

第3期中長期計画における 超深地層研究所計画の研究開発成果 —CoolRepR4としての成果の取りまとめについて—

**令和3年10月13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
東濃地科学センター
地層科学研究部**

本日の説明内容

1.CoolRepR4における成果取りまとめ

- (1) 必須の課題に関する研究開発成果と技術的評価結果
- (2) 必須の課題とCoolRepR4の構造
- (3) 成果ダイジェストの例

2.超深地層研究所計画の現状と今後の予定

必須の課題に関する研究開発成果と技術的評価結果

①地下坑道における工学的対策技術の開発

- 大規模湧水に対するウォータータイトグラウチング技術
- 地下水管理技術

令和元年度における中間評価結果

- 研究内容の妥当性
概ね適切であった
- 目標の達成度
概ね目標が達成できた

②物質移動モデル化技術の開発

- 長期的な変遷を含めた地下深部におけるわが国固有の亀裂ネットワーク中の地下水流動・物質移動に関する試験及びモデル化技術

- 研究内容の妥当性
概ね適切であった
- 目標の達成度
概ね目標が達成できた

③坑道埋め戻し技術の開発

- 坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術
- 長期モニタリング技術など

- 研究内容の妥当性
概ね適切であった
- 目標の達成度
概ね目標が達成できた

全体として概ね適切に研究が遂行され、所期の目標を達成できたと評価します。今後は、得られたデータや知見が地層処分研究開発全体の枠組みの中にフィードバック・継承されるとともに、関連分野の研究開発・人材育成に最大限有効に活用されるよう、国内外に広く提供・展開されることを期待します。

必須の課題とCoolRepR4の構造

【必須の課題】

【実施項目】

【CoolRepR4】

必須の課題を通して得られた知見を地層処分事業・安全規制への反映という視点で体系化

地下坑道における
工学的対策技術の
開発

- 大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術
- 地下水管理技術

→ 成果ダイジェスト
(主な成果+事業等への反映)

物質移動モデル化
技術の開発

- 不均質な割れ目ネットワークのモデル化手法の開発

→ 成果ダイジェスト
(主な成果+事業等への反映)

坑道埋め戻し技術
の開発

- 坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術
- 長期モニタリング技術

→ 成果ダイジェスト
(主な成果+事業等への反映)

→ 成果ダイジェスト
(主な成果+事業等への反映)

→ 成果ダイジェスト
(主な成果+事業等への反映)

⋮

⋮

⋮

物質移動モデル化
技術の開発

- 物質移動モデル化技術の開発

→ 成果ダイジェスト
(主な成果+事業等への反映)

⋮

⋮

⋮

A2群
(地質環境の短期変動・
回復挙動の理解)
コアメッセージ

A3群
(地質環境の長期変動・
回復挙動の理解)
コアメッセージ

成果ダイジェストの例

必須の課題（瑞浪）

実施項目

A2群

地下坑道における工学的対策技術の開発

- 大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術
- 地下水管理技術

物質移動モデル化技術の開発

- 不均質な割れ目ネットワークのモデル化手法の開発

坑道埋め戻し技術の開発

- 坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術
- 長期モニタリング技術

A3群

物質移動モデル化技術の開発

- 物質移動モデル化技術の開発

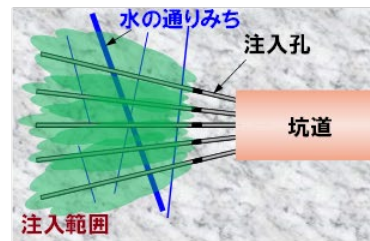
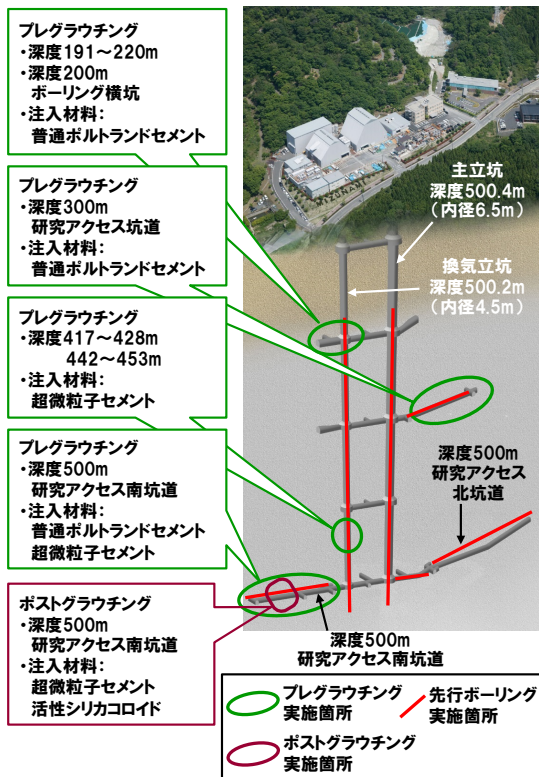
- ・ 本日の説明では、大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術と再冠水試験を事例として紹介
- ・ その他の項目については別途配布している資料を参照

成果ダイジェストの例

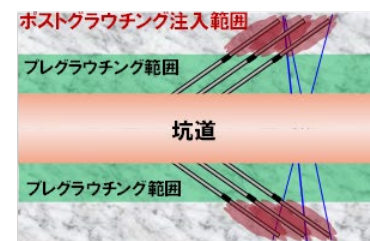
ー地下坑道における工学的対策技術の開発ー

【概要】大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術

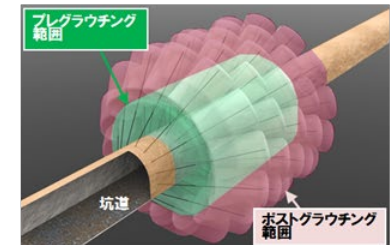
瑞浪超深地層研究所内で最も高水圧条件(約4MPa)である深度500m研究アクセス南坑道を利用し、プレグラウチングとポストグラウチングの併用によりウォータータイト構造に匹敵するレベルで湧水を極小化する技術の実証試験および試験計画検討に必要な湧水量予測のための理論式の構築を実施した。



(a) プレグラウチングの概念図

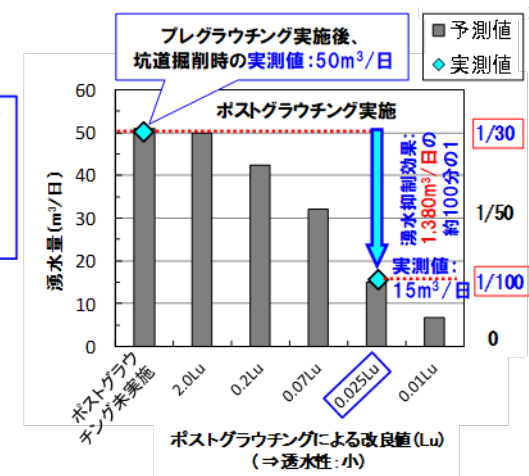
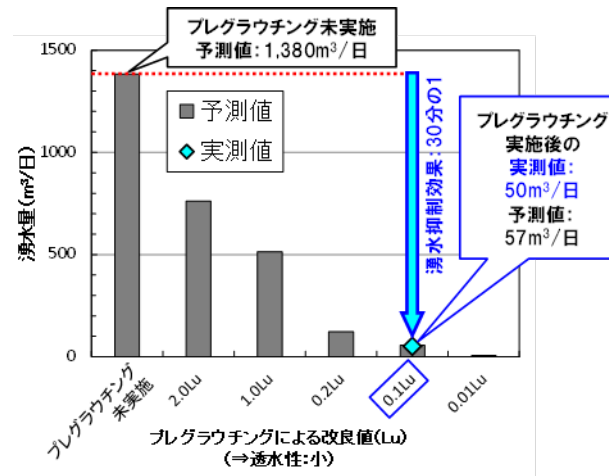


(b) ポストグラウチングの概念図



(c) プレグラウチングとポストグラウチングを併用した概念図

プレグラウチングおよびポストグラウチングの概念図



瑞浪超深地層研究所の研究坑道レイアウト、
プレグラウチングおよびポストグラウチング
実施箇所

深度500 m研究アクセス南坑道におけるプレグラウチングと
ポストグラウチングに伴う予測湧水量と実測湧水量の比較

成果ダイジェストの例

ー地下坑道における工学的対策技術の開発ー

【成果ダイジェスト】大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術

主要な成果	・深度500mの研究坑道において、坑道への湧水量を既存技術のプレグラウチングとポストグラウチングの組合せによりウォータータイトグラウト施工技術を実証し、瑞浪超深地層研究所内で最も高水圧条件(約4MPa)での湧水抑制効果を確認した。 ・超微粒子セメントを基本としたプレグラウチングにより、湧水量はグラウチング未実施の場合の予測値の4 %に抑えることができた。さらに、このプレグラウチング領域の一部において、より微細な割れ目への浸透が期待できる活性シリカコロイドを用いたポストグラウチングを実施することで、プレグラウチング領域の区間湧水量をさらに70 %低減することができ、プレグラウチングとポストグラウチングの併用により未実施の場合の予測値の99%の湧水抑制効果が確認できた。
事業等への反映	・処分場で想定される深度における高い地下水圧下でのグラウチング技術の適用性を提示することができた。 ・深度500mまでの湧水抑制対策時にも適用してきた予測のための理論式やグラウト材料の動的注入工法の適用性を提示した。 ・精密調査における地下施設や処分施設の設計、施工、閉鎖時の湧水対策技術、排水処理量の低減対策として適用できる(包括的技術報告書 第4章 処分場の設計と工学技術)
成果の公表	学術論文15件、JAEA技術資料21件

成果ダイジェストの例

一坑道埋め戻し技術の開発一

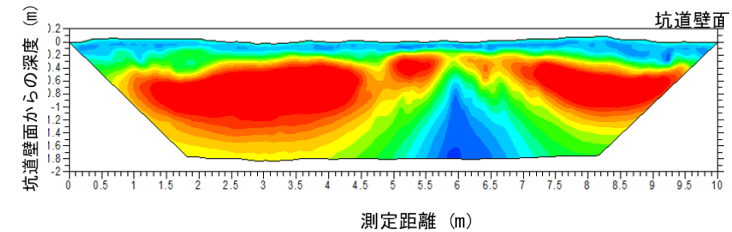
【概要】再冠水試験

地下施設の建設・操業により乱された地質環境の回復能力の例示と関連する技術の開発を目的として、深度500m研究アクセス北坑道における坑道の一部(以下、冠水坑道)を止水壁により閉鎖した後に地下水により冠水させる再冠水試験を実施した。

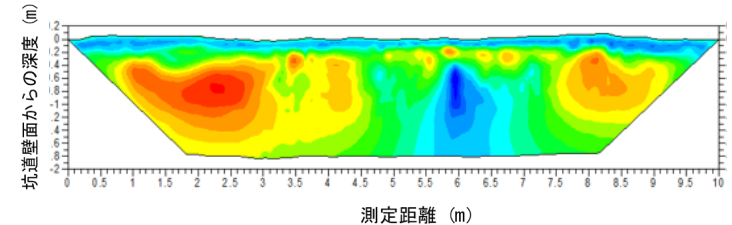


再冠水試験の流れ

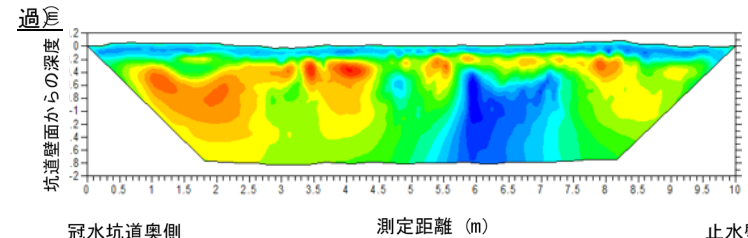
坑道冠水前 (2014年8月実施)



坑道冠水後 (2017年10月実施：坑道排水完了後約1ヶ月経過)



坑道冠水後 (2018年2月実施：坑道排水完了後約4ヶ月経過)



冠水坑道壁面で実施した比抵抗探索結果

成果ダイジェストの例

一坑道埋め戻し技術の開発一

【成果ダイジェスト】再冠水試験

主要な成果	・地下施設の建設・操業により乱された地質環境の回復能力の例示と関連する技術の開発を目的として、深度500m 研究アクセス北坑道における坑道の一部(以下、冠水坑道)を閉鎖し、地下水により冠水させる再冠水試験を実施した結果、坑道の建設によって岩盤内に形成された不飽和領域は、坑道を閉鎖することで再飽和すること、地下水の水圧観測結果から水圧が半年程度の短期間で定常化すること、岩盤変位の観測結果から岩盤変位が水圧変動箇所周辺に限定され、想定される限界ひずみよりも十分に小さいこと、閉鎖した坑道内にある人為的な影響(坑道の掘削・開放による酸化)を受けた地下水が微生物活動により還元状態への回復が促進されることを確認した。 ・一方で、地下水の水質観測結果から、冠水坑道内では吹き付けコンクリート中の鉍物が反応して地下水のpHが上昇しており、地下水のアルカリ化が顕著になることが予想される。
事業等への反映	・処分場の閉鎖後を想定した地下施設の設計(包括的技術報告書 4章)や安全評価における閉鎖後の地質環境特性の変化の推察(同 5章)に活用できる。
成果の公表	学術論文7件、JAEA技術資料35件

成果ダイジェストのまとめ

必須の課題	実施項目	成果ダイジェスト(一部)	成果の公表
地下坑道における工学的対策技術の開発	大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術	- 深度500 mの研究坑道において、坑道への湧水量を既存技術のプレグラウチングとポストグラウチングの組合せによりウォータータイトグラウト施工技術を実証し、瑞浪超深地層研究所内で最も高水圧条件(約4 MPa)での湧水抑制効果を確認した。 - 処分場で想定される深度における高い地下水圧下でのグラウチング技術の適用性を提示することができた。	学術論文15件、 JAEA技術資料21件
	施工対策影響評価技術	- グラウト材の岩盤への影響の経時変化を把握するための手法を確立するとともに、CT-XRDが非破壊で三次元的な鉱物分布を推定するための分析手法として有用であることを確認した。 - これらの分析により、施工後約6年経過した岩盤でもグラウト材との接触による新たな鉱物の形成や鉱物の溶脱などの変化は認められず、少なくともグラウチング後、数年でグラウト材により岩盤に変質が生じる可能性はほとんどないことを確認した。	
	地下水管理技術	瑞浪超深地層研究所のように、約90%の除去率が求められるふっ素処理や、低濃度から極低濃度までの除去が求められるほう素処理とともに処理量が大量である排水処理については、ふっ素については凝集沈殿処理、ほう素については凝集吸着処理が現時点で適切であることを提示した。	

成果ダイジェストのまとめ

必須の課題	実施項目	成果ダイジェスト(一部)	成果の公表
物質移動モデル化技術の開発	不均質な割れ目ネットワークのモデル化手法の開発	瑞浪超深地層研究所で取得した原位置データを用いてDFNモデルを構築するとともに、DFNモデルによる地下水流動解析や粒子追跡解析を実施し、それらの結果に基づく岩盤特性の評価方法や地下施設設計などへの反映方法を提示した。	学術論文49件、JAEA技術資料43件
	花崗岩中での物質移動現象の理解	- 収着性トレーサー物質を用いた原位置トレーサー試験技術を構築した。本試験の結果は、割れ目の表面への吸着と岩石基質部への拡散に伴う収着に加え、割れ目充填鉱物への元素の収着・脱離などの現象を考慮する必要があることが明らかとなった。日本の結晶質岩の割れ目は、充填鉱物をしばしば介在していることから、放射性核種の移行を遅延させる機能を有することを示唆する。 - 上記のデータを室内試験で取得し、原位置試験の結果と組み合わせることは、試験結果の評価解析で破過曲線を良好に再現し得る物質移行パラメータを得るために重要である。	
	物質移動におけるコロイド、有機物、微生物の影響因子の評価	花崗岩体の地下水中的コロイド粒子は、ケイ酸塩鉱物、有機物、鉄鉱物、硫化物、炭酸塩鉱物などから構成されるが、放射性元素と同様の化学性質を示す希土類元素を輸送し得るコロイド粒子は、主に炭酸塩コロイドであり、鉄コロイドもわずかに関与する。これらの粒子の生成・沈殿は、飽和指数に基づき熱力学的に解析が可能であり、飽和指数とコロイド態希土類元素の濃度の相関に基づいて、コロイドによる元素輸送量を評価できる可能性がある。	

成果ダイジェストのまとめ

必須の課題	実施項目	成果ダイジェスト(一部)	成果の公表
坑道埋め戻し技術の開発	再冠水試験	- 地下施設の建設・操業により乱された地質環境の回復能力の例示と関連する技術の開発を目的として、深度500m 研究アクセス北坑道における坑道の一部(以下、冠水坑道)を閉鎖し、地下水により冠水させる再冠水試験を実施した結果、坑道の建設によって岩盤内に形成された不飽和領域は、坑道を閉鎖することで再飽和すること、地下水の水圧観測結果から水圧が半年程度の短期間で定常化すること、岩盤変位の観測結果から岩盤変位が水圧変動箇所周辺に限定され、想定される限界ひずみよりも十分に小さいこと、閉鎖した坑道内にある人為的な影響(坑道の掘削・開放による酸化)を受けた地下水が微生物活動により還元状態への回復が促進されることを確認した。 - 一方で、地下水の水質観測結果から、冠水坑道内では吹き付けコンクリート中の鉱物が反応して地下水のpHが上昇しており、地下水のアルカリ化が顕著になることが予想される。	学術論文7件、 JAEA技術資料35件
	岩盤の破壊現象評価	空洞周辺に生じる応力的な破壊現象を対象とし、近接大口径ボーリング孔の掘削による孔壁破壊現象の観察、熱負荷による岩盤破壊の加速試験、粘性流体注入による割れ目進展挙動の観察および岩盤の破壊現象を含む長期岩盤挙動の評価手法の開発を行い、空洞周辺に生じる亀裂の進展メカニズムを把握した。	
	500m坑道での埋め戻し試験	坑道埋め戻し試験の実施により、全断面吹付け施工の適用性確認を行うとともに、品質管理手法の有効性を確認した。全断面吹付け工法については地層処分事業における埋め戻し工法として実用に耐えうると考えられるが、作業員の慣れや吹付け条件(ノズルの位置、向き)、施工環境(換気環境や供給可能な電力量)が施工性や品質に大きな影響を与えることも確認された。品質管理手法については、実試料測定との相関関係を予め把握しておくことで、3Dスキャナによる密度計測と試料採取による密度計測の併用は実際の地層処分事業における合理的・効率的な品質管理手法となることが期待される。	

成果ダイジェストのまとめ

必須の課題	実施項目	成果ダイジェスト(一部)	成果の公表
坑道埋め戻し技術の開発	長期モニタリング技術	坑道の埋め戻しにともなう環境条件の変化(回復)とその範囲を把握することに加え、既存のモニタリング技術の長期的な適用性を確認するため、地上および坑道から掘削されたボーリング孔での地下水長期モニタリングを実施した。地下施設建設前から地下施設の建設・操業段階における地下水長期モニタリングは、既往技術が適応可能であることを確認した。	(前ページ参照)
物質移動モデル化技術の開発	断層などの影響を含めた地質環境特性の長期変遷解析技術	- 主立坑断層近傍の割れ目頻度が高い領域(ダメージゾーン)においては、熱水性鉱物の充填に加えて、水圧破碎様の産状を伴う粘土状鉱物の充填が認められた。この領域は透水性が相対的に低かったことから、ダメージゾーン近傍では割れ目の充填・閉塞が生じ、長期的には透水性が低下する可能性がある。 - 瑞浪超深地層研究所で認められる700℃程度の超臨界流体によるマイクロフラクチャーの形成や高温流体による溶解、相対的に温度の低い熱水対流による粘土鉱物の形成による影響は、花崗岩の透水性の不均質性を高める原因の一つと考えられる。	学術論文3件、JAEA技術資料1件
	地下水の長期隔離に関する深部塩水地下水の起源・滞留時間の把握	地下水流動が緩慢な領域では塩水が長期にわたり保存され、他の塩濃度の異なる地下水との混合によって地下水水質分布が形成される。塩水の長期保存については断層などの低透水性の地質構造の影響によることが示唆され、変動帯に位置する日本においてはこれらの影響を考慮した解析を実施していくことが重要であると考えられる。	

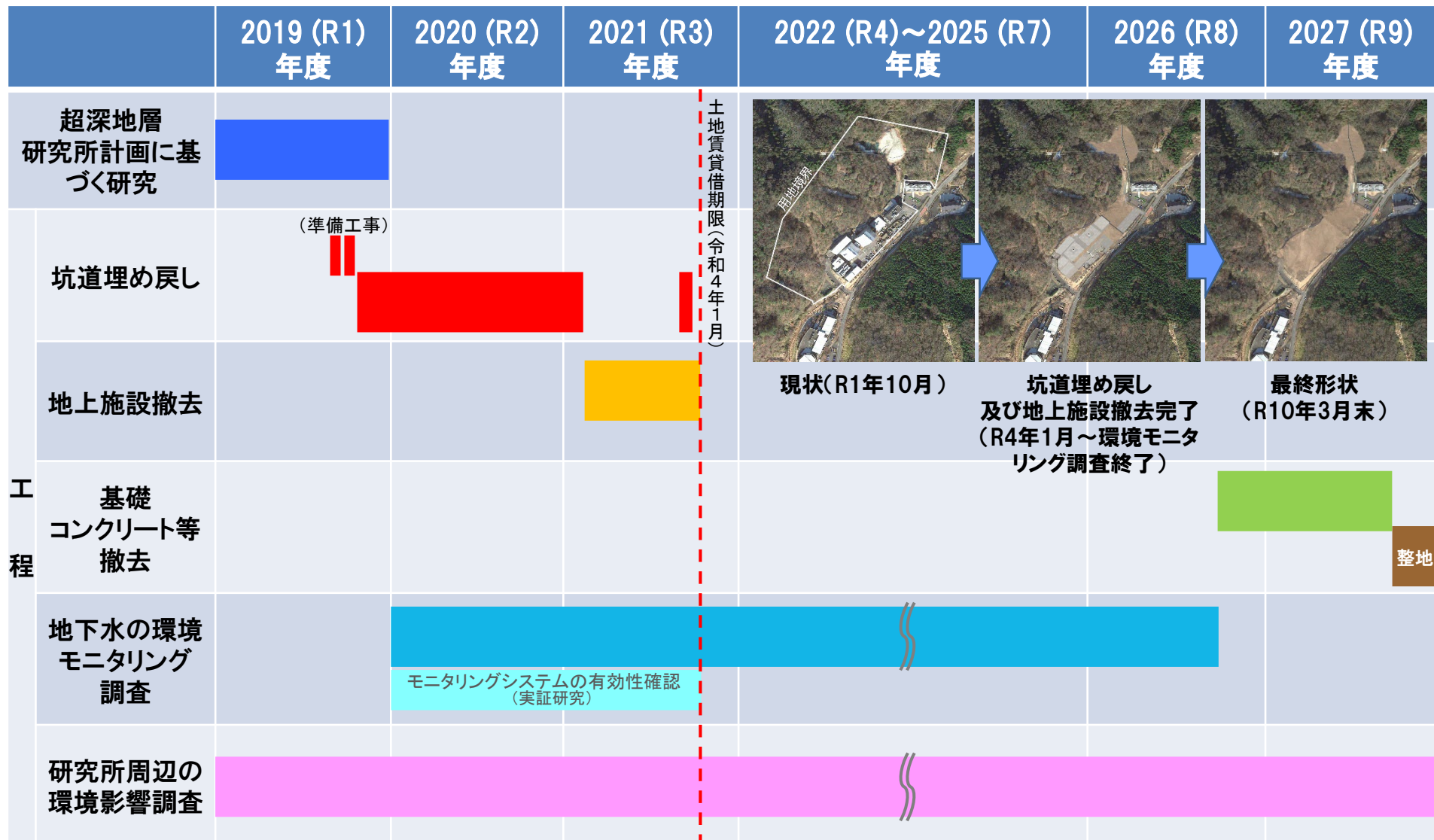
本日の説明内容

1.CoolRepR4における成果取りまとめ

- (1) 必須の課題に関する研究開発成果と技術的評価結果
- (2) 必須の課題とCoolRepR4の構造
- (3) 成果ダイジェストの例

2.超深地層研究所計画の現状と今後の予定

埋め戻し作業の工程計画案

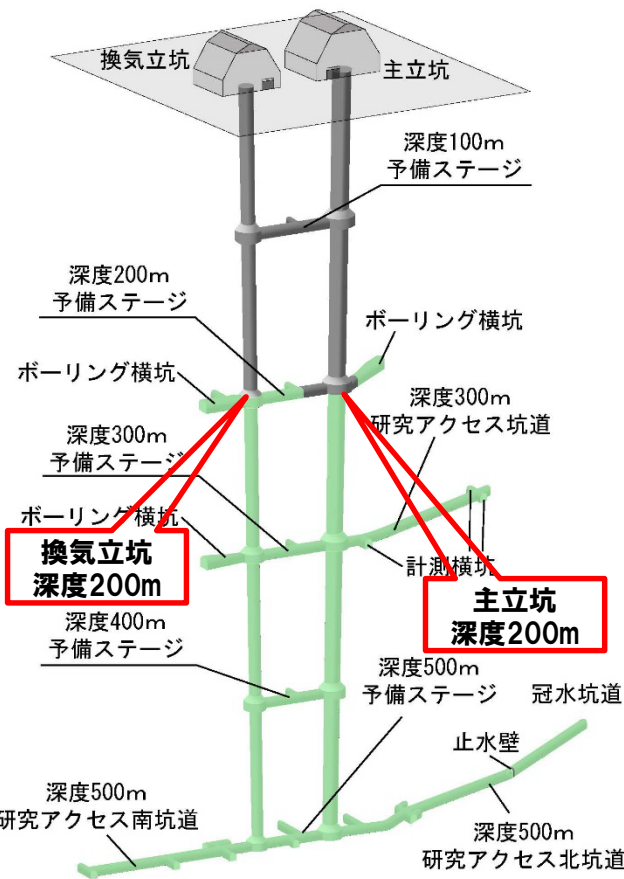


* 地上観測孔を利用した坑道周辺の地下水の水圧・水質観測については、研究所設置当初から継続しています。

坑道埋め戻し作業(前回委員会(第27回)資料)

埋め戻し進捗状況(2021.2.26現在)

- ・主立坑:深度200mまで完了
- ・換気立坑:深度200mまで完了
- ・深度300m水平坑道:2020.12.24完了
- ・深度400m水平坑道:2020.10.6完了
- ・深度500m水平坑道:2020.8.19完了



埋め戻し完了範囲



地上作業

- ・埋め戻し材をキブル(運搬容器)へ投入
- ・キブルを地上から立坑坑底へ、巻上機設備により運搬



坑道内作業

- ・立坑坑底でバックホウによりキャリアダンプ(埋め戻し材運搬車両)へ積込み、運搬



坑道内作業

- ・振動バケット装着バックホウにより埋め戻し、転圧



水平坑道の埋め戻し作業

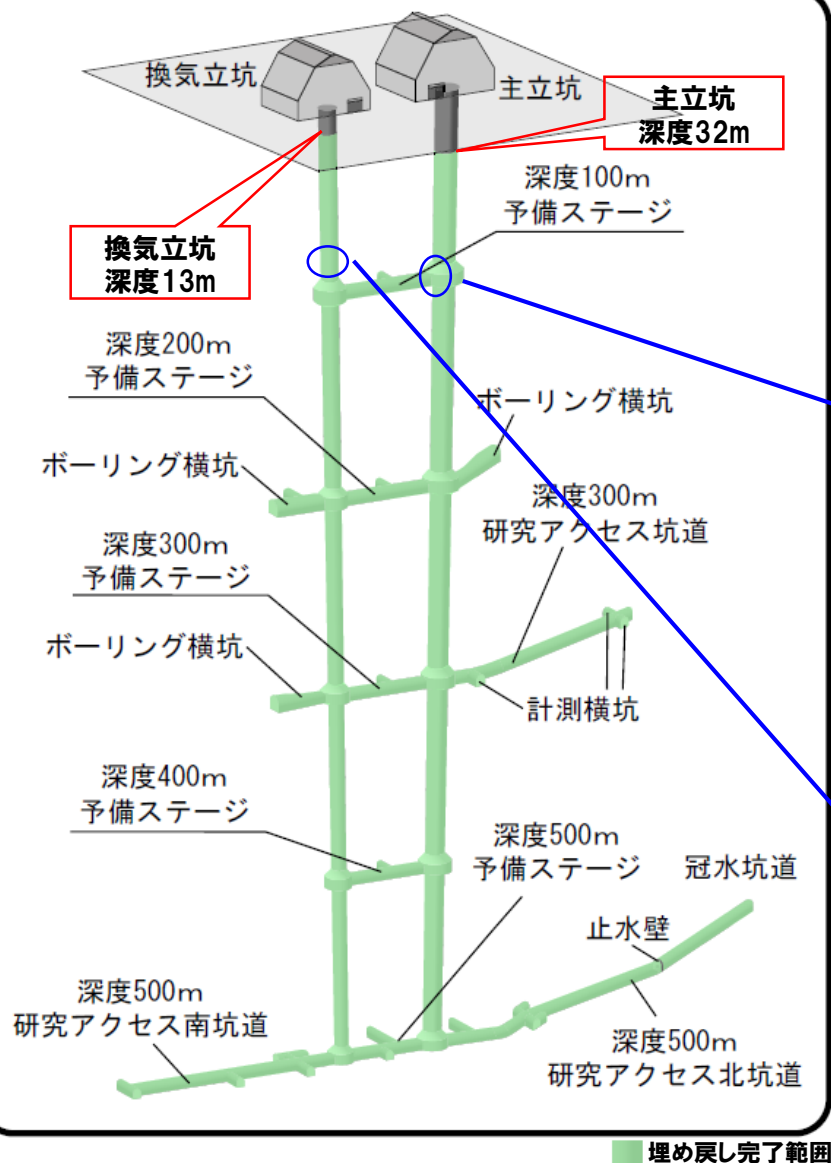
- ・写真の坑道規模:幅4m、高さ3.5m



主立坑の埋め戻し作業

- ・主立坑:内径6.5m

坑道埋め戻し作業



坑道埋め戻し進捗状況

- ・換気立坑 深度13m:2021.5.20
- ・主立坑 深度32m:2021.4.27
- ・深度100m水平坑道:2021.4.15完了
- ・深度200m水平坑道:2021.3.11完了
- ・深度300m水平坑道:2020.12.24完了
- ・深度400m水平坑道:2020.10.6完了
- ・深度500m水平坑道:2020.8.19完了

前回委員会以降の進捗

- ・5月20日で埋め戻しを一旦終了し、櫓、巻上機、坑口設備などの地上施設の解体を実施中。
- ・地上施設解体終了後、地表までの埋め戻しを実施予定。

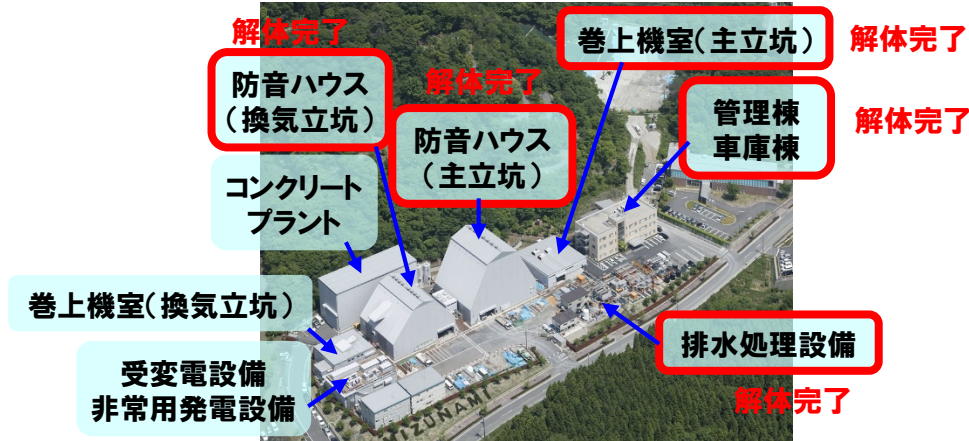


主立坑(直径6.5m)
深度100m予備ステージ
の埋め戻し作業
(予備ステージ:幅3m、
高さ3m)



換気立坑(直径4.5m)
深度90m付近の埋め
戻し作業

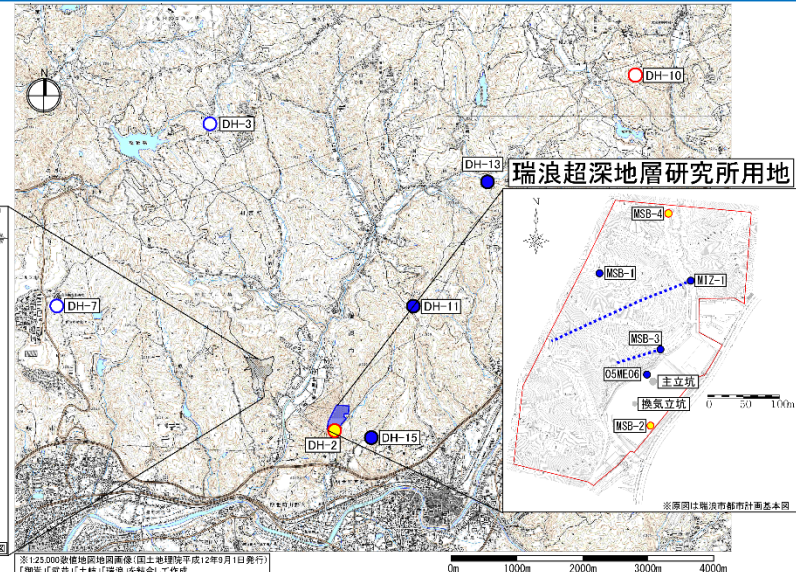
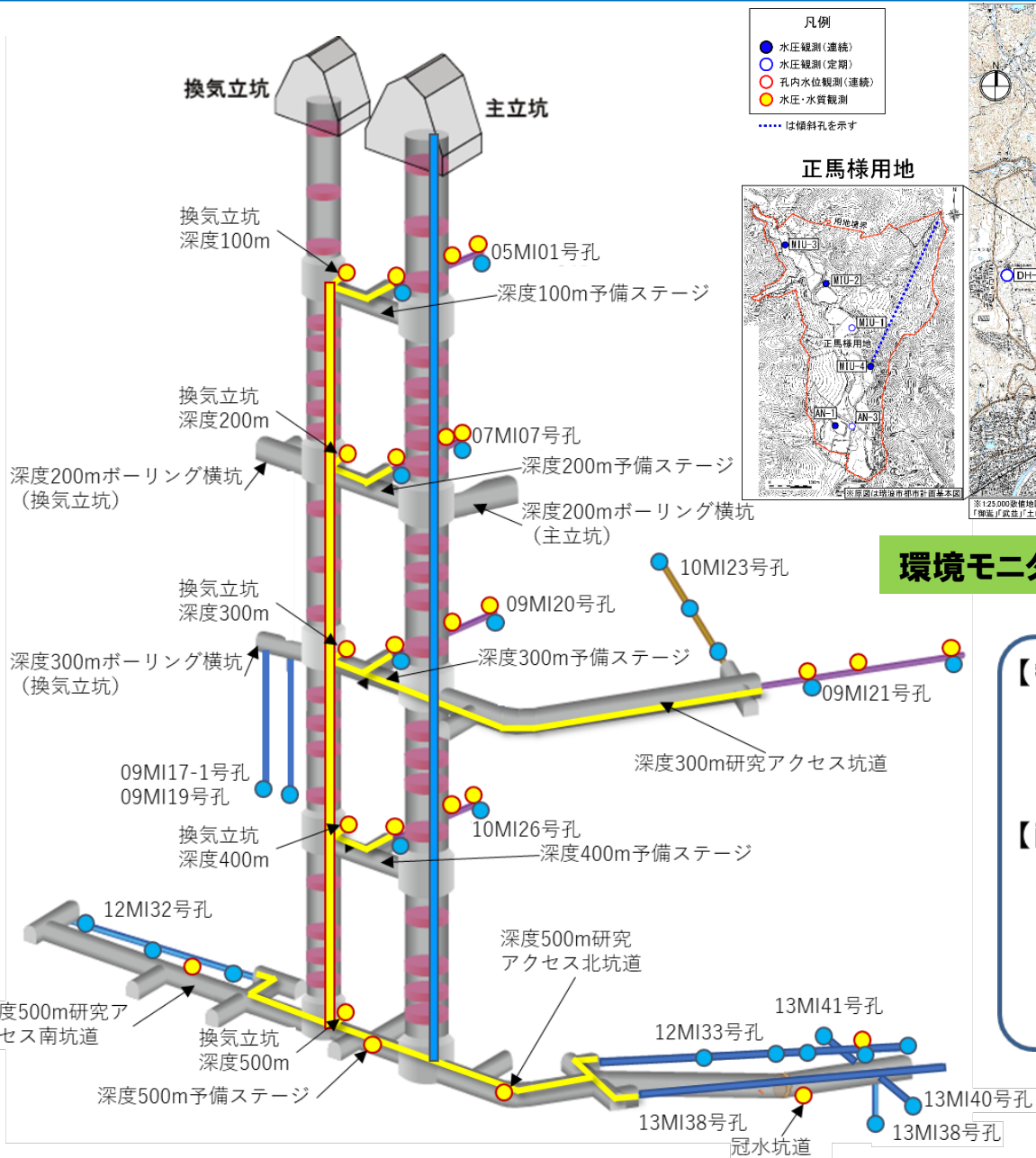
地上施設解体作業



地上施設解体作業状況(赤字は解体完了)

- ・管理棟、車庫棟:完了 2020.12.7～2021.2.12
- ・排水処理設備:完了 2021.5.10～7.2
- ・コンクリートプラント 2021.9.8～10月中旬(予定)
- ・受変電設備、非常用発電設備 2021.10月下旬～11月上旬(予定)
- ・主立坑
 - 巻上機室:完了 2021.7.5～7.19
 - 櫓防音ハウス:完了 2021.7.26～9.3
 - 坑口設備(座張り、蓋、EV乗り場)、坑口周辺整備 2021.9.10～10月中旬(予定)
 - 地表までの埋め戻し 2021.10月下旬～12月中旬(予定)
- ・換気立坑
 - 櫓防音ハウス:完了 2021.7.19～9.3
 - 巻上機室 2021.10月中旬～11月上旬(予定)
 - 坑口設備(座張り、蓋、EV乗り場)、坑口周辺整備 2021.10月下旬～11月上旬(予定)
 - 地表までの埋め戻し 2021.11月中旬～12月中旬(予定)

地下水の環境モニタリング調査



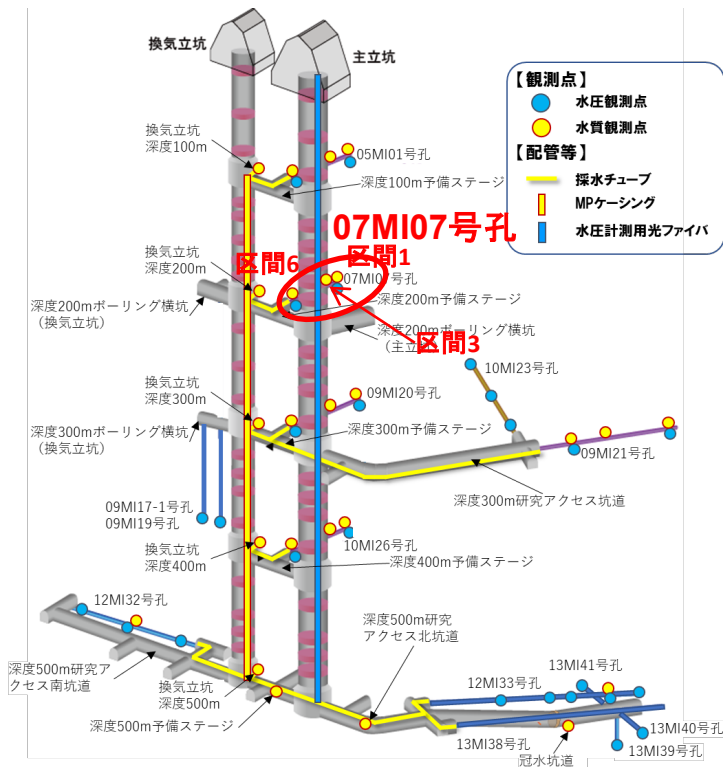
環境モニタリング調査を行う地上ボーリング孔の位置図



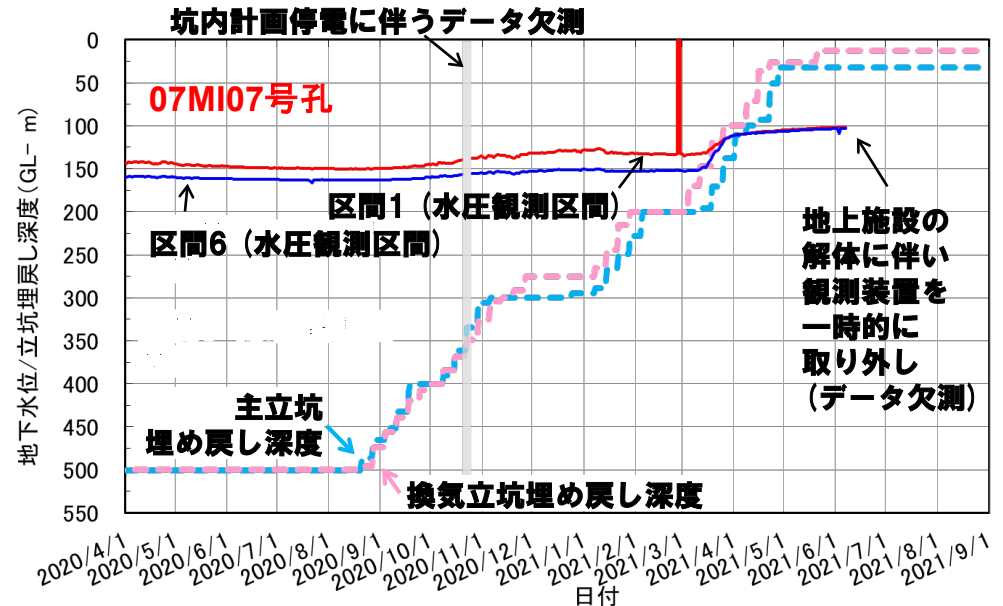
研究坑道内における環境モニタリング調査の位置図

地下水の環境モニタリング調査

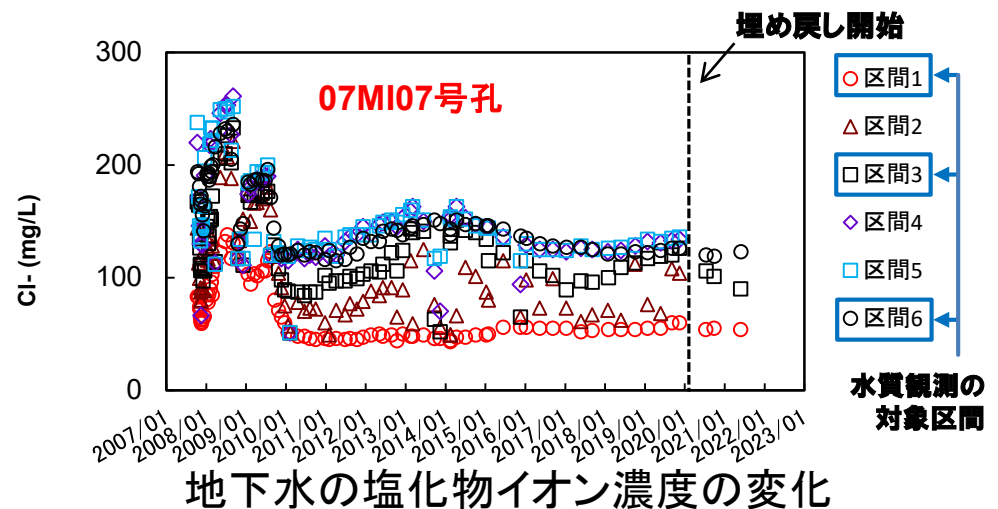
○地下水の水圧・水質の観測結果



環境モニタリング調査の位置図(研究坑道内)

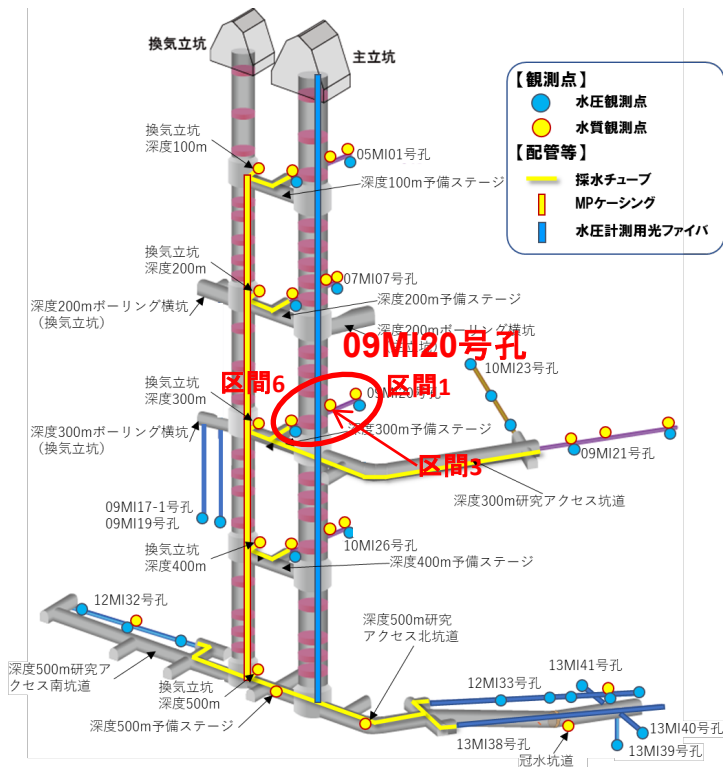


埋め戻しの進捗に伴う地下水の水圧変化

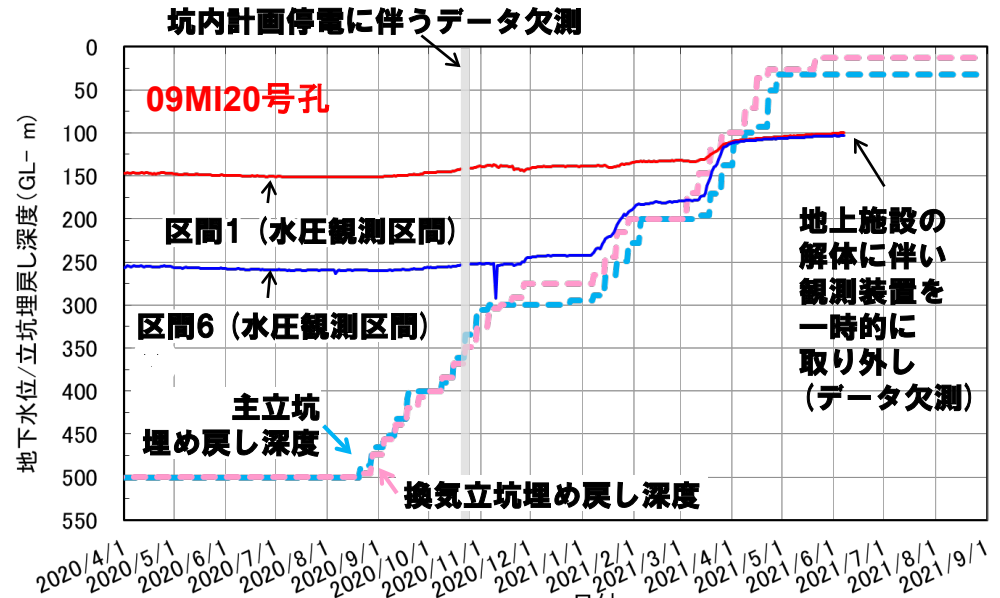


地下水の環境モニタリング調査

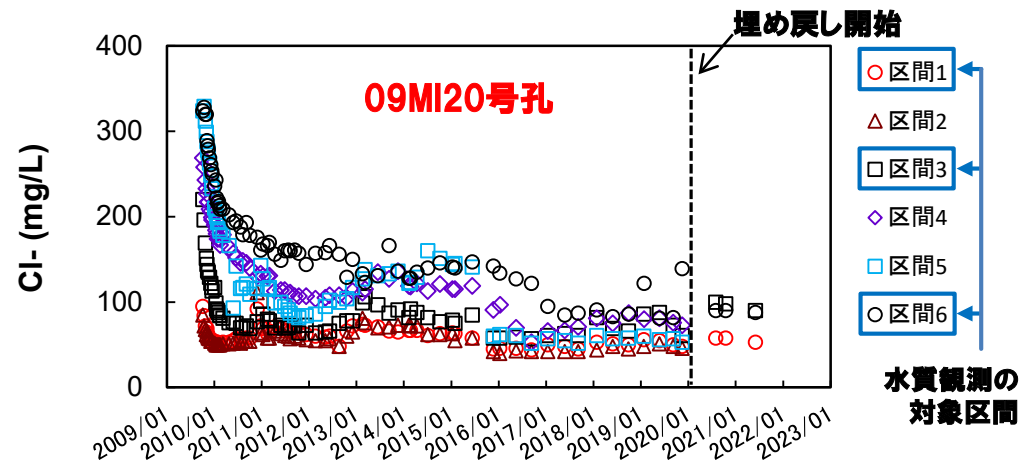
○地下水の水圧・水質の観測結果



環境モニタリング調査の位置図(研究坑道内)



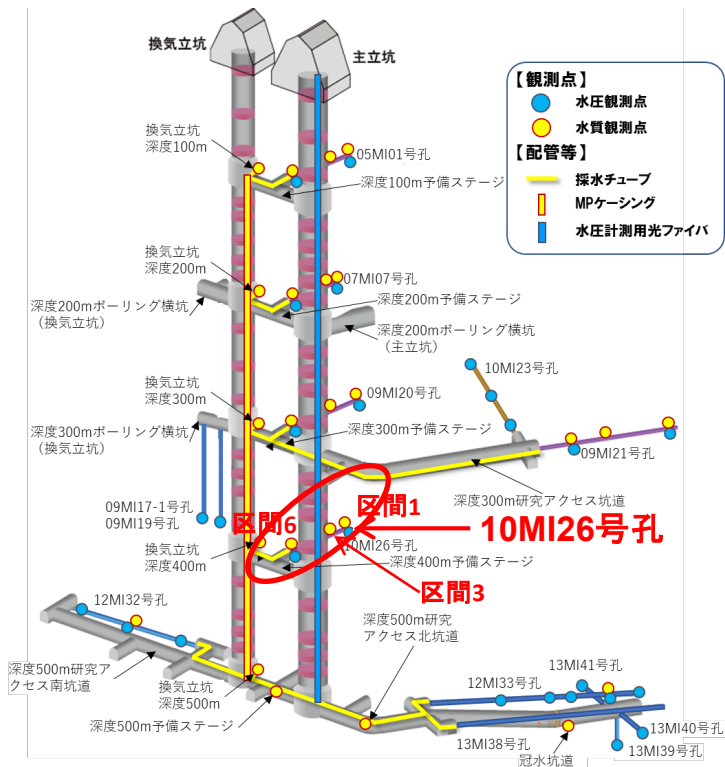
埋め戻しの進捗に伴う地下水の水圧変化



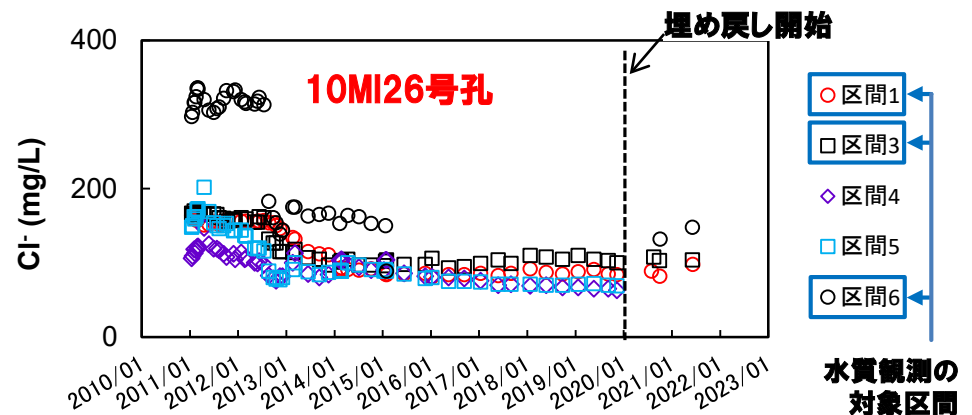
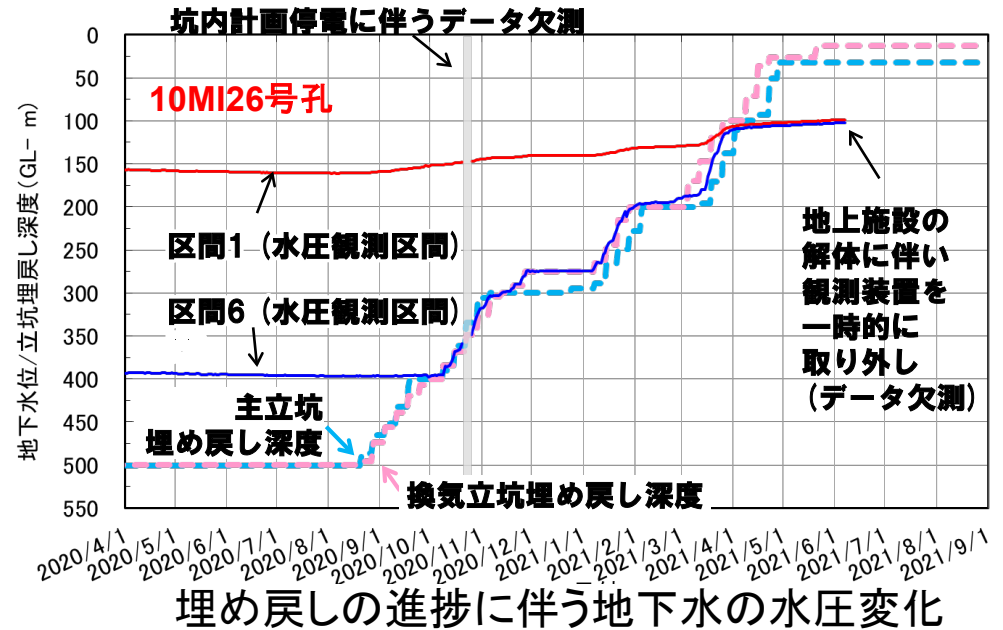
地下水の塩化物イオン濃度の変化

地下水の環境モニタリング調査

○地下水の水圧・水質の観測結果



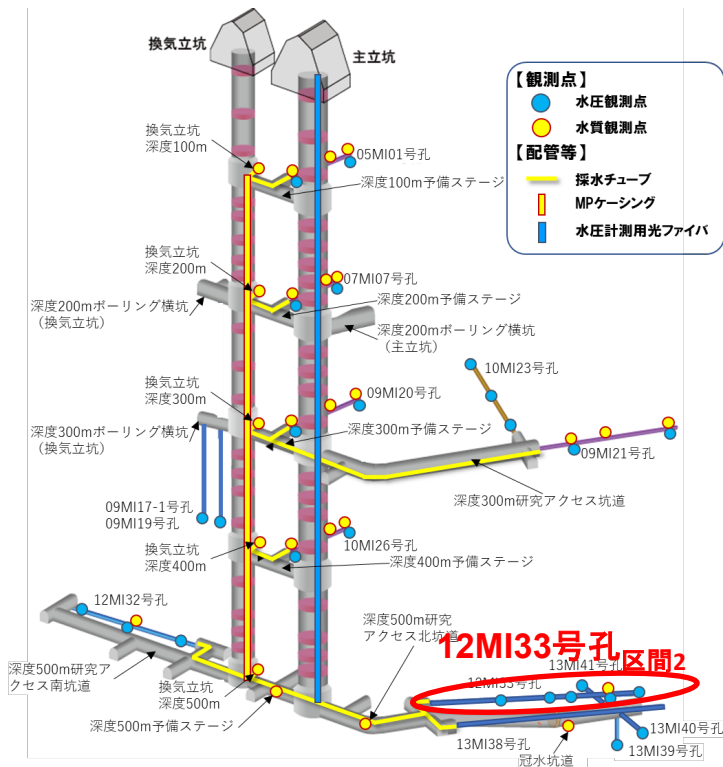
環境モニタリング調査の位置図(研究坑道内)



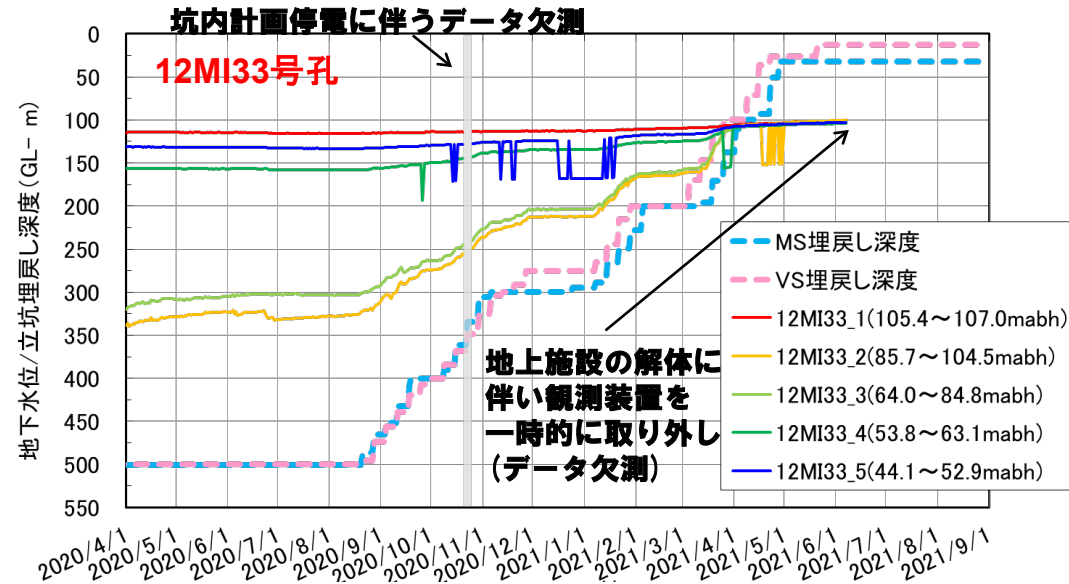
地下水の塩化物イオン濃度の変化

地下水の環境モニタリング調査

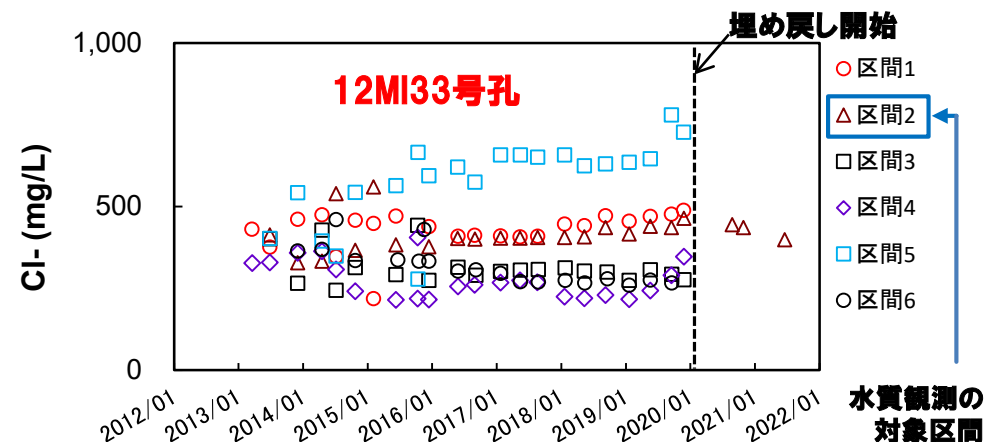
○地下水の水圧・水質の観測結果



環境モニタリング調査の位置図(研究坑道内)



埋め戻しの進捗に伴う地下水の水圧変化



地下水の塩化物イオン濃度の変化

地下水の環境モニタリング調査

○モニタリングシステムの有効性確認(実証研究)

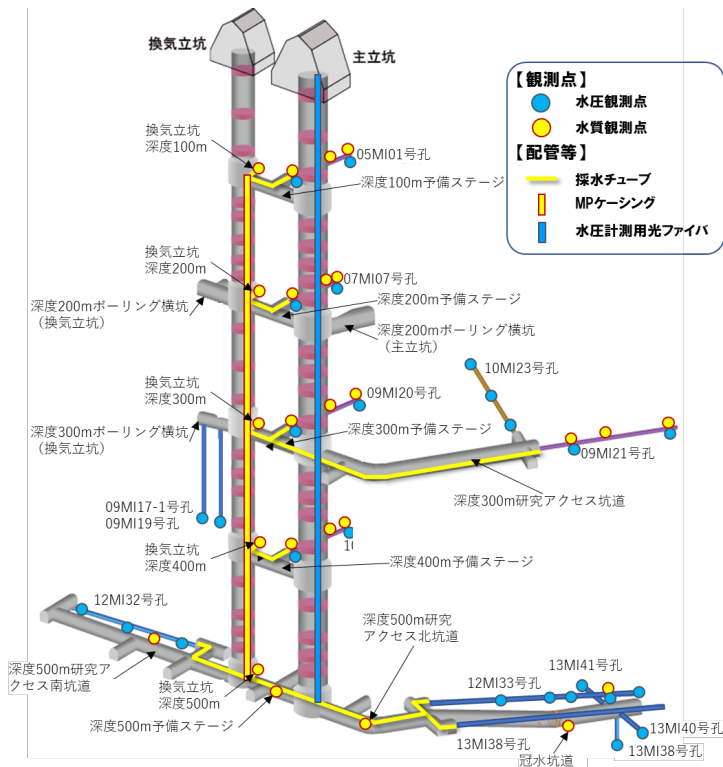
現 状

モニタリングシステムの水圧観測機能については、装置全体の設置が完了しており、地下水の水圧観測を通して正常に稼働していることを確認した。

- 地下水の採水機能については、採水作業を通して深度500mから深度100mまでの区間において正常に稼働していることを確認した。
また、システムの採水管を**深度30mから12mまで延長した(令和3年5月)**。

今後の予定

- 地下水の採水機能については、換気立坑の埋め戻しの進捗に合わせ、残る深度**12m**から地表まで採水管を延長し、本システムを完成させる。
完成後、システム全体の機能確認を行い、本システムの有効性を評価する。



環境モニタリングシステムの配置図

データの整理と活用方針

- 令和元年度末の研究終了までに取得した各種データについて、研究開発報告書類として公表済み。

例)

「超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究: 瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集 (2019年度)」

(JAEA-Data/Code 2020-012)

「超深地層研究所計画における地下水の水圧長期モニタリング (2017～2019年度)」

(JAEA-Data/Code 2020-010)

「超深地層研究所計画における研究坑道での湧水量計測データ集: 2019年度」

(JAEA-Data/Code 2020-015) など

- 坑道埋め戻し時のデータについては、令和4年度に研究開発報告書類として公表予定。
- 坑道埋め戻し後のデータ(～令和8年度)についても研究開発報告書類として適宜公表していく。
- 得られたデータの活用に関しては、外部資金の活用も視野に引き続き検討していく。

参考資料：地上施設解体状況



令和3年10月5日撮影

地上施設解体状況

管理棟、車庫棟解体：2020.12.7～2021.2.12【完了】



解体前



解体作業(2020.12.24)



解体完了(2021.2.12)

排水処理設備解体：2021.5.10～2021.7.2【完了】



解体前



解体作業(2021.6.8)



解体完了(2021.7.2)

地上施設解体状況

主立坑 巻上機室解体:2021.7.5～2021.7.19【完了】



解体作業(2021.7.5)



解体作業(2021.7.13)



解体完了(2021.7.19)

主立坑 櫓防音ハウス解体:2021.7.26～2021.9.3【完了】



解体作業(2021.7.27)



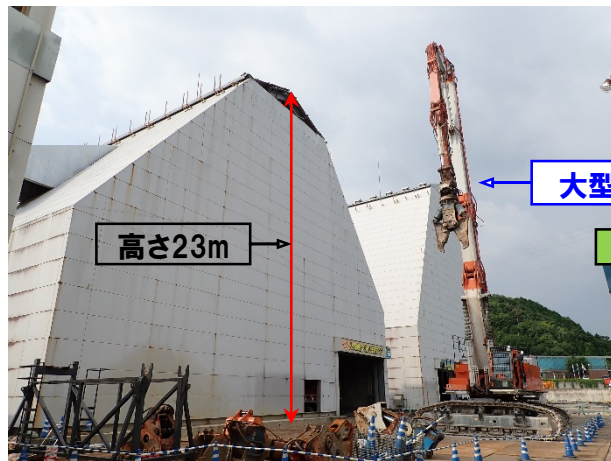
解体作業(2021.8.2)



解体完了(2021.9.3)

地上施設解体状況

換気立坑 櫓防音ハウス解体:2021.7.19～2021.9.3【完了】



解体作業(2021.7.21)

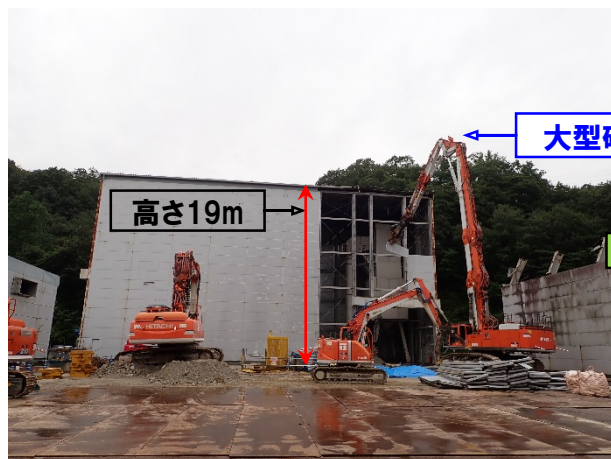


解体作業(2021.7.27)



解体完了(2021.9.3)

コンクリートプラント解体:2021.9.8～2021.10月中旬予定(作業中)



解体作業(2021.9.8)



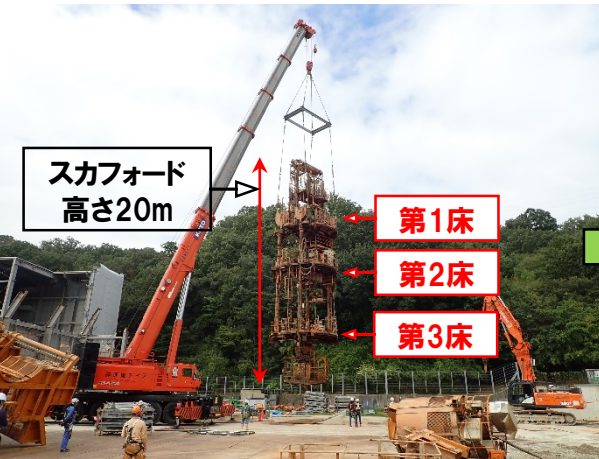
解体作業(2021.9.10)



解体作業(2021.9.28)

地上施設解体状況

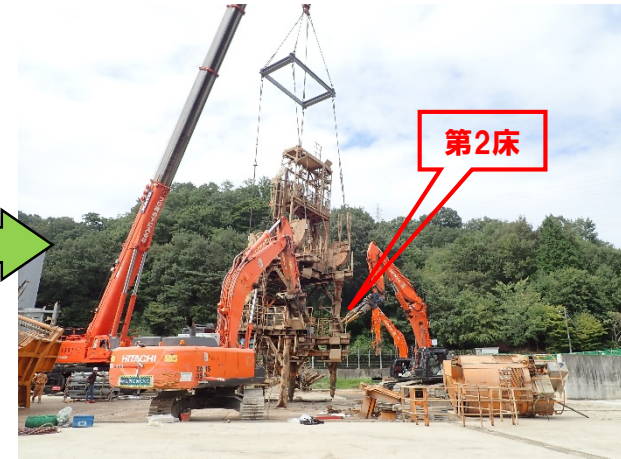
主立坑 坑口設備(坑口座張り、蓋、EV乗り場)、スcaffold解体:2021.9.10~2021.9.28【完了】



スcaffold解体作業(2021.9.21)
立坑内からスcaffold全体を吊り上げ



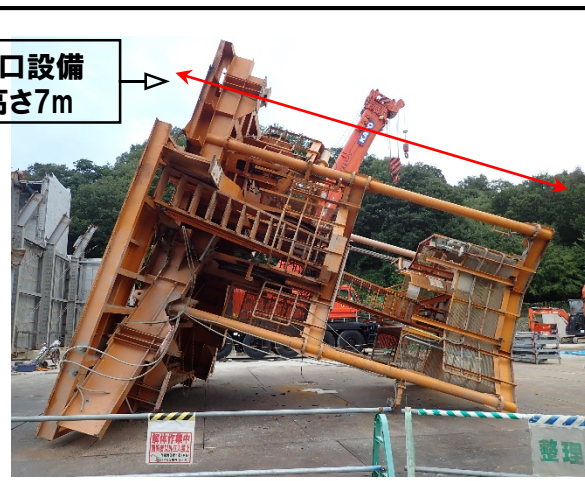
スcaffold第3床 破砕機で切り離し
(切り離し後、別途地上で解体)



スcaffold第2床 破砕機で切り離し
(切り離し後、別途地上で解体)



主立坑 坑口設備(坑口座張り、蓋、EV乗り場:一体物)解体作業(2021.9.14)



スcaffold第1床 地面に着床
(別途地上で解体)



未来へげんき
To the Future / JAEA

ご清聴ありがとうございました