の空気と水の圧力の和）が低下したことを設置したセンサーにより確認しました。国際共同研究 DECOVALEX^{*}では、室内試験結果を対象にした解析を実施し、各解析コードでの緩衝材の初期飽和度の取り扱いの違いで、膨潤圧や膨潤変形量の解析結果に違いが見られることが分かりました。また、空気の移動などを考慮した熱－水理－力学連成現象を把握するために、ベントナイト^{*}に温度勾配をかけた条件での室内試験を行い、連成解析コードを検証するためのデータを取得しました。人工バリアの試験体を取り出すための試験施工として、試験孔部に設置した人工バリアと埋め戻し部に設置したプラグや埋め戻し材の解体を行った結果、緩衝材の飽和度により最適な解体手法が異なること、事前に樹脂を注入することで埋め戻し材、コンクリート、岩盤の境界面を一体として採取できることなどを確認しました。

物質移行試験では、掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験を行い、掘削損傷領域の物質移行特性を評価するためのデータ取得を行いました。また、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、原位置試験のためのボーリング孔掘削および試験装置の設置を行い、地下水の水圧・水質や微生物群集などのデータを取得しました。さらに、ブロックスケール（数m～100m規模）を対象としたトレーサー試験を実施した結果、稚内層深部の物質移行概念モデルを検討する上で有益な情報を得ました。

(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8か月の暴露期間における大気条件下と湿潤条

件下での中性化^{*}の程度の違いなどを把握しました。また、坑道開放条件での坑道周辺岩盤における長期変化を評価するために、岩盤の掘削損傷領域の応力状態の違いによる透水性^{*}の変化について室内試験を実施した結果、加える圧力が増加するにつれて亀裂を含んだ岩石コアの透水性が低下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、埋め戻し材の変質挙動に関する解析の結果、埋め戻し材が変質する可能性は小さいことが示唆されました。また、ベントナイトの流出挙動に関する室内試験に着手するとともに、埋め戻し材の膨潤変形挙動に関する室内試験を継続し、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、坑道においてベントナイトの吹付け試験を実施し、吹付けの手順や吹付け材料の管理方法を確認するとともに、吹付け後の施工品質を把握しました。掘削損傷領域の調査技術の高度化として、岩盤中の連続性の高い割れ目を検知するために開発した試験装置の適用性を確認するとともに、坑道周辺の掘削損傷領域の経時変化を理解するための解析コードを開発しました。さらに、ボーリング孔を閉塞する際の方法として、ベントナイトブロックを孔内に設置する方法について具体的な手順について検討し、その手順を室内の模擬ボーリング孔で確認しました。

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として、緩衝材の流出挙動に係る試験を継続しました。緩衝材ブロックと岩盤の間に隙間がある施工方法については、湧水量の多い条件を含めた幅広い条件での室内試験により、緩衝材の流出挙動を確認しました。また、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長期的な流出挙動を確認するための試験を開始し、緩衝材の流出量などの計測に着手しました。

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として、緩衝材の温度が100℃を超えた状態で発生しうる現象に関する試験などの事例を調査しました。一例として、緩衝材中のスメクタイト（ベントナイトに含まれる膨潤性の粘土鉱物）のイライト（雲母鉱物）化につい

では、およそ 130℃までは 1,000 年後の緩衝材の変質割合が小さいと推測されました。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を入手し、データを整理しました。

(3) 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握やダクティリティインデックス (以下、DI)[※]を用いた透水性評価手法の信頼性向上などを目的に、DI モデルを再検証するためのシミュレーションや既存の水圧擾乱試験[※]結果を用いた比較検証を行いました。その結果、これまで確認されていた地下水の主要な水みちとなる割れ目の透水性と DI の間の相関関係のメカニズムを明らかにするとともに、それに関わる新たな DI の経験式[※]を構築しました。また、既往の水圧擾乱試験で認められていた割れ目の水理学的連結性に関する特異的な現象について、複数のケースを仮定したシミュレーションを行うことにより、一定の解釈を与えることができ、割れ目の水理学的連結性と DI の間に密接な関係があることを確認しました。

地下水の流れが非常に遅い領域 (化石海水[※]領域) を調査・評価する技術の高度化においては、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妥当性を確認するためのボーリング調査を実施し、声問層を対象とした地質環境特性を把握しました。また、既存の電磁探査データを加えて比抵抗分布の再解析を行い、より深い深度での解析精度が向上する結果を得ました。

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、坑道埋め戻し後の掘削損傷領域の透水性を推定するための手法の整備に向け、過年度に実施した樹脂注入後の掘削損傷領域の割れ目試料の観察結果を確認するためのシミュレーションを行いました。その結果、割れ目の開口幅とせん断[※]変位量 (割れ目に沿ったずれ幅) の間にほとんど相関性が認められないという観察結果と整合的なシミュレーション結果を得ました。これにより、地下の原位置相当の圧力条件では坑道埋め戻し後に掘削損傷領域の割れ目がずれても掘削損傷領域の透水性はほとんど増加しない

ことが確認できました。また、掘削損傷領域の割れ目を対象に実施した既往の注水試験のデータを検討した結果、緩衝材や埋め戻し材の膨潤圧が掘削損傷領域の透水性に与える影響を今後検討するのに有用なデータが得られました。

(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 2 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^{*7}の協力のもと、幌延国際共同プロジェクト（Horonobe International Project : HIP）を立ち上げるべく、準備会合への参加機関を募集し、準備会合にて、共同研究の内容や実施分担などについて議論を行いました。

以上のように、令和 3 年度は計画していた調査研究を進めて、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 3 年度の調査研究成果報告書に取りまとめます。

3.2 令和 4 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、人工バリア性能確認試験において、廃棄体の発熱がおさまった状態を模擬した条件での試験を継続し、データを分析、評価するとともに、国際共同研究 DECOVALEX にて人工バリア性能確認試験で取得したデータを対象とした連成解析結果の比較検証を行います。令和 3 年度に実施した、人工バリ

*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。

アの試験体を取り出すための試験施工の解体調査の結果を整理し、人工バリア性能確認試験の解体調査計画に反映するために適用可能な手法や注意点などの取りまとめを行います。また、物質移行試験について、掘削損傷領域における物質の移行挙動の解析手法の検討を行うとともに、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す。さらに、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ます。

「処分概念オプションの実証」については、搬送定置・回収技術の実証として、地下環境におけるコンクリートの劣化に関する試験、分析を継続するとともに、坑道閉塞後の坑道周辺岩盤の環境変化の予測解析を行います。閉鎖技術の実証として、埋め戻し材の安全機能を変化させる要因となりうるベントナイトの流出挙動に関する室内試験を継続し、その発生条件の検討を行います。膨潤変形挙動に係るデータの拡充を図るため、緩衝材と埋め戻し材の力学的相互作用を考慮した室内試験を実施するとともに、埋め戻し材の設計評価に資するデータの取りまとめを行います。工学規模試験で吹付けたベントナイトのサンプリング調査を実施し、施工品質を詳細に確認します。掘削損傷領域の経時変化を評価するとともに、高度化した物理探査技術の評価を行います。また、ボーリング孔を閉塞する原位置試験を行い、閉塞方法の適用性評価を行います。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として、緩衝材の流出試験を継続し、緩衝材の流出に関する長期的な挙動を確認します。高温度（100℃超）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験として、令和3年度までに実施した先行研究の事例調査を基に、100℃を超えた状態で生じうる現象などのシナリオを整理し、室内あるいは原位置試験の計画を策定します。また、それに資する海外での原位置試験に関する情報などを引き続き入手します。

「地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証」については、地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握やDIを用いた透水性評価手法の信頼性向上などを目的に、過年度に実施した水圧擾乱試験の結果の解析や、断層/割れ目の水理学的連結性に関する解析を、令和3年度に再検証したDIモデルを用いて行います。地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）

を調査・評価する技術の高度化として、化石海水領域の三次元分布を確認するためのボーリング調査を継続するとともに、物理探査、ボーリング調査、解析の一連の調査・解析について、化石海水の三次元分布を推定する際の最適な方法を整理します。また、令和3年度に再検証したDIモデルを用いて、掘削損傷領域の割れ目を対象に実施した既往の注水試験のデータを詳細に解析し、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を定量的に評価する手法を整備します。

また、令和2年度以降の必須の課題への対応に必要なデータ取得を実施します。

地下施設の管理においては、令和5年度に着工を予定している掘削工事に向け、必要となる設備の整備を行うとともに、地下施設の維持管理（設備運転や保守点検など）を継続します。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、作業者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、研究を進めていきます。また、新たな国際プロジェクトとして、幌延国際共同プロジェクト (HIP) の実施に向けた準備会合において、準備会合への参加機関、OECD/NEA および原子力機構の間で協議・調整を進め、最終的にプロジェクトへの参画を決定した機関との間で共同研究契約を締結する予定です。

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

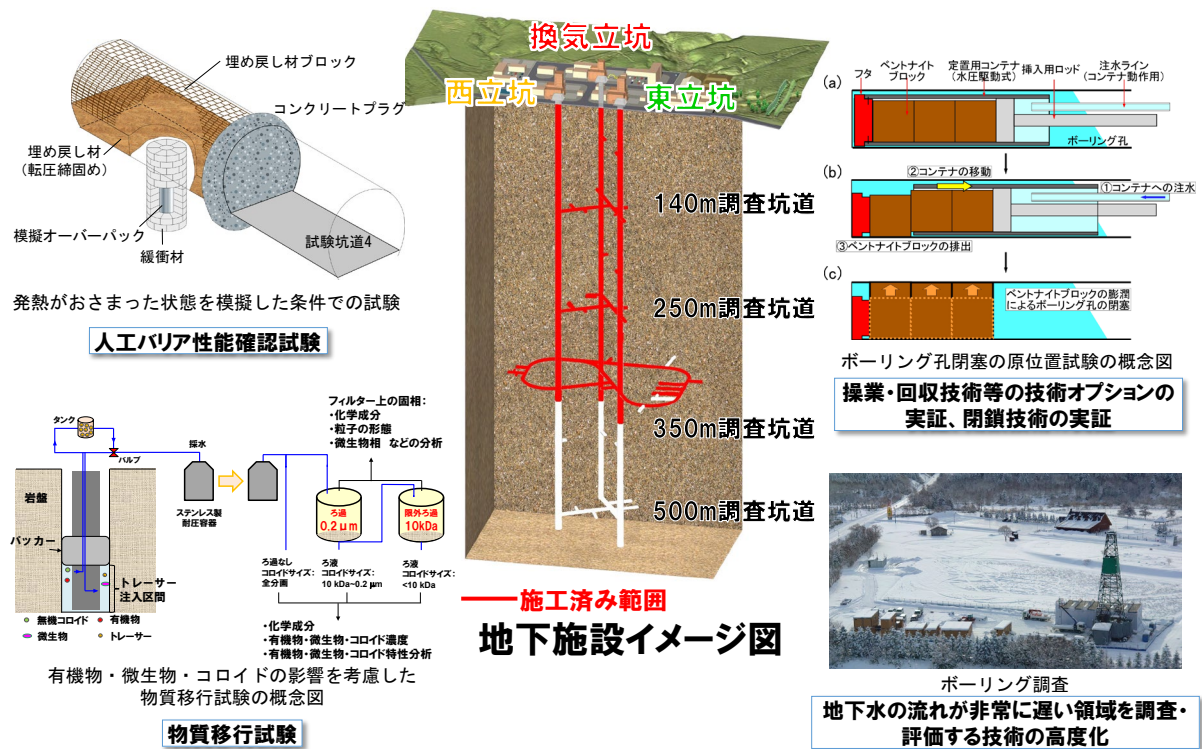


図2 令和4年度の主な調査研究

表 2 令和4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	発熱がおさまった条件での人工バリア性能確認試験の継続、国際共同研究DECOVALEXによる連成挙動の共同解析準備、気相を考慮した熱-水理-力学連成挙動に関する室内試験結果の整理・事前解析結果との比較・検証、人工バリアの試験体を取り出すための試験施工の解体調査結果の整理	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、稚内層深部のブロックスケールを対象としたトレーサー試験結果の解析評価	研究所用地、地下施設など
	処分概念オプションの実証	人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験	地下環境におけるコンクリートの劣化に関する試験・分析を継続、閉鎖システム（埋め戻し材やプラグなど）に関する基盤情報の整備を目的とした解析検討、閉鎖技術を実証するための工学規模試験結果の整理および室内試験などの継続、緩衝材流出の抑制に関する試験	研究所用地、地下施設など
		高温度（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験	100℃を超えた状態で生じる現象などのシナリオの整理、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、化石海水領域の三次元分布を把握するためのボーリング調査の継続、化石海水領域の三次元分布の推定に至る手法の取りまとめ、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
		地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験	緩衝材や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を評価する手法の整備	研究所用地、地下施設など
令和2年度以降の必須の課題へ対応するためのデータ取得		地質構造に関する調査、分析、岩盤の水理に関するデータ取得・モニタリング、分析、解析、地下水の地球化学に関する分析、岩盤力学に関するデータ取得、解析、地震観測、および計測手法の妥当性評価と必要に応じた調査技術・機器の改良など	研究所用地、地下施設、HDB-1～11孔、上幌延地区、浜里地区など	
地下施設の管理		掘削工事に向けた設備の整備、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	

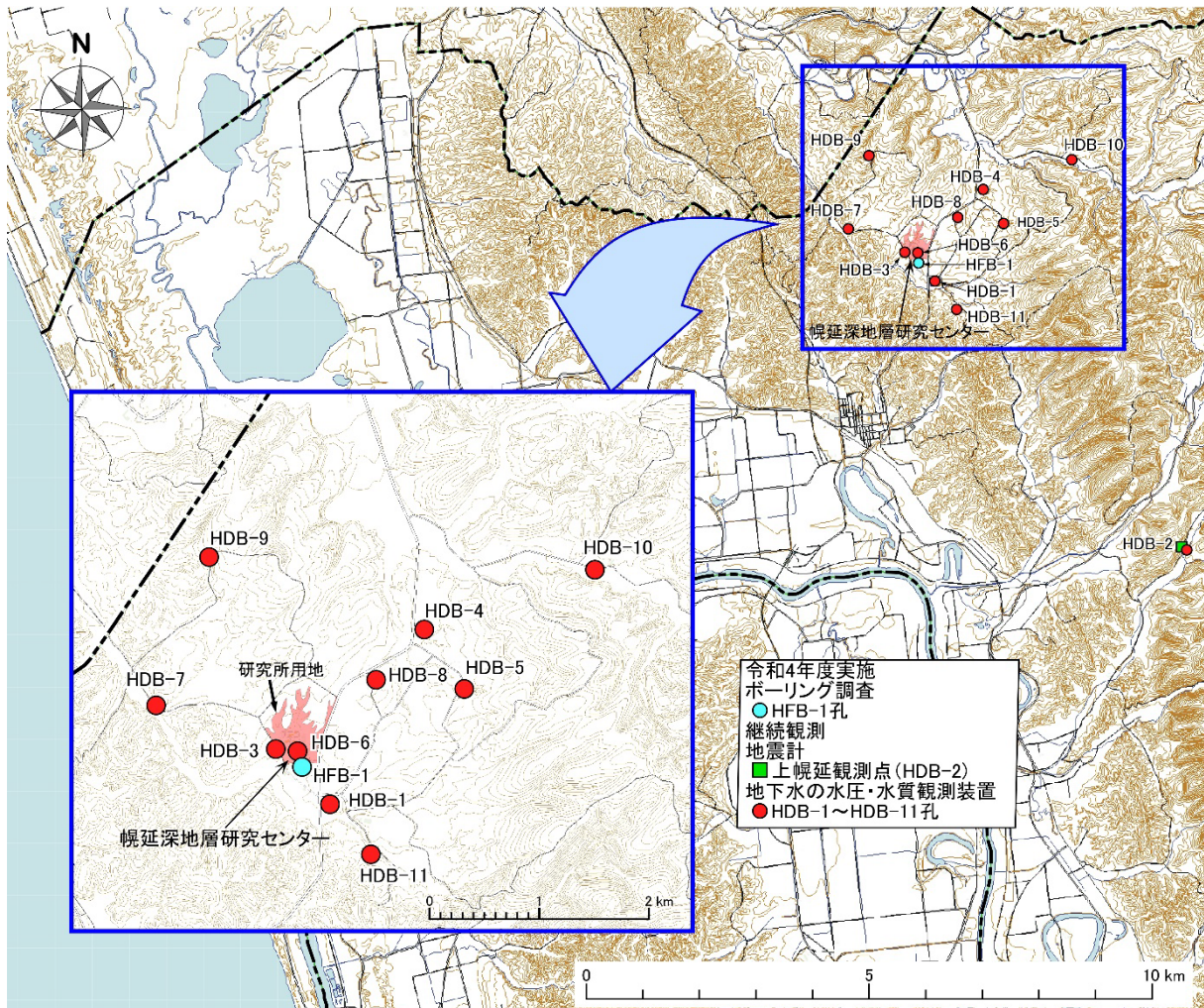


図 3 ボーリング孔の位置および観測装置の設置場所
 国土地理院の基盤地図情報（基本項目）を加工して作成

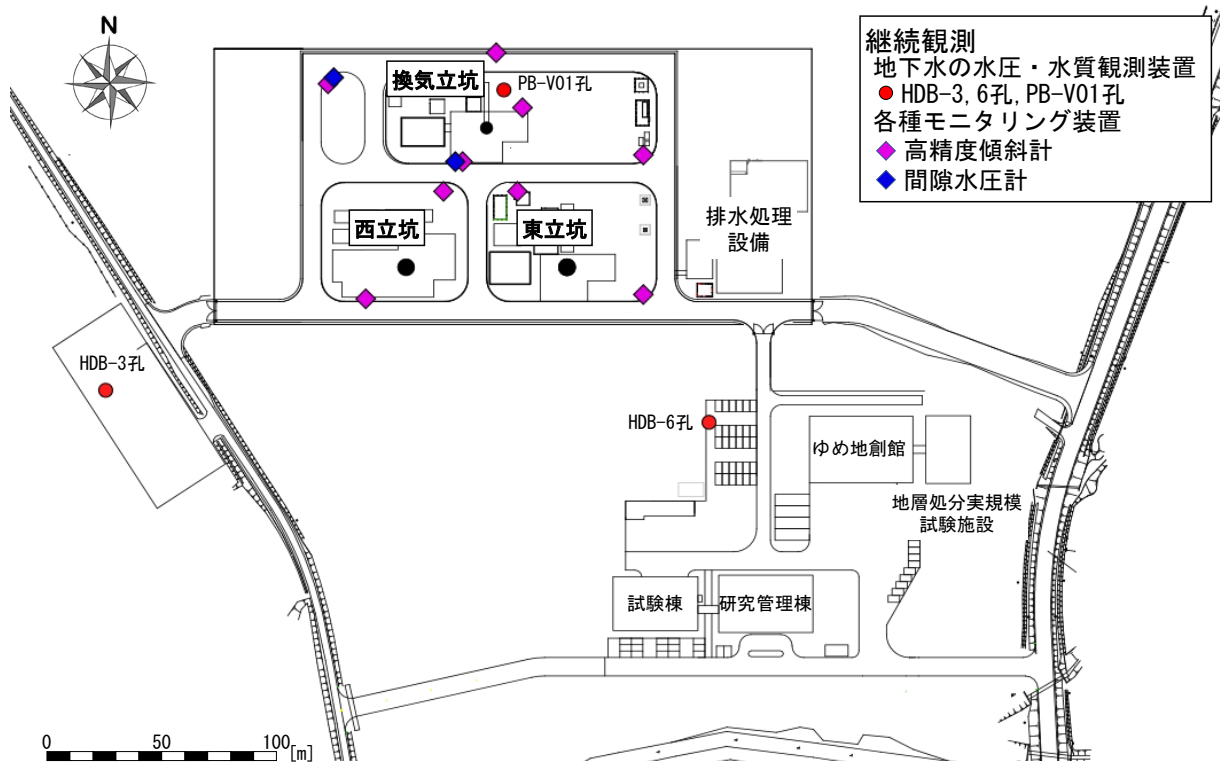
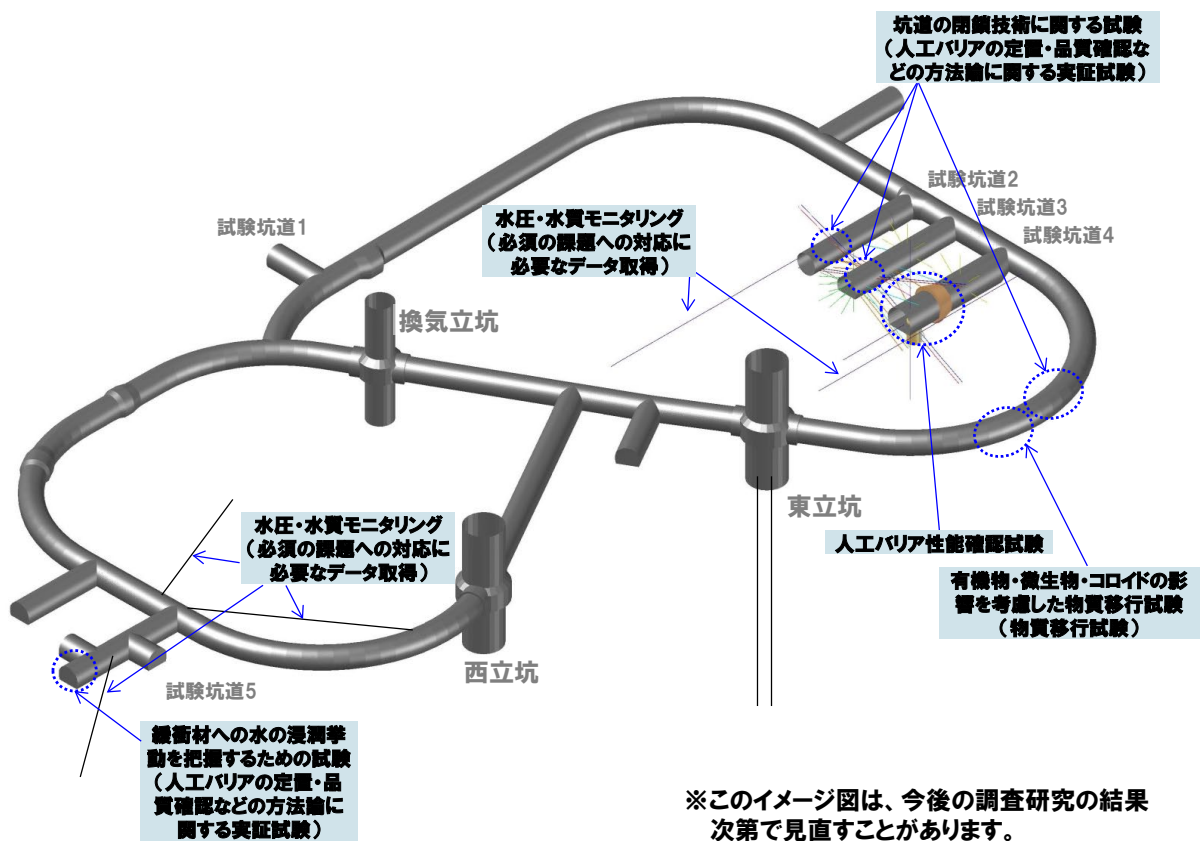


図 4 研究所用地における主な施設と観測装置の配置



※このイメージ図は、今後の調査研究の結果次第で見直すことがあります。

図 5 350m 調査坑道における主な調査研究の実施場所

4. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

4.1 人工バリア性能確認試験

令和 2 年度以降は、ガラス固化体設置直後の廃棄体の発熱過程に加えて、減熱過程を模擬した原位置試験データや解体調査により得られるより詳細なデータに基づく熱－水理－力学－化学連成現象^{*}の評価モデルの高度化が課題となります。そのため、人工バリア性能確認試験で設置しているヒーターの温度を下げた試験（減熱過程を模擬した原位置試験）を行い、熱－水理－力学－化学連成現象に係るデータを取得します。また、減熱試験終了後は解体調査により、人工バリア、埋め戻し材、コンクリート、周辺岩盤やそれらの境界面のサンプリングや分析を行います。人工バリア性能確認試験の解体調査については、適用する施工方法の検証を行うために事前に試験施工を行います。設置したセンサーや解体調査により得られるデータを基に、熱－水理－力学－化学連成解析を行い、評価モデルの高度化や適用性の確認を行います。このような人工バリア周辺で起こる現象の理解は、地層処分後の数万年以上の間の安全評価における初期状態の把握やオーバーパックの寿命を評価する際の人工バリア周辺の環境条件の設定に役立ちます。

令和 3 年度は、人工バリア性能確認試験（図 6）について、令和 2 年度から開始した減熱過程を模擬した試験の工程の 1 つとして、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）での試験に移行しました。令和 2 年度にヒーターの設定温度を約 90℃から 50℃に低下させた際と同様に、設置してあるセンサーにより緩衝材中の温度や間隙圧が低下したことを確認しました（図 7）。加えて、国際共同研究 DECOVALEX では、緩衝材の浸潤試験、膨潤圧試験、膨潤変形試験などの既存の室内試験結果を対象に、令和 2 年度に設定した解析条件を基に解析を実施し、異なる解析コードによる解析結果の違いを比較しました。その結果、各解析コードでの力学モデル（弾性モデルと弾塑性モデルの違い）や膨潤応力式における初期飽和度の取り扱いにより、緩衝材の膨潤圧や膨潤変形量の解析結果に違いが見られることが分かりました。また、空気の移動などを考慮した熱－水理－力学連成挙動を把握するために、ベントナイトに温度勾配をかけた条件での室内試験を行い、

ベントナイト中の温度、水分量、間隙圧の経時変化などの連成解析コードを検証するためのデータを取得しました。

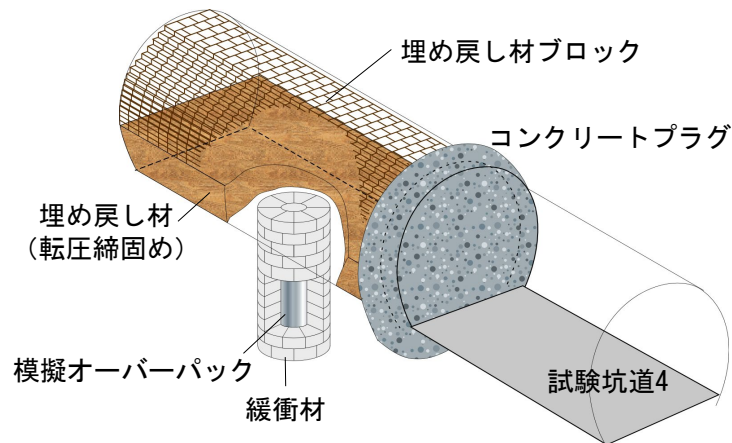
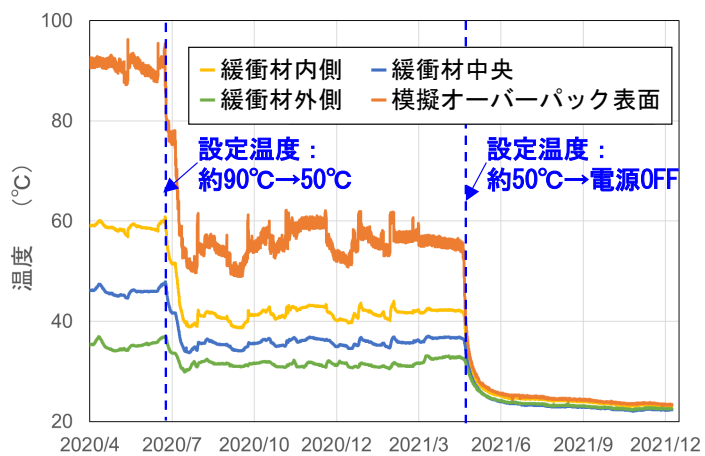
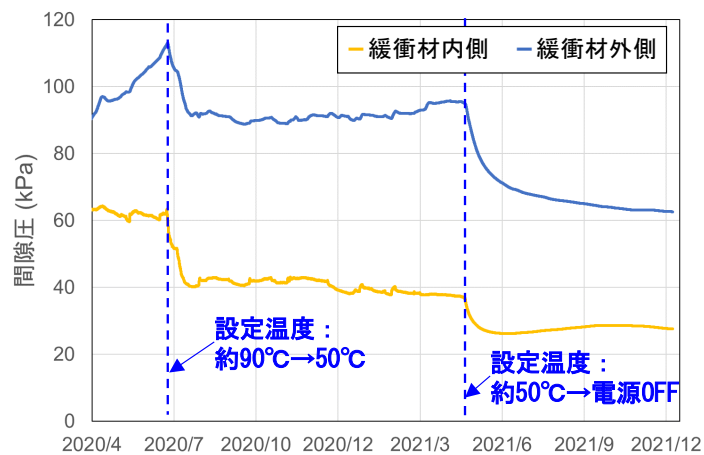


図 6 人工バリア性能確認試験の概念図



(a) 温度



(b) 間隙圧

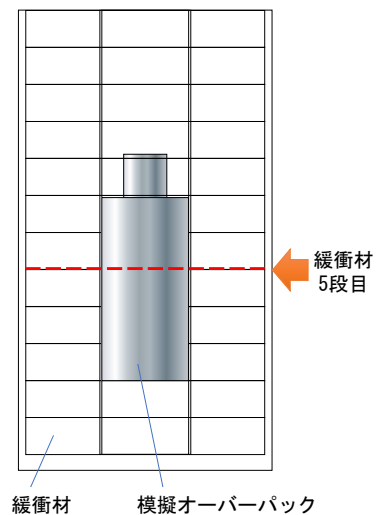


図 7 緩衝材 5 段目の計測データ

解体調査に先立って実施している試験施工（図 8）では、令和 2 年度試験孔部に設置した人工バリアと埋め戻し部に設置したプラグや埋め戻し材の解体を行いました。その結果、緩衝材の飽和度により最適な解体手法が異なること、引き上げ用の楊重設備を整備することで模擬オーバーバックとその表面の緩衝材の接触面を維持したまま一体で取り出し可能であること、事前に樹脂を注入することで埋め戻し材、吹付けコンクリート、岩盤の境界面が一体化された状態で採取できることなどを確認しました（図 9）。

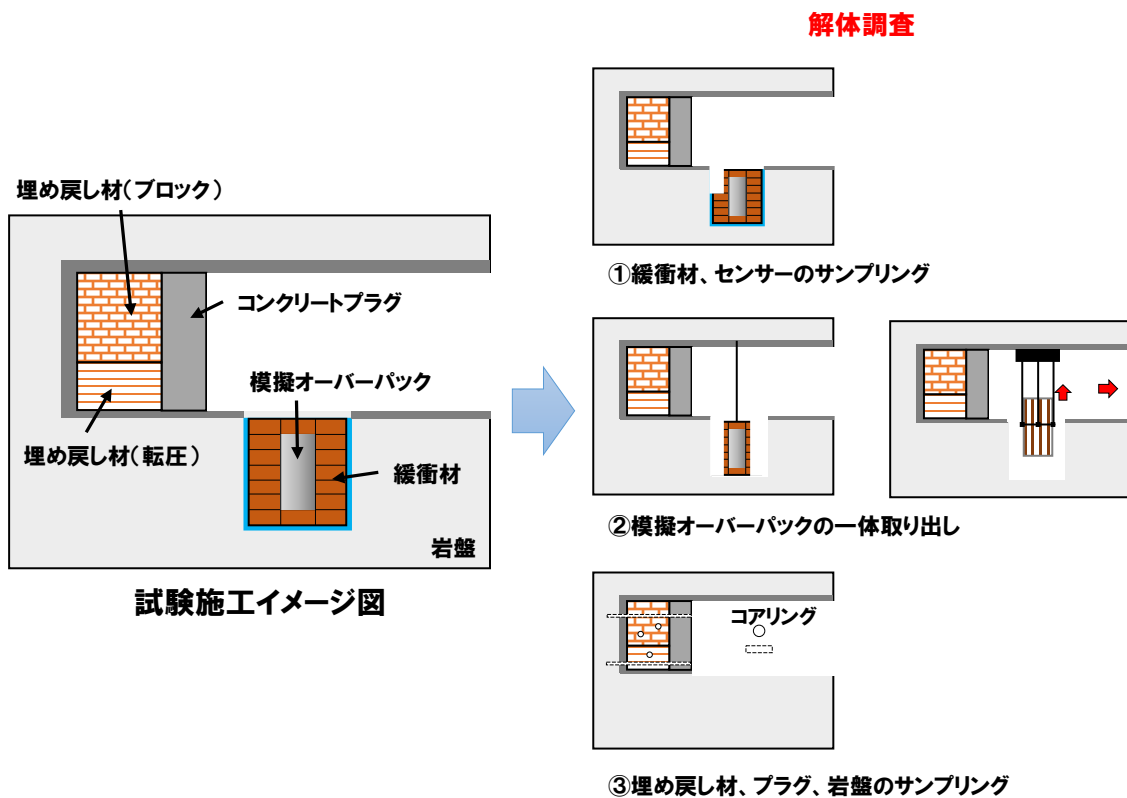


図 8 人工バリア解体試験施工の概念図

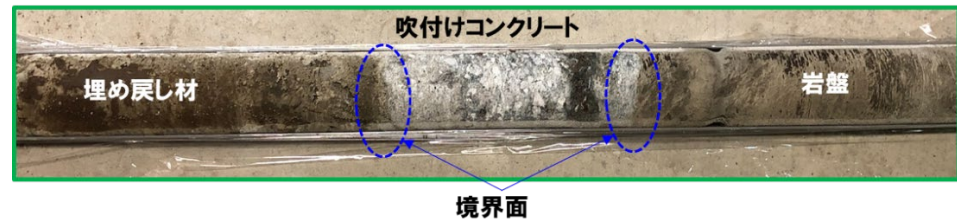


図 9 人工バリア解体試験施工の解体状況（試験孔部）

令和 4 年度は、廃棄体の発熱がおさまった状態を模擬した条件での試験を継続します。連成解析については、国際共同研究 DECOVALEX において令和 3 年度に実施した各国の解析結果の比較検証によって明らかになった課題を整理し、人工バリア性能確認試験で取得したデータを対象とした連成解析結果の比較検証を行います。

また、空気の移動などを考慮した熱－水理－力学連成挙動については、令和 3 年度に実施した室内試験や連成解析の検証結果を基に、連成現象の把握や解析コードの検証を行います。

令和 3 年度に実施した人工バリア解体試験施工の解体調査結果を整理し、人工バリア性能確認試験の解体調査計画に反映するために適用可能な手法や注意点などの取りまとめを行います。

4.2 物質移行試験

令和 2 年度以降は、掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立、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 10）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。

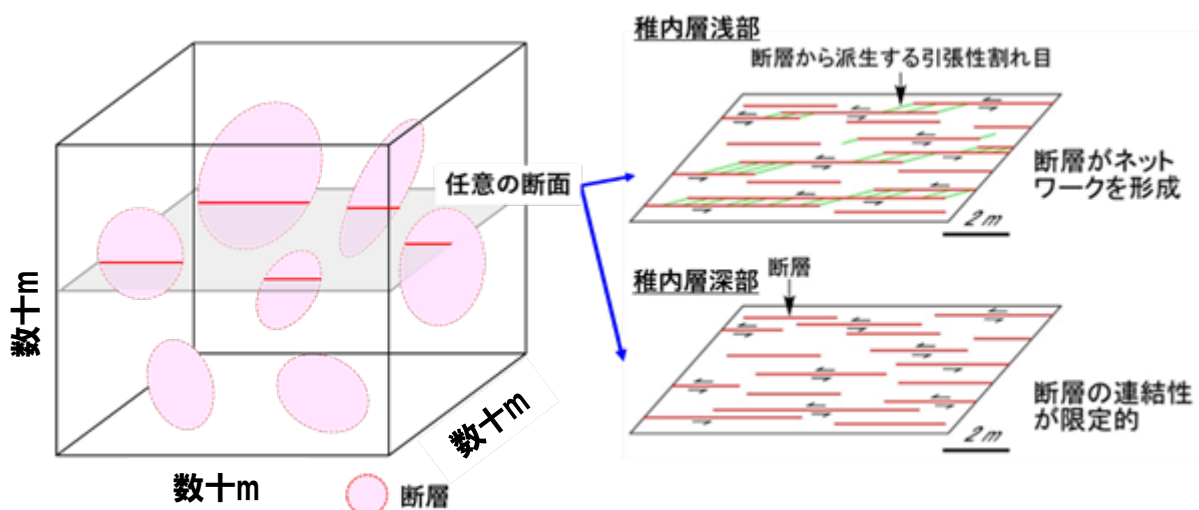


図 10 ブロックスケールにおける物質移行のイメージ

令和3年度は、試験坑道3の既存孔を利用した追加のトレーサー（非収着性）試験を行い、掘削損傷領域の物質移行特性を評価するためのモデル化/解析手法を検討するためのデータを拡充しました。その結果、トレーサー試験場所の周辺では、掘削損傷領域の割れ目だけではなく、試験坑道4の力学プラグと岩盤の境界、底盤コンクリートと岩盤の境界などの経路も介して、トレーサーが移行している可能性が示唆されました。

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、350m調査坑道において原位置試験を実施するためのボーリング孔の掘削ならびに試験装置の設置を行い、地下水の水圧や水質、微生物群集などの基礎的なデータを取得しました。

また、有機物（特に、元素と結合しやすいと考えられるフミン酸^{*}）の存在が地下水中の元素の存在状態に与える影響を評価するための試験を、原位置の試料を利用して実施しました。350m調査坑道から採取した地下水に複数の非放射性的希土類元素^{*}（セリウム（Ce）、ネオジウム（Nd）、ユウロピウム（Eu）およびホルミウム（Ho））を添加し、その後、異なるサイズのフィルターで限外ろ過^{*}を行いました。希土類元素のみを添加した場合と、希土類元素に加えて地下水から抽出したフミン酸を添加した場合を比較したところ、10 kDa^{*}のろ過フィルターサイズまでは、フミン酸を添加した場合の方がろ過後の希土類元素濃度が高くなりました（図11）。この結果から、フミン酸との錯形成により希土類元素の溶解度が上昇したこと、およびフミン酸と錯形成した希土類元素はコロイドとして存在していることが示唆されます。物質移行を検討する上で、有機物およびそのコロイドと元素との錯形成が重要であることが確認できました。

さらに、令和2年度に物質移行試験装置を設置した、東立坑底盤（深度380 m）からのボーリング孔を利用し、ブロックスケールにおける物質移行特性を評価するためのトレーサー試験を実施しました。その結果、揚水孔で観測されたトレーサー濃度は投入濃度に対して最大でも0.3%と非常にわずかでした（図12）。これは稚内層深部の断層における移行経路の水理的連結性は限定的である可能性を示唆します。この成果は稚内層深部の物質移行概念モデルを検討する上で有益な情報となります。

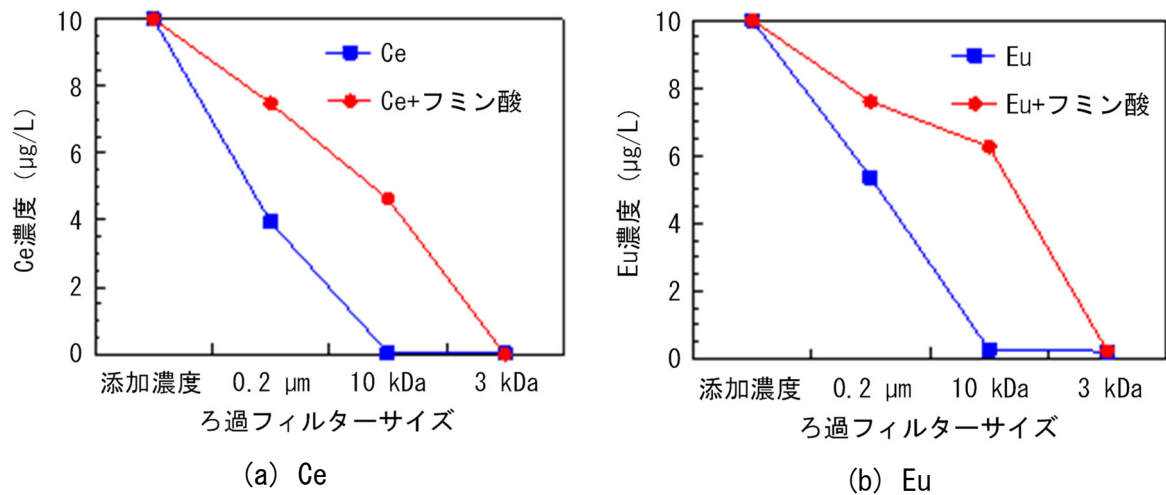


図 11 幌延の地下水（深度 350 m）に対する希土類元素およびフミン酸の添加試験

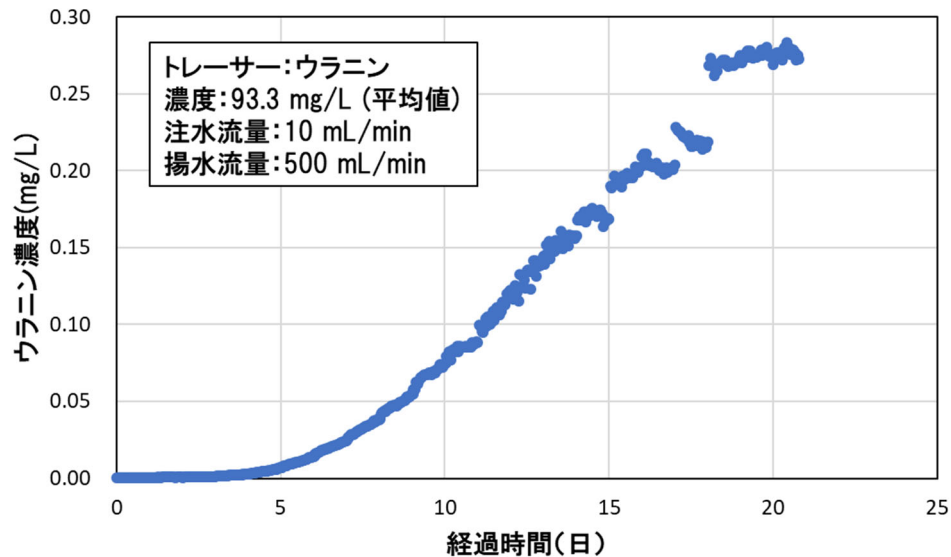


図 12 ウラニン*を用いたトレーサー試験結果

令和 4 年度は、令和 3 年度に実施したトレーサー試験結果に基づき、掘削損傷領域に分布する割れ目を介した物質の移行挙動のモデル化/解析手法の検討を行うとともに、必要に応じて水理・物質移行に関する追加の情報を取得します。また、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す（図 13）。ブロックスケールにおける遅延性能評価手法の整備に関しては、稚内層深部に分布する断層を介した物質の移行経路の水理的連結性を検証するために、令和 3 年度に実施したブ

ロックスケールのトレーサー試験の結果について解析評価を行います。また、稚内層深部で整備する遅延性能評価手法の比較検証の観点から、声間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す。

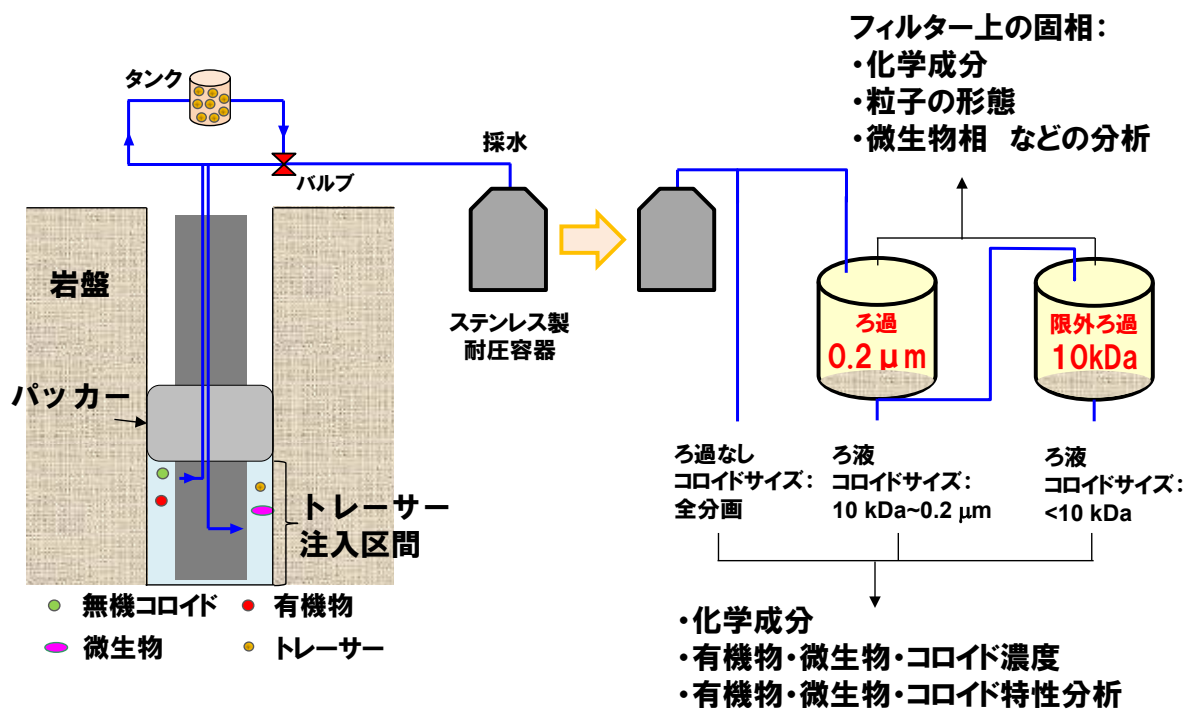


図 13 有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行試験の概念図

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

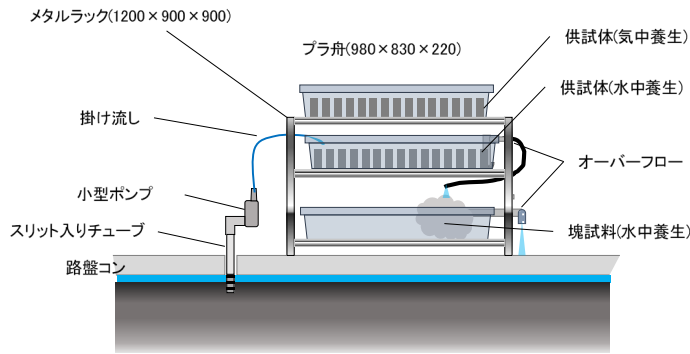
人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築については、人工バリア性能確認試験において、注入する地下水の圧力や量を増加させ、緩衝材に十分に水を浸潤させた状態で得

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3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14）。令和3年度は、定置から約8か月が経過した時点で一部の試験体を回収し、物性や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3mmの深さまで中性化が進んでいるのに対し、湿潤条件下に定置した試験体では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15）。

また、令和2年度から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*を実施しています。令和3年度は、これらの解析で使用する、岩盤の掘削損傷領域の応力状態の変化による透水性の変化に関するパラメータを取得するため、人工的に亀裂を発生させた岩石コアを用いて等方的に圧力を加えながら透水試験を実施しました。その結果、加える圧力が増加するにつれて亀裂を含む岩石コアの透水性が低下することを定量的に把握しました（図16）。また、解析条件の妥当性を評価するために、解析領域の広さを変化させた解析や坑道壁面からの水分の蒸発の有無を考慮した解析を実施し、境界条件の設定の違いによる影響を評価しました。その結果、坑道壁面からの水分の蒸発の有無は、岩盤内部の長期的な飽和度の変化への影響が小さいことが分かりました（図17）。

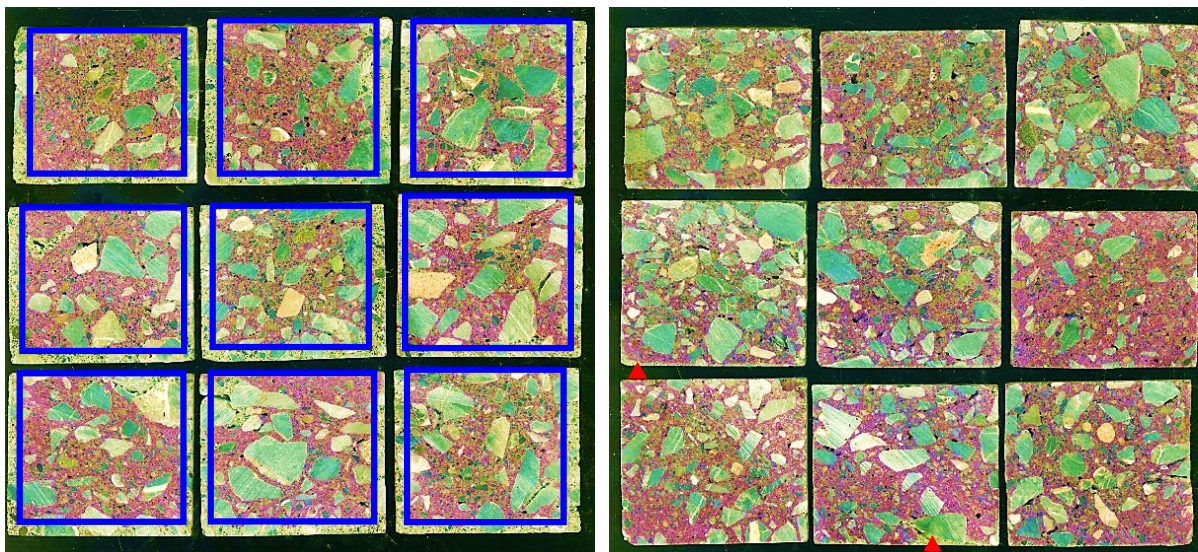


(a) 定置装置の概念図



(b) 定置状況

図 14 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（青色線の外側）
：表面から約 3 mm

(b) 湿潤条件下

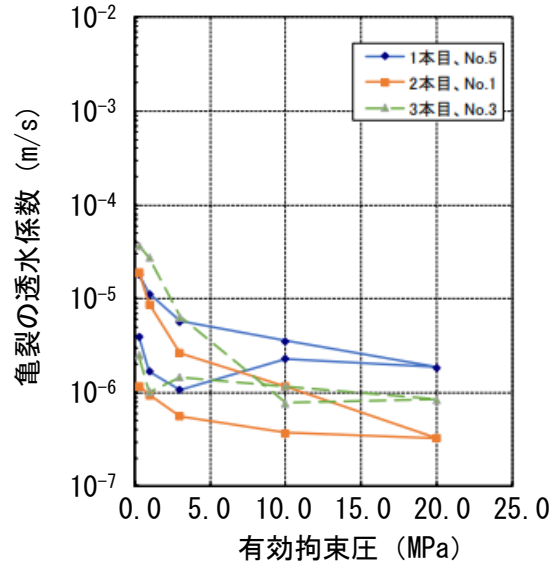
呈色のみられない領域（▲）
：ごく一部に限定

図 15 コンクリート試験体の変質領域

試験体の半割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。

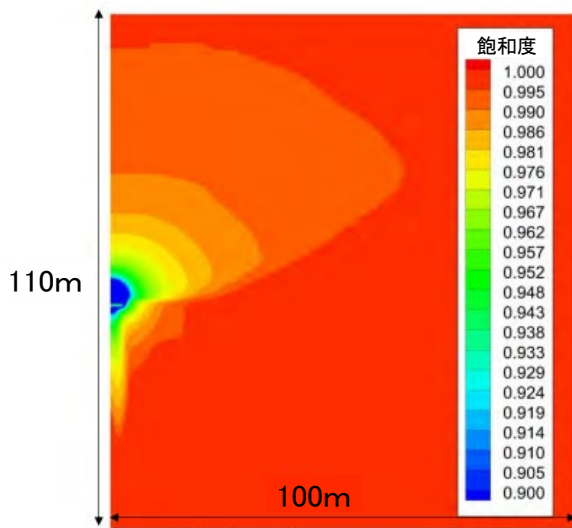


(a) 人工的に亀裂を発生させた岩石コア試料

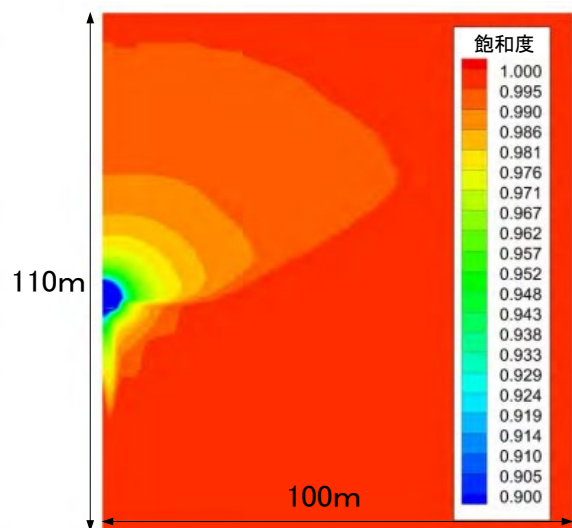


(b) 透水係数

図 16 封圧条件下における透水試験



(a) 水分の蒸発を考慮していないケース



(b) 水分の蒸発を考慮したケース

図 17 坑道掘削後 1,000 年における飽和度分布

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は、コンクリート成分の溶出に起因する埋め戻し材の変質が、坑道周辺の岩盤（掘削損傷領域を含む）、坑道支保工および埋め戻し材との相互作用を考慮した上で、顕在化するかどうかについて水理・化学連成解析を行いました。その結果、岩盤中や坑道支保工内の間隙あるいは坑道埋め戻し部の間隙が、溶出したコンクリート成分に起因する二次鉱物の沈殿により早期に閉塞することから、埋め戻し材の変質を

引き起こす要因の 1 つである地下水の供給が抑制され、埋め戻し材が長期にわたって変質する可能性は小さいことが示唆されました。また、埋め戻し材の性能を変化させる要因となりうるベントナイトの流出挙動の発生条件を検討するための室内試験に着手しました。

②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て実施しました。その結果から、緩衝材と埋め戻し材の力学的な相互作用を考慮した膨潤変形挙動の評価に必要な膨潤変形量と膨潤圧のデータを整理しました。また、緩衝材と埋め戻し材に含まれるベントナイトに吸収される水の水質がこれらの膨潤変形挙動に及ぼす影響について検討を行い、塩分濃度の低い水の場合に緩衝材の膨潤変形量が大きくな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 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 2 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を確認しました。また、試験坑道 2 を用いて、ベントナイトの吹付けによる止水プラグの施工方法について工学規模試験を実施しました（図 18）。工学規模試験では、坑道側面の岩盤を掘削して設けた切欠き部に対してベントナイトの吹付けを行い、吹付けの手順や吹付け材料の管理方法を確認するとともに、吹付け後のベントナイトの乾燥密度に生じるばらつきなどの施工品質を整理しました。

④掘削損傷領域の調査技術の高度化については、令和 3 年度までに 350m 調査坑道に整備した実験サイトにおいて、掘削損傷領域の物性値を調査するボーリングコア採取および室内試験を行いました。また、岩盤中の連続性の高い割れ目の検知を目的として、グラウト注入前後の透水試験および開発した試験装置による高精度な計測を行い、その適用性を確認しました（図 19）。プラグを施工する際、掘削損傷領域中の割れ目の連続性や分布を把握することは、プラグの厚さや深さなどを設計する上で重要な知見となります。その他に、坑道周辺の掘削損傷領域の経時変化の理

解を目的とした物理探査の解析コードを開発するとともに、開発した解析コードに必要な岩石の物性値のデータを室内試験で取得しました（図20）。物理探査によって取得される比抵抗および弾性波（P波）速度の分布に対して、室内試験で取得される飽和度変化に伴う物性値の変化を当てはめながら解釈することで、不均質構造の原因を特定できることが期待できます。

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、ボーリング孔にベントナイトブロックを設置する方法を対象に、ボーリング孔の閉塞に係るブロックの特性として膨潤状況や閉塞後の透水性を把握するための室内試験を実施しました。また、令和2年度に抽出・整理した技術的な課題に基づいてボーリング孔内にベントナイトブロックを設置する具体的な手順について、既往の調査⁽¹⁾を基に検討し、その手順を室内の模擬ボーリング孔で確認しました。

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間に隙間がある施工方法については、湧水量の比較的多い条件（約1.0 L/min）での試験を想定していましたが、自然の地下水位の低下により十分な湧水量を試験孔で確保することが難しくなりました。そこで、湧水量の多い条件を含めて、幅広い条件を想定した室内試験データを取得し、湧水量による緩衝材の流出挙動への影響を確認しました。また、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ついては、平成31年度に実施した1か月程度の流出試験により、隙間に何も充填しない場合と比較して緩衝材の流出濃度が少ない状態が維持されることが確認されました。この緩衝材の流出挙動の長期的な継続性や、孔内湧水量と緩衝材流出量の関係を確認するため、数か月に及ぶ長期的な緩衝材の流出試験を開始し、排水中の緩衝材の量、緩衝材に地下水が膨潤して発生する膨潤圧、試験孔にかかる水圧などの計測に着手しました。



(a) 坑道側面に設けた切欠き部



(b) 吹付けの実施状況

図 18 ベントナイトの吹付けによる施工方法の工学規模試験実施状況

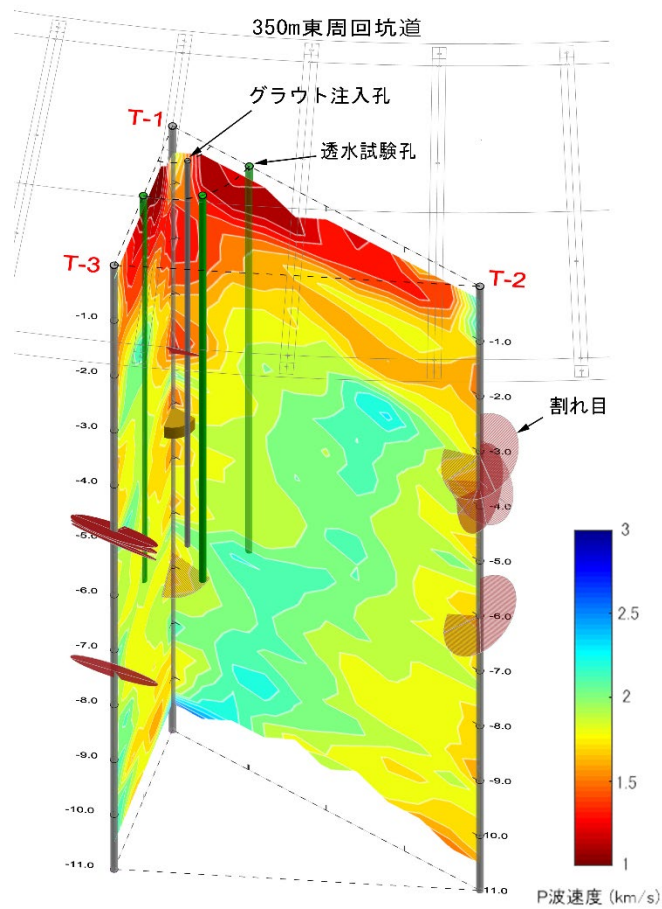


図 19 掘削損傷領域の連続性調査（弾性波（P波）速度分布図）

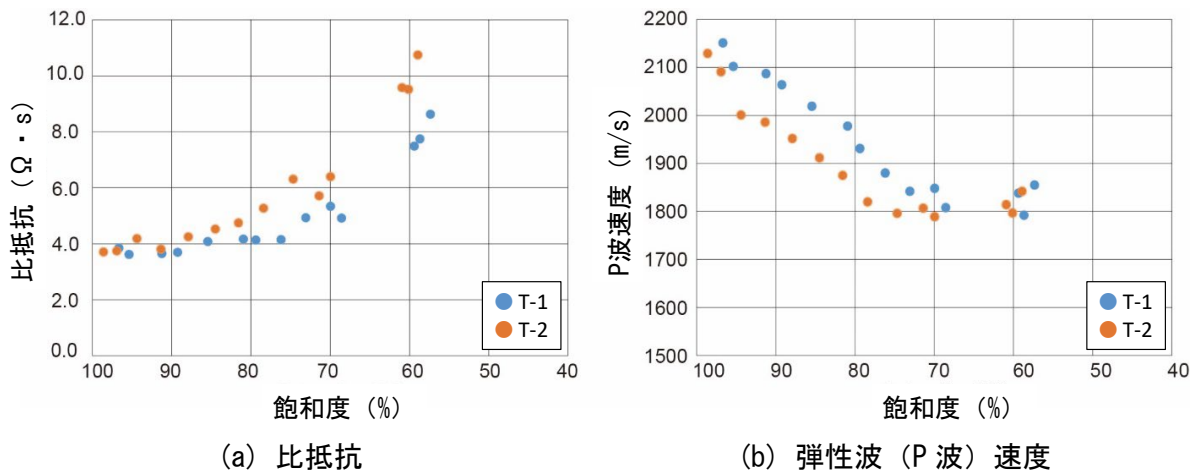


図 20 室内試験により取得された稚内層の健岩部における飽和度と比抵抗および弾性波 (P 波) 速度の関係

令和 4 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を継続するとともに、定期的に試験体の分析を行い、地下環境でのコンクリートの劣化挙動に係るデータの取得を進めます。また、坑道閉塞後を模擬した二次元多相流解析を実施し、坑道閉塞後の坑道周辺岩盤の飽和度や二酸化炭素、メタンガス濃度の予測解析を実施します。

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 3 年度に実施した連成解析に引き続き、力学現象も考慮した上で、埋め戻し材の安全機能が変わる可能性について検討を進めます。また、過年度の成果を含め、本検討で仮設定した坑道が主要な移行経路となりうるというシナリオの現実性について取りまとめを行います。さらに、埋め戻し材の安全機能を変化させる要因となりうるベントナイトの流出挙動に関し、坑道埋め戻しの状況を模擬した室内試験を継続し、流出挙動の発生メカニズムも考慮した上で、その発生条件の検討を行います。

②埋め戻し材の設計評価に必要なとなる緩衝材膨出抑制機能の把握については、令和 3 年度までに実施してきた緩衝材と埋め戻し材の力学的相互作用を考慮した縮尺模型試験を継続し、膨潤変形挙動に係るデータの拡充を図るとともに、埋め戻し材の設計評価に資するデータとしての取りまとめを行います。

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、令和 3 年度の工学規模試験で坑道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をより詳細に確認します。

④掘削損傷領域の調査技術の高度化については、試験坑道 4 周辺の掘削損傷領域を対象とした物理探査を継続し、解析コードの開発およびその解析コードの適用により掘削損傷領域の経時変化を評価するとともに、グラウト注入後のトモグラフィ調査などを実施し、高精度な三次元計測により高度化した物理探査技術を適用して評価を行います。

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 3 年度に室内試験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を対象として、地下施設に掘削したボーリング孔を閉塞する原位置試験（図 21）を実施し、閉塞方法の適用性評価を行います。

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ついては、令和 3 年度に開始した、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、緩衝材の流出試験を継続して緩衝材の流出量などを計測します。緩衝材の流出に関する長期的な挙動を確認するとともに、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を検討していきます。

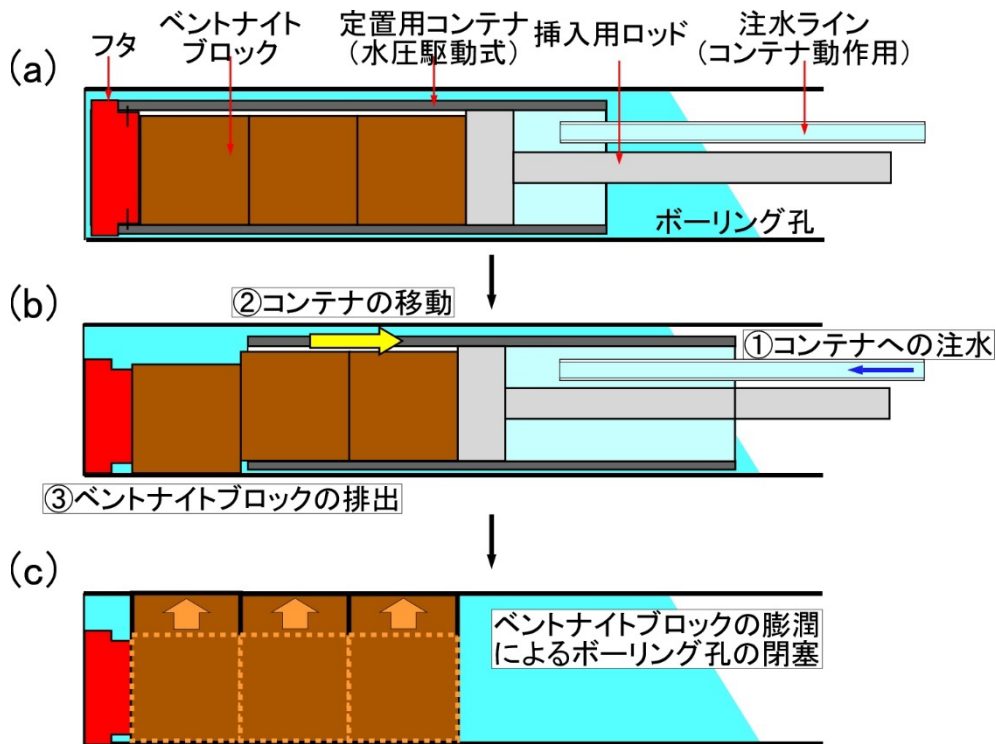


図 21 ボーリング孔閉塞の原位置試験の概念図

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。

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・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 22)。本研究については、「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画」の研究期間の後半に実施します。

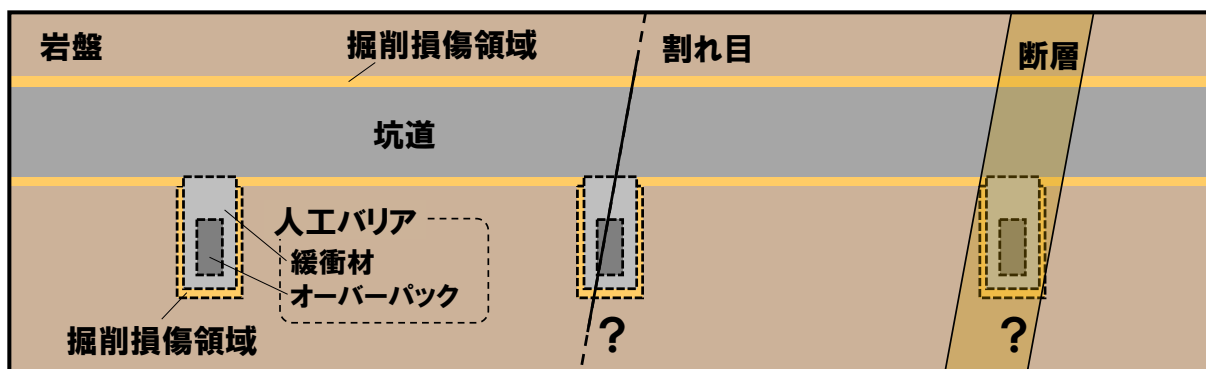


図 22 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化の概念図

5.2 高温度(100℃以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

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

令和3年度は、緩衝材の温度が100℃を超えた状態で発生しうる現象に関する試験・解析などの事例に関して調査を行いました。例えば、令和2年度の調査で緩衝材の変質現象の1つとして抽出されたスメクタイト(ベントナイトに含まれる膨潤性の粘土鉱物)のイライト(雲母鉱物)化については、温度、時間、間隙水のカリウムイオン(K^+)濃度、圧力、スメクタイトの化学組成などが主要なパラメータであり、イライト化反応が進行するためには K^+ の継続的な供給が必要であると報告されています⁽²⁾⁽³⁾。間隙水中の K^+ 濃度が幌延の深度350 mにおける地下水と同程度の場合を想定して、100℃以上の温度におけるスメクタイトのイライト化割合を計算すると、1,000年後のイライト化の割合は、130℃までは約5%以下、140℃では約10%にとどまることが示されました(図23)。緩衝材の温度が100℃を超えた状態が1,000年以上継続するとは考えにくいこと、反応に必要

な K^+ は拡散によって比較的ゆっくりと供給されると考えられること、ならびにイライト化反応の活性化エネルギーはより大きい値を取りうる⁽²⁾⁽³⁾ (反応速度がより小さくなる) ことから、実際に生じるイライト化の割合はさらに小さいと想定されます。一方、このような計算においては、緩衝材や母岩中に含まれるカリウムに富む鉱物(カリ長石など)の溶解による K^+ の供給⁽⁴⁾⁽⁵⁾や、加熱により緩衝材に生じた亀裂を通じて地下水が流入することによる K^+ の供給などについては考慮されていない点に留意する必要があります。

また、海外で実施されている緩衝材の最高温度が 100°C を超えた状態を模擬する原位置試験について、 100°C を超えた状態で生じうる現象の理解のために、廃棄体を模擬したヒーターの加熱に伴う各種センサーでの計測結果に関する情報を入手しました。スイスのグリムゼル試験場では、地下施設を使用して、緩衝材の温度を最高 200°C 程度まで上昇させることを想定した人工バリア試験が実施されています(HotBENT プロジェクト)。令和3年度は、試験坑道内へのヒーター・緩衝材・センサーなどの設置が完了し、9月よりヒーターの段階的な加熱が開始されました(図24)。令和4年度には、ヒーターの温度が 100°C を超えた状態でのデータが取得される予定です。

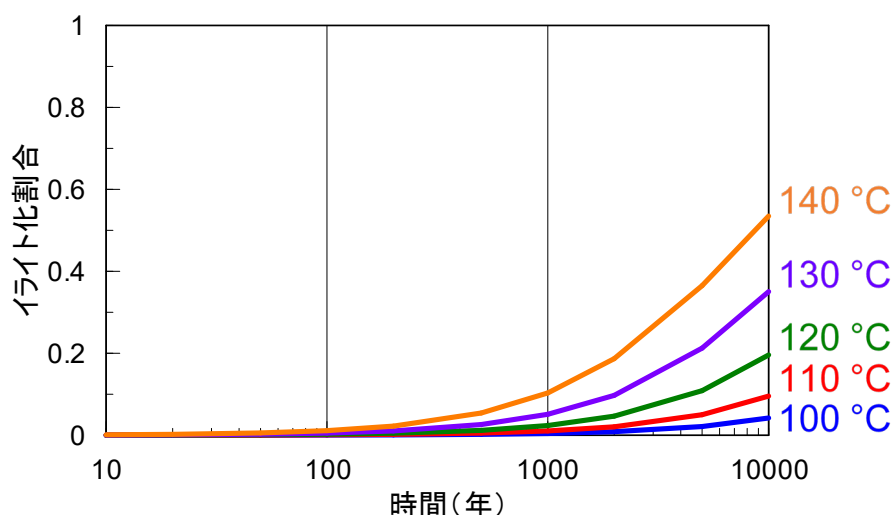
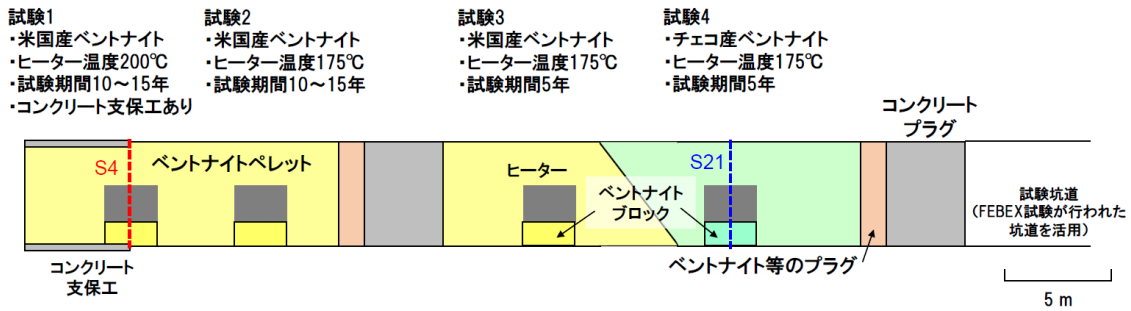
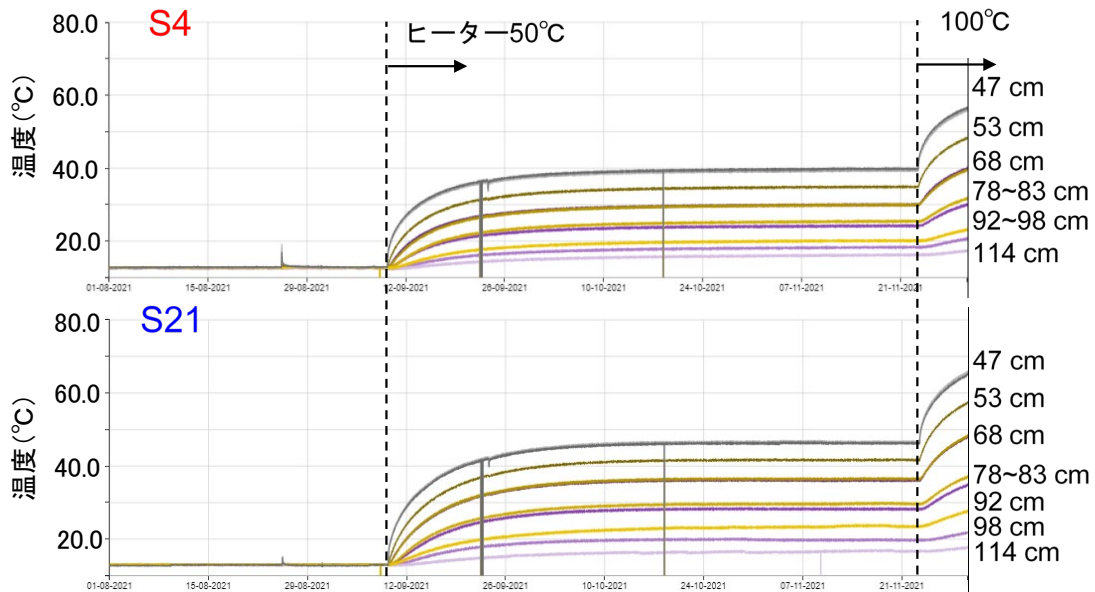


図 23 高温度におけるスメクタイトのイライト化の経時変化

参考文献(6)を参考とし、イライト化反応の活性化エネルギーは報告されている範囲(25~28 kcal/mol⁽³⁾)の最小値である25 kcal/mol、間隙水中の K^+ 濃度は幌延の深度350 mの地下水と同程度の75 mg/Lとして計算しています。



(a) 試験の概念図



(b) 温度の観測結果

グラフ右側の数字は、各温度センサー設置場所のヒーターからの距離を意味します。

図 24 高温の人工バリア性能確認試験（海外での研究事例）

令和4年度は、令和3年度までに実施した先行研究の事例調査を基に、100℃を超えた状態で生じうる現象などのシナリオを整理していきます（図 25）。また、その結果を踏まえて、重点的な調査が必要と考えられる現象に関する室内あるいは原位置試験の計画を策定し、準備を進めます。海外での原位置試験の情報も引き続き入手し、試験計画に反映するとともに、これらの情報と原位置試験で得られるデータを用いて、より精度の高いシナリオの構築を目指します。

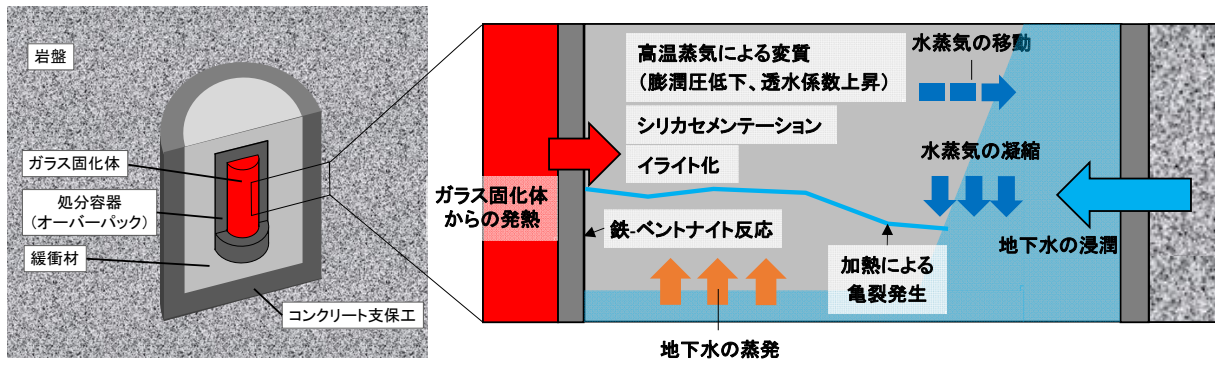


図 25 ガラス固化体からの発熱により人工バリア周辺に生じると想定される現象の概念図（令和3年度の調査結果に基づき更新）

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 3 年度は、DI を用いた透水性評価手法の信頼性向上に向け、既存の室内試験結果や水圧擾乱試験結果を用いて DI モデル⁽⁷⁾を再検証しました。これまで、DI と地下水の主要な水みちとなる割れ目の透水性は相関することが国内外の 6 つの地層のデータから経験的に分かっていたが⁽⁷⁾（図 26 の○）、その相関関係をより正確に表す経験式を構築するために、Kuang and Jiao の近似法⁽⁸⁾を適用して図 26 に示すような新たな経験式（図 26 の近似曲線）を構築しました。また、この近似曲線の物理的な意味を理解するためにシミュレーションを行った結果、図 26 の近似曲線が表す DI と割れ目の透水性の関係は、凹凸のある割れ目内の隙間の開閉現象（図 27）で説明できることが分かりました（図 26 の近似曲線のカーブの形が図 27 に基づくシミュレーション（図 26 の水色線）により、よく再現できています）。さらに、割れ目の透水性が図 26 の近似曲線の値であるために必要な条件をシミュレーション（計 88 パターン）した結果、0.05～2.00 mm 程度のわずかな割れ目のずれにより割れ目のかみ合わせが悪くなることによって、割れ目内の隙間が増える（図 28 上図）必要があることが分かりました。一般に、数百 μm～数 mm 程度までのずれは割れ目内に多くの隙間をもたらしますが、それ以上割れ目がずれてもかみ合わせの悪さは変わらず、割れ目内の隙間があまり増えなくなります（図 28 下図）。これらのことから、図 26 の近似曲線が示す透水性の

値（誤差範囲を含む）は、ある DI 条件において、割れ目のかみ合わせが悪くなることにより増加しうる透水性の上限値を表していると理解することができました⁽⁹⁾。

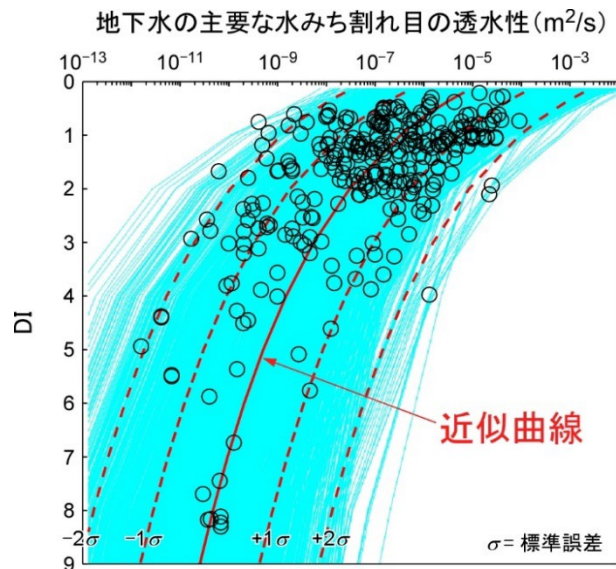


図 26 国内外の 6 つの地層における地下水の主要な水みち割れ目の透水性と DI の関係⁽⁹⁾

6 つの地層は、幌延、スイス、スウェーデン、フィンランド、イギリスの地層です。赤色曲線/破線はデータ（図中の○）から Kuang and Jiao⁽⁸⁾ の近似法を適用することにより得られる近似曲線を示し、水色の曲線は図 27 に示すモデルに基づくシミュレーション結果を示します。

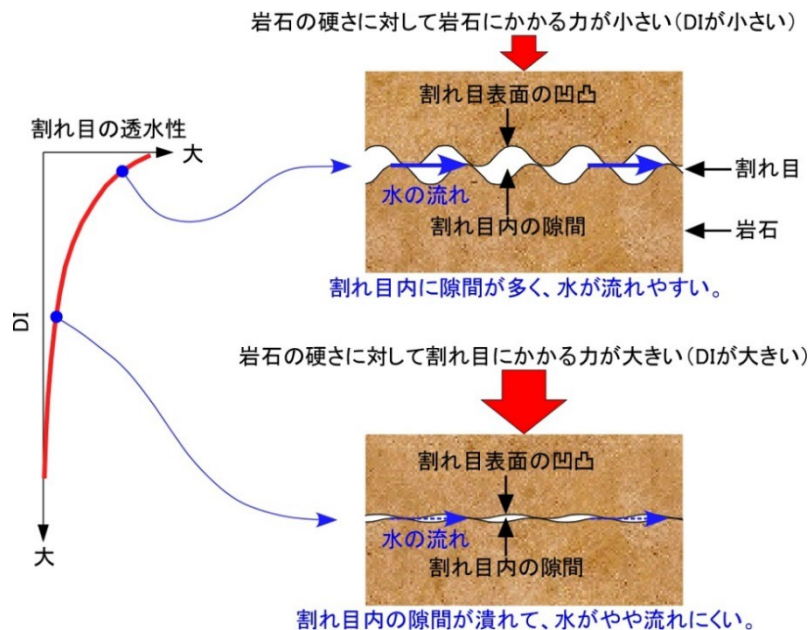


図 27 DI、割れ目内の隙間の開閉、および割れ目の透水性の関係（割れ目のずれが一定の場合）

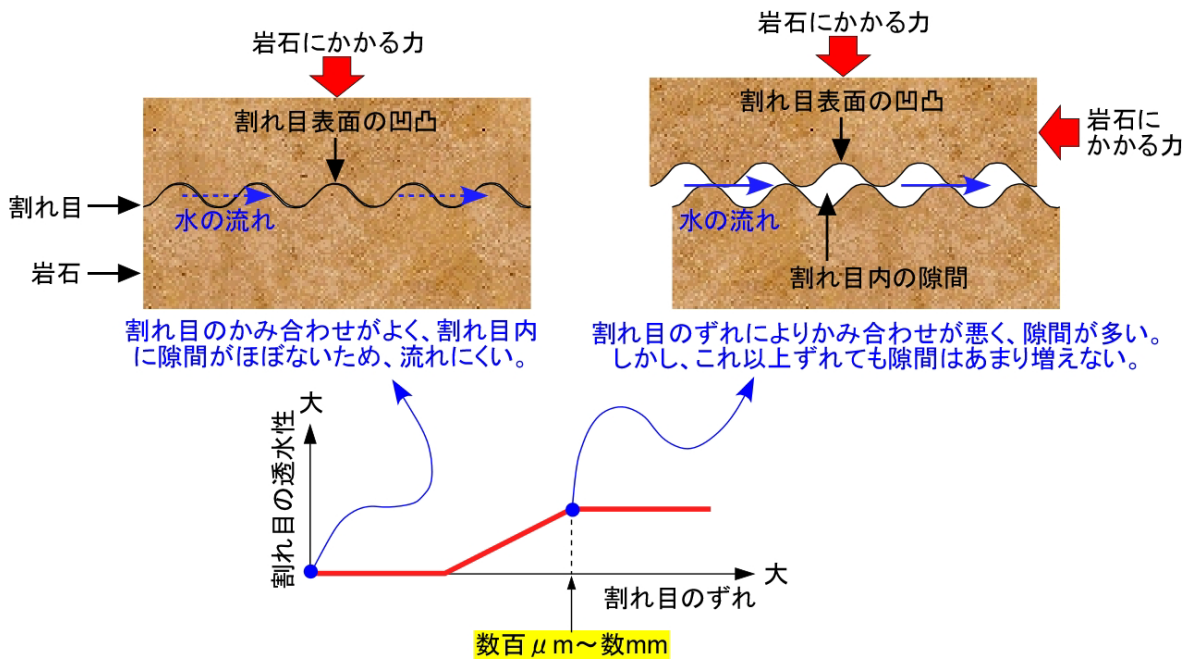


図 28 割れ目のずれ、かみ合わせ、および透水性の関係 (DI が一定の場合)

上記の結果に基づくと、DI に対する透水性が既に図 26 の近似曲線の値の誤差範囲に達している割れ目は、割れ目がずれてもそれ以上、透水性が上昇しにくく (図 28)、DI が変化する場合のみ、それに応じた透水性の変化 (図 27) が生じることが予想されます。このことを確認するために、国内外の地下研究施設において実施され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、幌延の地下施設では、透水性が既に近似曲線の誤差範囲に達している割れ目がずれても DI の減少量に応じた分の透水性の上昇しか発生しないことが確認できました (図 29(a))。またスイスでは、透水性が既に近似曲線の誤差の範囲に達している割れ目がずれても透水性の変化が 1 オーダー以内に留まるのに対し (図 29(b))、透水性が近似曲線の誤差の範囲に達していない割れ目がずれた場合は透水性が数オーダー増加し、近似曲線の範囲に透水性が達することが確認できました (図 29(c))。これらの結果は、図 26 の近似曲線が隆起侵食により DI が低下した場合や、地震などにより断層が再活動した場合の割れ目の透水性の変化量の上限を見積もるのに有用であることを示しています⁽⁹⁾。今後は、今回得られた結果を基に、令和 2 年度に実施した水圧擾乱試験の結果⁽¹⁰⁾との比較検証も行う予定です。

割れ目がずれる際には、割れ目が容易にずれるかどうかという観点も、断層の活動性評価の観点からは重要です。図 29(c)に示すスイスの水圧擾乱試験では、透水性が上昇する際に、割れ目内に破壊が生じたことを示唆する水圧低下が観測される一方で、図 29(b)の透水性が有意に上昇しない試験ではそのような割れ目内の破壊を示唆するような水圧低下は観測されませんでした⁽¹¹⁾。原位置の割れ目の充填状況も考慮すると、前者のケースでは石英などの鉱物によってシーリングされた割れ目がずれることにより割れ目内のシーリングが破壊されたことが考えられる一方で、後者のケースでは、シーリングされていない、あるいは過去の割れ目の再活動によって既に割れ目内のシーリングが破壊された状態の割れ目が試験中にずれたことが考えられます⁽⁹⁾。図 29(a)に示す幌延の水圧擾乱試験では、割れ目がずれる際に破壊を示唆するような水圧低下が観測される一方で⁽¹²⁾、令和 2 年度に幌延で実施した水圧擾乱試験ではそのような水圧低下は観測されていません⁽¹⁰⁾。割れ目がずれる際に生じる割れ目内の破壊現象の有無は、断層のずれにくさと密接に関連していると考えられます（ずれにくい場合は破壊が起きやすい）。今後はこのような観点を踏まえて、水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の検討を進めていきます。

令和 3 年度はさらに、図 29(a)に示す水圧擾乱試験で観測された割れ目の水理学的連結性に関する以下の現象について、令和 2 年度に引き続き検討を行いました。同水圧擾乱試験では、高压注水によって割れ目の水理学的連結性が上昇した後、水圧低下後も数日間、水理学的連結性が高い状態が保持された後に元の水理学的連結性が低い状態に戻りました。この現象を再現するために、割れ目の透水性や幾何形状について複数のケースを仮定したシミュレーションを行った結果、注水を停止した後に試験区間を開放したために、ボーリング孔近傍から徐々に割れ目が閉じていった可能性があることが分かりました⁽¹³⁾。他の可能性として、割れ目表面の微小な凹凸の側面に働く摩擦力が水圧低下後も割れ目内の隙間を保持した可能性が考えられましたが⁽¹³⁾、いずれの場合においても、割れ目の水理学的連結性が DI に強く依存する可能性が高い（図 30）ことが水圧擾乱試験により分かりました。

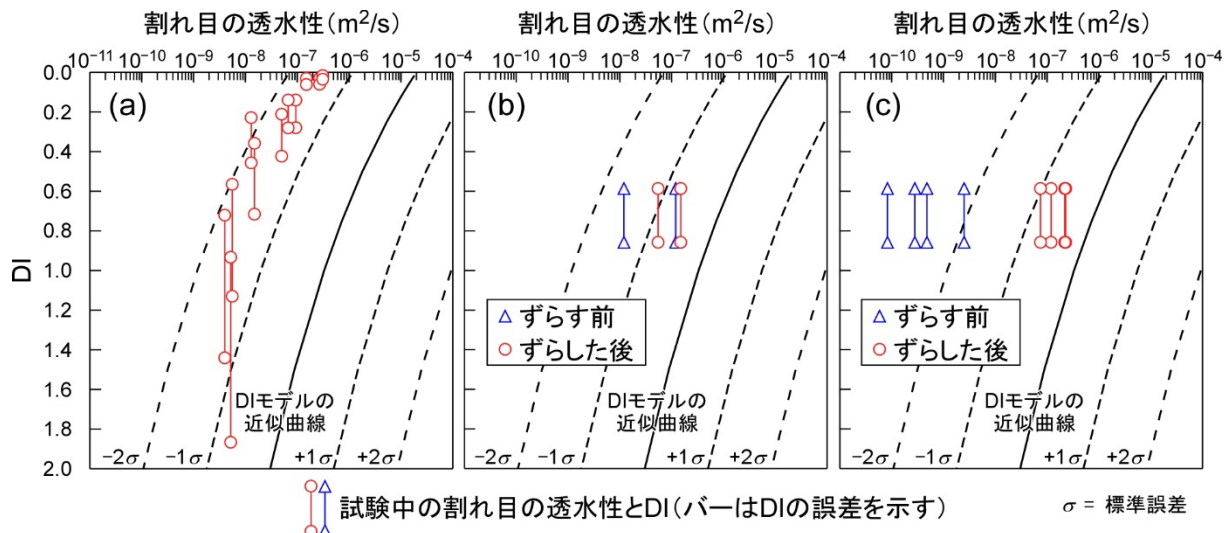


図 29 国内外の地下研究施設で実施された水圧擾乱試験の結果⁽⁹⁾

(a) 幌延の例。割れ目をずらす前から DI モデルの近似曲線（経験式）の誤差（ $\pm 2\sigma$ ）の範囲に割れ目の透水性が達しており、試験中、DI の低下とともに割れ目の透水性が近似曲線に沿って低下（試験中の割れ目のずれ幅は最大数 cm に到達）。(b) スイスの例。割れ目をずらす前から DI モデルの近似曲線の誤差（ $\pm 2\sigma$ ）の範囲に割れ目の透水性が達しており、割れ目をずらした後の透水性の変化は 1 オーダー以内（試験中の割れ目のずれ幅は最大 1 mm）。(c) スイスの例。割れ目をずらす前は DI モデルの近似曲線の誤差（ $\pm 2\sigma$ ）の範囲に割れ目の透水性が達していないが、割れ目をずらした後、透水性が数オーダー上昇し、近似曲線の範囲に割れ目の透水性が到達（試験中の割れ目のずれ幅は最大 1 mm）。

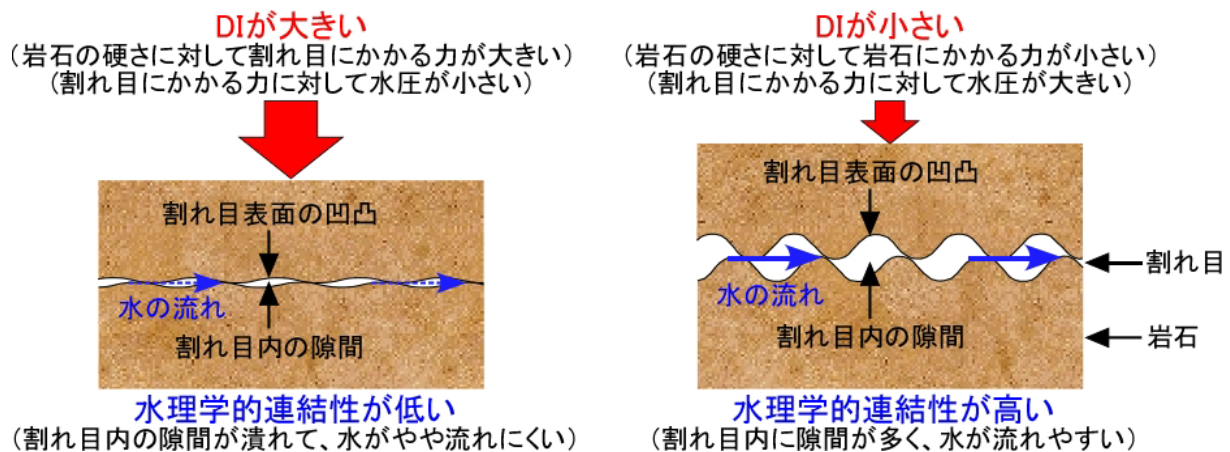


図 30 DI と割れ目の水理学的連結性の関係

令和 4 年度は、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の結果との比較検証を行います。また、これまでに得られたデータを活用して、DI と断層/割れ目の水理学的連結性の関係（図 30）に関する解析を行い、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を進めます。

6.1.2 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化

令和 2 年度以降は、地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化が課題であり、このような地下水の流れが非常に遅い領域を調査してモデル化する技術の実証を行います。具体的には、化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証、広域スケール(十数 km×十数 km)を対象とした水理・物質移行評価手法の検証(地下水滞留時間評価)のための水理解析、塩濃度分布評価のための水理・物質移行解析を行います。

この研究課題で整備される技術は、処分事業のサイト選定において、地質環境に求められる要件の 1 つとして挙げられている「放射性物質の移行を抑制する緩慢な地下水流動の水理場であること」を評価する際に役立ちます。本研究課題においては、化石海水が存在するような地下水の動きが非常に遅い環境を調査してモデル化する技術を実証するため、具体的には、以下を実施します。

- ① 地下水の流れが非常に遅い領域(化石海水領域)の調査・評価技術の検証
- ② 化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証
- ③ 広域スケール(十数 km×十数 km)を対象とした水理・物質移動評価手法の検証(地下水滞留時間評価)のための水理解析および塩濃度分布評価のための水理・物質移動解析

①地下水の流れが非常に遅い領域(化石海水領域)の調査・評価技術の検証では、地上からの主要な調査である物理探査とボーリング調査を対象に、化石海水領域を把握するための調査技術としての適用性やより効率的に把握するための調査仕様や手順などを検証します。②化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証では、幌延地域において取得されたデータを用いて化石海水の三次元分布を推定し、化石海水を指標として地下水の流れが非常に遅い領域を推定するための一連の手法を整理します。③広域スケール(十数 km×十数 km)を対象とした水理・物質移動評価手法の検証(地下水滞留時間評価)のための水理解析および塩濃度分布評価のための水理・物質移動解析では、地質環境中における過去から

現在までの地下水の流動や化学的状態などの移り変わり（古水理地質学的変遷）が、化石海水の三次元分布におよぼす影響について解析を通じた検討を行うとともに、化石海水領域の三次元分布の評価結果を踏まえた広域スケールの解析手法について検討します。

令和3年度は、①化石海水領域の調査・評価技術の検証については、令和2年度の電磁探査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に、ボーリング調査（HFB-1孔）を実施しました。調査地点として、声問層と稚内層がバランスよく調べられる地点、かつ、令和2年度の電磁探査により化石海水領域の広がり境界付近と推定された地点である、幌延深地層研究センターから南側に数十 m の地点を選定しました（図 31）。この地点では声問層と稚内層の地層境界は深度約 310 m に出現すると予想されます。また、令和2年度の電磁探査の解析結果、HFB-1孔の深度数十 m 以深では比抵抗値が 2.4~5.9 $\Omega \cdot m$ であると推定され、化石海水が存在する可能性があります。図 32 に HDB-3 孔、HDB-6 孔および HFB-1 孔において取得された塩化物イオン (Cl^-)、酸素同位体比^{*} ($\delta^{18}O$) および比抵抗の深度方向の分布を示します。比抵抗値が 2.4 $\Omega \cdot m$ 以下の領域に位置する HDB-3 孔では、化石海水に相当する地下水が深度約 100 m 以深の声問層から確認されていますが、比抵抗値が 2.4~5.9 $\Omega \cdot m$ の領域に位置する HDB-6 孔では、化石海水に相当する地下水は深度約 400 m 以深の稚内層から確認されています。この違いは、水理学的連結性を有する断層が分布する稚内層浅部の層厚が関係していると考えており、HDB-3 孔、HFB-1 孔、HDB-6 孔の順で層厚が厚く、その順で天水浸透の影響が大きいと考えています。電磁探査の解析結果に基づくと、HFB-1 孔の比抵抗値は HDB-3 孔と HDB-6 孔の中間程度であると推定されていることから（図 32(d)）、HFB-1 孔はそれらの中間的な特徴を示すと予想されます。具体的には、深度約 100 m 付近の声問層から化石海水相当の地下水が出現するか、また、稚内層浅部での天水浸透の影響はあるかといった観点から評価する必要があります。令和3年度は声問層を対象として深度 200 m まで岩石コアを採取するためのボーリング掘削を行いました。採取した岩石コアを対象に割れ目観察を行うとともに、化石海水の存在を確認するために岩石コアの間隙に含まれる地下水の水質・同位体データを

分析するための試料を採取し、分析作業を進めています。また、ボーリング孔の孔壁周辺の割れ目分布や地層の比抵抗などを計測する物理検層を実施しました。

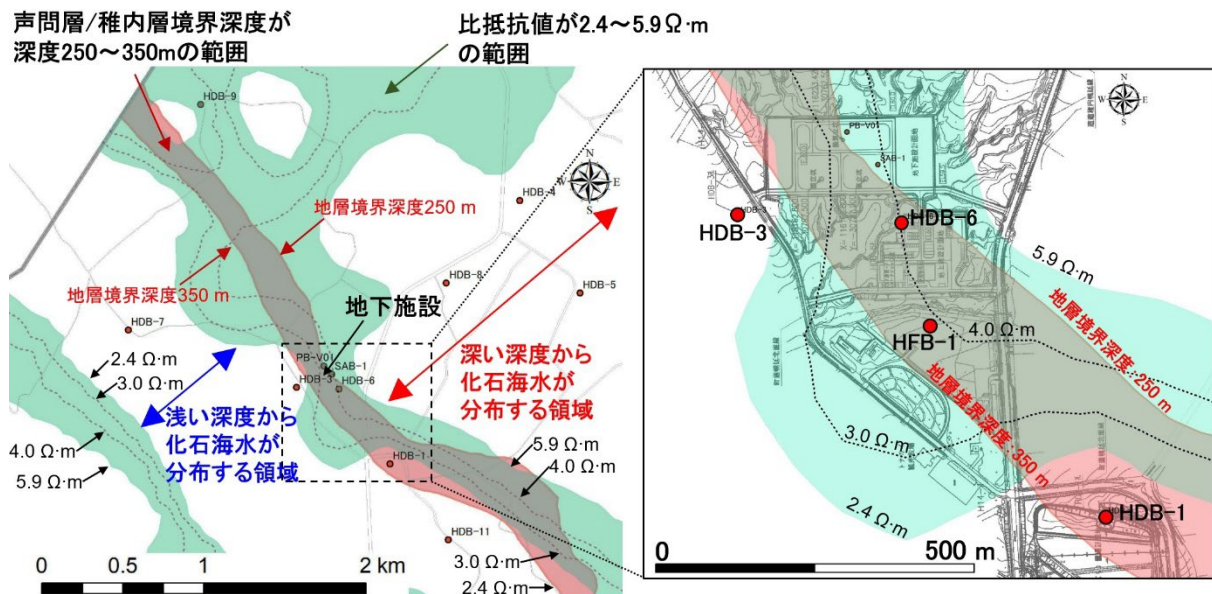


図 31 幌延深地層研究センター周辺における声問層/稚内層境界の深度と標高-275 mにおける比抵抗分布

左図の赤で示す範囲は、地表から声問層/稚内層境界までの深度が 250~350 m になる範囲を示します。一方、緑色の範囲は標高 - 275 m において比抵抗値が 2.4~5.9 Ω・m となる範囲を示します。この比抵抗値は令和 2 年度に実施した電磁探査の解析結果に基づきます。右図は左図の点線に囲まれた範囲の拡大であり、ボーリング調査 (HFB-1 孔) の実施地点を示します。なお、標高-275 m は、幌延深地層研究センターでは深度約 335 m となります。

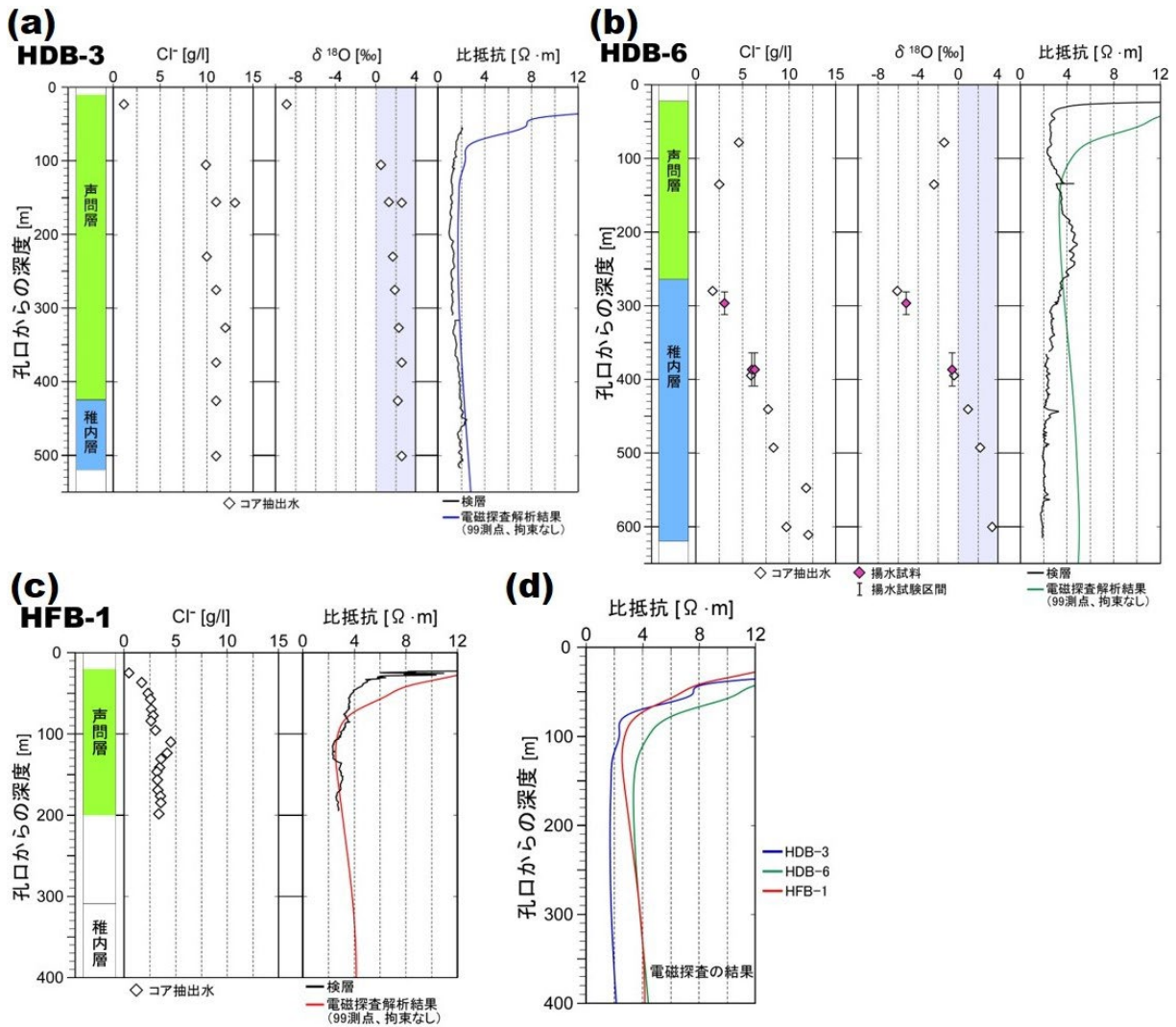


図 32 HDB-3 孔、HDB-6 孔および HFB-1 孔において取得された塩化物イオン濃度 (Cl^-)、酸素同位体比 ($\delta^{18}O$)、比抵抗と令和 2 年度の電磁探査の解析結果に基づく比抵抗

(a)、(b)、(c)はそれぞれ HDB-3 孔、HDB-6 孔および HFB-1 孔の結果を示します。令和 3 年度は HFB-1 孔を深度 200 m まで掘削しました。(c)には Cl^- 濃度の結果のみを示します。また、HFB-1 孔における声問層/稚内層の境界は深度約 310 m と予想しています。(d)は令和 2 年度に実施した電磁探査の解析結果に基づく比抵抗の比較を示します。

②化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証については、令和 2 年度に取得した物理探査データを用いて、電磁探査と反射法地震探査のデータを組み合わせて三次元比抵抗分布を解析する方法について検討しました。令和 2 年度に実施した電磁探査の解析の結果から、幌延深地層研究センター付近を境にして、南西側では比抵抗が相対的に低く、大曲断層が分布する北東側の比抵抗値は相対的に高いことが分かりましたが、より深い深度での解析精度を見直すことが課題となっていました。

そこで、令和3年度は、さらに既存の電磁探査データ15測点のデータを加えて再解析を実施しました。その際、地表付近の高比抵抗構造や準三次元反射法地震探査により得られた地層境界面を拘束条件とする場合も解析しました。それらの結果を図33に示します。電磁探査データ15測点のデータを加えた再解析の結果、深度0~1,000 mの範囲において高比抵抗と低比抵抗のコントラストが明瞭となりました。また、拘束条件を設けることにより、地層の分布と調和する結果が得られました。

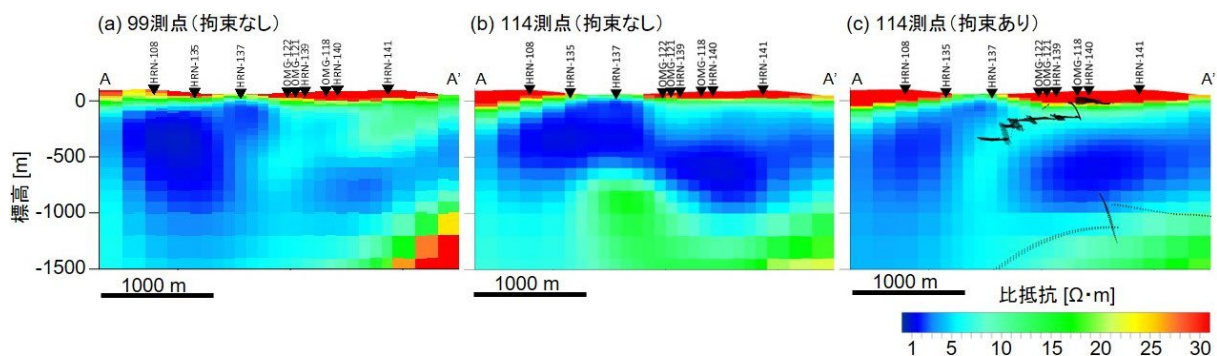


図33 電磁探査データの解析結果の比較

(a)は物理探査範囲内にある令和2年度に実施した電磁探査の60測点と既存の39測点(平成13年度および平成15年度実施)の計99測点を用いた解析結果です。(b)は(a)の99測点に物理探査範囲外にある平成15年度の電磁探査の15測線を追加した計114測点を用いた解析結果です。(c)の測点データは(b)の解析と同様ですが、地表付近の高比抵抗構造および地層境界について拘束条件を設けた場合の解析結果です。

③広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の検証については、広域スケールの地下水流動解析を実施する上で考慮すべき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ために、地形や海水準(陸地に対する海面の相対的な高さ)、涵養量(降水や地表水が地下に浸透して地下水として加わる水の量)などの長期的時間変化を考慮した感度解析を実施しました。その結果、長期的な地形変化や地下水の密度および異常水圧領域の変化が化石海水領域に影響を及ぼしうることが分かりました。

令和4年度は、令和3年度に深度200 mまで掘削したボーリング孔を延長し、稚内層を対象に化石海水の有無を確認するため地下水の水質・同位体データの取得を継続します。ボーリング調査地点では、深度300 m付

近に声問層と稚内層の地層境界があり、その境界付近より下の 150 m 程度の区間では、割れ目の水みちとしての連結性が良く、地下水が比較的流れやすい領域であると予想されます。そのため、化石海水分布と地層・地質構造分布の関係を評価する上で重要な区間となります。加えて、これまでの成果に基づき、物理探査およびボーリング調査によるデータ取得から地球統計学的手法による化石海水領域の三次元分布の推定に至る一連の手法を取りまとめます。また、これまでに実施した水理・物質移行解析に基づき、化石海水領域が存在する広域スケールを対象としたモデル化・解析手法を取りまとめます。その際、地質環境中における過去から現在までの地下水流動や化学的状态などの移り変わり（古水理地質学的変遷）が化石海水領域に与える影響を評価するという観点から整理します。

また、産業技術総合研究所*8との共同研究として、令和 3 年度に幌延町沿岸部において、海陸連続三次元地質環境モデルの妥当性の検証を目的とした海上物理探査を行う計画でしたが、他の地域での実施となりました。そのため、令和 4 年度は、令和 3 年度の実績に基づき探査手法を見直した上で、幌延町沿岸部の浅海域において海上物理探査を実施するとともに、浜里地区などにおいて水文地質データの取得を行います。

6.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

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

令和 3 年度は、令和 2 年度に実施した樹脂注入後の掘削損傷領域の割れ目試料の観察により得られた開口幅とせん断変位の関係性について、その妥当性を確認するためにシミュレーションを行いました。観察により、割れ目の開口幅とせん断変位量には相関性がほとんどないことが確

*8 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。

認められました（図 34 の●）が、割れ目面にかかる力を原位置相当の 3.2 MPa として割れ目の開口幅とせん断変位量の関係を既存のモデル⁽¹⁴⁾を用いてシミュレーションすると、上記の観察結果と整合的なシミュレーション結果（開口幅とせん断変位量がほとんど相関しない結果）を得ることができました（図 34(a)）。一方、割れ目面にかかる力を原位置相当の圧力よりも極端に小さく見積もってシミュレーションを行うと、上記の観察結果をよく再現できない（開口幅とせん断変位量がよく相関する）ことが確認できました（図 34(b)）。これらの結果から、地下の原位置相当の圧力条件では、掘削損傷領域の割れ目が坑道閉鎖後にずれたとしても、圧力が大きく低下しない限り、掘削損傷領域の割れ目の開口幅（透水性）はほとんど増加しないことが確認できました⁽¹⁵⁾。

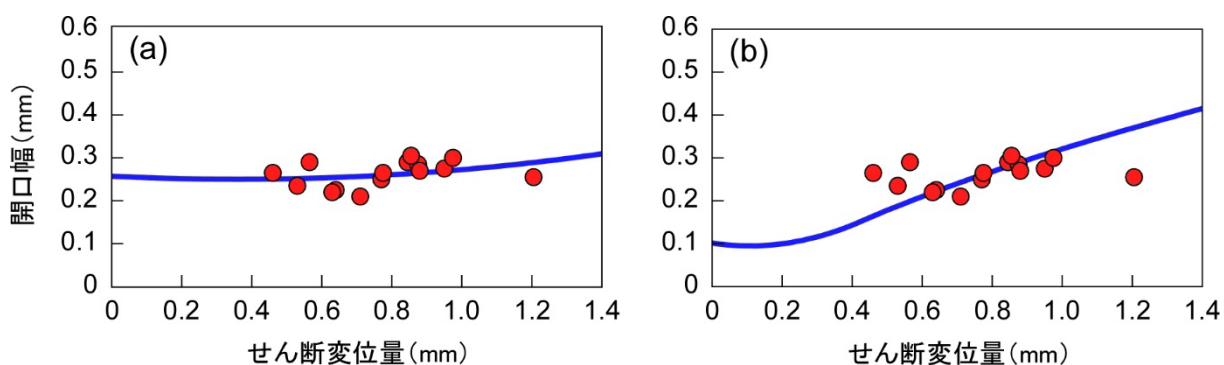


図 34 樹脂注入後の掘削損傷領域の割れ目試料で観察された開口幅とせん断変位量の関係（赤丸）とシミュレーション結果（青線）⁽¹⁵⁾

令和 3 年度はさらに、掘削損傷領域の割れ目を対象に実施した既往の注水試験のデータについて、以下のような検討を行いました。同試験では段階的に注水圧（試験区間の水圧）を増加させ、その時の注入流量の変化を計測しました（図 35(a)はその結果の例）。試験中の試験区間の水圧と注入流量の関係を調べると、試験区間の水圧の増加に伴う注入流量の増加量は、試験区間の水圧の増加とともに徐々に大きくなることが分かりました（図 35(b)）。これは一般的な水理学の知見に基づくと、水圧の増加に伴って割れ目の開口幅が増加していることを示唆しており、このようなデータは割れ目面にかかる力に応じて割れ目の開口幅がどのように変化するかを調べるのに有用な情報となります。

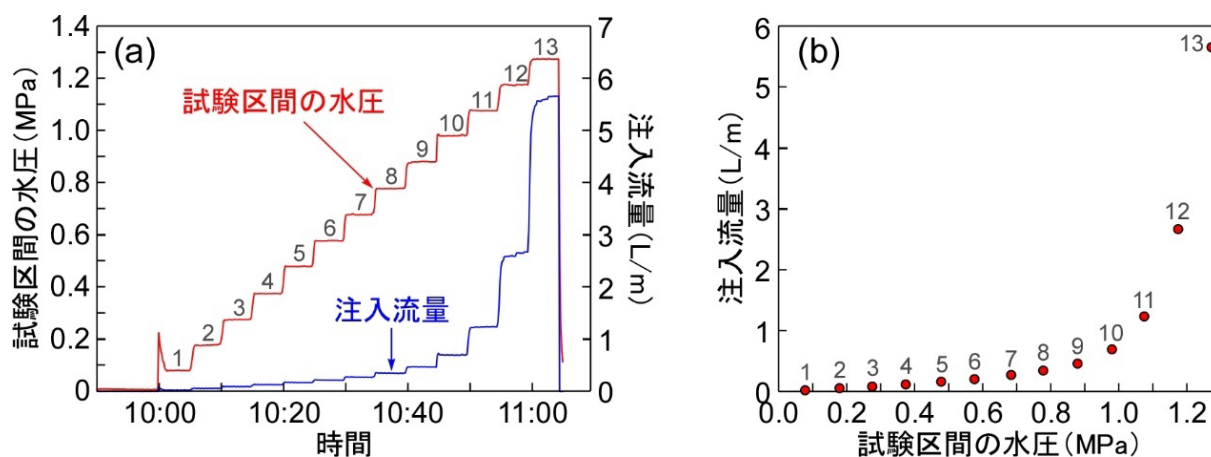


図 35 掘削損傷領域の割れ目を対象に実施した既往の注水試験のデータの例

注水試験中の試験区間の水圧と注入流量の(a)推移と(b)両者の関係。図中の1~13の番号は試験中のステップの番号を表します。

令和4年度は、掘削損傷領域の割れ目を対象に実施した既往の注水試験のデータ（図35はその一例）について、令和2年度に再検証したDIモデル（6.1.1を参照）を用いて詳細な解析を行い、坑道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤が坑道埋め戻し後の掘削損傷領域の透水性に与える影響を定量的に評価する手法を整備します。

7. 令和2年度以降の必須の課題への対応に必要なデータ取得

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

令和3年度におけるデータ取得例として、ここでは地下水のpHや酸化還元電位、圧力などの物理化学パラメータのモニタリング結果を示します。地下施設の建設に伴う坑道周辺の地下水の水質変化を把握するため、既存のボーリング孔を対象に地下水の採水調査を行いました。地下水のpHや酸化還元電位などの物理化学パラメータについては、大気中の酸素との接触や圧力の低下などの影響を低減させた原位置の地下水の値を取得するために、350m調査坑道に設置している水圧・水質モニタリング装置を用いて、物理化学パラメータを取得しています。人工バリア性能確認試験の試験箇所周辺のボーリング孔に設置した水圧・水質モニタリング装置から得られた地下水のpHや酸化還元電位については、令和2年度までと同様の結果が得られました。また、令和2年度においては人工バリア性能確認試験の注水量の変化に伴う水圧の変化が確認されていましたが、令和3年度においては注水量の変化は無いことから、観測された水圧変化は、令和2年度までと同様の採水調査や装置のメンテナンスに伴うものと考えられます（図36）。

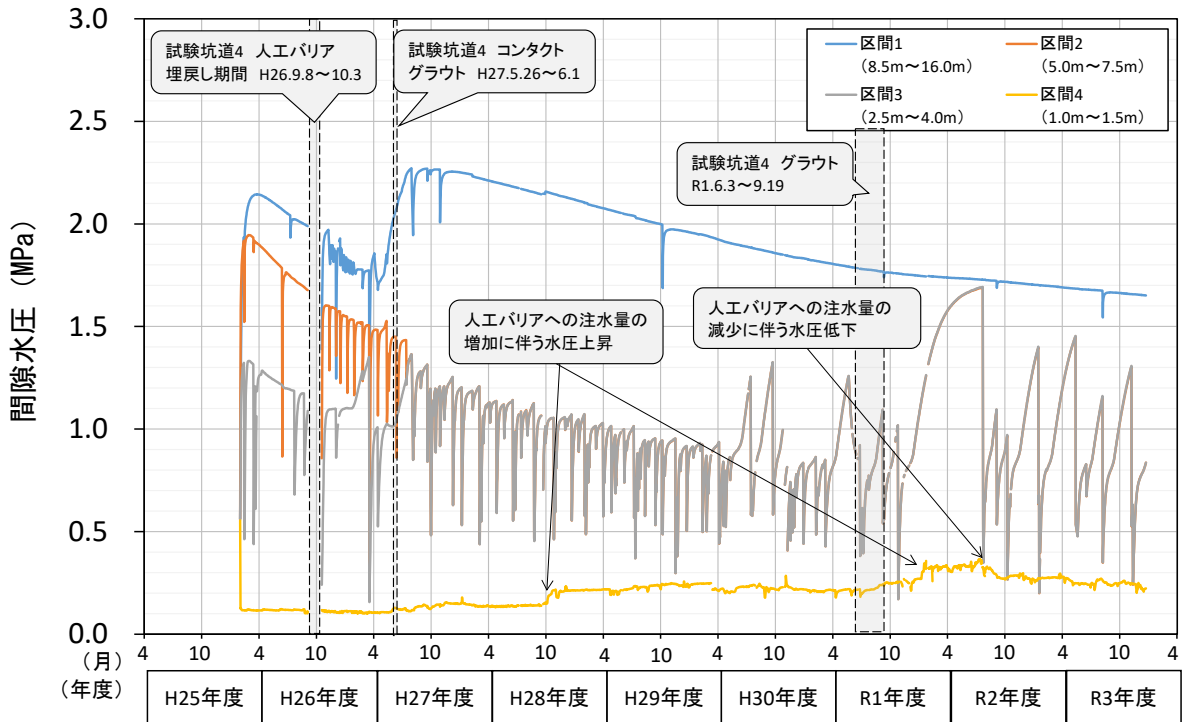


図 36 人工バリア性能確認試験の試験箇所周辺のボーリング孔 (13-350-C08 孔) における水圧の経時変化

令和4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します。地質構造に関しては、ボーリング調査や坑道掘削時の壁面観察で得られた地質データに基づいた地層および割れ目の空間的分布に関する特徴の整理を継続します。また、令和2年度以降の必須の課題の目的に応じて、地質構造や水理の特徴を踏まえた水理地質構造モデル*を構築します。岩盤の水理に関しては、坑道掘削後の地質環境の変化を把握するため、地上から掘削された既存のボーリング孔での水圧観測を行います。地下水の地球化学に関しては、既存のボーリング孔を対象に地下水の採水調査を行うとともに、地下水の水質分布や水質の時間的な変化を把握します。また、坑道掘削の影響については、地表や坑道に設置した高精度傾斜計*および坑道に設置した地中変位計などを用いて、岩盤の微小な変形の観測を継続します。さらに、地震に伴う地質環境特性の変化に関わるデータ取得のため、上幌延観測点 (HDB-2) と地下施設での地震観測を継続します。

8. 地下施設の管理

令和 5 年度に着工を予定している掘削工事に向けて、掘削に必要なとなる掘削土（ズリ）の積込み機やコンクリートプラント設備の整備、および安全対策設備の改修などを行うとともに、地下施設の維持管理（設備運転や保守点検など）を実施します（図 37）。

研究所用地およびその周辺の地下には、メタンを主成分とする可燃性ガスが存在しているため、地下坑道内の換気を十分に行うとともに、防爆仕様の機器の使用やガス濃度の監視などの防爆対策を徹底します。

地下施設からの排水および掘削土（ズリ）置場の浸出水は、これまでと同様に、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。



(a) 巻上機の整備



(b) 制御盤の整備

図 37 工事および維持管理の様子

9. 環境調査

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

9.1 排水量および水質調査

排水処理設備から天塩川へ放流している排水量について監視を行うとともに、排水処理前後の水質、天塩川の水質、浄化槽排水の水質について調査を行います。また、掘削土（ズリ）置場の環境への影響を監視するため、清水川および掘削土（ズリ）置場周辺の地下水についても水質調査を行います（図 38）。



(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 38 水質調査の様子

9.2 研究所用地周辺の環境影響調査

研究所用地周辺の環境影響調査として、清水川の水質および魚類を対象に調査を実施します（図 39）。



(a) 清水川の水質調査



(b) 清水川の魚類調査

図 39 環境影響調査の様子

10. 安全確保の取り組み

調査研究に関わる作業の実施にあたっては、安全確保を最優先とした取り組みを行います。具体的には、作業計画時における安全対策の確認を徹底するとともに、作業者に対する安全教育や訓練の実施、定期的な安全パトロールなどを通じて安全確保に努めます（図 40）。



図 40 安全パトロールの様子

11. 開かれた研究

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

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

地層処分や研究開発に関する国民との相互理解を促進するため、幌延深地層研究センターのホームページ^{*9}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。また、令和2年度から幌延町広報誌「ほろのべの窓」の誌面をお借りして連載している、研究内容を紹介する記事については、令和4年度も継続して行います。

11.1 国内機関との研究協力

○北海道科学大学

AI技術を活用した画像認識による坑道壁面の地質判読に関する研究

○東京大学

天然有機物が核種移行に与える影響に関する研究

微生物を指標とした堆積岩中の水みち調査手法の開発

層状ケイ酸塩による微量元素の還元反応のメカニズム解明

○名古屋大学

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

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

- 京都大学
水質形成機構のモデル構築および数値解析に関する共同研究
- 京都大学、東北大学
地下水中の微量元素と有機物を対象とした地球化学研究
- 幌延地圏環境研究所*10
堆積岩を対象とした岩盤力学や微生物などに関する研究
- 産業技術総合研究所
海陸連続三次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータ取得手法の高度化
- 電力中央研究所*11
地下施設建設時の坑道掘削影響領域の調査技術に関する研究
実地下水中のコロイドへの核種の収脱着メカニズムに関する研究
(原子力機構 核燃料サイクル工学研究所が実施する共同研究への協力)
- 原子力規制庁
放射性廃棄物処分坑道の閉鎖措置確認に向けた掘削損傷領域およびベントナイトの透水性に関する研究 (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)
- 深田地質研究所、東京大学
断層中のメタンガス高精度検出に関する共同研究 (原子力機構 東濃地科学センターが実施する共同研究への協力)
- 株式会社安藤・間
ボアホールジャッキ試験による岩盤の初期応力測定手法の適用性に関する研究
- 株式会社大林組
光式 AE 計測を用いた坑道周辺のモニタリングに関する研究

*10：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。

*11：一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。

上記のほか、他の大学や研究機関などとの研究協力を進めます(図 41)。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 大学からの実習生の受け入れ

11.2 国外機関との研究協力

○DECOVALEX

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

○モンテリ・プロジェクト^{*12} (スイス)

オパリナス粘土層の摩擦特性試験など

^{*12}：堆積岩を対象とした地層処分研究に関する国際的な原位置試験プロジェクトです。スイスのモンテリ・トンネル内において地層処分に関連する各種の原位置試験が実施されています。

○クレイクラブ (Clay Club) *13

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

○環太平洋地域における地下研究施設 (URL) を活用した国際協力

各機関が課題とするテーマについて情報交換、解析技術の検討など

上記のほか、OECD/NEA の協力のもと、幌延国際共同プロジェクト (Horonobe International Project : HIP*14) を令和 4 年度から新たに開始します。本プロジェクトでは、令和 2 年度以降の必須の課題に関わる試験や解析などを実施するとともに、国内外の技術者や研究者を育成することを目的としています。

また、国外の研究機関などとの研究協力や地下施設における原位置試験などに関わる情報交換を進めます。また、OECD/NEA と経済産業省が主催する、地下研究施設の共同利用に関する国際ワークショップに協力するとともに、韓国の研究者を対象として、地下施設で行っている調査研究の体験を目的とした実務トレーニングを行います。

*13 : Clay Club は、経済協力開発機構/原子力機関 (OECD/NEA) の放射性廃棄物管理委員会の下に置かれたプロジェクトの 1 つです。地層処分の実施・規制・研究機関を中心とした組織であり、様々な粘土質媒体の特性の比較や粘土の物性や挙動および、地下施設で実施される試験に関する技術的かつ科学的情報の交換、さらには、サイト特性調査技術の詳細な評価を実施しています。

*14 : HIP ホームページ ; <https://www.jaea.go.jp/english/04/horonobe/IJP/HIP/index.html>

12. 用語集

【英数字】

Da (ダルトン)

質量を表す単位であり、質量数 12 の炭素原子の質量の 1/12 と定義されていますが、限外ろ過に用いられるフィルターサイズの指標としても用いられます。10 kDa (キロダルトン) のろ過フィルターサイズとは、10 kDa (10,000 Da) より小さな質量の分子が通ることのできる孔径の指標を意味します。

DECOVALEX (デコバレックス)

DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments (連成モデルの開発とその実験結果との検証) の略称で、地層処分システムの性能評価において重要な課題の 1 つである熱-水理-力学-化学連成挙動モデルの開発・確証を目的とした国際共同研究です。

HotBENT (ホットベント)

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

【あ行】

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いいます。化学式は $C_{20}H_{10}Na_2O_5$ であらわされます。トレーサー試薬としての利用のほか、入浴剤の着色料などとしても利用されています。

【か行】

回収可能性

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、処分場の閉鎖までの間に何らかの理由でその取り出しが望まれた場合

に、それを取り出し、搬出する一連の行為が実現可能であることを言います。

回収方法

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

化石海水

地層の堆積時に地層中に取り込まれた海水が地質学的な長い時間をかけて変質した古海水のことです。化石海水が存在する場所は、地下水の流れ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。

希土類元素

希土類元素は、原子番号 21 のスカンジウム (Sc) と 39 のイットリウム (Y) に、原子番号 57 のランタン (La) から 71 のルテチウム (Lu) までの 15 元素を合わせた 17 元素の総称です。レアアースとも呼ばれます。

掘削損傷領域

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

経験式

理論的根拠は明らかではないが、実験や観測などによる実測値から導かれた関係を数式で表したものです。

限外ろ過

コロイド粒子などの、通常のろ過方法では分離できない微細な粒子をろ過する方法で、質量が約 1 kDa～1,000 kDa の分子を分離することができます。

減熱過程

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

高精度傾斜計

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

コロイド

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

【さ行】

酸化還元電位

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

酸素同位体比

酸素同位体比とは質量数 16 の酸素に対する質量数 18 の酸素の割合を指します。幌延地域では、表層水で-10‰前後、深部地下水で 0‰前後の値を示すことが分かっています。

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をずらす試験のことです。試験の前後で断層の水理特性に与える影響を確認します。

水理地質構造モデル

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

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いいます。

【た行】

堆積岩の緩衝能力

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

ダクティリティインデックス (DI)

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

多相流解析

岩盤中を流れる流体の流動シミュレーションにおいて、水の流れだけではなく、空気や蒸気などの気相の流動も考慮した解析のことです。

中性化

大気中の二酸化炭素とコンクリート中の水酸化カルシウムなどの成分とが反応し、コンクリート中の細孔溶液の pH が低下する現象です。中性化が進むとコンクリート中の鉄筋が腐食しやすくなり、鉄筋が腐食することでコンクリートのひび割れなどが発生し、コンクリート構造物の劣化が進みます。

透水性

岩盤の水の通し易さのことです。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： k 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 (m^3/s)、 A ：断面積 (m^2)、 h ：水頭差 (m)、 l ：長さ (m) を表します。

トレーサー

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】

暴露試験

材料および製品を特定の環境に暴露し、その環境における材料や製品の化学的性質・物理的性質および性能の変化を調査する試験です。

フミン酸

植物などが微生物により分解される最終生成物のうち、酸性である無定形高分子物質のことで、腐植酸とも呼ばれます。

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

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	R4の実施内容	研究期間														
					前半					後半									
					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（人工バリアの解体調査および緩衝材の飽和度の確認を含む）、ならびに施工方法などの工学的実現性の例示等を行い、設計、施工および評価・解析といった一連の技術に関する基盤情報を整備する</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(解体調査による)</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 人工バリア性能確認試験において、廃棄体の発熱がおさまった状態を模擬した条件下での試験を継続し、データを分析・評価</p>	<p>前半の5年程度で実施</p> <p>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</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>緩衝材中発熱がおの温度のさまたげ、低下や緩衝材内側試験に移の間隙圧の低下を確認</p>					<p>令和4年度までに得られる成果 減熱過程における ○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>国際プロジェクト（DECOVALEX等）における解析コード間の比較検証、改良・高度化</p>					<p>④-1 国際共同研究 DECOVALEXによる連成解析コード間の比較検証の継続</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>				
					<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 試験施工の解体調査結果を整理し、解体調査計画に反映するための手法などの取りまとめ</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>試験施工では、埋め戻し材、プラグ、試験孔、人工バリアを設け、注水開始</p> <p>試験施工の解体作業を行い、緩衝材の解体方法や模擬オーバーバックの取り出し手法を確認</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 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>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>									

※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～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。

1.2 物質移行試験

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	R4 の実施内容	研究期間										
					前半					後半					
					前半の5年程度で実施										
<p>・幌延地域に分布する泥岩は断層等の構造的な割れ目が分布することが知られているため、岩盤基質部（＝健岩部）における拡散および割れ目（掘削損傷領域などの人為的な割れ目も含む）を介した移流・分散が主要な移行経路や形態として考えられる</p> <p>・有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に影響を及ぼすことが考えられる</p> <p>・したがって、割れ目を有する堆積岩での物質移行経路や形態と物質移行に与える要因（有機物・微生物・コロイド等）を総合的に評価することが必要</p> <p>・そのために、幌延の泥岩を事例として、岩盤基質部（＝健岩部）および割れ目の双方を対象とした原位置トレーサー試験等を実施し、それぞれの構造の物質移行特性評価手法を構築することが重要</p> <p>・世界的にも事例が少ない泥岩などの人為的な割れ目を対象としたトレーサー試験手法を確立することも重要</p> <p>・あわせて、有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に及ぼす影響を把握することが重要</p>	<p>① 岩盤基質部（＝健岩部）を対象とした物質移行特性（物質の移動速度や岩盤へのくつきやすさ等）の評価手法の検証</p> <p>② 割れ目を対象とした物質移行特性（物質の移動速度や岩盤へのくつきやすさ等）の評価手法の検証</p> <p>③ 泥岩中の割れ目を対象としたトレーサー試験手法の検証</p> <p>④ 掘削損傷領域などの人為的な割れ目を対象とした物質移行特性（物質の移動速度や岩盤へのくつきやすさ等）の評価手法の検証</p> <p>⑤ 有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に及ぼす影響を把握</p> <p>⑥ 割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立</p>	<p>④ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>⑤ 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行モデル化手法の高度化</p>	<p>確立した試験手法を用いて掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得を実施するとともに、有機物や微生物が放射性物質を取り込んで移動する影響が限定的であることを確認する。また、物質移行評価手法の高度化するため以下を実施</p> <p>④ 確立したトレーサー試験手法を用いた掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得</p> <p>⑤ 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行試験</p> <p>⑥ 割れ目を有する堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むブロックスケール（数 m～100m 規模）における遅延性能評価手法の整備</p>	<p>④ 過年度の掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の解析評価</p> <p>⑤ 有機物・微生物・コロイドが核種移行に及ぼす影響の現象理解の継続、原位置トレーサー試験の着手</p>	<p>前半の5年程度で実施</p>					<p>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</p>					
	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	<p>④ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</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>					
	<p>掘削損傷領域の水領域の物理・物質移行特性を評価するためデータの取得を拡充</p>										<p>令和6年度までに得られる成果 ○原位置試験データ（非吸着性/吸着性トレーサー）の取得 ○EDZにおけるモデル化/解析評価手法の提示</p>				
	<p>⑤ 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行モデル化手法の高度化</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>				
	<p>室内試験データ（地下水中の有機物の掘削・装置を布等）を取得</p>										<p>令和6年度までに得られる成果 ○室内試験データの拡充 ○有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行モデルの提示</p>				
	<p>⑥ ブロックスケール（数 m～100m 規模）における遅延性能評価手法の整備</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>				
<p>原位置試験の準備作業としての物質移行試験装置の設置</p>										<p>令和6年度までに得られる成果 ○原位置試験データ（非吸着性/吸着性トレーサー）の取得 ○幌延を事例としたブロックスケールの評価手法の提示</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。

2.1 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	R4の実施内容	研究期間													
					前半					後半								
・処分場の操業（廃棄体の搬送定置・回収、処分場の閉鎖を含む）に関わる人工バリアの搬送・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証を目的として、幌延の地下施設を事例に、原位置試験を実施し、人工バリアの搬送定置・回収技術及び閉鎖技術を実証する	① 処分場の操業（廃棄体の搬送定置・回収、処分場の閉鎖を含む）に関わる人工バリアの搬送・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証 ② 個別の要素技術の実証試験 ③ 埋め戻し材、プラグに関する設計手法、製作・施工及び品質管理手法の確立	①②③ 操業・回収技術などの技術オプションの実証、閉鎖技術の実証	注入する地下水の圧力や量を増加させ、緩衝材に十分に水を浸潤させた状態を確保して施工方法（締め、ブロック方式等）の違いによる緩衝材の品質の違いを把握する。また、埋め戻し方法（プラグの有無等）・回収方法による埋め戻し材の品質の違いを把握する。	① 地下環境におけるコンクリートの劣化に関する試験、分析の継続 ② 閉鎖システム（埋め戻し材やプラグなど）に関する基礎情報の整備を目的とした解析検討、室内試験および原位置試験の継続	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	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				
					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								
地下環境で乾燥および湿潤条件下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のコンクリート中の中性化の程度の違いを確認					令和6年度までに得られる成果 ○実際の地下環境における支保部材の経年変化に係るデータ取得 ○坑道掘削・閉鎖後の地質環境変化に関する事象の把握								
② 閉鎖システム（埋め戻し材やプラグなど）に関する基礎情報の整備を目的とした解析検討、室内試験および原位置試験の継続					閉鎖システムに関する基礎情報の整備を目的とした解析検討、室内試験、工学規模試験を実施					閉鎖システムに関する基礎情報の整備を目的とした解析検討、室内試験、工学規模試験を実施								
② 閉鎖技術（埋め戻し方法：プラグ等）の実証					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施													
閉鎖システムに関する基礎情報の整備を目的とした解析検討、室内試験、工学規模試験を実施					閉鎖システムに関する基礎情報の整備を目的とした解析検討、室内試験、工学規模試験を実施					令和6年度までに得られる成果 ○シーリングシステムの長期性能評価に関する考え方の整理 ○緩衝材の膨潤挙動に影響を与える事象の整理 ○止水プラグの施工に関する重要技術の抽出 ○EDZ調査技術の評価・高度化 ○坑道内からのボーリング孔に対するシーリング技術の整備・実証								
③ 人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法のの違いに係る品質保証体系の構築					③ 人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施								
自然湧水環境での緩衝材の流出状況を確認					流量による影響に着目した緩衝材の流出試験を実施					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								
③ 人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築（(1)実際の地質環境における人工バリアの適用性確認のうち、人工バリア性能確認試験とあわせて実施）					③ 人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施								

※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	R4の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
・処分場の操業（廃棄体の搬送定置・回収、処分場の閉鎖を含む）に関わる人工バリアの搬送・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証を目的として、幌延の地下施設を事例に、原位置試験を実施し、人工バリアの搬送定置・回収技術及び閉鎖技術を実証する	① 処分場の操業（廃棄体の搬送定置・回収、処分場の閉鎖を含む）に関わる人工バリアの搬送・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証 ② 個別の要素技術の実証試験 ③ 埋め戻し材、プラグに関する設計手法、製作・施工及び品質管理手法の確立	④ 廃棄体の設置方法等の実証試験を通じた、坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化	人工バリアの品質を踏まえて、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するため以下を実施 ④-1 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化 ④-2 先行ボーリングによる地質環境特性調査ならびに工学的対策技術を考慮した、地下施設及び人工バリアの設計評価技術の体系化 ④-3 多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術及び処分孔支保技術の整備、緩衝材流出・侵入現象評価手法及び抑制対策技術の整備 ④-4 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理	後半の5年程度で実施するため、R4は実施しない	他の研究課題を取り込んで体系化して取り組む課題として、後半の5年程度で実施									
					-					④-1 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化				
										④-2 地下施設及び人工バリアの設計評価技術の体系化				
										④-3 多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術及び処分孔支保技術の整備、緩衝材流出・侵入現象評価手法及び抑制対策技術の整備				
					④-4 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理									

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

※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)など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	R4の実施内容	研究期間														
					前半					後半									
					前半の5年程度で実施														
<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>①-1 100℃を超えた状態における現象等の調査事例に基づく課題の抽出、データ取得や解析手法の高度化の計画の策定</p>	<p>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</p>					<p>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</p>									
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	<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>					
					<p>海外での先行研究原位置試験事例の調査結果を（試験条踏まえた件、手法課題の抽出）を入手</p>										<p>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</p>				
			<p>①-2 100℃を超え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</p>	<p>①-2 100℃を超えた状態での人工バリアの基本特性やニアフィールドでの熱-水-応力-化学に係る連成現象に関する試験・解析およびシナリオ検討事例の調査、わが国の処分概念や設計オプションを想定したシナリオの整理</p>	<p>①-2 100℃を超えた際にニアフィールドにおいて発生する現象の整理</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>									
					<p>シナリオ先行研究の検討に事例の調査(水分査(緩衝材移動、物質の鉱物・性移動特性)能変化)</p>										<p>令和6年度までに得られる成果 ○100℃を超えた際にニアフィールドにおいて発生する現象の整理</p>				
					<p>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)</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>				
<p>海外での原位置試験の情報(試験条件、手法等)を入手</p>										<p>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</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。

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	R4の実施内容	研究期間														
					前半					後半									
<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 の断層における地震動や坑道掘削に伴う、割れ目における地下水の流れの変化に関して、堆積岩の緩衝能力（自己治癒能力）を実証するために、以下の検討や試験を実施する</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>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</p> <p>②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備</p>	<p>②-1～3 既往の水圧擾乱試験の結果の解析</p> <p>②-1～3 DI と断層/割れ目の水理学的連結性の関係に関する解析</p>	<p>前半の5年程度で実施</p> <p>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</p>														
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	<p>②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握</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>					
					<p>より大型の水圧擾乱の断層を試験やシミュレーションの乱試験を結果に基実施し、デバッグモデルを改良</p>										<p>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</p>				
					<p>②-2 DIを用いた透水性評価の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備</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>				
					<p>割れ目の水圧擾乱水理学的試験やシミュレーションの領域区分シミュレーションの遷移領域を追加</p>										<p>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</p>				
					<p>②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備</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>				
					<p>より大型断層の活動性評価対象として係る既往の水圧擾乱試験を実施し、データを取得</p>										<p>令和6年度までに得られる成果 ○水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備</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。

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	R4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（化石海水領域）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 ③ 地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）の調査・評価技術の検証	③、④-1 電磁探査により推定した化石海水領域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 R4 までの成果に基づき、物理探査およびボーリング調査によるデータ取得から地球統計学的手法による化石海水領域の三次元分布の推定に至る一連の手法の整理	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				
					③ 地下水の流れが非常に遅い領域の調査・評価技術の検証					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					化石海水領域を把握するための物理探査を実施し、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				
					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					令和6年度までに得られる成果 ○化石海水領域の調査・評価技術の整備・高度化				
④-2 広域スケール（十数km×十数km）を対象とした水理・物質移動解析の結果に基づき、古水理地質学的変遷が化石海水領域に与える影響を評価するための広域スケールのモデル化・解析手法の整理					④-2 広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の検証					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
広域スケールの地下水流動に深度・気候などが与える影響を整理					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					令和6年度までに得られる成果 ○広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の整備				

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

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

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

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	R4の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
					前半の5年程度で実施									
・地震・断層活動等の地殻変動に対する堆積岩の力学的・水理学的な緩衝能力（自己治癒能力）を定量的に検証し、堆積岩地域における立地選定や処分場の設計を、より科学的・合理的に行える技術と知見を整備する	① 人工バリアの緩衝材や坑道の埋め戻し材による掘削損傷領域（EDZ）のひび割れの自己治癒能力を評価する手法の確立 ② 人工バリアの自己治癒能力（ひび割れの修復）を実証	② 地殻変動による人工バリアの緩衝材や坑道埋め戻し材の掘削損傷領域（EDZ）への自己治癒能力の実証	人工バリアのひび割れに対する自己治癒能力を実証するため以下の机上検討を実施 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	② DI を用いた EDZ の透水性を予測する既存モデルの再検証 ② 坑道埋め戻し後の EDZ の透水性を推定するモデルの構築	②-1 DI を用いた EDZ の透水性を予測する既存モデルの再検証 試料観察に基づき、試験やシミュレーションの結果に基づきモデルを改良					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 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 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				
					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 試料観察に基づき、戻し後の EDZ の割れ目や割れ目が EDZ の透水性に与える影響を確認					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施 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) 日本原子力研究開発機構：平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書 廃棄物埋設における性能評価手法に関する調査, 2019.
- (2) Pusch, P. and Madsen, F. T.: Aspects on the illitization of the Kinnekulle bentonites, *Clays and Clay Minerals*, vol.43, 1995, pp.261-270.
- (3) Wersin, P., Johnson, L. H. and McKinley, I. G.: Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100°C, *Physics and Chemistry of the Earth*, vol.32, 2007, pp.780-788.
- (4) Zheng, L., Rutqvist, J., Birkholzer, J. T. and Liu, H. H.: On the impact of temperatures up to 200°C in clay repositories with bentonite engineer barrier systems: A study with coupled thermal, hydrological, chemical, and mechanical modeling, *Engineering Geology*, vol.197, 2015, pp.278-295.
- (5) Zheng, L., Rutqvist, J., Xu, H. and Birkholzer, J. T: Coupled THMC models for bentonite in an argillaceous repository for nuclear waste: Illitization and its effect on swelling stress under high temperature, *Engineering Geology*, vol.230, 2017, pp.118-129.
- (6) Huang, W. L., Longo, J. M. and Pevear, D. R.: An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer, *Clays and Clay Minerals*, vol.41, 1993, pp.162-177.
- (7) Ishii, E.: Predictions of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones from rock rheology: Preliminary results, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.120, 2015, pp.2220-2241.
- (8) Kuang, X. and Jiao, J.J.: An integrated permeability-depth model for Earth's crust, *Geophysical Research Letters*, vol.41, 2014, pp.7539-7545.
- (9) 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.
- (10) 中山雅(編):幌延深地層研究計画 令和 2 年度調査研究成果報告, *JAEA-Review* 2021-053, 2022, 133p.
- (11) Krietsch, H., Gischig, V.S., Doetsch, J., Evans, K.F., Villiger, L., Jalali, M., Valley, B., Löw, S. and Amann, F.: Hydromechanical processes and their influence on the stimulation effected volume: observations from a decameter-scale hydraulic stimulation project, *Solid Earth*, vol.11, 2020, pp.1699-1729.
- (12) Ishii, E.: A conventional straddle-sliding-packer system as a borehole extensometer: Monitoring shear displacement of a fault during an injection test, *Engineering Geology*, vol.275, 2020, 105748.

- (13) Ohno, H. and Ishii, E.: Effect of fault activation on the hydraulic connectivity of faults in mudstone, *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2022, 100317. in press.
- (14) Asadollahi, P. and Tonon, F.: Constitutive model for rock fractures: Revisiting Barton's empirical model, *Engineering Geology*, vol.113, 2010, pp.11-32.
- (15) Aoyagi, K., Ishii, E., Chen, Y. and Ishida, T.: Resin-injection testing and measurement of the shear displacement and aperture of excavation-damaged-zone fractures: A case study of mudstone at the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, in press.