

幌延深地層研究計画に関する 令和3年度の成果と令和4年度の計画

令和4年2月21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

報告の内容

1. 令和2年度以降の計画の概要
2. 令和3年度の成果と令和4年度の計画

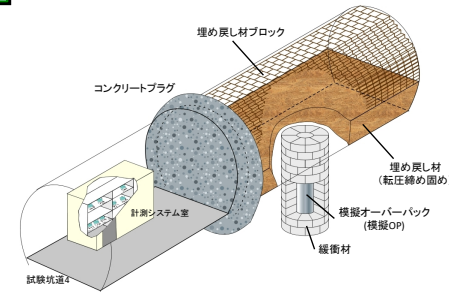
＊ 本研究には、以下の経済産業省資源エネルギー庁委託事業の成果の一部を利用した。
・高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業〔JP007597〕

1. 令和2年度以降の計画の概要

令和2年度以降の幌延深地層研究計画

①実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

- 1) 人工バリア性能確認試験
- 2) 物質移行試験



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

- 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

- ・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

- 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



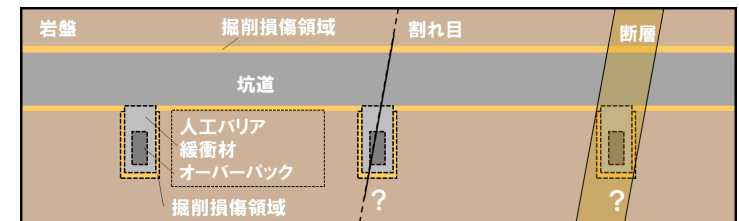
閉鎖技術オプションの整理

③地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

- 1) 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

- ・地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握
- ・地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化

- 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

令和2年度以降の幌延深地層研究計画

研究工程

		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		浸潤時・減熱時のデータ取得、連成モデルの適用性確認、国際プロジェクトにおける解析コード間の比較検証、改良・高度化						※		
1.2 物質移行試験		掘削影響領域での物質移行に関するデータ取得、有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行試験、等								
2. 処分概念オプションの実証										
2.1 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験										
2.1.1 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証		搬送定置・回収技術、閉鎖技術の実証								
2.1.2 坑道スケール〜ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化						坑道スケール〜ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化、廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理、等				
2.2 高温（100℃以上）等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験		100℃超の隙にニアフィールドにおいて発生する現象の整理、国際プロジェクト情報の収集・整理、等								
3 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証										
3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化										
3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握		数10cmの幅の断層を対象とした水圧擾乱試験、断層の活動性評価手法の整備、等								
3.1.2 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化		地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）の調査・評価技術の検証、等								
3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験		人工バリアの緩衝材や坑道埋め戻し材が掘削影響領域の力学的・水理学的な緩衝能力に与える影響を把握する解析手法の開発								
【施設計画】										
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く

※ 人工バリア性能確認試験については、材料の水分量や密度、腐食の度合いなど詳細なデータ取得するための解体調査を当初令和5、6年度に予定していたが、500m掘削中（令和5～7年度）は、安全管理上、作業が2箇所（2切羽）までに限定され、規模の大きな作業が困難になるため、令和8、9年度に実施することとしました。

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。

2. 令和3年度の成果と令和4年度の計画

①実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

1) 人工バリア性能確認試験

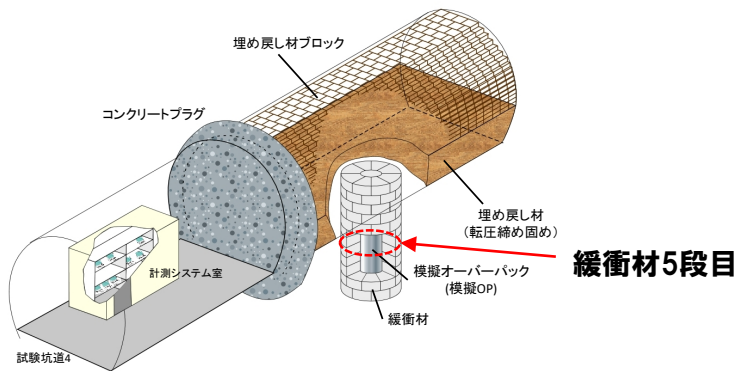
【研究開発の目的と令和10年度までの実施内容】

目的:人工バリア周辺で起こる、熱－水－応力－化学連成現象を理解する。

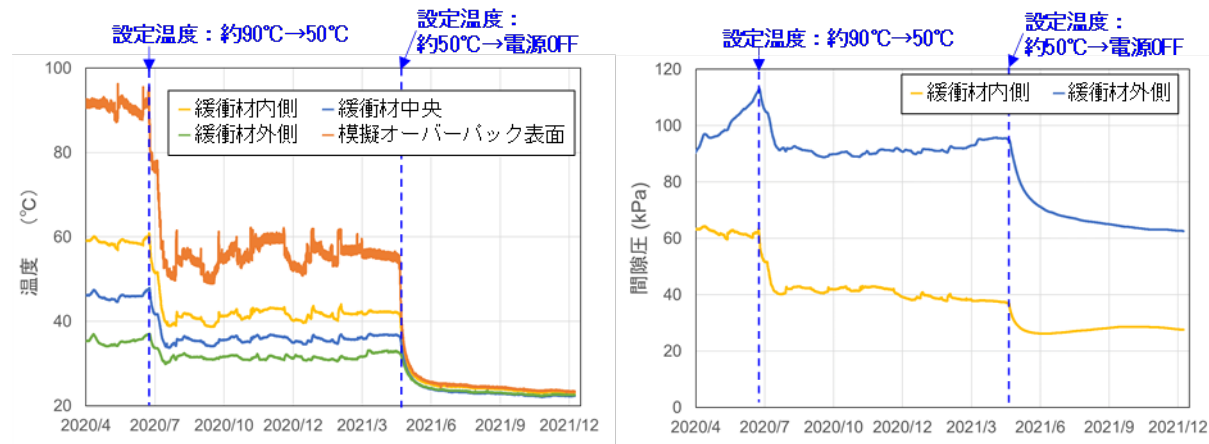
- 実規模大の原位置試験(人工バリア性能確認試験)を通じて人工バリア周辺の熱－水－応力－化学連成現象に係わるデータ取得し、それらのデータから解析評価手法を検証
- 人工バリアの解体作業により緩衝材の飽和度などを確認

【令和3年度の実施内容と成果】

- 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開始し、緩衝材中の温度の低下や温度低下に伴う間隙圧の低下を確認(連成解析コード検証のためのデータ取得)
- 国際共同研究(DECOVALEX)において、既存の室内試験結果(緩衝材の浸潤試験、膨潤圧試験、膨潤変形試験など)を対象に共同解析を実施。解析結果の比較検証により各国の解析コードの課題(力学モデル、初期飽和度の取り扱いなど)を抽出



人工バリア性能確認試験の概念図

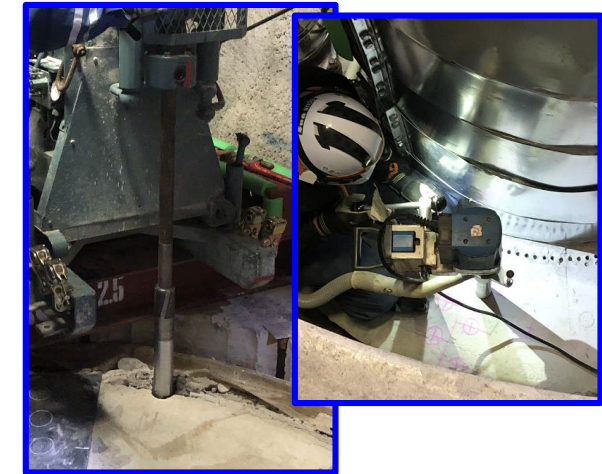
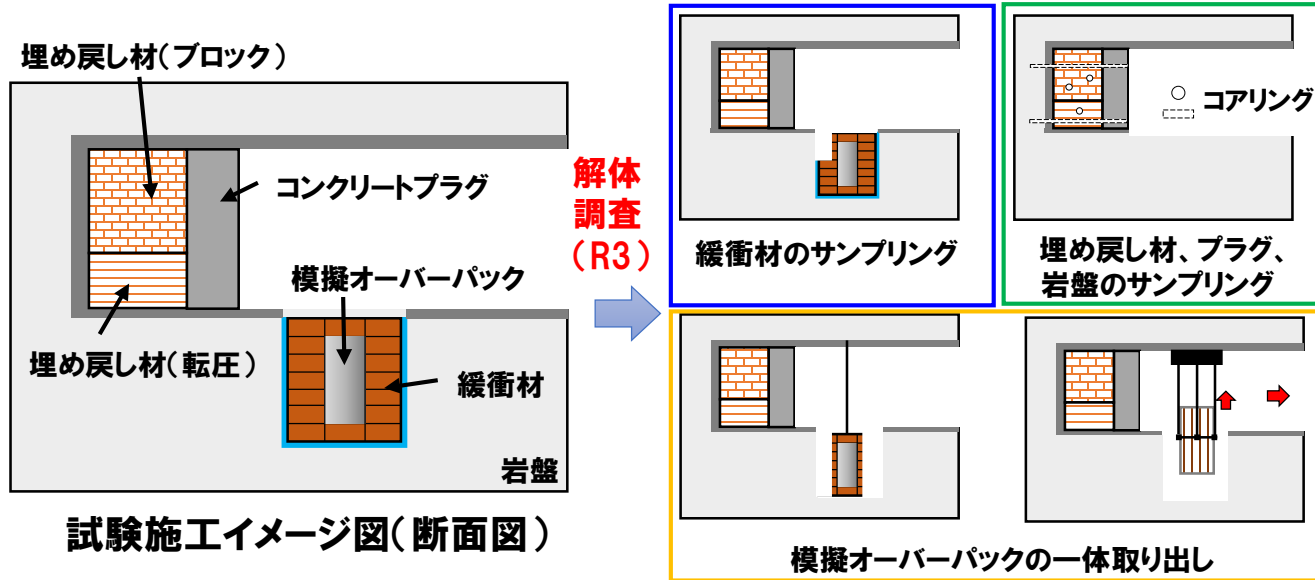


緩衝材5段目の温度(左図)と間隙圧(右図)の変化

①実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

1) 人工バリア性能確認試験

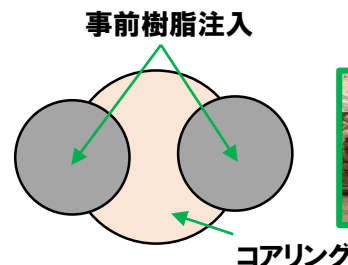
- 人工バリア性能確認試験の解体調査に向けて、別坑道に設置した緩衝材や埋め戻し材の解体を行い、無水での粘土材料の解体手法、模擬オーバーパックの一体取り出し手法、異なる材料界面を保持した状態で取り出す手法などの適用性を確認



緩衝材ブロックサンプリングの様子
(左:ボーリングマシン、右:ハンドコア)



模擬OP一体取り出しの様子



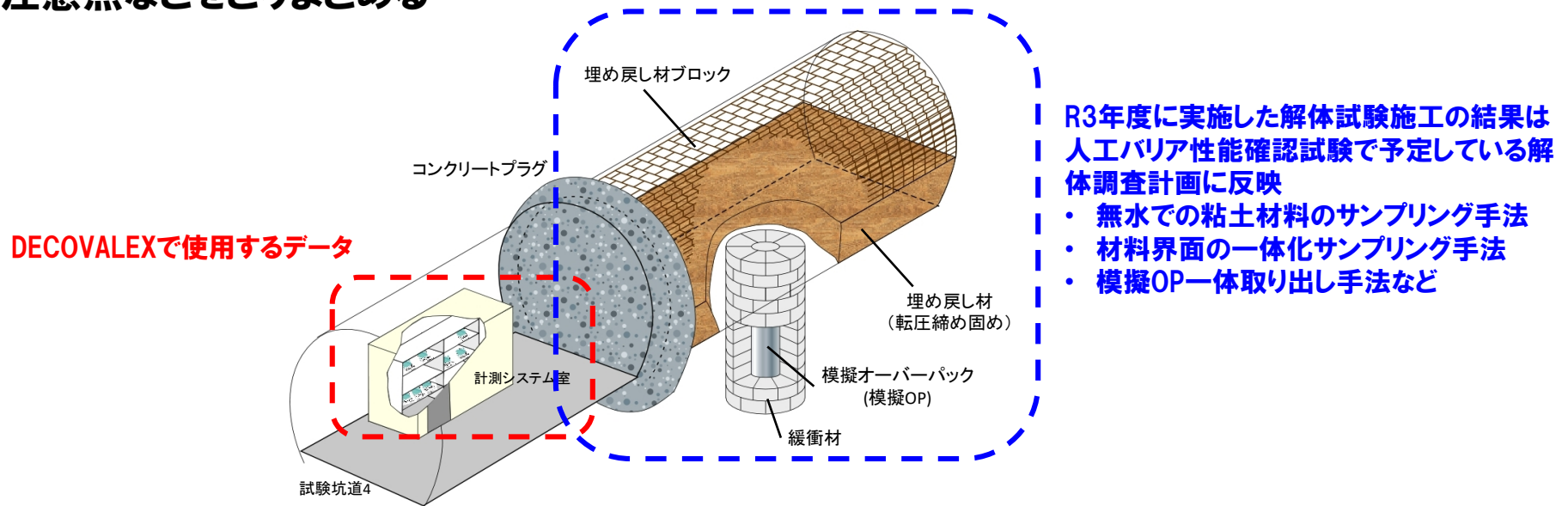
埋め戻し材、吹付けコンクリート、岩盤界面サンプリング後の試料

①実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

1) 人工バリア性能確認試験

【令和4年度の計画】

- 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データ取得を継続
- 国際共同研究(DECOVALEX)で、室内試験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(緩衝材の膨潤変形を表現するための力学モデルなど)、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開始
- 令和3年度に実施した人工バリアの解体試験施工での調査結果(緩衝材、埋め戻し材、コンクリート、岩盤等のサンプリング手法や各種材料の境界面を一体化した状態でサンプリングする手法など)をもとに、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をとりまとめる



人工バリア性能確認試験の概念図

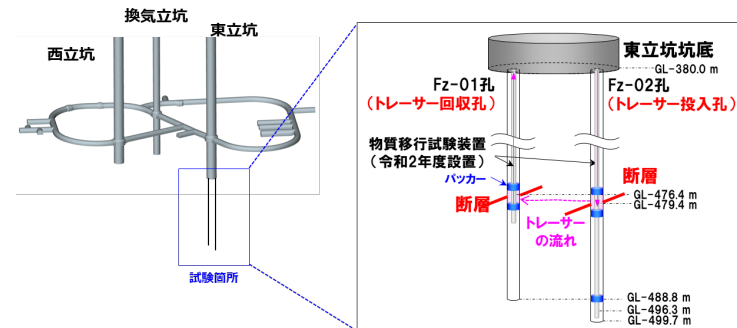
①実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

2) 物質移行試験

【研究開発の目的と令和10年度までの実施内容】

目的: 堆積岩における物質移行現象の評価手法を整備する。

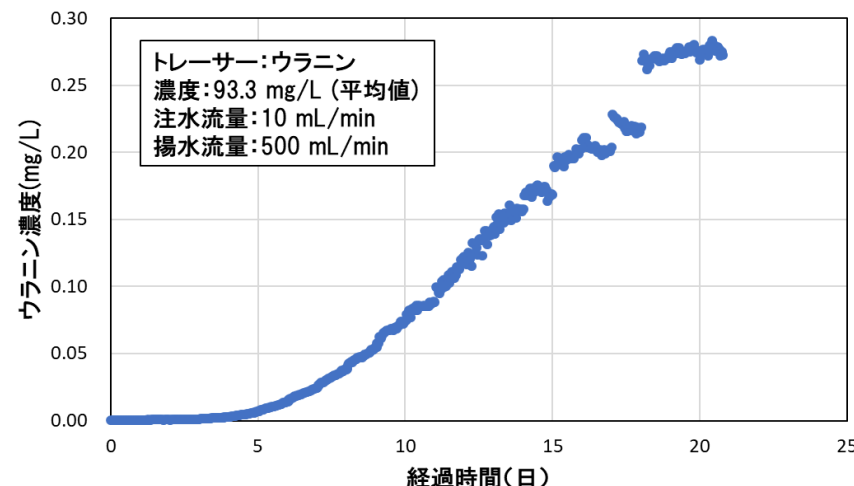
- 掘削損傷領域でのトレーサー試験、物質移行データの取得
- 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行試験
- 掘削損傷領域、岩盤中の割れ目を含むブロックスケール(数m~100m規模)の物質移行評価手法の構築



稚内層深部の断層を対象とした物質移行試験

【令和3年度の実施内容と成果】

- 掘削損傷領域でのトレーサー試験により、物質移行特性を評価するためのデータを取得
- 有機物・微生物・コロイドを対象とした原位置試験の準備作業を行い、水圧や水質、微生物群集などのデータを取得、また地下水中の有機物が元素の存在状態に与える影響を評価するための室内試験データを取得
- 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行い、観測濃度が投入濃度に比べて低く、稚内層深部の断層における移行経路の水理学的連結性が限定的であることを示唆



ブロックスケールにおける物質移行試験結果

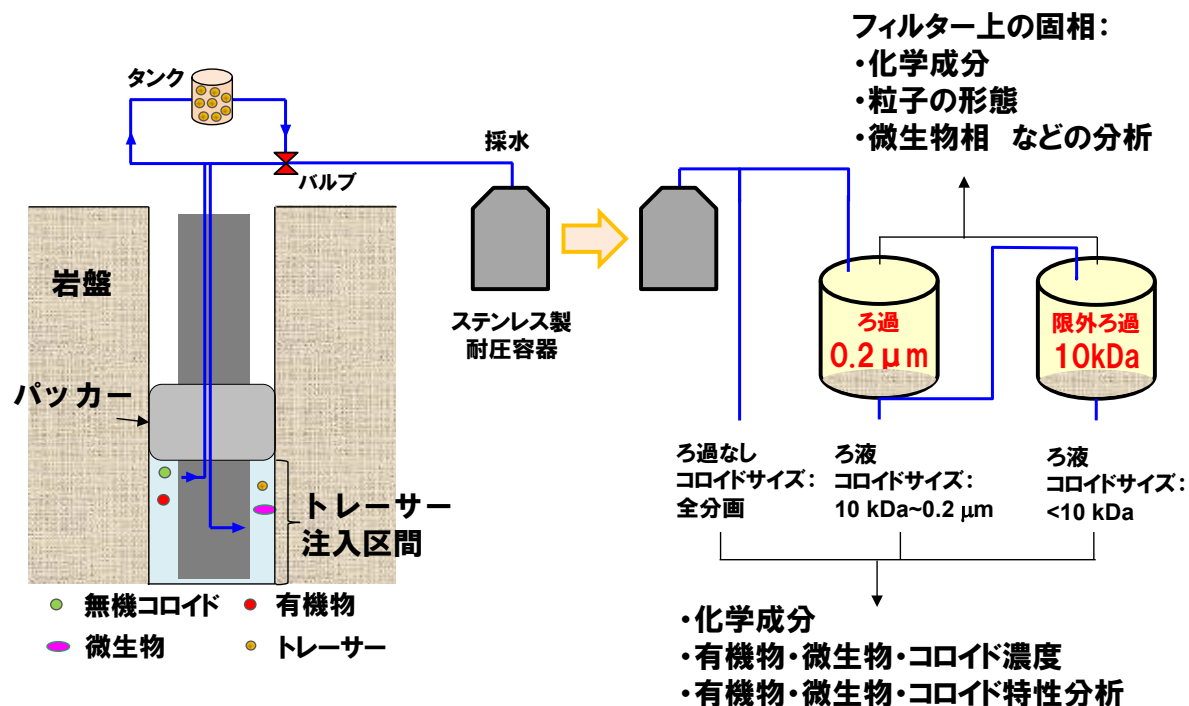
孔間が約2.6 mの距離であるのに対し、揚水孔へのトレーサーの到達までに4日程度かかるとともに、最大のトレーサー観測濃度が投入濃度に対して約0.3%であった。

①実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

2) 物質移行試験

【令和4年度の計画】

- 掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験結果に基づき物質移行挙動の評価手法などの検討
- 有機物・微生物・コロイドが核種移行に及ぼす影響を確認するための原位置試験に着手
- 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学的連結性を検証するため、令和3年度に実施したブロックスケールを対象としたトレーサー試験結果の解析評価を実施



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

②処分概念オプションの実証 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 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

【研究開発の目的と令和10年度までの実施内容】

目的：坑道の閉鎖技術や閉鎖システムの性能を担保するための設計・施工技術の選択肢を整理する。

- 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)の整備
- 閉鎖技術(埋め戻し方法：プラグ等)の実証
- 人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工に係る品質保証体系の構築

【令和3年度の実施内容と成果】

- コンクリート支保の経年変化を調査する暴露試験を継続し、地下水に湿潤した条件では、コンクリート構造物の劣化の原因となる中性化の領域がごくわずかであることを確認
- 止水プラグに用いるベントナイト吹付けの工学規模試験を実施し、吹付け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バラツキなどの施工品質を整理
- 緩衝材の流出挙動を把握するための試験として長期的な緩衝材の流出量、膨潤圧、試験孔にかかる水圧などの計測を開始、また室内試験により湧水量と緩衝材の流出量の関係を把握

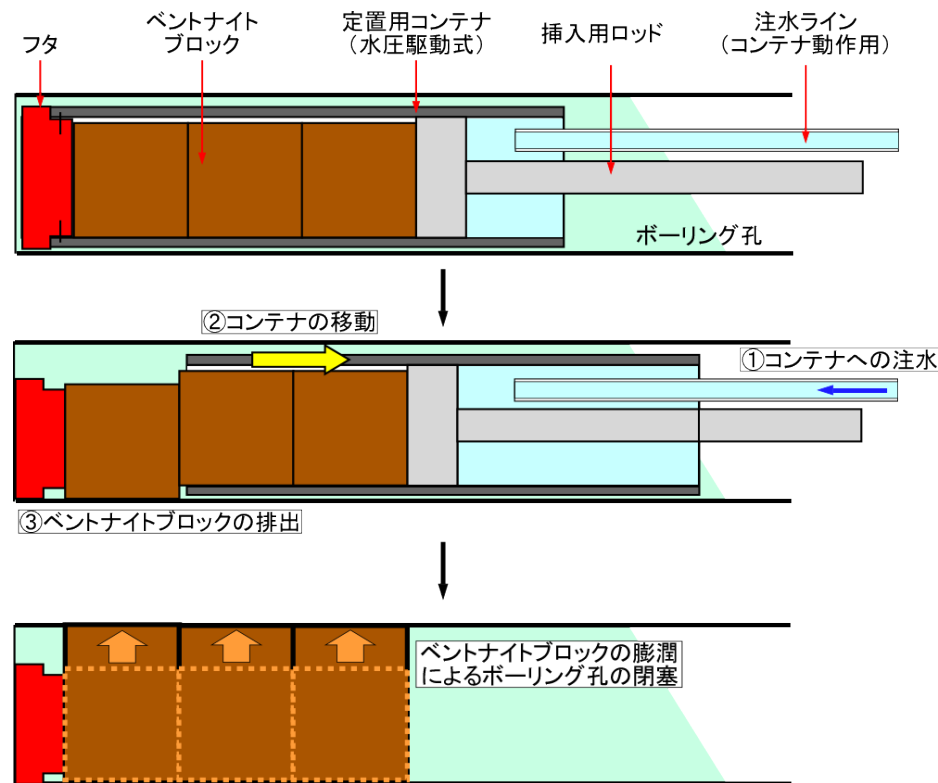


ベントナイトの吹付けによる施工方法の
工学規模試験実施状況

②処分概念オプションの実証 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 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4年度の計画】

- 地下環境でのコンクリートの物性変化データの取得を継続するとともに、坑道閉鎖後における周辺岩盤の環境（応力状態、透水性など）の変化の予測解析を実施
- 埋め戻し材やプラグなどの要求性能を具体化する上で必要となる材料特性データや坑道周辺の地質環境データの整備を目的とした解析、室内試験および掘削損傷領域の調査技術の確認などを継続
- 止水プラグの施工技術オプションの整備のため、吹付け後のベントナイトの乾燥密度や含水比などの施工品質の整理を継続します。さらに、新規に掘削するボーリング孔を利用し、ボーリング孔の閉塞技術の適用性を確認する原位置試験を実施
- 令和3年度に開始した、長期の緩衝材の流出試験を継続し、緩衝材の施工方法に応じた長期的な緩衝材の流出量などを確認



ボーリング孔閉塞の原位置試験の概念図

斜め下向きに掘削予定。
水色：注入水、緑色：坑内水

②処分概念オプションの実証

2) 高温度(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

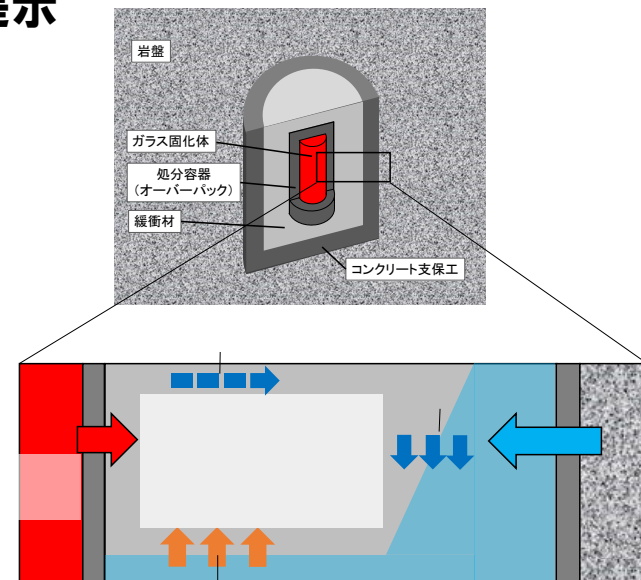
【研究開発の目的と令和10年度までの実施内容】

目的: 想定外の要因により緩衝材温度が100℃を超えた場合の挙動を確認する。

- 100℃超になった際に人工バリアとその周辺岩盤において発生する現象の整理
- 人工バリアとその周辺岩盤における上限温度設定の考え方の提示

【令和3年度の実施内容と成果】

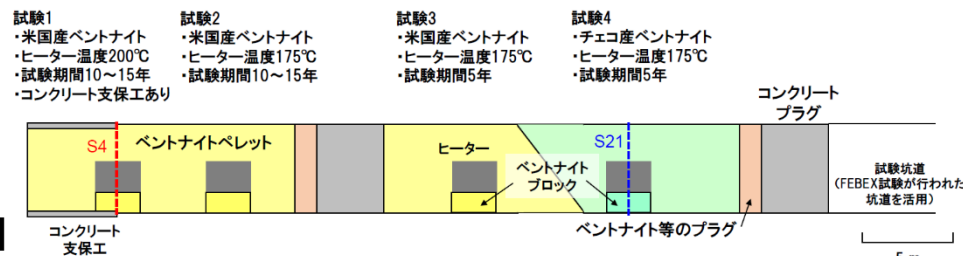
- 緩衝材の温度が100℃を超えた状態で発生しうる現象に関する試験等の事例を調査した結果、緩衝材中のスメクタイトのイライト化については、およそ130℃までは1,000年後の緩衝材の変質割合が小さいと推定
- 海外機関が実施している緩衝材の最高温度が100℃を超えた状態を模擬する原位置試験について、模擬廃棄体(ヒーター)の加熱に伴う計測データ等に関する情報を入手



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4年度の計画】

- 先行研究の事例調査を基に、100℃を超えた状態で生じ得る現象等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
- 海外の原位置試験に関する情報収集を継続



国際プロジェクトHotBENT試験(スイス)の概念図

地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

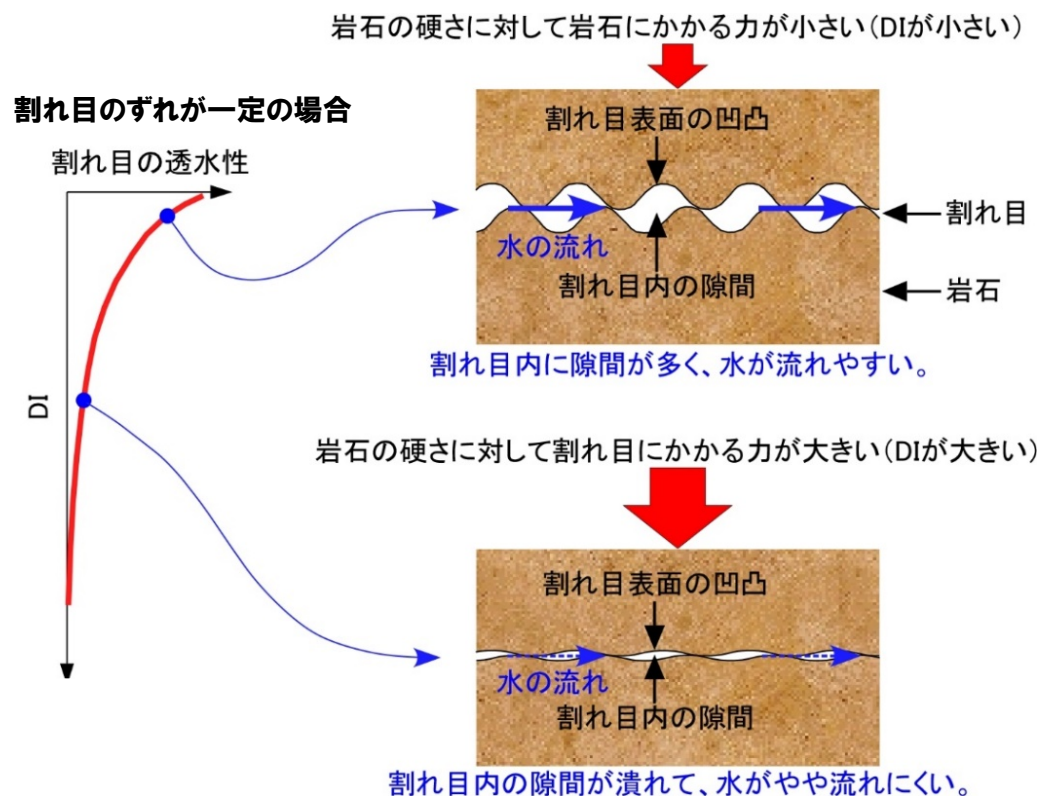
【研究開発の目的と令和10年度までの実施内容】

目的: 地殻変動が透水性に与える影響を推測するための手法を整備する。

- ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験
- 断層、割れ目の長期的な透水性の評価手法の構築

【令和3年度の実施内容と成果】

- 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った結果、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の間の相関関係について、その物理的根拠を定量的に明らかにするとともに、新たな経験式を構築
- 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現象について、透水性や幾何形状に関し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

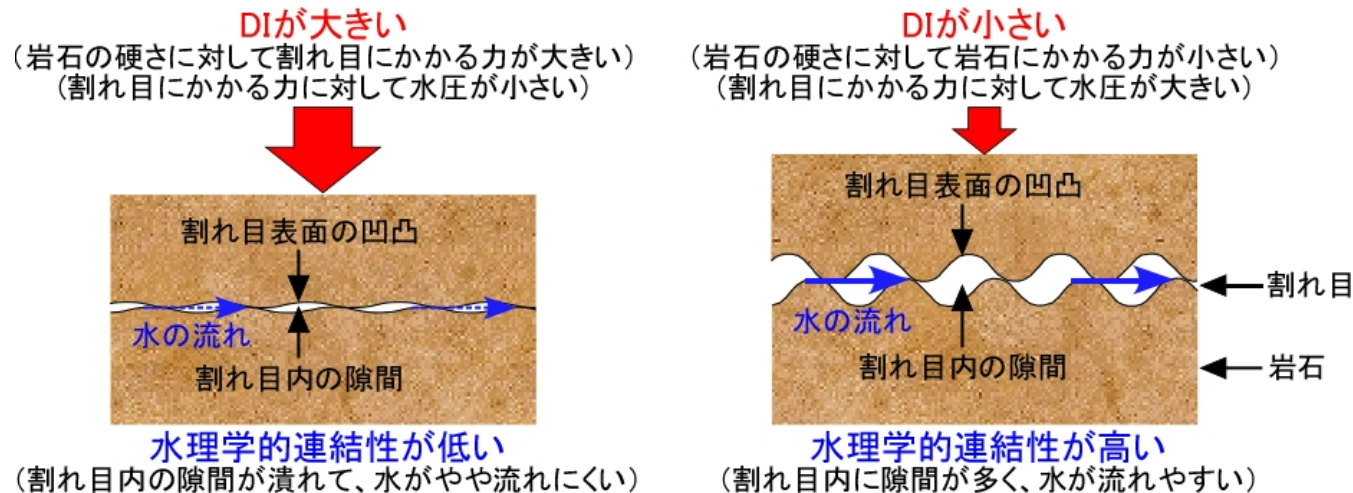


DI、割れ目内の隙間の開閉、および割れ目の透水性の関係

地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

【令和4年度の計画】

- 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
- 既存のデータを活用して、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



DIと割れ目の水理学的連結性の関係

③地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証 1) 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

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

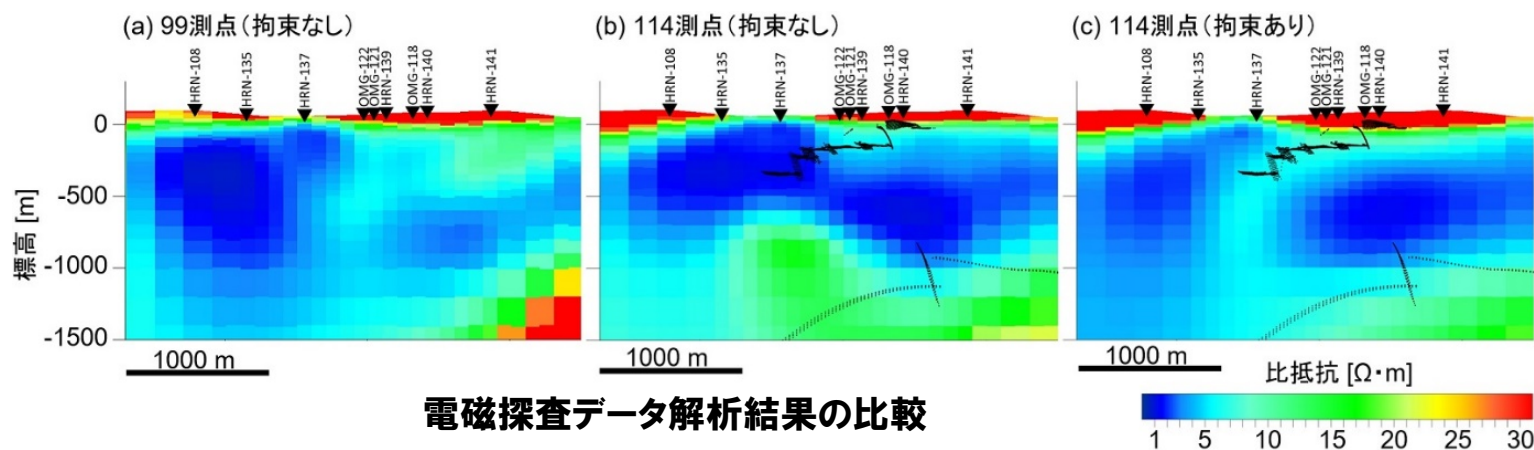
【研究開発の目的と令和10年度までの実施内容】

目的: 地下水の流れが非常に遅い領域の分布を把握するための技術を構築する。

- 化石海水の分布領域の調査・評価技術の高度化
- 地下水の滞留時間、塩濃度分布を推測するための水理解析、物質移動解析

【令和3年度の実施内容と成果】

- 令和2年度に実施した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、声問層を対象にボーリング調査(深度200mまで)を実施し、地質環境特性を把握
- 過去の電磁探査データを加えた比抵抗分布の再解析を実施した結果、より深い深度での解析精度が向上し、地層の分布と調和する結果を得た
- 地形や海水準などの長期的時間変化を考慮した感度解析を実施した結果、長期的な地形変化や地下水の密度変化などが化石海水領域に影響を及ぼし得ることが分かった



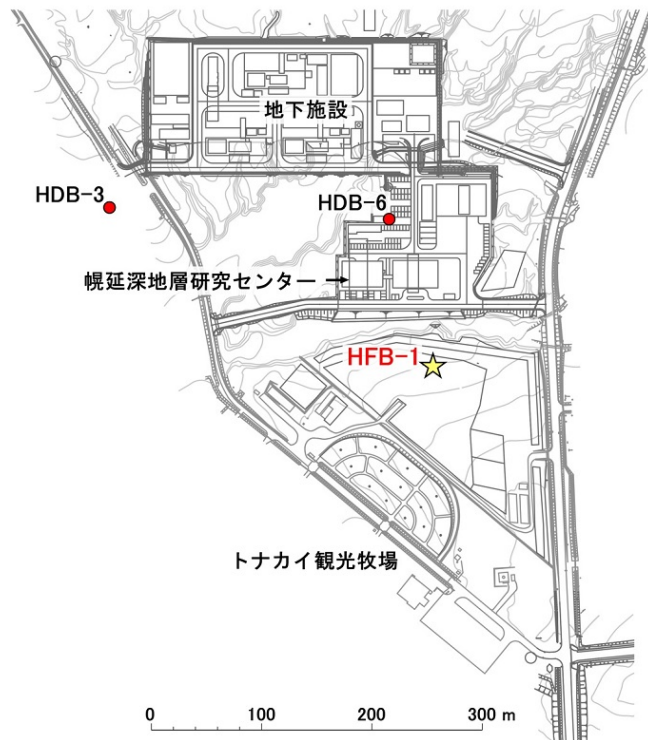
電磁探査データ解析結果の比較

- (a) 令和2年度の物理探査範囲内のデータを使った解析結果
- (b) (a) のデータ及び上記範囲外のデータを使った解析結果
- (c) (b) のデータを使い、地表付近の高比抵抗構造と反射法地震探査で得られた地層境界面を拘束条件とした解析結果

③地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証 1) 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化 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4年度の計画】

- 令和3年度に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
- 化石海水の三次元分布を推定するための、物理探査、ボーリング調査、地球統計学的解析、水理・物質移行解析といった一連の調査・解析手法の取りまとめ



ボーリング調査実施地点(HFB-1孔)



ボーリング調査現場の全景

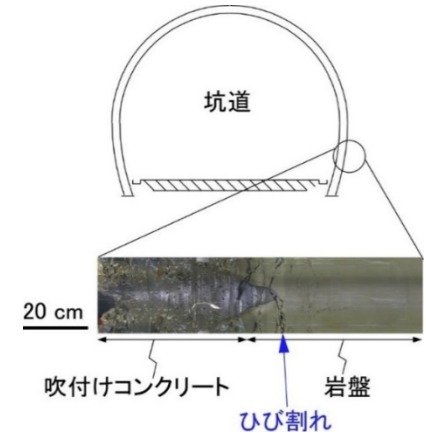
③地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

2) 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

【研究開発の目的と令和10年度までの実施内容】

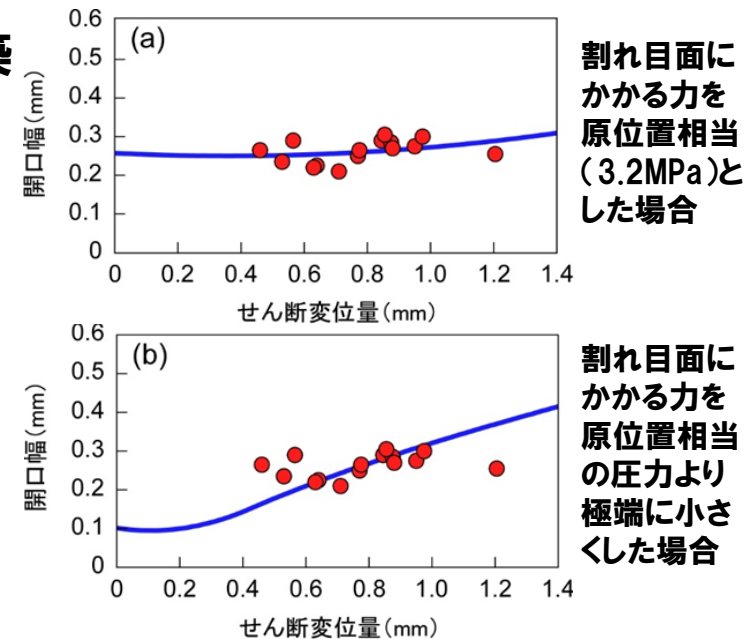
目的：坑道閉鎖後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤を踏まえ、掘削損傷領域の透水性を推測する手法を構築する。

- 緩衝材や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)に与える影響の解析手法の構築
- 坑道近傍の力学条件に基づいて掘削損傷領域の透水性予測方法の構築
- 坑道埋め戻し後の掘削損傷領域の透水性予測方法の構築



【令和3年度の実施内容と成果】

- 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の妥当性を検証するためのシミュレーションを行った結果、割れ目の開口幅とせん断変位量の間には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取得
- 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、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(次スライド図)を取得



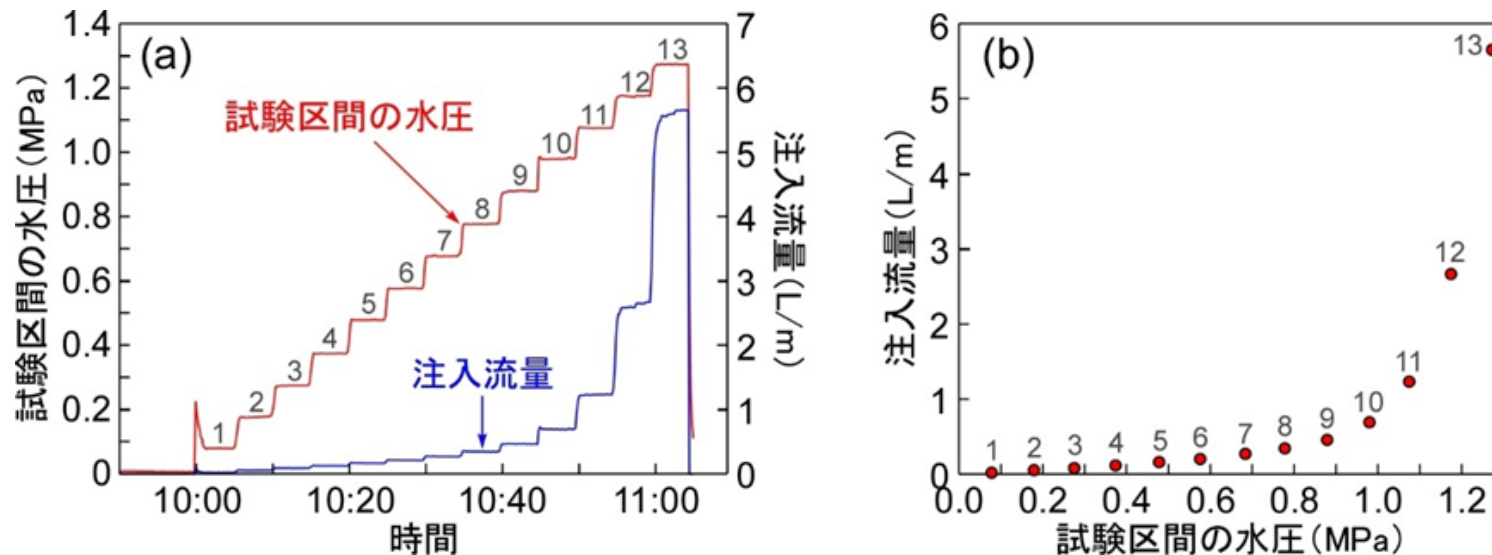
樹脂注入後の掘削損傷領域の割れ目試料で観察された開口幅とせん断変位量の関係(赤丸)とシミュレーション結果(青線)

③地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

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4年度の計画】

- 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



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す

(参考) DECOVALEXの概要

DECOVALEX (The **DE**velopment of **CO**upled models and their **VAL**idation against **Ex**periments)

連成モデルの開発とその実験結果との検証に関する国際共同研究)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一つである熱－水理－力学－化学連成挙動モデルの開発・検証を目的とした国際共同研究です。

第7フェーズ(DECOVALEX 2023)は、2020年に開始しました。
17機関が、出資機関です。

【DECOVALEX 2023における7つの課題】

Understanding of Processes and Impact on Safety

1. SAFENET: Micro-Scale THMC Lab Experiments with Focus on Shear
2. Modeling Advection of Gas in Clays (MAGIC)
3. Heat and Gas Fracturing in Clays (HGFrac)

Full-Scale THM Demonstration Experiments

4. THM Modeling of the FE Experiment
5. Full-scale Engineered Barrier System Experiment at Horonobe URL

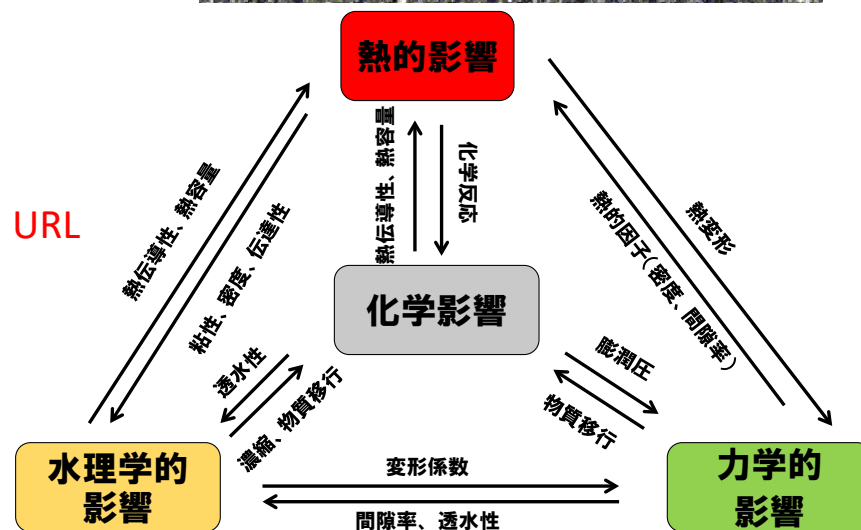
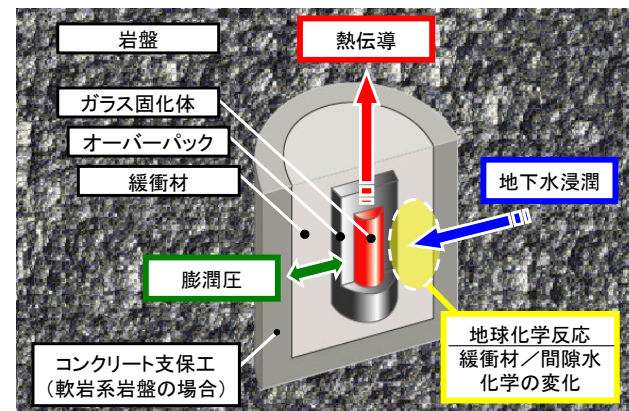
【幌延の人工バリア性能確認試験を題材とした課題】

THM Behavior of Salt as a Host Rock

6. Brine Availability Test in Salt (BATS)

Performance Assessment (PA) Methodologies

7. Comparison of PA Methods for Two Generic Repository Cases

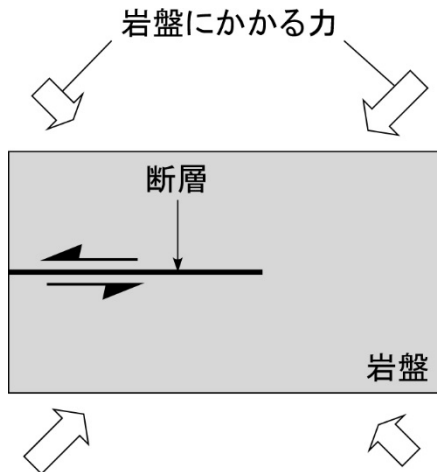


ニアフィールドにおける連成現象

(参考) ダクティリティインデックス(DI)の概念

岩盤の水の流れやすさを四次元的
(三次元+時間変化)に推定するた
めのパラメーター

既にある断層に力がかかると断層は動く

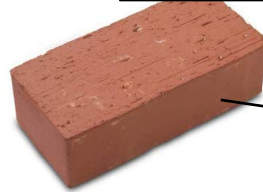


岩盤にかかっている力と
岩盤の固さのバランス
(DI)で割れ目ができるか
変形するのかが決まる

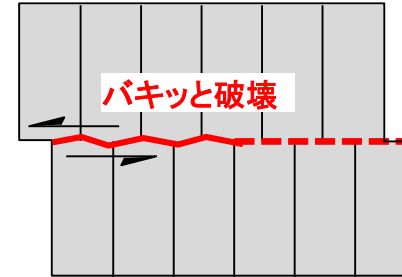
$$DI = \frac{\text{岩盤にかかる力}}{\text{岩盤の固さ}}$$

- ※岩盤にかかる力は深度が深くなると大きくなります
- ※岩盤にかかる力は平均応力を用います
- ※岩盤の固さは引張強度を用います

レンガのような固いイメージ



DIが小さい(岩盤にかかる力に対して
岩盤が十分に固い)と割れ目ができる

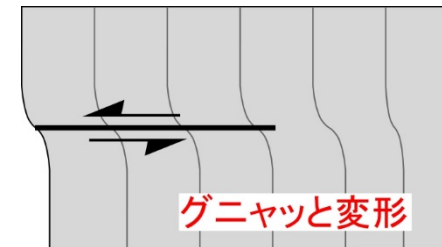


将来的に水が流
れやすい岩盤

$DI < 2$

$DI \gg 2$

この違いを数値で判断できる



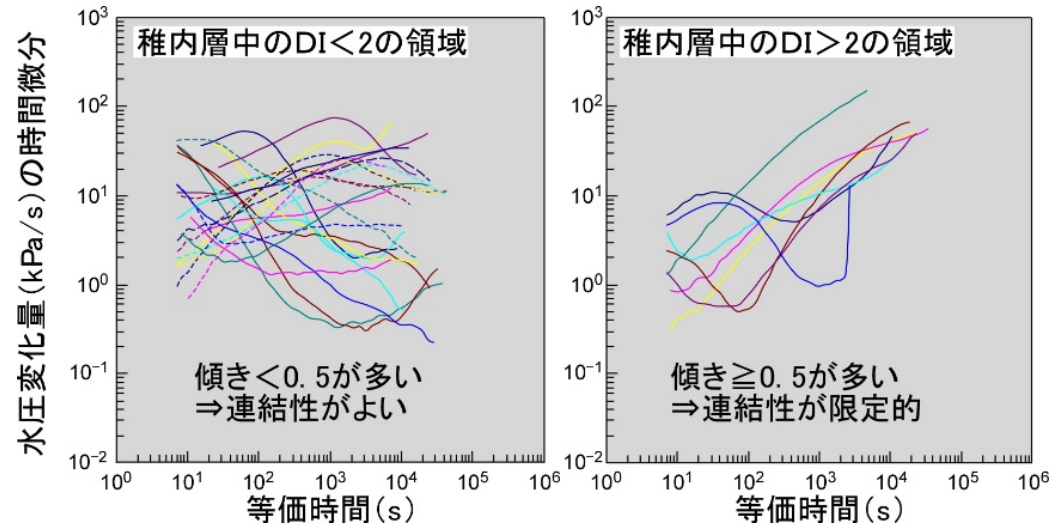
将来的に水が流
れにくい岩盤

DIが大きい(岩盤にかかる力に対して岩盤が十分
に柔らかい)と変形する(割れ目はできない)

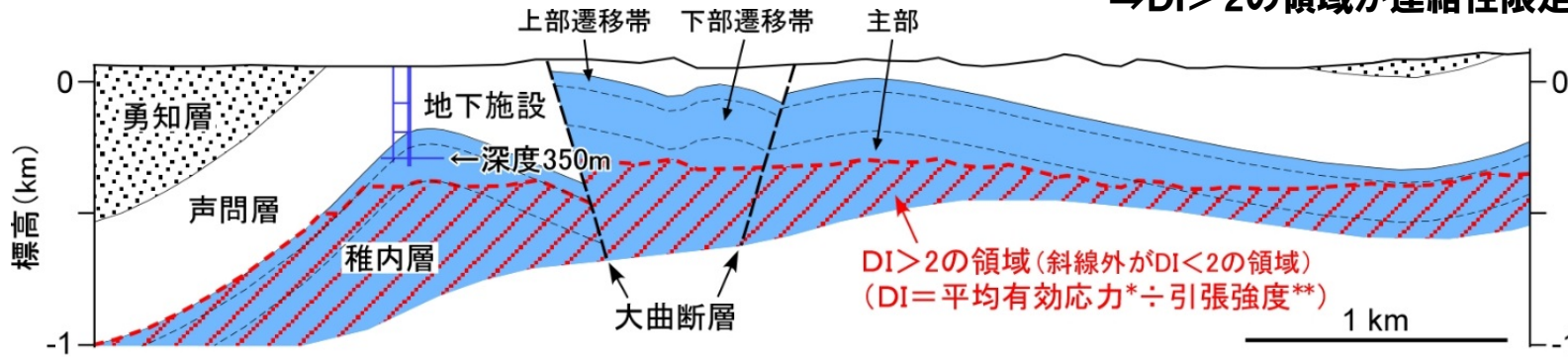
粘土のような柔らかいイメージ



(参考) ダクティリティーインデックス(DI)の分布



透水試験の詳細解析による亀裂の不連結性の評価
⇒DI>2の領域が連結性限定的



*地下施設周辺の平均有効応力(MPa) $\approx 7.8 \times \text{深度(km)}$ **稚内層の引張強度(MPa): 上部遷移帯 ≈ 2.2 、下部遷移帯 ≈ 1.8 、主部 ≈ 1.5

力学的検討に基づく稚内層中のDIの分布

亀裂の不連結性のDI依存性