

幌延深地層研究計画に関する 令和7年度の成果及び令和8年度の計画

(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8年3月9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

体系化の研究の全体像

4つの課題の役割と成果目標

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

課題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

- 深度に応じた堆積岩の水理・物質移行特性の違いの実証
- 掘削損傷領域や人工バリア/処分坑道の設計(仕様やレイアウトなど)も考慮した閉じ込め性能の評価手法の整理

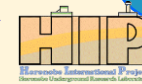


Task A

物質移行評価
技術(安全評価)

課題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

- 人工バリアを定置するピットの配置位置や坑道の間隔を設計するための調査・設計・評価の一連の技術の体系化
- 高地圧下での坑道掘削や、実規模スケールでの埋め戻し/止水プラグの設計から施工までの一連の技術の実証



Task B

調査・設計・
施工技術

課題③: 多接続坑道を考慮した湧水等抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備

- 複数の坑道やピットを施工する際の湧水抑制対策や支保技術の整備
- 緩衝材の流出現象や岩盤への侵入現象を評価・抑制する技術の整備

各種対策技術

課題④: 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理

- 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な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・評価手法について、他の堆積岩との比較による体系的整理

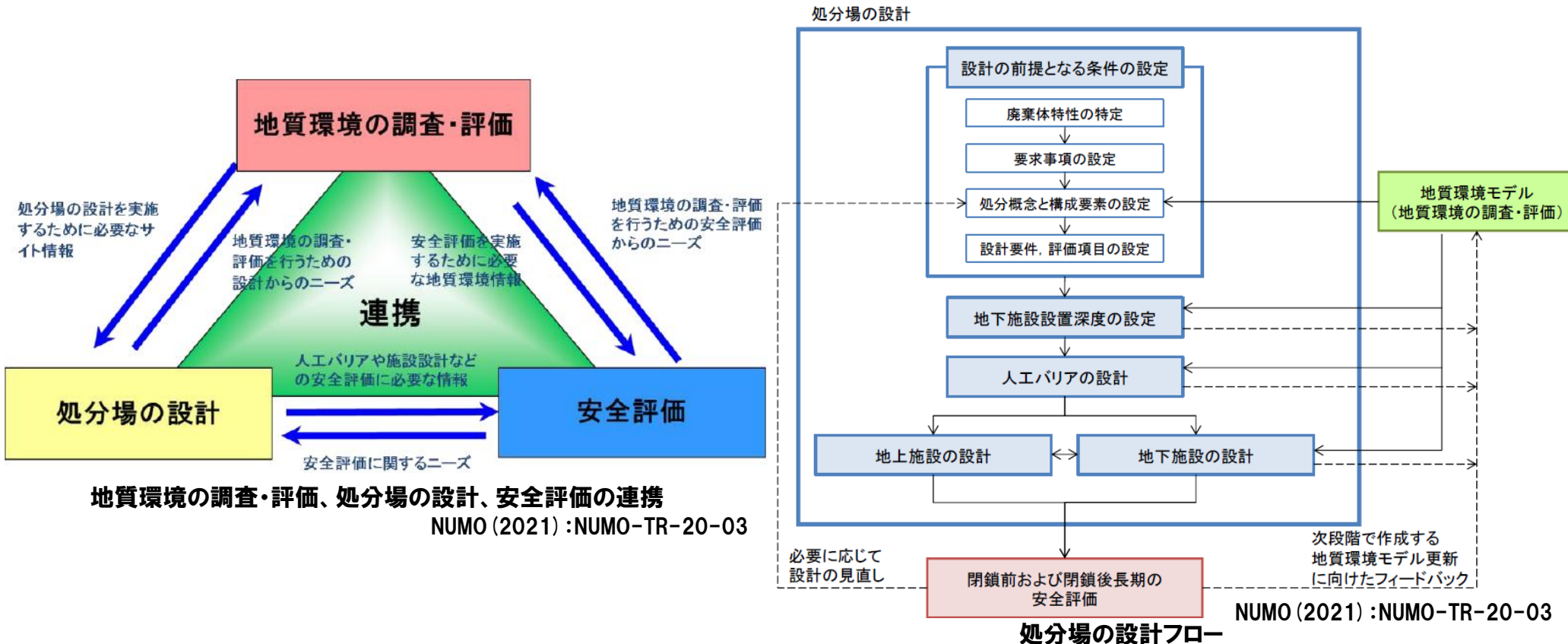
地質環境特性
の体系化と
一般化

これまでに構築してきた地質環境調査、工学的対策、モデル化技術の体系的な適用による、坑道やピットの配置に係る考え方、人工バリア材料などの設置方法、それらの閉じ込め性能を評価する手法の体系的な提示【実際の地質環境に適用可能な技術基盤】

体系化の研究の全体像

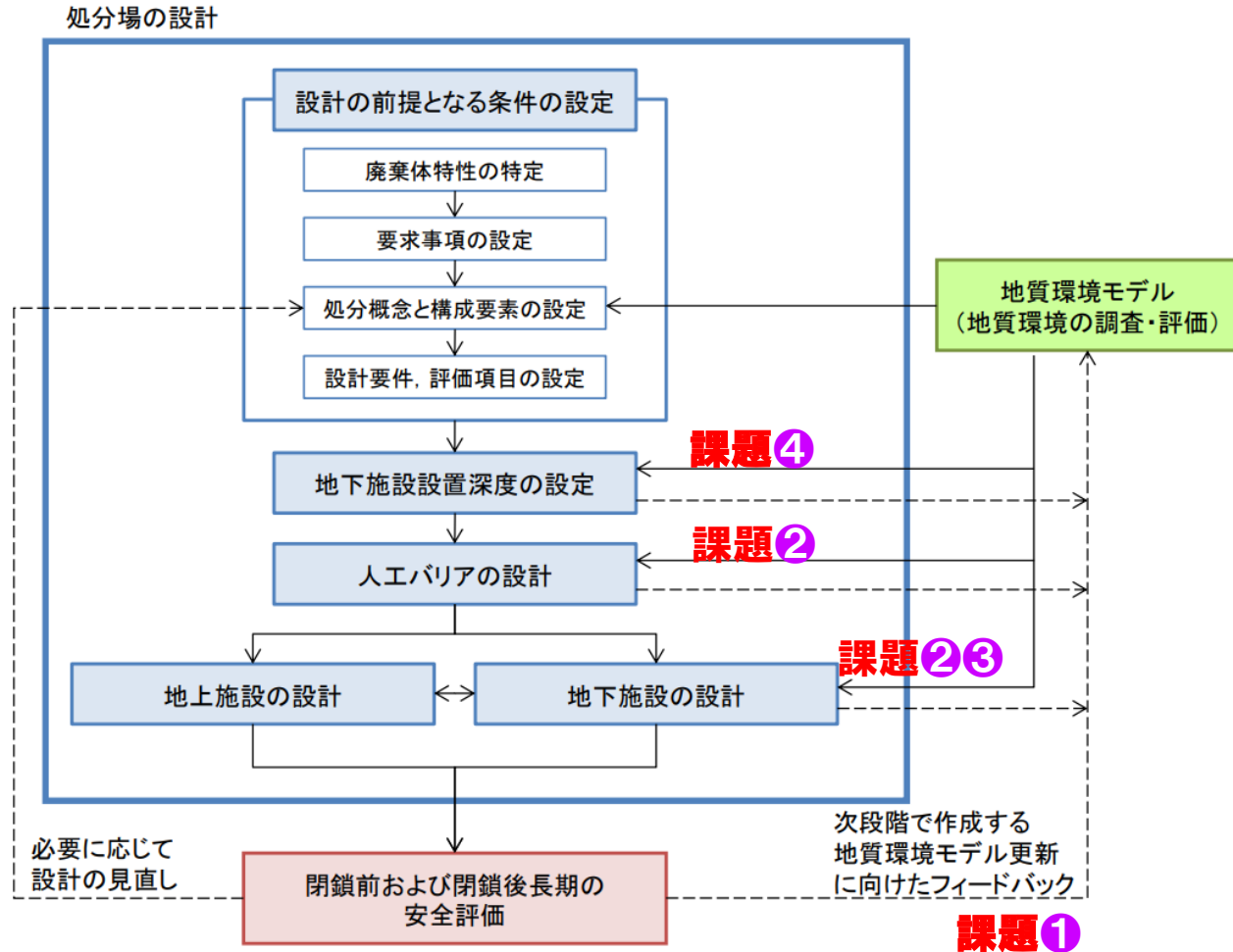
NUMO包括的技術報告書に示された分野間連携、処分場設計フロー

- 調査・評価 ⇄ 設計 ⇄ 安全評価の相互の情報のやり取りを踏まえた連携作業が不可欠であり、相互フィードバック(必要なデータ・情報)が、不確実性低減や整合性確保において重要
- 処分場の設計：
 - ・ 廃棄体特性・地質環境モデル・要求事項に基づく処分概念と安全機能を担う構成要素の設定
 - ・ 地質環境モデルを参照した設置深度・人工バリア・地下/地上施設、操業方法と安全対策の設定・設計
 - ・ 安全評価結果に応じて各項目へのフィードバック・見直し



体系化の研究の全体像

処分場設計フローに対する4つの課題の対応



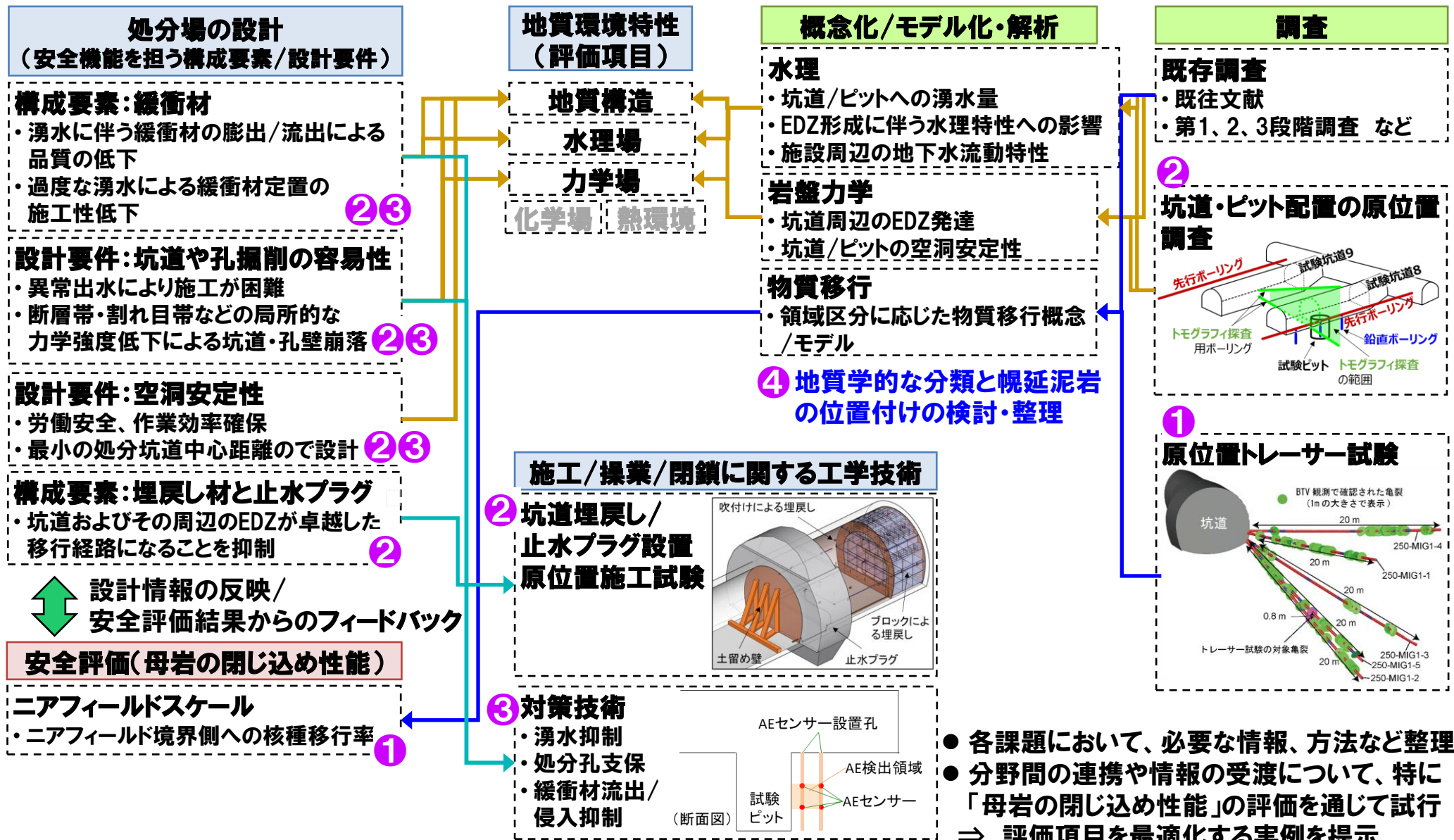
処分場の設計フロー

NUMO (2021) : NUMO-TR-20-03に追記

- 幌延URLを活用し、4つの課題を通じて、処分場の設計や安全評価の一部のプロセスを試行し、分野間のデータ・情報の受け渡しやフィードバックの実例を提示

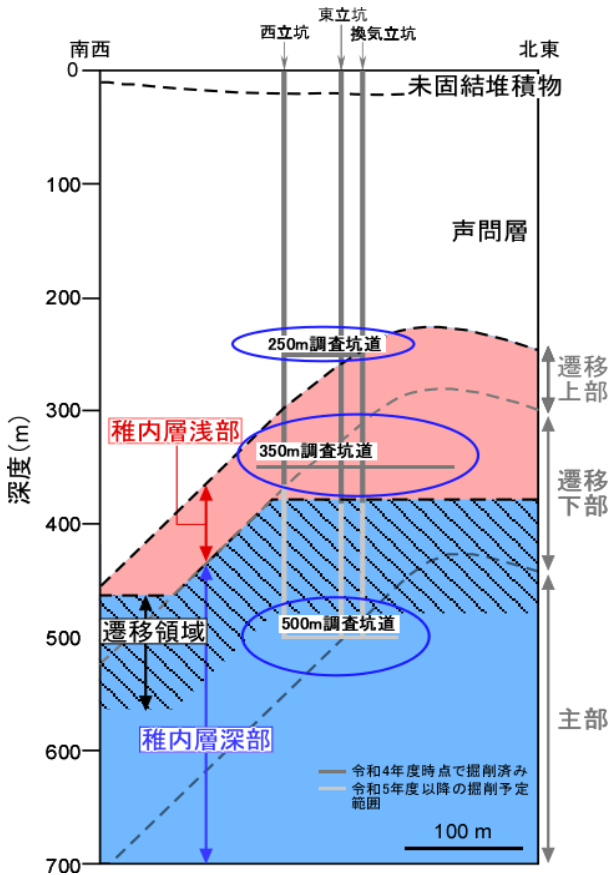
体系化の研究の全体像

4つの課題の位置付け・関係



研究の目的

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



地質断面図

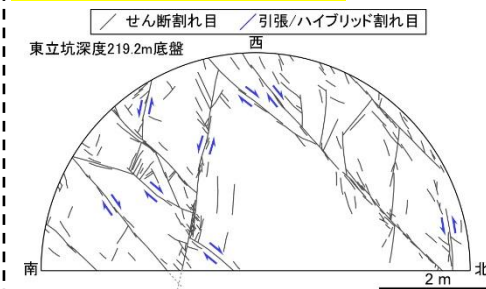
力学的検討に基づき、稚内層を区分

- ・ 浅部領域: 割れ目が開きやすい (隙間ができやすい) ($DI \ll 2$)
- ・ 深部領域: 割れ目が開きにくい (隙間ができにくい) ($DI \gg 2$)

※ $DI = \text{平均有効応力} \div \text{引張強度}$

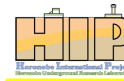
(Ishii et al., Hydrogeol J, 2025)

深度250 m (声問層)



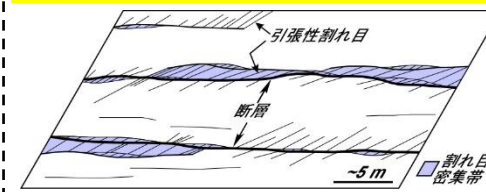
せん断割れ目のスケッチ (Ishii, 2017, IJRMMS)

- ・ 数十本/10 mの1D頻度でせん断割れ目が存在するが、その開口性や水理学的連結性は限定的 (舟木ほか, 2009, 応用地質);
- ・ 坑道沿いにEDZ (青柳ほか, 2014, 土木学会論文集)
- ・ 50~60%程度のマトリクス間隙



Task A 原位置トレーサ試験を実施しながら検討

深度350 m (稚内層浅部: $DI < 2$)

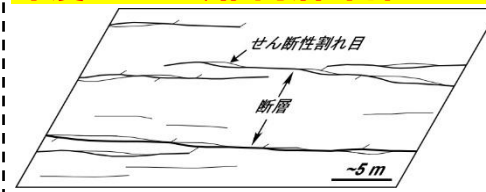


断層のイメージ: 多数の引張性割れ目が断層の連結を促進 (Ishii, 2016, JGR)

- ・ 約1本/10 mの1D頻度で存在する断層が水みちのネットワークを形成 (Ishii, 2017, Eng Geol; Ishii et al., Hydrogeol J, 2025);
- ・ 坑道沿いにEDZ (Aoyagi & Ishii, 2019, RMRE)
- ・ 30~40%程度のマトリクス間隙

既存の成果を活用しつつ検討

深度500 m (稚内層深部: $DI > 2$)



断層のイメージ: 連結を促進する引張性割れ目の発達が限定的 (Ishii, 2016, JGR)

- ・ 約1本/10 mの1D頻度で断層が存在するが、その水理学的連結性は限定的 (Ishii, 2017, Eng Geol; Ishii et al., Hydrogeol J, 2025)
- ・ 坑道沿いのEDZ?
- ・ 30~40%程度のマトリクス間隙

既存の成果を活用しつつ検討

母岩の閉じ込め性能の評価

既存の成果やHIPの成果を踏まえ、水みち特性の異なる岩相を対象に物質移行モデルを構築し、人工バリアや処分坑道の仕様やレイアウトを考慮した閉じ込め性能を評価

令和7年度の成果概要

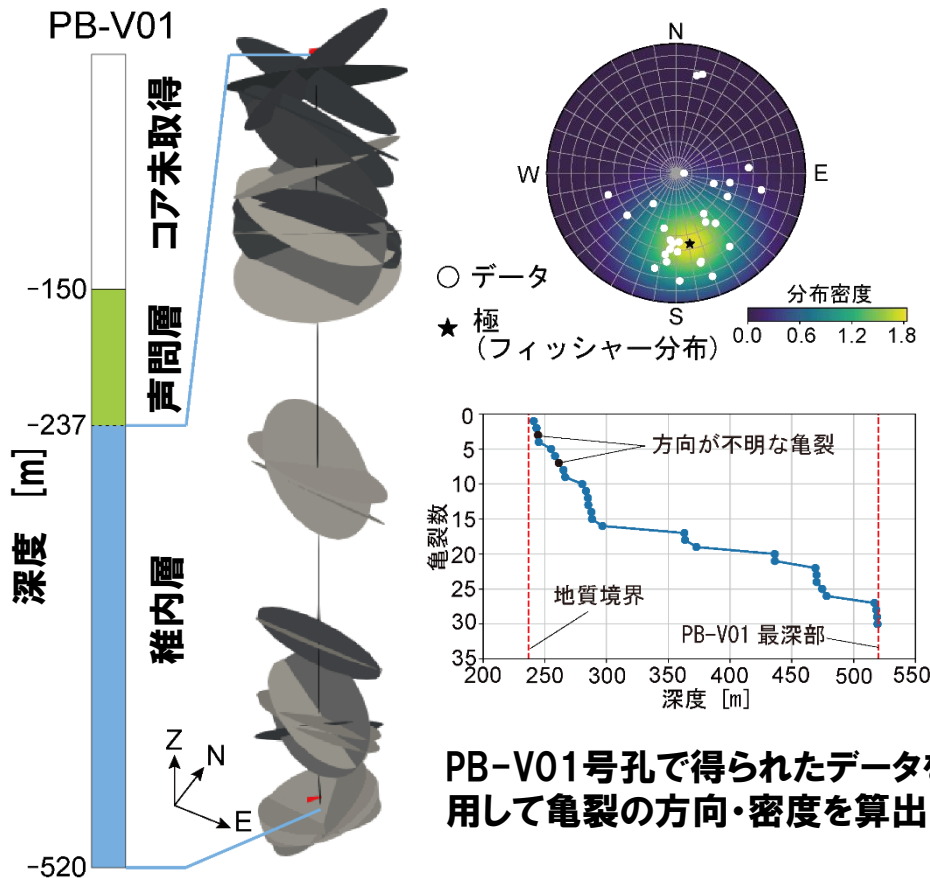
①坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化

【岩盤の有効透水係数の推定】

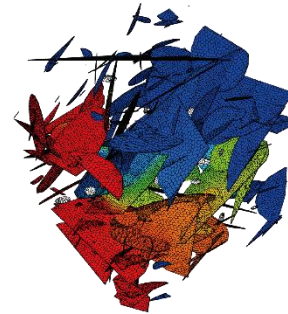
- 既存の研究による亀裂の有効透水量係数の算出手法と亀裂ネットワークモデルを組み合わせ、岩盤の閉じ込め性能の評価に利用可能な有効透水係数の推定手法を提示

亀裂ネットワークモデルの構築

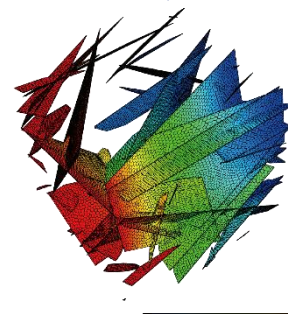
亀裂の大きさや分布は、地質観察から得られた情報に基づいて複数ケースのモデルを作成し、亀裂の連結性から最適なモデルを選択



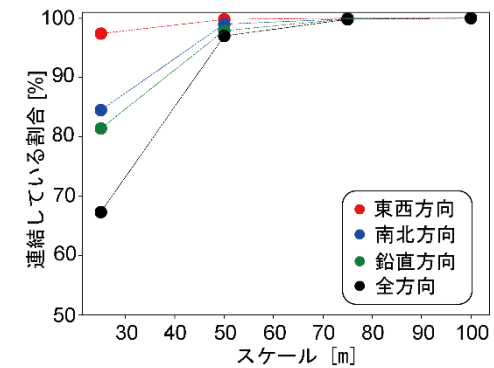
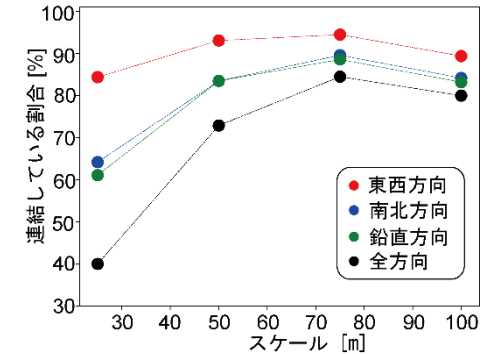
半径5 mの指数分布に従う場合



半径20 mの指数分布に従う場合



水圧 [MPa] 0 0.5 1



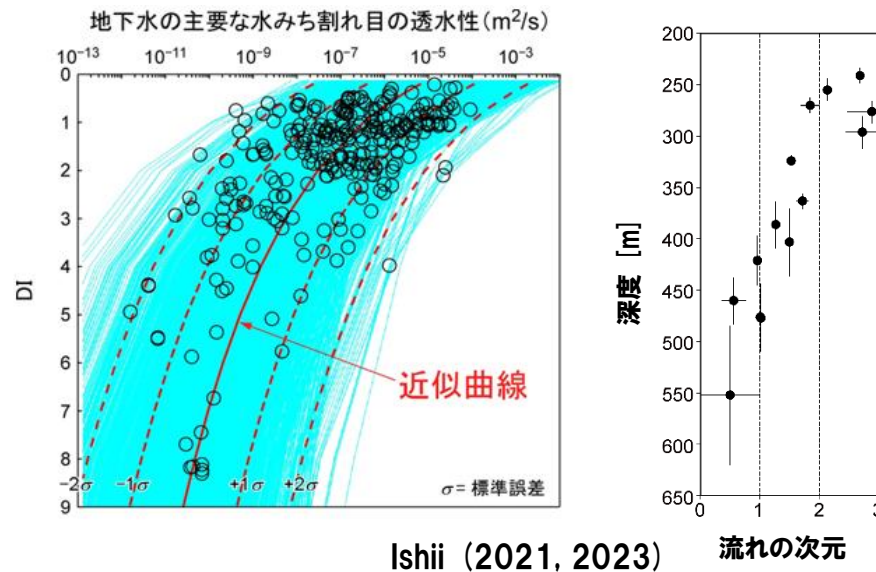
大きい亀裂を多く含む方が原位置における観測結果をより適切に表現

令和7年度の成果概要

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

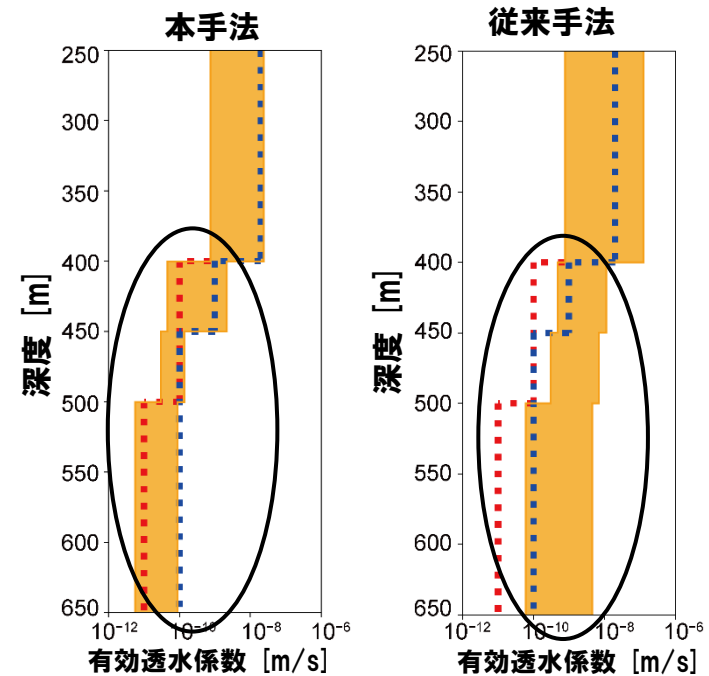
【岩盤の有効透水係数の推定】

- 構築した亀裂ネットワークモデルモデルの各亀裂に透水量係数を付与して有効透水係数を算出
- 本手法により推定した有効透水係数は、地下施設全体の湧水量や地下施設周辺のボーリング孔の地下水圧変化から求めた有効透水係数と整合することを確認



- 局所的な透水量係数と流れの次元を考慮した有効透水量係数を算出
- 有効透水量係数の算出には、Landau-Lifshitz-Matheronの式を利用

$$T_{eff} = T_{av} \cdot \exp \left[\sigma^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{D} \right) \right]$$



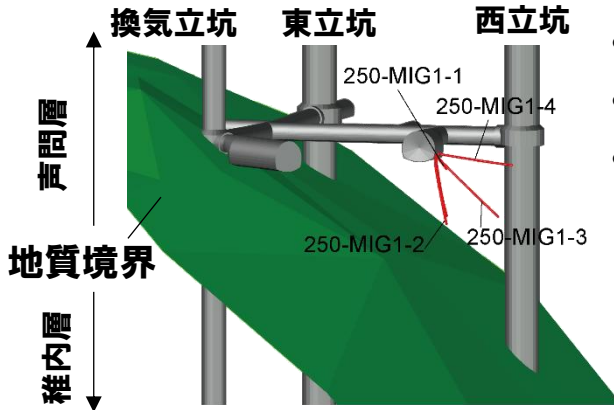
- 従来手法は、透水量係数が対数正規分布に従うと仮定したモデル
- 深部における有効透水性も適切に評価

令和7年度の成果概要

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

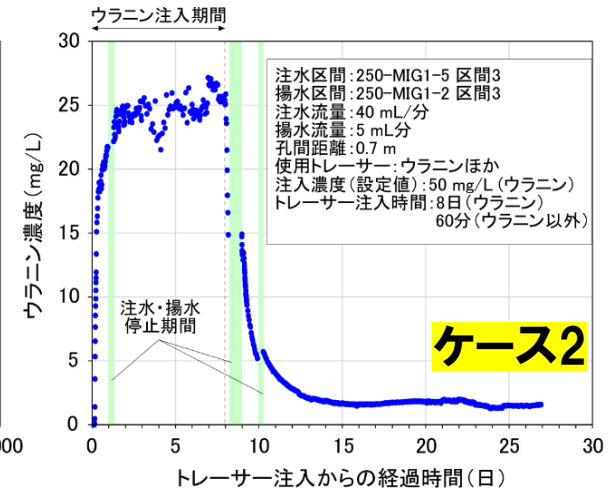
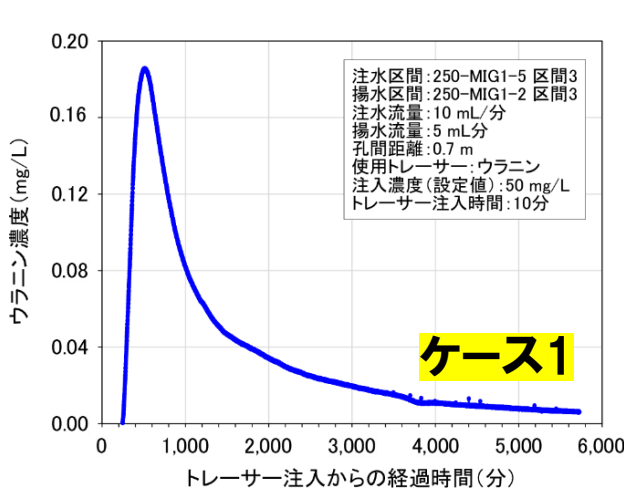
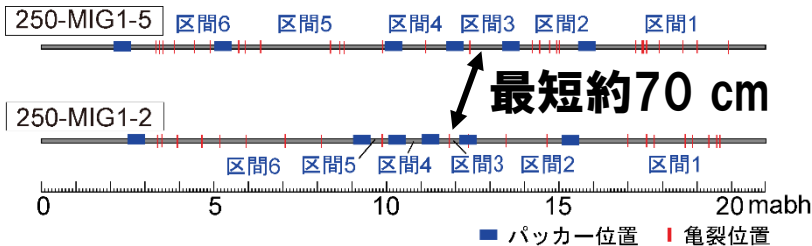
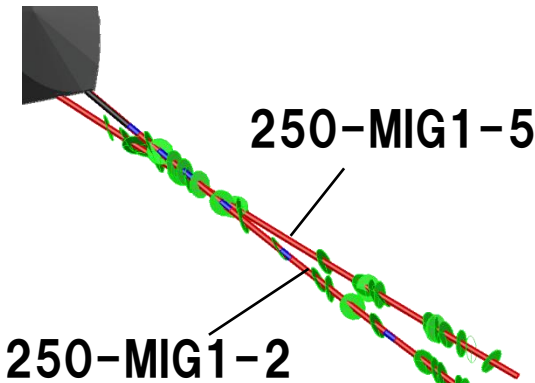
Task A

【声問層を対象にしたトレーサー試験におけるデータ取得】



- 令和6年度までに約20 mの250-MIG1-1から1-4孔を掘削
- ボーリング孔掘削中に250-MIG1-1と1-2孔間で水理応答を確認
- 透水試験結果や予備解析結果に基づいて、トレーサー試験で使用するボーリング孔250-MIG1-5を250-MIG1-2に隣接して掘削

令和6年度は最も距離が短い観測区間を選定して試験を実施



*ケース2では、収着性・非収着性の計11種類のトレーサーを注入

- 2ケース分の破過曲線を取得
- 短いダイポール長においてトレーサー試験が実施可能であることを確認

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

Task A

【声問層を対象にしたトレーサー試験におけるデータ取得】

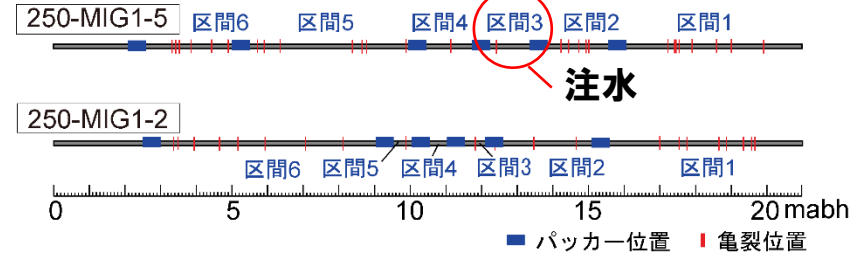
- 声問層で実施するトレーサー試験の条件設定において考慮すべき項目

脱ガス発生防止⇒揚水量の抑制
力学的な影響の排除⇒注水量の抑制

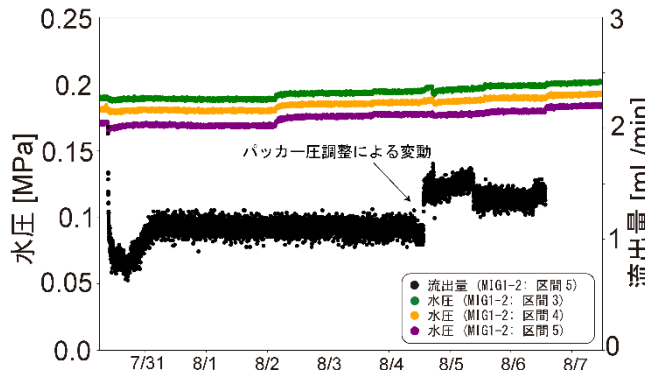
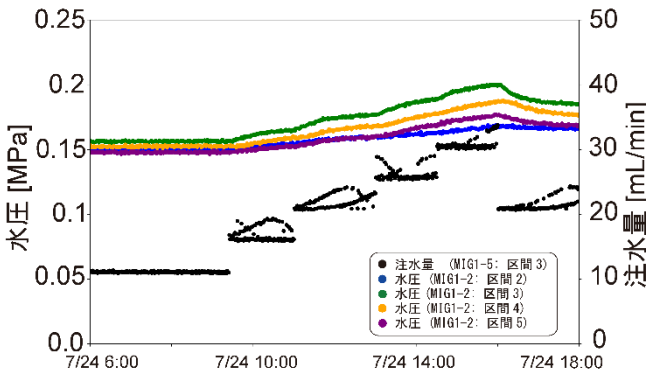
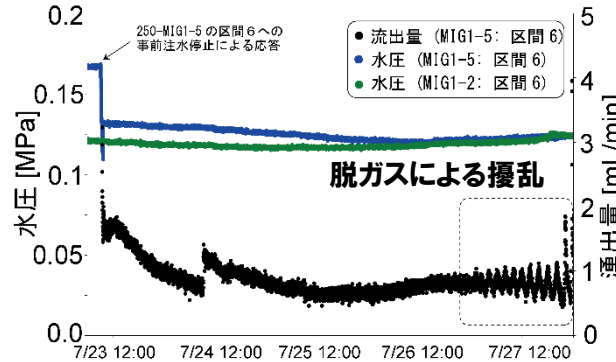
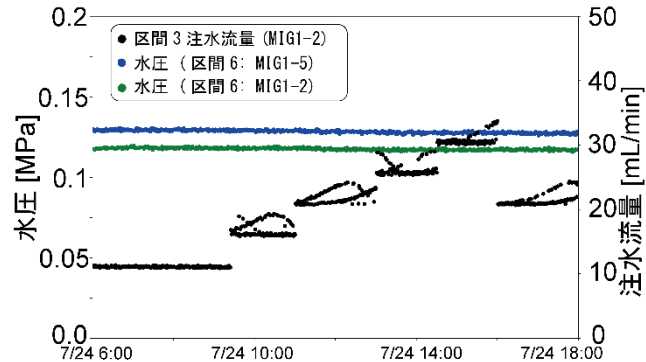


揚水にポンプを使用せず自然流出を利用する試験方法を検討

- 注水試験による区間選定と試験方法の妥当性検討



- ✓ 250-MIG1-5の区間3から注水
- ✓ 250-MIG1-5の区間6および250-MIG1-5の区間5を解放
- ✓ 自然流量や周辺における水圧応答を確認



水圧応答が認められない
脱ガスが発生
⇒試験不可

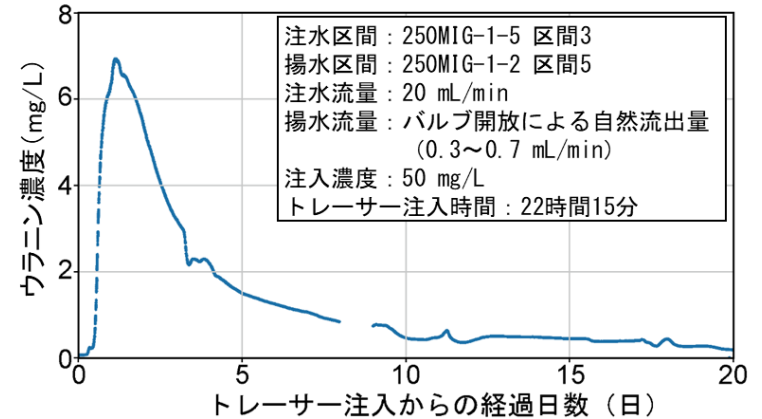
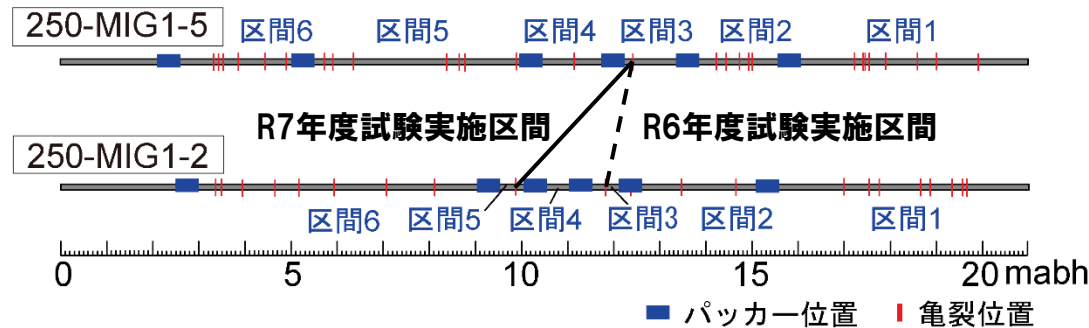
明確な水圧応答
湧出量が一定
⇒試験区間に選定
⇒試験の妥当性を支持

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

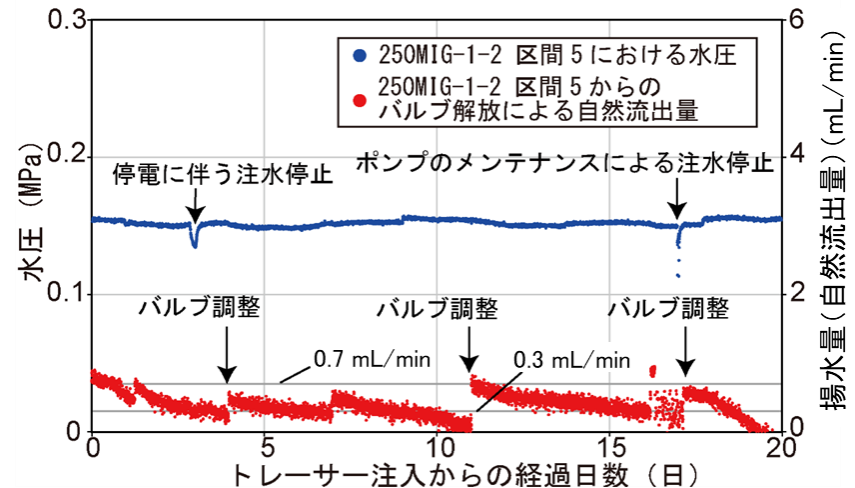
Task A

【声問層を対象にしたトレーサー試験におけるデータ取得】

- 声問層の物質移行モデルの検討に必要な原位置孔間トレーサー試験として、R6年度とは異なる試験条件(ダイポール長がより長い区間)でトレーサー試験を実施
- 既存の装置を用いて、脱ガスや水理・力学連成現象の発生を抑制しつつ、20日間のトレーサー試験を実施し破過曲線を取得



- R6年度と同様に、250-MIG1-5の区間3を注水点に設定
- 250-MIG1-2の区間5でポンプを使用せず、バルブを解放による自然流出を揚水とすることで、R6年度よりも低流量条件下で試験を実施 (バルブ調整により、流出量を0.3~0.7 ml/minに制御)
- 複数の亀裂が関与すると考えられる領域での試験の実施
- 注水・揚水点以外の周辺区間でも採水し、破過曲線を取得



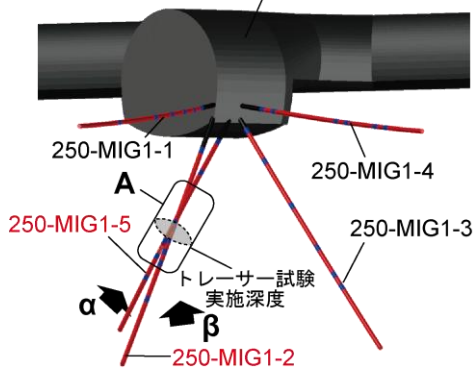
①坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化

Task A

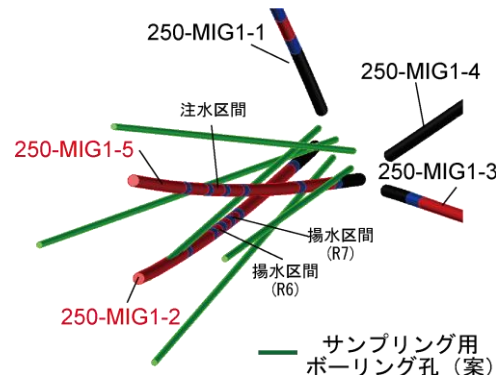
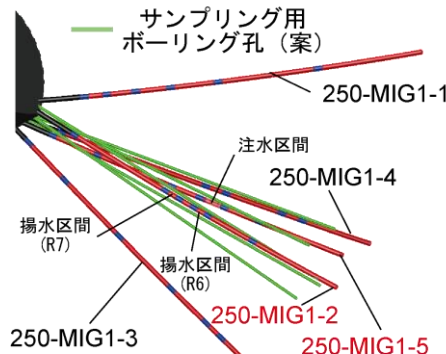
【声問層を対象としたトレーサー試験実施場所周辺における岩石試料の採取および試料の分析】

➤ トレーサー試験実施場所周辺における詳細な物質移動のルートや物質移行特性を把握

深度 250m 西立坑側第1ボーリング横坑



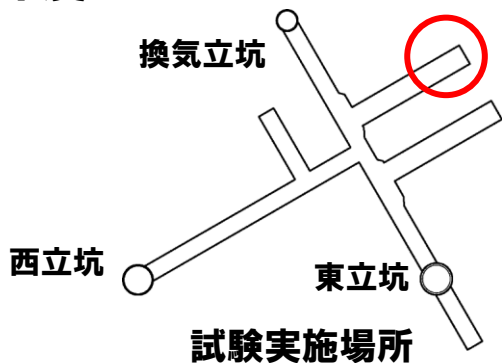
* 各ボーリング孔の長さは約 20 m
* 赤字で示す 250-MIG1-2 および 250-MIG1-5 はトレーサー試験を実施したボーリング孔



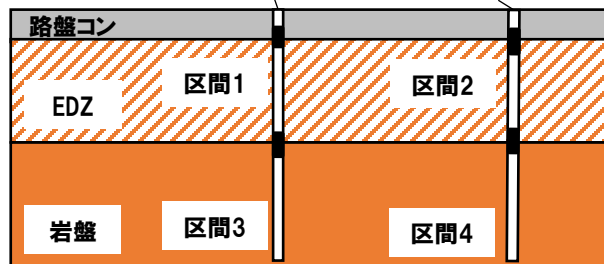
- 最終的なレイアウトやボーリング本数は検討中
- 約20 mのボーリング孔を複数本掘削し、トレーサー試験区間周辺の岩石試料を採取
- 全ての亀裂表面を分析し、トレーサーの経路を把握

【異なる深度での掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の実施】

➤ 深度500 mにおいてEDZを対象としてトレーサー試験を実施しEDZの物質移行特性を把握



試験実施場所 500EDZ-TR01:注水孔 500EDZ-TR02:揚水孔



試験レイアウト案

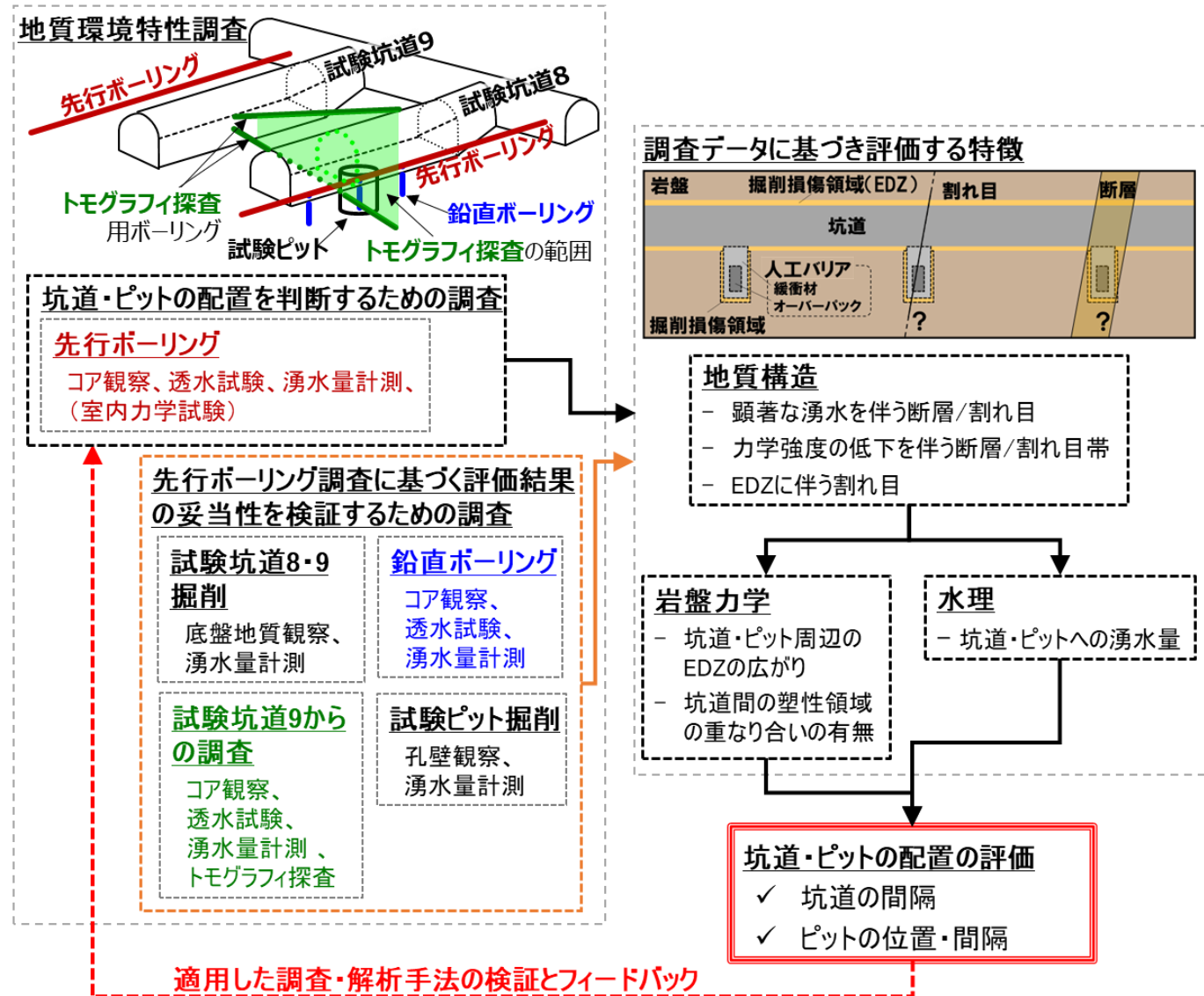
- 令和8年1月にボーリング孔を掘削
- コア観察やBTVによりEDZの範囲は確認済み

既存の研究結果やこれら調査結果を用いて、坑道スケールからピットスケールにおける岩盤の閉じ込め性能の評価手法の整理

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

【地質環境特性調査に基づく坑道とピットの配置の評価】

- 先行ボーリングからの調査データとこれまでに構築してきた解析手法が、坑道の間隔とピットの配置(位置・間隔)の評価に適用可能であることを実証
- 先行ボーリングおよび解析手法に基づく評価結果を、500 m試験坑道8・9の掘削以降に得られる調査結果と比較して妥当性を検証し、データ取得条件や解析条件の適切性を確認、調査計画および解析手法の最適化に資する知見と留意点を整理



研究の目的

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

Task B

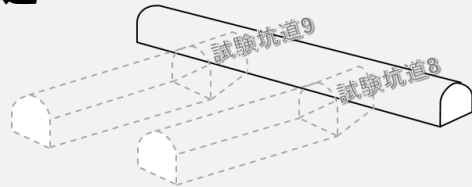
調査・評価の流れ

調査

モデル化・解析

評価・設計

調査坑道掘削前



(R6)

既存データ
(350m坑道調査時まで)

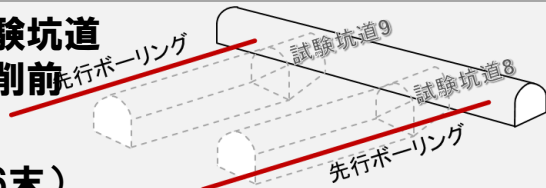
既存モデル構築手法
(350m調査坑道)に基づき、
500m試験坑道8、9の場を
予測

処分場設計に関する既存文献に基づく
評価項目を特定(本試験での重点項目)

- ①坑道/ピットの力学的安定性
- ②坑道/ピットのEDZの重なり合い
- ③坑道/ピットへの湧水箇所、湧水量

評価項目: 上記①、②、③など

試験坑道掘削前



(R6末)

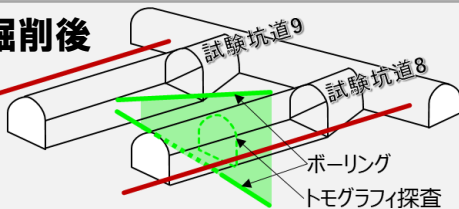
・先行ボーリング
(コア観察、BTV観察、
透水試験)
・室内試験(岩石物性)

調査結果に基づく予測結
果の妥当性確認とモデル
更新

評価項目: 上記①、②、③など

工学的対策(グラウト)の必要性判断

坑道掘削後



(R7)

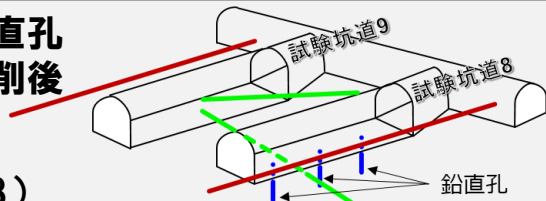
・トモグラフィ探索用ボーリング
(コア観察、BTV観察、
透水試験、トモグラフィ)
・坑道底盤地質観察
・室内試験(岩石物性)

調査結果に基づく予測結
果の妥当性確認とモデル
更新

評価項目: 上記①、②、③など

鉛直孔の掘削位置の決定

鉛直孔掘削後



(R8)

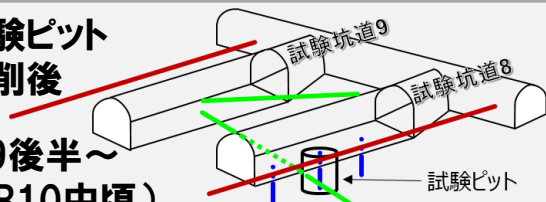
・鉛直孔
(コア観察、BTV観察、
透水試験)
・室内試験(岩石物性)

調査結果に基づくモデル更
新

評価項目: 上記①、②、③など

試験ピットの掘削位置の決定、
工学的対策の必要性の判断、
試験ピット掘削工法の決定

試験ピット掘削後



(R9後半~
R10中頃)

・試験ピット掘削
・試験ピット掘削時の亀
裂発生へのモニタリング
(AE計測など)

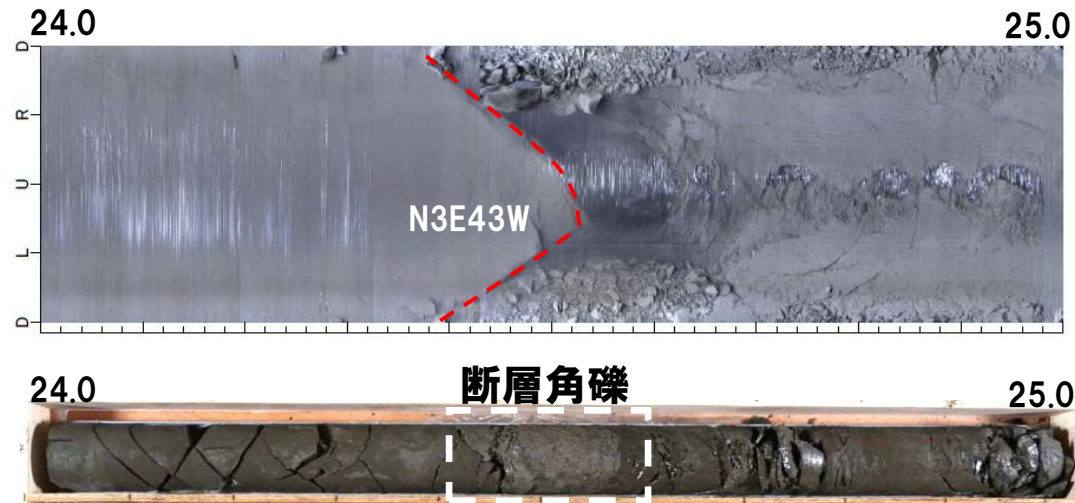
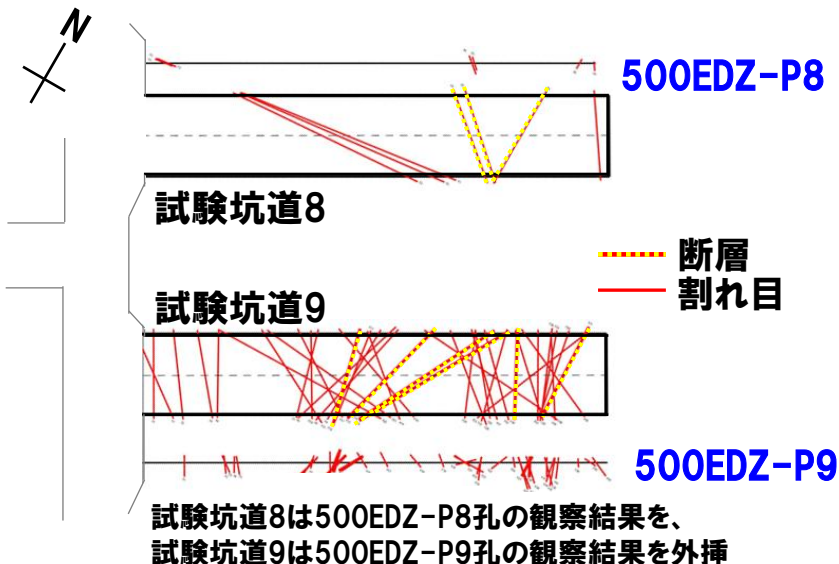
試験ピットの試験結果
に基づくモデル更新

評価項目: 上記①、②、③など

調査・評価・設計手法のとりまとめ
・当初設計へのフィードバック
・処分事業への提言

【坑道・ピットの配置を検討するための調査としての先行ボーリング調査】

- 2本の先行ボーリング孔を掘削して、コア観察、BTV検層、透水試験、湧水量調査を実施
- 断層やせん断割れ目の走向・傾斜や分布頻度を確認した結果、断層・割れ目の代表的な走向・傾斜はNS～NW・西傾斜で、試験坑道9の方が断層・割れ目の頻度が高いと推定
- 先行ボーリング孔からの湧水はほぼ認められず、さらに試験坑道9側の先行ボーリング孔(500EDZ-P9)で断層を含む区間において実施した透水試験では健岩部と同程度の透水量係数($10^{-10} \sim 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)であったことから、坑道掘削時の湧水量はわずかと推定
⇒ 湧水抑制対策(グラウト)は不要と判断

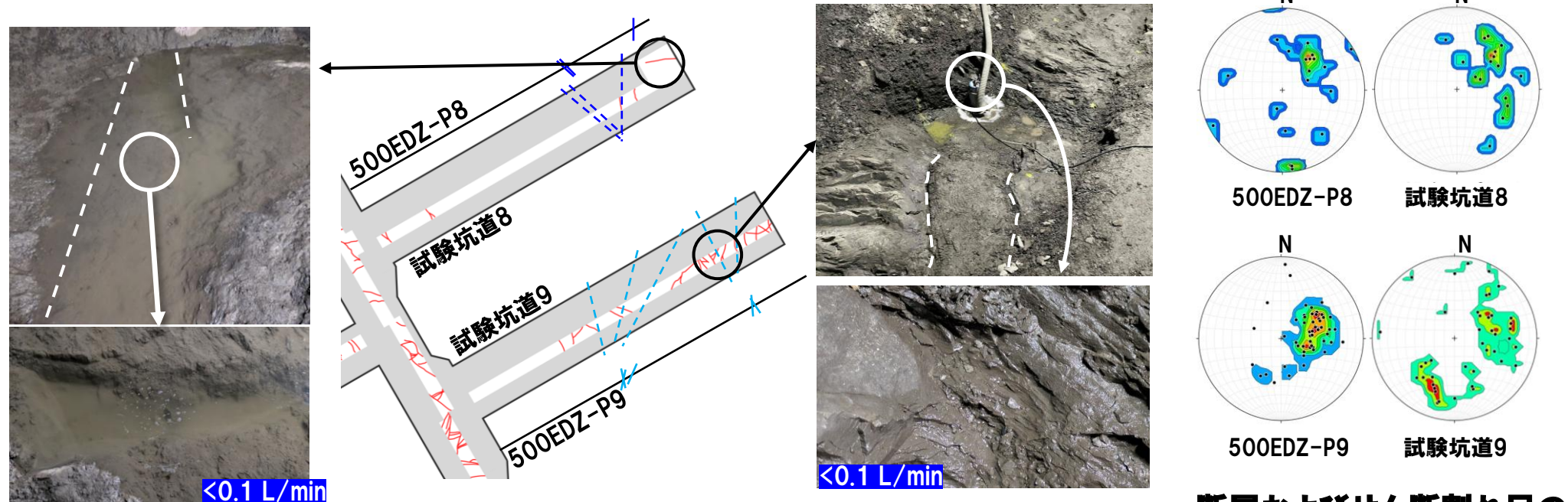


先行ボーリングで確認した断層および割れ目の位置

先行ボーリング調査で認められた断層の例 (500EDZ-P9孔)

【試験坑道8・9における底盤の地質観察】

- 坑道底盤を観察し、断層・割れ目の分布、ならびに湧水箇所と湧水量を把握
- 断層の分布密度や走向・傾斜の傾向は、先行ボーリング調査の推測結果と概ね一致し、一部の断層については、先行ボーリング調査で推測した断層分布との連続性を確認
- 複数の湧水箇所が確認されたが、いずれも湧水量は少量(<0.1 L/min)
- 今後、断層性状の比較検討およびEDZ割れ目の分布傾向を解析する予定



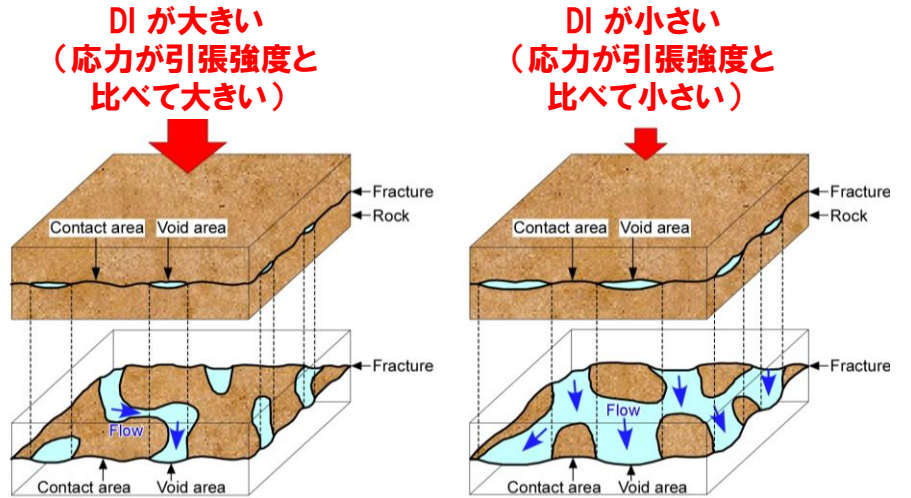
底盤観察で確認した断層分布と断層および湧水箇所の写真の一例

断層およびせん断割れ目の走向・傾斜

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

Task B

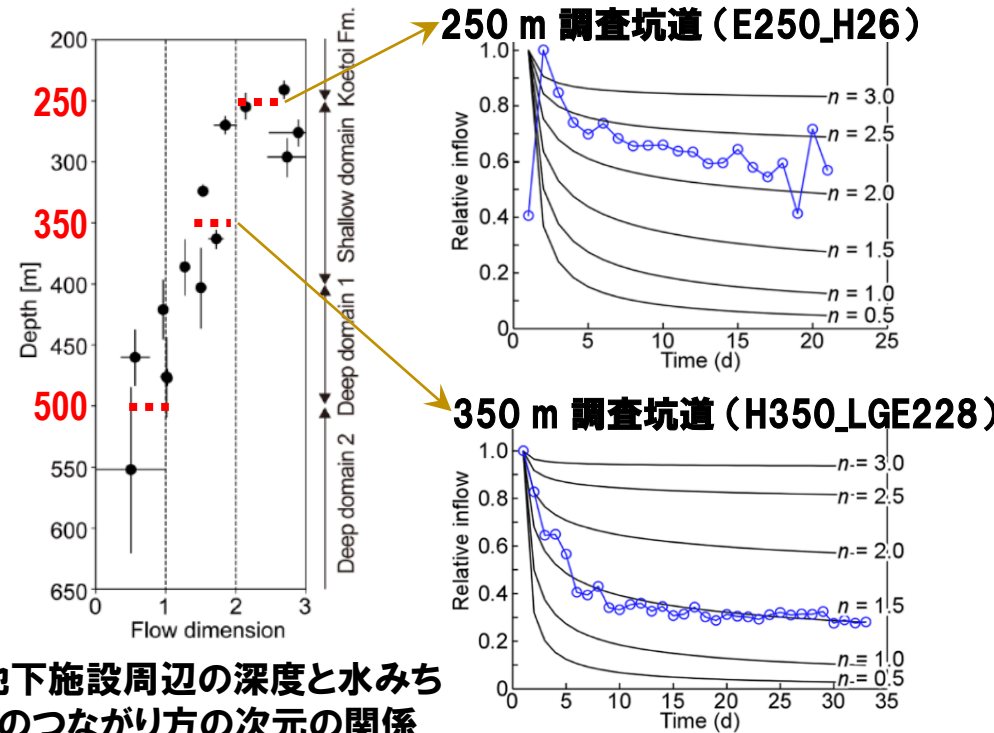
【坑道掘削時の湧水量の予測解析】



空隙が小さく、連結箇所が少ない
(水みちのつながり方の次元が低い)

空隙が大きく、連結箇所が多い
(水みちのつながり方の次元が高い)

(Ishii et al., 2025)



地下施設周辺の深度と水みちのつながり方の次元の関係

(Ozaki et al., 2024)

坑道掘削直後の相対湧水量の時間変化 (Ishii, 2023)

【水みちのつながり方の次元を考慮した湧水量予測】

- 坑道と交差した断層から発生する湧水量の自然減少は、各深度の岩盤における水みちのつながり方の次元を考慮した解析結果と合致 (Ishii, 2023; Sakuma et al., 2025)
- 亀裂の法線応力(DI)と水みちのつながり方の次元の関連性 (Ohno et al., 2022; Ishii et al., 2025)

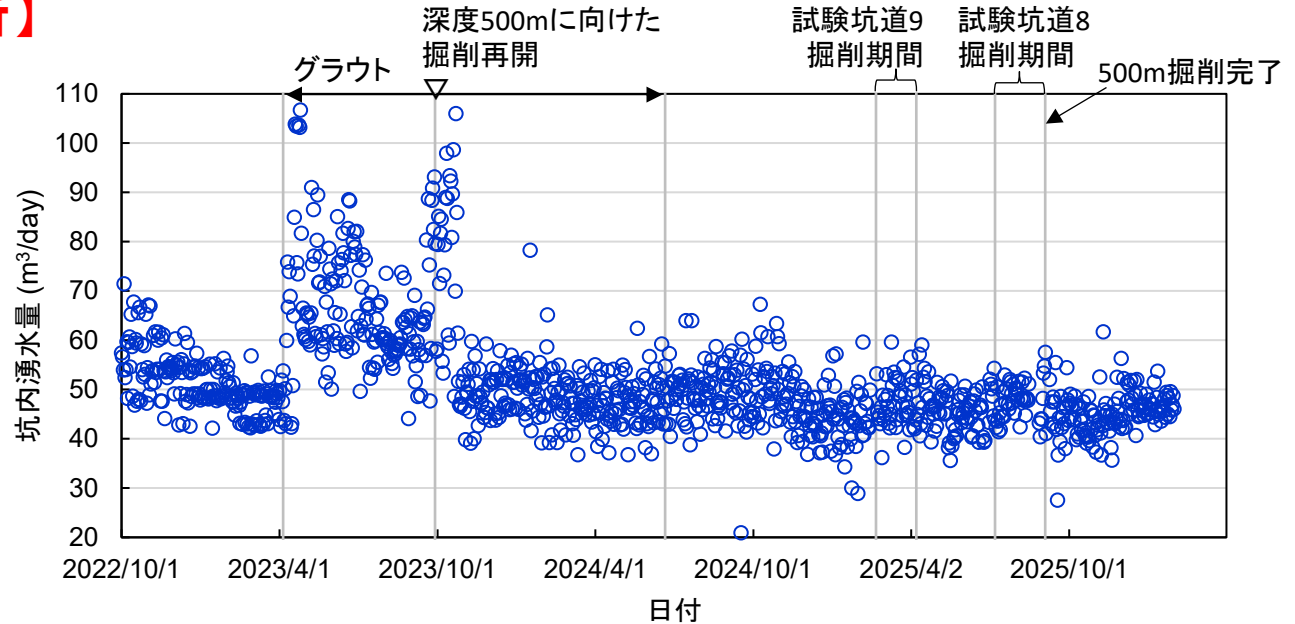
- 水みちのつながり方の次元を考慮した解析により湧水量の自然減少を推定可能
- 定常的な湧水量の予測に応用 (Ozaki et al., 2024; 尾崎・石井, 2026; Sakuma et al., 2025)

【坑道掘削時の湧水量の予測解析】



500m試験坑道9

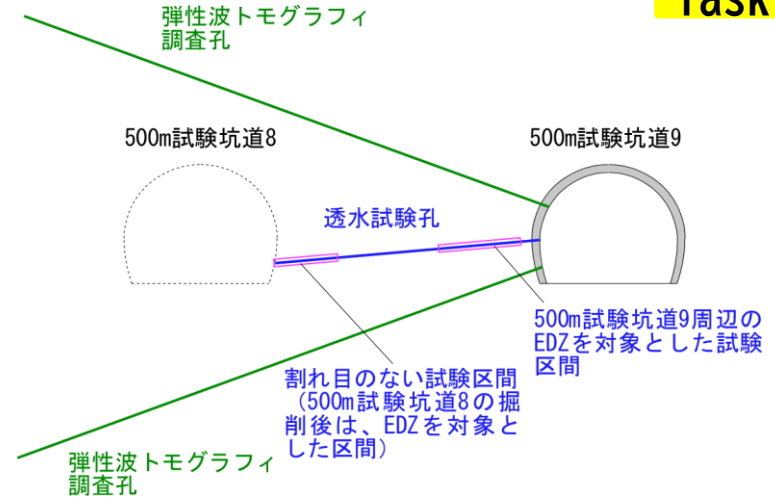
(2025/6/18(掘削してから約2ヵ月後))



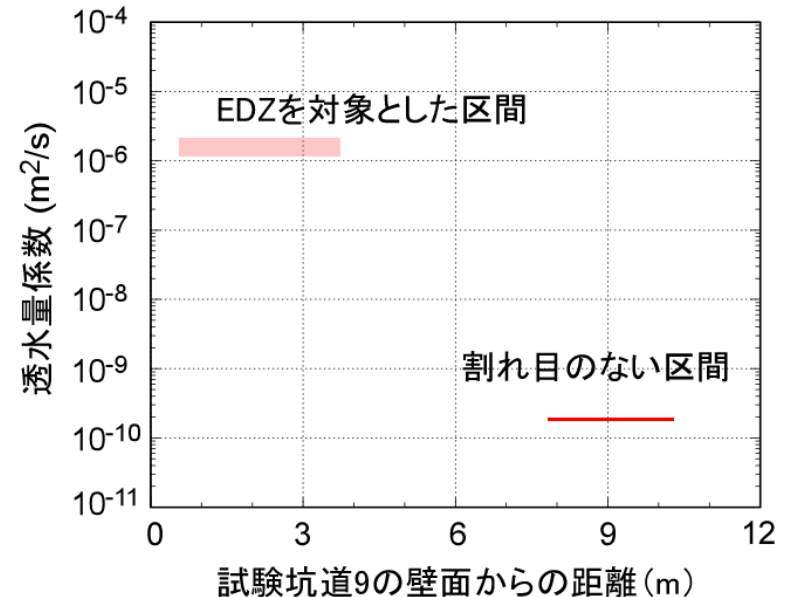
- 深度500 mは水みちのつながり方の次元が低い(< 1.5)ため、湧水量の自然減少の影響が大きく(Murakami and Ishii, submitted)、定常的な湧水量は坑内湧水量と比較してわずかであると予測(Ozaki and Ishii, 2024)
- 先行ボーリング調査の結果、両坑道からの湧水量は少ないと推測(既出)
- 試験坑道9および8の掘削前後における坑内湧水量(地下施設全体の湧水量)は $40 \sim 60 \text{ m}^3/\text{day}$ と大きな変化がないことから、両坑道からの湧水量は数 m^3/day オーダーと推測
- 実際に試験坑道8・9の底盤を観察した結果、個々の湧水点の湧水量は $< 0.1 \text{ L}/\text{min}$
 - 深度500 m調査坑道に整備した排水システムを用いて詳細な湧水量観測を実施予定

【EDZの水理・力学特性に関する調査】

- EDZの広がりを検討するために、試験坑道9の掘削後に試験坑道8に向けて3本のボーリング孔を掘削してコア観察、BTV観察を実施
- 試験坑道8の掘削前後の弾性波トモグラフィ調査、透水試験を実施。試験坑道9周辺のEDZの水理・力学特性を得るとともに、試験坑道8掘削前の初期状態の岩盤の物性を取得
- ボーリングコアの観察およびBTV観察結果から、EDZは側壁面において最大約3.1 mまで広がっていることを確認
- EDZを対象とした区間では、割れ目のない区間と比較して4桁高い透水量係数が得られた



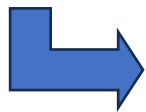
試験坑道8および9における弾性波トモグラフィ調査および透水試験のレイアウト



令和7年度の成果概要

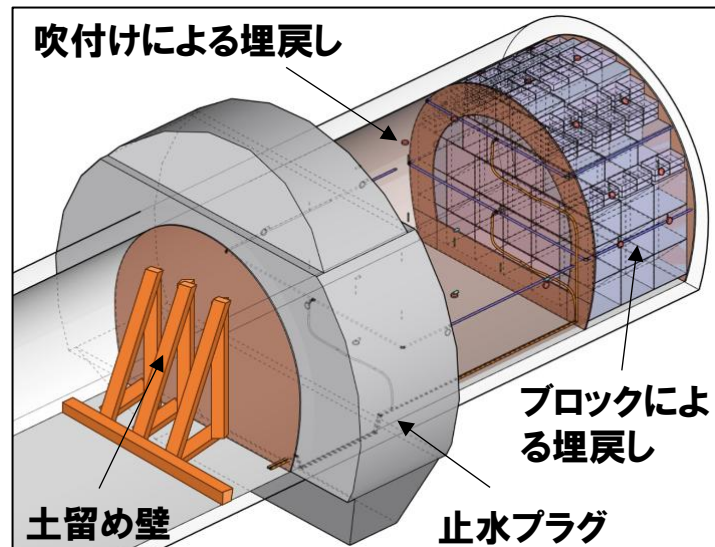
② 先行ボーリングによる地質環境特性調査ならびに工学的対策を考慮した、地下施設および人工バリアの設計評価技術の体系化

- 処分坑道、連絡坑道、アクセス坑道および周辺の掘削損傷領域(EDZ)が相互に連結して放射性物質の短絡経路になることを防ぐため、処分場閉鎖段階に埋め戻し材とともに止水プラグを設置(NUMO, 2021)
- 堆積岩での主な課題: 結晶質岩と比べ国内外での検討事例が少なく、また、岩盤強度やEDZ分布などが異なるため、止水プラグの施工の観点から以下が課題
 - ✓ 坑道の空洞安定性の観点から施工される鋼製支保/吹付けコンクリートなどの止水プラグ施工時の取り扱いと空洞安定性を考慮した止水プラグの施工方法
 - ✓ EDZを拡大させない切欠きの拡幅掘削方法

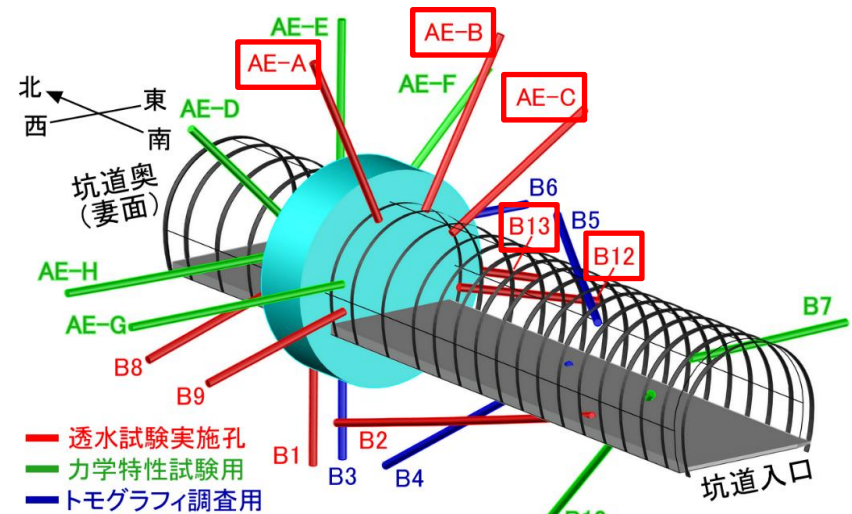


350 m試験坑道6における原位置施工試験により、坑道埋め戻しから止水プラグ設置までの一連の施工技術を確認・実証

令和5～7年度: 止水プラグ設計のため、試験坑道6周辺のEDZ分布や水理特性を把握するための原位置調査を実施



坑道埋め戻しと止水プラグの原位置施工試験の概念図

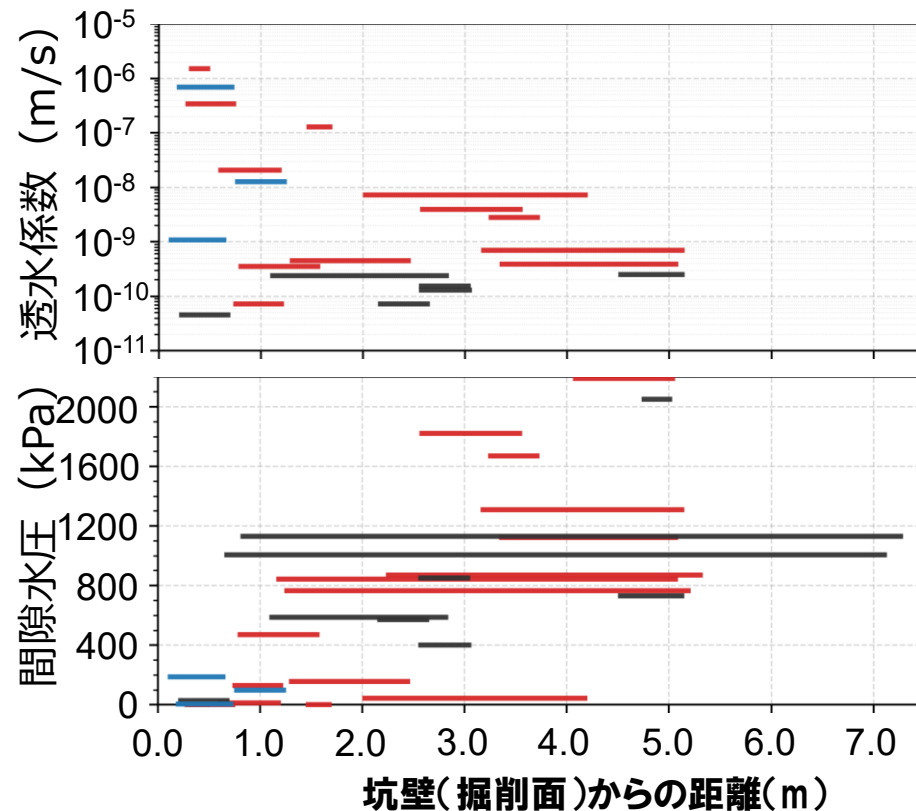
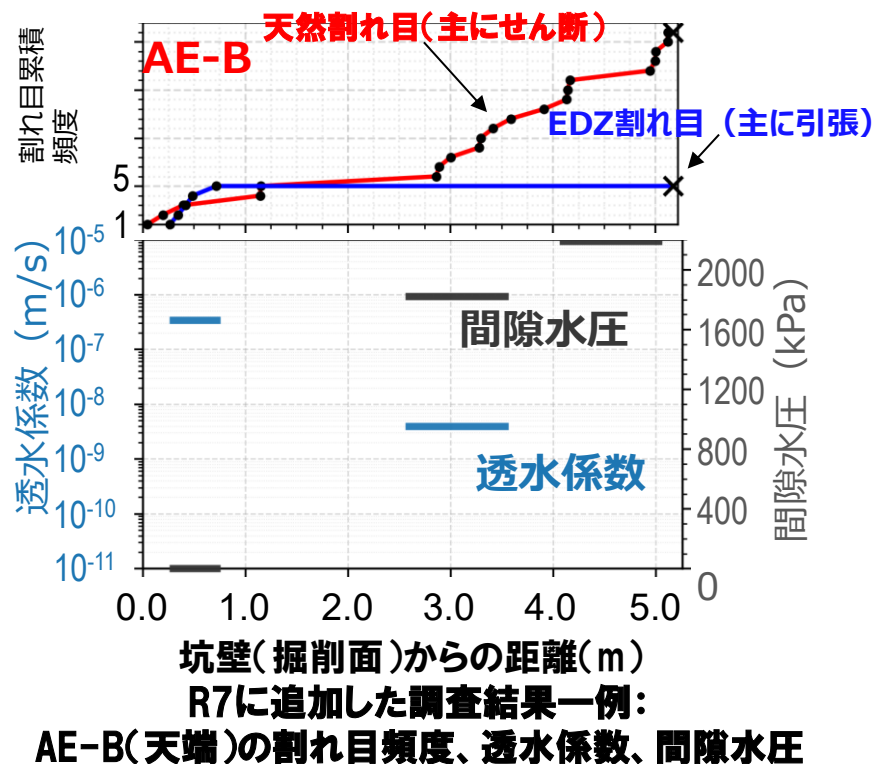


350 m試験坑道6周辺のボーリング孔レイアウト

令和7年度の成果概要

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

【試験坑道6周辺のEDZ分布や水理特性を把握するための原位置調査】



坑壁からの距離と透水係数・間隙水圧の関係
透水試験を実施した9つのボーリング孔の結果

間隙水圧

- 坑道近傍は 0 kPa 付近だが、坑道からの距離とともに増加し、特に天端側で高い

EDZ

- 西側側壁の割れ目頻度は低い一方、天端・側壁・底盤に EDZ が分布
- EDZは坑道から最大1.5 m程度

透水係数

- 坑道近傍(EDZ 推定域)では、健岩部に比べて約 4 桁高い
- 坑道から離れると、天然割れ目領域で健岩部に比べて約 2 桁高い
- 天然割れ目近傍では EDZ に特徴的な引張割れ目の頻度は低いが、天然割れ目自体の透水性が変化した可能性あり

令和7年度の成果概要

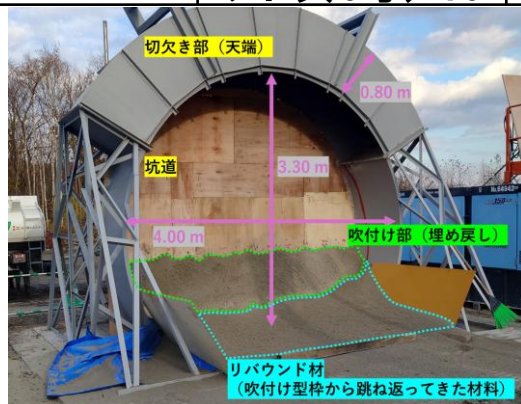
② 先行ボーリングによる地質環境特性調査ならびに工学的対策を考慮した、地下施設および人工バリアの設計評価技術の体系化

【止水プラグと坑道埋め戻しの施工方法の検討】

- 坑道の埋め戻しと止水プラグの施工において、吹付け工法を適用することを想定し、坑道と切欠き部の一部(天端)の形状を実寸で模擬した型枠を用いた地上吹付け試験を実施
- 施工後の平均乾燥密度は、埋め戻し材・止水プラグともに目標値を上回ることを確認
- 上向きに吹付けを行う止水プラグの切欠き部の天端ではリバウンド材(付着せずに跳ね返って落ちた材料)の量が多くなる傾向

地上吹付け試験における材料配合と吹付け試験条件

試験ケース	材料配合(%)	施工含水比(wt%)	目標乾燥密度 (Mg/m ³)	備考
埋め戻し材	ベントナイト:40 幌延の泥岩:60	32.5	1.30	幌延の泥岩の粒径を5 mm以下に調整
止水プラグ	ベントナイト:70 ケイ砂(3号):15 ケイ砂(5号):15	18.6	1.43	



吹付け型枠の概要



埋め戻し材の吹付け時の様子



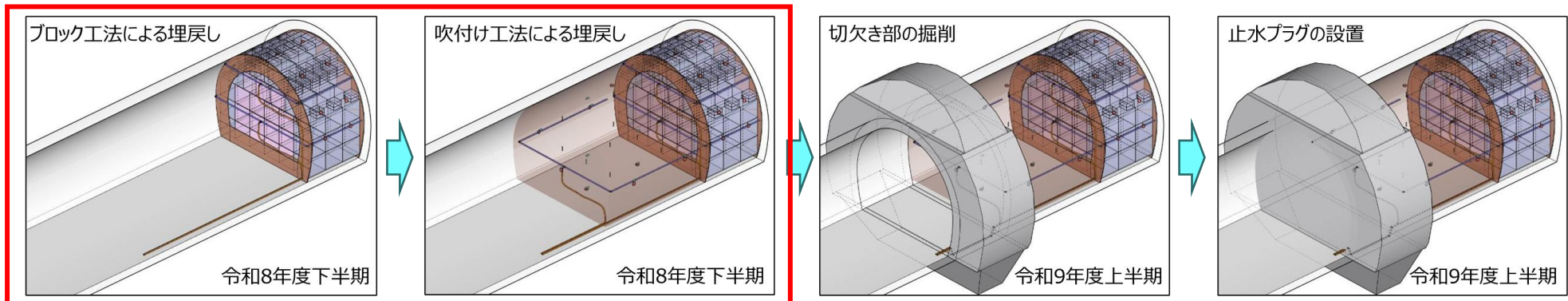
止水プラグ材料の吹付け完了時の様子

令和8年度の実施計画

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

【令和8年度の実施計画】

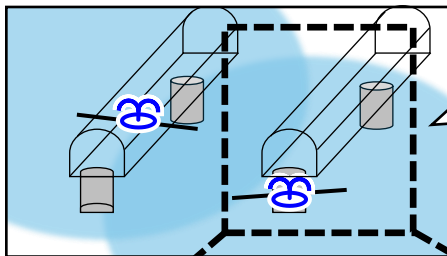
- 試験坑道8掘削後のEDZの透水性の変化、試験坑道8掘削前後の弾性波速度構造に基づくEDZの広がりを推定し、EDZの予測解析の妥当性を検証
- 試験坑道8掘削後に、周辺に新たに生じたEDZの広がりや透水性の増大の程度について、弾性波トモグラフィ調査、透水試験により確認
- 350 m試験坑道6の奥側から数mの範囲をブロック工法と吹付け工法を組み合わせる埋め戻しを実施
- 原位置施工試験では、埋め戻しの手順や施工品質の管理方法などを確認するとともに、施工後の埋め戻しの状態を確認するためのセンサーなどを設置



※具体的な作業手順は検討中であり、また実施時期は地下施設の他の作業状況により変わる可能性あり
坑道埋め戻しと止水プラグの作業手順の案

研究の目的

③多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、
緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備

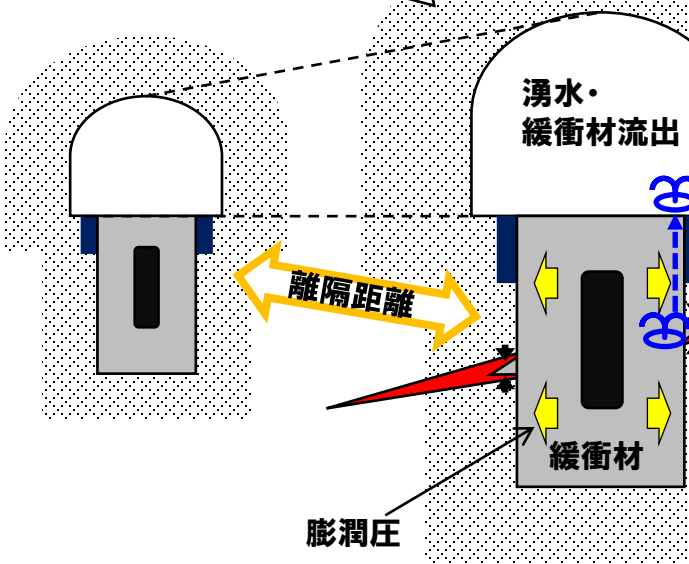


①多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術として、
近接する複数の湧水箇所間の水圧干渉を考慮した
湧水量あるいはその減少速度の予測手法と
湧水抑制対策への反映方法の整備

②ピット周辺のEDZの範囲を
評価するための解析手法と
支保設計への反映方法

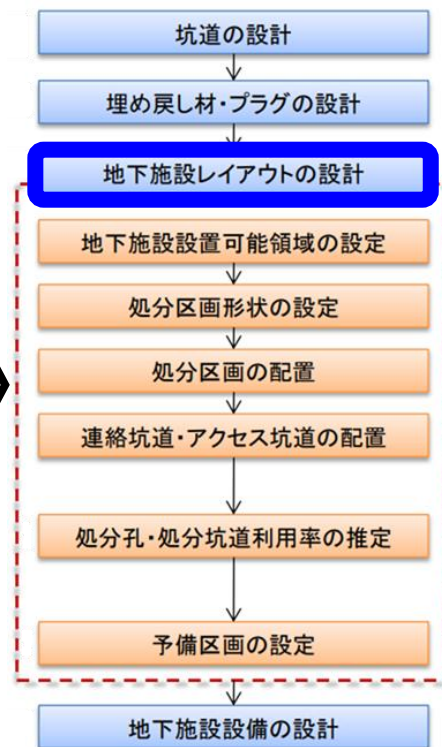
EDZ

③断層や割れ目からの定常的な
湧水量や減少量の予測手法と
緩衝材の流出抑制対策への反映



④ピット周辺の割れ目の
開きにくさの評価手法と
侵入抑制対策への
反映方法の整備

反映



地下施設の設計フロー
(NUMO-SC 第4章)

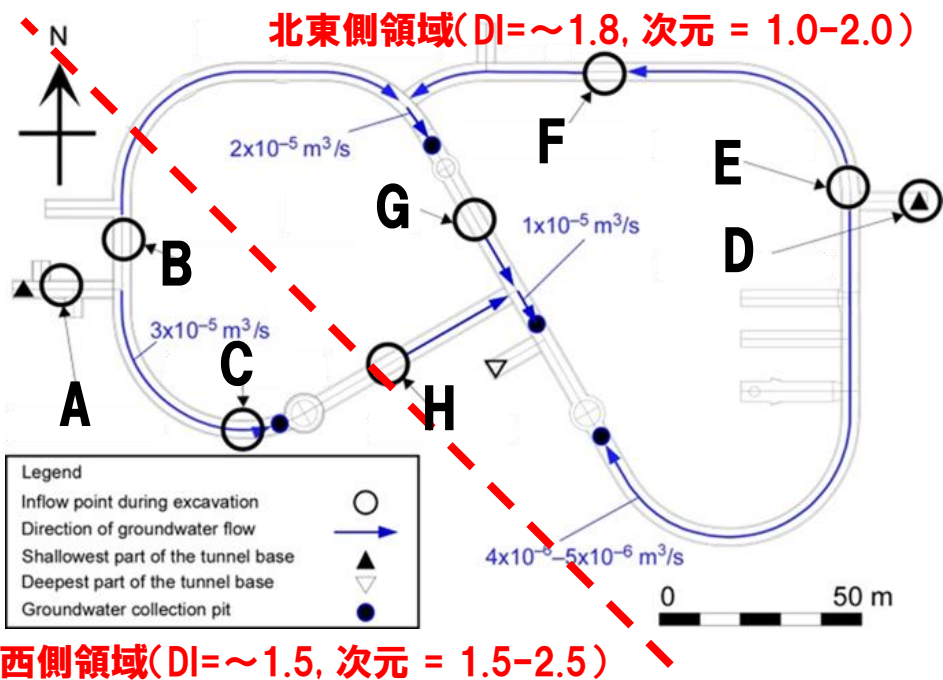
令和7年度の成果概要

③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・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備

①多接続坑道を考慮した湧水抑制対策技術として、近接する複数の湧水箇所間の水圧干渉を考慮した湧水量あるいはその減少速度の予測手法と湧水抑制対策への反映方法の整備

【複数の湧水箇所間の水圧干渉を考慮した湧水量の減少速度の予測手法の整備】

- 深度350 mを水みちのつながり方の次元が異なる2つの領域に区分し、それぞれの領域に分布する複数の湧水点の湧水量を対象に、水みちのつながり方の次元の違いに基づいた湧水量の減少速度を予測
- 掘削当時と現在(約10年後)の湧水量の観測値を用いて実際の減少速度を算出し、予測結果と比較



実測した湧水量と現在の湧水量および
これらを用いて算出した湧水量の自然減少率

(Sakuma et al., 2025)

湧水点	掘削時の湧水量 (m ³ /s)	現在の湧水量 (m ³ /s)	掘削から約10年経過した後の自然減少率
A+B+C (南西側)	3×10^{-4}	3×10^{-5} – 6×10^{-5}	5 – 10
D+E+F (北東側)	5×10^{-4} – 2×10^{-3}	4×10^{-6} – 3×10^{-5}	20 – 400
G+H (北東側)	9×10^{-4} – 2×10^{-3}	1×10^{-5}	60 – 100

南西側領域(DI=~1.5, 次元 = 1.5-2.5)

350m調査坑道における掘削当時の主要な湧水箇所
(Sakuma et al., 2025)

令和7年度の成果概要

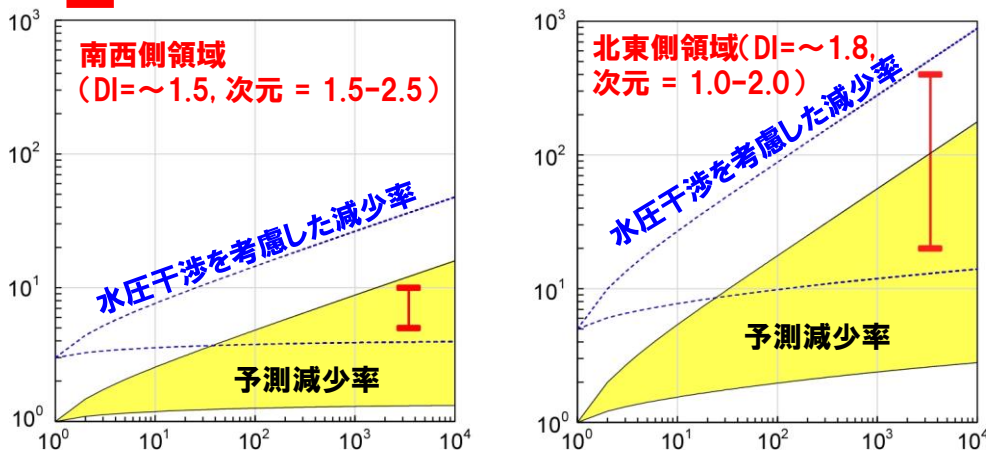
③多接続坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、
緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備

①多接続坑道を考慮した湧水抑制対策技術として、近接する複数の湧水箇所間の水圧干渉を考慮した湧水量あるいはその減少速度の予測手法と湧水抑制対策への反映方法の整備

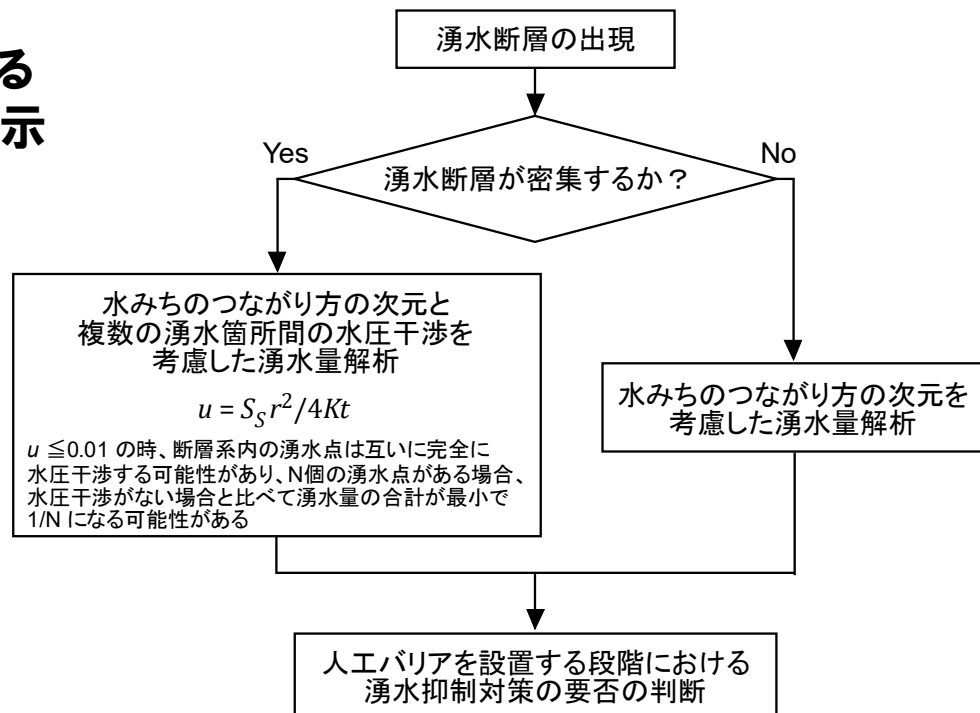
【複数の湧水箇所間の水圧干渉を考慮した湧水量の減少速度の予測手法の整備】

- 水みちのつながり方の次元を考慮した解析の結果、複数の湧水箇所間で生じる水圧干渉の影響を加味することで、解析で予測した減少率は、観測結果から算出した減少率と矛盾しない値となった
- 水圧干渉による湧水量の減少速度の加速を考慮することで、湧水抑制対策の要否を検討する上で重要な判断材料を提供可能
- 以上を踏まえ、人工バリアを設置する段階における湧水抑制対策の要否を判断するための手順を提示

I は湧水量の観測値から求めた減少率



350m調査坑道内における湧水量の実測減少率と予測減少率
(Sakuma et al., 2025)



近接する複数の湧水箇所間の水圧干渉を考慮した湧水量解析と湧水抑制対策の判断手順

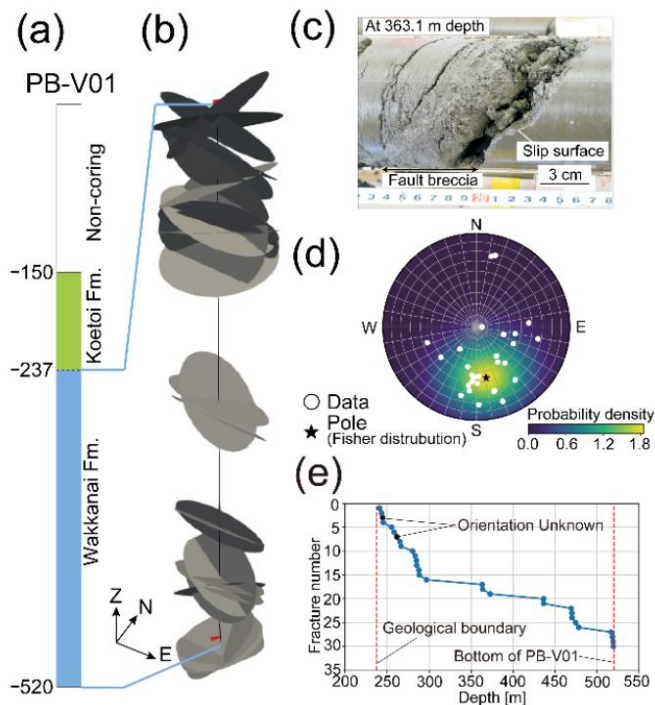
令和7年度の成果概要

③多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、
緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備

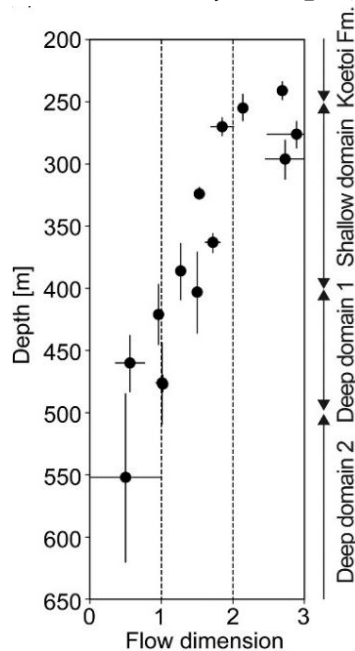
③断層や割れ目からの定常的な湧水量や減少量の予測手法と緩衝材の流出抑制対策への反映

【定常的な湧水量を予測する手法の開発】

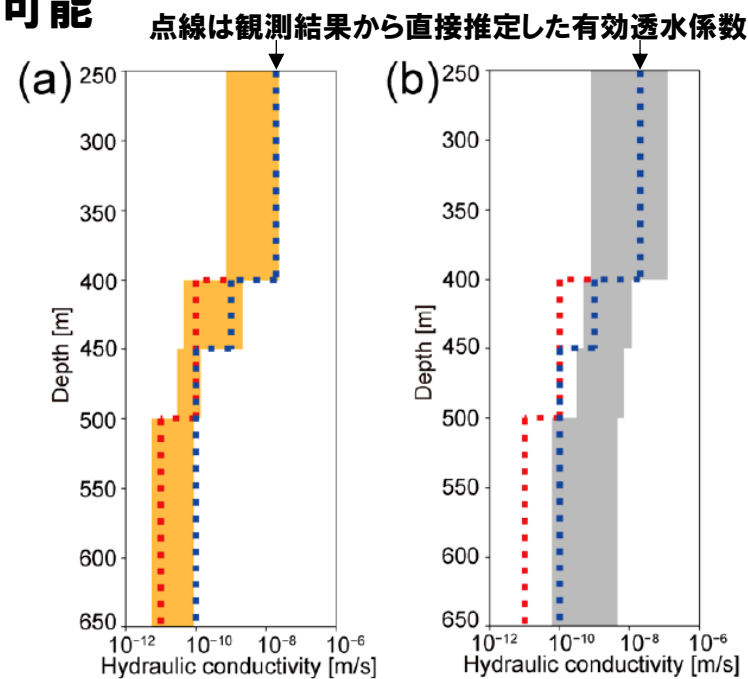
- 断層の代表的な透水性とDFNモデルを組み合わせることで有効透水係数を推定する手法を開発
- 地下施設直近で掘削されたPB-V01孔のデータを用いてDFNモデルを構築し、開発した手法を適用して地層の有効透水係数を算出した結果、観測結果から直接推定した有効透水係数を適切に再現可能
- 断層や割れ目からの湧水の定常的な発生量をより適切に予測可能



PB-V01孔で得られた地質、断層および割れ目のデータ (尾崎・石井, 2026)



地下施設周辺における深度と水みちのつながり方の次元の関係



有効透水係数の計算結果

(a) 開発した手法の推定結果、(b) 透水量係数を対数正規分布に従って各亀裂に割り当てて計算した結果 (尾崎・石井, 2026)

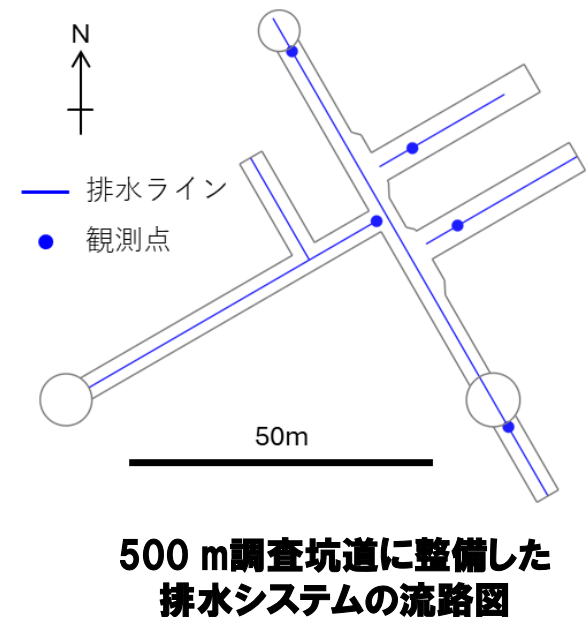
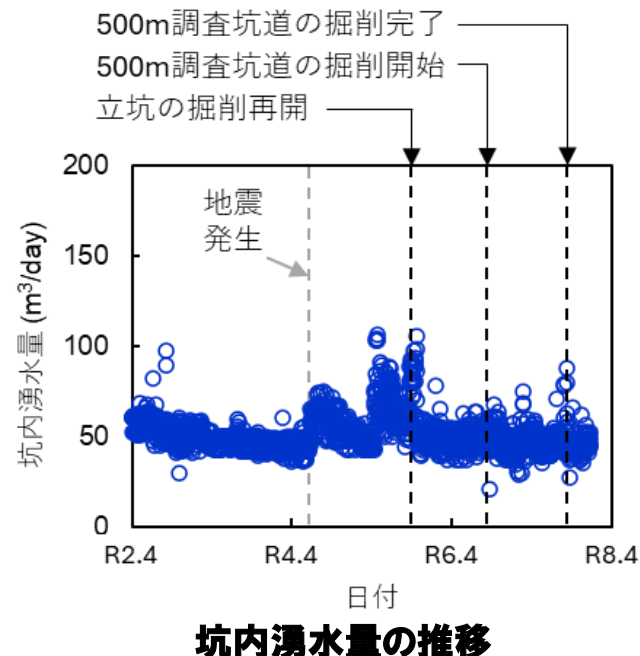
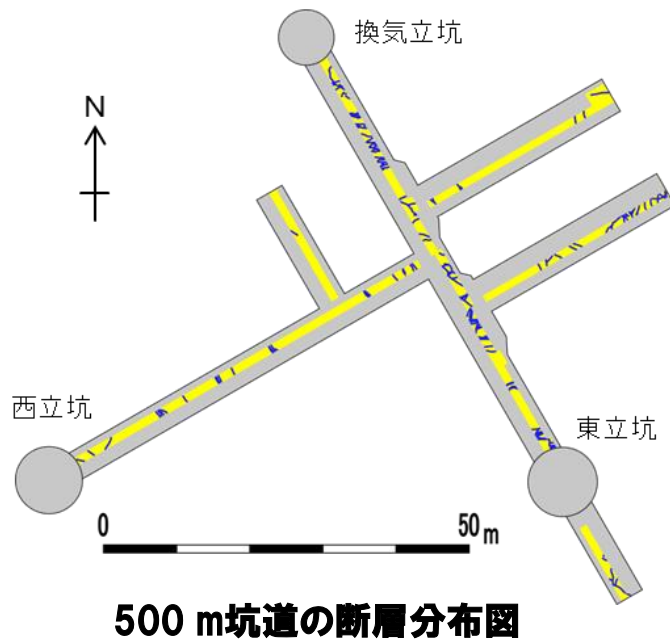
令和7年度の成果概要

③多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、
緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備

③断層や割れ目からの定常的な湧水量や減少量の予測手法と緩衝材の流出抑制対策への反映

【坑道からの湧水量の変化に関する検討】

- 500 m調査坑道において地質調査を行った結果、複数の断層を確認
- 断層や割れ目へのグラウト注入を行わなかったにもかかわらず、坑内湧水量の定常的な増加は認められなかったことから、500 m調査坑道への湧水量は坑内湧水量と比較してわずかであると推測
- この推測結果は事前の予測結果(Ozaki and Ishii, 2024)と調和的
- 今後、500 m調査坑道に整備した排水システムを利用して詳細な湧水量とその時間変化を観測



令和7年度の成果概要

③多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、
緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備

②ピット周辺のEDZの範囲を評価するための解析手法と支保設計への反映方法

【ピット周辺のEDZの広がり予測解析概要】

- 500 m試験坑道8におけるピット掘削の再現と、複数本のピット掘削における力学的な相互干渉について検討することを目的として、数値解析モデルを構築
- 地上からの調査結果から推定した深度500 mの岩盤物性と地圧状態を設定して、弾塑性の三次元逐次掘削解析を行い、ピット掘削時の周辺岩盤のEDZの広がりを予測

- 3本のピット(直径2.4 m、深さ4.2 m)の掘削が再現可能
- 離隔はNUMOの包括的技術報告書に倣って設定(直径の3倍)

解析物性値 (Aoyagi et al. 2024)

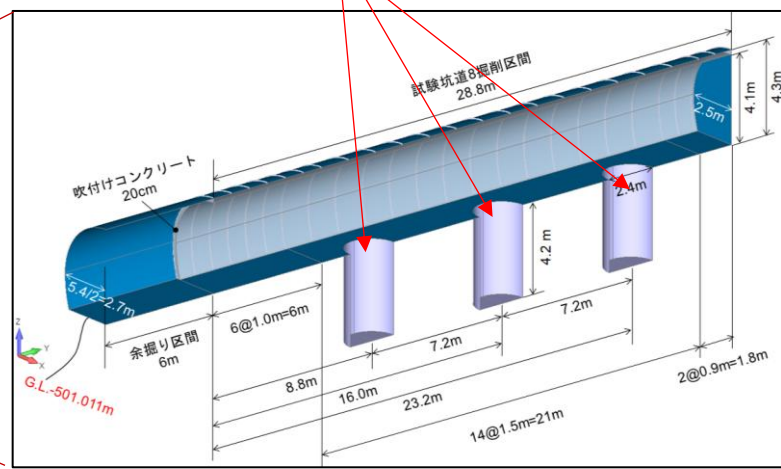
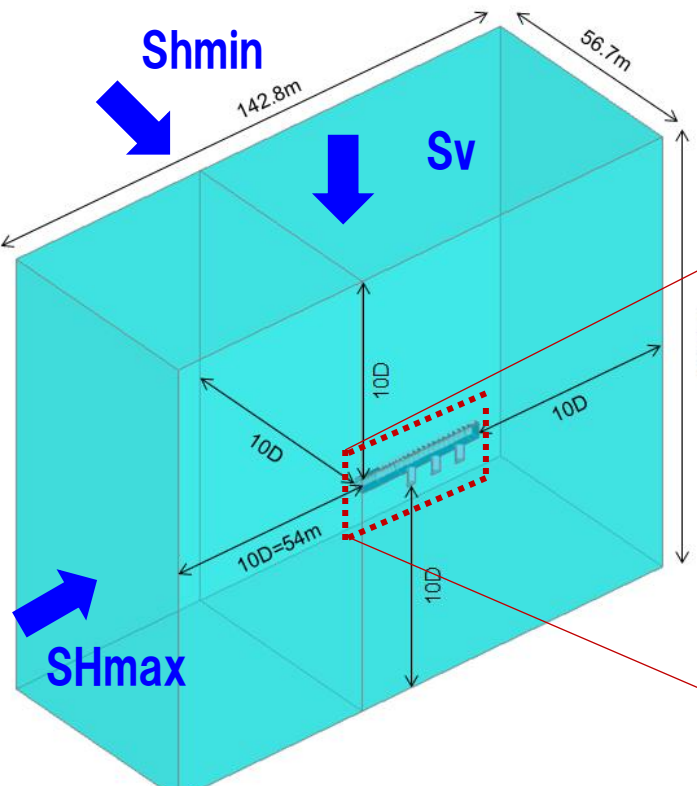
	500mの稚内層 岩石	コンクリート
ヤング率(GPa)	2.12	9.29
ポアソン比	0.24	0.2
粘着力(MPa)	2.26	-
内部摩擦角(°)	19.6	-
引張応力(MPa)	1.2	-
密度(kg/m ³)	1990	2350

※Drucker Pragerの破壊規準を採用

地圧条件

	SHmax	Shmin	Sv
Case 1	7.2	5.6	8.0
Case 2	10.1	7.2	8.0

単位:MPa



解析モデルの全景と坑道およびピット掘削部の拡大図

要素数: 3,738,097
接点数: 3,720,014

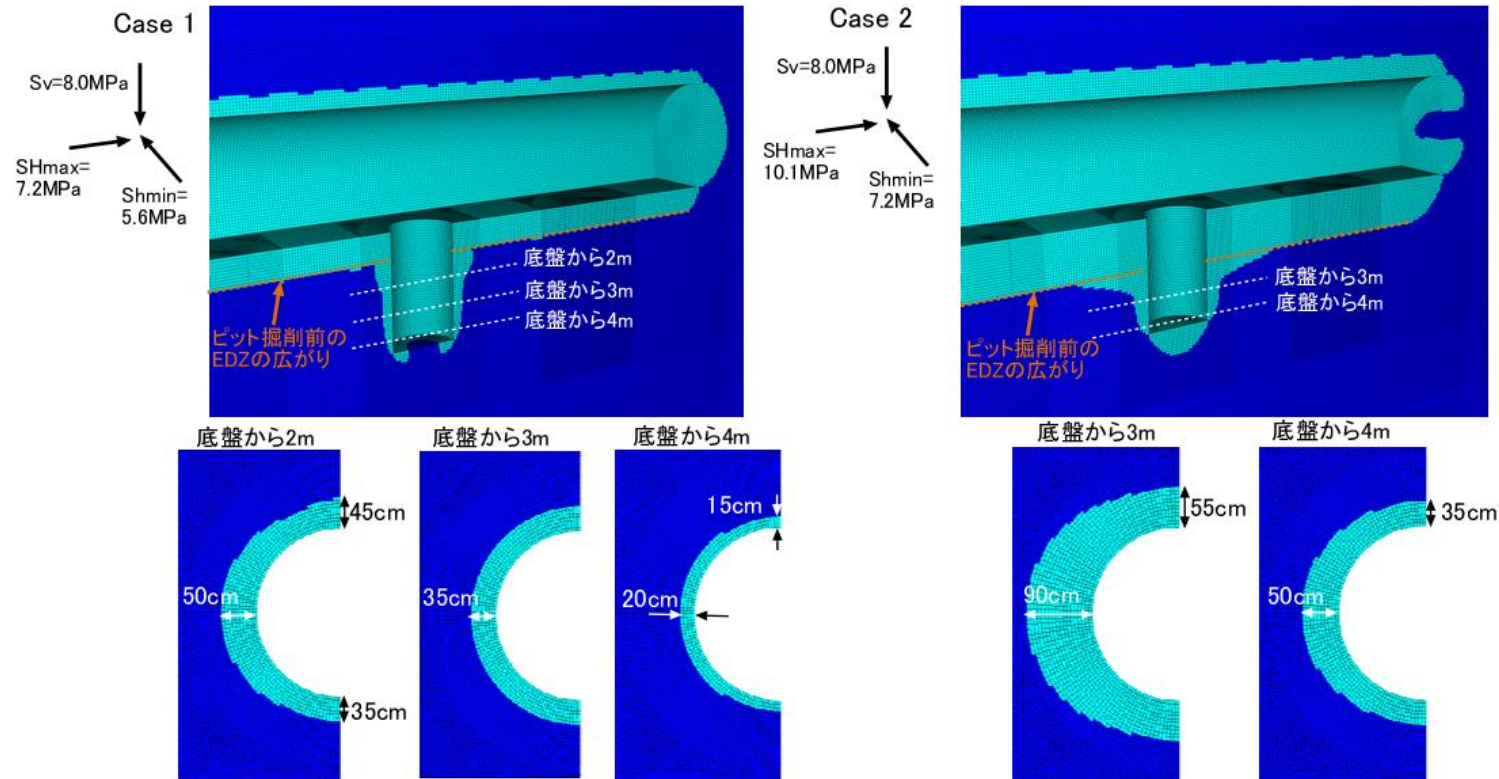
令和7年度の成果概要

③多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、
緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備

②ピット周辺のEDZの範囲を評価するための解析手法と支保設計への反映方法

【ピット周辺のEDZの広がり(予測解析結果)】

- 底盤部のEDZの下端付近は大きくEDZが広がり、それ以深は深度とともにEDZの広がりが小さくなる傾向を確認。底盤EDZの下端から深部にしたがつて、ピット周辺のEDZはCase1で50 cmから20 cm、Case2で90 cmから50 cmまで縮小
- 裸孔掘削の場合、特に浅部にて孔壁が不安定な状態になると推定。実際は全周ケーシング掘削を行うため、支保としてケーシングがどのような効果を発揮するかを解析で検討し、施工計画に反映



解析により得られた坑道およびピット周辺のEDZの広がり(水色部分)

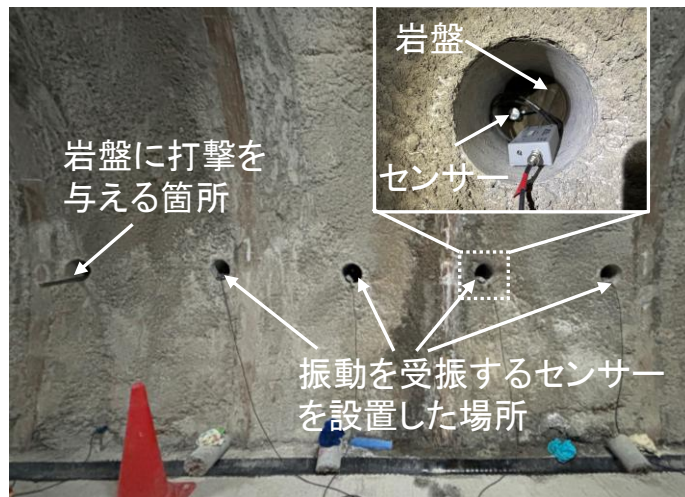
令和7年度の成果概要

③多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、
緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備

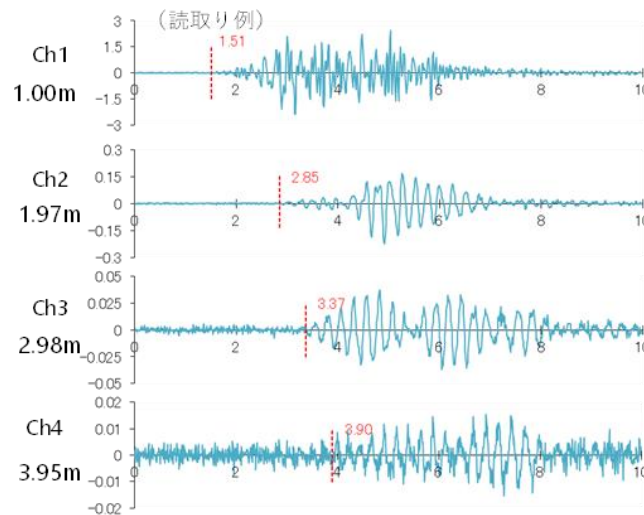
②ピット周辺のEDZの範囲を評価するための解析手法と支保設計への反映方法

【ピット周辺のEDZの広がりの計測計画の検討】

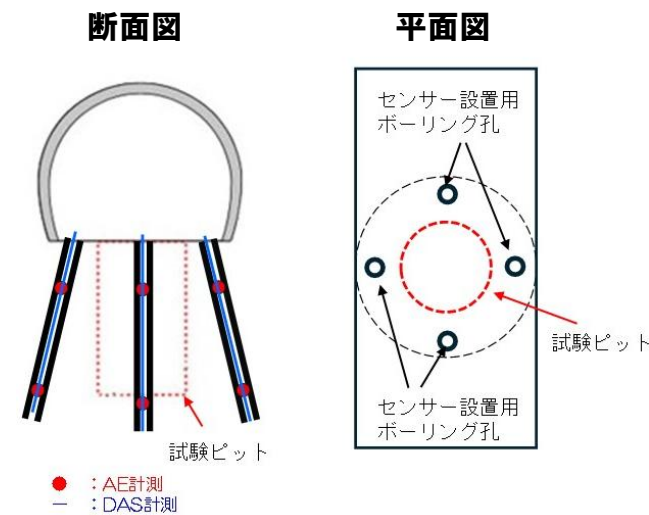
- 500 m試験坑道8にて、岩盤打撃時の振動の距離減衰特性を調査
- 結果として、発振点から5 m程度の範囲まで弾性波が到達することを確認。ピット掘削時のAEの到達可能距離は約5 mと予想
- EDZの広がり予測解析や弾性波減衰特性を踏まえてAE計測レイアウト案を提示



弾性波の減衰特性調査の様子
(500 m試験坑道8)



取得した波形の例



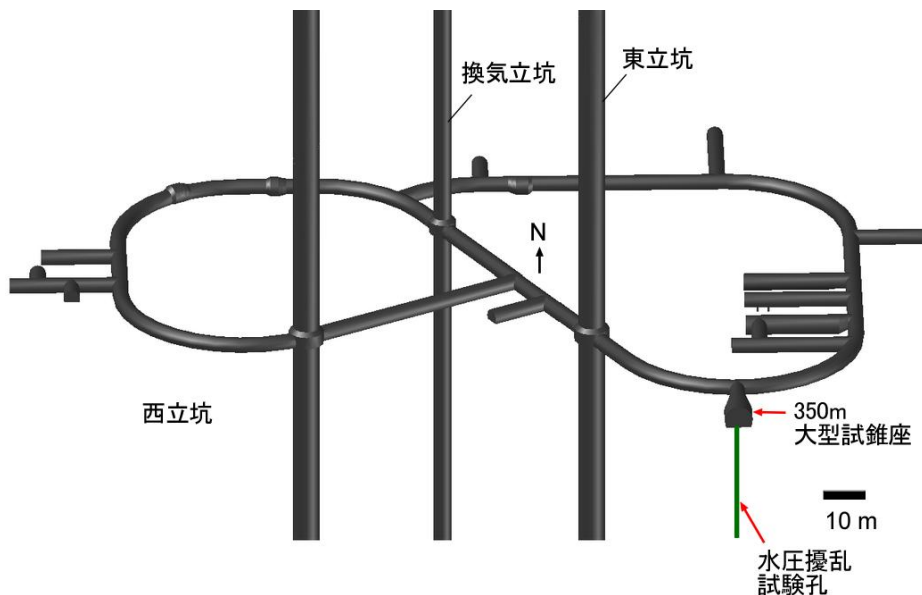
ピット掘削中のAE計測
レイアウト案

令和7年度の成果概要

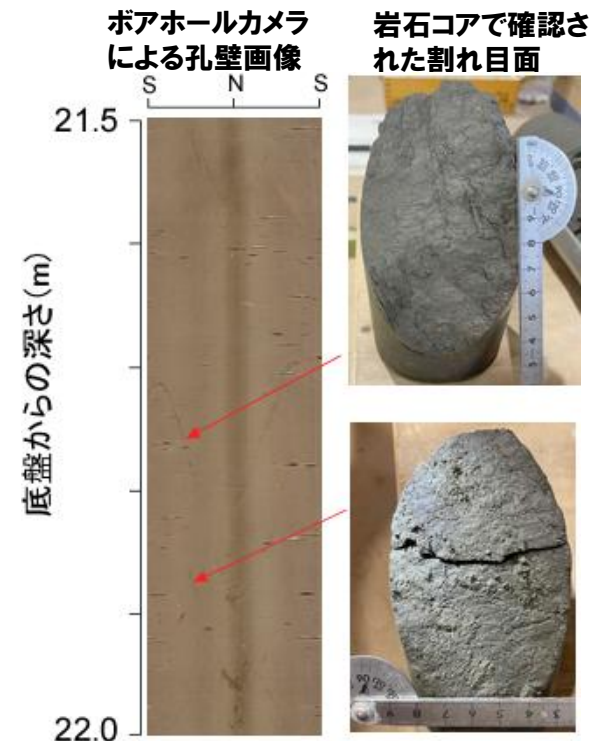
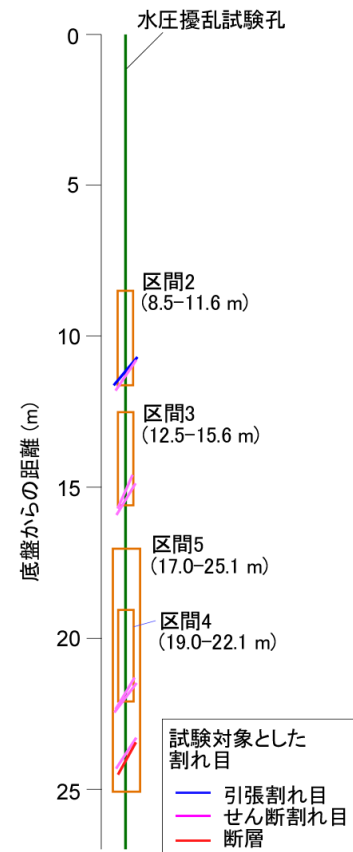
③多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、
緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備

④ピット周辺の割れ目の開きにくさの評価手法と侵入抑制対策への反映方法の整備

- 350 m大型試験錐座において、割れ目や断層を対象とした水圧擾乱試験を実施
- 引張、せん断割れ目を含む区間と断層を含む区間として4区間を設定し、段階的に区間内の水圧（区間圧力）を上昇させて流量の変化を確認
- 各段階ごとの透水量係数を解析により算出し、水理学的開口幅に変換。得られたデータを用いて亀裂に作用する有効垂直応力と水理学的開口幅の情報から割れ目の開きにくさを評価



水圧擾乱試験実施場所、試験実施区間と対象とする割れ目の位置



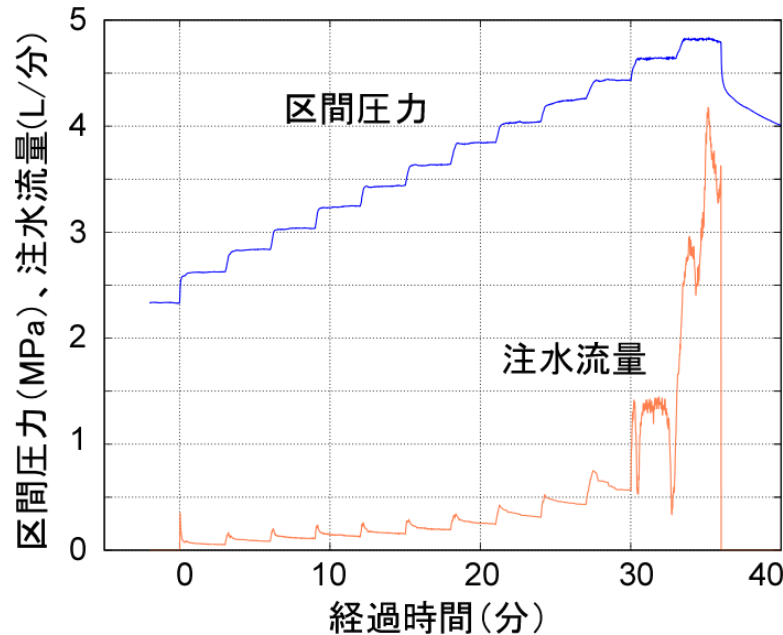
例：区間4において確認されたせん断割れ目

令和7年度の成果概要

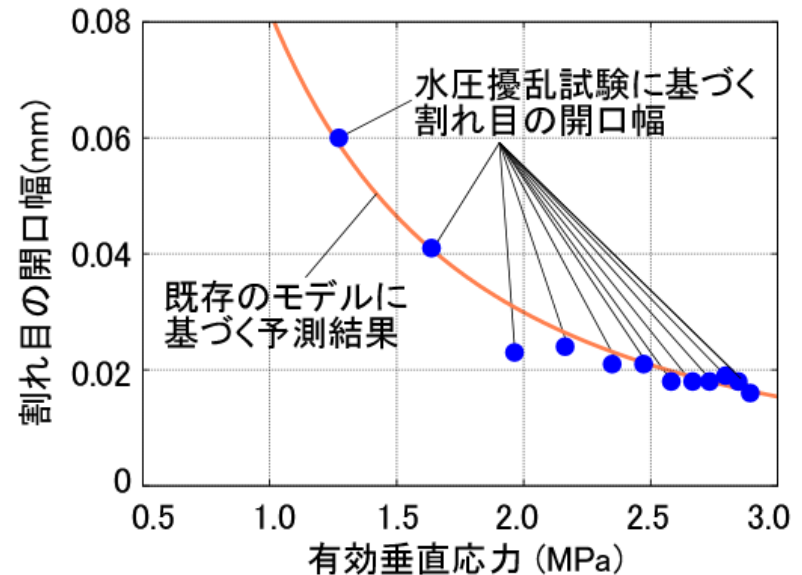
③多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、
緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備

④ピット周辺の割れ目の開きにくさの評価手法と緩衝材の侵入抑制対策への反映方法の整備

- 区間4では、垂直有効応力が1.6 MPa以下となった時点、すなわち区間圧力が4.6 MPaになった時点から割れ目の開口幅が顕著に増大
- 既存のモデルに基づく予測結果により、水圧擾乱試験により得られる開口幅と有効垂直応力の関係性を説明可能。すなわち、既存のモデルによりせん断割れ目の開きにくさの定量的な評価が可能



段階的に上昇させた区間圧力とそのときの注水流量の関係(区間4)



せん断割れ目を対象とした割れ目の開口幅と有効垂直応力の関係(区間4)

令和8年度の実施計画

③多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、 緩衝材流出・侵入現象評価手法および抑制対策技術の整備

②ピット周辺のEDZの範囲を評価するための解析手法と支保設計への反映方法

- EDZの広がり予測解析結果と岩盤の振動が伝わる距離の情報を基に、ピット掘削中のEDZの広がりを計測する計画を精査
- EDZの広がり予測解析結果に基づき、ピットの施工方法や支保の必要性の検討
- 試験坑道8の地質状況や先行ボーリング調査結果を踏まえ、ピット掘削位置を選定
→課題②のピットの配置の考え方へ反映

③断層や割れ目からの定常的な湧水量や減少量の予測手法と緩衝材の流出抑制対策への反映

- 令和7年度に整備した排水システムを用いて、深度500 mにおける各坑道の湧水量を把握
- 深度350 mと500 mにおける定常的な湧水量やその減少量の違いを考慮した予測手法の整備

④ピット周辺の割れ目の開きにくさの評価手法と緩衝材の侵入抑制対策への反映方法の整備

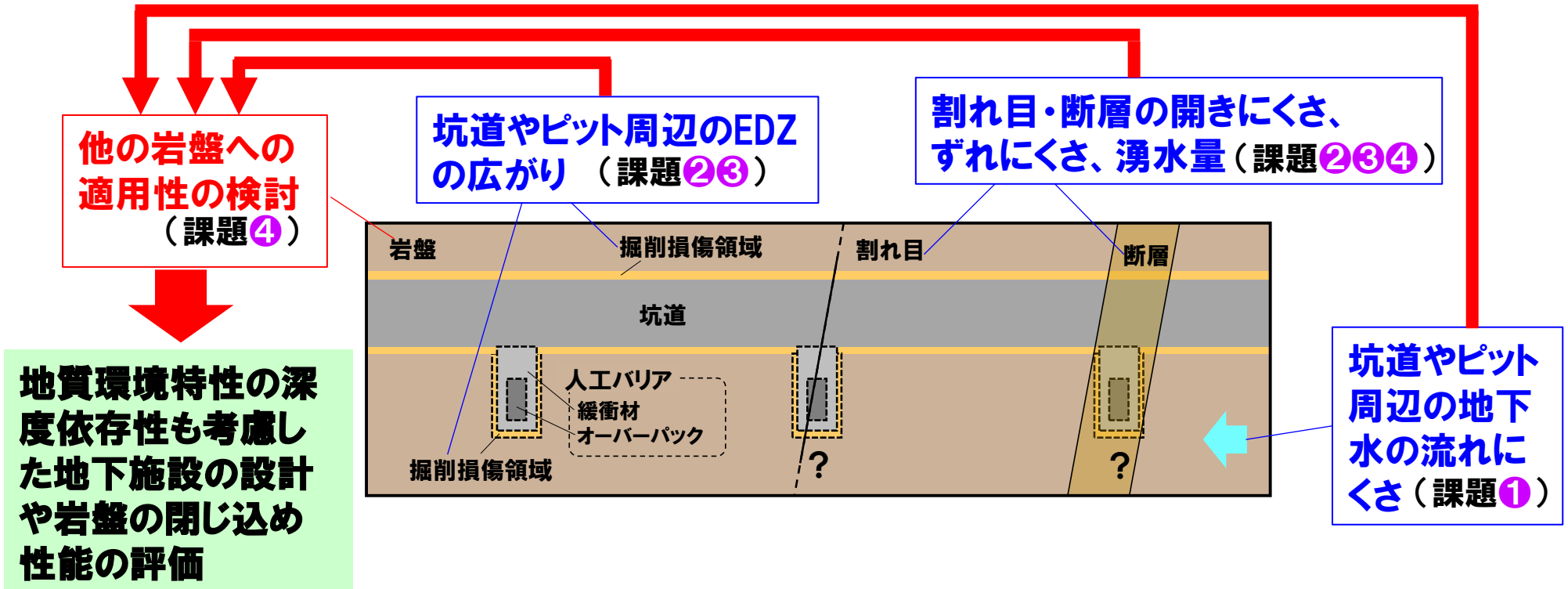
- 350 m調査坑道で実施した水圧擾乱試験結果を整理して、割れ目に作用する応力が変化したときの既存割れ目や断層の開きにくさの定量的な評価手法の整備
- 割れ目への緩衝材の侵入に対する留意点を検討

研究の目的

④ 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要なとなる情報の整理

坑道やピット周辺に存在する割れ目の開きにくさやずれにくさ、割れ目からの湧水量、地下水の流れにくさ(物質の動きにくさ)、EDZの広がりなどの**地質環境の調査・評価**を行い、緩衝材やオーバーバックの機能、坑道やピットの安定性および廃棄体周辺の岩盤の閉じ込め性能を担保するために必要な情報を整理し、**地質環境特性の深度依存性も考慮した地下施設の設計や岩盤の閉じ込め性能の評価に反映**

廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報と、各課題で得られる情報、課題④で検討する内容の関係

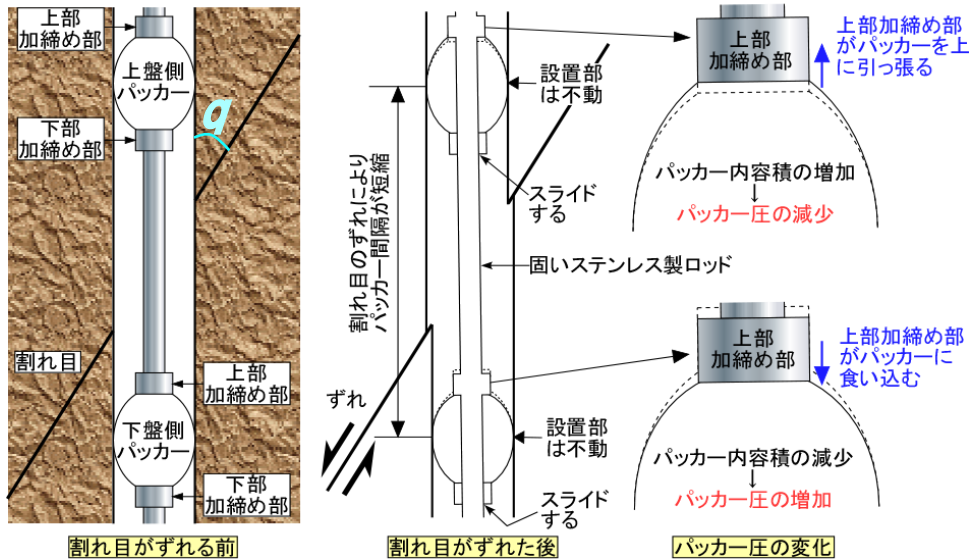


令和7年度の成果概要

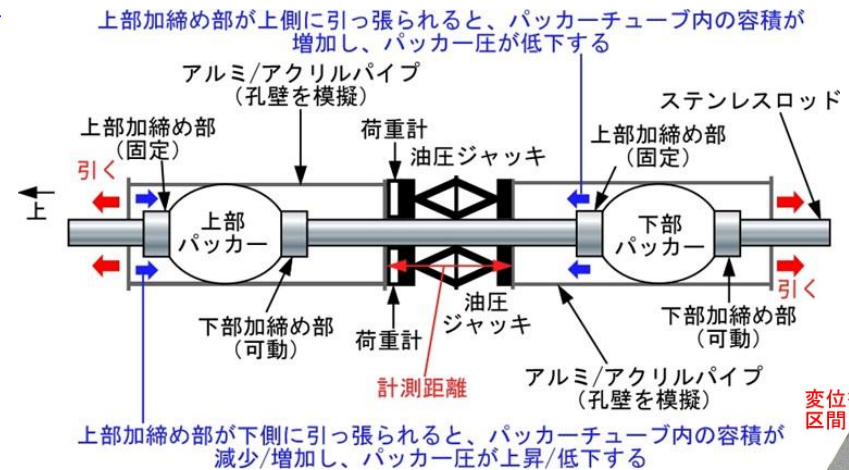
④ 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理

【割れ目のずれにくさに関する調査・評価手法の整理】

- 実際のボーリング孔における試験をより忠実に再現するために、パッカー間をロッドでつないで区間の変位を与えた時のパッカー圧の変化を室内試験により検討
- 実験に幌延深地層研究センターに分布する岩石のヤング率を包含する材料として、孔壁を模擬する人工パイプにはアクリル樹脂とアルミニウムを採用(ヤング率0.6~4.5 GPaを想定)
- 深度数百mでの試験を想定した水圧条件を考慮し、パッカー圧を3.0 MPa, 5.0 MPa, 6.9 MPaの3通りで実験を実施



水圧擾乱試験により割れ目をずらしたときの
パッカー圧の変化とせん断変位の関係 (Ishii, 2024)



室内試験の概要
(佐久間ほか, 2026)



試験区間の変位と割れ目のせん断変位 u_s 、開口変位 d_m の関係

$$\Delta l = \Delta u_s \cos \theta + \Delta d_m \sin \theta$$

令和7年度の成果概要

④ 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理

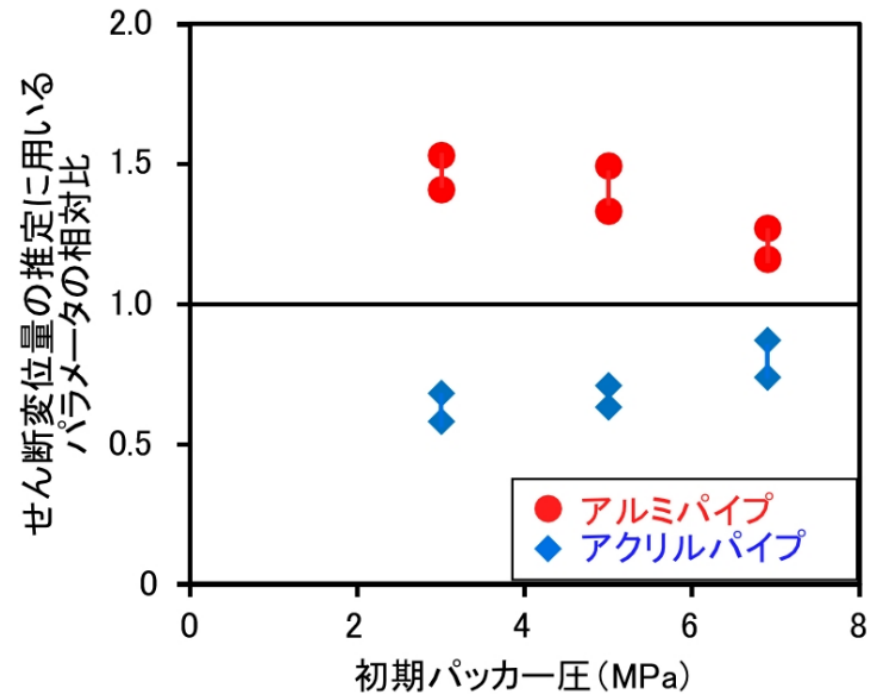
【割れ目のずれにくさに関する調査・評価手法の整理】

- 試験の結果、過去の室内試験はせん断変位量を1.2倍～1.5倍もしくは0.6倍～0.9倍に過大もしくは過小評価
- 断層や割れ目のずれの評価において、パッカーを連結させ、パッカー圧を原位置試験の条件と合わせた実験による校正結果を基に原位置試験のデータ分析を行うことが、信頼性の高い評価のために重要

試験区間の変位とパッカー圧 の変化の校正式 (佐久間ほか、2026)

$$\Delta l = -a(b_u + b_l)V\Delta P/K$$

Δl : 試験区間の変位
 $a(b_u + b_l)$: 室内試験で求める値
 V : パッカーと注水ラインの容積
 ΔP : パッカー圧の変化
 K : 水の体積弾性率



室内試験の結果

(佐久間ほか、2026)

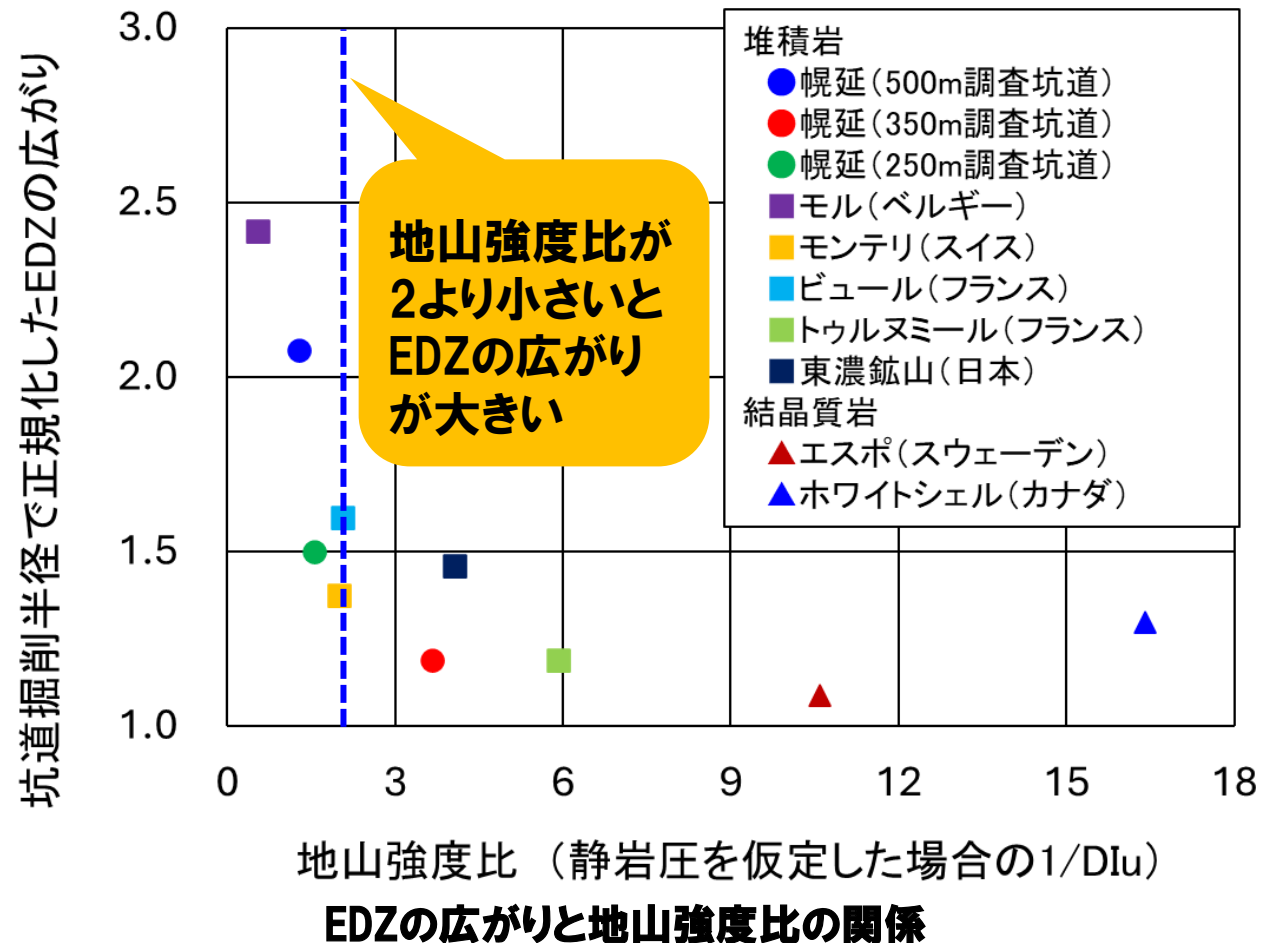
令和7年度の成果概要

④ 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理

【EDZの広がりに関する調査・評価手法の整理】

- 幌延で確認されたEDZの広がりや、他の地下研究施設で確認されたEDZに関する文献調査を実施
EDZの広がり と 地山強度比の関係性について整理
- EDZの広がり は、坑道掘削時の応力状態や岩盤強度に依存

- 地山強度比は、一軸圧縮強度と土被り圧(地山密度×深さ)の比(応力の異方性を無視して静岩圧を仮定)
- D_{Iu} は平均有効応力と一軸圧縮強度の比で、静岩圧を仮定すると地山強度比の逆数に相当

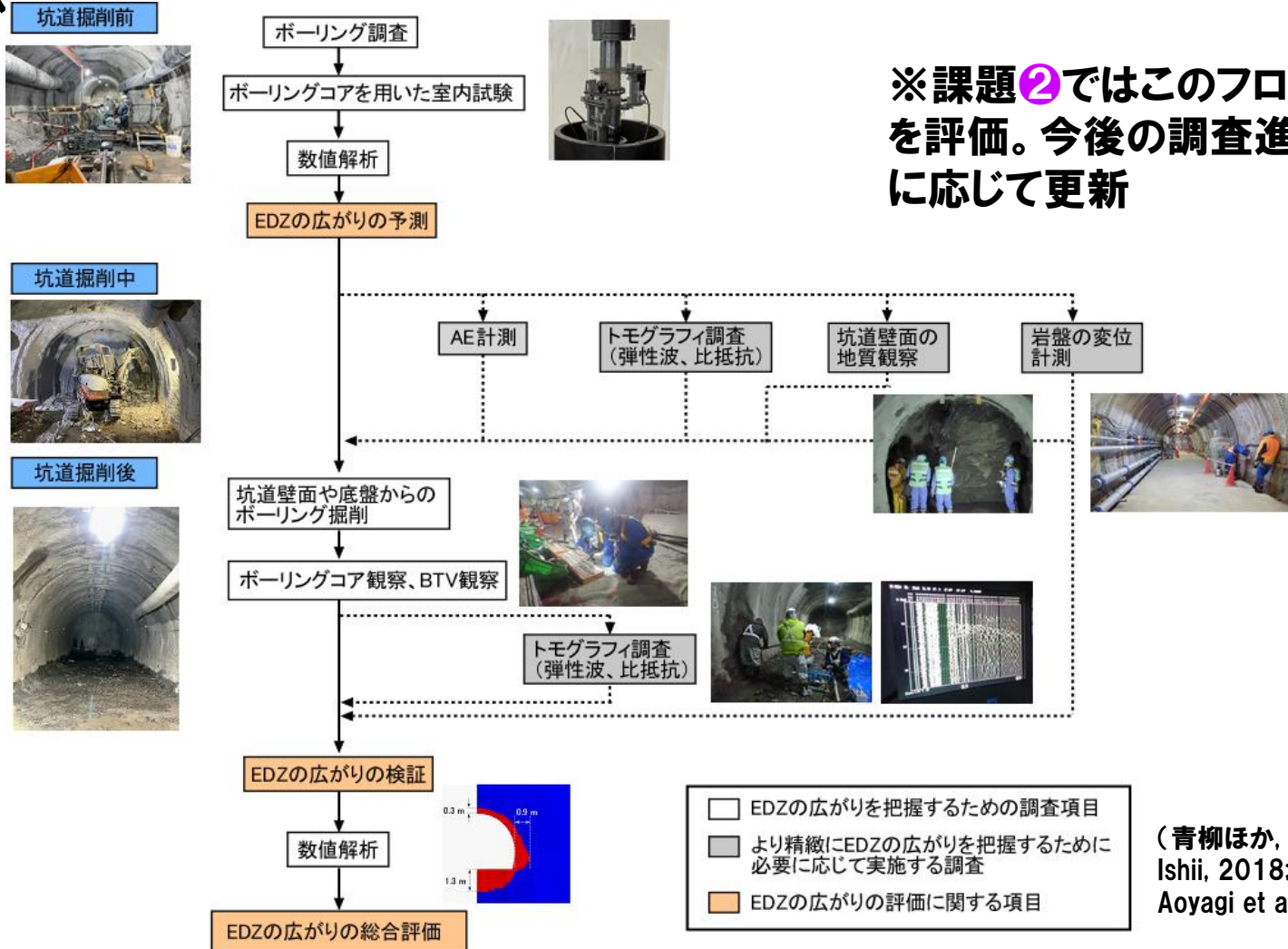


令和7年度の成果概要

④ 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理

【EDZの広がりに関する調査・評価手法の整理】

EDZの広がりには岩盤の種類によらずに岩盤の応力状態と強度に依存することを踏まえ、幌延や他の地下研での事例を基に、**様々な岩盤に対して適用可能なEDZの広がり**の調査・評価に関するフローチャートとして提示



※課題②ではこのフローに基づいてEDZを評価。今後の調査進展を踏まえて必要に応じて更新

(青柳ほか, 2014; 2017; Aoyagi and Ishii, 2018; 2024; Hata et al., 2024; Aoyagi et al., 2025)

令和8年度の実施計画

④ 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理

- 割れ目のずれにくさに関して、立坑掘削前のグラウト施工時に断層部で確認されたずれの情報を
用いた分析を進めるとともに、350 m調査坑道で実施した水圧擾乱試験で得られたデータの解
析を実施
- 割れ目の開口幅とその開きにくさ(課題③)、割れ目のずれにくさ、ピット周辺の地下水の流れにく
さ(課題①)、割れ目からの湧水量(課題③)、ピット周辺のEDZの広がり(課題②)の調査・評価
手法について、堆積岩における適用可能性に関する整理を継続して実施
- ピット周辺の地下水の流れにくさについては、水みちのつながり方の次元が低く、割れ目内の水み
ち同士の連結が少ない岩盤でも、地層の代表的な透水性を適切に求めることができる計算手法
を構築(課題①)
堆積岩以外の岩盤についても整理を行い、ピット周辺の地下水の流れにくさに関わる岩盤分類の
ためのフローチャートの構築を検討

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係る成果(令和7年度)(1/2)

- Aoyagi, K., Hayano, A., Le, A. N. and Kim J.-W.: Current activity of the Horonobe International Project: Prediction of the excavation damaged zone induced around the gallery excavated at 500 m depth, The 1st International Workshop on Coupling Processes in Geological Disposal (COUGEO 2025), 2025.
- 青柳和平, 田村友識, 村上裕晃, 早野明, 尾崎裕介, 大野宏和, 石井英一: 幌延国際共同プロジェクトにおける岩盤力学研究の現状, 資源・素材学会講演集, vol.12, no.2, 2025, 7p.
- 青柳和平, 田村友識, 尾崎裕介, 石井英一, 本島貴之, 菅原健太郎: 幌延深地層研究センターの深度500mの調査坑道を対象とした掘削損傷領域の事前予測, 第51回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2025, pp.119-124.
- Dei, S., Sugiura, Y., Amano, Y., Francisco, P. C. M., Takahashi, Y. and Tachi, Y.: Retention mechanisms of uranium in calcite veins from deep subsurface sedimentary formations of the Horonobe area, Hokkaido, Japan, 19th Conference on the Migration of Actinides and Fission Products in the Geosphere (Migration' 25), 2025.
- Fairat, K., Takeda, M., Ozaki, Y., Mochizuki, A., Ohno, H., Fukatsu, Y., Dei, S.: Applicability of the 1D-dual continuum disconnected matrix model for describing the in-situ tracer test in the mudstone at Horonobe URL, 第35回社会地質学シンポジウム, 2025.
- Hayano, A., Aoyagi, K., Murakami, H. and Kimura, S.: An Empirical approach to disposal tunnel design and sealing in Neogene sedimentary rocks, Proceedings of 2025 International High Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM 2025), 2025.
- 河田賢斗, 岩井裕正, 安原英明, 緒方奨, 末武航弥, 尾崎裕介, 青柳和平: 損傷理論を考慮した連続体解析手法を用いた幌延URLの二次元坑道掘削解析, 第60回地盤工学研究発表会, 2025.
- 河田賢斗, 緒方奨, 青柳和平, 尾崎裕介, 岩井裕正, 安原英明: 損傷理論を考慮した二次元坑道掘削解析モデルによる岩盤内亀裂発生挙動の再現に関する解析的研究, 第51回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2025, pp113-119.
- Kimura, S., Hayao, A. and Ono, M.: An Overview of a full-scale construction experiment for the tunnel sealing technology at Horonobe URL, Proceedings of 2025 International High Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM 2025), 2025.
- 木村駿, 大野宏和, 千々松正和, 伊藤歩夢: X線CT測定による幌延泥岩を用いた坑道埋戻し材の特性の把握, 令和7年度土木学会全国大会第80回年次学術講演会, 2025.
- Liebscher, A., Peti, L., Stockmann, M., Strusinska-Correia, A., Tatomir, A., Goubel, A., Ozaki, Y., Hayano, A., Ohno, H., Tachi, Y. and Aoyagi, K.: Developing advanced technologies and human resources towards implementation of geological disposal: The Horonobe International Project (HIP), European Geosciences Union General Assembly 2025 (EGU2025), 2025.

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係る成果(令和7年度)(2/2)

- 西谷友幸, 萩原健司, 藤枝大吾, 青柳和平: 深度500mに向けた立坑掘削における覆工コンクリートの仕様検討および情報化施工－幌延深地層研究計画 地下研究施設整備(第III期)等事業－, トンネルと地下, vol.57, no.2, 2026, pp.135-145.
- 西谷友幸, 本島貴之, 菅原健太郎, 青柳和平, 田村友識, 石井英一: 断層の有無の違いによる立坑掘削時の覆工および周辺地山の安定性への解析的検討, 令和7年度土木学会全国大会第80回年次学術講演会, 2025.
- 小野誠, 磯さち恵, 大野宏和, 木村駿: 堆積岩を用いた坑道埋戻しにおける吹付け工法の施工特性, 令和7年度土木学会全国大会第80回年次学術講演会, 2025.
- 尾崎裕介, 石井英一: Landau-Lifshitz-Matheronの式による亀裂内の不均質性を考慮した有効透水量係数と亀裂ネットワークモデルを用いた有効透水係数の推定, 材料, vol.75, no.3, 2026.
- 尾崎裕介, 緒方奨, 中岡健一, 清水浩之, 安原英明, 赤木俊文, 青柳和平, 福田大祐: 幌延深地層研究センターを対象とした坑道掘削時の周辺岩盤の連成現象理解を目的とした一斉解析, 第51回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 2025, pp.125-130.
- Ozaki, Y., Takeda, M., Ohno, H., Mochizuki, A., Dei, S. and Fairat, K.: In-situ tracer experiments in the fractured mudstone with high porosity at the 250 m stage of the Horonobe Underground Research Laboratory, The 1st International Workshop on Coupling Processes in Geological Disposal (COUGEO 2025), 2025.
- Sakuma, K., Ishii, E. and Murakami, H.: Predicting the long-term natural decay of inflow from faults or fractures encountered during excavation of deep underground tunnels using the flow dimension. Environ Earth Sci vol.84, 2025, 663.
- 佐久間圭佑, 石井英一, 青柳和平, 田村友識: スライド式パッカーを用いた孔内軸変位計測における室内校正実験方法の改善, 材料, vol.75, no.3, 2026.