

幌延深地層研究計画に関する 令和6年度の成果及び令和7年度の計画

(2) 必須の課題のうち令和6年度に取りまとめる課題

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

令和7年3月11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

解析条件などの詳細説明箇所には、
補足資料 と付記しています。

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

【令和6年度の計画】

● 搬送定置・回収技術の整備

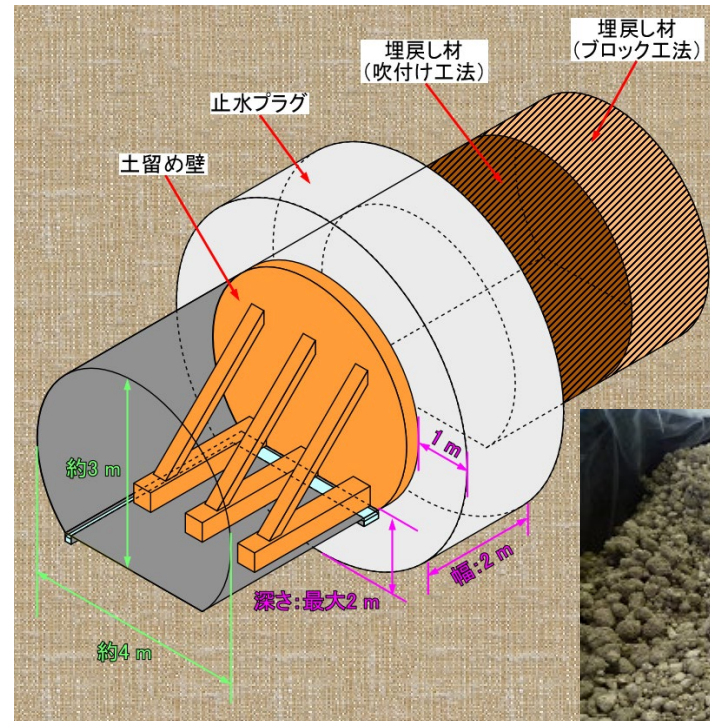
- 支保部材の経年変化などの整理、取りまとめ

● 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について取りまとめ

● 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、取りまとめ



止水プラグを用いた坑道閉鎖の施工試験イメージ



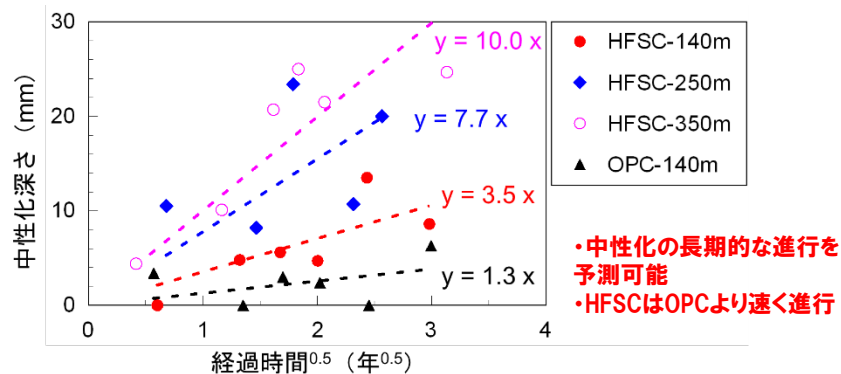
掘削土(ズリ)を用いた埋め戻し材

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

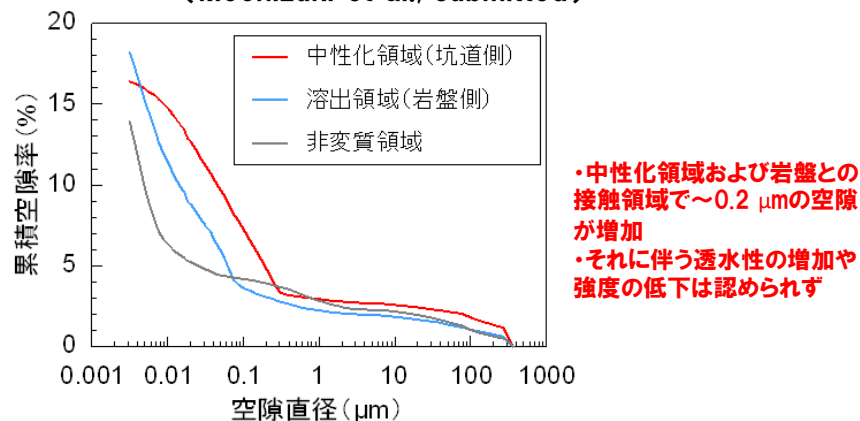
搬送定置・回収技術の整備

【成果取りまとめ】

- 回収可能性を考慮して坑道開放期間が長期化することにもなう影響の調査評価手法の整備
 - ・吹付けコンクリートの化学・微細構造・力学特性等の変化に関する知見と調査手法
 - ・坑道周辺岩盤の、坑道掘削～埋め戻し後の再飽和過程に関する解析の例示



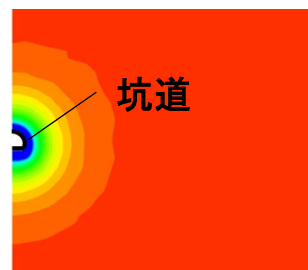
低アルカリ性セメント(HFSC)および普通ポルトランドセメント(OPC)吹付けコンクリートの中性化深さ (Mochizuki et al., submitted)



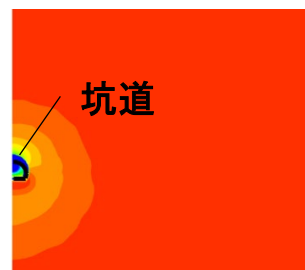
HFSC吹付けコンクリートの空隙径分布 (Mochizuki et al., submitted)

坑道開放50年

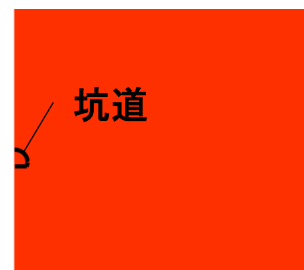
埋め戻し直前



埋め戻し後100年

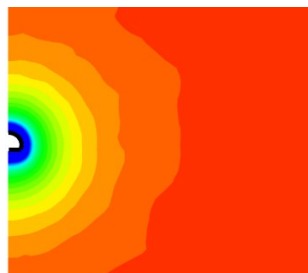


埋め戻し後950年

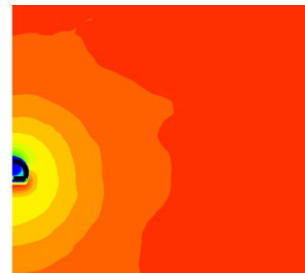


坑道開放200年

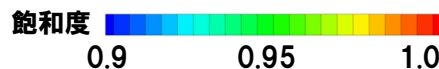
埋め戻し直前



埋め戻し後100年



埋め戻し後800年



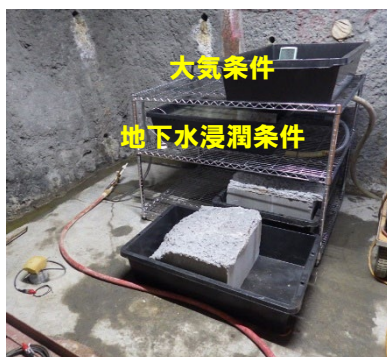
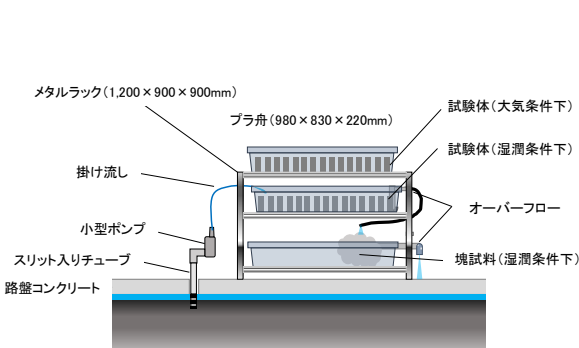
・クリープを考慮した力学計算結果に基づいた坑道周辺の長期的な透水性の変化を考慮

気液2相流解析による坑道閉鎖後の飽和度変化の予察解析結果

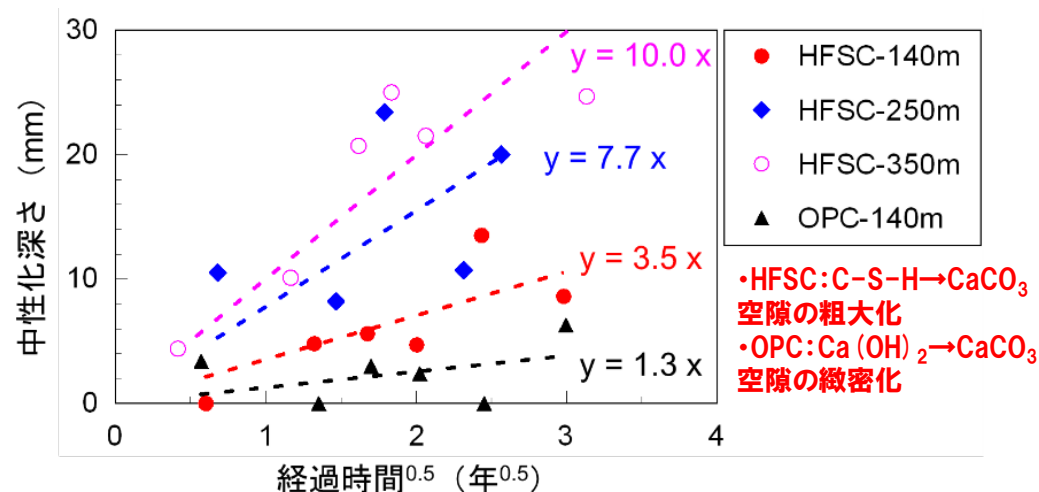
2.1.1 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証 搬送定置・回収技術の整備

【吹付けコンクリートの特性変化】

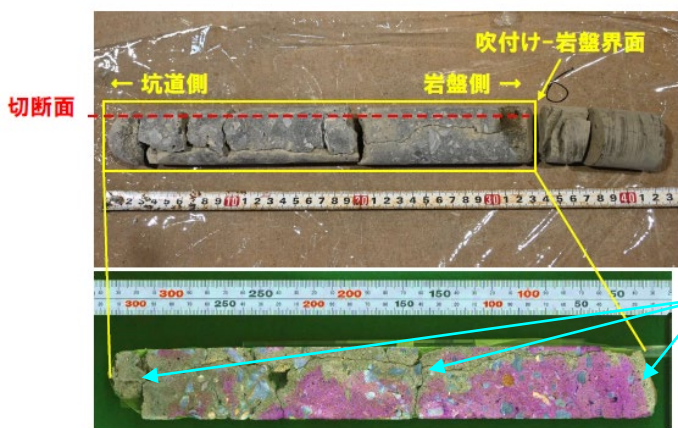
- 坑道に定置した低アルカリ性セメント(HFSC)試験体および実際の吹付けコンクリートを対象とした試験・分析による、吹付けコンクリートの化学・微細構造・力学特性等の変化に関する知見と調査手法の整備



HFSC試験体の定置概念図(左)および写真(右)



HFSCおよび普通ポルトランドセメント(OPC)
吹付けコンクリートの中性化深さ
(中山, 2020: Mochizuki et al., submitted)



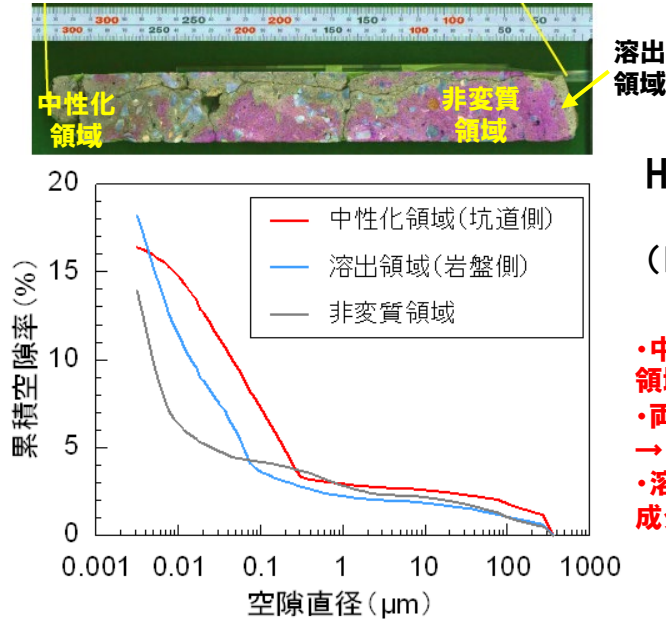
- 坑道表面(中性化)
- 内部の亀裂周辺
- 岩盤との接触部

フェノールフタレインの変色を指標としたpH低下領域の把握

- HFSCはOPCと比べて中性化の進行速度が速く、セメント水和物の組成の違いに起因すると考えられる
- HFSCにおいても、中性化深さと経過時間の関係式により長期的な影響範囲を推定可能

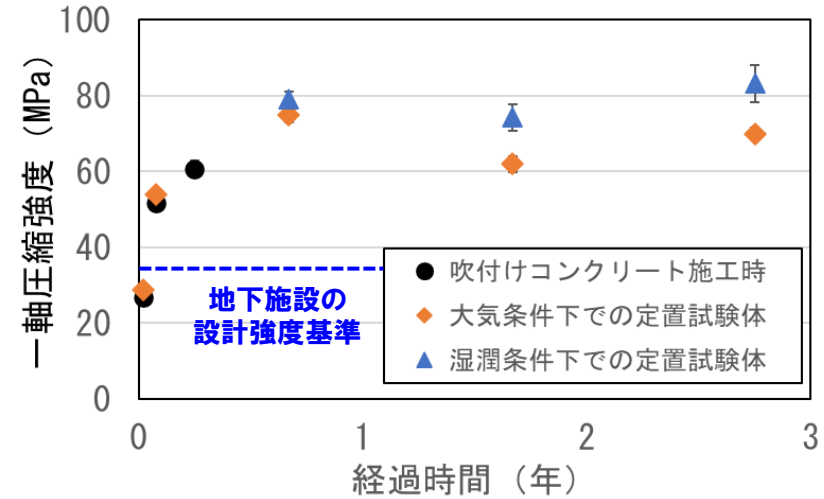
2.1.1 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証 搬送定置・回収技術の整備

【吹付けコンクリートの特性変化】



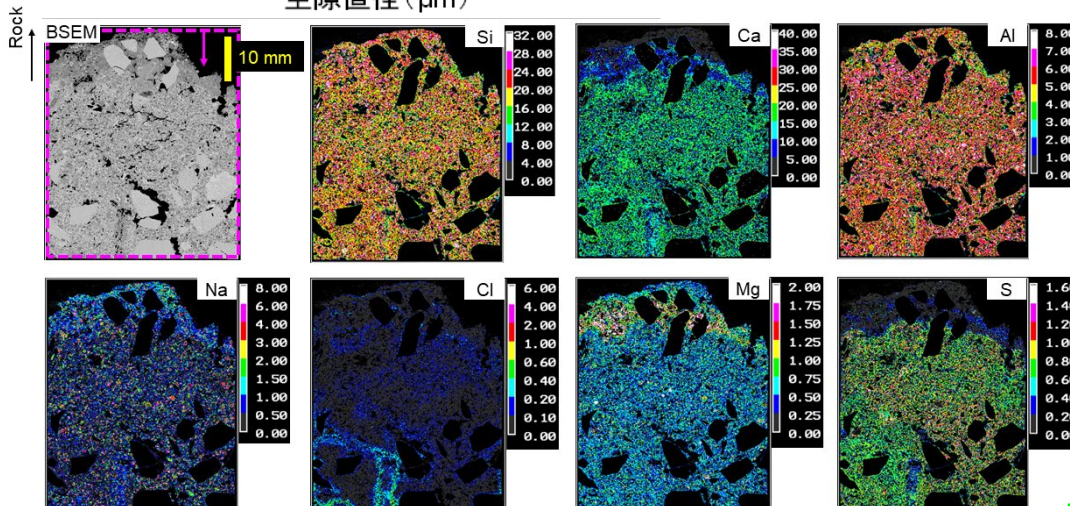
HFSC吹付けコンクリートの
空隙径分布
(Mochizuki et al., submitted)

- ・中和化領域および溶出(岩盤接触)領域で $\sim 0.2 \mu\text{m}$ の空隙が増加
- ・両領域でCa・S濃度の低下
→ C-S-H, エトリンガイトの溶解・分解
- ・溶出領域ではそれに加えて、地下水成分(Na, Mg)の濃集



コンクリート試験体の一軸圧縮強度の経時変化

- HFSCは中性化および地下水との接触により一部セメント水和物が分解／溶解、空隙が粗大化(中性化の進行にも関係か)
- このことに起因する強度の低下などは生じていないことが示唆



溶出領域(岩盤界面付近)のHFSC吹付けコンクリートの元素分布

補足1

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

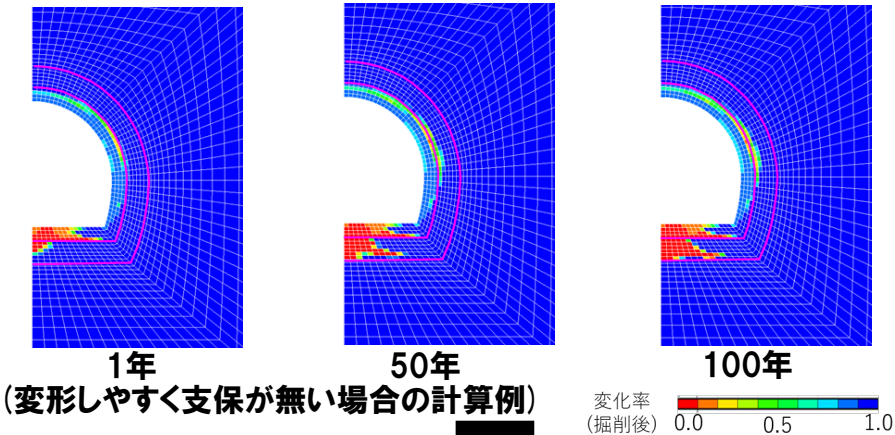
搬送定置・回収技術の整備

【坑道周辺環境の解析の例示】

補足2

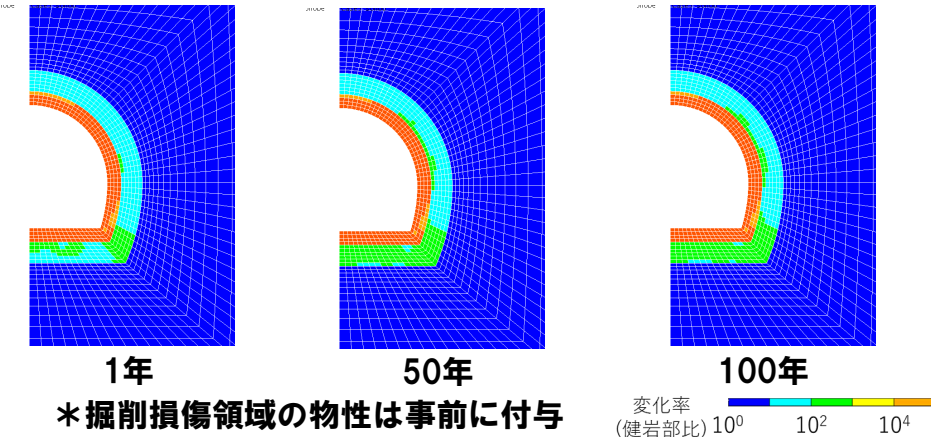
- 大久保モデル（コンプライアンス可変型モデル）による坑道解放時の長期力学解析

坑道解放状態におけるヤング率の変化



- 応力解析結果から坑道周辺の透水性の変化を計算（実施例では室内試験によるデータを使用）

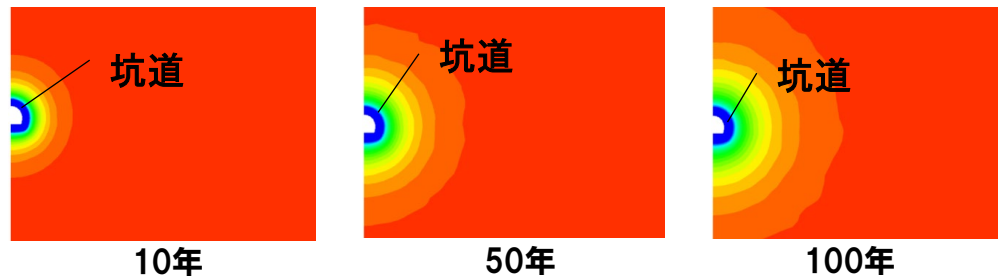
坑道解放状態における透水性の変化



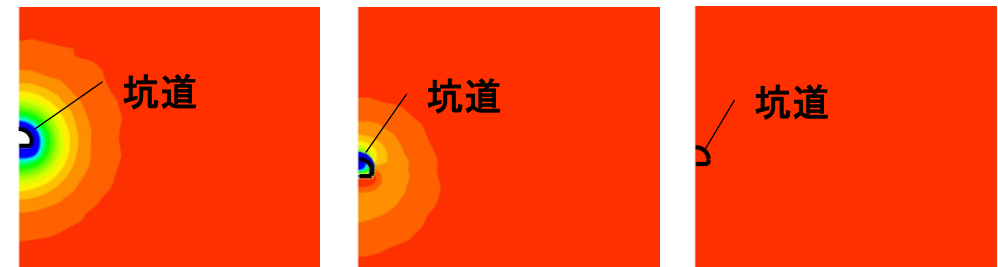
*掘削損傷領域の物性は事前に付与

- 弱連成解析による脱ガスを考慮した2相流解析

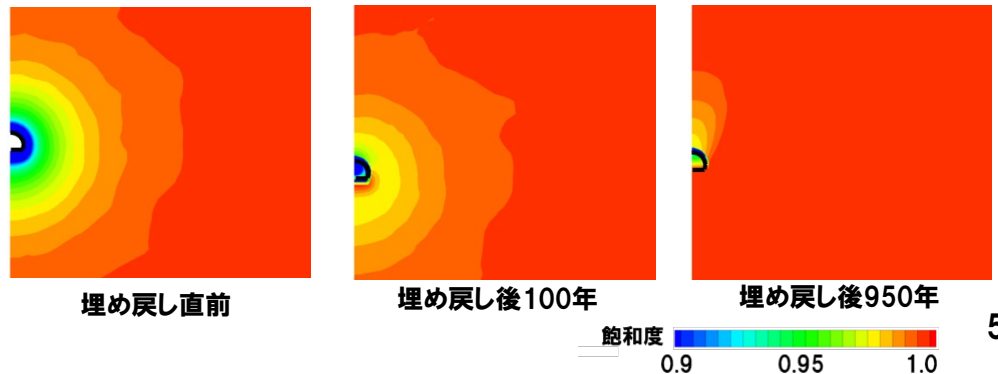
坑道解放後の飽和度変化（坑道周辺の透水性変化を入力）



坑道解放後に埋め戻した際の飽和度変化（坑道開放50年の場合）



坑道解放後に埋め戻した際の飽和度変化（坑道開放200年の場合）



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

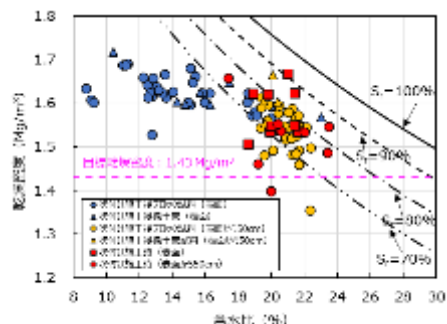
【成果取りまとめ】

- 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

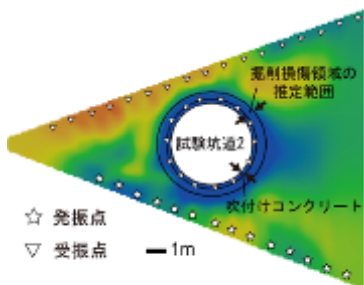


原位置吹付け試験の状況

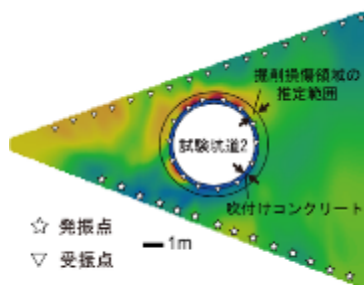


吹付け後の乾燥密度と含水比の関係

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

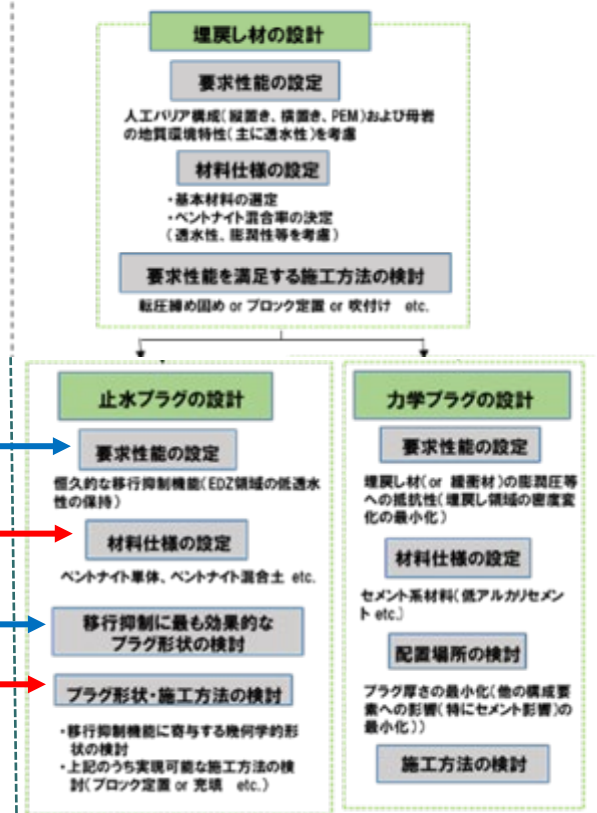


(b) 吹付けコンクリートの影響を考慮

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

EDZの存在が想定される領域に弾性波速度が遅い領域を検出

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

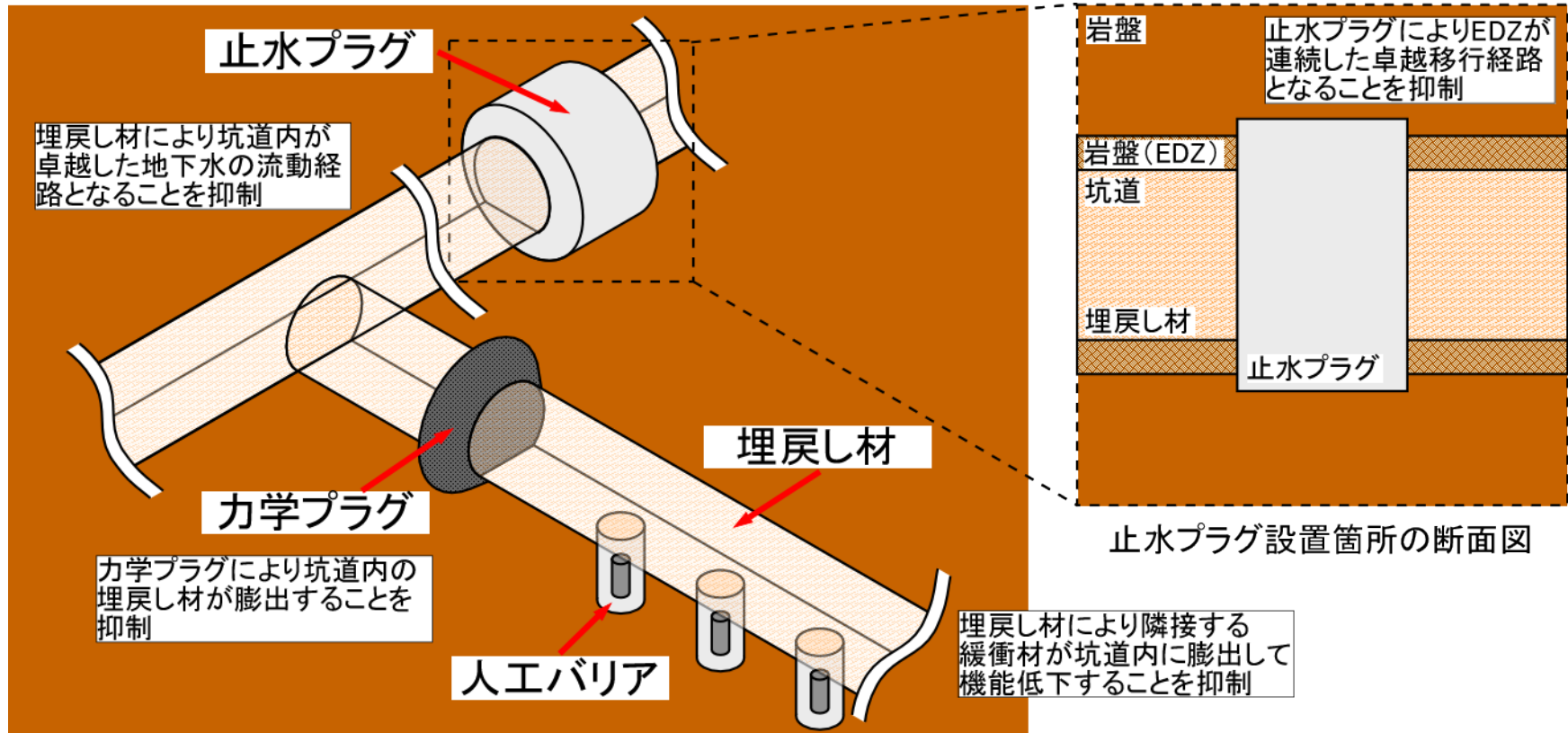
(資源エネルギー庁受託事業「地層処分施設閉鎖技術確証試験」(平成30年度～令和4年度), 原子力機構・原環センター, 2023)

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

閉鎖技術の実証

【背景・目的】

将来の処分場閉鎖後に、坑道や掘削損傷領域が地上まで直結する移行経路となることを防ぐために、地下施設および周辺岩盤の長期的な変遷を考慮しつつ、埋め戻し材やプラグなどに期待される性能の具体化や設計評価技術の改良・高度化を図る。また、埋め戻し材やプラグなどの施工方法の原位置環境への適用性・実現性について確認する。



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

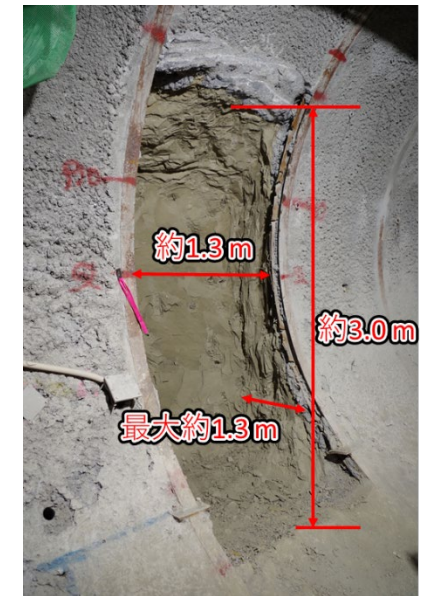
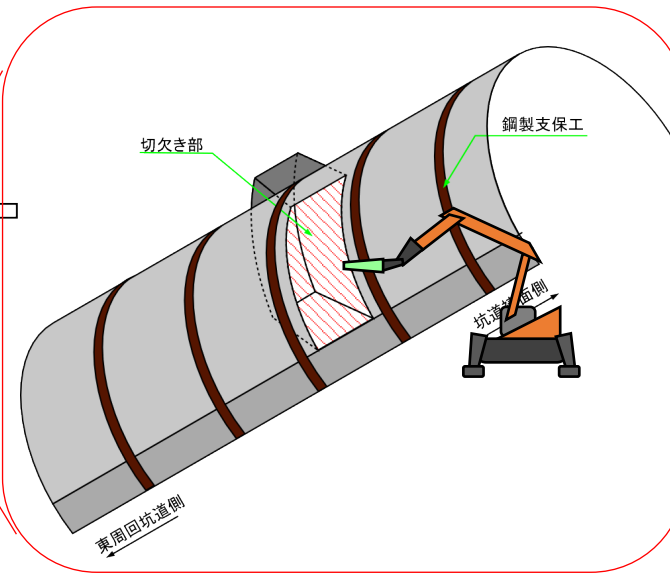
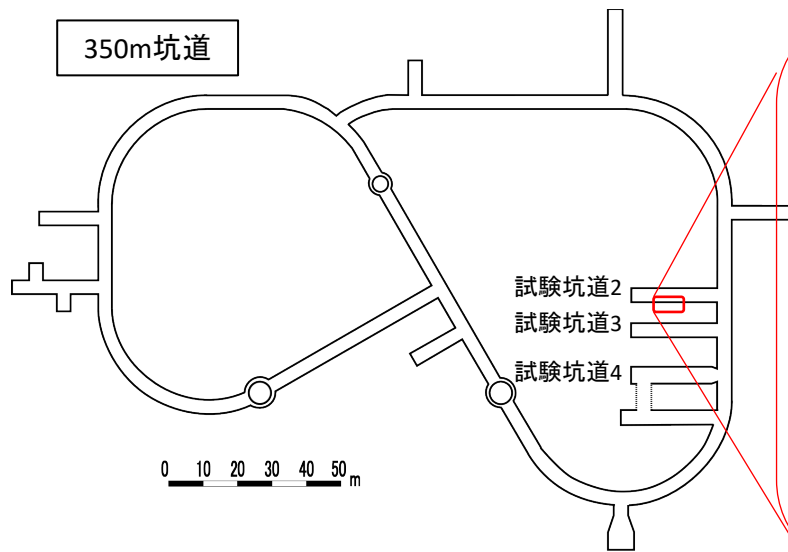
掘削損傷領域の連続性を遮断するための施工技術の実証

【背景・目的】

- 止水プラグの切欠き部のように狭隘な空間に対して施工時に乾燥密度が低下する恐れのある場所に対して適用できる施工方法が必要
- 止水プラグに要求される低透水性を確保できる材料仕様を実現可能な施工方法としてベントナイト系材料の吹付け工法に着目して、適用性・実現性を原位置環境で確認

【実施内容】

- 350m試験坑道2において、坑道の側壁部に止水プラグの切欠き部を模擬した拡幅部を対象に吹付け施工試験を実施
- 吹付け時の作業手順や吹付け後の施工品質(乾燥密度や含水比)を確認



原位置施工試験のイメージ

350m試験坑道2の切欠き部

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

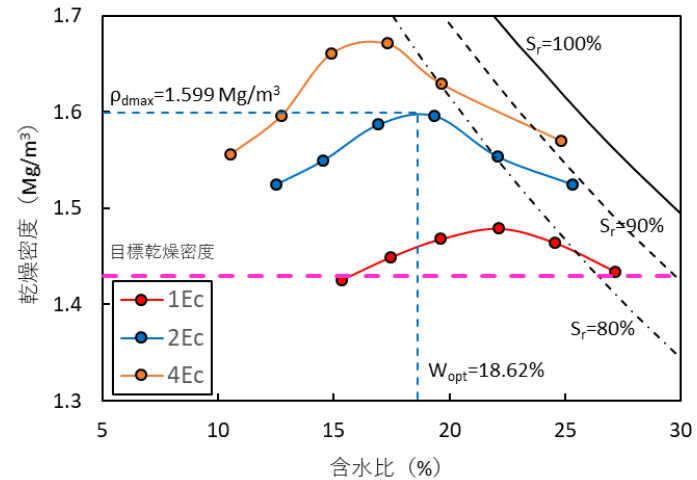
【吹付け材料の仕様】

- 吹付け材料には、クニゲルV1とケイ砂を混ぜ合わせてベントナイト混合率が70%となるようにした混合土を作製
- 止水プラグに必要な性能を担保するために必要な透水係数として 10^{-11} m/sのオーダーの値を確保できる有効粘土密度として 1.2 Mg/m^3 を設定して、吹付け後の乾燥密度を 1.43 Mg/m^3 に設定
- 含水比の設定値は、締固め試験(JIS A 1210)の結果より締固めエネルギーが $2E_c$ の場合の最適含水比である18.62%に設定

混合率(%)			自然含水比(%)		目標乾燥密度 (Mg/m^3)	目標含水比 (%)
クニゲルV1	3号ケイ砂	5号ケイ砂	クニゲルV1	ケイ砂		
70	15	15	6.17~10.19	1	1.43	18.62



作製した吹付け材料



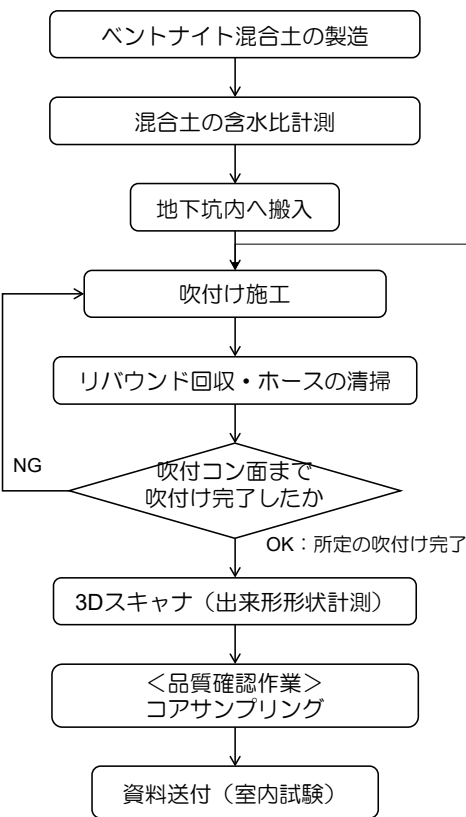
締固め試験の結果

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

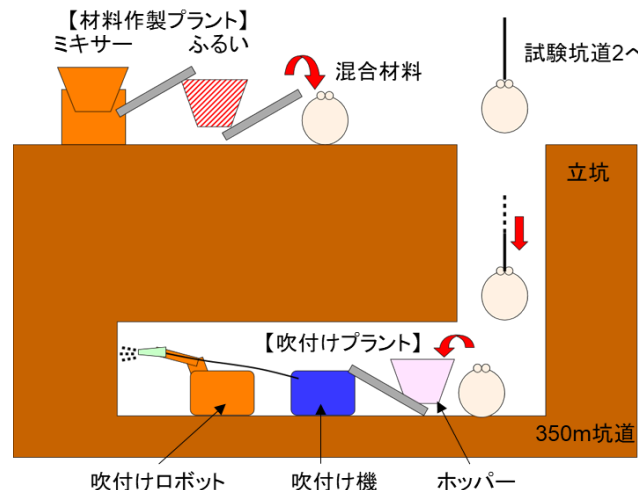
閉鎖技術の実証

【原位置吹付け施工試験の概要】

- 材料は幌延の地上施設内で製作して、地下施設へと搬入
- 吹付けは6日間にわたって実施し、午前中に材料製作、午後に吹付けを実施



吹付け試験の実施手順



吹付け試験の実施状況

吹付け試験の条件

目標乾燥密度 [Mg/m ³]	1.43
吹付け材料重量 [kg/バッチ]	約415
目標含水比 [%]	18.62
エアー量 [m ³ /min]	12.0
材料投入量 [kg/min]	約30

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

【吹付けの実績】

- 2日目より圧縮空気中の水分を除去するためのエアドライヤーを圧縮空気配管と吹付け機の間
に設置した。これにより、1日目は乾燥密度が 1.41 Mg/m^3 であったが、2日目以降は高い乾燥
密度での吹付けが実現でき、平均乾燥密度は 1.57 Mg/m^3 となった。



1日目



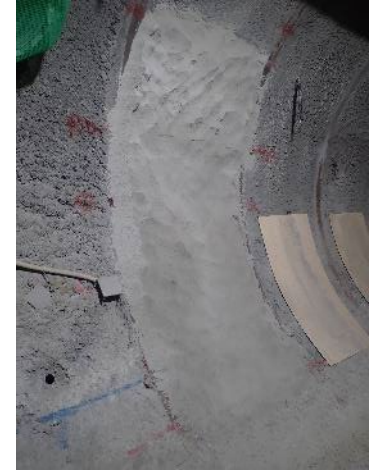
3日目



4日目



5日目



6日目

	出来形重量 [kg]	吹付け体積 [m ³]	乾燥密度 [Mg/m ³]	リバウンド率 [%]	吹付け時間 [min]	材料投入量 [kg/min]	吹付け能力 [m ³ /hr]
1日目	1057	0.622	1.41	8.3			
2日目	1802	0.879	1.70	19.8	79	28.44	0.67
3日目	2560	1.409	1.51	27.7	103	34.38	0.82
4日目	1934	1.044	1.54	28.1	80	33.60	0.78
5日目	1108	0.591	1.56	27.5	54	28.31	0.66
6日目	1047	0.569	1.53	33.1	59	26.53	0.58
全体	9508	5.027	1.57	25.3			
2日目～6日目					374.05	30.93	0.72

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

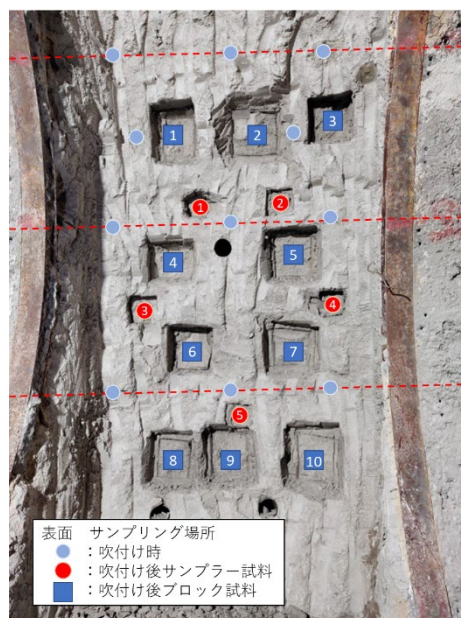
閉鎖技術の実証

【吹付け後のサンプリングの結果】

- 吹付け試験時と吹付け後1年経過にサンプリングを行い含水比と乾燥密度を測定して施工品質を確認
- 吹付け時の乾燥密度の平均値は 1.55 Mg/m^3 となり、目標乾燥密度よりも高い乾燥密度で施工できることを確認
- 吹付け後1年経過した試料を用いて室内透水試験を実施した結果、透水係数は $10^{-12} \sim 10^{-13} \text{ m/s}$ のオーダーとなり、止水プラグの材料として設計した 10^{-11} m/s よりも低い値で施工できることを確認
- 止水プラグの施工方法として、吹付け工法の適用性を確認



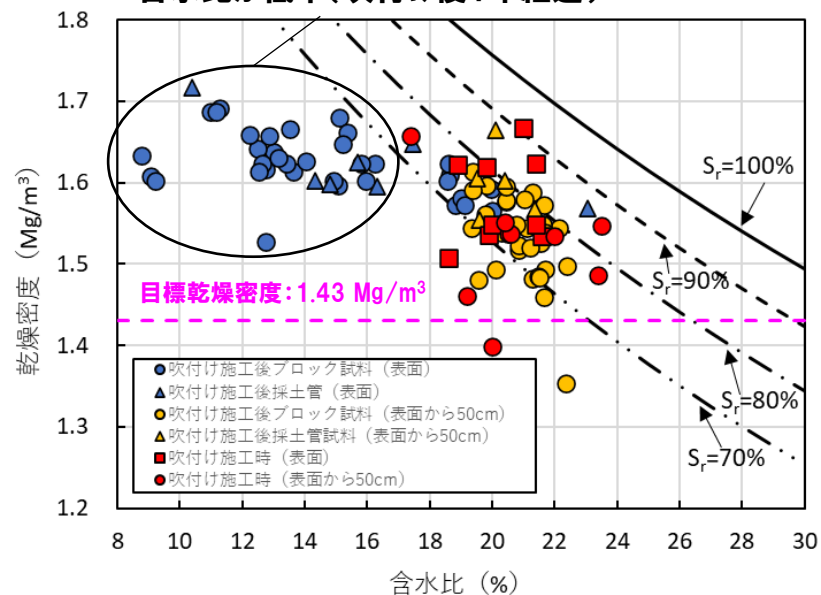
(a) 吹付け表面



(b) 吹付け表面から50 cm

吹付け後のサンプリングの位置

坑道の換気の影響で吹付け表面の含水比が低下(吹付け後1年経過)



含水比と乾燥密度の関係

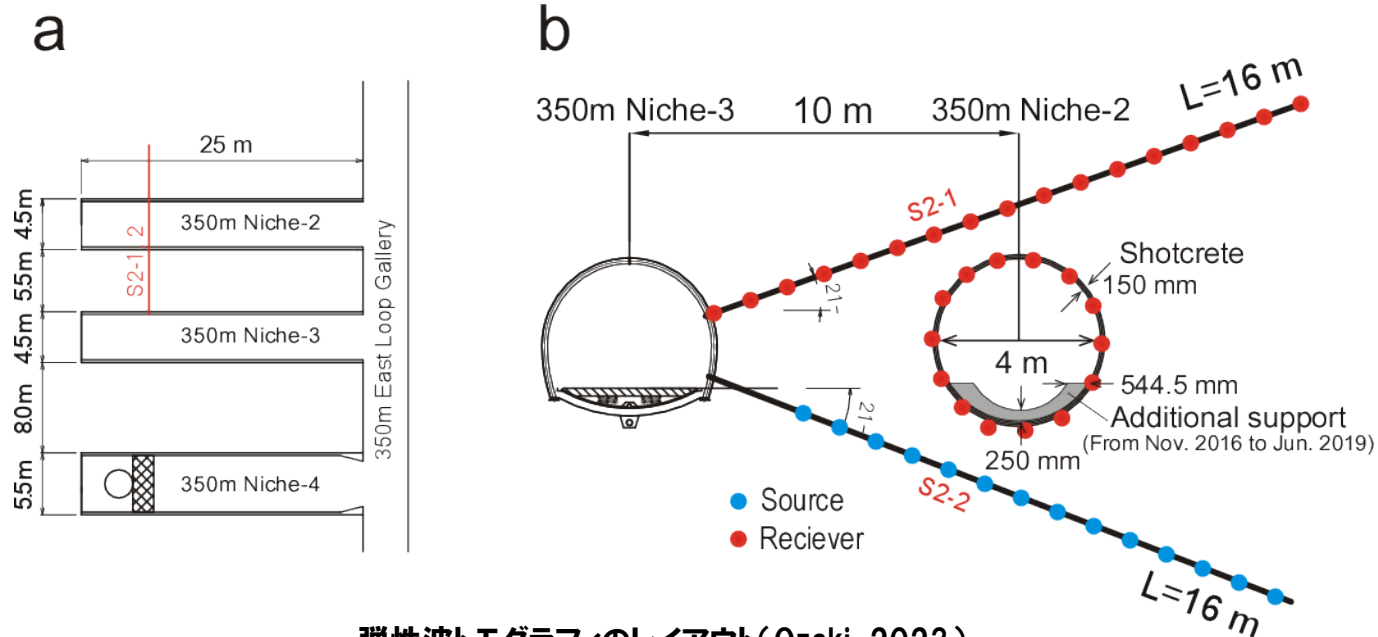
2.1.1 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証

閉鎖技術の実証

掘削損傷領域の調査技術の高度化

【背景・目的】

- 坑道周辺のEDZの範囲や物性を把握するための調査手法として面的に非破壊で調査できる様々な物理探査がこれまで適用
- EDZの調査を行う上で、
 - 坑道壁面のコンクリートなどの構造物が物理探査の結果に及ぼす影響の除去
 - EDZの範囲や物性の時間変化を評価できる手法の開発が必要
- 350m試験坑道2で繰り返し実施した弾性波トモグラフィの結果を用いて坑道周辺のEDZの時系列変化を評価できる解析手法の開発を実施



弾性波トモグラフィのレイアウト(Ozaki, 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

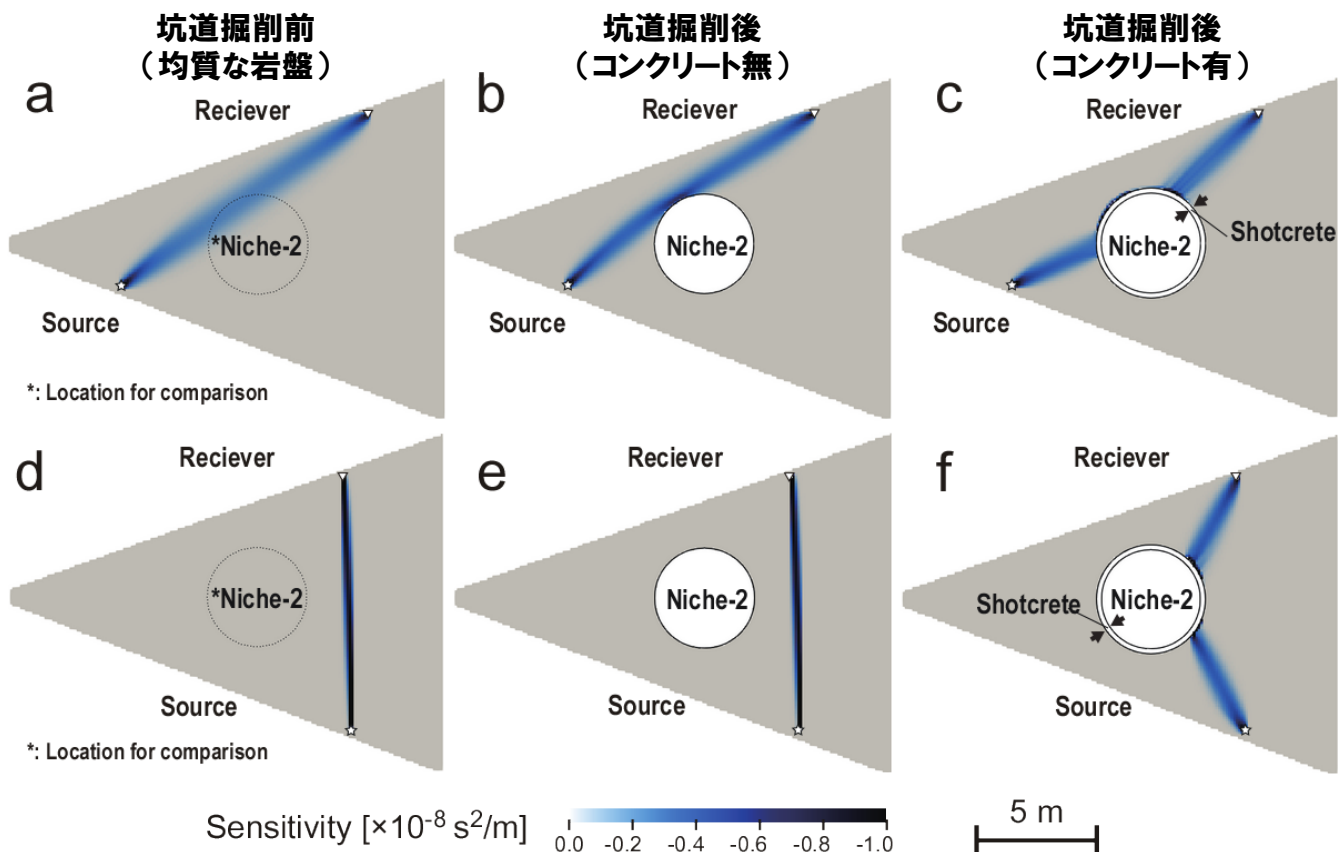
閉鎖技術の実証

【吹付けコンクリートの影響】

- EDZの検出に及ぼす吹付けコンクリートの影響を調べるため、P波の初動の到達時間による弾性波トモグラフィの感度解析を実施。
- 均質な岩盤の場合にはP波の直線的な伝搬経路に沿うように感度が高い領域が分布。一方で、弾性波速度が速い吹付けコンクリートがある場合、坑道の吹付けコンクリートを通り抜けるように伝搬経路が屈折し、その経路に沿って高感度の領域が分布。

材料に設定した弾性波速度

岩盤	2000 m/s
吹付けコンクリート	5000 m/s
坑道	345 m/s



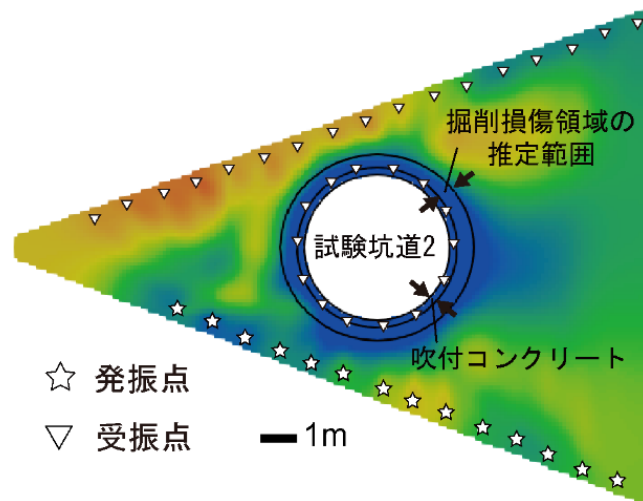
弾性波トモグラフィの感度解析結果(Ozaki, 2023)

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

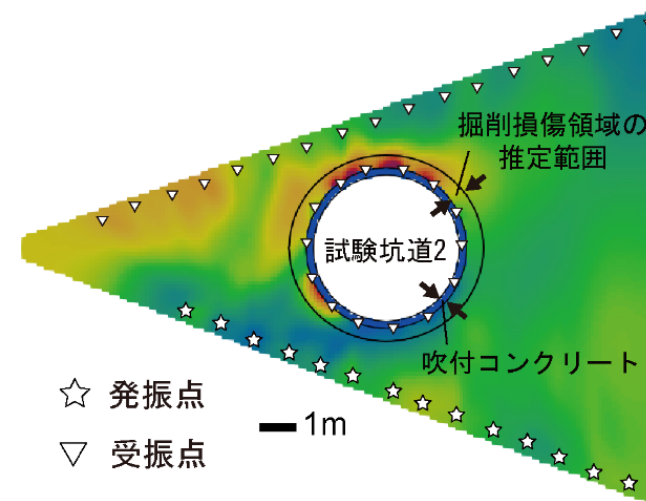
閉鎖技術の実証

【吹付けコンクリートの影響の除去】 補足3

- 坑道壁面の吹付けコンクリートの影響を考慮しない場合、坑道壁面の吹付けコンクリートの弾性波速度が速いため、坑道周辺に高速度領域が広く推定されてしまい弾性波速度が低下すると予想されるEDZの状況が検出できない。
- 吹付けコンクリートの物性および位置を解析時に事前情報として入力し、岩盤と吹付けコンクリートの速度の不連続性を考慮可能な解析コードを開発することにより、吹付けコンクリートの影響を除去し坑道周辺の低速度領域を検出することが可能



(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

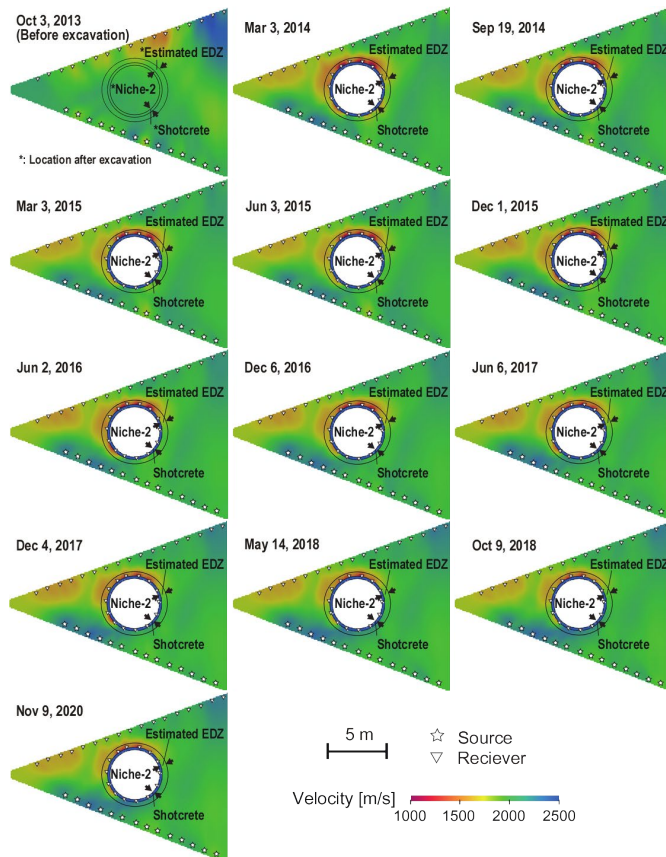
吹付けコンクリートの影響を考慮した解析手法によるP波速度分布の推定

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

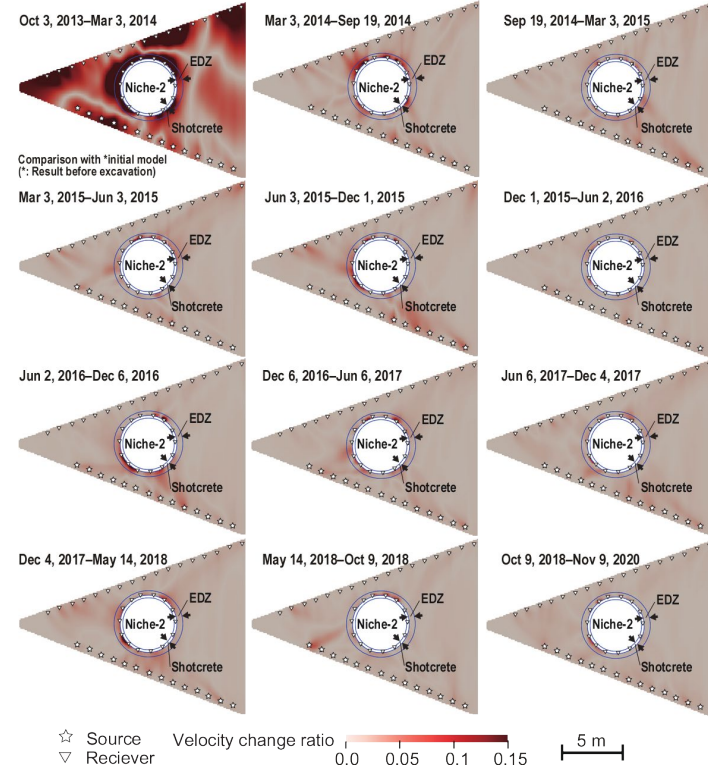
閉鎖技術の実証

【弾性波速度の時系列変化の解析】 補足3

- 同一の場所で繰り返し測定したデータの解析時に時系列情報を付与するタイムラプス解析が可能となるように解析手法を拡張(Ozaki, 2023)し、物性値の時間変化を追跡できるモニタリング手法として適用できるように調査手法を整備
- 7年間の同じ領域を対象に取得した弾性波トモグラフィの結果に対してタイムラプス解析を実施し、坑道掘削直後に生じたEDZの範囲は、時間経過でほとんど変化していないことが示された



タイムラプス解析によるP波速度分布の時系列変化



タイムラプス解析の結果に基づき計算した速度変化率

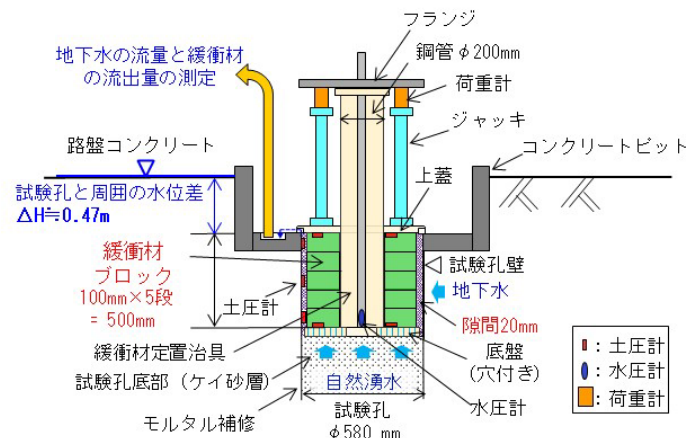
2.1.1 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証

人工バリア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

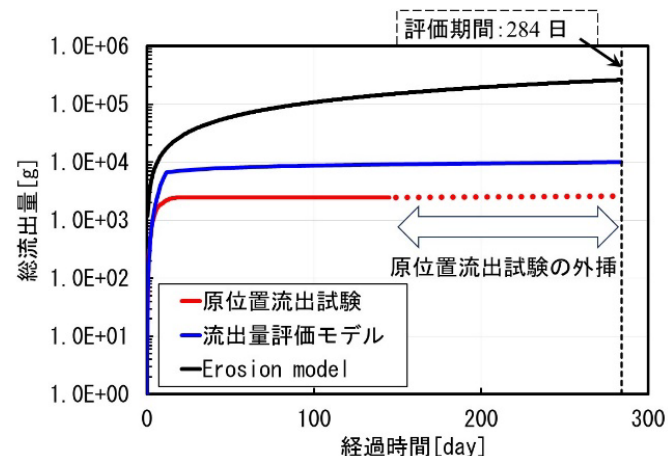
【成果取りまとめ】

人工バリアの緩衝材

- 人工バリアの緩衝材の竖置き定置方法として、「隙間未充填」と「ケイ砂充填」の2つの技術オプションについて、緩衝材の総流出量を評価できるベースモデルを整備
- 原位置試験を通じて、整備したベースモデルを用いることにより、より現実的に総流出量が評価できる見通しを得た



350m試験坑道5における緩衝材流出試験の概要(隙間未充填ケース)



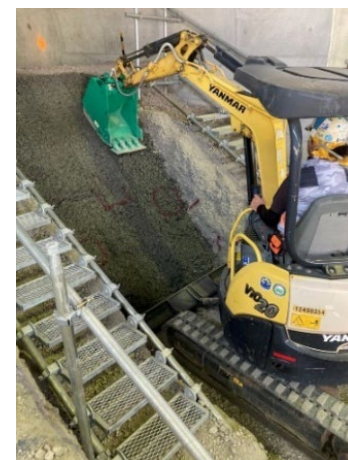
原位置試験結果とベースモデルによる総流出量評価(隙間未充填ケース)(菊池ほか, 2024)

坑道の埋め戻し材

- 埋め戻し材の施工効率の向上が期待できるブロック工法、斜め転圧工法およびスクリー工法について要素試験を実施し、各工法の埋め戻しの施工方法としての見込みを示した
- 転圧工法と吹付け工法の実証試験※で得られたデータと合わせて埋め戻し材の施工方法としての5工法の適用範囲および施工品質などに関する情報を整備



埋め戻し材ブロックの試作



斜め転圧工法による施工試験の状況

※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、閉鎖技術の実証に係る成果

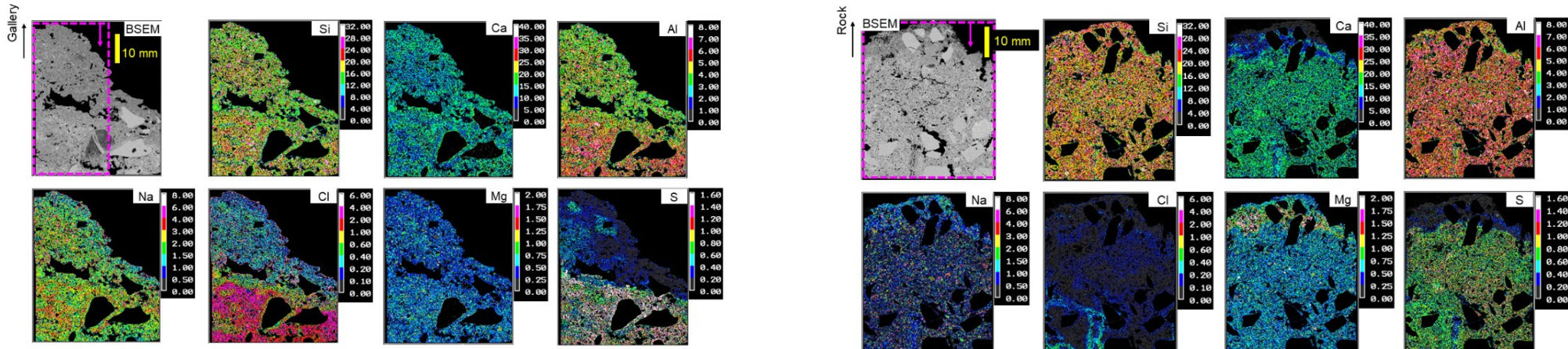
- 原子力環境整備促進・資金管理センター，日本原子力研究開発機構（2023）：高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 [JPJ007597] 回収可能性技術高度化開発3ヵ年取りまとめ報告書。
- 日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進・資金管理センター（2023）：高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 [JPJ007597] 地層処分施設閉鎖技術確証試験5ヵ年取りまとめ報告書。
- 菊池広人，宇田俊秋，林大介，江守稔，木村駿（2024）：縦置き・ブロック方式における緩衝材の流出量評価方法の検討，原子力バックエンド研究，vol. 31, no. 1, pp. 11-20。
- 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。
- 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。
- Ozaki, Y. (2023): First-arrival traveltime tomography for monitoring the excavation damaged zone in the Horonobe Underground Research Laboratory, Rock Mechanics Bulletin, 2 (3), 100057.

文献リスト

中山雅 (2020): 幌延URL における低アルカリ性セメント系材料の劣化および周辺環境への影響調査, JAEA-Data/Code 2020-009, 98p.

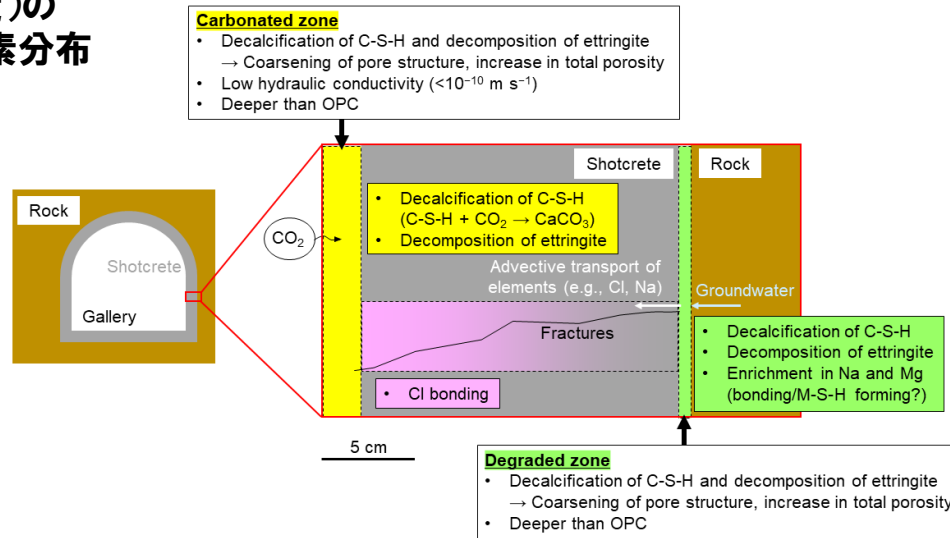
補足1-1

【補足：坑道周辺でのHFSC吹付けコンクリート変質に関する概念図】



中性化領域(坑道表面付近)の
HFSC吹付けコンクリートの元素分布

溶出領域(岩盤界面付近)の
HFSC吹付けコンクリートの元素分布

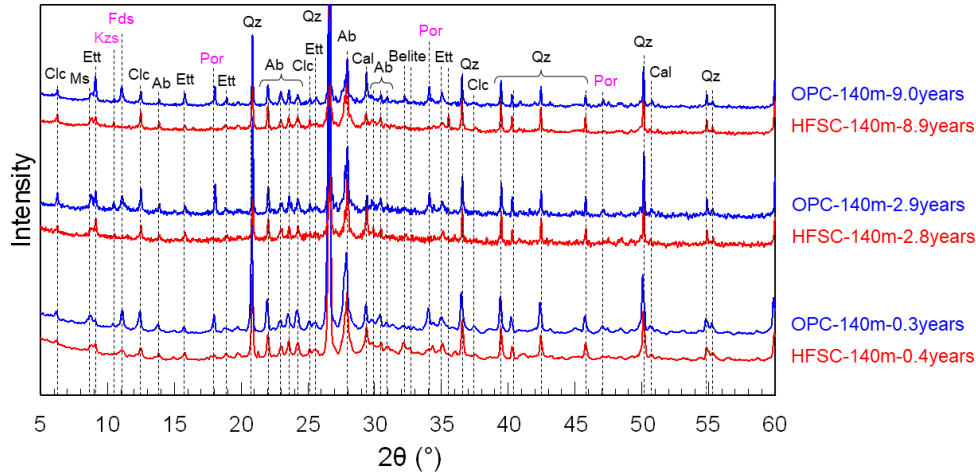


幌延におけるHFSC吹付けコンクリートの
変質に関する概念図

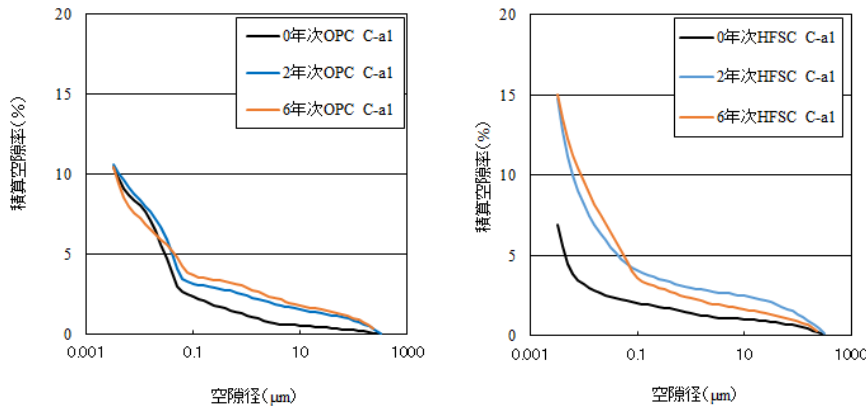
(Mochizuki et al., submitted)

補足1-2

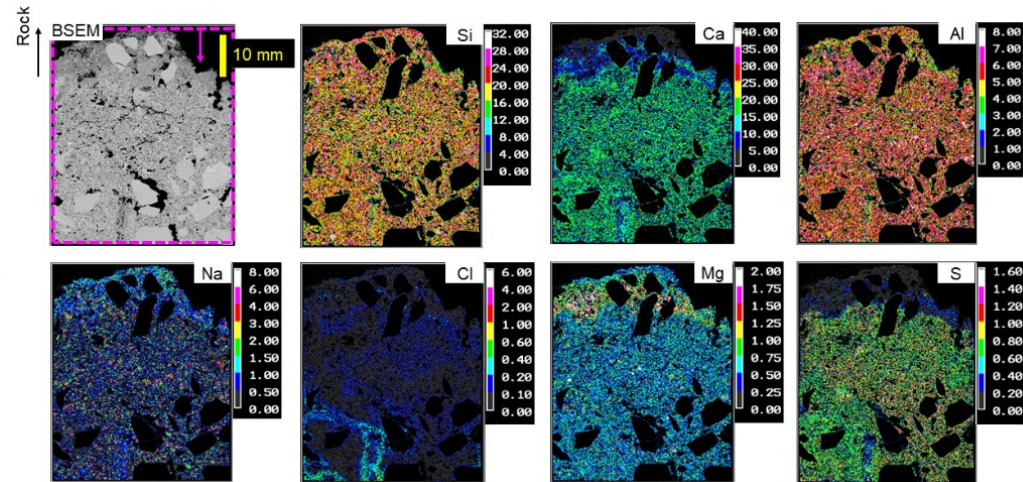
【補足:HFSCとOPCの違い】



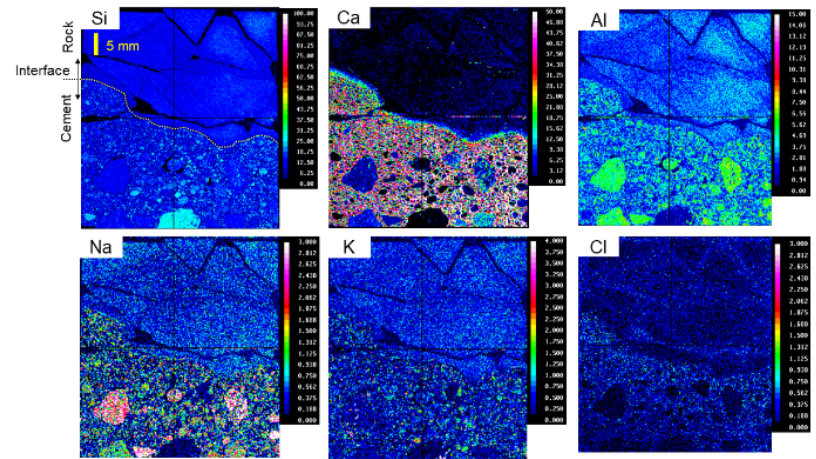
HFSCおよび普通ポルトランドセメント(OPC)吹付けコンクリートの鉱物組成
(中山, 2020; Mochizuki et al., submitted)



HFSCおよびOPC吹付けコンクリートの溶出領域(岩盤界面付近)での空隙構造の時間変化
(中山, 2020)



溶出領域のHFSC吹付けコンクリートの元素分布



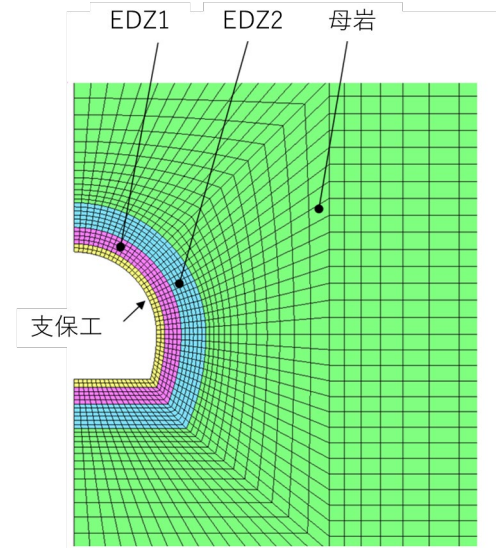
溶出領域のOPC吹付けコンクリートの元素分布
(中山, 2020)

補足2

【補足：坑道周辺環境の解析で行った計算手順】

掘削直後のEDZの範囲およびその物性(力学・水理)を事前に設定
解析事例の場合、初期状態として以下を設定

- EDZの弾性係数の設定にP波速度分布の比を利用 (Tsusaka et al., 2014)
- コンプライアンス可変型のパラメータは過去の室内試験を参考に設定(吉野ほか、2015)
- コンプライアンス可変型モデルに必要な内部摩擦角および粘着力は、P波速度から推定された弾性係数から近似式を用いて推定(アイダンほか、1992)
- 初期の透水係数は透水試験の結果を参考に設定(Aoyagi and Ishii, 2018)
- 不飽和透水係数はMiyakawa et al., (2019)に基づき設定

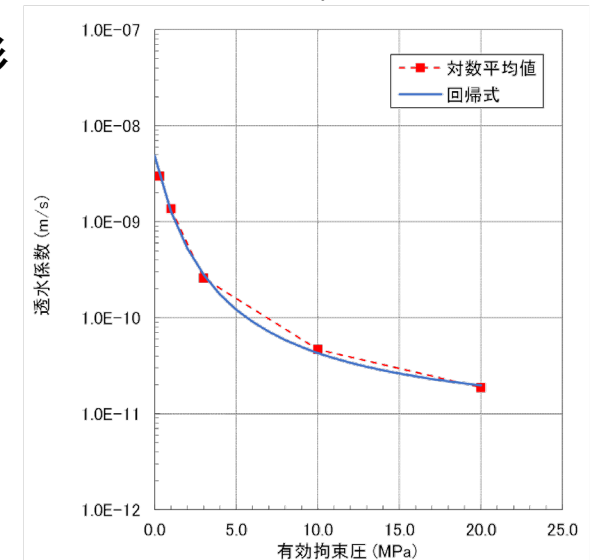


初期モデル(力学解析用メッシュ)

初期条件からコンプライアンス可変型モデルを用いて長期岩盤変形挙動を解析し、透水係数の長期変化を計算

解析事例の場合、透水性の変化に以下の試験結果を利用

- EDZの透水性の変化の計算は、圧裂亀裂を発生させた岩石試料を用いた室内試験で取得した応力と透水性の近似式を使用
- 母岩部に関しては、透水性の変化に健岩部に亀裂が生じた場合のデータとして、3軸試験時のデータを適用(郷家ほか、2011)(解析では変形量が小さく変化なし)



透水性の変化を随時入力し、水理・力学弱連成解析を実施

$$\log_{10}k_f = \frac{\sigma_n}{-1.373 - 0.3491\sigma_n} + \log_{10}4.875 \times 10^{-9}$$

補足3-1

【補足:吹付けコンクリートの影響の除去】

目的関数 $E = (d - F(m))^2 + \sigma(Cm)^2 \longrightarrow$ 最小化

- 一般的に物理探査の逆解析は列決定 \Rightarrow モデルパラメータ数 $>$ データ数
- モデルに制約を与えて解く

d	観測データ
F	フォワードオペレータ
m	モデルパラメータ(全て)
C	制約条件
σ	トレードオフパラメータ

モデル制約 C

- 隣り合うセルの物性値は似た値となる制約が良く用いられる

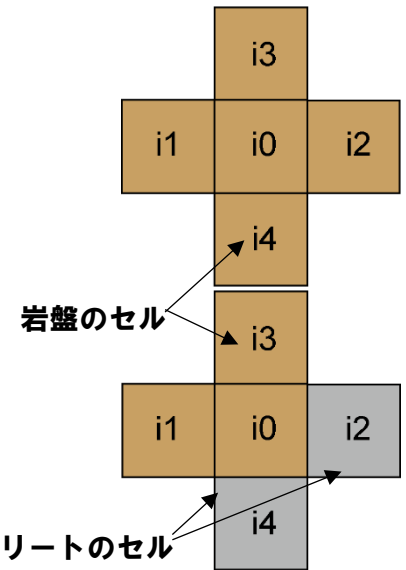
(この制約は、地球統計学で使用されるモデルコバリアンスの逆行列と同様)

右のステンシルの場合 (通常の場合)、

$$\sum_{k=1}^4 (m_{i_k} - m_{i_0})^2$$

セメントの影響を除去する場合、

$$(m_{i_1} - m_{i_0})^2 + (m_{i_3} - m_{i_0})^2$$



目的関数 $E = (d - F(m))^2 + \sigma(Cm)^2$

↓

$$E = (d - F(m))^2 + \sigma(C_{mod}m_r)^2 + M(m_s - m_{shot})^2$$

2項目と3項目:

岩盤と吹付けコンクリートの境界で制約条件を切り離し

自由になった吹付けコンクリートの弾性波速度を既知の値として制約

C_{mod}	上記方法で修正した C
m_r	モデルパラメータ (岩盤)
m_s	モデルパラメータ (吹付)
m_{shot}	弾性波速度(吹付、既知)
M	トレードオフパラメータ (十分大きな値)

補足3-2

【補足:タイムラプス解析】

目的関数 (単一時間データの場合)

$$E = (d - F(m))^2 + \sigma(C_{mod}m_r)^2 + M(m_s - m_{shot})^2$$

- モデル制約と同様に、近い時間のモデルパラメータは類似しているとして制約

$$E = \sum_t (d_t - F(m_t))^2 + \sigma(C_{mod}m_{r,t})^2 + M(m_{s,t} - m_{shot})^2 + \Lambda(m_t - m_{t-1})^2$$

t	時間
Λ	感度分布に応じた重みづけ行列 (対角行列で要素毎に重みづけ)

時間制約が無い場合：

ある時間のデータが変化した場合、感度に関らず推定されるモデルパラメータが広い範囲で変化する可能性 (2項目の影響)

⇒タイムラプス制約 (4項目) により、不要な範囲 (感度が無い領域) における時間変化を制約できる

タイムラプス解析の場合、時間 (ステップ数) に応じてモデルパラメータが増えるため計算コストは増大