

## 処分概念オプションの実証

# (2-2) 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

—掘削に伴う岩盤中の水理、力学、水質の変化—

令和5年8月28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  
青柳 和平・村上 裕晃

# 説明概要

## 課題

- 人工バリアに要求される品質を踏まえて、要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認。
- 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する方法論を構築。

## 目的・内容

- 500m調査坑道で想定される状況の予測や処分坑道・ピットの配置を決定する方法論構築に資するため、掘削損傷領域(EDZ)の水理・力学・化学特性の経時変化、EDZの将来予測の観点から、深度350mまでの掘削により得られた研究事例を整理。

## 成果

- 掘削直後にEDZが約0.6m程度進展するとともに、透水係数が健岩部と比較して4-5桁程度増大。掘削後5年程度経過しても、透水係数の変化はほぼ発生しない。
- 坑道掘削から5～10年程度の時間スケールにおいては、坑道の掘削が地下水のpHや酸化還元電位(Eh)に与える影響は小さく、地下水の還元状態は維持され、地下水の溶存成分もほとんど変化しない。
- 膨潤性が乏しく自己シール性が期待できない岩盤では、割れ目に作用する圧力の変化を推定することにより、透水性の将来予測が可能であることが示唆。
- 500m調査坑道で想定される状況の事前予測や、処分坑道周辺において適した岩盤に処分孔を配置するための考え方、指標整備に資する情報としてこれらの成果を活用。

# 目的

人工バリアに要求される品質を踏まえて、要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法(間隔など)を確認。

## 原位置試験・解析：

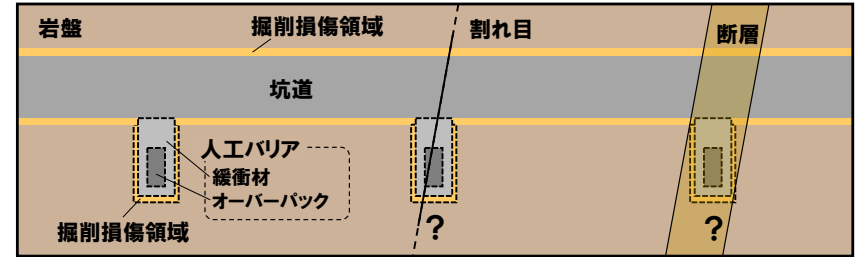
- 指標の候補をあらかじめ検討し、予測解析により指標に関連する着目すべき特性を定量的に明確化
- 地質環境調査技術の適用として、指標に基づき断層・割れ目やEDZの特性に関するデータを取得
- 地質環境調査により必要性が判断された場合、工学的対策（グラウト）を実施
- 適用した調査技術やモデルの妥当性を評価するためのデータ取得と事後解析



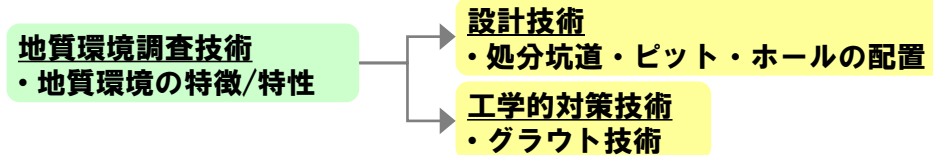
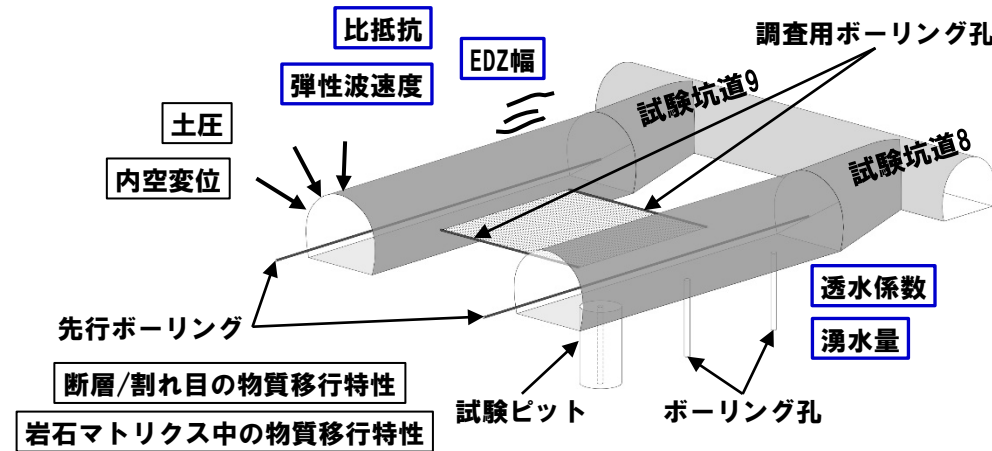
原位置試験・解析や既存の地質環境情報を活用したケーススタディとして、以下に着目して「処分坑道・ピットの配置の設計に関する調査・評価技術の枠組み」を構築。

- 処分坑道と交差する断層/割れ目のスケールを考慮した処分ピット・ホールの配置に対する概念/指標
- 地質環境調査、処分坑道、ピット/ホールの配置、工学的対策を含む関連する技術の体系化の考え方

## 500m調査坑道での調査の例



処分坑道・ピットの配置の指標検討の概念



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

# 報告内容

令和5年度の計画：

令和6年度から実施する坑道内でのボーリング調査や坑道掘削などの原位置試験に先立ち、断層/割れ目からの湧水や、EDZの発達に関する**既存情報の収集・整理**を行い、500m調査坑道で想定される状況などを検討



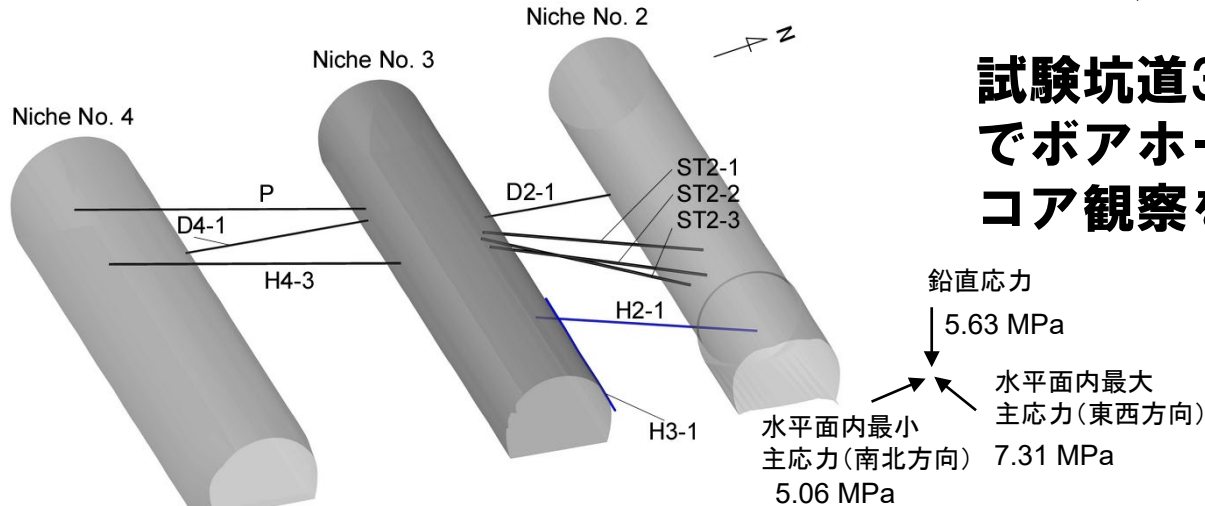
EDZの水理・力学・化学特性の経時変化、EDZの将来予測の観点から、下記の既存研究事例の整理結果を報告

- **EDZの水理・力学特性の経時変化の理解**
  - 水平坑道における調査事例
  - 立坑における調査事例
  - 坑道掘削に伴う水質の変化
- **EDZの透水性の将来予測に関する研究**
  - 割れ目の可視化による透水性の将来予測
  - 人工バリアの膨潤、坑道閉鎖に伴うEDZの透水性の将来予測

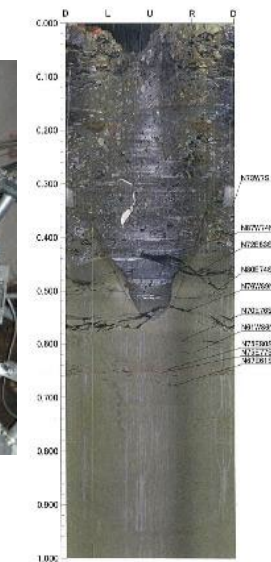
# EDZの水理・力学特性の経時変化の理解

## -水平坑道における調査事例-

### 350m試験坑道3における割れ目発達領域の調査

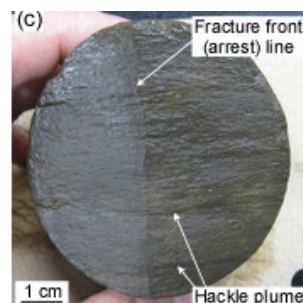


試験坑道3で掘削した8本のボーリング孔でボアホールテレビューワー（BTV）観察、コア観察を実施。



得られた孔壁画像の例

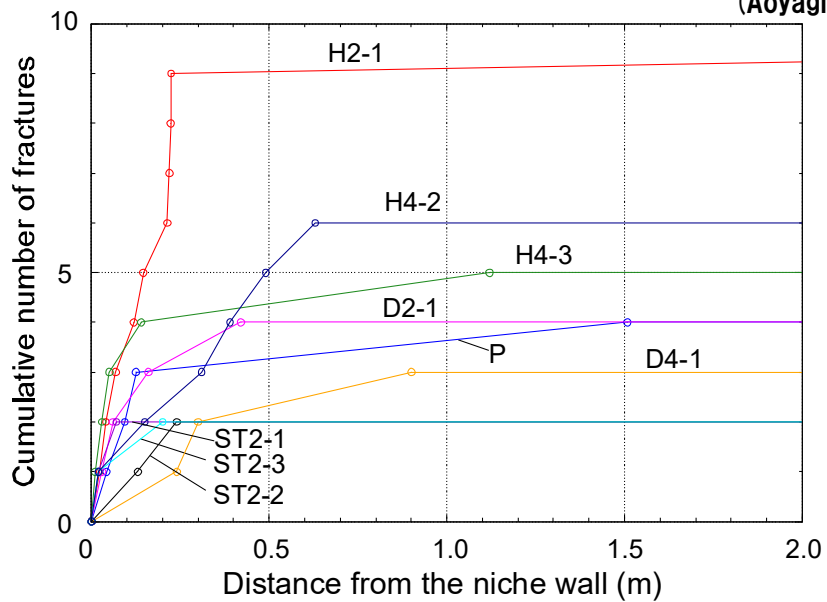
調査の状況



←EDZ割れ目の表面（羽毛状構造と鏡肌を確認）

- EDZの発達範囲は壁面から約0.6m程度
- EDZの割れ目は引張とせん断の性質を有するハイブリッド割れ目であることを確認。

### BTV観察結果-累積割れ目本数と壁面からの距離 (Aoyagi and Ishii 2019)

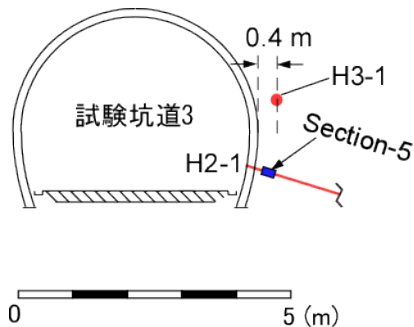


# 水平坑道における調査事例

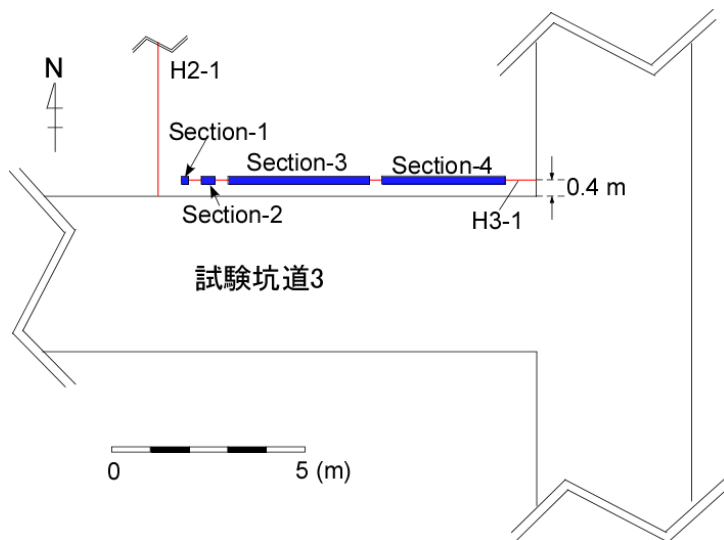
## 350m試験坑道3における透水試験

### 透水試験レイアウト

断面図

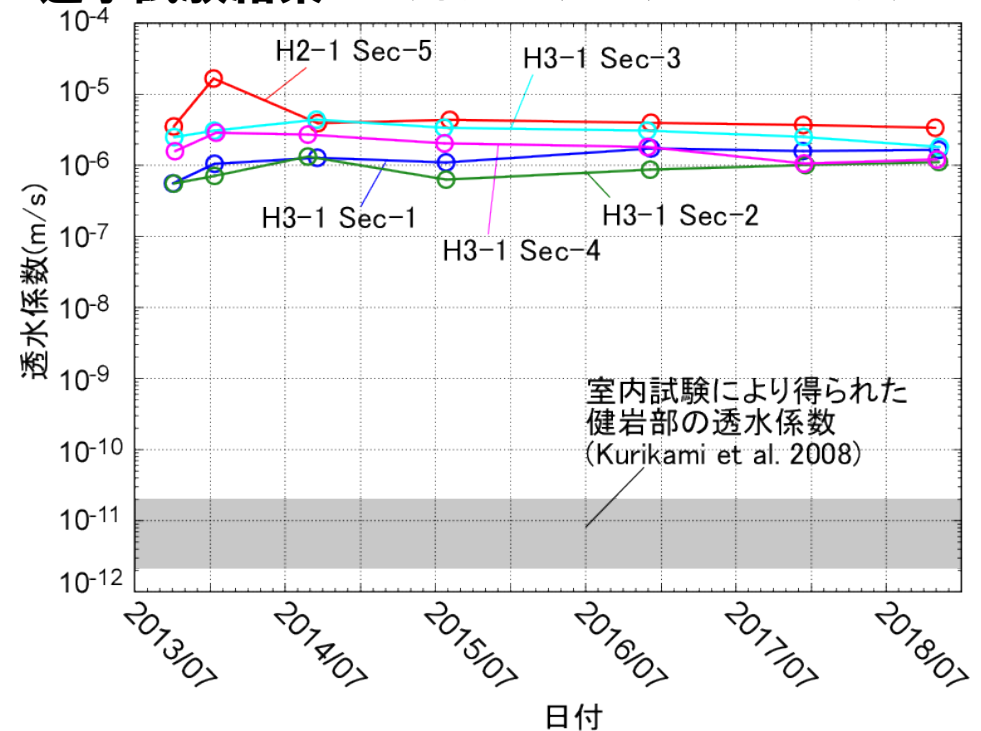


平面図



## 透水試験結果

(青柳ほか(2017)にデータを追加)

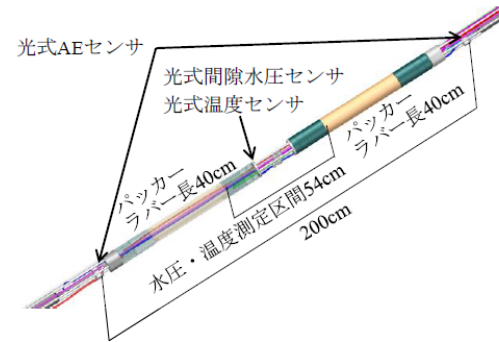


- **健岩部と比較して5~6桁程度の透水係数の増大を確認**
- **掘削後5年程度経過しても経時的な変化は確認されない。**
- **膨潤性に乏しい岩盤のため、スイスのモンテリやフランスのビュールで見られるような自己修復 (self-sealing) は期待できない。**

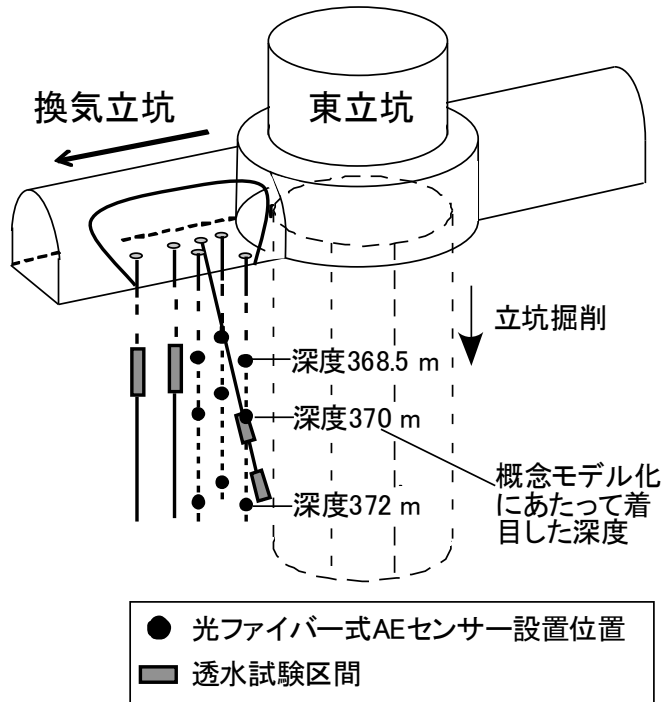


# 立坑における調査事例

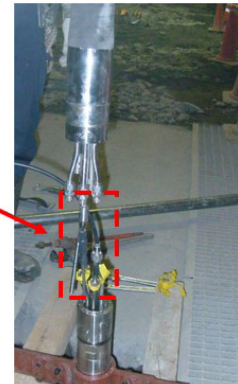
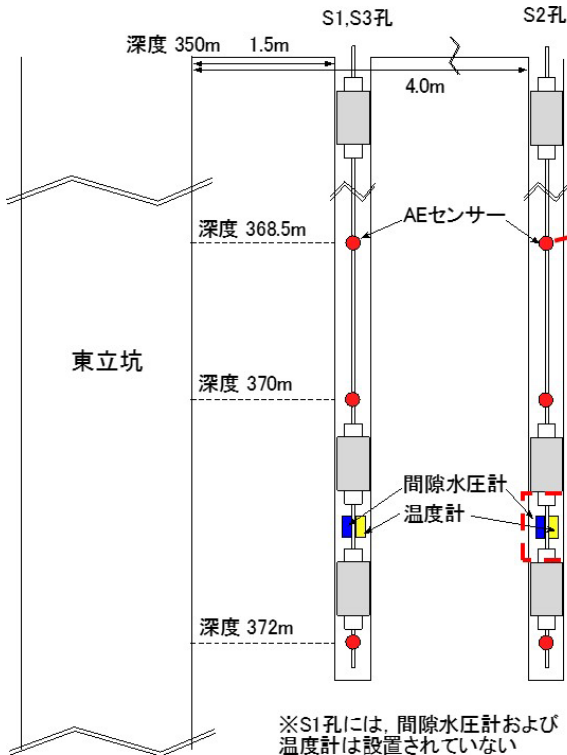
1本のボーリング孔に複数の**光式AEセンサ**および**光式間隙水圧計**、**光式温度計**を設置可能なマルチ光計測プローブを設置（株式会社大林組との共同研究）。立坑掘削中、掘削後のAE発生数や水圧変化を計測。計測領域近傍にて掘削前後の透水試験も併せて実施。



原位置試験レイアウト概念図



マルチ光計測プローブ設置断面図、写真

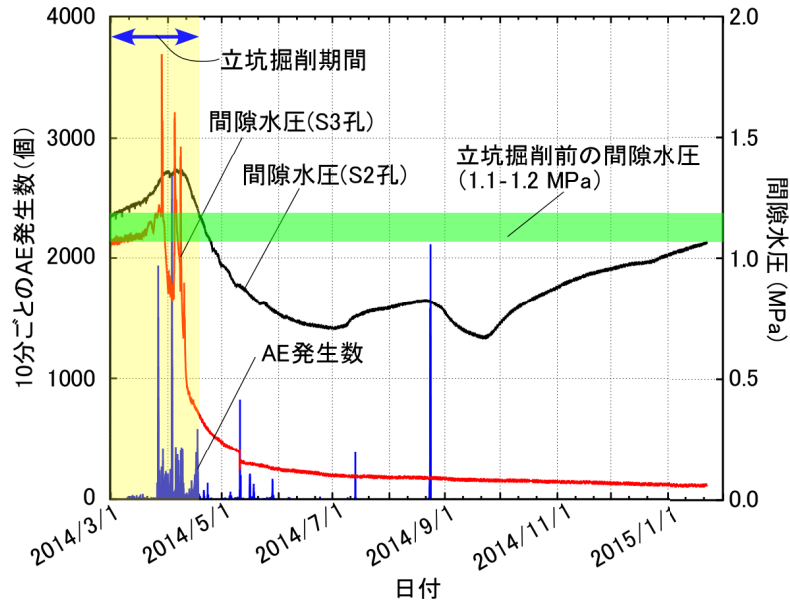


マルチ光計測プローブ設置状況

# 立坑における調査事例

## AE発生数と間隙水圧の経時変化

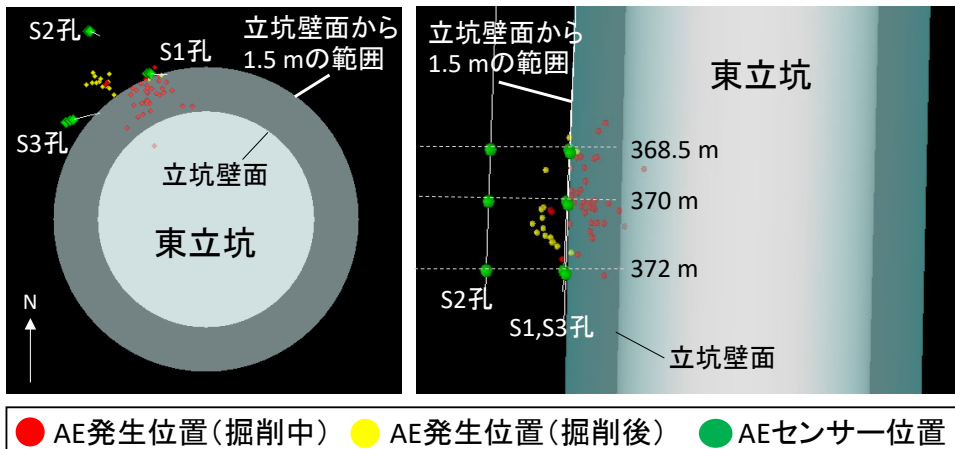
(after Hata et al. (2023))



- 立坑掘削中にAE発生数が顕著に増大
- 壁面から1.5mの位置の間隙水圧は掘削に伴って急激に低下する。4mの位置では間隙水圧は低下するものの、徐々に元の値に戻っていく。
- 掘削後もAEが発生しているが、割れ目中の二相流体流入に伴い発生する波形が主なもの。

## AE震源（発生位置）の分布

(after Hata et al. (2023))

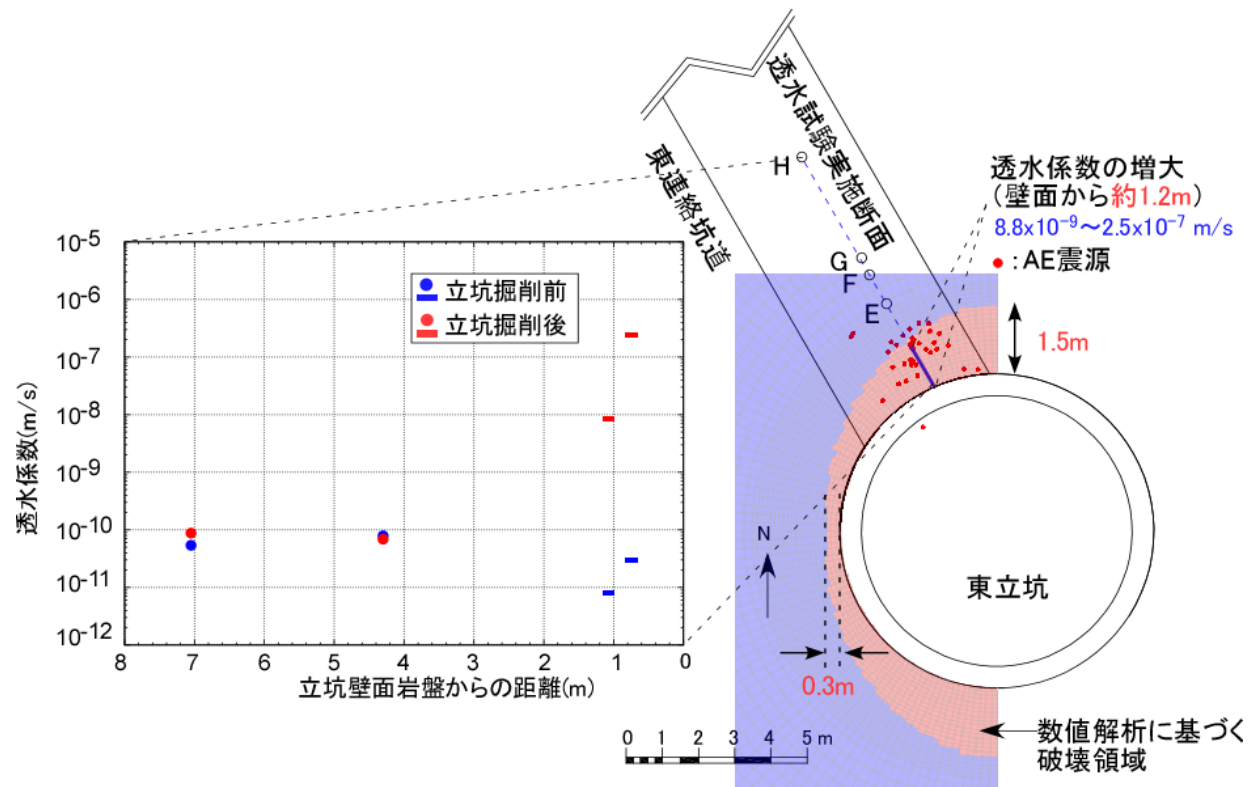


- 壁面から1.5m以内の範囲でAEの発生が顕著。
- 掘削後もその外側でAEが発生しているが、掘削後のEDZの進展との関連性については不明。



# 立坑における調査事例

## 立坑周辺のEDZの概念モデルの構築 (Hata et al., 2023)



### 原位置試験および解析のまとめ

- AE震源の分布  
→ 壁面から1.5m以内で顕著
- 透水係数  
→ 壁面から1.0m程度の範囲で、掘削前後で3~4桁程度の増大を確認
- 水理力学連成解析  
→ 壁面から1.5m程度までEDZが発達

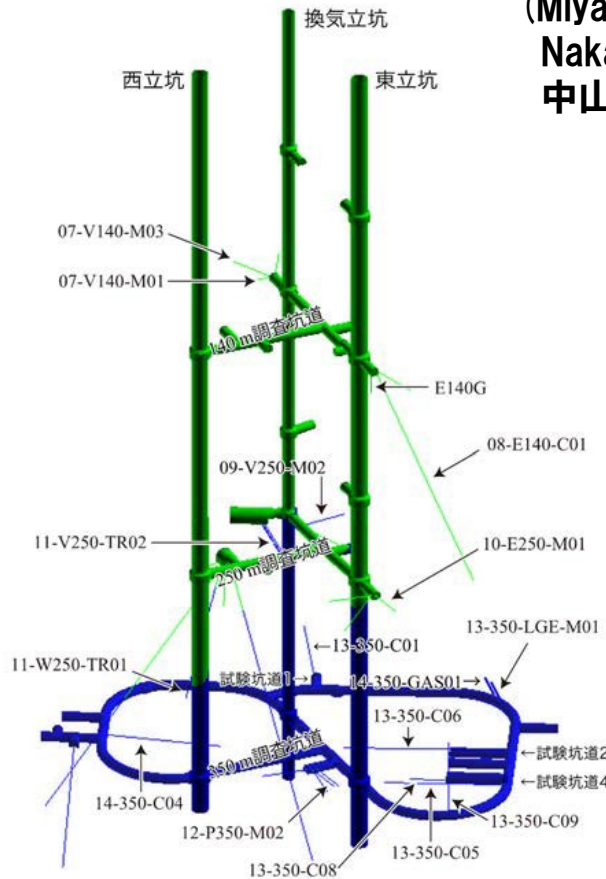


立坑におけるEDZの発達をわかりやすく概念モデルとして整理することが可能。

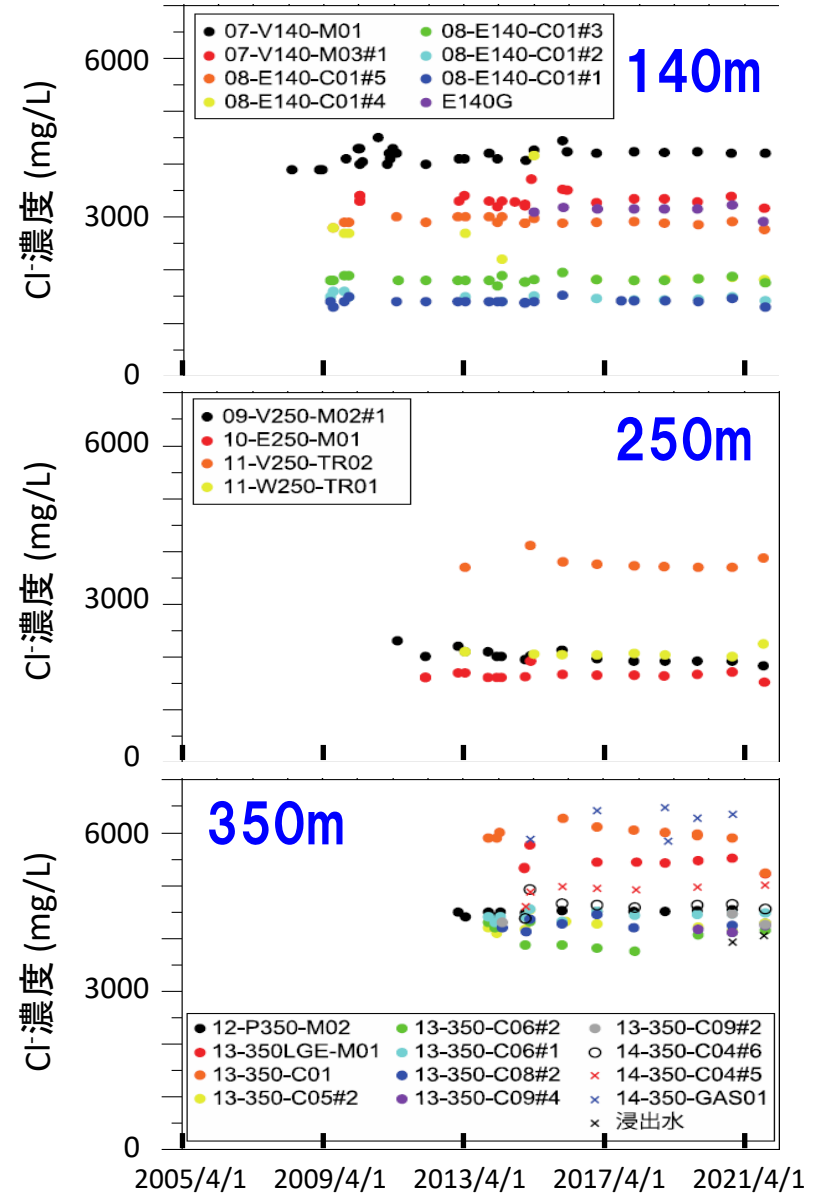
# 坑道掘削に伴う水質の変化

## 岩盤中の地下水水質の時間変化

(Miyakawa and Nakata, 2022 ; 中山編, 2022)

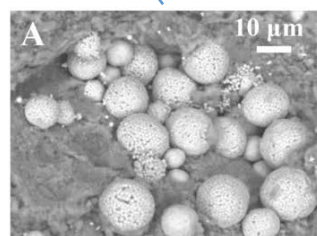
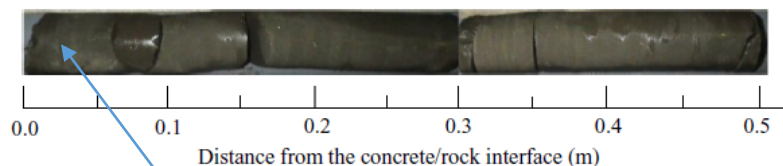


- ボーリング孔の塩化物イオン濃度 (Cl<sup>-</sup>) は大きく変化していない
- 異なる水質の地下水の混合は示唆されない



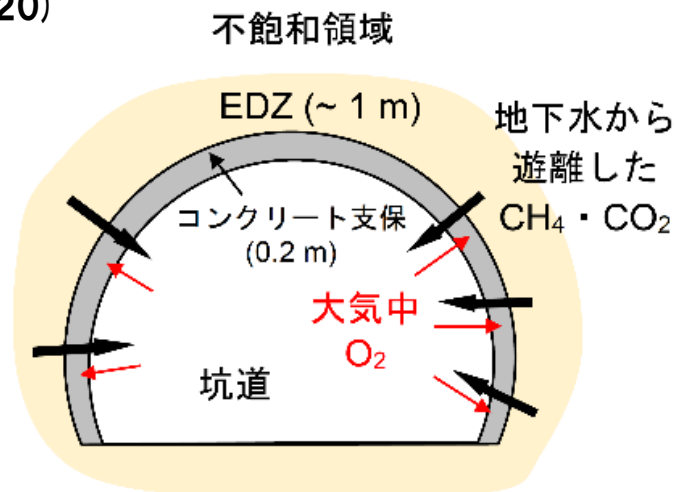
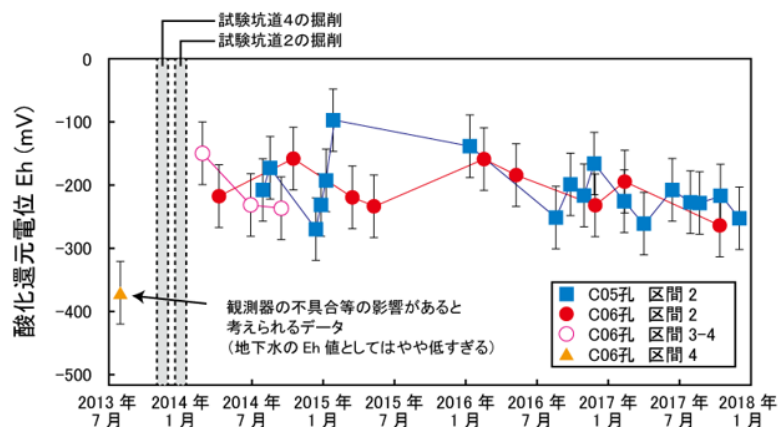
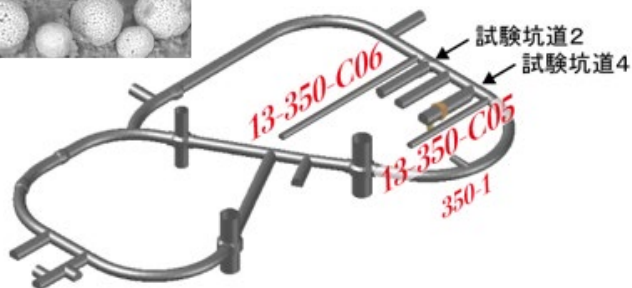
# 坑道掘削に伴う水質の変化

## 坑道近傍における地球化学環境の変化 (Mochizuki et al., 2020)



Borehole 350-1

Pyrite



- EDZ領域のpHとORP (C06孔、坑道からの離隔距離0.6m) は、EDZ領域外のpHとORP (C05孔、離隔距離3.0m) と同程度
- 坑道直近の岩盤中にパイライトが存在
- 観測区間内のガスは $\text{CH}_4$ と $\text{CO}_2$ 
  - 地下水由来のガスが岩盤内部への酸素の侵入を抑制、還元状態を維持



酸化の抑制メカニズムを説明

# EDZの透水係数の将来予測に関する研究

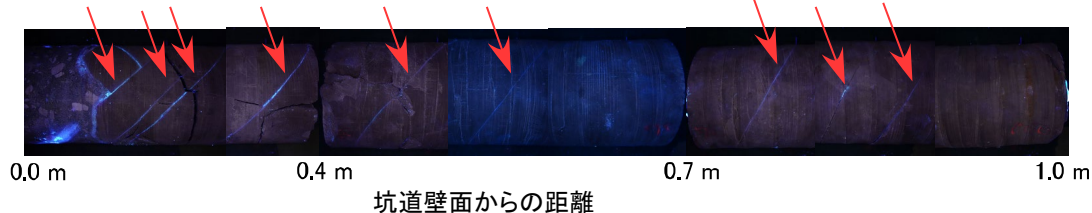
## 割れ目の可視化によるEDZの透水性の将来予測技術開発（京都大学との共同研究）



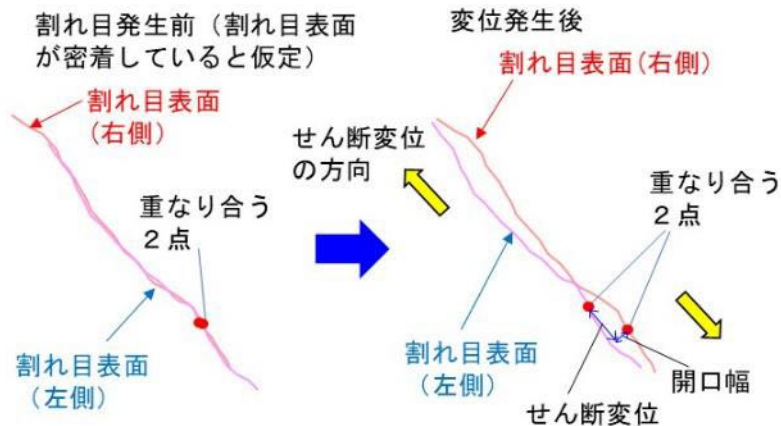
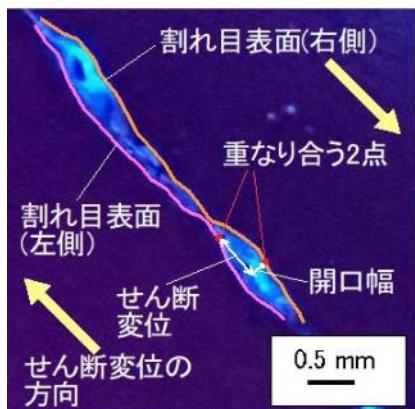
可視光での観察結果



紫外線照射下での観察結果



## 可視化した割れ目の観察による変位の計測方法

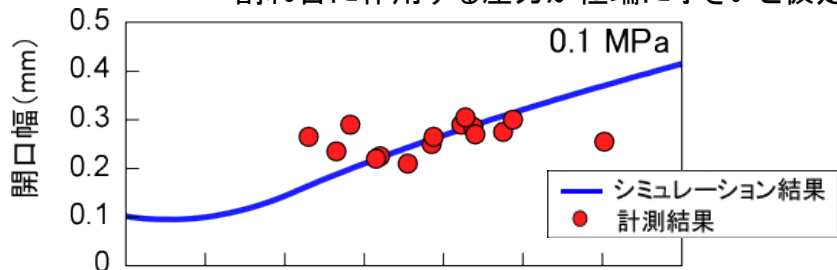


- 注入時に割れ目に擾乱をあたえないよう粘性の低い樹脂を新たに開発してEDZ割れ目に注入して固化。
- EDZ割れ目の分布と変位（せん断変位、開口幅）を観察。

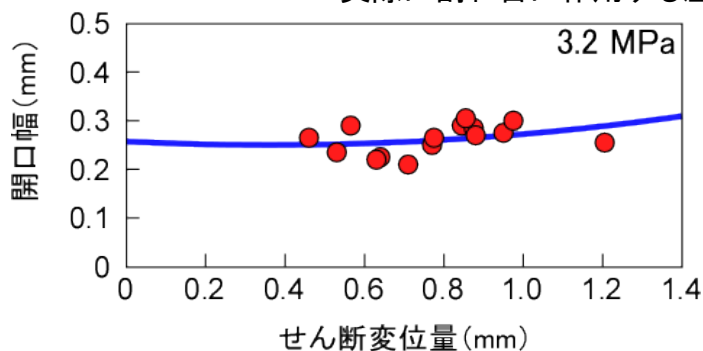
# EDZの透水係数の将来予測に関する研究

## せん断変位と開口幅の関係

割れ目に作用する圧力が極端に小さいと仮定



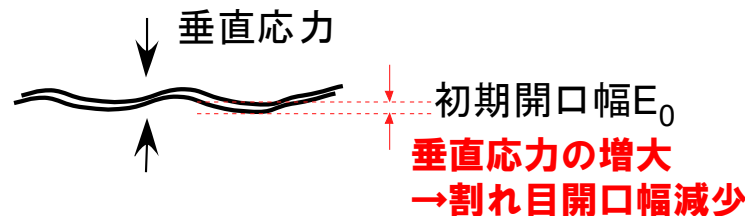
実際に割れ目に作用する圧力を想定



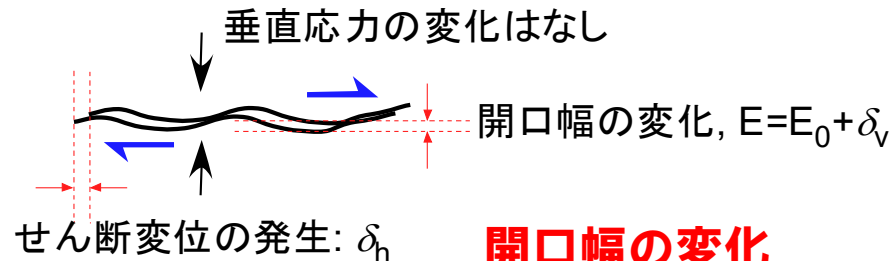
(after Aoyagi et al. (2022))

## 開口幅の変化の概念図

掘削直後の割れ目に作用する応力状態



せん断変位の発生



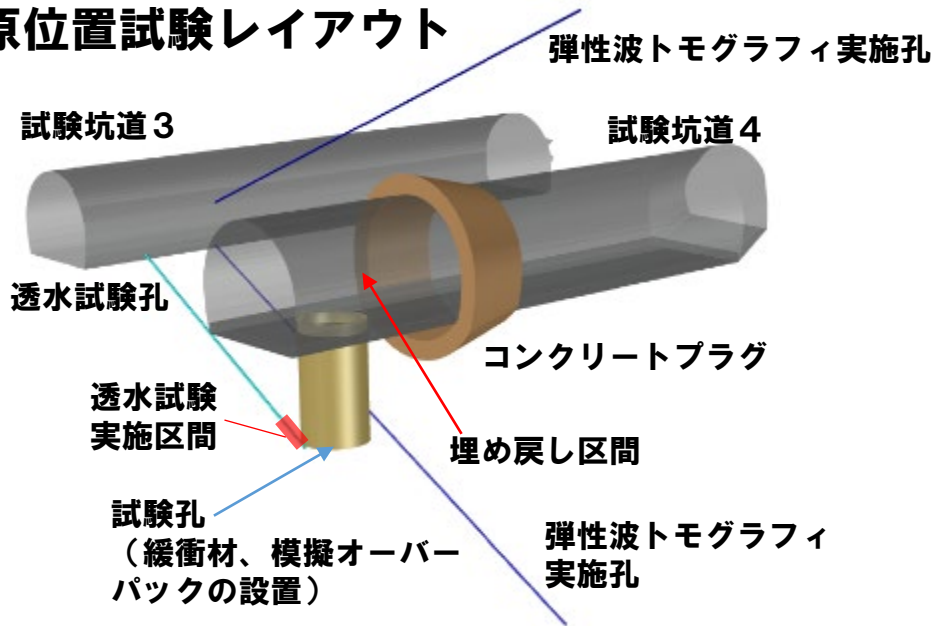
**開口幅の変化  
( $\delta_v$ ) はほぼ見られない**

- せん断変位が増大しても有意な開口幅の変化は発生しない。
- 坑道閉鎖後の地下水の再冠水に伴う緩衝材の膨潤が生じたとしても、圧力が大きく低下しない限りは、せん断変位の増大に起因する**将来的な透水係数の大きな変化はない。**



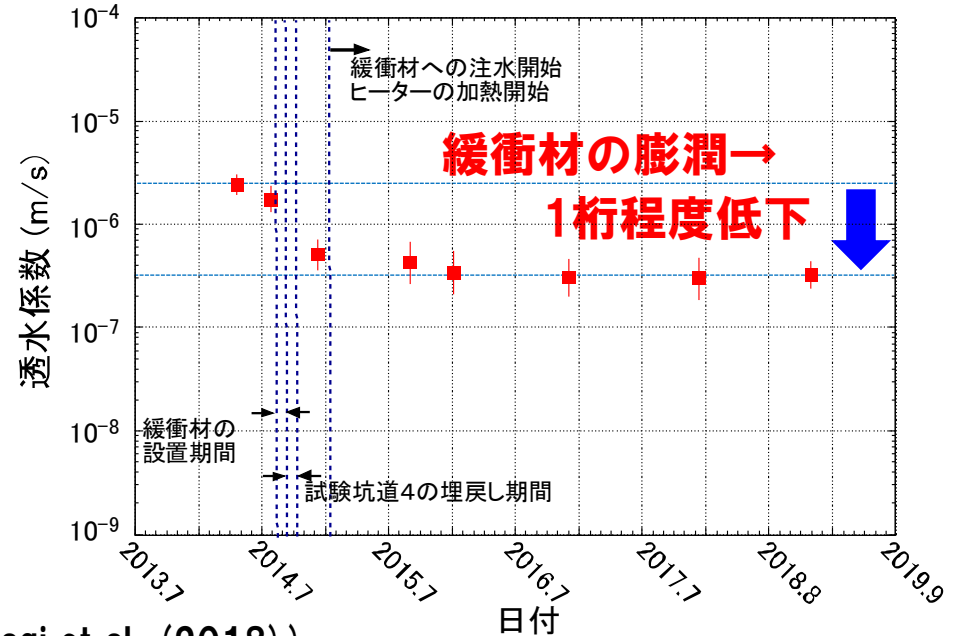
# 人工バリアの膨潤、坑道閉鎖に伴うEDZの透水性の将来予測

## 原位置試験レイアウト



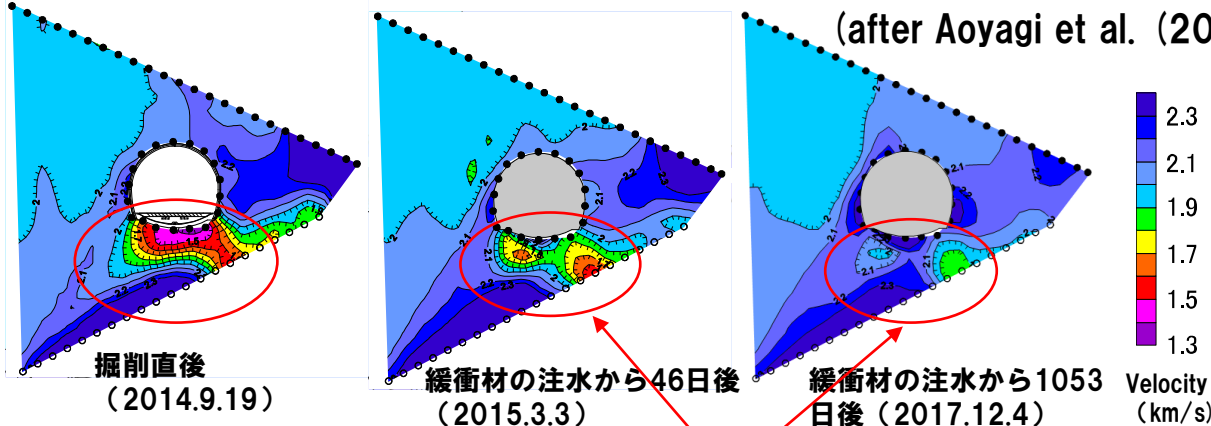
## 透水試験結果

(after Aoyagi et al. (2018))



## 試験坑道4周辺の弾性波速度分布の経時変化

(after Aoyagi et al. (2018))



緩衝材膨潤に伴う割れ目の閉塞や、閉鎖後の注水に伴う飽和度増大の影響を反映した底盤部の速度増大を確認。

坑道の一部閉鎖と地下水の冠水に伴う人工バリアの膨潤の影響により、割れ目の閉塞と若干の透水性の変化を確認。



割れ目面に作用する応力（特に垂直応力）がEDZの水理特性に影響を及ぼす。

# まとめ

## • EDZの水理・力学特性の経時変化の理解

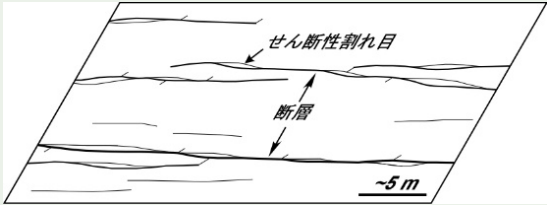
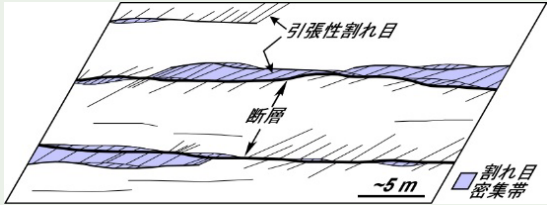
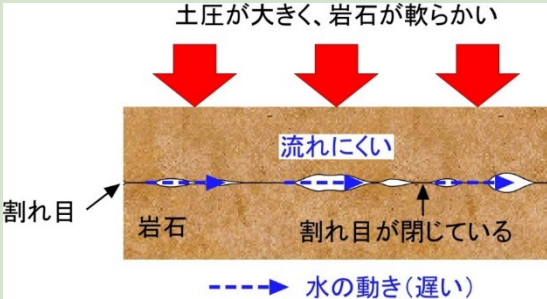
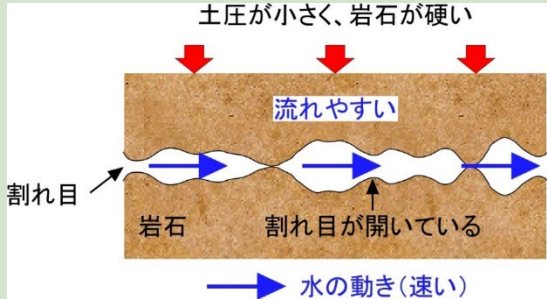
- 掘削直後にEDZが約0.6m程度進展するとともに、透水係数が健岩部と比較して4-5桁程度増大。掘削後5年程度経過しても、透水係数の変化はほぼ発生しない。
- 坑道掘削から5~10年程度の時間スケールにおいては、坑道の掘削が地下水のpHや酸化還元電位（Eh）に与える影響は小さく、地下水の還元状態は維持され、地下水の溶存成分もほとんど変化しない。

## • EDZの透水性の将来予測に関する研究

- 緩衝材の膨潤に伴い割れ目に作用する垂直応力が増大することにより、割れ目が閉塞し、EDZの透水性が減少することを確認。一方、せん断変位の発生はEDZの透水性の将来的な変化に有意な影響を及ぼさない。
- 膨潤性が乏しく自己シール性が期待できない岩盤では、割れ目に作用する圧力の変化を推定することにより、透水性の将来予測が可能であることが示唆。

# 事例調査結果の活用

## 350mと500mの地質環境の特徴

ポイント	深度500m	深度350m
<p>土圧・ 地下水圧</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・土圧が大きく、岩石が軟らかい</li> <li>・地下水圧が高い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・土圧が小さく、岩石が硬い</li> <li>・地下水圧が低い</li> </ul>
<p>地質の 状態 (分布する 割れ目の 特徴)</p>	 <p>断層沿いに割れ目の発達が乏しく、断層内を水が流れにくい</p>	 <p>断層沿いに多数の割れ目が発達し、断層内を水が流れやすい</p>
<p>割れ目の 開口状況</p>	 <p>割れ目が閉じており、水や物質が流れにくい</p>	 <p>割れ目が開いており、水や物質が流れやすい</p>

# 500m調査坑道での調査や体系化への反映

## 湧水量の予測→割れ目の発達状況に着目

既存の地質情報を整理した水理地質環境モデルの構築による水理解析や、割れ目中の地下水流れの次元の評価による予測解析。

→地質環境特性の更新、緩衝材性能への影響検討、緩衝材定置判断、物質移行特性の把握

## EDZの範囲の予測→高地圧・低強度・高間隙水圧環境に着目

初期地圧状態、岩盤物性や間隙水圧場を再評価し、水理・力学解析を実施。割れ目の情報の整理、更新による既存亀裂の影響とEDZ発達範囲の関係性の予測解析。

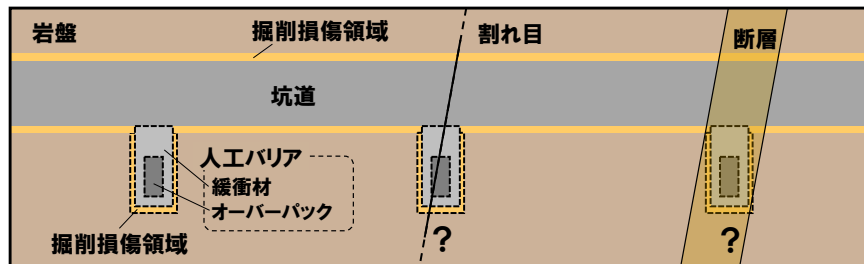
→坑道の支保設計、坑道やピットの間隔、止水プラグ設計、500m調査坑道のEDZ調査計画検討、物質移行特性の把握

## EDZの透水性の予測→高地圧・高間隙水圧環境、割れ目の開口状況に着目

割れ目に作用する応力と割れ目開口幅に関する既存経験式やDIによる予測解析。

→湧水量評価、物質移行特性の把握

500m調査坑道で実施する原位置試験結果も踏まえ、処分坑道周辺において適した岩盤に処分孔を配置するための考え方や指標の整備に資する情報として活用。



廃棄体定置決定や間隔設定の考え方の整理

---

# 参考資料



# 参考：幌延国際共同プロジェクト(HIP)との関連

## 【幌延国際共同プロジェクトTask Bの目的】

処分場の操業に貢献しうる技術オプションの開発、および好ましい適性を有する岩盤領域に処分孔を配置するための基準の確立を通じて、処分坑道や処分孔を配置するための技術の体系的な統合を実証する。



前スライドに記載した予測解析や500m調査坑道における原位置試験、それらの結果を踏まえた処分孔を配置するための考え方や指標の整備について、HIPタスクB参加機関（英国地質調査所、オーストラリア連邦科学産業研究機構、韓国原子力研究所、原子力環境整備促進・資金管理センター、原子力発電環境整備機構、ドイツ連邦放射性廃棄物機関、ブルガリア国営放射性廃棄物会社）と連携して研究開発を進めていく。

# 本日の発表内容に係る文献リスト

- 青柳和平, 石井英一, 石田毅(2017):“幌延深地層研究センターの350m調査坑道における掘削損傷領域の破壊様式の検討”, Journal of MMIJ, Vol.133, No.2, pp.25-33.
- Aoyagi, K., Miyara, N., Ishii, E., Nakayama, M. and Kimura, S. (2018) : Evolution of the excavation damaged zone around a modelled disposal pit; Case study at the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, Proceedings of 13th SEGJ International Symposium.
- Aoyagi, K. and Ishii, E. (2019) : A Method for Estimating the Highest Potential Hydraulic Conductivity in the Excavation Damaged Zone in Mudstone, Rock Mechanics and Rock Engineering, 52(2), pp.385-401.
- Mochizuki, A., Ishii, E., Miyakawa, K. and Sasamoto, H. (2020):Mudstone redox conditions at the Horonobe Underground Research Laboratory, Hokkaido, Japan: Effects of drift excavation, Engineering Geology, 267, 105496.
- Aoyagi, K., Ishii, E., Chen, Y. and Ishida, T. (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, 55, 2022, pp.1855-1869.
- Miyakawa, K. and Nakata, K. (2022):Data of Groundwater Chemistry Obtained in the Horonobe Underground Research Laboratory Project (FY2022), JAEA-Data/Code 2022-013, 19p.
- 中山雅(編)(2022):幌延深地層研究計画 令和3年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2022-025, 164p.
- Hata, K., Niunoya, S., Aoyagi, K., Miyara, N.: Evaluation of excavation damaged zones (EDZs) in Horonobe Underground Research Laboratory (URL), Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering (in press).