

幌延深地層研究計画に関する 令和5年度の計画及び進捗

令和5年10月30日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド研究開発部門
幌延深地層研究センター 深地層研究部

報告内容

I. 令和2年度以降の計画の概要

- 1.1 研究計画の工程
- 1.2 幌延国際共同プロジェクト(HIP)
- 1.3 原位置試験の実施予定場所
- 1.4 施設整備
- 1.5 深度500mでの研究の意義と体系化
- 1.6 体系化研究のイメージ
- 1.7 体系化研究と個別課題の関係
- 1.8 地層処分システムの変遷と課題との関係

II. 令和5年度の計画及び進捗

- 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
 - 1.2 物質移行試験
- 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
 - 2.1.2 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
 - 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
- 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
 - 3.1.2 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
 - 3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

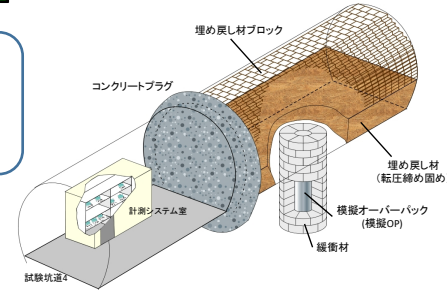
I . 令和2年度以降の計画の概要

1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

1.1 人工バリア性能確認試験

1.2 物質移行試験

赤文字は幌延国際共同プロジェクトの対象課題



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

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

2.1.2 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

2.2 高温度(100℃以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験



閉鎖技術オプションの整理

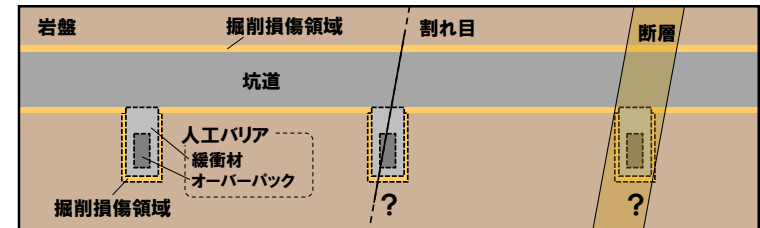
3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

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

3.1.2 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

3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験





廃棄体定置決定や間隔設定の考え方の整理

I . 令和2年度以降の計画の概要

1.1 研究計画の工程

		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	人工バリアの位置・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	搬送位置・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・水理的な緩衝能力に与える影響を把握する解析手法の開発								

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

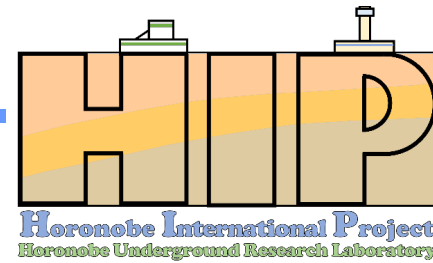
	個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題(2.1.2)に統合して実施する。
	2.1.2を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

令和5年度における研究実施の留意点:

- ① 令和5年度または令和6年度の個別研究課題の成果取りまとめ
- ② 幌延国際共同プロジェクト(HIP)の着実な実施
- ③ 令和6年度以降の体系化研究の計画の具体化

I . 令和2年度以降の計画の概要

1.2 幌延国際共同プロジェクト(HIP)



【前提】

- 「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」に沿って、**令和10年度末までを限度として実施**。
- 「**幌延町における深地層の研究に関する協定書**」の遵守を大前提に進める。

【目的】

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実際の深地層での研究開発を多国間で協力しながら推進するもの。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成果を最大化するとともに、それを通して知識と経験を共有し次世代を担う国内外の技術者や研究者を育成。

【実施内容】

高レベル放射性廃棄物の地層処分場の合理的設計、操業、閉鎖および地層処分システムの安全性評価で用いる先進的技術の開発・実証は国際的な課題。このため、幌延深地層研究センターの地下施設を活用して、国際的に関心の高い以下の項目に取り組む。

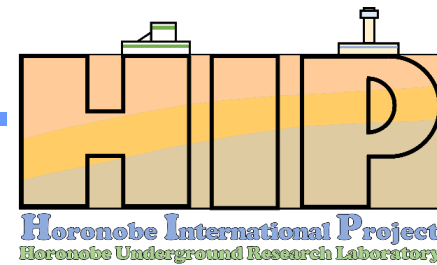
(カッコ内は「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」の課題名)

- タスクA:物質移行試験(実際の地質環境における人工バリアの適用性確認)
- タスクB:処分技術の実証と体系化(処分概念オプションの実証)
- タスクC:実規模の人工バリアシステム解体試験

(実際の地質環境における人工バリアの適用性確認)

I . 令和2年度以降の計画の概要

1.2 幌延国際共同プロジェクト(HIP)



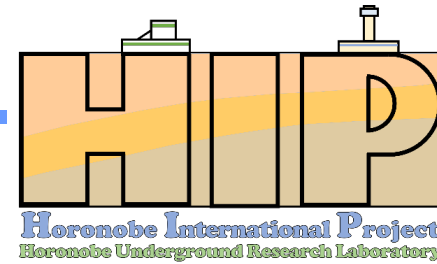
【参加機関】

- 令和3年度～4年度において、参加を表明した研究機関と準備会合(計5回)を実施
プロジェクトの内容や実施分担などについて議論し、協定書の内容に基本合意(令和4年10月)
- 英国地質調査所と原子力機構の署名により協定発効:令和5年2月8日

参加機関(署名順)	署名日	タスクA	タスクB	タスクC
英国地質調査所(BGS、英国)	2/7	○	○	○
日本原子力研究開発機構(JAEA、日本)	2/8	○	○	○
原子力テクノロジー国営会社(RATEN、ルーマニア)	2/8	○	—	—
工業技術研究院(ITRI、台湾)	2/10	○	—	—
韓国原子力研究所(KAERI、韓国)	3/15	○	○	○
連邦放射性廃棄物機関(BGE、ドイツ)	3/28	○	○	○
原子力環境整備促進・資金管理センター(RWMC、日本)	4/3	—	○	○
原子力発電環境整備機構(NUMO、日本)	4/3	○	○	○
電力中央研究所(CRIEPI、日本)	4/3	○	—	○
オーストラリア連邦科学産業研究機構(CSIRO、オーストラリア)	4/28	○	○	○
国営放射性廃棄物会社(SERAW、ブルガリア)	7/18	○	○	○

I . 令和2年度以降の計画の概要

1.2 幌延国際共同プロジェクト(HIP)



実施状況(全体概要)

- 第1回管理委員会(4/11-12, パリ):実施計画の承認
- 合同タスク会合(6/28, ウェブ):各タスクの詳細計画を確認
- タスクAに関する現地会合(9/6, 幌延):原位置試験現場確認、意見交換など
- タスクBに関する現地会合(10/13, 幌延):解析に関する意見交換など
- タスク会合(タスクA:9/26)

合同タスク会合で共有した詳細計画を踏まえた
令和5年度実施計画、各機関の進捗状況の共有、議論

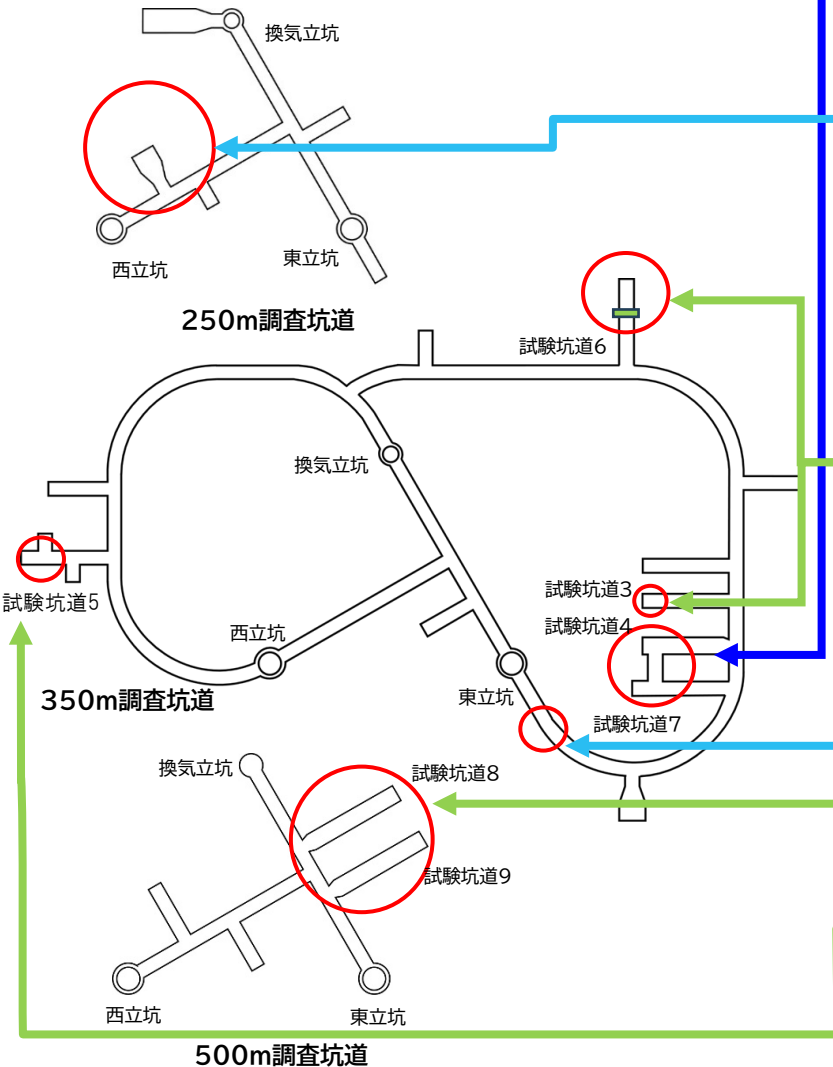


タスクA現地会合:原位置試験現場確認の様子

I. 令和2年度以降の計画の概要

1.3 原位置試験の実施予定場所

令和2年度以降の課題における 原位置試験の実施予定場所



●実際の地質環境における人工バリアの適用性確認に関わる研究

1)人工バリア性能確認試験

連成解析技術の信頼性を確認するため、試験坑道4で人工バリアの解体、センサーの較正、分析を実施。

2)物質移行試験

ブロックスケールにおける遅延性能評価手法を整備するため、250m調査坑道で物質移行データを取得。有機物・微生物・コロイドの影響評価手法を整備するため、350m周回坑道で物質移行データを取得。

●処分概念オプションの実証に関わる研究

1)閉鎖技術(埋め戻し方法・プラグ等)の実証試験

坑道閉鎖に関わる地下施設及び人工バリアの設計評価技術を体系化するための実証試験を実施。

2)掘削影響試験

多接続坑道での湧水抑制対策技術及び処分孔支保技術を整備するために、試験坑道8、9でボーリング調査、物理探査などを実施。

3)初期地圧測定

坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術を体系化するため、500m調査坑道で初期地圧測定を実施。

4)高温条件での人工バリア性能確認試験

緩衝材の最高温度が100℃を超えた状態での人工バリア性能に関する試験データを整備するため、試験坑道5で原位置加熱試験を実施。

I .令和2年度以降の計画の概要

1.4 施設整備

施設整備工程の更新

本年4月より地下施設の施設整備業務を開始し、深度500m掘削に向けた準備を実施している。湧水抑制対策（グラウト工）のための先行ボーリング結果に基づき、施工方法の最適化の検討を進めた結果、施設整備工程を更新することとした。（本年8月9日に北海道及び幌延町にご説明するとともにHPに掲載）

【工程更新の主な理由】

1. 先行ボーリング結果に伴う湧水抑制対策期間の見直し

- ・ 湧水抑制対策は、先行ボーリングによる調査を実施し、詳細な施工範囲を決定
- ・ 調査の結果、換気立坑の湧水抑制対策範囲を合計で約50m分拡充、施工期間を6か月程度延長
- ・ 東立坑は、湧水抑制対策の進捗が早く、予定より2か月程度早期に掘削に着手できる見通し

2. コンクリート打設長の見直しに伴う掘削期間の短縮

- ・ 東立坑および西立坑の覆工コンクリートの打設長は、当初、岩盤状態が悪い条件で適用する1mを標準案
- ・ 受注時の事業者からの技術提案として改善策が提示され、解析結果により採用の是非を判断
- ・ 解析の結果、打設長を前回工事でも実績のある2mとすることが可能と判断
- ・ これにより、東立坑および西立坑の掘削期間が6か月程度短縮

	R5年度	R6年度	R7年度
350m調査坑道			
換気立坑			
東立坑			
西立坑			
500m調査坑道			

■見直し後の工程、■見直し前の工程

※段取りや設備等の準備期間を含む（湧水抑制対策は含まない）

※本工程は、今後も現場の進捗等に応じて適宜見直しを行う

【工程の主な更新内容】

- ・ 令和5年度の第2四半期に換気立坑より順次着手としていた立坑掘削について、東立坑より着手
- ・ 西立坑は令和6年度下期から着手予定
- ・ 深度500m調査坑道については予定通り、令和7年度末に完成する見込みであり、研究計画への影響なし

I .令和2年度以降の計画の概要

1.4 施設整備

350m調査坑道の拡張作業状況

掘削状況

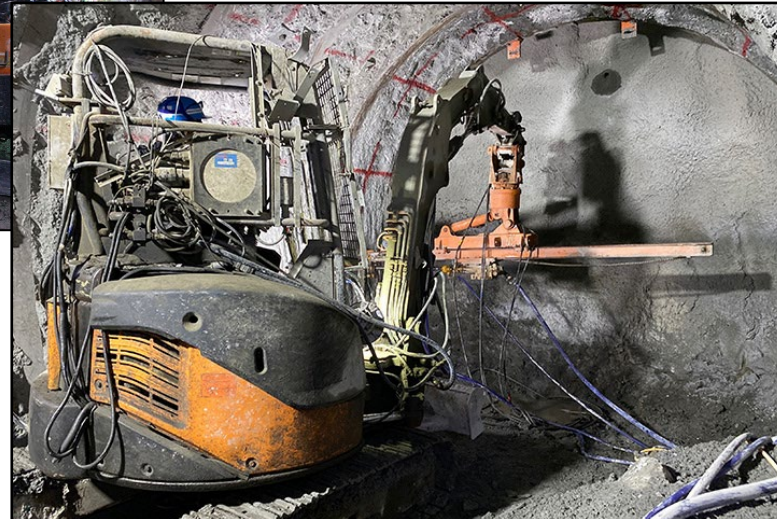
6月13日 試験坑道6の掘削開始

9月13日 試験坑道7の掘削開始

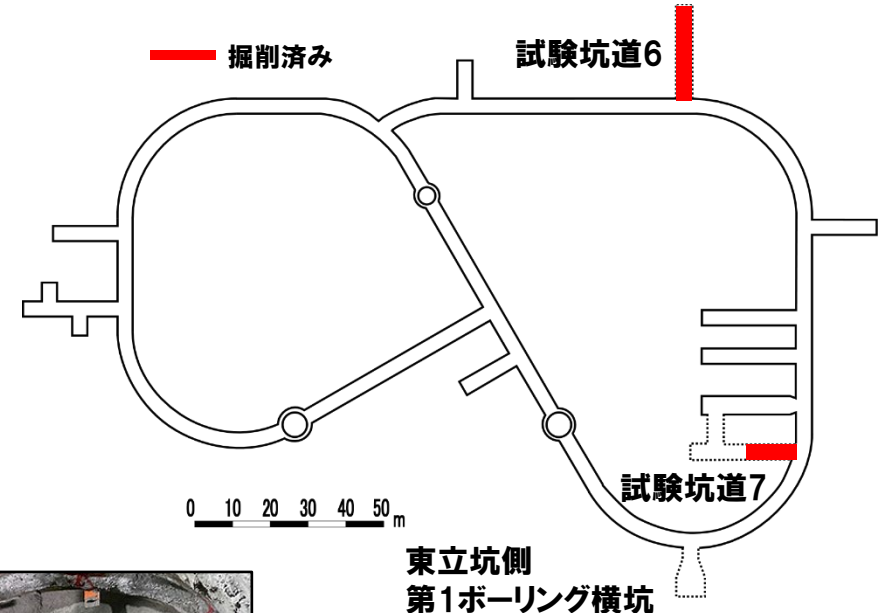
10月19日現在の掘削長:39m/66m



試験坑道6掘削開始時の状況



試験坑道7の掘削状況(ロックボルトの施工)



東立坑側
第1ボーリング横坑

(令和5年10月19日現在)

350m調査坑道平面図
(拡張範囲:点線部)

I .令和2年度以降の計画の概要

1.4 施設整備

500mに向けた東立坑の掘削作業状況

掘削状況

東立坑の掘削再開:9月29日

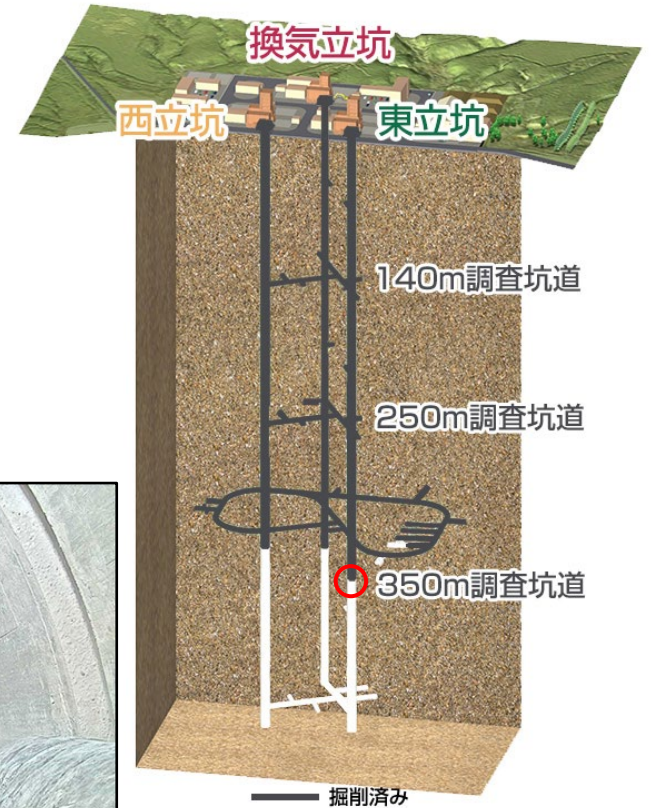
10月19日現在の掘削長:2m/135m



東立坑掘削開始時の状況
(380m底盤)



東立坑の掘削状況(R5.10.17)
(型枠(センター)の設置)



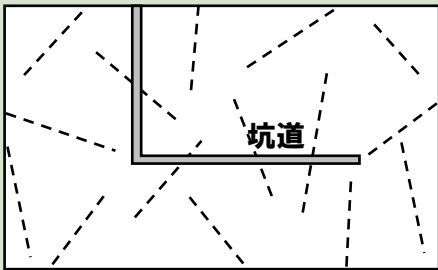
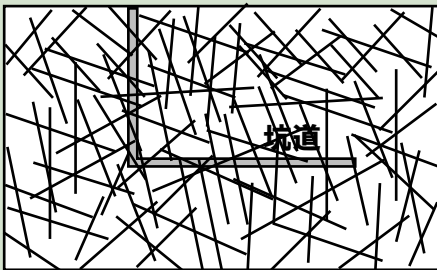
【地下施設イメージ図】
(令和5年10月19日現在)

I . 令和2年度以降の計画の概要

1.5 深度500mでの研究の意義と体系化

深度350mとは性質の異なる深度500mの地層を対象に、坑道を展開して研究に取り組むことで、主に以下の成果が得られ、技術基盤の整備に、より一層貢献可能。

- 高い地圧がかかり坑道の設計・施工上の難易度が高い地質条件下で、処分技術に関わる基盤技術を実証。
- 物質が動きにくい環境で岩盤が有する物質を閉じ込める性能が実証でき、人工バリア等の技術仕様の精緻化を提案。
- 水の流れに大きな影響を及ぼす掘削影響領域を含めた安全評価技術を体系的に実証可能。

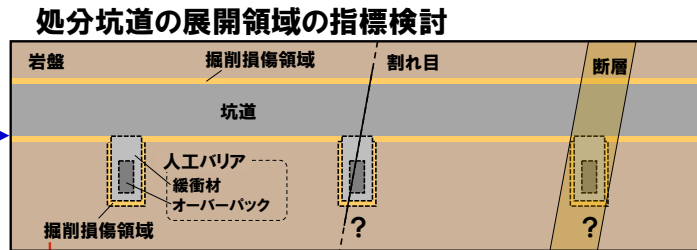
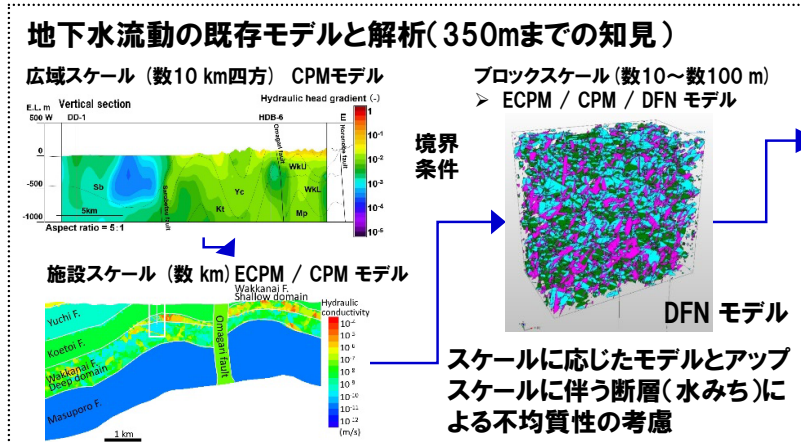
ポイント	深度500m	深度350m
処分技術	<ul style="list-style-type: none"> • 土圧が大きく、岩石が軟らかい • 地下水圧が高い <p>⇒ 高い地圧がかかり坑道の設計・施工上の難易度が高い地質条件下で、処分技術に関わる基盤技術を実証できる</p> <p>⇒ 海外でも事例が少ない堆積岩の深度500mにおいて処分技術を実証できる</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 土圧が小さく、岩石が硬い • 地下水圧が低い <p>⇒ 地圧が低く坑道の設計・施工上の難易度が低い地質条件下で、処分技術に関わる基盤技術を実証できる</p>
安全評価	<ul style="list-style-type: none"> • 地下水や物質が割れ目内を流れにくい • 岩盤中の割れ目が少なく、坑道の掘削により掘削損傷領域がより広く発達すると考えられる <p>⇒ 物質が動きにくい環境で、岩盤が有する物質を閉じ込める性能が実証でき、人工バリア等の技術仕様が精緻化できる</p> <p>⇒ 水の流れに大きな影響を及ぼす掘削影響領域も含めた安全評価技術を体系的に実証できる</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 地下水や物質が割れ目内を流れやすい • 岩盤中の割れ目が多く、坑道の掘削による掘削損傷領域の発達度合いは小さい <p>⇒ 水が流れやすい割れ目が多くつながる領域を対象とした安全評価技術を体系的に実証できる</p>
イメージ図	<p>立坑</p>  <p>坑道</p> <p>----- 水が流れにくい割れ目</p>	<p>立坑</p>  <p>坑道</p> <p>———— 水が流れやすい割れ目</p>

I. 令和2年度以降の計画の概要

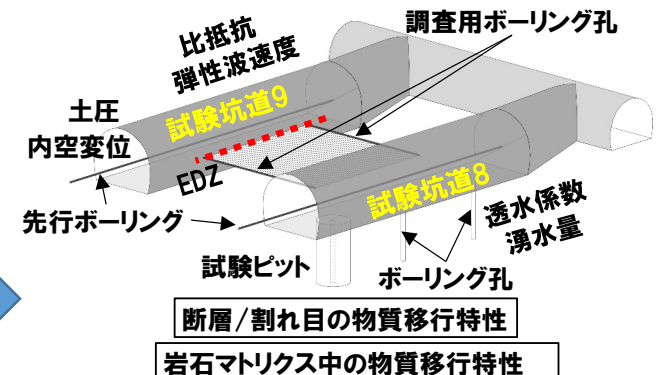
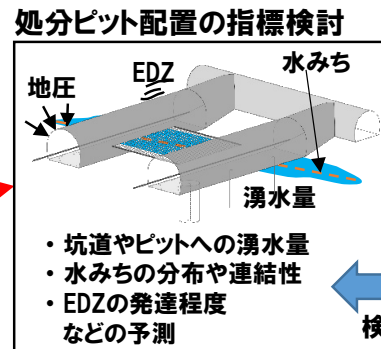
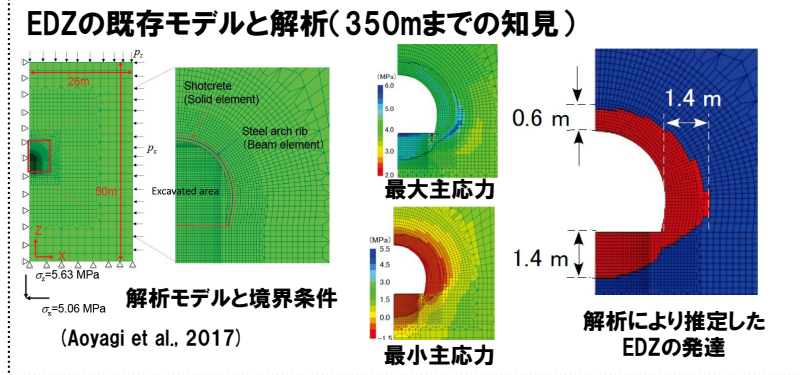
1.6 体系化研究のイメージ

処分坑道・ピットを配置するための設計概念や指標および関連技術を体系的に整備、最適化

- 実際に坑道を掘削して、地質環境の調査、設計・施工、物質移動に関わる解析等を実施し、廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報等を整理するなど処分技術を実証



物質が移動し難い領域の事例として、500m調査坑道を対象として処分ピットの配置を事前検討し、実際に施工してその妥当性を確認するとともに、必要な工学技術を実証する。

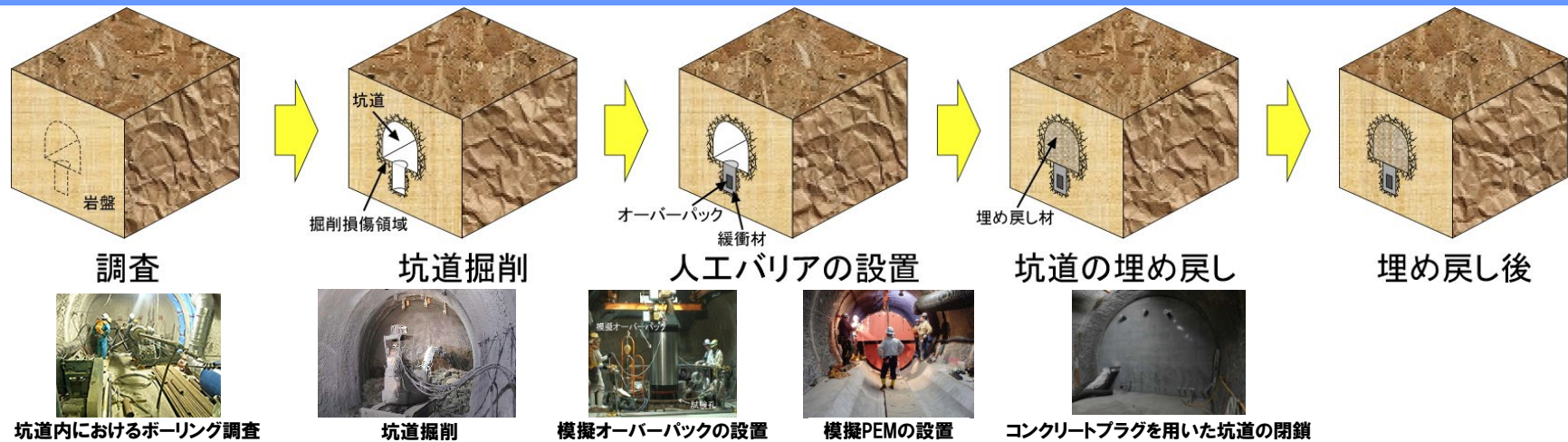


地質環境特性に基づきグラウトの必要性や処分坑道・ピットの配置を決定

特性の異なる岩盤中の物質移行モデルの構築、地下深部から地上までの物質移行・閉じ込め性能の評価(安全評価技術の適用性評価)

I. 令和2年度以降の計画の概要

1.7 体系化研究と個別課題の関係



必須の課題の項目		各課題の成果が地層処分事業のどの時点に反映されるのか？		
		調査	建設(坑道掘削)・操業(人工バリアの設置)・坑道の埋め戻し	坑道の埋め戻し後の評価
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	人工バリア設計手法の確認	人工バリア設置技術、坑道埋め戻し方法の確認	人工バリア、埋め戻された坑道で起こる現象の確認
	1.2 物質移行試験	岩盤中での物質の動きの調査技術の確認	岩盤中、掘削損傷領域での物質の動きの調査技術の確認	岩盤中での物質の動きの解析評価技術(安全評価技術)の確認
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	人工バリア設置、坑道埋め戻しの技術オプションの確認	
		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～ピットの配置、掘削・操業・閉鎖技術の体系化、坑道周辺の物質の動きの確認	埋め戻し後の掘削損傷領域、岩盤中の物質の動きの予測解析技術の確認
	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			限界条件下で人工バリアで起こる現象の確認
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	長期的な岩盤中の水の動き易さを推測する技術の確認	
		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	長期的な地下水の流動状態を把握する技術の確認	
	3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験		坑道、人工バリア周辺の地下水の動き易さを推測する技術の確認	埋め戻された坑道、人工バリア周辺の地下水の動きを推測する技術の確認

黒文字：令和元年度までに実施済 青文字：令和2年度以降計画の前半に実施 赤文字：令和2年度以降計画の後半に実施

I . 令和2年度以降の計画の概要

1.8 地層処分システムの変遷と課題との関係

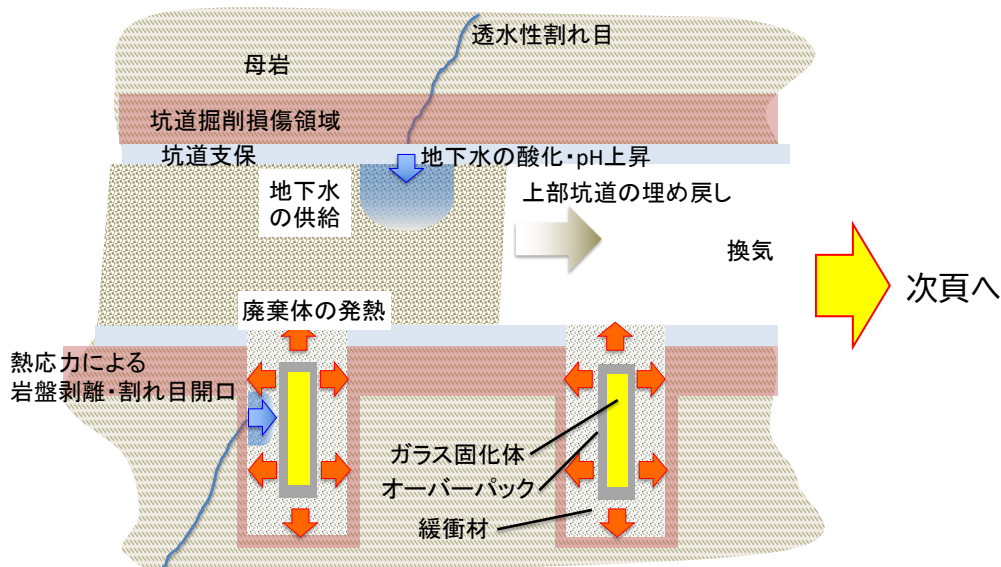
令和2年度以降の幌延深地層研究計画における研究課題

- 1.1 人工バリア性能確認試験
- 1.2 物質移行試験
- 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
- 2.2 高温度(100℃以上)などの限界条件下での人工バリア性能確認試験

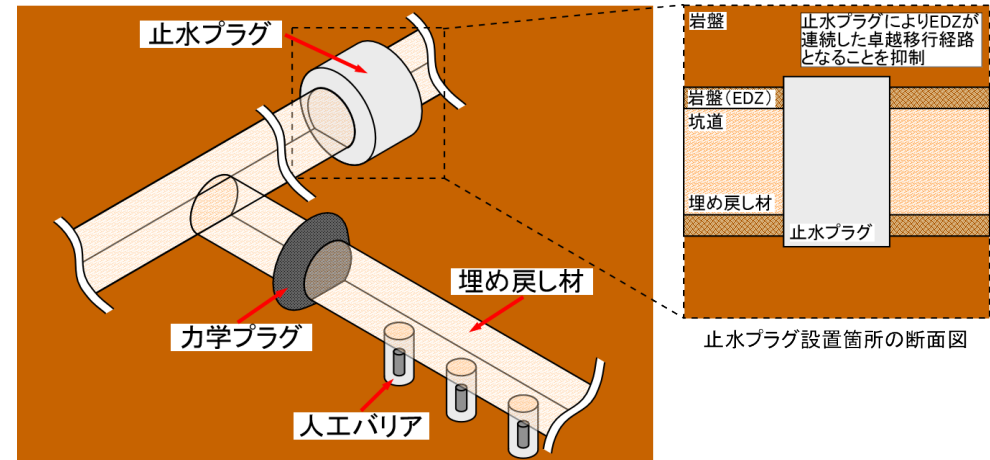
- 3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化
- 3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

各課題で確認する事象は、以下の通り。

建設・操業・埋め戻し期間



- ・ピットの配置・施工(2.1)
- ・掘削影響による割れ目の生成、既存割れ目の開口(2.1)
- ・セメント等の人工材料の設置(2.1)
- ・岩盤割れ目部からの湧水(2.1)
- ・周辺岩盤の物理化学変化(2.1) など



処分場の埋め戻し(閉鎖)時

- ・止水プラグの性能を確保できる品質を達成可能な施工方法の検討(2.1)
- ・止水プラグや坑道の埋め戻しの設計に資する掘削損傷領域(EDZ)の調査技術の高度化(2.1)

処分場の埋め戻し(閉鎖)後

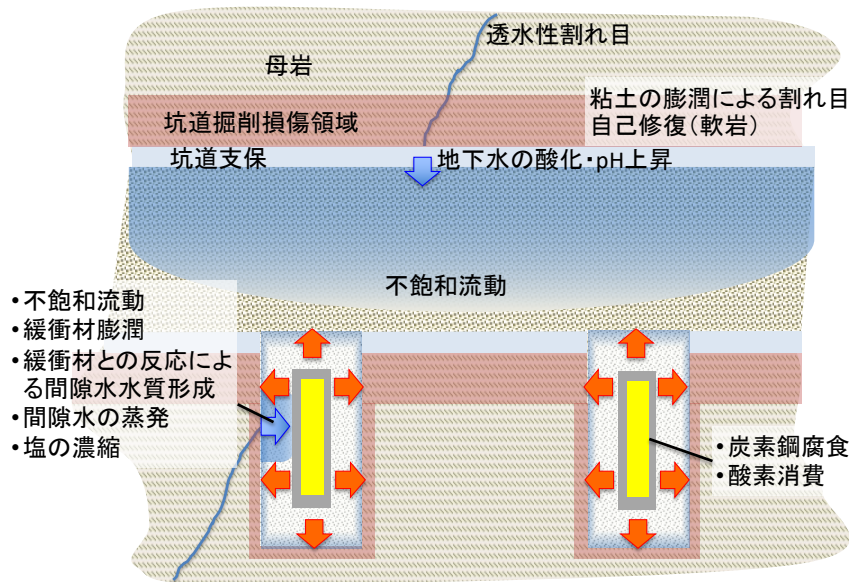
- ・止水プラグの地下水移行抑制機能の評価(2.1)

I . 令和2年度以降の計画の概要

1.8 地層処分システムの変遷と課題との関係

処分場閉鎖～ニアフィールド'遷移状態(閉鎖後1,000年まで)

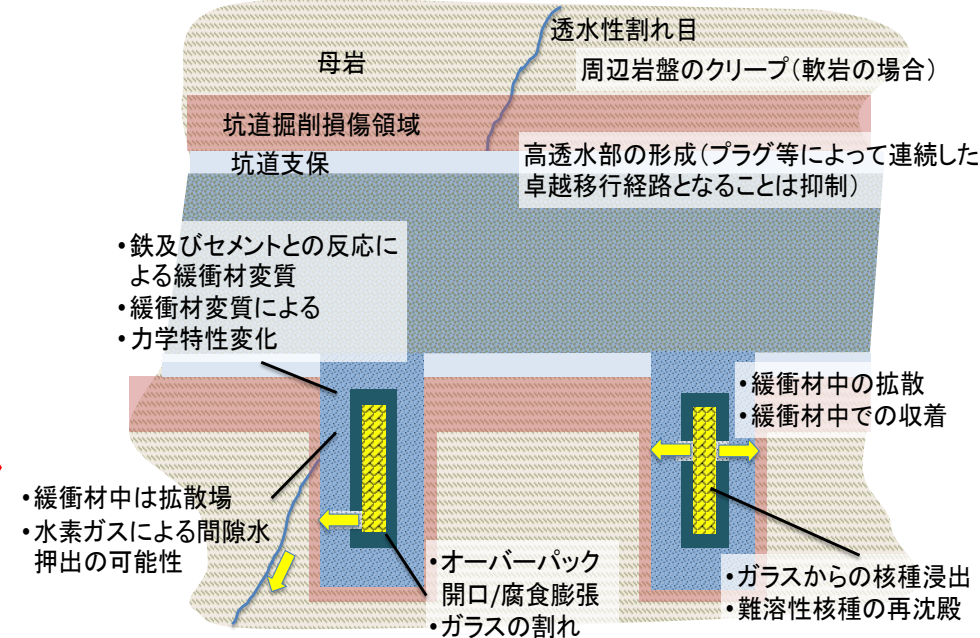
(廃棄体の発熱の顕著な期間)



- ・不飽和流動
 - ・緩衝材膨潤
 - ・緩衝材との反応による間隙水水質形成
 - ・間隙水の蒸発
 - ・塩の濃縮
 - ・炭素鋼腐食
 - ・酸素消費
- ・緩衝材への含水による熱特性の変化、膨潤圧の発生、透水性の変化(1.1, 2.2)
 - ・緩衝材間隙水の蒸発による塩の濃縮(1.1, 2.2)
 - ・緩衝材の膨潤による割れ目自己修復(1.1, 2.2)
 - ・廃棄体からの発熱、減熱による水分移動への影響(1.1, 2.2)
 - ・オーバーパックの腐食および腐食による強度低下(1.1) など

人工バリア・岩盤での核種移行(1,000年後以降)

(環境条件が定常に至り、外部環境と伴に変遷していく期間: 数万年～数十万年)



- ・鉄及びセメントとの反応による緩衝材変質
 - ・緩衝材変質による力学特性変化
 - ・緩衝材中の拡散
 - ・緩衝材中での収着
 - ・緩衝材中は拡散場
 - ・水素ガスによる間隙水押出の可能性
 - ・オーバーパック開口/腐食膨張
 - ・ガラスの割れ
 - ・ガラスからの核種浸出
 - ・難溶性核種の再沈殿
- ・廃棄体の発熱低下(1.1)
 - ・緩衝材の流出/膨出による密度低下(1.1, 2.1)
 - ・緩衝材の変質による力学特性の変化(1.1, 2.1)
 - ・オーバーパックの腐食膨張による緩衝材の圧密(1.1)
 - ・鉄/ベントナイト、コンクリート/ベントナイト相互作用による緩衝材の変質(1.1)
 - ・開口した割れ目等に沿った地下水流動(1.2, 2.1, 3.2)
 - ・放射性核種の移行(1.2)
 - ・緩衝材の侵食による人工バリア内の移流場の形成(1.1)
 - ・長期的な岩盤変位による緩衝材への影響(3.1, 3.2) など

報告内容

I. 令和2年度以降の計画の概要

- 1.1 研究計画の工程
- 1.2 幌延国際共同プロジェクト(HIP)
- 1.3 原位置試験の実施予定場所
- 1.4 施設整備
- 1.5 深度500mでの研究の意義と体系化
- 1.6 体系化研究のイメージ
- 1.7 体系化研究と個別課題の関係
- 1.8 地層処分システムの変遷と課題との関係

II. 令和5年度の計画及び進捗

- 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
 - 1.2 物質移行試験
- 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
 - 2.1.2 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
 - 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
- 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
 - 3.1.2 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
 - 3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

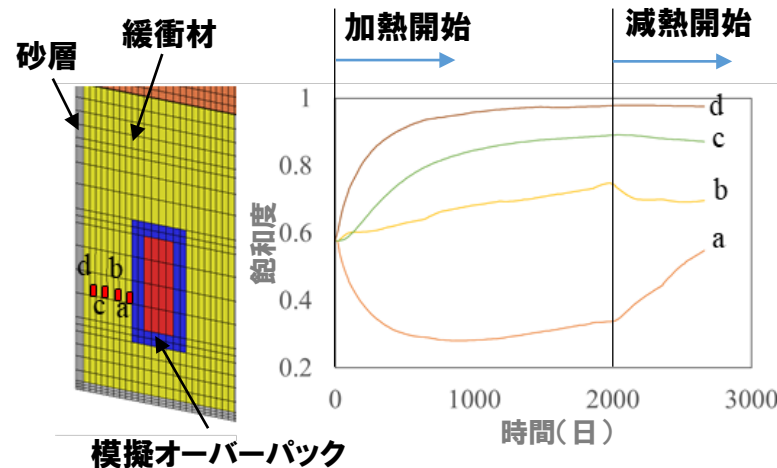
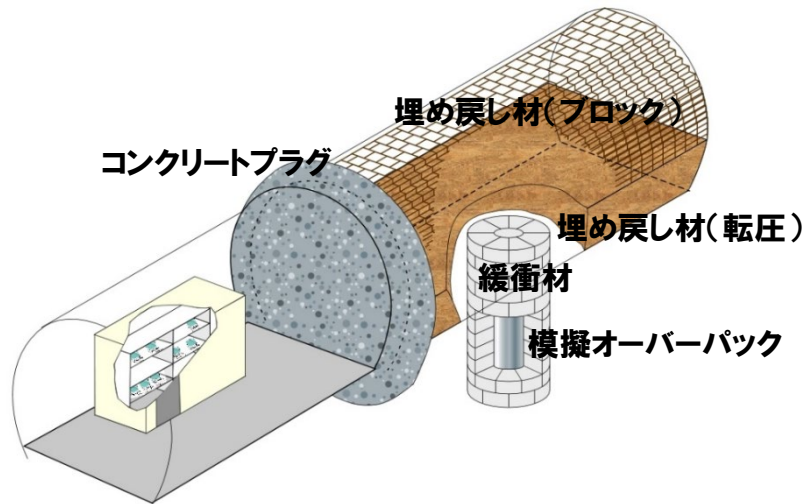
1.1 人工バリア性能確認試験

【第4期中長期計画 目的】

幌延URLの地下350mで実施している人工バリア性能確認試験で取得されたデータをもとに、人工バリア定置後、緩衝材が飽和に至るまでに発生する人工バリア周辺での熱-水-応力-化学連成現象の評価と現象を予測するための解析モデルの検証を実施

【令和5年度の計画・進捗】

- 人工バリア性能確認試験のデータを対象とした連成解析モデルや解析結果の検証(国際共同研究 DECOVALEX2023における複数の機関によるベンチマーク解析、異なるコードの比較分析を実施)
【令和5年度に結果を取りまとめる】
- 人工バリア性能確認試験の解体調査計画の具体化(HIP: Task C)



人工バリア性能確認試験で取得された温度、水分量、応力の経時変化を対象とした連成解析を実施し、各参加機関の解析結果との比較検証を行う

人工バリア性能確認試験の概要図

平成26年度からデータ計測を開始、令和5年度は令和8年度から開始予定の解体調査計画についてHIPで議論

DECOVALEXにおける解析検討の一例(JAEA)

緩衝材5段目における飽和度分布の連成解析結果

【参考】 国際共同研究 DECOVALEX

【国際共同研究DECOVALEX】

地層処分環境における熱－水－応力－化学（THMC）連成現象の理解および評価モデルの検証を目的に実施されている国際共同研究であり、1992年から4年程度の期間でフェーズが進められ、現在は第8フェーズとなる

（DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments）

【DECOVALEX2023の概要】

- 2020年から2023年の4年間、事務局はLBNL（米国）
- 参加機関は19機関、採決されたタスクは7（A～G）
- JAEAは室内試験および幌延の人工バリア性能確認試験のデータを用いた解析評価モデルの比較をタスクとして提案（タスクD）
- タスクDの参加チームはJAEA（日本）、BGR（ドイツ）、CAS（中国）、KAERI（韓国）、SNL（米国）、TPC（台湾）

【Task Dの概要】

● JAEAによる個別の室内試験結果を対象とした解析結果の比較

目的: 比較的単純な系での比較により、解析コードの特徴を把握するとともに、一部パラメータをフィッティングにより求める。必要に応じて解析コードを更新

解析対象: 膨潤圧試験、膨潤変形試験、浸潤試験、温度勾配水分拡散試験結果

● 幌延URLでの人工バリア性能確認試験を対象とした解析結果の比較

目的: 実現象に近い系での比較により、推定したパラメータや評価手法の妥当性を検証

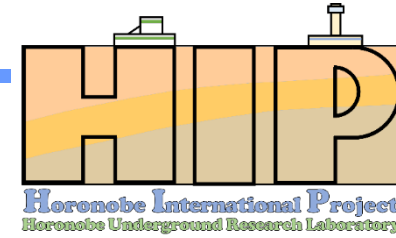
解析対象: 温度、飽和度、応力、変位の経時変化

各機関の解析コード

チーム	解析コード	力学モデル	水理モデル
BGR	OpenGeoSys	弾性モデル/ 弾塑性モデル	単相流
CAS	CASRock	弾性モデル	単相流
KAERI	COMSOL	弾塑性モデル	二相流
JAEA	THAMES	弾性モデル	単相流
	MACBECE	弾塑性モデル	-
SNL	PFLOTRAN	-	二相流
TPC	COMSOL	弾性モデル	単相流

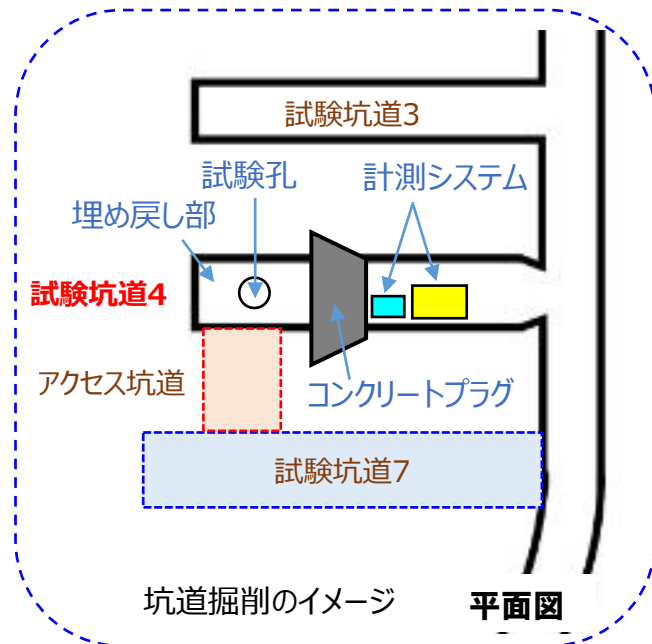
1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

1.1 人工バリア性能確認試験

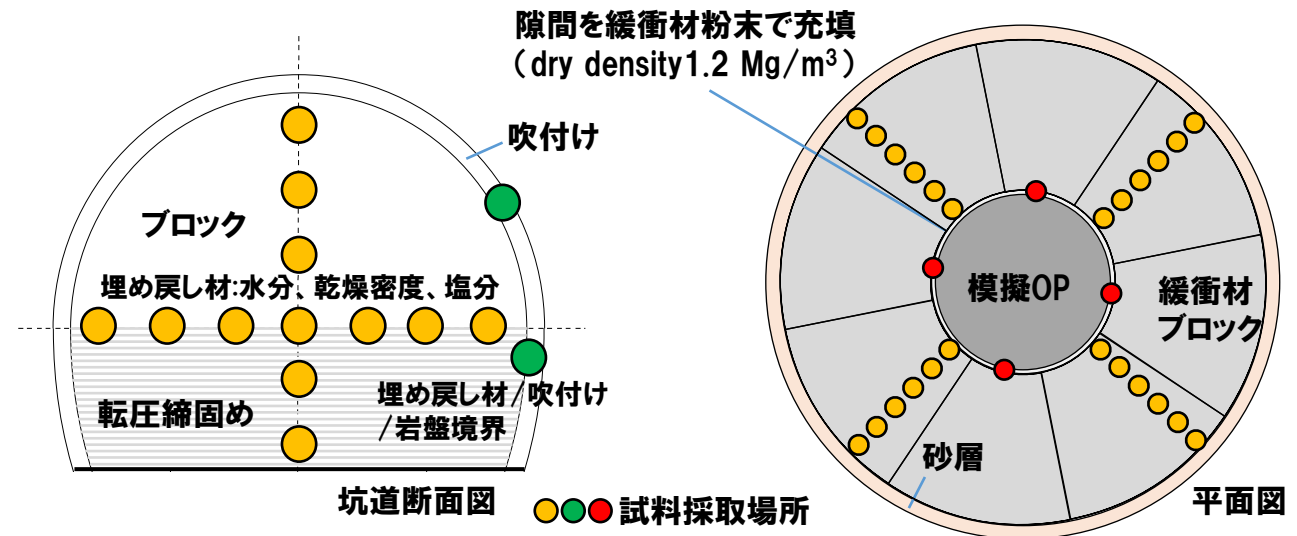


【令和5年度の計画・進捗:HIP(Task C)】

- 人工バリア性能確認試験の解体調査で使用する試験坑道7の掘削を開始（令和5年度に完成予定。アクセス坑道の掘削、解体調査は令和8年度以降に実施予定）
- 解体調査における各サンプリングの目的、分析項目、サンプリング位置などについて、令和4年度の計画案をベースとして、HIP参加機関のニーズやアイデアをもとに、より詳細な計画を立案予定



解体調査のための試験坑道7の掘削



解体調査計画のイメージ図

連成現象の理解やモデルを検証するために必要なデータ(飽和度、乾燥密度、間隙水組成分布など)や材料界面での現象(緩衝材の膨出・隙間充填、腐食、セメント影響など)を把握するために必要なデータを整理し、解体調査時のサンプリング位置や数量を決定する

Task C参加機関

BGE(ドイツ)、BGS(英国)、CRIEPI(日本)、CSIRO(オーストラリア)、JAEA(日本)、KAERI(韓国)、NUMO(日本)、RWMC(日本)、SERAW(ブルガリア)

1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

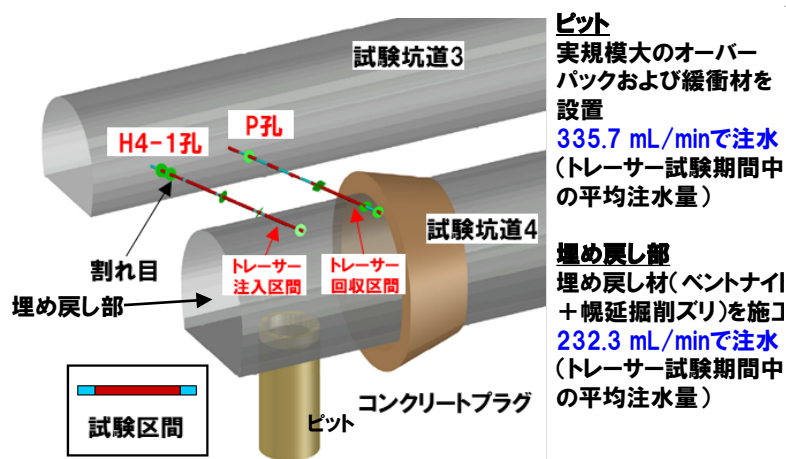
1.2 物質移行試験

【第4期中長期計画 目的】

幌延地域に分布する水みちの特性が異なる3つの岩盤を事例に、岩盤特性の不均質性等を考慮した上で、物質移行のシナリオおよび関連因子(微生物、有機物、コロイド影響など)や坑道近傍からより広い領域を含む複数のスケールを対象とした核種移行モデルを構築・検証するとともに、これら一連のモデル化・解析手法を総合的な物質移行特性評価手法として整備

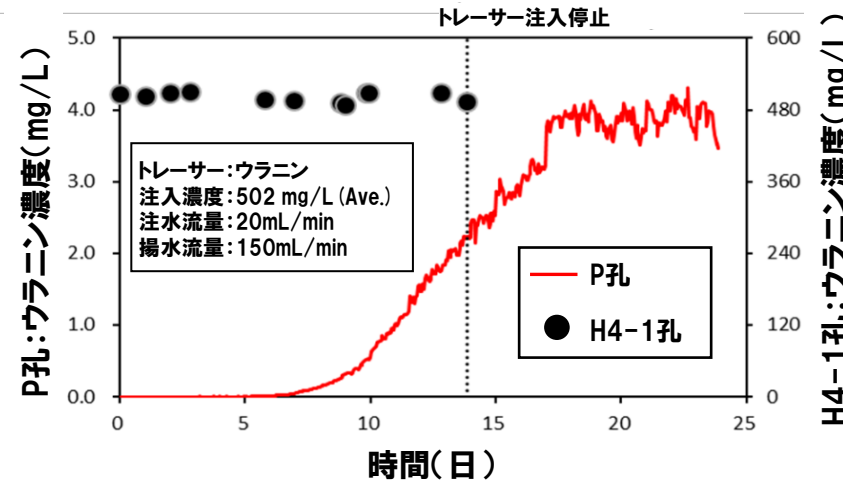
【令和5年度の計画・進捗】

- 原位置トレーサー試験結果に基づく掘削損傷領域の物質移行挙動(主に移流・分散)の解析評価
- 稚内層深部の断層(深度480m付近)を対象として実施したトレーサー試験結果の解析
- 声問層を対象とした物質移行モデルの構築に必要な水理・地質特性の把握(HIP:次ページ)



掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験 (350m調査坑道)

H4-1孔(注水孔)とP孔(揚水孔)の孔間のトレーサー試験を実施し、ウランを一定濃度で連続注入



トレーサー試験結果

一定濃度の連続注入開始から約14日後以降はトレーサー注入を停止した状態で、トレーサー濃度を観測

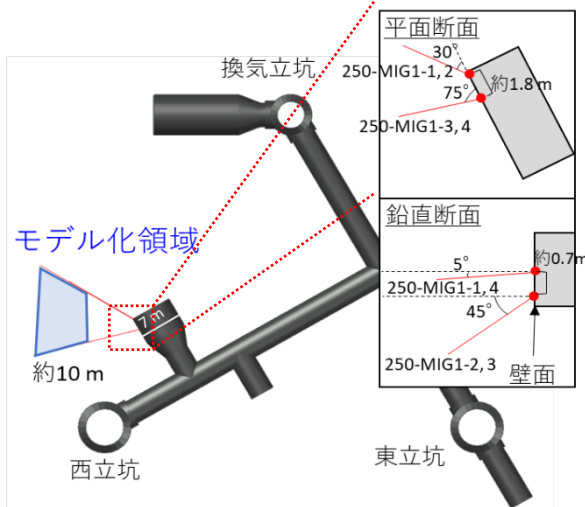
掘削損傷領域における分散効果を1次元移流・分散モデルによる解析評価を実施

掘削損傷領域の物質移行挙動の解析評価の計画

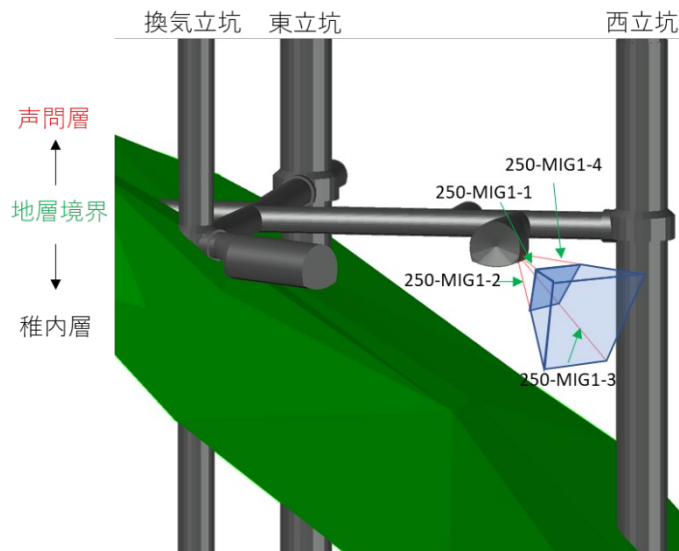
1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

1.2 物質移行試験

【令和5年度の計画・進捗:HIP(Task A)】

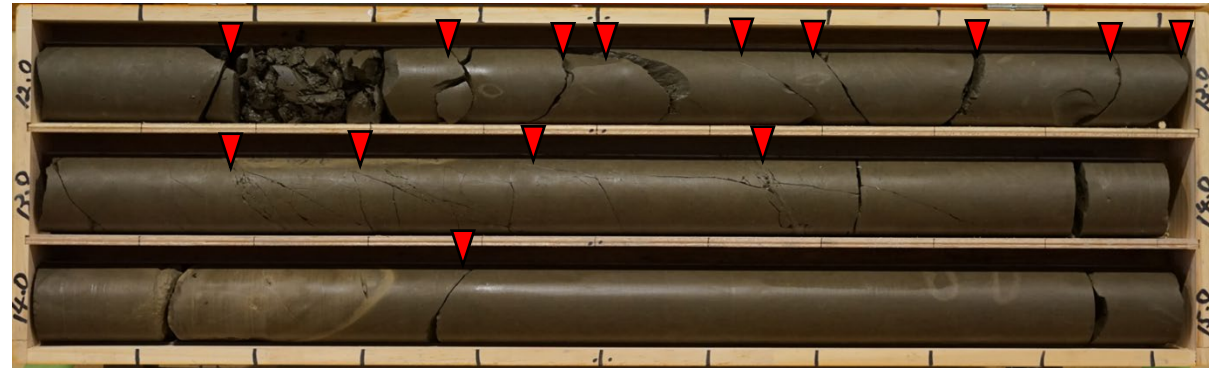


平面図:調査エリア(声問層:250m調査坑道)



鳥瞰図:調査エリア(声問層:250m調査坑道)

せん断割れ目



ボーリングコア写真(250-MIG1-1:掘削長12.0~15.0m)

- 声問層の約10m四方を対象とした物質移行モデルの検討に必要な水理・地質・地下水化学のデータを取得中
 - 地質情報(割れ目分布)に加え、透水試験(単孔・孔間)結果から間隙水圧分布、水理学的連結性などを評価し、モデル化領域の水理特性を把握(JAEA)
- 原位置トレーサー試験の試験デザイン検討や試験準備
 - 既存のトレーサー試験結果(稚内層浅部)を活用したベンチマーク解析や声問層を対象とした孔間式トレーサー試験の予察解析(BGS, CSIRO, ITRI, JAEA, KAERI, NUMO, RATEN)
 - せん断割れ目を対象に予備的な単孔式トレーサー試験(CRIEPI)

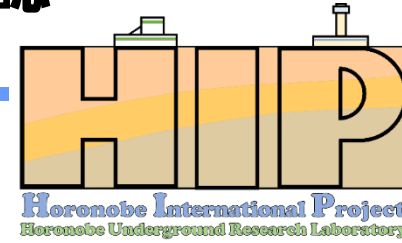
※資源エネルギー庁受託事業(核種移行総合評価技術開発)で一部実施

Task A参加機関

BGE(ドイツ)、BGS(英国)、CRIEPI(日本)、CSIRO(オーストラリア)、ITRI(台湾)、JAEA(日本)、KAERI(韓国)、NUMO(日本)、RATEN(ルーマニア)、SERAW(ブルガリア)

1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

1.2 物質移行試験



幌延国際共同プロジェクト タスクAの実施状況

- 350mにおける既存の原位置トレーサー試験結果に基づいた各機関の解析コードによるベンチマークテストおよび予測モデルの開発の計画の協議と、各機関による解析への着手
- 原位置試験場所(250m調査坑道)から採取した岩石コアを用いた室内試験による拡散・収着パラメータの取得方法や条件の検討
- 原位置試験に関して、ボーリング孔でのBTV観察結果やそれを踏まえた透水試験条件の共有・議論

年 月	2023			2024	参加機関	実施内容	
	6	9	12	3			
数値解析			 ベンチマークテスト	 モデル開発	 予測解析	BGE CRIEPI CSIRO ITRI JAEA KAERI NUMO RATEN	・ベンチマークテストによるソフトウェアの相互比較 ・原位置試験の条件設定のための予察解析 ・原位置試験の予察解析
室内試験			 バッチ試験	 透過拡散試験		JAEA CRIEPI RATEN	・バッチ試験による収着係数の取得 ・透過拡散試験による収着係数および拡散係数の取得
原位置試験	 BTV観察		 透水試験	 トレーサー試験	JAEA CRIEPI 他機関	・BTV観測による亀裂情報の取得 ・透水試験 ・単孔式トレーサー試験 (CRIEPI)	

1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

1.2 物質移行試験（微生物・有機物・コロイド）

【第4期中長期計画 目的】

地下深部の微生物・有機物・コロイドが核種移行に与える影響を明らかにすることを目的として、微生物・有機物・コロイドの特性評価手法を検討・確立するとともに、核種移行に対する微生物・有機物・コロイドの影響評価手法を整備

【令和5年度の計画・進捗】

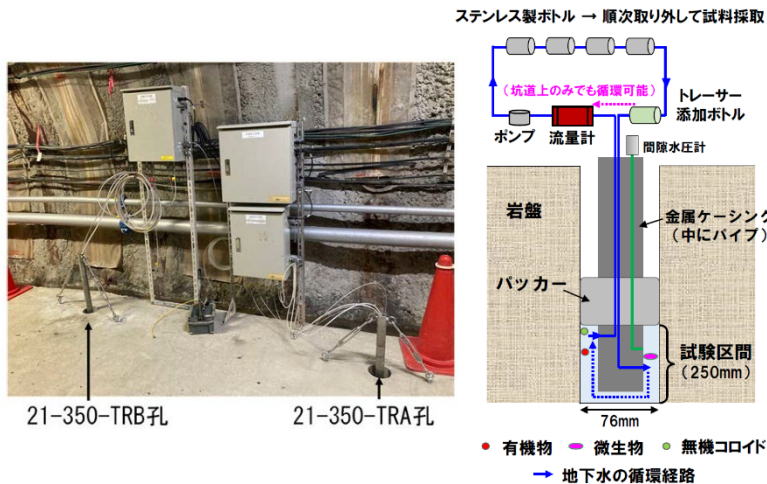
● 地下水に対する希土類元素の室内添加試験の実施

昨年度の室内試験の再現性確認、より長期的な反応期間(1か月程度)でのコロイドとの反応性確認

● 原位置ボーリング孔へのトレーサーの注入・循環試験の実施

トレーサーの濃度変化や存在形態から、原位置環境中におけるトレーサーの挙動を評価

資源エネルギー庁受託事業(核種移行総合評価技術開発)で一部実施



350m試験坑道の試験装置の写真(左)

および試験概念図(右)

21-350-TRA孔にトレーサーを注入・循環(2023年8月)

トレーサー	希土類元素(各50 $\mu\text{g/L}$) Co, Ni, Mo(各100 $\mu\text{g/L}$) Cs(10 mg/L)、I(100 mg/L) ※BG濃度および過去の試験実績から
試験手順	① トレーサー添加前の地下水試料を採取 ② トレーサーを添加:坑道上の経路のみで循環して試料を採取 ③ 試験区間を含めて循環し、0, 1, 2日後に試料を採取
処理・分析	未ろ過、0.2 μm ろ過、10 kDa ろ過 各ろ液中のトレーサー濃度・有機物濃度・微生物組成等、フィルター上の粒子のサイズ・形態・化学組成等を分析予定

トレーサー注入・循環試験の概要

原位置におけるトレーサーの存在状態や溶解度などを明らかにし、室内試験との結果の比較から、原位置で考慮すべき現象やその程度を評価

2. 処分概念オプションの実証

2.1.1 操業・回収技術等の技術オプションの実証

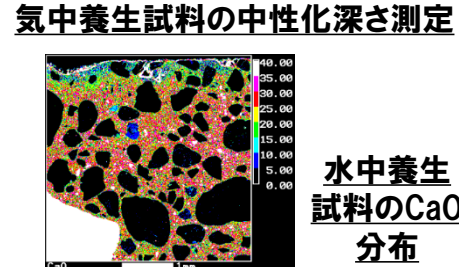
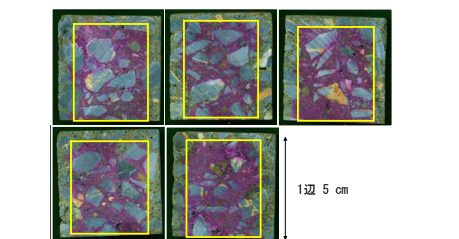
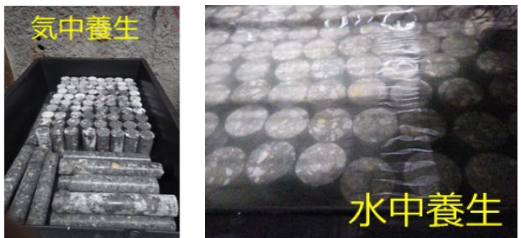
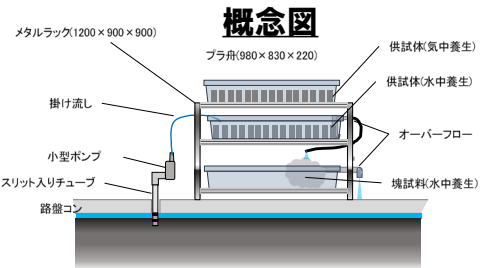
【第4期中長期計画 目的】

人工バリアの搬送定置・回収技術(緩衝材や埋め戻し材の状態に応じた除去技術オプション、回収容易性を考慮した概念オプション、品質評価手法など)を、幌延の地下施設を事例として整備

【令和5年度の計画・進捗】

- 地下施設の坑道に定置した低アルカリ性コンクリート試験体の変質の把握
- 地下施設に施工されている低アルカリ性吹付けコンクリートの変質の把握
- 水分量を考慮した坑道周辺岩盤のクリープ変形に関するデータ取得

資源エネルギー庁受託事業
(NF長期環境変遷評価技術開発)で実施



水分量の違いに応じた坑道施工吹付けコンクリートの変質状況を、定置試料の分析結果を指標として評価

坑道に定置したコンクリート試験体

大気中で養生した場合と、原位置地下水中で養生した場合とを比較

試験体の分析結果(R4)

気中養生: 中性化が進行(約3 mm/年)
水中養生: Caの溶脱、地下水成分の浸透
※今年度も同様の分析を実施予定

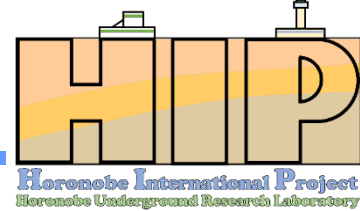
坑道施工吹付けコンクリートの採取

水分状態が異なると考えられる試料を複数採取
分析予定項目: 水分量、力学特性(圧縮/引張強度等)、空隙分布、化学特性(元素分布等)

回収技術に係る坑道支保材料(吹付けコンクリート)の変質の把握

2. 処分概念オプションの実証

2.1.1 閉鎖技術の実証



【第4期中長期計画 目的】

止水プラグについて、地質環境特性に応じた要求性能を明確化し、止水プラグの形状や材料仕様を具体化できるように設計手法の詳細化を進めるとともに、実際の地質環境条件や作業環境を考慮した地下研究施設を活用した実証的な研究をととして、施工技術の成立性を確認

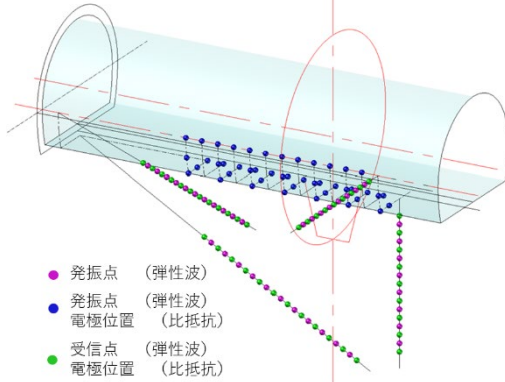
【令和5年度の計画・進捗:HIP(Task B)】

※資源エネルギー庁受託事業(地層処分施設施工・操業技術確証試験)で一部実施

Task B参加機関: BGE(ドイツ)、BGS(英国)、CSIRO(オーストラリア)、JAEA(日本)、KAERI(韓国)、NUMO(日本)、RWMC(日本)、SERAW(ブルガリア)

- 350m試験坑道6の掘削を完了し、坑道掘削後のEDZの特性把握のための調査・試験に着手
 - 坑道周辺のEDZの範囲やEDZの透水性の相対的な変化を把握するためにボーリング調査(コア観察、BTV観察)、トモグラフィ調査(弾性波・比抵抗)、透水試験・間隙水圧測定を実施
- 止水プラグおよび坑道埋め戻しの仕様検討に必要な材料特性データ取得
 - 埋め戻し材と止水プラグの材料仕様の検討に必要な特性(粒度分布、透水係数、締固め性能、膨潤圧など)を取得
- 令和8年度以降に実施予定の試験坑道6の止水プラグの原位置施工試験の計画検討に着手
 - 坑道周辺のEDZの範囲や透水性の変化を踏まえ、坑道埋め戻しおよび止水プラグの要求性能を具体化
 - 上記の要求性能を実現できる材料仕様および施工方法の検討

トモグラフィ調査のレイアウト案

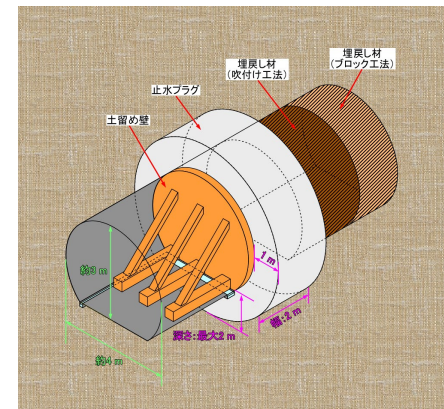


坑道周辺のEDZの特性調査



幌延の掘削スリを用いた埋め戻し材の例

材料特性データの取得



止水プラグの原位置施工試験イメージ

埋め戻しから止水プラグの設置までの一連の施工技術を確認・実証

2. 処分概念オプションの実証

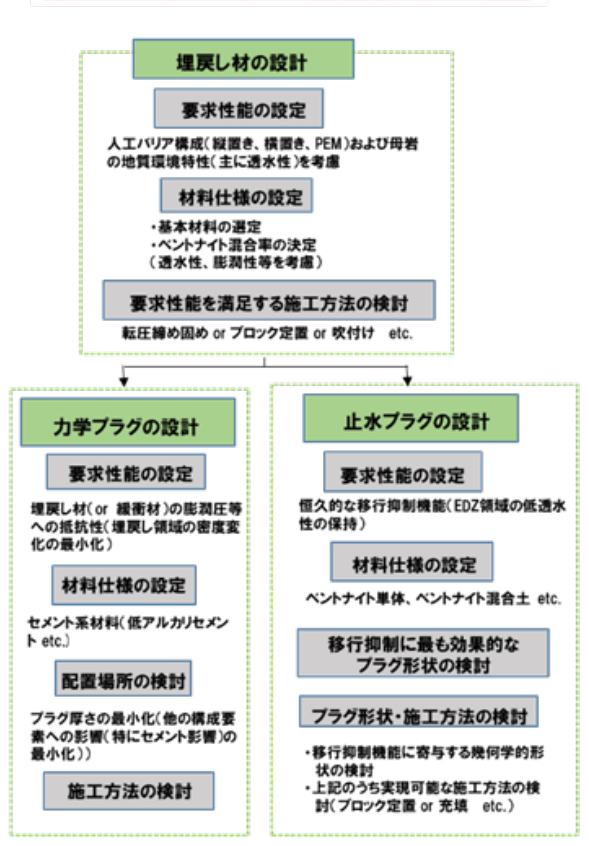
2.1.1 閉鎖技術の実証

閉鎖技術の実証の実施内容は幌延国際共同プロジェクトTask Bで実施

※また、資源エネルギー庁からの受託事業「地層処分施設施工・操業技術確証試験」として実施

- 令和6年度までに幌延の堆積岩を対象として設計フローに基づいた止水プラグの設計を実施
 - 設計項目に対して要求性能・条件や設計に必要な情報を整理・更新

本事業成果として提案する閉鎖システムに関する設計フロー



止水プラグの設計項目と要求性能・条件、設計に必要な情報の整理イメージ

設計項目	要求性能・条件	設計に必要な情報	実施内容 ※赤字は令和5年度から実施
要求性能の設定	<ul style="list-style-type: none"> ● 周辺岩盤と同程度の透水係数 	<ul style="list-style-type: none"> ● EDZの分布 ● EDZ、岩盤の透水性 ● 埋め戻し材の透水性 	<ul style="list-style-type: none"> ● ボーリング調査(コア観察、BTV観察) ● 弾性波・比抵抗トモグラフィ ● 透水試験・間隙水圧モニタリング ● 水理解析
材料仕様の設定	<ul style="list-style-type: none"> ● 設定した透水係数を達成できる材料仕様(乾燥密度、材料配合等) 	<ul style="list-style-type: none"> ● ベントナイト混合土の材料特性(締固め特性、透水性、膨潤特性等) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 室内試験
プラグ形状の検討	<ul style="list-style-type: none"> ● 物質移動抑制効果の高い幾何形状 ● 力学的安定性の観点から施工可能な形状 	<ul style="list-style-type: none"> ● 岩盤の力学物性 ● EDZの分布 ● EDZ、岩盤の透水性 	<ul style="list-style-type: none"> ● 室内試験 ● 水理解析 ● 力学解析
施工方法の検討	<ul style="list-style-type: none"> ● EDZの拡大を抑制する切欠きの拡幅方法 ● 設定した止水プラグの材料仕様を実現可能な施工方法 	<ul style="list-style-type: none"> ● 切欠きの拡幅によるEDZ形成の程度 ● 止水プラグの工法毎の施工性(乾燥密度、施工時間等) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 文献調査 ● 力学解析

資源エネルギー庁受託事業「地層処分施設閉鎖技術確証試験」(平成30年度～令和4年度)で提案した設計フロー(原子力機構・原環センター, 2023)

2. 処分概念オプションの実証

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

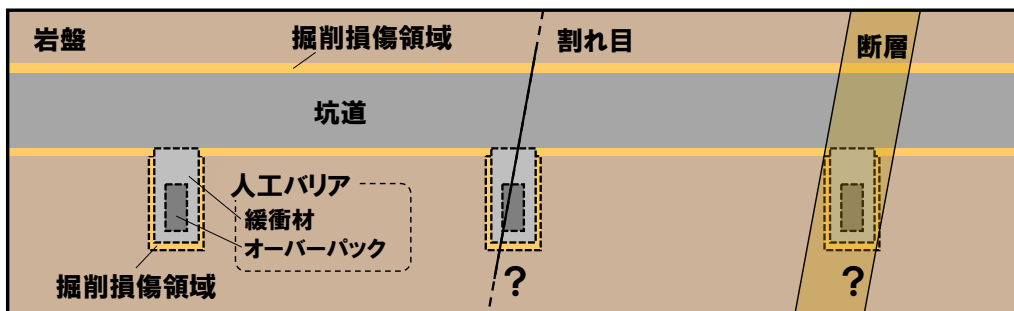
【第4期中長期計画 目的】

人工バリアに要求される品質を踏まえて、要素技術(先行ボーリングによる地質環境特性調査、湧水抑制対策といった工学的対策技術)を体系的に適用し、廃棄体の設置方法(間隔など)に関連する、坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術を整理

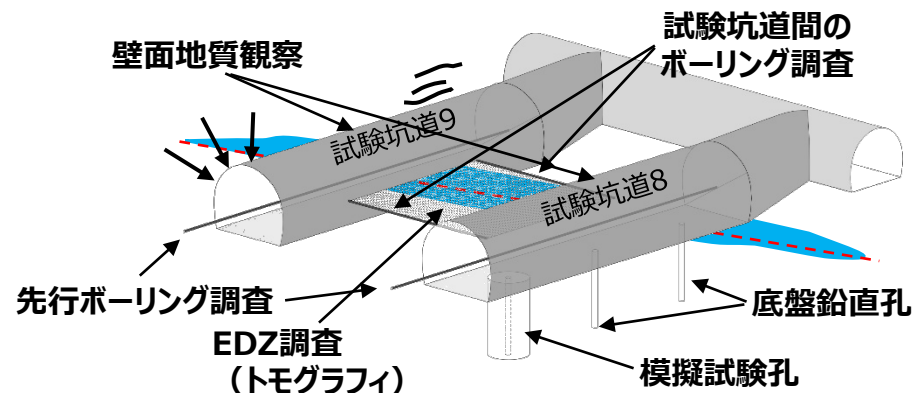
【令和5年度の計画・進捗:HIP(Task B)】

Task B参加機関: BGE(ドイツ)、BGS(英国)、CSIRO(オーストラリア)、JAEA(日本)、KAERI(韓国)、NUMO(日本)、RWMC(日本)、SERAW(ブルガリア)

- 令和6年度から実施する500m調査坑道における原位置試験に先立ち、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(EDZ)の発達に関する既存情報を収集・整理し、500m調査坑道で想定される状況などを検討。



処分坑道・ピットの配置の指標検討の概念



500m調査坑道における原位置試験サイト(計画)

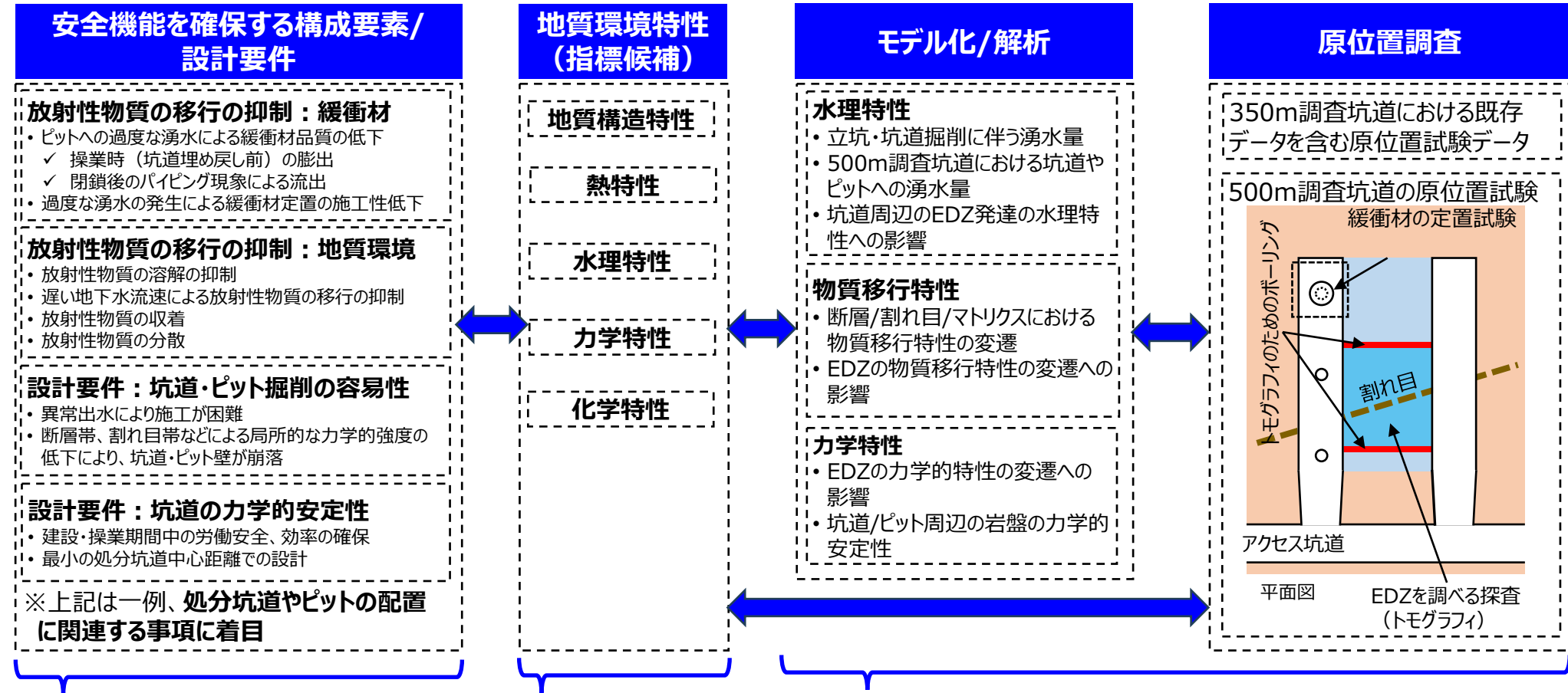
- 坑道/ピットの配置の判断に関する特性(指標)の整理とともに、原位置調査とモデリングを通じて整理した指標の有効性を評価
 - 令和5年度は、実施計画の具体化として、この体系化の枠組み・アプローチを検討(次ページ)
- 緩衝材の定置の施工性や品質確保、処分坑道の空洞安定性が坑道・ピットスケールの調査の主要な着目点。幌延の地質環境条件の場合、坑道・ピット周辺に生じる湧水やEDZ発達等が上記の着目点に影響。
 - 令和5年度は、湧水やEDZ等に係る情報収集と計画の具体化を実施

2. 処分概念オプションの実証

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

【令和5年度の計画・進捗:HIP(Task B)】

処分坑道やピットの配置に関する調査・評価技術に関する体系化のイメージ



- 上記は一例、処分坑道やピットの配置に関連する事項を諸外国の事例や国内の動向に基づき抽出
- 安全機能を確保する構成要素の品質や設計要件を確認するための地質環境特性を抽出
- 設定した指標を評価するために必要なデータ
- 調査により直接評価、あるいはモデル化/解析により評価
- 評価不可の場合、調査・解析手法の見直し、または評価指標の見直しが必要

2. 処分概念オプションの実証

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

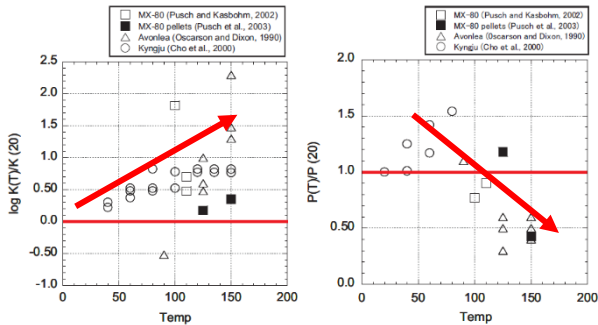
【第4期中長期計画 目的】

人工バリア中の緩衝材の最高温度が100℃を超えた状態で、人工バリアおよびその周辺岩盤領域(ニアフィールド)において発生しうる現象を整理し、人工バリア性能に関する試験データの整備および解析手法の開発を行い、ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示

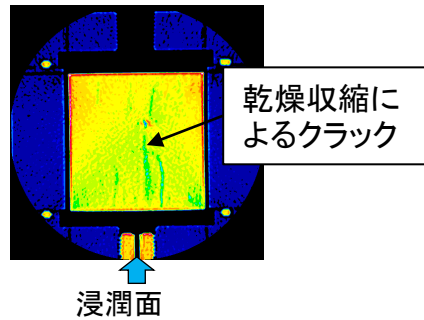
【令和5年度の計画・進捗】

- 100℃を超える温度履歴を経た緩衝材の特性変化等に関する室内試験の実施
- 100℃を超える温度条件での原位置試験の試験系構築、加熱・モニタリング開始
 - ・緩衝材の応力分布やひび割れに影響しうるパラメータ(形状、含水量)を変えた、複数のブロックを設置
 - ・既存温度、土圧、水位、水分分布をモニタリングするとともに、次年度以降に解体・分析

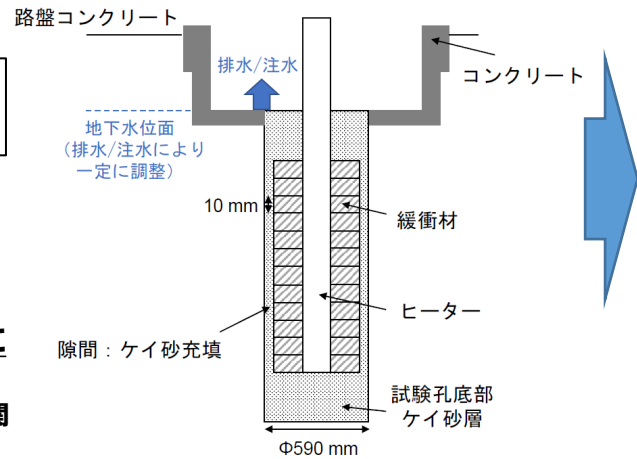
資源エネルギー庁
受託事業(NF長期環境変遷評価
技術開発)で実施



温度と緩衝材の透水係数(左)および膨潤圧(右)の関係 (JAEA, 2009)
高温になるほど透水係数が上昇し膨潤圧が低下する傾向が認められる



100℃を超える加熱で緩衝材に生じたひび割れのX線CT測定
高温条件での緩衝材のひび割れに関する定量的なデータを取得



- ・ 100℃を超えた状態でニアフィールドにおいて発生する現象を確認
- ・ 100℃を超える温度履歴を経た緩衝材の特性に関するデータの整備

室内試験によるデータ整備

100℃を超える温度履歴とそれによる乾燥・湿潤が生じた場合の基本特性(透水性、膨潤圧)の変化や、生じたひび割れの影響を評価

100℃を超える温度条件での原位置試験の概念図

100℃を超えて加熱した際および100℃以下まで減熱した際の緩衝材や岩盤に生じる熱/水/力学挙動等の観測・分析を実施

3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

3.1.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

【第4期中長期計画 目的】

地殻変動が地層の透水性に与える影響を推測するため、ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験と、その結果に基づく隆起侵食の影響を含めた透水性評価、断層の活動性評価の手法を整備

● ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験

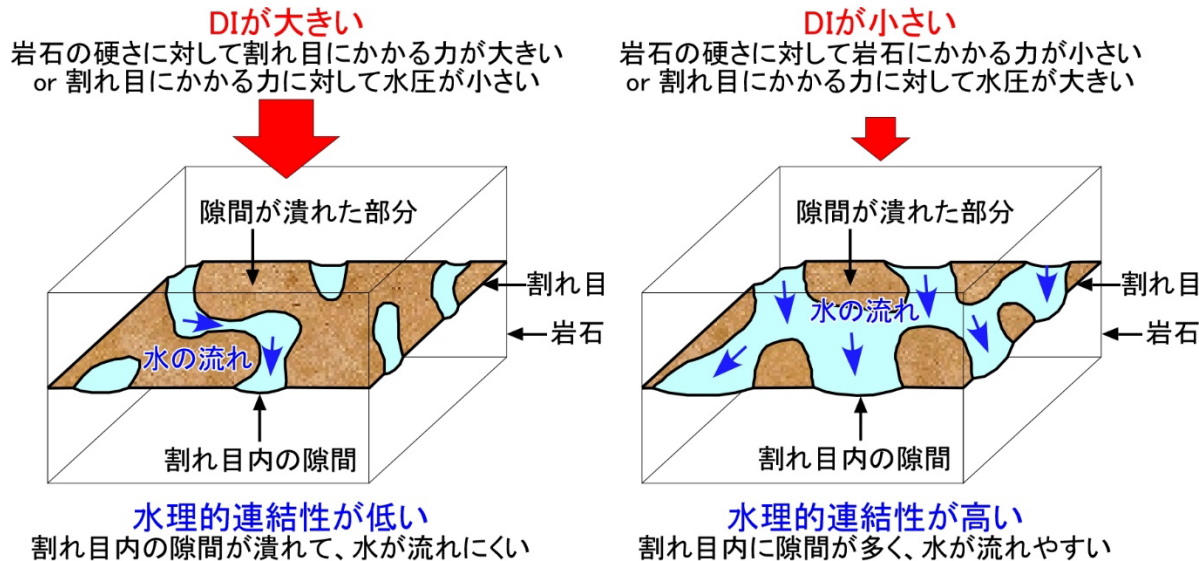
断層のずれが断層の透水性や水理的連結性に与える影響を通常の透水試験装置を用いて簡易的に調べる手法を開発
これまで幅数センチ(断層帯幅)の断層で適用性を確認したが、より大きな幅数十cmの断層でも実施し、本手法の適用性を確認

● 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

DIと断層/割れ目の透水性や水理的連結性の関係のメカニズムを水圧擾乱試験やシミュレーションの結果を用いて検討
隆起侵食などの地殻変動が地層の透水性に与える影響をDIを用いて定量的に推定する手法を整備

● 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備

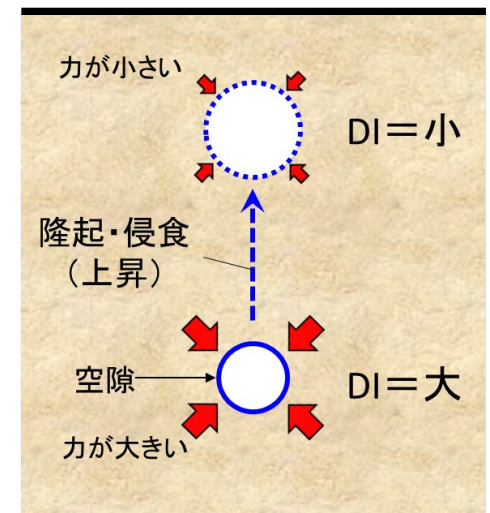
水圧擾乱試験により得られる断層の変位などの情報を利用して、断層の力学的な状態を評価する手法を整備



DI*と割れ目の水理学的連結性の関係

*DI(ダクティリティインデックス): 岩石にかかる力を岩石の引張り強さで割ったもの

地面



隆起侵食が透水性に与える影響

3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

3.1.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

【令和5年度の計画・進捗】

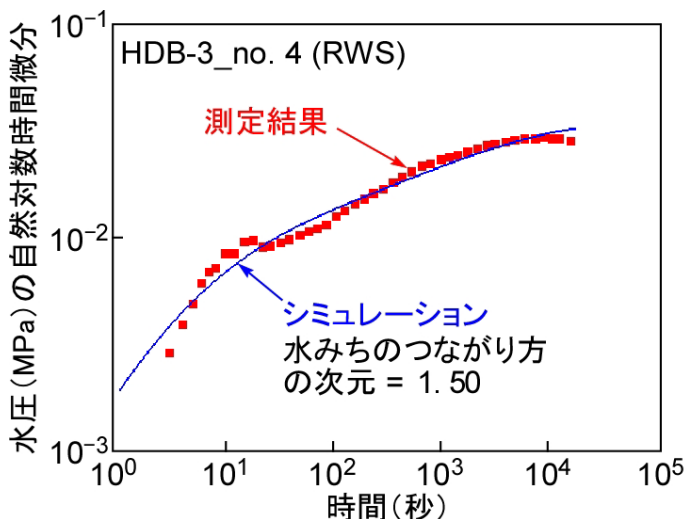
「DIを用いた透水性評価手法の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備」や「水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備」を目的として、以下を実施

- **DIと断層/割れ目の水理的連結性の関係に関する解析**

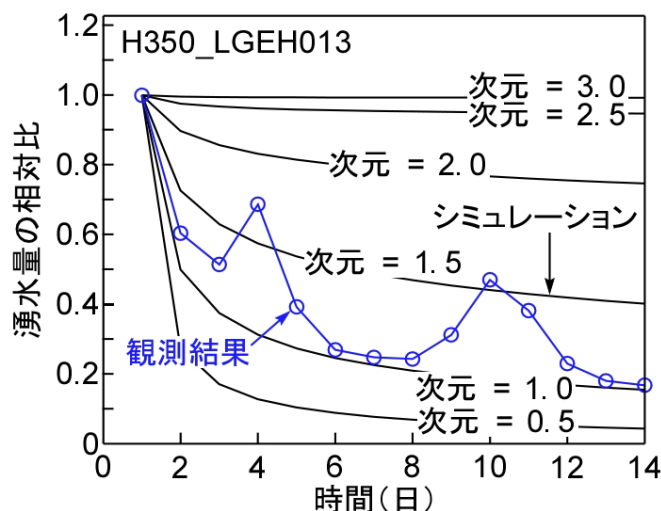
これまでデリバティブプロットを用いて定性的に判定していた水みちのつながり方の次元(水理的連結性)について、専用のシミュレーター(nSIGHTS)を用いた計算を実施し、次元を定量的に決定(下図参照)。

- **過年度に実施した水圧擾乱試験の結果の解析**

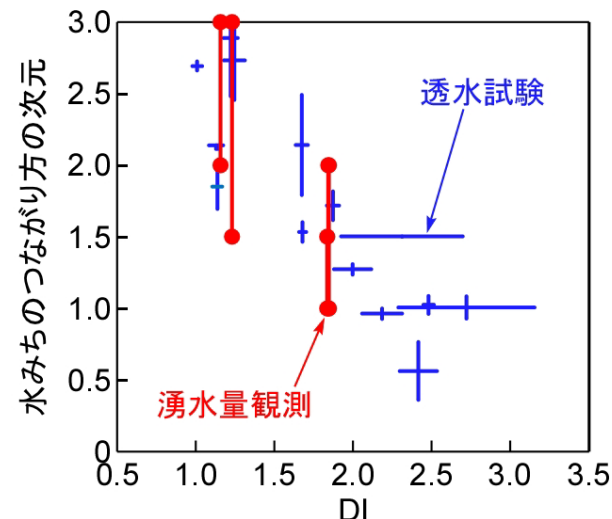
断層の活動性を評価する上で重要となる原位置の応力場を水圧擾乱試験の結果から算出する方法を検討。



ボーリング調査における断層を対象とした透水試験時の水圧変化を専用のシミュレーターにより解析し、水みちのつながり方の次元を決定*



坑道掘削時に遭遇した断層からの湧水量変化(観測値)とシミュレーション結果を比較し、次元を決定*(上図の例では次元を1.0~1.5と推定)



地下施設周辺の稚内層中の水みちのつながり方の次元とDIの関係*
 ・ 今後、得られた関係の物理的な意味を解析を通じて検討

*Ishii (2023, Hydrogeology Journal)

3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

3.1.2 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

【第4期中長期計画 目的】

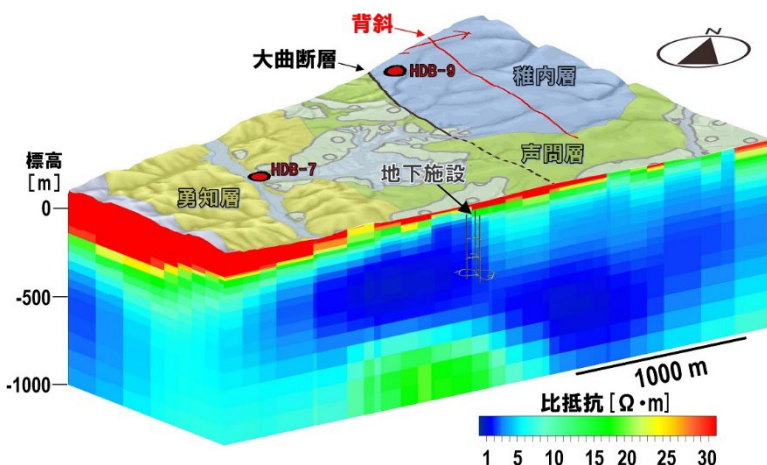
地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化を目的として、化石海水が存在するような地下水の流れが非常に遅い領域(低流動域)の三次元分布を調査・評価する手法の検証および広域スケールを対象とした水理・物質移行評価手法の検証

【令和5年度の計画・進捗】

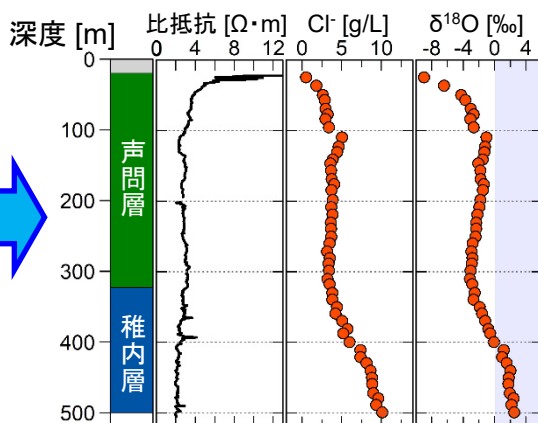
これまでに電磁探査とボーリング調査を組み合わせて、低流動域の三次元分布を調査・評価する方法をエネルギー事業の報告書※として作成。令和5年度は、これまでのエネルギー事業の成果を中心に、地球化学的な観点も含めた方法論の検討と成果取りまとめを進める。

- 低流動域の三次元分布の推定手法(論文)(下図及び次ページ)
- HFB-1孔ボーリング調査の詳細な試験結果(JAEA-Data/Code)

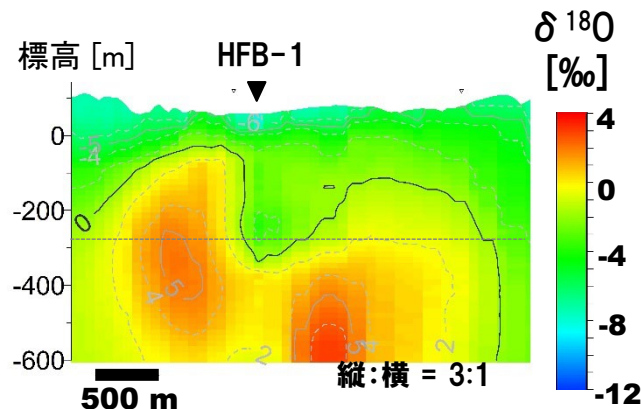
※平成31年度～令和4年度のエネルギー事業(岩盤中地下水流動評価技術高度化開発)



電磁探査による三次元比抵抗分布の取得



ボーリング調査による比抵抗、水質(Cl⁻濃度、酸素同位体比)の深度プロファイル取得



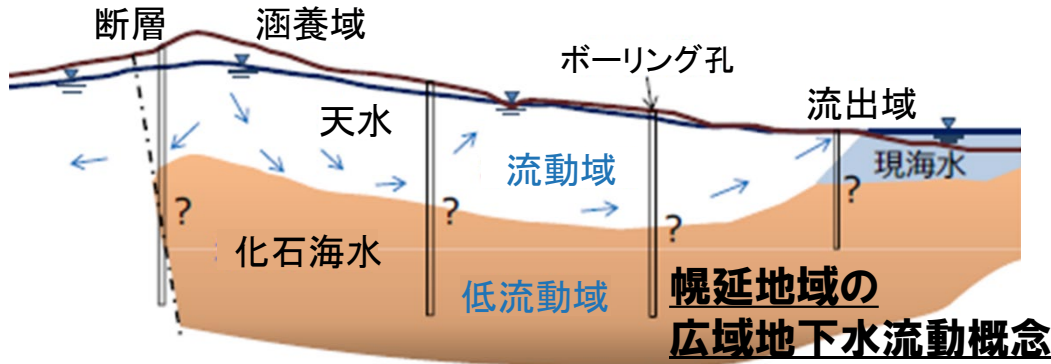
地球統計学的解析による三次元分布の推定

低流動域の三次元分布推定の流れ

3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

3.1.2 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

【令和5年度の計画・進捗】



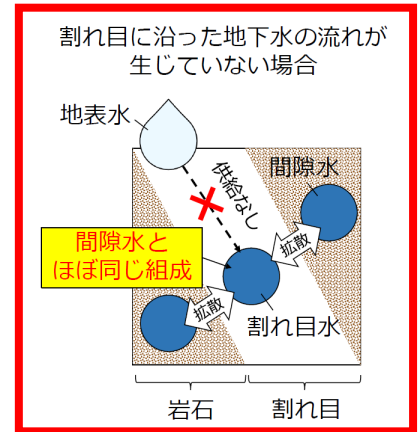
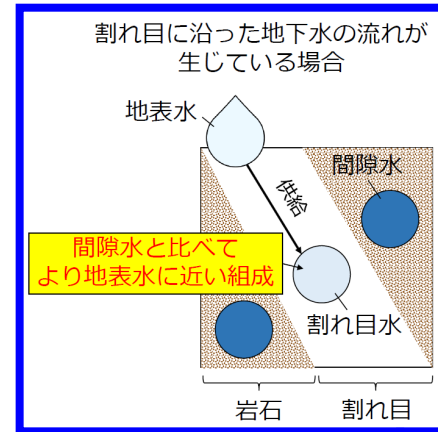
低流動域の三次元分布の推定

低流動域の三次元分布を推定

- 物理探査やボーリング調査などの地上からの調査により、低流動域の三次元分布を推定

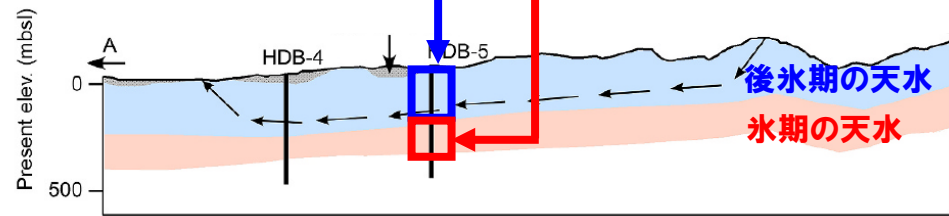
長期的に安定な水理場・化学環境であることの確認

- 地下水の水質形成や年代といった地球化学的アプローチにより、着目した水質が低流動を示す指標になることを確認



- 割れ目水と間隙水の水質に **コントラスト有**
- 現在と同じ同位体比の天水が浸透
- 天水の¹⁴C年代: **4~7 ka**

- 割れ目水と間隙水の水質に **コントラスト無**
- より寒冷な時期を示す同位体比の天水が浸透
- 天水の¹⁴C年代: **11 ka以前**



- ⇒ 天水領域の浅部: **後氷期の天水が流動**
- ⇒ 天水領域の深部: **最終氷期の天水が滞留**
- ⇒ 鉛直方向の動水勾配の違いに起因

割れ目水と間隙水の水質コントラストおよび¹⁴C年代を利用した地下水流動の評価手法を構築