

令和2年度以降の幌延深地層研究計画 の成果報告(令和4年度～令和6年度)

②必須の課題のうち令和6年度に取りまとめる課題

令和7年10月20日

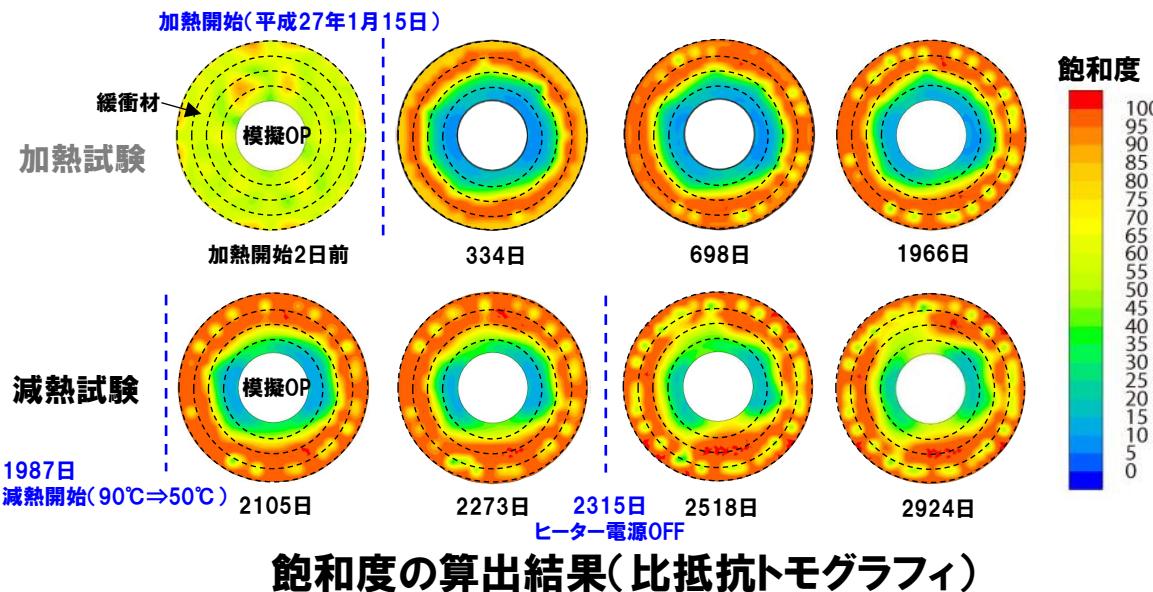
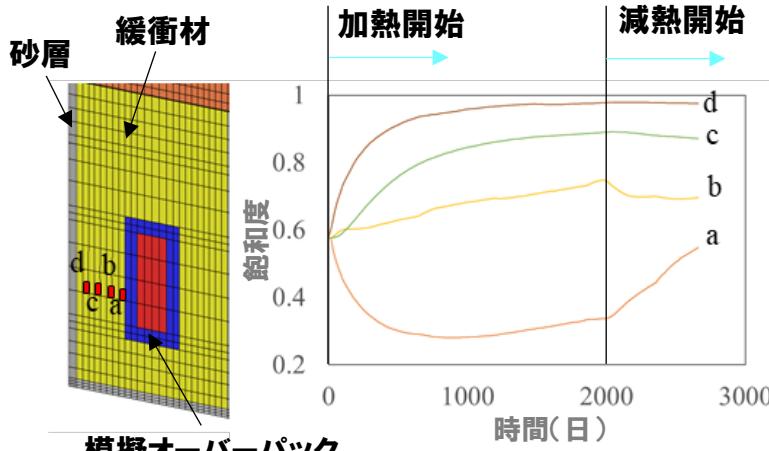
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
幌延深地層研究センター

1.1 人工バリア性能確認試験

【第4期中長期計画 目的】

熱－水－応力－化学連成現象モデルの高度化

› 緩衝材の地下水浸潤データを取得し、連成モデルの適用性確認



【実施内容】

- › 減熱過程の試験データの取得
- › 国際共同研究(DECOVALEX)において、取得データに基づく連成解析結果を比較、検証
- › 人工バリア解体試験施工の結果(緩衝材、埋め戻し材、コンクリート、岩盤および境界面の採取手法に関する知見)をもとに、人工バリア性能確認試験場所の解体調査計画を検討

1.1 人工バリア性能確認試験

【成果:DECOVALEX 2023】

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。

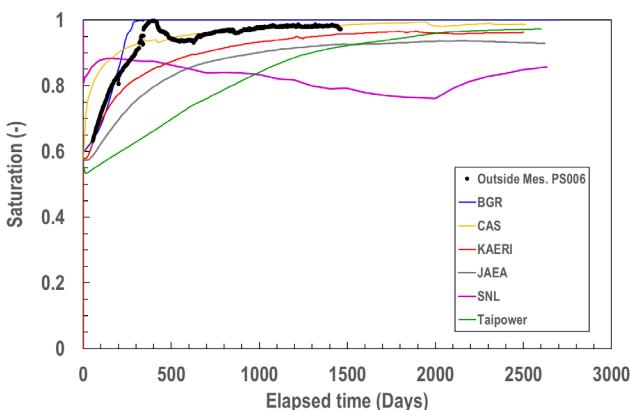
解析対象: 膨潤圧試験、膨潤変形試験、浸潤試験、温度勾配水分拡散試験結果

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

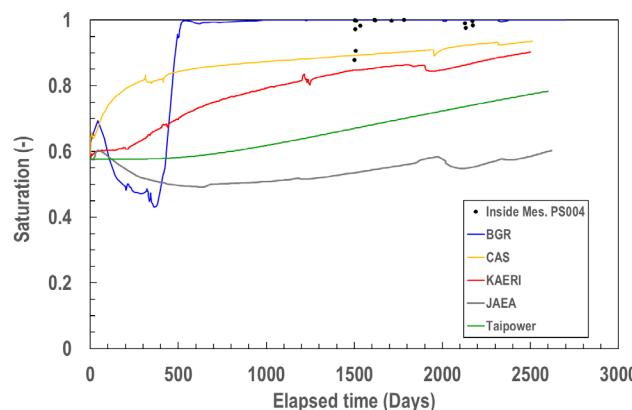
目的: 実現象に近い系での比較により、推定したパラメータや評価手法の妥当性を検証

解析対象: 温度、飽和度、応力、変位の経時変化

原位置試験結果を対象とした検証例

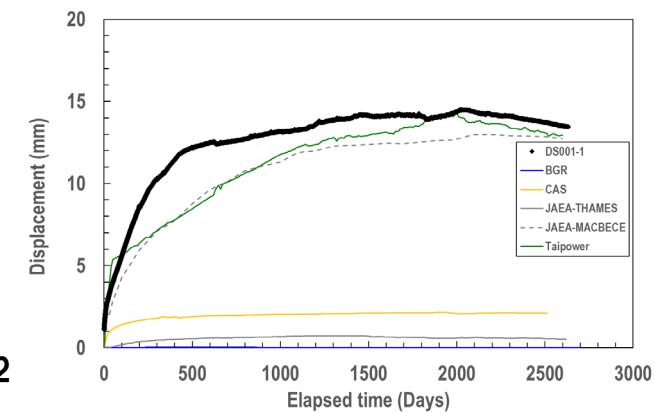


緩衝材外側の飽和度変化



緩衝材内側の飽和度変化

- ・ 緩衝材外側の飽和度変化は各機関の解析結果はほぼ同様の傾向を示したが、緩衝材内側(ヒーター近傍)の飽和度変化は大きな差が見られた
- ・ ヒーター近傍の浸潤挙動はヒーターの加熱によって生じる温度勾配による水蒸気拡散が大きく影響し、それらの現象をモデルに組み込むこと、室内試験などで水蒸気拡散に関わるパラメータを精度よく同定することが重要



模擬OP下部の変位

- ・ 室内試験(一軸圧縮試験)で取得された変形係数を用いた弾性体モデルでは、膨潤変形を過小に評価する
- ・ 弾性体モデルでも、膨潤変形に関わる式を追加することで再現性は向上
- ・ 弹塑性体モデルでは、室内試験を基にしたフィッティングにより同定したパラメータを使用することで、原位置の膨潤変形挙動も再現可能

1.1 人工バリア性能確認試験

【成果:DECOVALEX 2023】

- 国際共同研究DECOVALEXでは、人工バリア性能確認試験のデータを対象に熱－水理－力学連成解析を実施し、室内試験および原位置試験の各機関の解析結果を比較した。
- その結果、等温条件での浸潤挙動は計測結果と解析結果がよく一致する結果が得られたが、温度勾配条件での浸潤挙動は原位置試験において、力学挙動は室内試験・原位置試験とともに、計測結果と解析結果に差異が確認された。
- 本検討により、連成現象を精度よく再現するために必要な解析モデルや感度の高いパラメータを確認した。
- 解体調査でより詳細なデータ(水分量、乾燥密度、変形、水質など)を取得することで、さらなる解析モデルの検証が可能。

DECOVALEX-2023 Task D 関連のレポートおよび論文

- Sugita, Y et al. DECOVALEX-2023: Task D Final Report, 2024.
- Sugita, Y et al. Numerical simulation of coupled THM behaviour of full-scale EBS in backfilled experimental gallery in the Horonobe URL, Geomechanics for Energy and the Environment, Vol 42, 2025, 100668.
- Ohno, H and Takayama, Y. Modeling of coupled processes in full-scale engineered barrier system performance experiment at Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, Geomechanics for Energy and the Environment, vol.41, 2025, 100636.
- Minseop, K et al. Comparative analysis of primary variables selection in modeling non-isothermal two-phase flow: Insights from EBS experiment at Horonobe URL, Geomechanics for Energy and the Environment, Vol 41, 2025, 100628.

【まとめ】

以上により、国際共同研究DECOVALEXを通じて、人工バリア周辺の連成現象に関するデータ取得(センサーによる)、それらのデータを使用した連成解析モデルの検証と課題抽出を実施。今後は、解体試験により検証データを取得し、連成解析モデルの検証を実施予定(HIP Task Cを活用)。

1.1 人工バリア性能確認試験

【HIP Task C 人工バリア性能確認試験の解体試験】

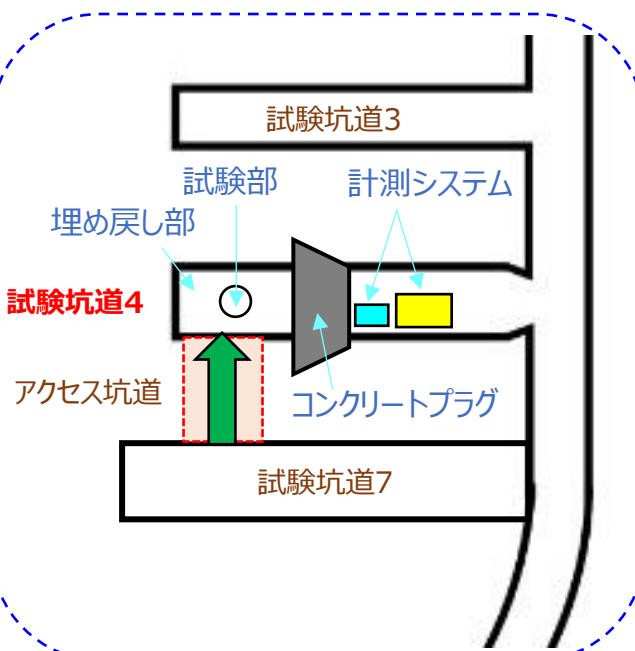
- 解体調査における各サンプリングの目的、分析項目、サンプリング位置などについて、HIP参加機関のニーズやアイデアをもとに、解体計画を検討
- 2026年から解体試験を開始し、埋め戻し材、周辺岩盤、コンクリート、緩衝材、模擬オーバーパックなどのサンプルを取得予定。

アクセス坑道の掘削



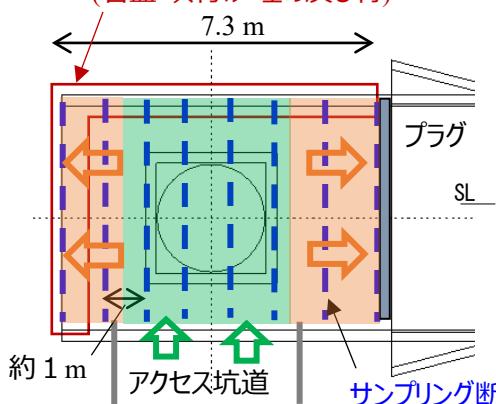
埋め戻し部のサンプリング

(埋め戻し材、周辺岩盤およびコンクリート)



平面図

界面サンプリングエリア
(岩盤-吹付け-埋め戻し材)



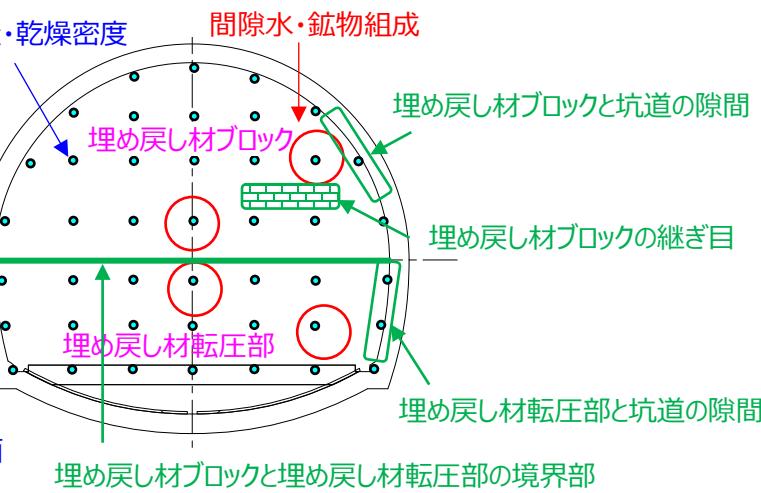
側面図

水分量・乾燥密度

間隙水・鉱物組成



試験孔部のサンプリング
(緩衝材、模擬オーバーパック)



埋め戻し部のサンプリングのイメージ図

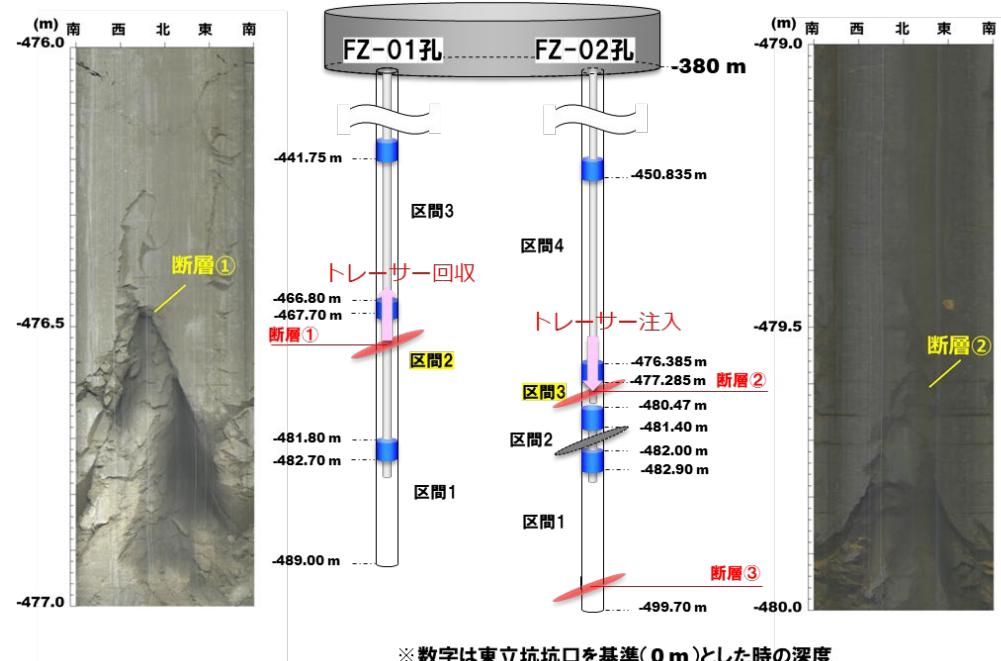
1.2 物質移行試験

【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

【実施内容】

- **掘削損傷領域における物質移行**
 - モデル化・解析手法の検討
- **有機物・微生物・コロイドの影響評価**
 - 室内試験および原位置試験の結果の整理
 - 影響評価手法の検討
- **ブロックスケールを対象とした物質移行試験**
 - モデル化・解析手法の検討



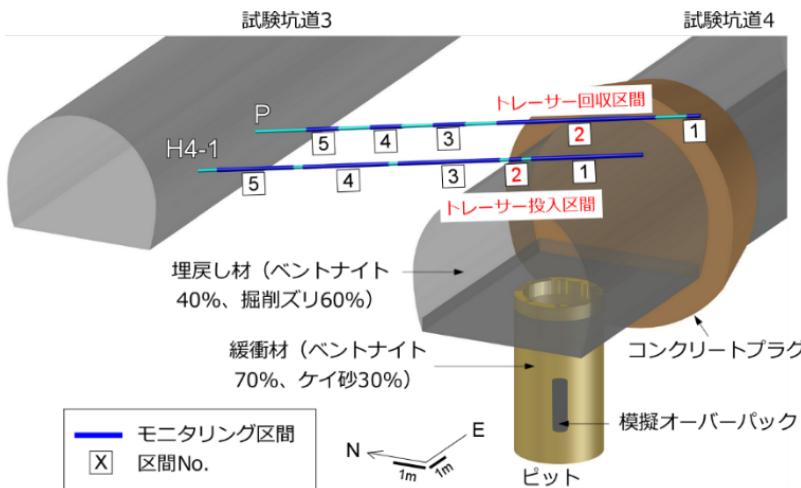
ブロックスケールを対象とした物質移行試験
(東立坑の480m付近の稚内層深部を対象, 孔間距離4.5m)

1.2 物質移行試験 掘削損傷領域における物質移行

350m調査坑道の試験坑道3および4(左下図)において掘削損傷領域を対象としたウラニン(非吸着性)を用いた孔間トレーサー試験(左下図)によりデータを取得

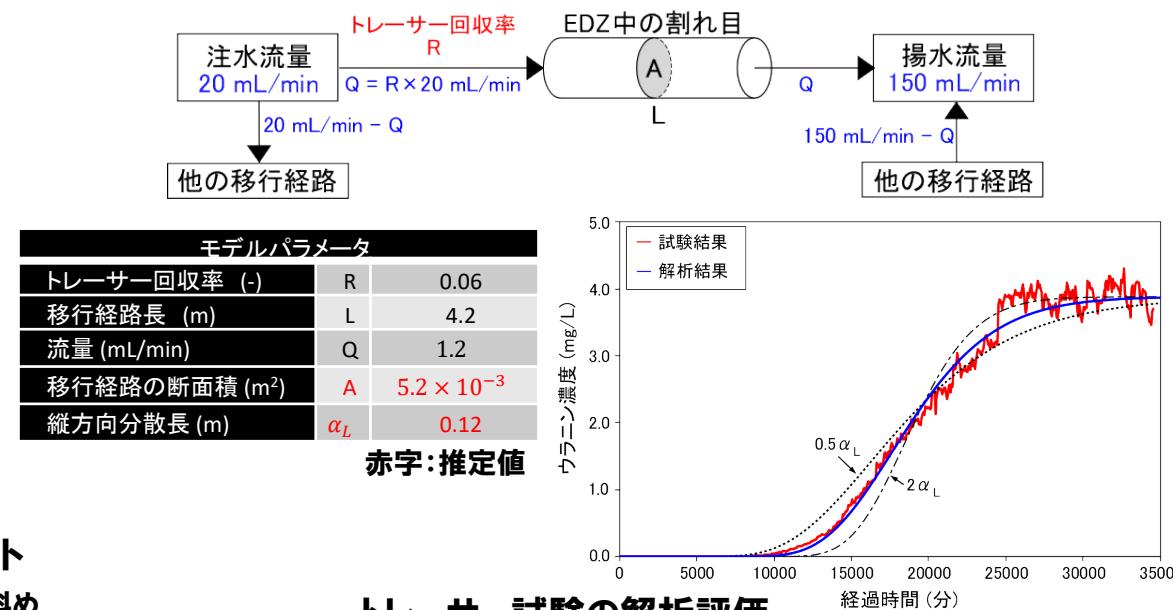
【成果】

- 複数の移行経路を介してトレーサーが移行することが想定された中、最も速い移行経路に着目し、解析評価を実施した結果、1次元の物質移行モデルを仮定することで掘削損傷領域の移流分散挙動を適切に評価可能であることを確認(右下図)
- これまでに知見の得られていない掘削損傷領域の物質移行特性を把握するための原位置でのデータ取得とモデル化手法を提示



掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験のレイアウト

H4-1孔とP孔は試験坑道3の南側壁面から試験坑道4に向かって斜め上向きに掘削されている。H4-1孔の区間2をトレーサー投入区間、P孔の区間2をトレーサー回収区間としている。



1.2 物質移行試験

【成果取りまとめ】

・掘削損傷領域における物質移行

世界的にも例が無かった掘削損傷領域の物質移行特性の原位置データを稚内層浅部を対象に取得するとともに、割れ目を一次元の経路としてモデル化することで挙動を評価可能であることを示した。これにより、掘削損傷領域の物質移行特性を把握するための原位置でのデータ取得とモデル化の手法を提示。

・有機物・微生物・コロイドの影響評価

地下水中の有機物・微生物・コロイドとの相互作用が物質移行に与える影響について、原位置と室内にてデータを取得し、その影響を定量的に見積もることができた。地下水中の有機物・微生物・コロイドの特性に関する知見やその評価手法について整備することができた。

・ブロックスケールを対象とした物質移行試験

ブロックスケール(数m～100m規模)における物質移行を評価するため、稚内層深部の割れ目の連結性が限定的な岩盤を対象に物質移行データを取得するとともに、移行経路を湾曲が大きい非常に長い一次元の経路としてモデル化した解析によって実測データを再現することができた。

【まとめ】

坑道周辺の掘削損傷領域とブロックスケールの物質移行を評価するためのデータ取得やモデル化手法を提示するとともに、有機物等の関係因子の影響を把握したことによって、総合的な物質移行特性評価手法を構築するという所期の成果を得た。

⇒今後は、体系化の研究において、坑道スケール～ピットスケールにおける閉じ込め性能を評価するための物質移行解析の中で、これらの成果を反映していく。

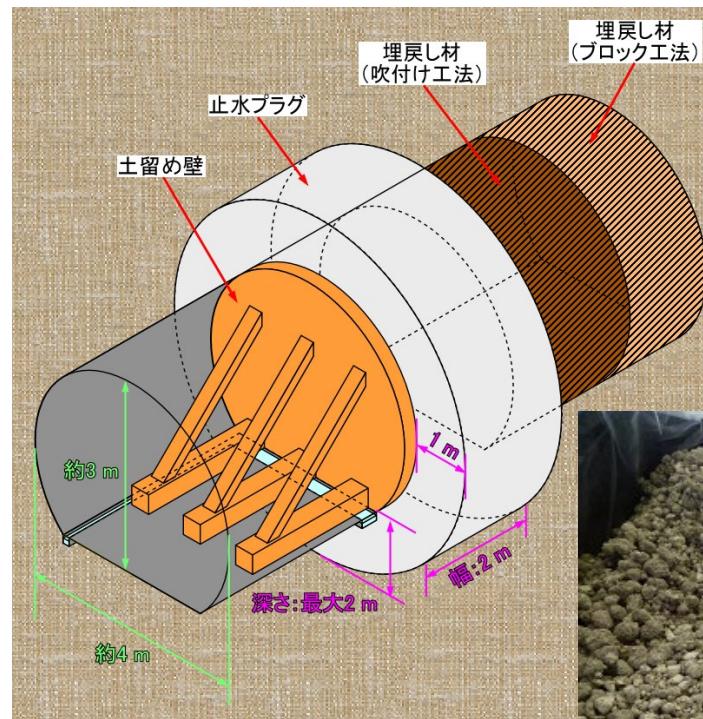
2.1.1 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証

【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

【実施内容】

- **搬送定置・回収技術の整備**
 - 支保部材の経年変化などの整理
- **閉鎖技術の実証**
 - 埋め戻し材や止水プラグなどの性能の考え方や掘削損傷領域の調査技術などの有効性や技術的な課題を検討
- **人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工の違いによる品質保証体系の構築**
 - 品質保証の仕組みや考え方の体系的な整理



止水プラグを用いた坑道閉鎖の施工試験イメージ



掘削土(ズリ)を用いた埋め戻し材

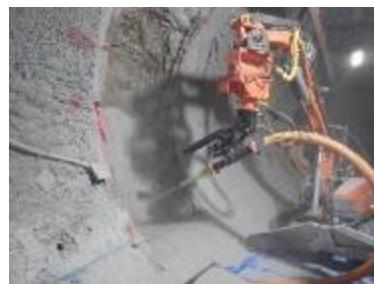
2.1.1 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証

閉鎖技術の実証

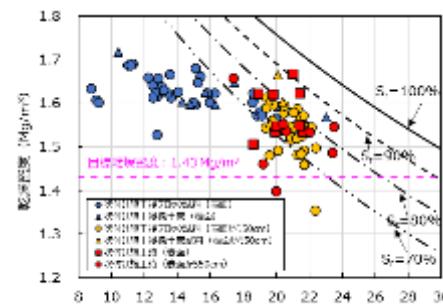
【成果】

- 止水プラグ等の施工要素技術の原位置環境への適用性・実現性を確認
- 個別要素技術の成果を実際の設計・検討に活用できる設計フローとして提示

止水プラグの施工方法として吹付け工法に着目して原位置環境での吹付け試験を実施。要求性能(透水係数)を満足する材料仕様(乾燥密度、材料配合)の施工が可能であることを確認

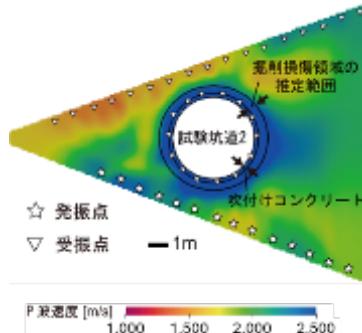


原位置吹付け試験の状況

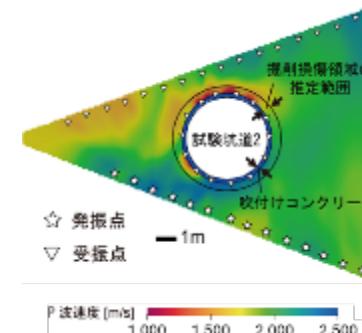


吹付け後の乾燥密度と含水比の関係

EDZの範囲や物性を調査できる方法として、坑道内においても弾性波トモグラフィや比抵抗トモグラフィを適切に適用できるように解析手法を整備



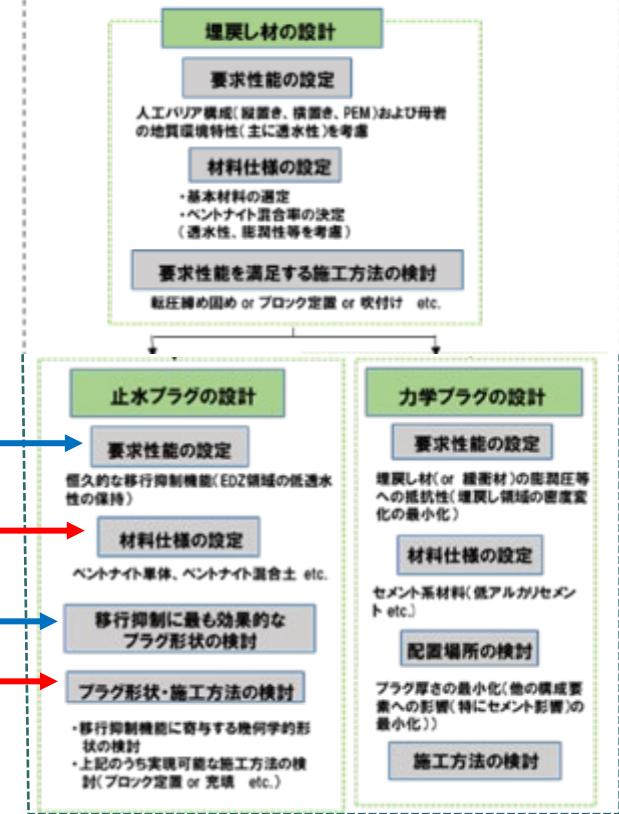
(a) 吹付けコンクリートの影響を考慮しない



(b) 吹付けコンクリートの影響を考慮

吹付けコンクリートの影響を考慮した解析手法によるP波速度分布の推定

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



設計フロー

(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), 原子力機構・原環センター, 2023)

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

【成果取りまとめ】

・ **搬送定位・回収技術の整備**

処分坑道が長期間開放された場合に生じ得るコンクリート支保の化学状態や長期的な物性変化の評価に必要な知見と調査手法、およびコンクリート支保に隣接する岩盤の坑道掘削から坑道埋め戻し後の再飽和過程の解析手法を整備できた。また、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について、現実的な時間内で一連の回収・除去作業が実現可能な見通しを得た。

・ **閉鎖技術の実証**

埋め戻し材や止水プラグについて、期待される性能の具体化や設計評価技術の改良・高度化を目的とした数値解析や原位置試験を通じて、施工方法の原位置環境への適用性・実現性を確認、個別の技術開発で得られた成果を実際の設計・検討に活用できる設計フローとして提示した。

・ **人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工の違いによる品質保証体系の構築**

埋め戻し材の施工方法について、5つの工法の適用範囲および施工品質などについて施工方法を選択する際の基盤情報を整備した。緩衝材の流出挙動について、総流出量を評価できるベースモデルを整備した。

【まとめ】

操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証について、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の整理、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、坑道の閉鎖技術に係る埋め戻しや閉鎖システムの性能を担保する設計・施工技術の選択肢の整理を行い、所期の成果を得た。

⇒今後は、体系化の研究において、ここでの成果を反映した実規模スケールの施工試験を通じて、埋め戻し材と止水プラグの設計から施工に至るまでの一連の技術を体系化する。

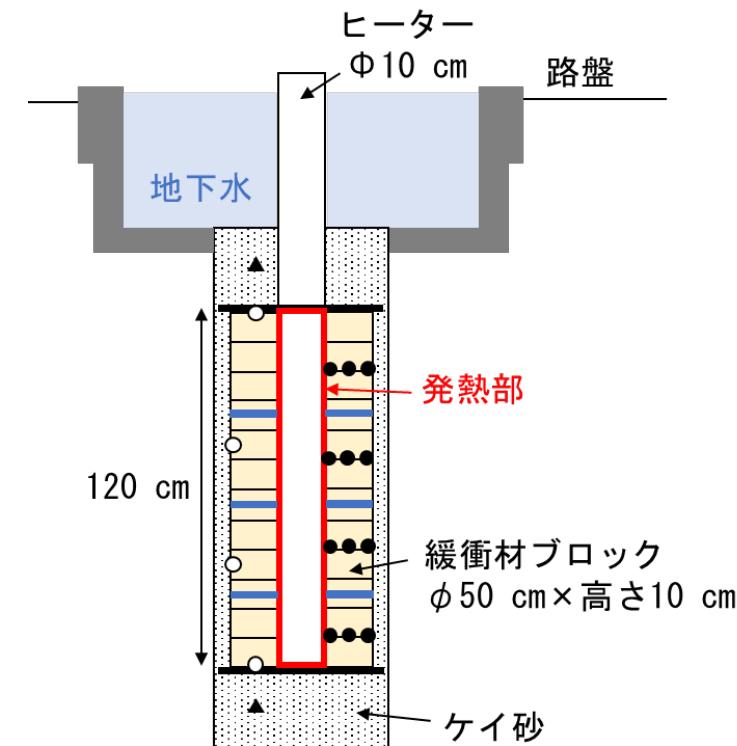
2.2 高温度(100°C以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

【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°C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

【実施内容】

- 350m試験坑道5における高温条件下での原位置試験（試験体の設置、加熱開始、孔内の温度や水分分布などのモニタリング）
- ひと組の試験系の解体、100°Cを超える熱履歴を経た緩衝材の特性を確認する試験・分析の実施
- 加熱による緩衝材のひび割れと水の浸潤による閉塞挙動を確認する室内試験の実施



- 热電対 (温度)
- ▲ 間隙水圧計 (水圧)
- 土圧計 (全応力)
- 比抵抗測定電極 (比抵抗→水分分布)

センサーの配置(断面図)

2.2 高温度(100°C以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

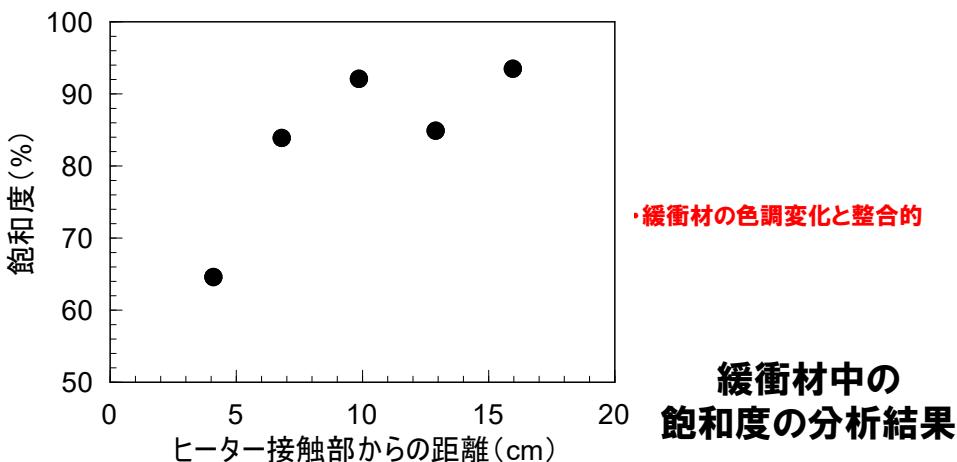
【成果】

- 加熱にともない生じる現象(緩衝材のヒーター接触部でのひび割れ等)や緩衝材特性の変化を、原位置試験の解体調査の結果とともに整理
- 原位置試験で計測された温度変化の再現解析から、緩衝材の温度分布に影響する事象を整理
- 加熱による緩衝材のひび割れ・水の浸潤による閉塞挙動に関する室内試験結果の整理

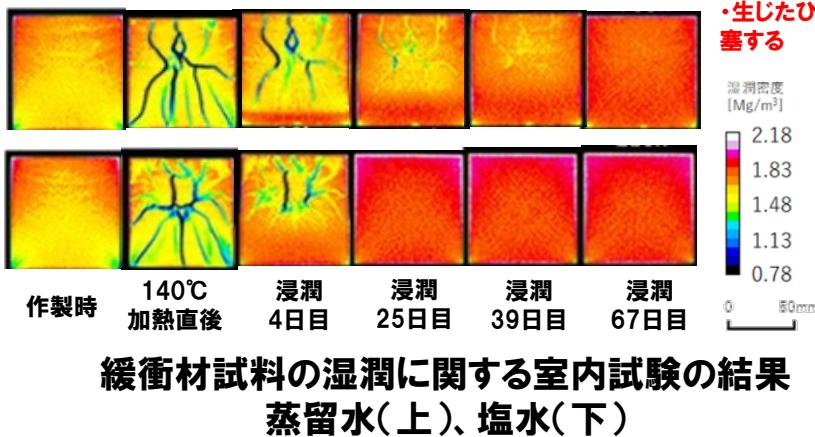


- ・上から2~12段目のヒーター接触部から外側に、最大10 cm程度まで、緩衝材の色調の変化を確認
- ・上から3~12段目のヒーター接触部で、緩衝材のひび割れを確認

緩衝材内部の色調の変化(左)、
ヒーター接触部に認められた
緩衝材のひび割れ(右)



・緩衝材の色調変化と整合的



2.2 高温度(100°C以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

【成果取りまとめ】

- 原位置試験
 - オーバーパックの局部腐食に関する既往の室内試験データ等にもとづき、ヒーター加熱温度を140°Cに設定
 - 100°Cを超えるヒーター温度での加熱により緩衝材ブロックのヒーター接触部ではひび割れが生じることを確認
 - ヒーター近傍の緩衝材では、温度履歴を受けていない緩衝材と比べて一軸圧縮強度が低く透水係数が高い傾向を確認
- 室内試験(ひび割れの発生、閉塞挙動を確認)
 - 高温度での加熱により緩衝材にひび割れが生じてもそれらが優先的な水みちとはならないことを確認
 - 生じたひび割れは、蒸留水を浸潤させた場合および塩水を浸潤させた場合のいずれも閉塞することを確認

【まとめ】

以上により、所期の目標である、短期的に100°Cを超えた場合に緩衝材に生じる変質や人工バリアおよびその周辺に発生する現象の原位置条件での把握、人工バリア周辺における上限温度設定の考え方の整備を完了。

⇒今後は、体系化の研究において、ピットスケールの人工バリア等の評価の中で、ここで得られた成果を反映していく。

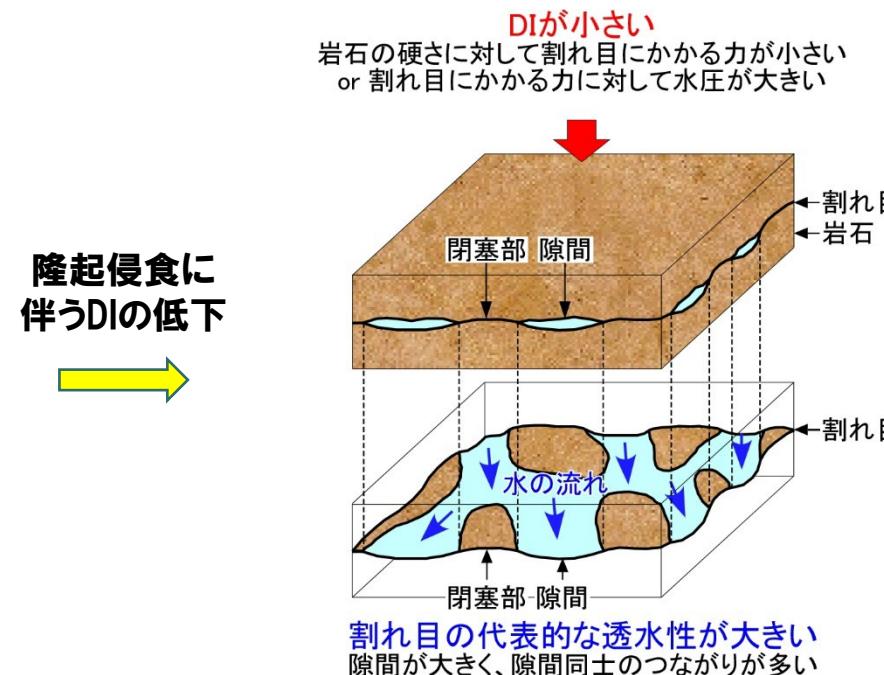
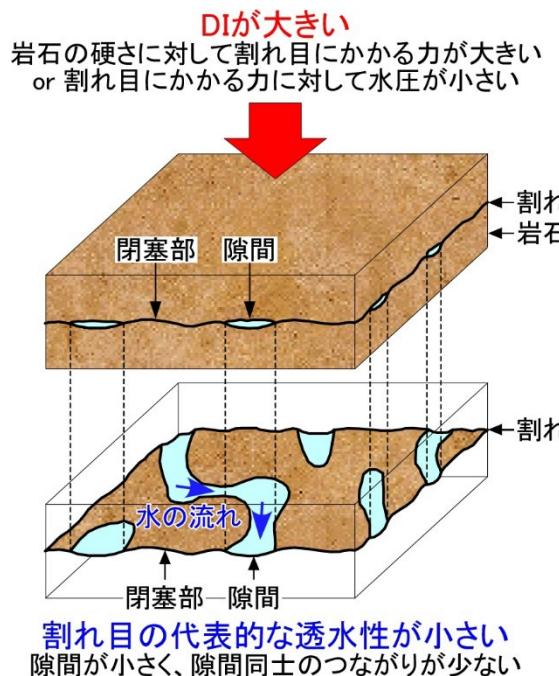
3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

【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、断層の力学的な安定性評価の手法を整備

【実施内容】

- 断層/割れ目の水理学的連結性とDIの関係や断層の力学的な安定性に関する検討
- これまでの成果の取りまとめ



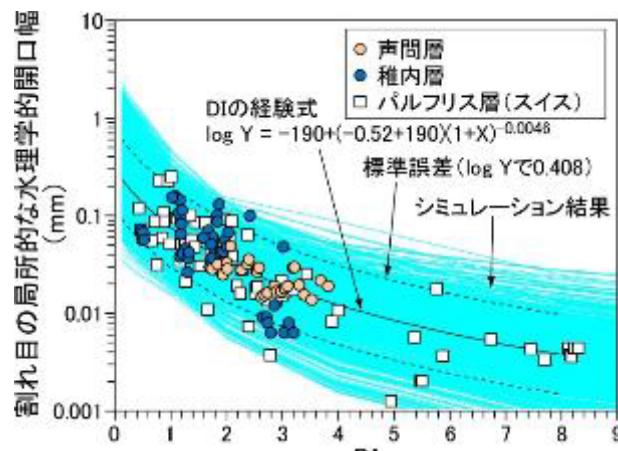
隆起侵食に
伴うDIの低下

DI*と割れ目の代表的な透水性の関係

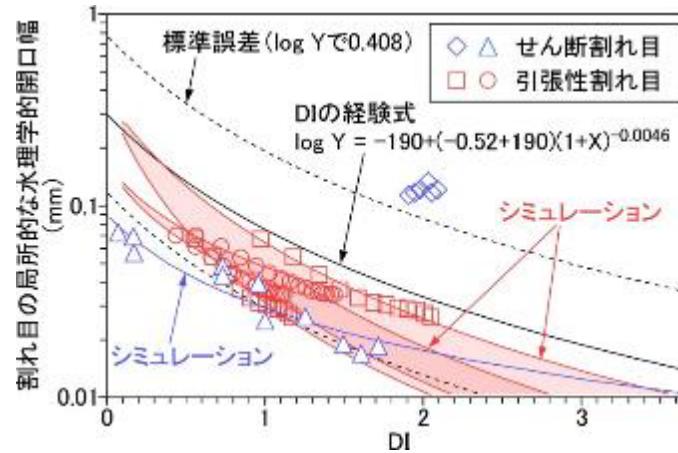
*DI(ダクティリティインデックス):岩石にかかる力を岩石の引張り強さで割ったもの

3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

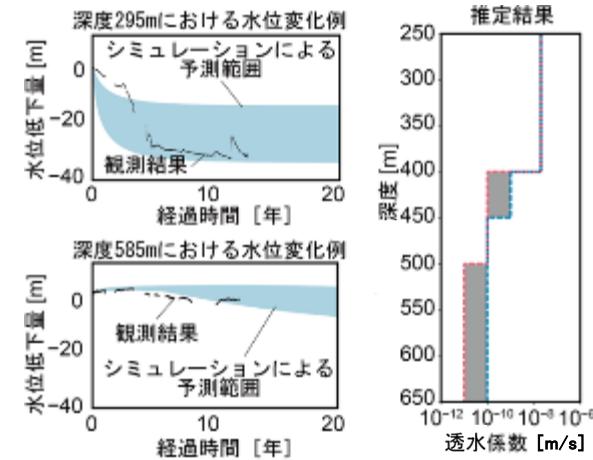
【成果】水圧擾乱試験による地殻変動の影響を含めた透水性評価手法の整備



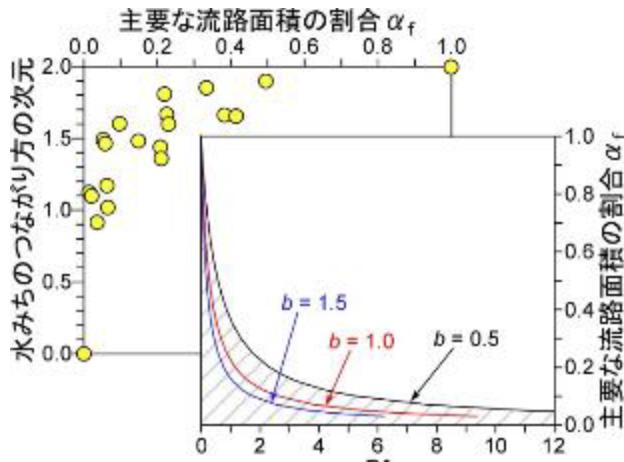
割れ目内での隙間の大きさとDIの関係の構築とシミュレーションによる検証



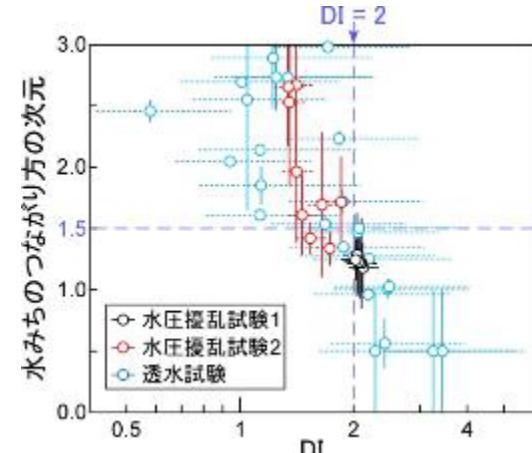
稚内層における割れ目を対象とした水圧擾乱試験による検証



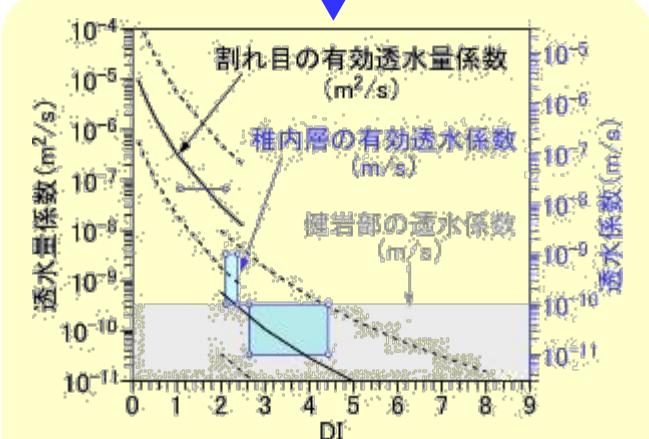
地下施設周辺の水圧変化に基づく稚内層の有効透水係数の推定



仮想透水試験による割れ目内の隙間のつながり具合とDIの関係



稚内層における断層帯を対象とした透水試験と水圧擾乱試験による検証



地殻変動の影響を考慮した割れ目の有効透水量係数とDIの関係

3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

【成果取りまとめ】

- ・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については、稚内層と類似する地層の場合、断層や割れ目の代表的な透水性とダクティリティインデックス(DI)の関係や水圧擾乱試験を適用することにより、地殻変動の影響を考慮した地層の長期的な透水性を評価可能
- ・断層の力学的な安定性を表す指標のひとつであるせん断剛性を水圧擾乱試験により原位置で適切に評価できることを確認

【まとめ】

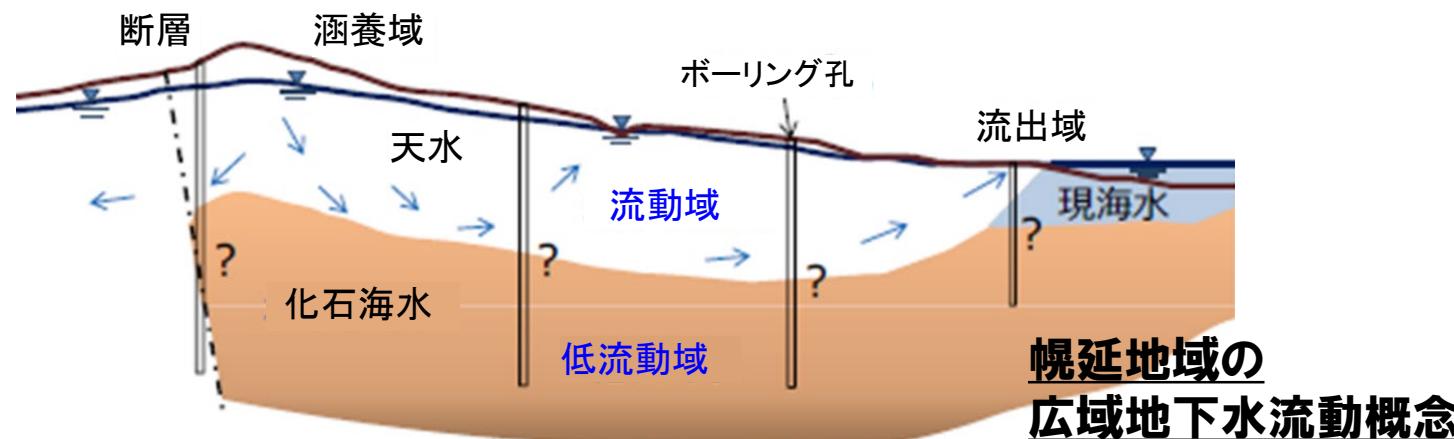
地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握、ダクティリティインデックス(DI)を用いた透水性評価の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備、水圧擾乱試験による断層の力学的な安定性評価手法の整備を完了した。

⇒今後は、体系化の研究において、ここで得られた成果を反映して、ピット周辺の割れ目からの湧水量や掘削損傷領域の広がりなどの調査・評価手法の整理を進める。

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

【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



- 地下浅部は、隆起・侵食により天水が涵養し、地下を経由して、流出域まで流動する**流動域**
- 地下深部は、隆起・侵食を経ても天水の涵養の影響を受けておらず、埋没続成過程により変質した堆積時の海水※が残されており、拡散が支配的な**低流動域**

※本研究では、このような古い海水を「化石海水」と呼ぶ

【実施内容】

引き続きこれまでに得られた成果に基づき、地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する方法を取りまとめる。

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

【成果】

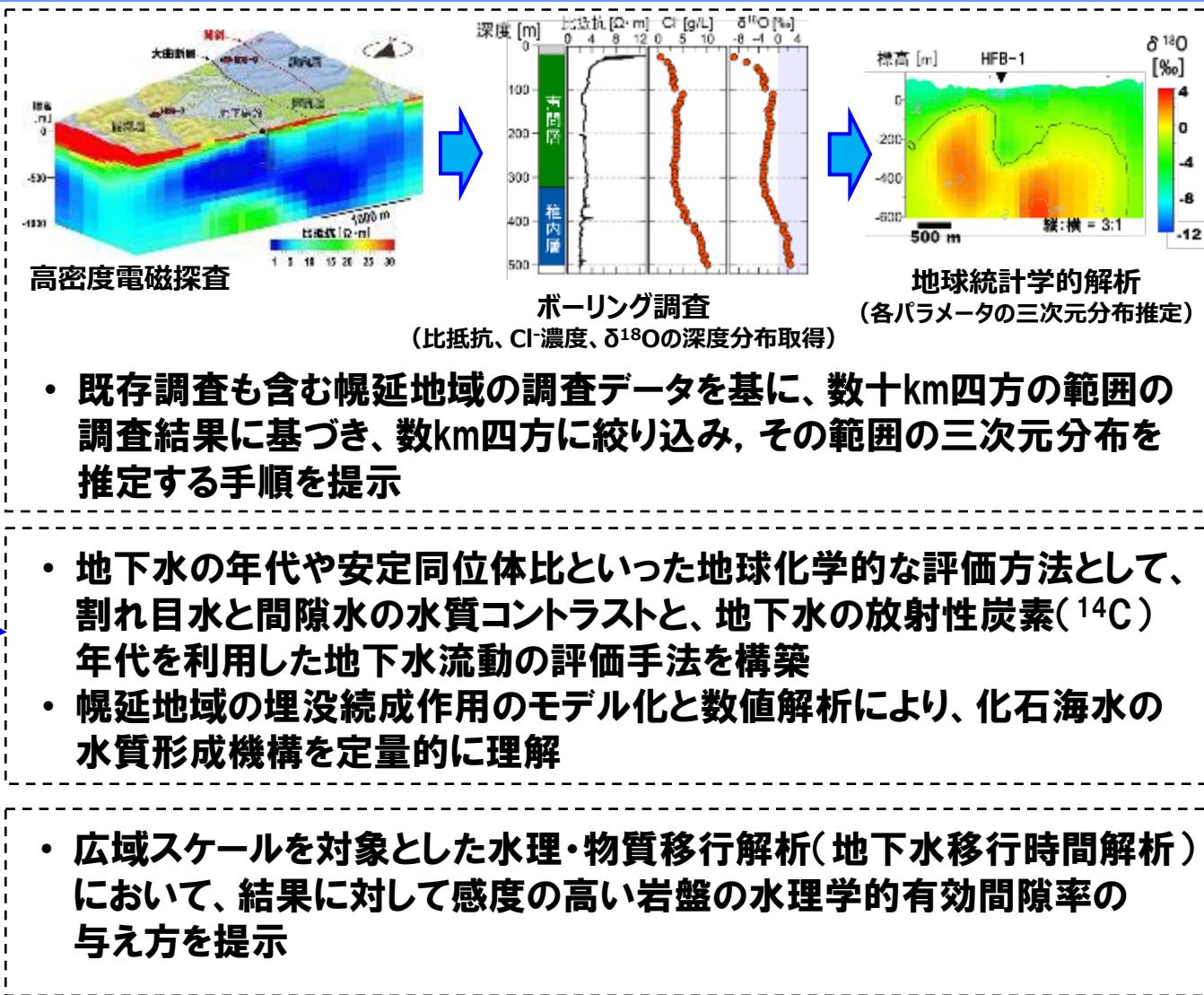
地下水の流れが非常に遅い領域の調査・モデル化技術を実証

流動域/低流動域の三次元分布を調査・評価

流動域/低流動域の三次元分布を推定

長期的に安定な水理場・化学環境の確認

水理モデル構築と数値解析による地下水移行時間の評価



※平成30年度～令和4年度工ネ庁事業（岩盤中地下水流動評価技術高度化開発）の成果の一部を活用して実施

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

【成果取りまとめ】

- 化石海水の三次元分布を地上からの調査から推定する一連の手法と手順を提示
 - 手順1: 数十km四方～数km四方を対象とした電磁探査
 - 手順2: 電磁探査結果に基づくボーリング調査地点の選定とボーリング調査
 - 手順3: 地球統計学的手法による酸素同位体比の三次元分布の推定
- 地下水年代等による安定な水理場・化学環境の確認手法を提示
 - 割れ目水と間隙水の水質コントラストおよび炭素年代測定を利用した地下水流動の評価手法を構築
 - 幌延地域の埋没続成作用のモデル化と数値解析により化石海水の水質形成機構を定量的に理解
- 広域スケールを対象とした地下水移行時間解析手法を整備
 - 岩盤の水理学的有効間隙率の適切な与え方を提示

【まとめ】

地下水の流動域/低流動域の三次元分布の推定手法、地下水年代等による安定な水理場・化学環境の確認手法、広域スケールでの地下水移行時間の評価手法を構築し、それらを組み合わせて、地下水の流れが非常に遅い領域を調査してモデル化する技術を実証した。
⇒今後は、体系化の研究において、坑道スケール～ピットスケールにおける閉じ込め性能を評価するための物質移行解析の中で、これらの成果を反映していく。

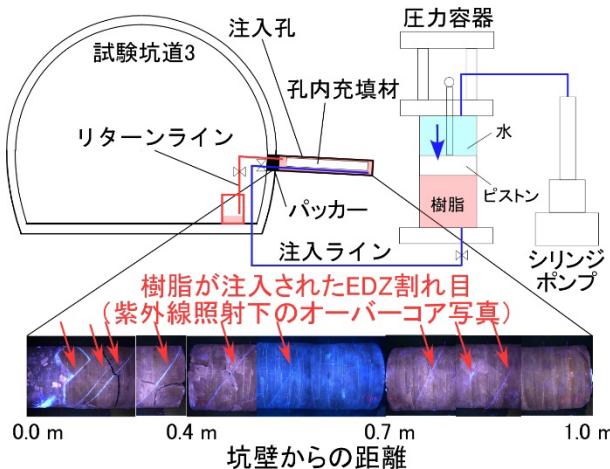
3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

(参考資料p.23~25)

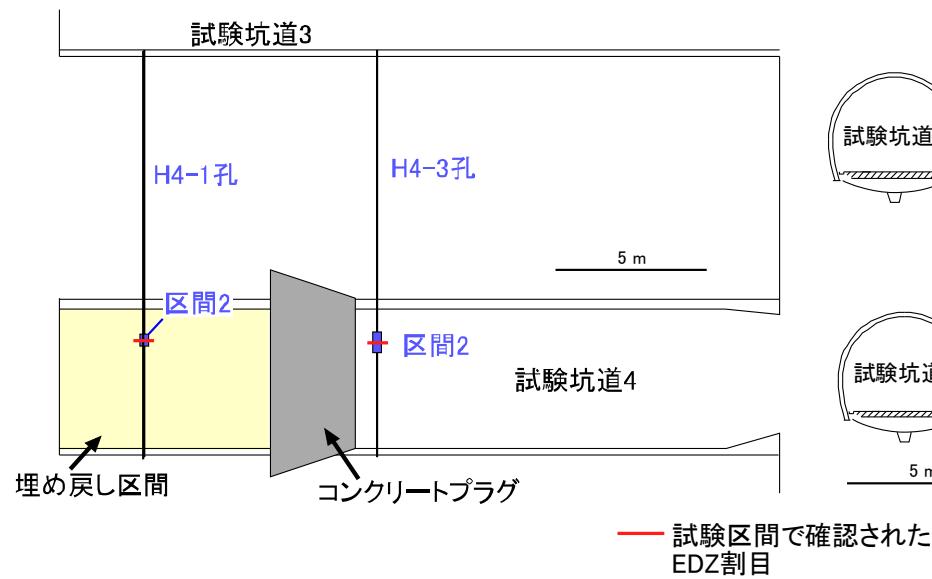
【第4期中長期計画 目的】

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を構築

- 岩盤の強度・応力条件から掘削損傷領域の透水性を予測する既存モデルの再検証
- 坑道埋め戻し後の掘削損傷領域の透水性を予測するモデルの構築



掘削損傷領域の樹脂注入試験
割れ目のせん断変位量と開口幅との相関を
調べ、モデルの妥当性を検証



掘削損傷領域の段階注水試験実施場所(H4-1孔の区間2とH4-3孔の区間2)
水圧増加(応力変化)に伴う割れ目の透水性の変化を調べ、モデルの妥当性を検証

【実施内容】

- 掘削損傷領域の段階注水試験結果や、樹脂注入試験により得られる割れ目のせん断変位と開口幅の関係性を分析
- 坑道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤による応力変化による割れ目の開閉が、掘削損傷領域の透水性に与える影響を検討するとともに、その予測モデルを構築

3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

【成果取りまとめ】

- 坑道埋め戻し後の掘削損傷領域の透水性の変化は推定されるDIの変化と経験式により導出される理論曲線から予測可能^{*1,2}。この経験式の信頼性は、段階注水試験や樹脂注入試験により確認可能^{*2}。
- 応力変化によるEDZ割れ目のずれがEDZの透水性に与える影響については、樹脂注入試験により得られるせん断変位と開口幅の分析と経験式とのフィッティングによって評価可能^{*3}。
- 掘削損傷領域の透水性の変化は、個々の割れ目の透水性を理論的モデルにより評価し、それを足し合わせることで予測可能^{*2}。

*1 Eng Geol, vol.294, 106369

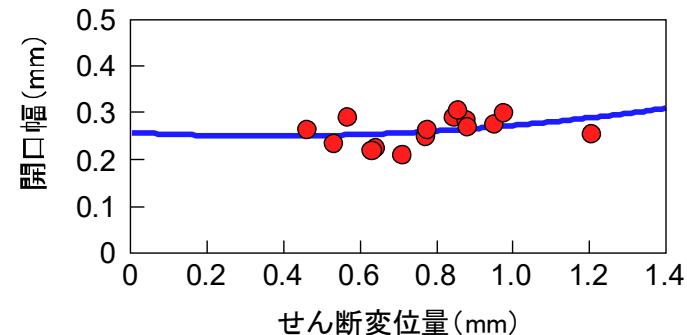
*2 Int J Rock Mech Min Sci, vol. 159, 105229

*3 Rock Mech Rock Eng, vol.52, 385-401 & vol.55, 1855-1869.

【まとめ】

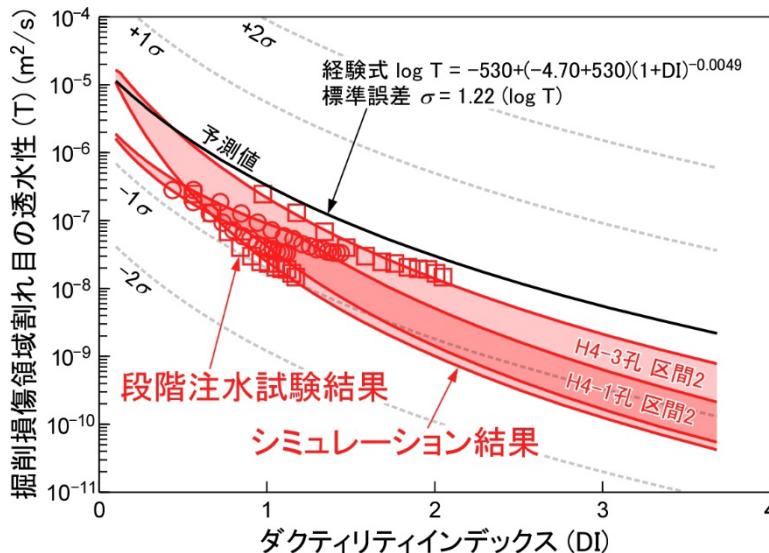
以上により、所期の目標である、坑道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤が掘削損傷領域の透水性に与える影響を評価する手法の整備を完了。

⇒今後は、体系化の研究において、ここで得られた成果を反映して、ピット周辺の割れ目の開きにくさなどの調査・評価手法の整理を進める。



掘削損傷割れ目の開口幅とせん断変位量の関係

割れ目に作用する垂直応力を原位置相当の3.2MPaとした場合の理論値と、実測値との比較



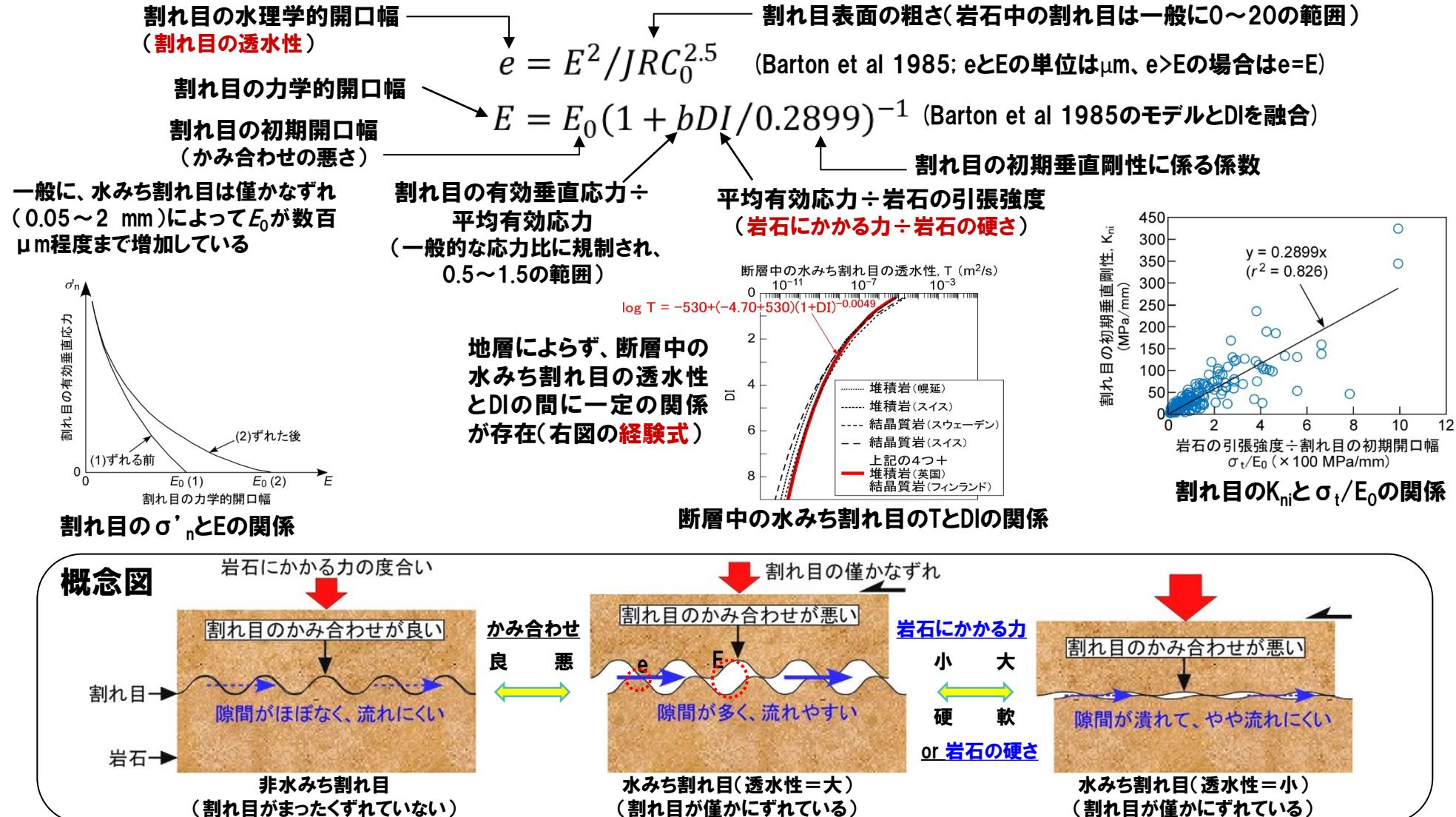
段階注水試験結果とDIモデルの比較
試験により得られたDIの変化に伴う透水性の変化傾向
がDIモデルに基づく予測値と整合的

參 考 資 料

3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

参考資料

割れ目の透水性は、DI(岩石にかかる力÷岩石の硬さ)によって概ね決まり、透水性とDIの関係は一定の経験式で表せる。



3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

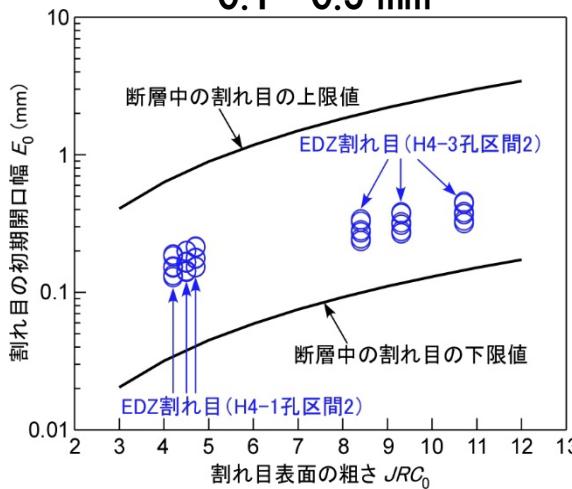
参考資料

割れ目の透水性とDIの経験式を用いて、埋め戻し後のEDZの透水性変化をDIの変化から予測するとともに、その妥当性を段階注水試験等で検証できる。また、個々のEDZ割れ目の透水性を、以下の理論式より評価し、それらを足し合わせることによりEDZの透水性変化を予測することも可能。

幌延のEDZ割れ目の場合:0.4~0.9

$$E = E_0 (1 + bDI / 0.2899)^{-1}$$

幌延のEDZ割れ目の場合:
0.1~0.5 mm



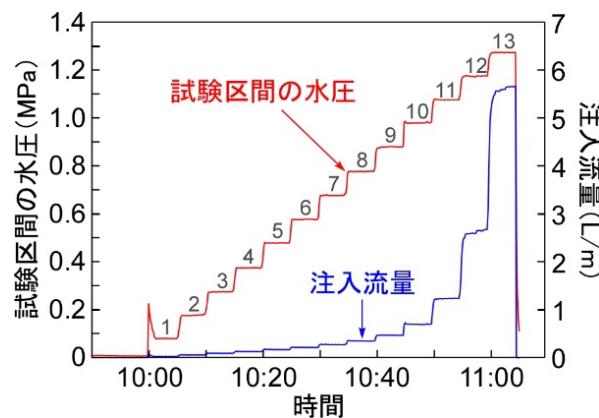
割れ目の初期開口幅と表面の粗さの関係

幌延のEDZ割れ目の場合:4~11

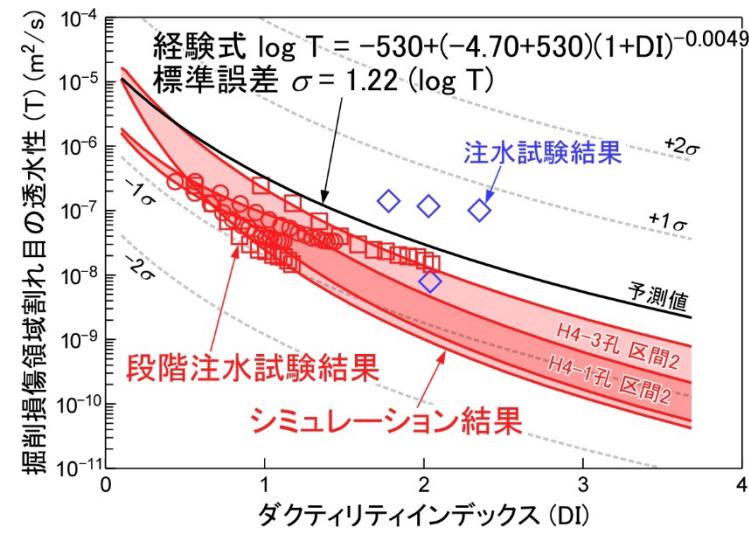
$$e = E^2 / JRC_0^{2.5}$$

経験式の有効性を原位置試験により確認

(段階)注水試験により、EDZ割れ目の透水性が経験式(予測値)の誤差の範囲に収まることを確認(右下図)。段階注水試験(左下図)により、DIを変化させた時の透水性の変化傾向が経験式と整合的であることも確認(理論式を用いたシミュレーションでも)。



段階注水試験時の水圧と注入流量例



EDZ割れ目のTとDIの関係

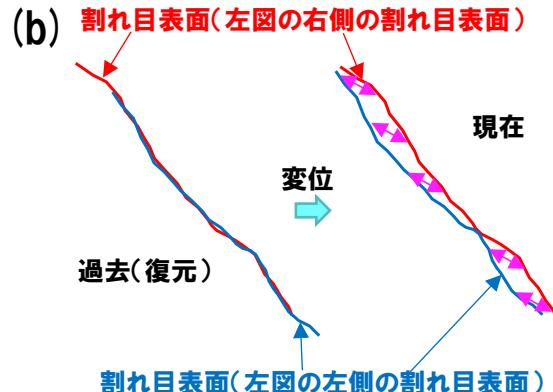
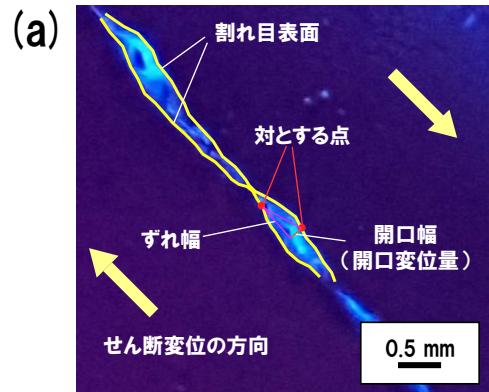
Eng Geol, vol.294, 106369; Int J Rock Mech Min Sci, vol. 159, 105229; J Geophys Res Solid Earth, vol. 120, 2220–2241; Rock Mech Rock Eng, vol.52, 385–401

3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

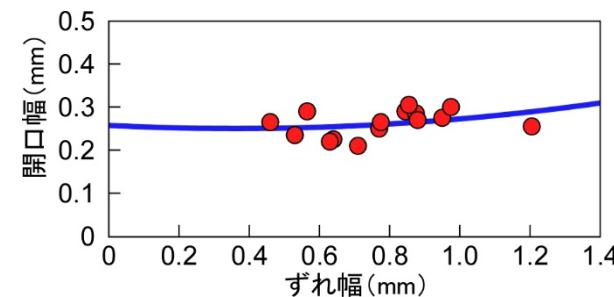
参考資料

透水性とDIの経験式/理論式を用いて、EDZの透水性変化(割れ目の有効垂直応力の変化によるもの)を予測することが可能。一方で、緩衝材/埋め戻し材の膨潤に伴いEDZ割れ目がずれる可能性もある。

割れ目のずれが透水性に与える影響は、既に経験式の中に考慮されており、割れ目が新たにずれても透水性に有意な影響を与えない。その検証方法としては、樹脂注入試験が有効。



樹脂注入試験における割れ目の開口幅とすれ幅の計測方法
(a)樹脂注入割れ目の拡大写真(紫外線照射下)と計測した開口幅とすれ幅の例、(b)対となる割れ目表面のフィッティングによる変位前の状態の復元



樹脂注入後のEDZ割れ目の開口幅とすれ幅
(赤丸)とシミュレーション結果(青線)

計測された開口幅はすれ幅の増加に伴ってほとんど増加しない。これはAsadollahi and Tonon (2010) のモデルを用いたシミュレーションでも再現でき、深度350mの地圧では割れ目に垂直にかかる力が大きいため(3 MPa程度)、割れ目がずれても開口が抑えられていると解釈。したがって、埋め戻し後に割れ目がさらにずれても開口幅(透水性)はほとんど変化しないと推定。

Rock Mech Rock Eng, vol.55, 1855–1869

1. 実際の地質環境における人工バリア性能確認試験 に係る成果

参考資料

- Amano et al. (2024) : Diverse microbiome functions, limited temporal variation and substantial genomic conservation within sedimentary and granite rock deep underground research laboratories, *Environmental Microbiome*, vol.19, 105.
- Arthur et al. (2023) : Paleoclimatic controls on natural tracer profiles in biogenic sedimentary formations of the Horonobe area, Japan, *Applied Geochemistry*, vol.155, 105707.
- 伊藤ほか (2024) : 幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験を対象とした再冠水時の熱的 / 水理的状態変遷を反映した弾塑性力学解析, *土木学会論文集(インターネット)*, vol.80, no.8, 24-00030.
- Kim et al. (2025) : Comparative analysis of primary variables selection in modeling non-isothermal two-phase flow: Insights from EBS experiment at Horonobe URL, *Geomechanics for Energy and the Environment*, vol.41, 100628.
- Kirishima et al. (2022) : Deep groundwater physicochemical components affecting actinide migration, *Chemosphere*, vol.289, 133181.
- 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所 (2023) : 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 [JPJ007597] ニアフィールドシステム評価確証技術開発 平成30年度～令和4年度 取りまとめ報告書.
- 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所 (2024) : 令和5年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 [JPJ007597] 地層処分安全評価確証技術開発 核種移行総合評価技術開発 報告書.
- 大野 (2024) :幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開(4)タスクC:実規模の人工バリアシステムの解体試験, *原子力バックエンド研究*, vol.31 , no.2, pp.140-143.
- Ohno and Takayama (2025) : Modeling of coupled processes in full-scale engineered barrier system performance experiment at Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, *Geomechanics for Energy and the Environment*, vol.41, 100636.
- 尾崎 (2024) :幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開(2)タスクA:物質移行試験, *原子力バックエンド研究*, vol.31, no.2, pp.128-133.
- Saito et al. (2023) : Origin of dissolved organic matter in deep groundwater of marine deposits and its implication for metal binding, *ACS ES&T Water*, vol.3, no.12, pp.4103-4112.
- Sugita et al. (2025) : DECOVALEX-2023 Task D Final Report, DECOVALEX-2023.
- Sugita et al. (2025) : Numerical simulation of coupled THM behaviour of full-scale EBS in backfilled experimental gallery in the Horonobe URL, *Geomechanics for Energy and the Environment*, vol.42, 100668.
- 鈴木ほか (2023) : 熱-水-応力-化学連成解析モデルを用いた海水系地下水環境下における緩衝材の浸潤挙動評価 (受託研究), JAEA-Research 2022-013, 41p.
- 武田・石井 (2024) :原位置トレーサー試験による堆積岩中の掘削損傷領域内の移流分散評価, *原子力バックエンド研究*, vol.31, no.1, pp.3-10.
- Zhao et al. (2022) : Sorption of Cs⁺ and Eu³⁺ ions onto sedimentary rock in the presence of gamma-irradiated humic acid, *Journal of Hazardous Materials*, vol.428, 128211.

2. 処分概念オプションの実証 に係る成果

参考資料

- Aoyagi et al. (2024) :Estimation stress state using measured tunnel convergence in loop galleries excavated in mudstone, International, Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 178, 105776.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 日本原子力研究開発機構 (2024) :令和5年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 [JPJ007597] 地層処分施設施工・操業技術確証試験 報告書.
- 早野 (2024) :講演再録 幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開(3)タスクB:処分技術の実証と体系化, 原子力バックエンド研究, vol.31, no.2, pp.134–139.
- 菊池ほか (2024) :豎置き・ブロック方式における緩衝材の流出量評価手法の検討, 原子力バックエンド研究, vol.31, no.1, pp.11–20.
- Kimura et al. (2022) : Evaluation of Sealing Performance of Bentonite Materials in Excavated Damaged Zone for Sedimentary Rocks at the Horonobe Underground Research Laboratory, The 7th East Asia Forum on Radwaste Management (EAFORAM2022).
- 望月ほか (2024) :高温条件下での稚内層珪質泥岩の一軸圧縮試験, JAEA-Research 2024-003, 86p.
- 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター (2023) :令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 [JPJ007597] 地層処分施設閉鎖技術確証試験 5カ年取りまとめ報告書.
- 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所 (2024) : 令和5年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 [JPJ007597] 地層処分安全評価確証技術開発 ニアフィールド長期環境変遷評価技術開発 報告書.
- Ohno et al. (2024) :Modelling transport pathways of faults with low hydraulic connectivity in mudstones with low swelling capacity, Geoenergy, vol.2, geoenergy2023-047.
- Ozaki (2023) : First-arrival traveltimes tomography for monitoring the excavation damaged zone in the Horonobe Underground Research Laboratory, Rock Mechanics Bulletin, vol.2, no.3, 100057.
- Ozaki et al. (2024) : Variation of electrical resistivity distribution around the opened and backfilled tunnel in the Horonobe Underground Research Laboratory, Proceedings of the 4th International Conference on Coupled Processes in Fractured Geological Media: Observation, Modeling, and Application (CouFrac2024).
- Shirase et al. (2022) : Countermeasures against piping and erosion of bentonite buffer: Piping inhibition due to pre-hydration, Clay Conference 2022: 8th International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement.
- Yoshida et al. (2024) : Post-earthquake rapid resealing of bedrock flow-paths by concretion-forming resin, Communications Engineering, vol.3, 67.
- Yoshida et al. (2024) : Rapid and long-lasting bedrock flow-path sealing by a “concretion-forming resin”: Results from in-situ evaluation tests in an Underground Research Laboratory, Horonobe, Japan, Powering the Energy Transition through Subsurface Collaboration: Proceedings of the 1st Energy Geoscience Conference (Energy Geoscience Conference Series, 1), 20p.

3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証 に係る成果

参考資料

- Aoyagi and Ishii (2024) : Evaluation of temporal changes in fracture transmissivity in an excavation damaged zone after backfilling a gallery excavated in mudstone, Environmental Earth Sciences, vol.83, 98.
- Aoyagi et al. (2022) : 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, vol.55, pp.1855–1869.
- Ishii (2022) : Constant-head step injection tests to quantify the stress dependence of fracture transmissivity in an excavation damaged zone: A Case study from the Horonobe Underground Research Laboratory, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol.159, 105229.
- Ishii (2023) : Effects of flow dimension in faulted or fractured rock on natural reductions of inflow during excavation: a case study of the Horonobe Underground Research Laboratory site, Japan, Hydrogeology Journal, vol.31, pp.893–911.
- Ishii (2024) : Constant-head step-injection tests using a conventional straddle-sliding-packer system for investigating the shear capabilities of minor faults, Rock Mechanics and Rock Engineering, vol.57, no.10, pp.8861–8878.
- Ishii et al. (2025) : Rock strength and stress dependence of local flow-path connectivity within faults or fractures: a preliminary overview of virtual and in-situ hydraulic tests, Hydrogeology Journal, vol.33, pp.63–85.
- Kuribayashi et al. (2025) : Large disequilibrium of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ isotope ratios in deep groundwater and its potential application as a groundwater mixing indicator, Geochemical Journal, vol.59, no.2, pp.35–44.
- 宮川ほか (2023) : HFB-1孔調査データ集, JAEA-Data/Code 2023-009, 103p.
- Miyakawa et al. (2023) : Evolution of porewater in a Neogene sedimentary formation in the Horonobe area, Hokkaido, Japan: Modeling of burial diagenesis, Geochemical Journal, vol. 57, no. 5, pp. 155–175.
- 宮川ほか (2024) : 亀裂性堆積岩を対象とした地下水流动解析における有効間隙率の与え方: 北海道幌延に分布する声問層と稚内層浅部の事例, 原子力バックエンド研究, vol.31, no.2, pp.82–95.
- 望月・石井 (2022) : 地下深部の岩盤における地下水の現在の流れの有無を水の安定同位体比から判別する, Isotope News, vol.784, pp.23–27.
- Mochizuki and Ishii (2022) : Assessment of the level of activity of advective transport through fractures and faults in marine deposits by comparison between stable isotope compositions of fracture and pore waters, Hydrogeology Journal, vol.30, pp.813–827.
- Mochizuki and Ishii (2023) : Paleohydrogeology of the Horonobe area, Northern Hokkaido, Japan: Groundwater flow conditions during glacial and postglacial periods estimated from chemical and isotopic data for fracture and pore water, Applied Geochemistry, vol.155, 105737.
- 日本原子力研究開発機構, 電力中央研究所 (2023) : 令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 [JPJ007597] 岩盤中地下水流动評価技術高度化開発 報告書.

3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証 に係る成果

参考資料

- Ohno and Ishii (2022) : Effect of fault activation on the hydraulic connectivity of faults in mudstone, Geomechanics for Energy and the Environment, vol.31, 100317.
- Ozaki et al. (2022) : Variation in fault hydraulic connectivity with depth in mudstone: An Analysis of poroelastic hydraulic response to excavation in the Horonobe URL, Geomechanics for Energy and the Environment, vol.31, 100311.
- Ozaki and Ishii (2023) : Verification of the existing hydrogeological model using hydraulic pressure monitoring data during long-term drainage from Horonobe URL and prediction of the hydraulic response to new excavation up to a 500m depth, The 30th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE30).
- Ozaki and Ishii (2024) : Relationship between fault transmissivity, flow dimensions and effective hydraulic conductivity in siliceous mudstone of the Wakkai Formation around the Horonobe Underground Research Laboratory in Japan, Geoenergy (Internet), vol.2, geoenergy2023-056.
- 下茂ほか (2022) : 背斜軸周辺の大気中メタンアノマリについて, 深田地質研究所年報.