

深地層の研究施設計画に関する報告会2020

3. 超深地層研究所計画(瑞浪)

1) 必須の課題成果取りまとめ報告書と令和2年度以降の計画

2020年12月1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

部長 笹尾 英嗣

報告の内容

- **超深地層研究所計画の概要**
- **必須の課題成果取りまとめ報告書の概要**
- **研究所の活用と研究成果のアウトリーチ**
- **令和2年度以降の計画について**

超深地層研究所計画の概要

超深地層研究所計画の経緯

- 1995年8月 研究所計画の公表
- 1995年12月 **地層科学研究に係る協定**締結
- 1996年4月 正馬様用地において、研究所計画の開始
- 2002年1月 瑞浪市と**土地賃貸借契約及び協定**を締結
- 2002年4月 瑞浪超深地層研究所の開所(市有地における第1段階の調査研究開始)
- 2002年7月 用地造成工事着工
- 2003年7月 立坑掘削工事着工
- 2005年11月 岐阜県及び瑞浪市と**環境保全協定**を締結
- 2014年9月 機構改革計画に基づく「地層処分技術に関する研究開発報告書」－今後の研究課題について－の公表
- 2020年1月 令和2年度以降の超深地層研究計画を公表
- 2020年2月 坑道埋め戻しに着手



東濃地科学センターの施設

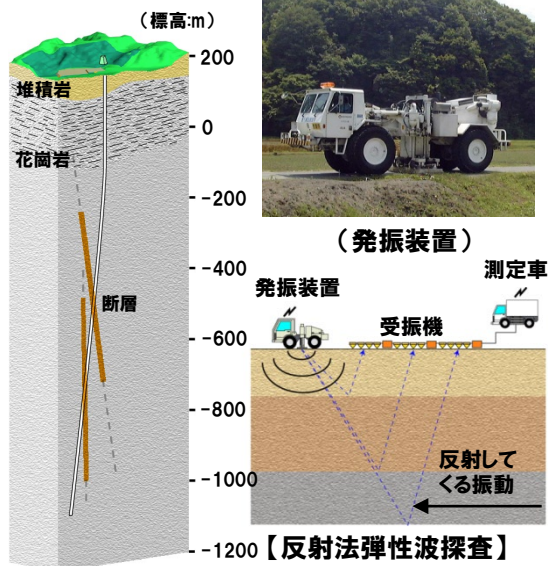
超深地層研究所計画の進め方

【目標】

- ① 深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備
- ② 深地層における工学技術の基盤の整備

【第1段階:H8-16】

地表からの調査予測研究段階



(ボーリング調査)

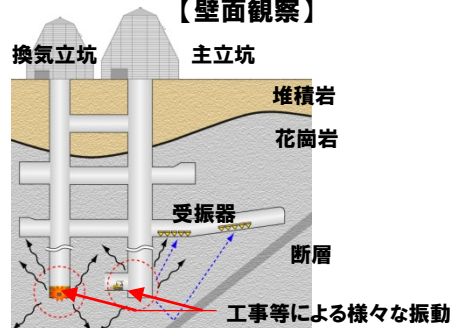
- 地表からの調査研究による地質環境モデルの構築
- 坑道建設前の深部地質環境の状態の把握

【第2段階:H16-25】

研究坑道の掘削を伴う研究段階



【壁面観察】



【研究坑道内での物理探査】

- 坑道掘削に伴う調査研究による地質環境モデルの構築
- 坑道の施工・維持・管理に関わる工学技術の有効性の確認

【第3段階:H22-R1】

研究坑道を利用した研究段階



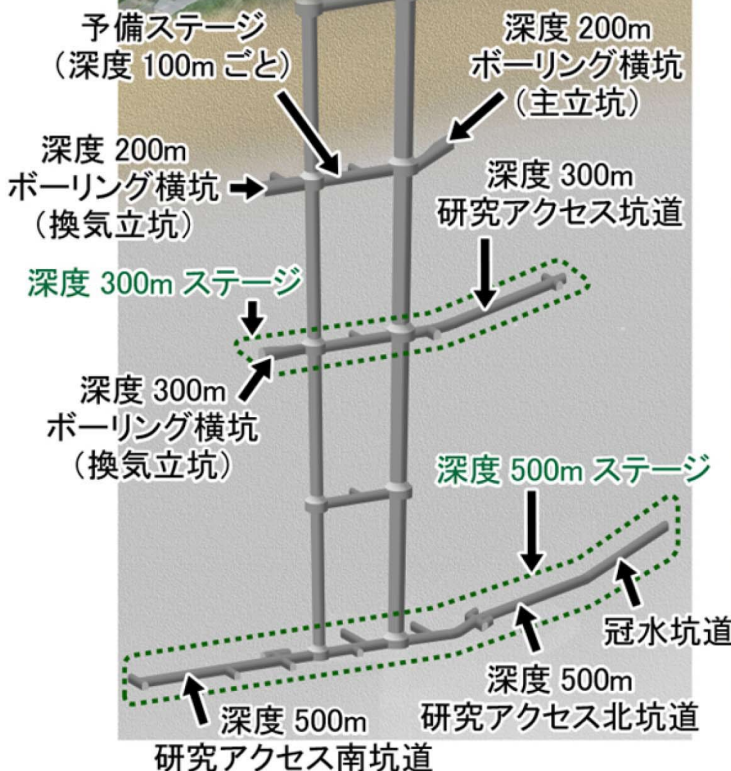
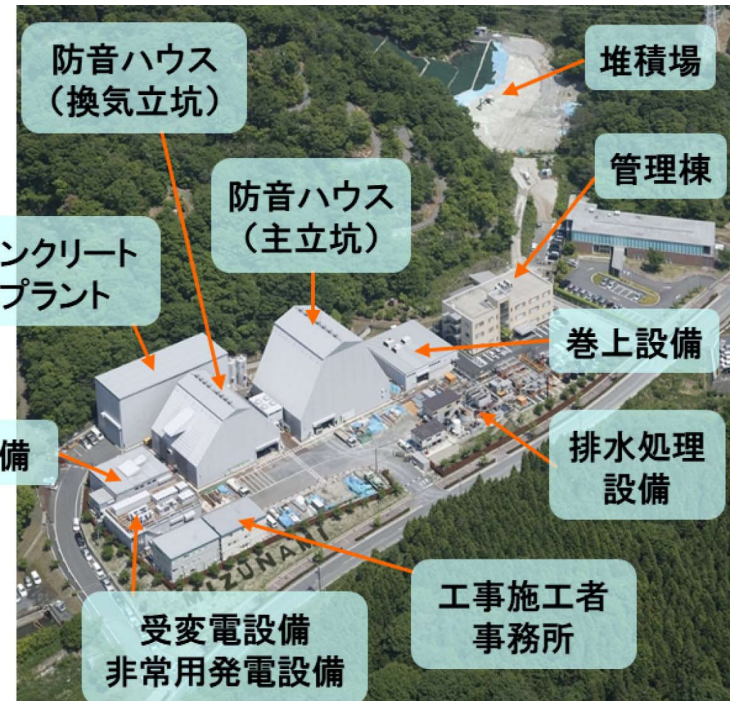
【再冠水試験】



【岩盤中の物質の移動に関する調査研究】

- 坑道を利用した調査研究による地質環境モデルの構築
- 深地層における工学技術の有効性の確認

瑞浪超深地層研究所の施設構成



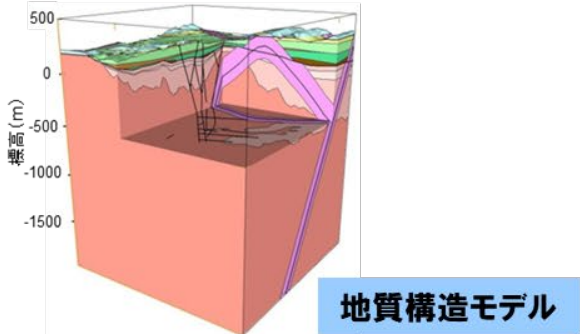
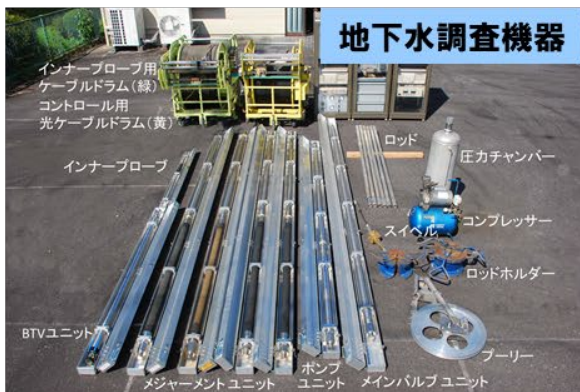
【深度500m研究アクセス南坑道】



【深度500m研究アクセス北坑道】

第1段階・第2段階で得られた主な成果

地質環境の調査・モデル化 手法の開発



- ◆ 地上から地下深部の地質環境特性を把握するための調査技術及び解析技術を整備

坑道掘削に伴う地質環境の 変化に関する調査・解析 技術の開発



- ◆ 坑道掘削に伴う地下水の水圧・水質、岩盤の変位等を捉えるための観測技術及び予測解析技術を整備
- ◆ 坑道掘削工事に伴う地質環境の変化に関する知見を蓄積

地下深部に安全に坑道を 掘削する技術の確立



- ◆ 深度500mにおける高い水圧環境の中で安全に坑道を建設・維持する技術及び坑内湧水を抑制する技術などを実証

深地層の研究施設計画の「残された必須の課題」

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の中長期目標を達成するための計画（中長期計画）（平成27年4月1日～平成34年3月31日）

《深地層の研究施設計画》

- ◆ 超深地層研究所計画については、地下坑道における工学的対策技術の開発、物質移動モデル化技術の開発及び坑道埋め戻し技術の開発に重点的に取り組む。これらに関する研究については、**平成31年度末までの5年間で成果を出すことを前提に取り組む**。また、**同年度末までに、跡利用を検討するための委員会での議論も踏まえ、土地賃貸借期間の終了（平成34年1月）までに埋め戻しができるようにという前提で考え、坑道埋め戻しなどのその後の進め方について決定する。**（瑞浪超深地層研究所関連抜粋）

（以下、令和2年4月1日に変更認可された計画で追記）

令和2年度以降においては、坑道埋め戻しなどのその後の進め方について定めた「令和2年度以降の超深地層研究所計画」に基づき、土地賃貸借期間の終了までに坑道の埋め戻し及び地上施設の撤去を行う。また、埋め戻し期間中は、埋め戻しに伴う地下水の回復状況を確認するために、実証研究を兼ねてモニタリングシステムの有効性を確認する。

必須の課題

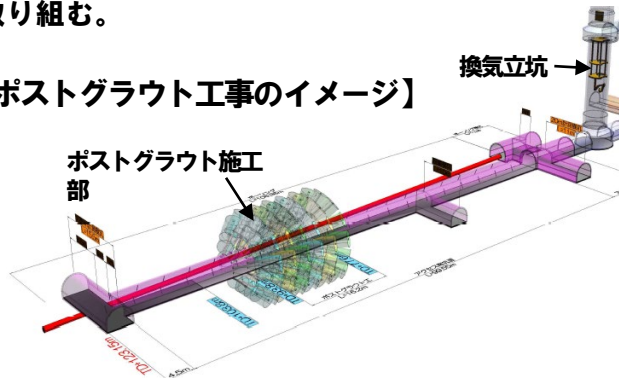
①地下坑道における工学的対策技術の開発

- ◆大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術
 - ◆地下水管理技術
- 【概要】

深度500mの研究坑道において、坑道への湧水量をプレグラウトとポストグラウトの組合せによって制御可能とするウォータータイトグラウト施工技術を実証する。

また、地下水排水処理技術等の地下水管理技術の高度化にも取り組む。

【ポストグラウト工事のイメージ】

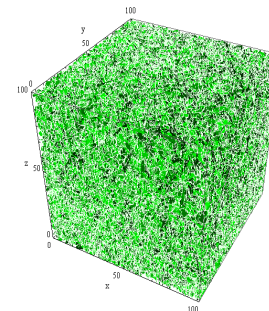


②物質移動モデル化技術の開発

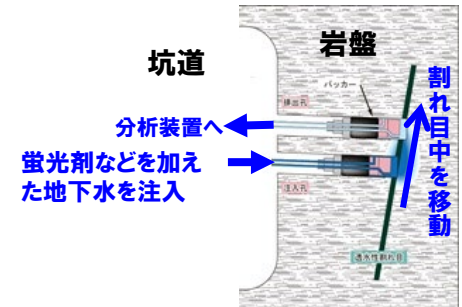
- ◆長期的な変遷を含めた地下深部におけるわが国固有の亀裂ネットワーク中の地下水流動・物質移動に関する試験及びモデル化技術
- 【概要】

深度500mの研究坑道において、花崗岩中の割れ目での物質の移動現象を理解し、モデル化するための調査解析を実施する。

また、割れ目の透水性及び地下水の流動・水質の長期的変化や地下水流動の緩慢さを明らかにするための調査を実施する。



【割れ目分布モデル】

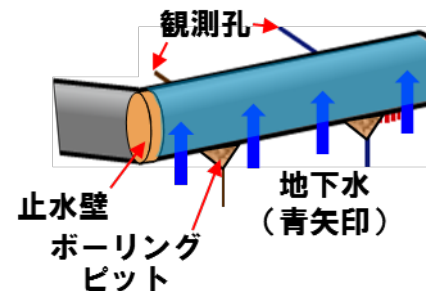


【研究坑道内での物質移動試験の例】

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
- 【概要】

深度500mの研究坑道において、坑道の一部を埋め戻し、地下水を自然に冠水させることによって、地下水の水圧・水質及び坑道周辺岩盤の化学的・力学的変化を観察し、地質環境の回復能力等を評価すると共に、地質環境に応じた埋め戻し技術の構築を目指す。また、長期の観測に必要なモニタリング技術の開発も実施する。



【再冠水試験のイメージ】



【モニタリング装置】

必須の課題成果取りまとめ報告書の概要

必須の課題における研究項目

1. 地下坑道における工学的対策技術の開発

1.1 地下水抑制技術の開発

1.1.1 ウォータータイトグラウト施工技術の実証

1.1.2 施工対策影響評価技術の開発※※

1.2 地下水管理技術の開発

1.2.1 地下水排水処理技術の開発

2. 物質移動モデル化技術の開発

2.1 不均質な割れ目ネットワークのモデル化手法の開発

2.1.1 実際の割れ目の性状を考慮した割れ目ネットワークのモデル化手法の整備

2.1.2 花崗岩中での物質移動現象の理解※※

2.1.3 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

2.2 地質環境の長期変遷に関する解析・評価技術の開発

2.2.1 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

2.2.2 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※※

3. 坑道埋め戻し技術の開発

3.1 坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術の開発

3.1.1 冠水坑道での再冠水試験

3.1.2 岩盤の破壊現象評価

3.1.3 500m坑道での埋め戻し試験※

3.2 モニタリング技術の開発

※資源エネルギー庁受託事業を活用して実施

※※一部を資源エネルギー庁受託事業を活用して実施

地下坑道における工学的対策技術の開発

1.1 地下水抑制技術開発

1.1.1 ウォータータイトグラウト施工技術の実証

(研究の背景・狙い・目標・意義)

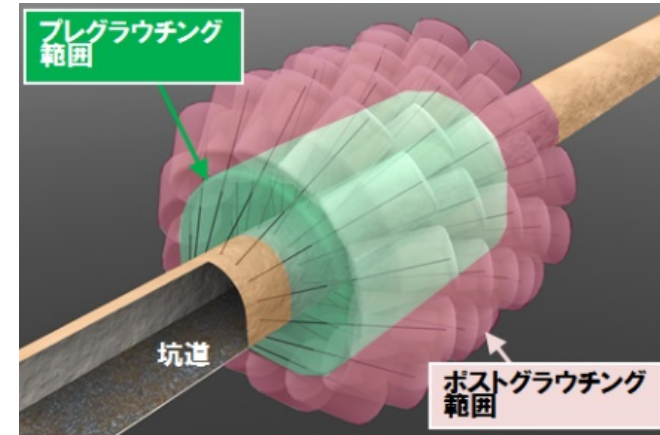
- ✓ 地下深部における高い水圧の状態下で十分に湧水を抑制する技術の確立は地層処分事業において重要な課題の一つ。
- 地下深部における高水圧の湧水を抑制することを目的として、グラウチングの技術開発を実施。

(実施内容)

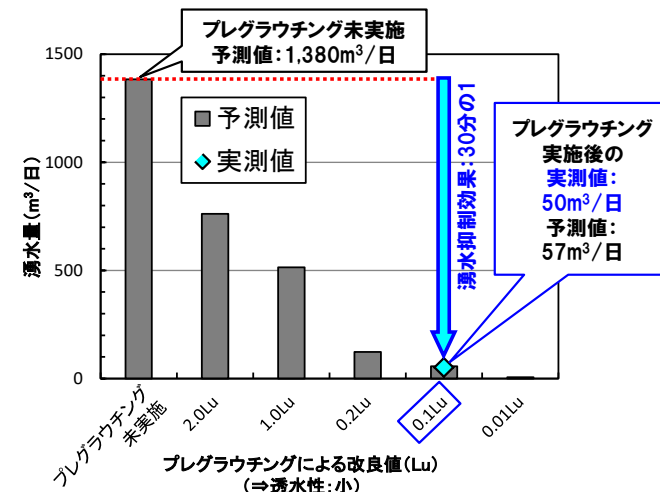
- ✓ グ라우チング後の湧水抑制目標を達成するために必要な岩盤の透水性低下割合や注入範囲を設定するために、グラウチング効果を考慮できる理論式を考案し適用。
- ✓ 高水圧下においても湧水を抑制できるグラウチング技術を開発。
- ✓ 深度500mにおいては坑道掘削後にポストグラウチングを追加実施することにより、さらなる湧水抑制を実現。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- **地層処分場の維持コストの低減や人工バリアの施工精度の向上に寄与**
 - ・プレグラウチングとポストグラウチングの併用により、グラウチングを実施しない場合に対して約100分の1まで低減。
 - ・高水圧下での一般建設工事への適用を期待。



プレグラウチングとポストグラウチングの概念図



プレグラウチングの効果の評価結果

地下坑道における工学的対策技術の開発

1.1 地下水抑制技術開発

1.1.2 施工対策影響評価技術の開発

(研究の背景・狙い・目標・意義)

- ✓ セメントや鋼材等の人工材料は時間経過とともに劣化し、それにより空洞周辺の地質環境に変化が生じる可能性があるものの、人工材料が坑道周辺の地質環境に与える影響の定量的検討は未実施。
- 研究坑道周辺に注入したグラウト材(主にセメント)に着目し、それが坑道周辺の地質環境に及ぼす影響を把握・評価するための技術開発を実施。

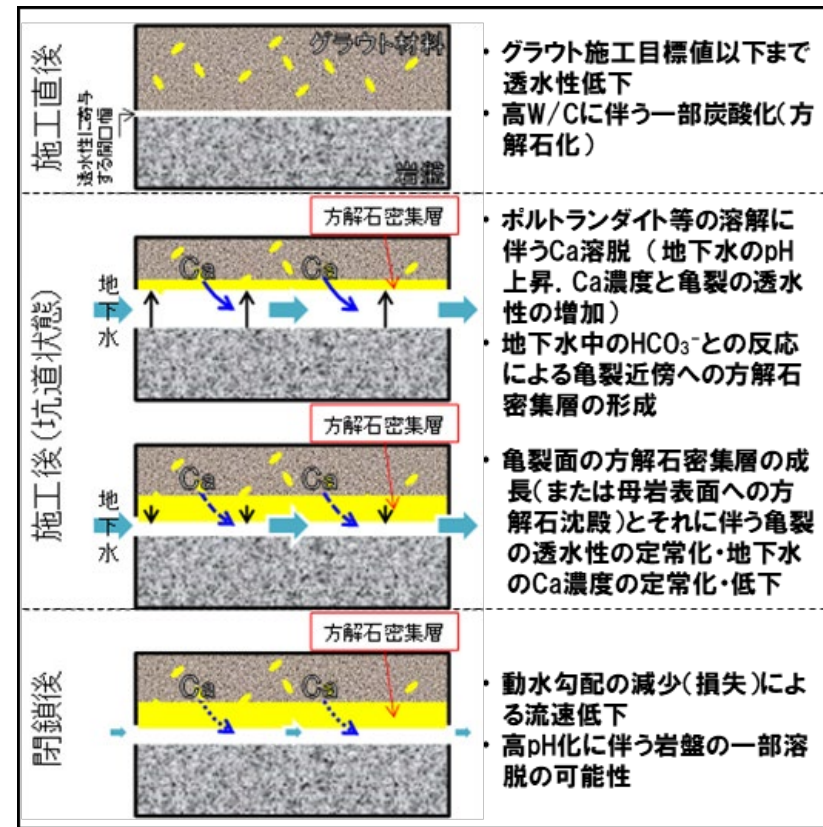
(実施内容)

- ✓ グラウチング実施時期が異なる施工場所で採取したボーリングコアを用いた各種の室内分析を実施。
- ✓ グラウト材が地質環境に及ぼす影響を把握・評価する調査手法、およびグラウト材の存在が及ぼす地質環境への影響に関する概念モデルを構築。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

➤ グラウト材の存在が及ぼす地質環境への影響を評価

- ・グラウト材の岩盤への影響の経時変化を把握するために必要な試料作製方法や分析方法を確立。
- ・グラウト材との接触による鉱物の形成や溶脱などの変化は認められず、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くなることを確認。



グラウト材と岩盤の相互作用メカニズムの変遷に係る概念モデル

地下坑道における工学的対策技術の開発

1.2 地下水管理技術の開発

1.2.1 地下水排水処理技術の開発

(研究の背景・狙い・目標・意義)

- ✓ 研究坑道の湧水には、自然由来のふっ素とほう素が比較的高濃度で含まれているため、凝集沈殿処理及びイオン交換処理によってふっ素及びほう素を除去。
- ふっ素及びほう素の処理に関する最新の技術的知見を調査し、排水処理の効率化の可能性を検討。

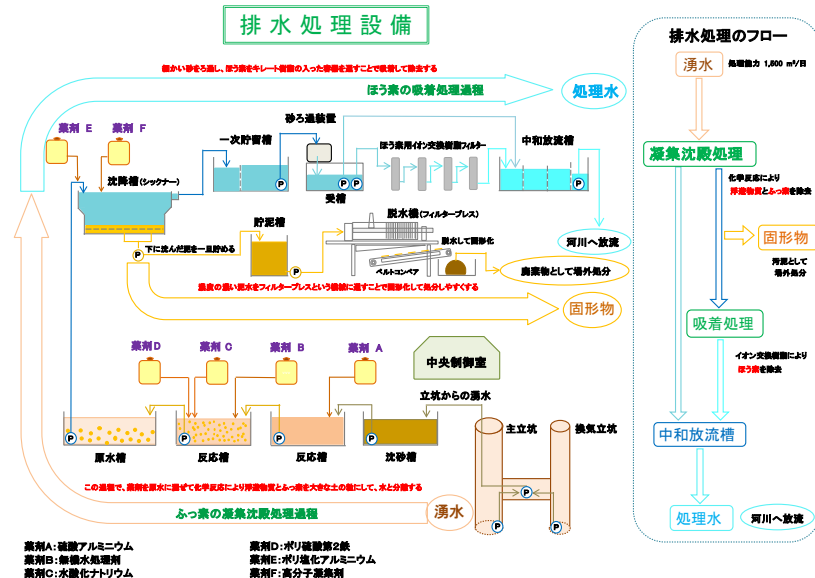
(実施内容)

- ✓ ふっ素及びほう素に関する排水処理技術に関する最新の技術的知見を文献により調査。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- **大規模地下施設の建設・維持管理における環境負荷及びコスト低減に必要な知見を提供。**

- ・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、現行の処理方法が現時点で適切であることを確認。
- ・実証された排水処理技術は、日本全国に分布する鈹山跡地の汚染水処理にも応用可能。



現行の排水処理施設(写真)と処理フロー

物質移動モデル化技術の開発

2.1 不均質な割れ目ネットワークのモデル化手法の開発

2.1.1 実際の割れ目の性状を考慮した割れ目ネットワークのモデル化手法の整備

(研究の背景・狙い・目標・意義)

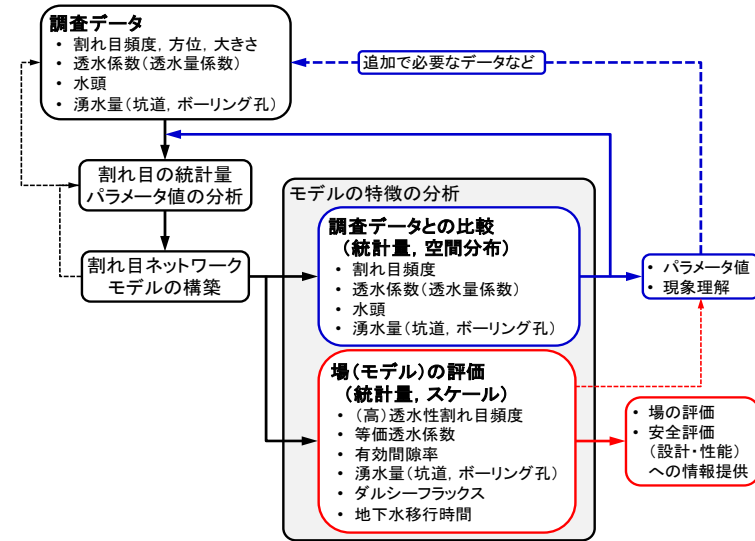
- ✓ 亀裂性岩盤では、放射性物質の主要な移行経路となる割れ目の分布特性や水理学的特性の評価が重要。
- 割れ目の分布や水理学的特性は不均質であるため、不均質性を表現可能な割れ目ネットワーク(DFN)モデルの構築手順や妥当性確認に至る一連の方法論を提示。

(実施内容)

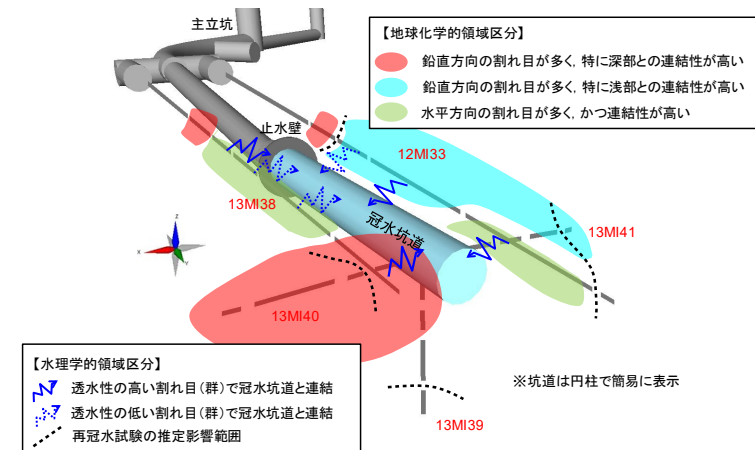
- ✓ 研究坑道の壁面調査やボーリング調査結果を用いてDFNモデルを構築し、DFNモデルの特徴の分析を通じてDFNモデル化手法の有効性と限界を整理。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- **岩盤の水理特性を地下施設のレイアウト設計や建設、安全評価に反映**
 - ・割れ目の湧水の有無に着目したデータ解析や割れ目半径との相関性を考慮した透水性の設定が、岩盤中の割れ目の分布特性や透水性を統計的に再現する上で有効。
 - ・DFNモデルを用いた地下水流動解析や粒子追跡解析によって、亀裂性岩盤の不均質性や湧水可能性を定量的に評価。



モデルの構築と評価の流れ(概念図)



割れ目分布の不均質性を示した概念図

物質移動モデル化技術の開発

2.1不均質な割れ目ネットワークのモデル化手法の開発

2.1.2 花崗岩中での物質移動現象の理解

(研究の背景・狙い・目標・意義)

- ✓ 従来は主にトレーサー試験によって割れ目の開口幅や割れ目内分散長, 分配係数等を推定。
- ✓ 日本のように割れ目頻度が高く, 割れ目には充填物が含まれていることが多い岩盤を対象として, 物質移動特性を把握する手法の提示を目標に技術開発を実施。

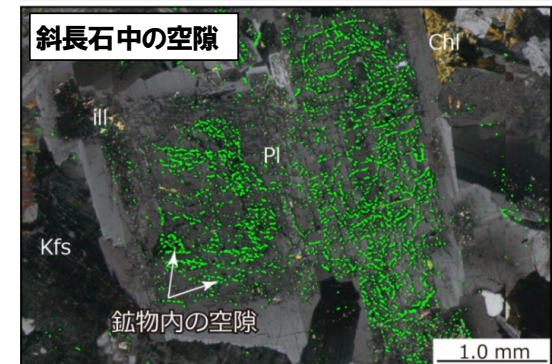
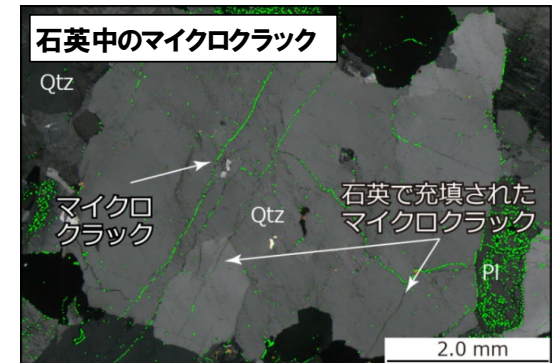
(実施内容)

- ✓ 単孔式および孔間の物質移動試験, 透水性割れ目およびその周辺の岩石の室内物質移動試験を実施し, 物質移動に関するパラメータを取得。
- ✓ 長期の物質移動現象を把握するために, 割れ目とその周辺岩盤, 地下水を対象として, ウラン系列核種などの分布を把握。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

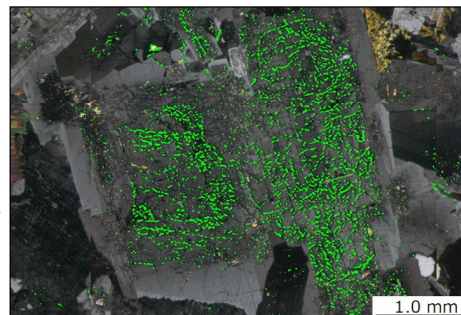
➤ 花崗岩中の物質移動特性を提示

- ・原位置トレーサー試験および評価技術を整備。
- ・花崗岩中の微小空隙を把握する手法を整備し, 健岩部における物質移動プロセスを明示。
- ・天然トレーサーを用いた長期にわたる物質移動現象を把握する手法を整備。

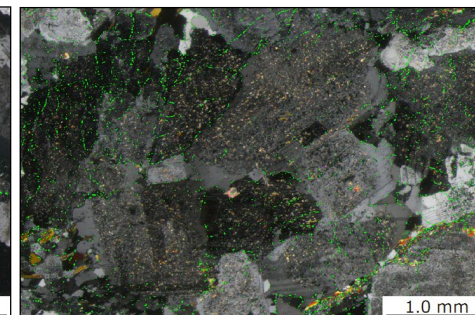


土枝花崗岩中の微小空隙(緑色の領域)

土枝花崗岩



グリムゼル花崗閃緑岩



土枝花崗岩とグリムゼル花崗閃緑岩の微小空隙(緑色の領域)

物質移動モデル化技術の開発

2.1 不均質な割れ目ネットワークのモデル化手法の開発

2.1.3 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

(研究の背景・狙い・目標・意義)

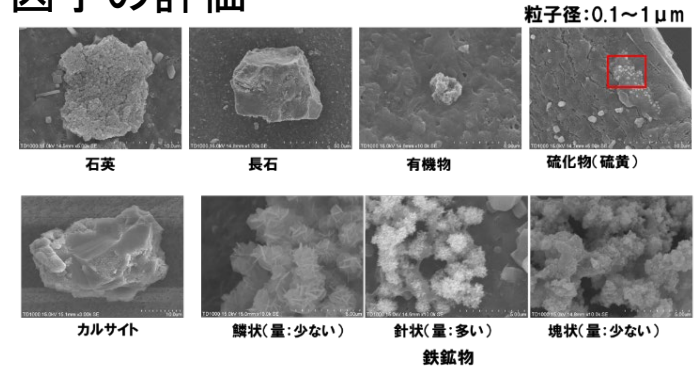
- ✓ 従来、コロイド、有機物、微生物とアナログ元素との相互作用の研究により、コロイドの核種移行への影響が例示。
- 地下深部における、コロイド、有機物、微生物の物質移動への影響に関する基本情報を取得し、元素の輸送・遅延量の評価手法の構築を目標とした研究開発を実施。

(実施内容)

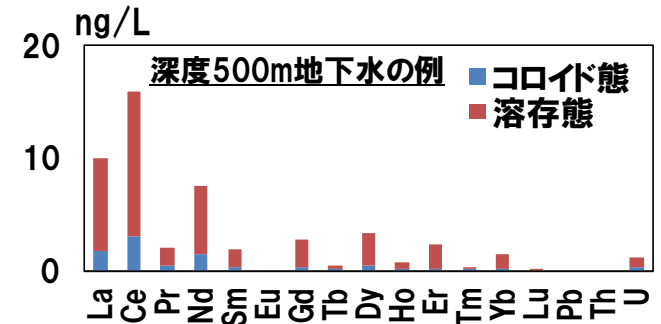
- ✓ 天然地下水および坑道の建設・閉鎖の影響を受けた地下水(深度500m冠水坑道)中のコロイド、有機物、微生物の存在量や各種元素との相関を解析。
- ✓ 放射性元素の移動プロセスに対する影響を考察するため、天然の希土類元素標(アナログ元素)を分析。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- **ボーリング孔を利用したコロイド調査技術を構築し、花崗岩中の地下水に含まれるコロイド粒子が元素の移動プロセスに与える影響を評価**
 - ・坑道閉鎖環境では、吹付セメント等に溶存態希土類元素が付着し、方解石に過飽和な環境下で、希土類元素を担持した炭酸塩コロイドが凝集・沈殿することで移動が抑制されることを確認。
 - ・花崗岩地下水中には、硫黄化学種やメタンを利用した代謝機能を有する微生物の生態系が存在し、地下水の水質形成(還元環境の形成など)に影響することを確認。



地下水中に認められるコロイド



地下水中のコロイド分析結果

物質移動モデル化技術の開発

2.2 地質環境の長期変遷に関する解析・評価技術の開発

2.2.1 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

(研究の背景・狙い・目標・意義)

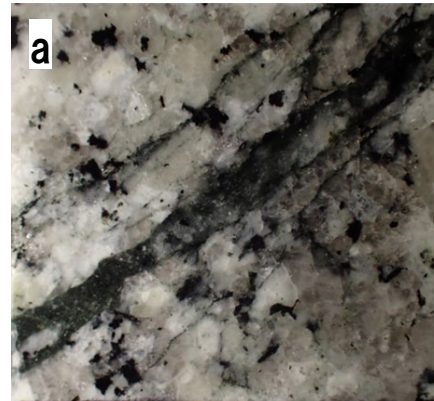
- ✓ 既往研究では、岩盤の透水性に関して、400°C~700°Cの高温流体による微細割れ目の形成や岩盤の透水性への影響が例示。
- 花崗岩の透水特性の形成過程に関わる基礎的知見を取得して、高温流体や断層の影響を評価する手法を構築することを目標。

(実施内容)

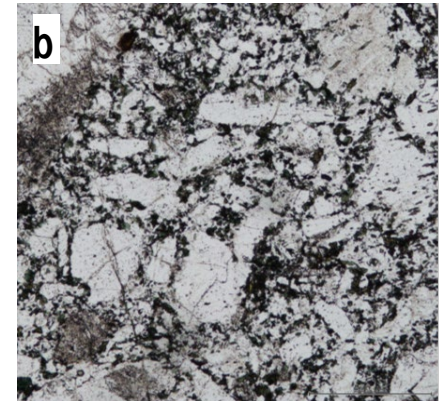
- ✓ 高温流体の痕跡である割れ目や充填鉱物の産状と形成温度に関わるコア観察，顕微鏡観察，化学組成分析・解析を実施。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

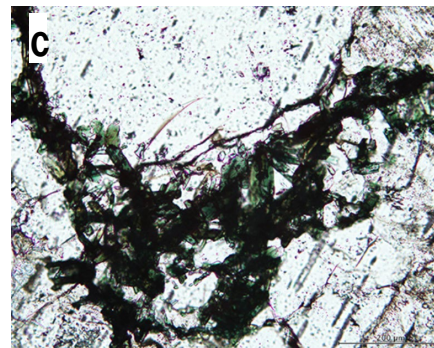
- **長期的な透水特性の変遷を例示**
 - 高温流体による割れ目および充填鉱物の形成履歴調査手法を確立。
 - 断層と高温流体による充填鉱物の形成履歴と透水性との関係の把握と長期変遷解析技術(水理地質構造概念モデル(タイプ分類))を提案。



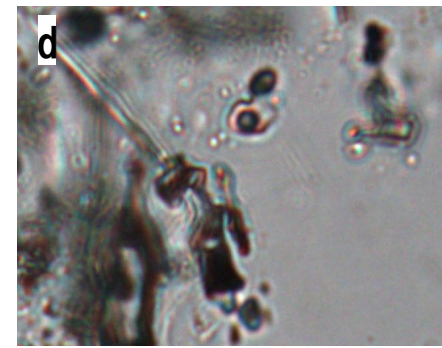
5mm



500µm



200µm



高温流体の痕跡(Glassy vein:ホルンブレンダタイプ)

a: 研磨片接写。幅2~3mmの黒脈と平行マイクロフラクチャー，破碎した石英が認められる。b: 同薄片の顕微鏡写真(オープンニコル)。黒脈には石英，長石破片の隙間に充填した細粒ホルンブレンド。c: 同，マイクロフラクチャーの開口部に析出した自形ホルンブレンド。d: 同，石英結晶中の高塩濃度流体包有物(直径約10µm)。

物質移動モデル化技術の開発

2.2 地質環境の長期変遷に関する解析・評価技術の開発

2.2.2 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

(研究の背景・狙い・目標・意義)

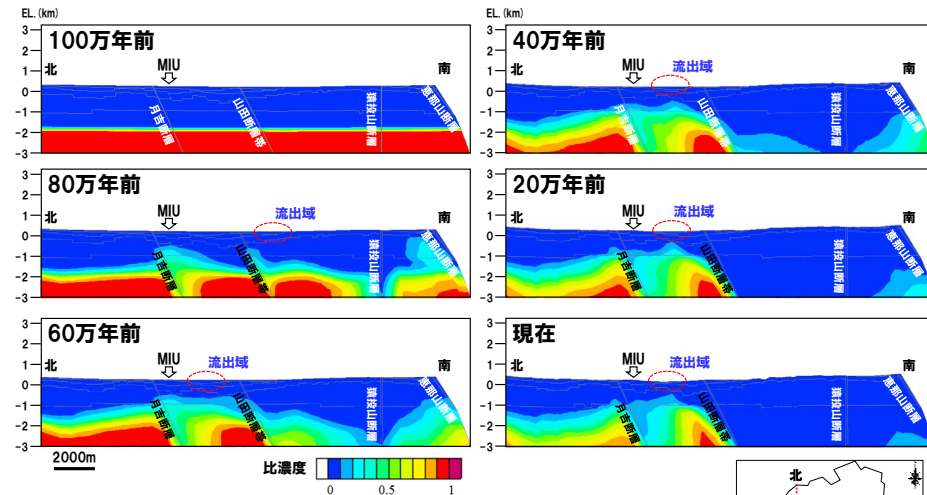
- ✓ 東濃地域に存在する深部塩水については、様々な検討がなされてきたが、起源は未解明。
- ✓ 日本では、研究事例が少なく花崗岩深部における塩水の存在は不明確であるものの、国外では、ある程度の深度以深の花崗岩深部での塩水の存在は普遍性を有する可能性があるため、その存在要因を理解しておくことは非常に重要。

(実施内容)

- ✓ これまでに得られた地下水の起源、滞留時間に関する地球化学データを再整理。
- ✓ 地下坑道で得られた地下水の ^{14}C 年代測定を行うとともに、地質環境の変遷を踏まえた地下水流動解析の結果などを参照しながら、解析的な検討を実施し得られた知見や課題を取りまとめ。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- **深部塩水の起源と、塩水が地下水水質分布に与える影響を推定**
 - ・東濃地域では、水-岩石相互作用や海水の浸透等が複合的に作用して形成されたと推定。
 - ・海水・古海水があり地下水流動の緩慢な環境では、 ^{36}Cl 、 ^4He 、酸素同位体などが有効な指標。
 - ・地下水流動が長期的に緩慢な状態にある場所では、塩水が長期にわたり保存され、他の塩分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と推定。



100万年前から現在にかけての地下水中の塩分濃度の長期変遷の推定結果

坑道埋戻し技術の開発

3.1 坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術の開発

3.1.1 冠水坑道での再冠水試験

(研究の背景・狙い・目標・意義)

- ✓ 安全性評価にあたっては、処分施設の建設・操業により乱された地下水環境の施設閉鎖後の状態を推定し、評価を行う必要性。
- 地下水環境の回復過程や長期的な定常化過程を理解し、それらを調査・解析する技術を整備。

(実施内容)

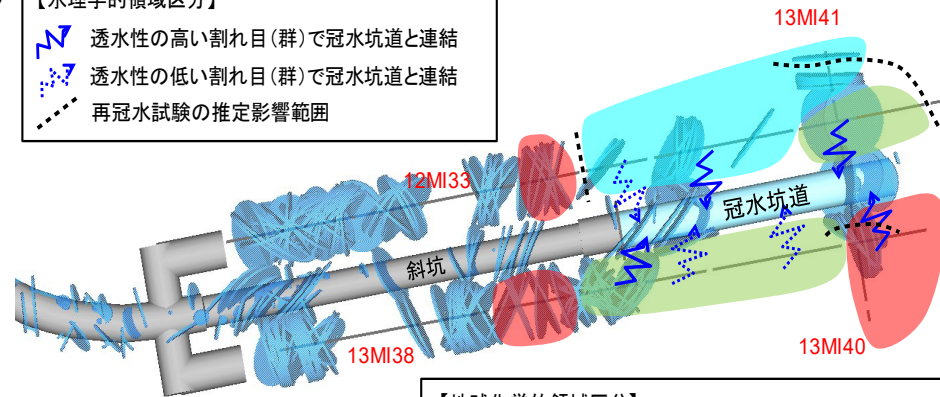
- ✓ 坑道周辺の水理地質構造の確認および物質移動特性の調査
- ✓ 止水技術の確認および冠水時の水理-力学-化学特性の観測・解析
- ✓ 予察的埋め戻し試験
- ✓ モニタリング技術開発

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- **坑道の冠水に伴う諸現象を確認するとともに、モデル化技術を構築**
 - ・地下水の水圧や水質分布の変化から坑道周辺岩盤の水みちとなる割れ目分布を概念化し、坑道周辺岩盤は数m～数十m程度の空間スケールで水理的な不連続性を確認。
 - ・既往の連成解析ソフトウェアを、岩盤不均質性のモデル化、モデル大規模化、解析速度高速化の観点で改良し、汎用性の高いツールとして整備。
 - ・湧水環境の坑道でも原位置施工後には、 10^{-9} m/s程度の均質な透水性が期待できることを提示。

【水理学的領域区分】

- 透水性の高い割れ目(群)で冠水坑道と連結
- 透水性の低い割れ目(群)で冠水坑道と連結
- 再冠水試験の推定影響範囲



【地球化学的領域区分】

- 鉛直方向の割れ目が多く、特に深部との連結性が高い
- 鉛直方向の割れ目が多く、特に浅部との連結性が高い
- 水平方向の割れ目が多く、かつ連結性が高い

坑道周辺の割れ目分布の概念

坑道埋戻し技術の開発

3.1 坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術の開発

3.1.2 岩盤の破壊現象評価

(研究の背景・狙い・目標・意義)

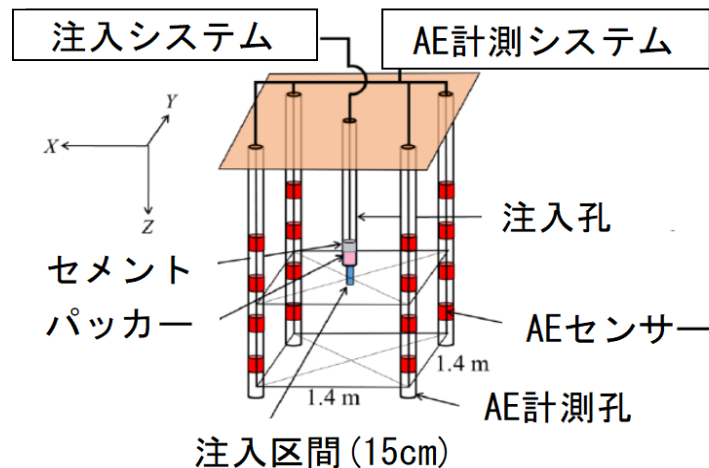
- ✓ 地下深部での空洞掘削により、周辺岩盤中に掘削影響領域が発生するが、掘削以外に坑道周辺に再配分された応力の集中による物理的損傷が発生。応力集中の範囲や物性変化のメカニズム・程度の把握は安全性評価の観点から重要。
- 深度500m研究坑道を利用して、岩盤の破壊現象の範囲や物性変化のメカニズム・程度の把握と評価手法の構築を目的とした検討を実施。

(実施内容)

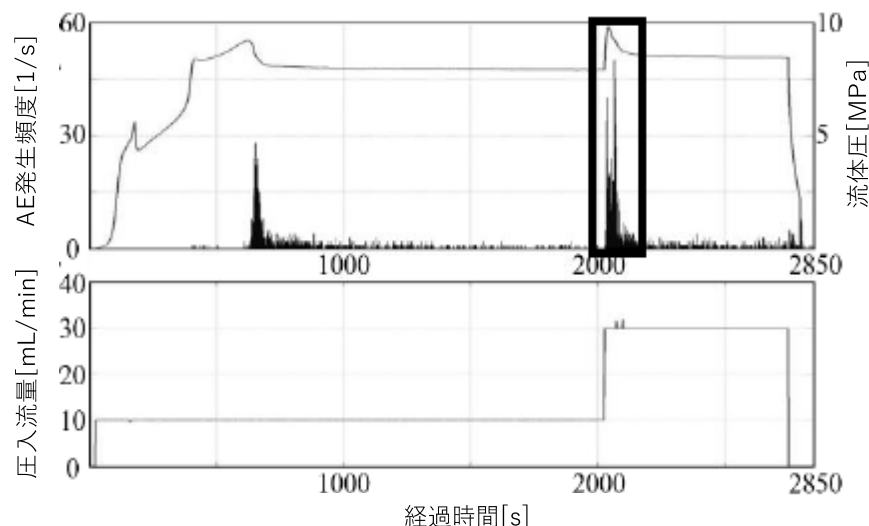
- ✓ 粘性流体注入による割れ目進展挙動の観察。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- **坑道掘削に伴う岩盤破壊現象を理解**
 - ・圧力上昇による岩盤の破壊時のき裂造成メカニズムはせん断破壊型が支配的であるが、新たなき裂発生時には引張破壊が発生することを把握。
 - ・AEを利用しその破壊領域の範囲や前兆を把握することは、掘削損傷領域の物性の把握や施工の安全確保の観点から非常に有効であることを確認。



計測用ボーリング孔配置およびAEセンサーレイアウト



試験で得られた流体圧・AE発生頻度・圧入流量図

坑道埋戻し技術の開発

3.1 坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術の開発

3.1.3 500m坑道での埋め戻し試験

(研究の背景・狙い・目標・意義)

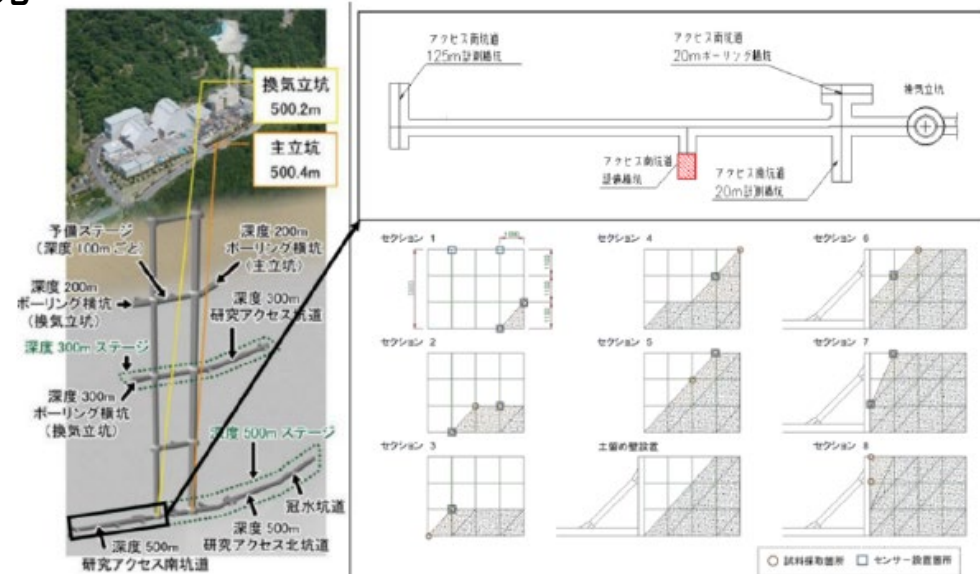
- ✓ 緩衝材や坑道の埋め戻し材は、放射性物質の選択的な移行経路となることの防止、廃棄体や坑道の力学的安定性の確保の観点から重要な役割。
- ✓ 緩衝材の設置に関する検討や原位置試験、坑道閉鎖に用いられるプラグの施工試験が行われてきたが、水平坑道埋戻しの原位置試験は、参照事例は少ない。
- 坑道埋め戻しに伴う地質環境の変化の把握に関連する基盤技術を整備することを目的として埋め戻し試験を実施。

(実施内容)

- ✓ 既設坑道を利用して、材料選定のための各種室内試験、坑道埋め戻し、埋め戻し後のボーリングによるサンプリングと室内試験を実施。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 坑道全断面を対象とした吹付け施工法の実用性を提示
 - ・今回設定した埋め戻し材の品質(透水係数 10^{-8} m/s)を満たす埋め戻しが実施できることを確認。



埋め戻し試験の
施工概要



坑道埋戻し技術の開発

3.2 モニタリング技術の開発

3.2.1 長期モニタリング技術の開発

(研究の背景・狙い・目標・意義)

- ✓ 処分事業の安全性評価にあたっては、処分施設の建設・操業により乱された地下水環境の施設閉鎖後の状態を推定し、評価を行う必要性。
- 地下水環境の回復過程や長期的な定常化過程にかかわる現象を理解するとともに、それらを調査・解析するための技術を整備。

(実施内容)

- ✓ 長期的な環境条件の予測解析技術を構築するため、施設建設前～閉鎖後のモニタリング手法及び解析技術を開発。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- **施設建設・操業・閉鎖時の汎用的モニタリング、解析手順を提示**
 - ・2003年から約15年間、地表(観測孔6本・50区間)、坑道(観測孔20本・73区間)において水圧・水質を観測、観測機器などの実用性の確認。
 - ・花崗岩中に地下施設を建設した場合に起こる環境変化の解析手法の構築。

① 水理地質構造を踏まえ施設設計



① 施設建設時の地下水湧水量・水質と周辺の水圧低下領域の経年変化の予備解析



② 解析上の水圧低下領域、坑道、地表に連続する水理地質構造に観測点を設置



③ 建設時に遭遇した想定外の水理地質構造、水圧応答が観察された観測点の観測強化



④ 観測データに基づき数十年スケール(操業中)の施設建設影響の予測解析



⑤ 予備的な坑道閉鎖により水圧・水質回復過程の観測



⑥ 水圧・水質回復データに基づき施設全体閉鎖後の予測解析

施設建設・操業・閉鎖時のモニタリング、解析手順

これまでの成果

必須の課題		主な成果
① 地下坑道における工学的対策技術の開発	1) 地下水抑制技術の開発	プレグラウチングとポストグラウチングの併用により、高水圧環境下での湧水抑制技術を開発し、グラウチングを実施しない場合に対して約100分の1まで低減することができた。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。
	2) 地下水管理技術の開発	現行の処理方法が現時点で適切であることを確認した。
② 物質移動モデル化技術の開発	1) 不均質な割れ目ネットワークのモデル化手法の開発	割れ目ネットワークモデルを用いた地下水流動解析や粒子追跡解析を実施することで、亀裂性岩盤の不均質性や湧水可能性を定量的に評価でき、地下施設のレイアウト設計や建設時、安全評価に有効に活用できる見通しを得た。
	2) 地質環境の長期変遷に関する解析・評価技術の開発	断層と高温流体による充填鉱物、微細割れ目の形成履歴と透水性との関係を把握し、長期的な透水特性の変遷を例示した。
坑道埋め戻し技術の開発	1) 坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術の開発	今回設定した埋め戻し材の品質を満たす埋め戻しを実施できることを確認した。
	2) モニタリング技術の開発	施設建設・操業・閉鎖時の汎用的モニタリング、解析手順を提示した。

現中長期計画におけるこれまでの成果報告 **研究開発報告書 80報、査読付き論文 52報**

土木学会賞**技術賞**(平成27年度)、日本原子力学会バックエンド部会**奨励賞**(平成28年度)、土木学会土木情報学**論文賞**(平成28年度)、日本原子力学会バックエンド部会**論文賞**(令和元年度)、日本応用地質学会**論文賞**(令和2年度)

外部有識者による評価結果

第3期中長期計画におけるこれまでの研究開発成果について、大学等の外部有識者からなる「地層処分研究開発・評価委員会」および「深地層の研究施設計画検討委員会」において技術的な評価を受け、以下のような評価結果を得た。

- ◆ 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、国内外に広く展開されることを期待**します。

研究成果の取りまとめ

- ◆ **超深地層研究所計画における研究開発は、令和元年度をもって終了**
- ◆ **広域地下水流動研究についても、超深地層研究所計画における研究開発の終了と合わせて、令和元年度をもって終了**
- ✓ **超深地層研究所計画の各段階および中期計画期間の成果は、報告書およびCoolRepとして公開済み**
 - 第1段階報告書: JAEA-Research 2007-014
 - 第2段階報告書: JAEA-Research 2015-026
 - 必須の課題報告書(第3段階報告書): JAEA-Research 2019-012
 - 第1期中期計画期間(H17~H21年度)取りまとめ: JAEA-Review 2010-073
 - 第2期中期計画期間(H22~H26年度)取りまとめ: JAEA-Research 2015-007
 - 第3期中長期計画期間(H27~R3年度)取りまとめ: 作成中
- **地層処分事業や安全規制、人材育成に活用していただけるような内容の報告(ホームページに掲載)を作成中**
- **令和3年度で埋め戻しも含めた現場作業が終了することから、超深地層研究所計画の集大成として、報告会を開催することを検討中**

研究所の活用と研究成果のアウトリーチ

共同研究と施設利用

共同研究 (H27～R1)

電力中央研究所	<ul style="list-style-type: none"> 地下水年代調査および評価技術の開発 物質移動特性調査および評価技術の開発
産業技術総合研究所	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の水理・化学・生物連成現象に関わる研究
原子力環境整備促進 ・資金管理センター	<ul style="list-style-type: none"> 地下環境モニタリング技術の適用性に関する研究 無線計測技術の適用性に関する研究
岡山大学	<ul style="list-style-type: none"> 結晶質岩を対象とした微視的構造変化が長期挙動におよぼす影響に関する研究
京都大学	<ul style="list-style-type: none"> 土岐花崗岩の浸透率空間分布の詳細把握と地下水流動系との関連性に関する研究
京都大学・大林組	<ul style="list-style-type: none"> 粘性流体注入に伴う周辺岩盤への影響に関する研究
静岡大学	<ul style="list-style-type: none"> 大深度地球化学モニタリング技術に関わる研究
東京大学	<ul style="list-style-type: none"> 地下環境の形成に関わる微生物プロセスの評価技術の研究 結晶質岩を対象とした長期岩盤挙動評価手法に関する研究 深部地球化学環境の形成プロセスに関わる地下微生物と岩石・地下水相互作用の評価技術の構築
大林組	<ul style="list-style-type: none"> 亀裂性岩盤における透水不均質性のモデル化に関する研究
鹿島建設	<ul style="list-style-type: none"> 地中レーダによる坑道周辺岩盤における水理特性評価に関する研究
清水建設	<ul style="list-style-type: none"> 逆解析を用いた地下水流動のモデル化・解析に関する共同研究
清水建設ほか	<ul style="list-style-type: none"> 低アルカリ性瞬結吹付けコンクリートと岩盤との相互作用に関する研究
西松建設	<ul style="list-style-type: none"> 地質環境変化の把握を目的とした高精度男性は計測システムの適用性に関する研究
東京測器	<ul style="list-style-type: none"> 光ファイバひび割れ検知センサーの安全確保技術としての適用性に関する研究
DECOVALEX-2019	<ul style="list-style-type: none"> 連成解析に関わる国際共同研究

施設供用 (H27～R1)

東濃地震科学研究所	<ul style="list-style-type: none"> 坑内への地震計・歪計等の設置・観測 地上モニタリング化のための通信システムの整備
京都大学	<ul style="list-style-type: none"> 炭酸水注入による掘削影響領域の透水性変化計測
名古屋大学	<ul style="list-style-type: none"> ニュートリノ補足用原子核乾板の保管

研究成果のプレス発表による理解醸成

プレス発表

2016:「断層運動で損傷した岩盤の自己修復機能を確認」

2016:「花崗岩の主要な構成鉱物中に物質を閉じ込める微小空隙の存在を確認」

2016:「亀裂から出る高水圧の湧水を抑制する技術を開発」日経コンストラクション(2017/1/13)

2017:「坑道閉鎖環境において物質の移動を抑制する現象を解明」

2017:「光合成由来のエネルギー源に依存しない地底生態系の解明に成功」朝日新聞(9/11)

2018:「結晶質岩(花崗岩)内の割れ目評価のための新知見」

2019:「花崗岩内の物質移動経路に関する新知見」電気新聞(4/18)、科学新聞(5/10)

2019:「マグマ由来の流体による微小な割れ目網が地下水の流路に」電気新聞(11/18)、岐阜新聞(11/21)、科学新聞(11/29)

地元で配布している「地層研ニュース」で研究トピックスを紹介

MIU 地下深部の世界に挑戦! 研究レポート No.11

坑道建設工事の影響にも耐える 地下環境を回復させた微生物の働き

瑞浪超深地層研究所の深度500mの研究坑道の一部(冠水坑道)を閉鎖し、意図的に坑道を水没させて坑道閉鎖時の地下環境の回復現象を捉える世界初の試験(再冠水試験)において、坑道建設工事により大気と融れて酸化になった地下水が、坑道閉鎖・冠水後に地下深部に生息する微生物の還元作用により坑道建設前の還元的な状態に回復することが確認されました。この研究成果は、日本地球化学会の学会誌「地球化学」に掲載されました。

世界初の試み「坑道を水没させて地下環境の回復」を調べると、地下深部に放射状に分布する地層裂隙を閉鎖するために、地下環境への人為的な影響は避けられないと考えられてきました。特に地下の酸化還元状態などの化学的状態や、放射状に分布する地層裂隙の閉鎖や、放射状に分布する地層裂隙の閉鎖による影響を抑制するための坑道閉鎖工事によって影響を受けた地下環境の坑道閉鎖後の状態変化を確認する必要があります。

本研究では、坑道閉鎖後の地下環境の状態変化を確認するため、閉鎖後の地下環境の1花崗岩中に冠水坑道を建設し、平成25年1月に冠水坑道を閉鎖・冠水させ、その後約1年9ヶ月の期間、坑道閉鎖後の地下環境・地下水の止水・水質、岩盤裂隙の閉鎖状態の変化を観測しました(図1)。ここでは、地下水の化学的性質である酸化還元電位の状態変化を紹介いたします。

閉鎖の結果、坑道建設直後より大気に融れて酸素を含んだ酸化された地下水は、坑道閉鎖後、約3ヶ月で酸化還元電位がマイナス180mV程度になり、坑道建設前の状態に戻りました。また、この酸化還元電位の低下と同じタイミングで、地下水中の硫酸根イオン濃度の増加や硝酸根イオン濃度の減少が観察されました(図2)。このように、坑道閉鎖による微生物の活動に伴う還元作用に特徴的な現象です。

以上のことから、微生物が地下環境の回復に大きな役割を果たすことが、再冠水試験によって明らかになりました。

図1 再冠水試験の実施場所と試験レイアウト

図2 冠水坑道内の地下水の酸化還元電位及び地下水中の酸素濃度の時間的変化

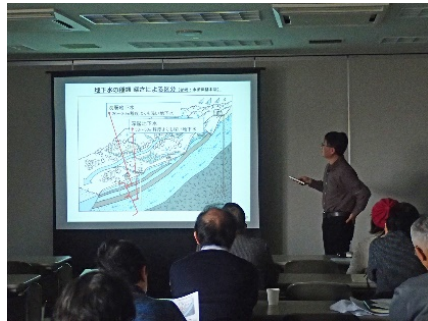
図3 微生物の数 (a) 及び冠水坑道内の地下水中の硝酸根イオン濃度と硫酸根イオン濃度 (b) の時間的変化

理解醸成・人材育成・国際協力に関する活動

理解醸成活動



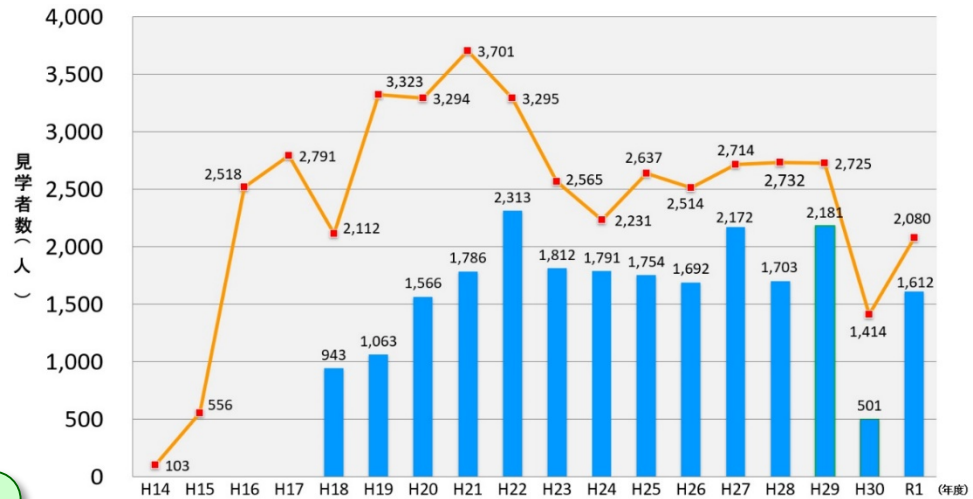
サイエンス体験イベント



サイエンスカフェの開催

施設見学

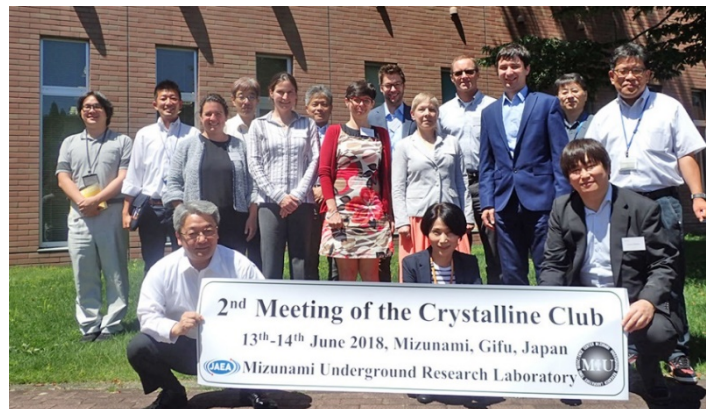
累計見学者数: 43,305人(入坑者数: 22,889人)



国際協力



(韓国KINGS: Technical Training)



(OECD/NEA: Crystalline Club)

人材育成



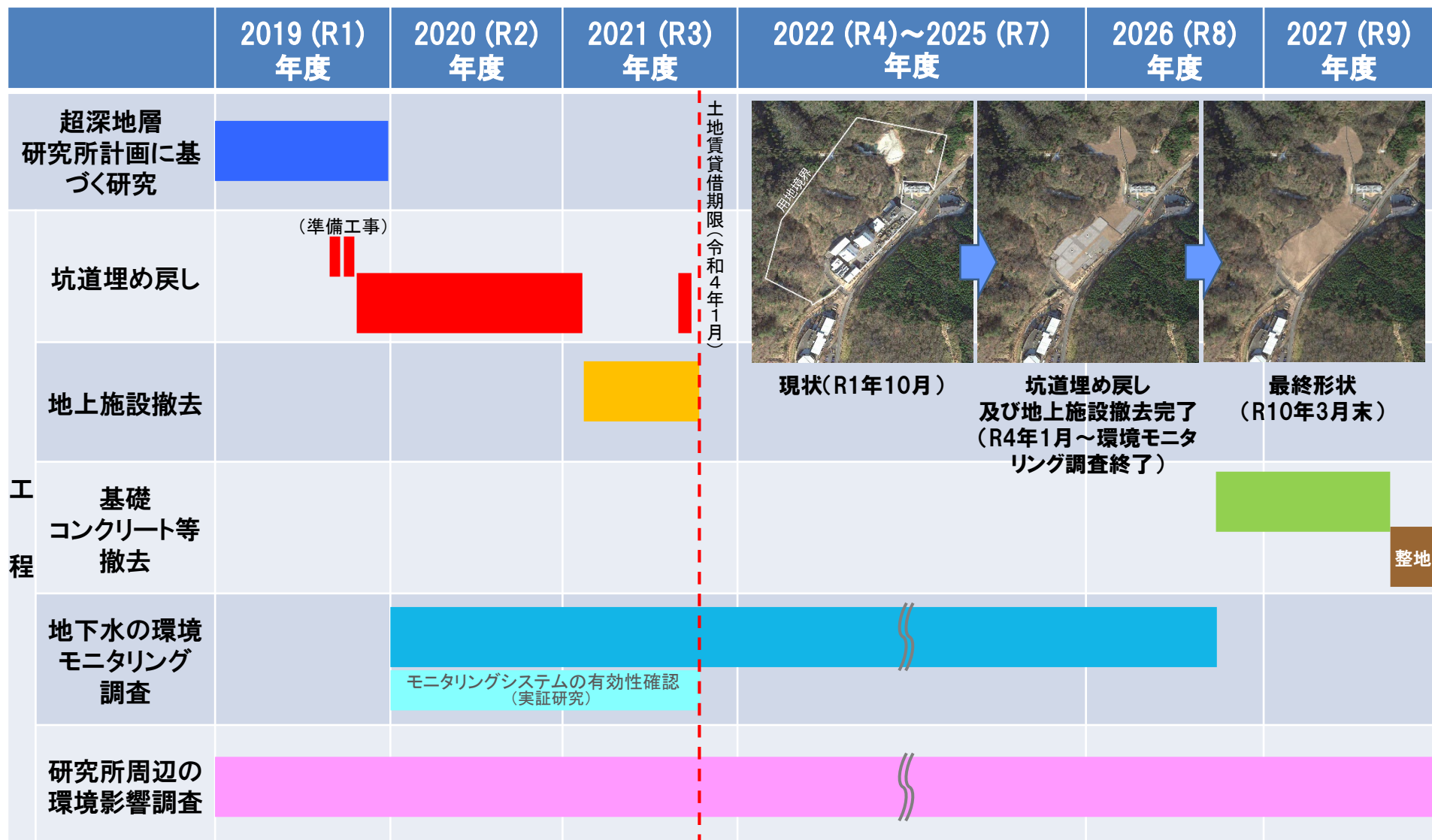
地元大学等への講師派遣

令和2年度以降の計画について

計画の要点

- ◆ 超深地層研究所計画における研究開発は、令和元年度をもって終了
- ◆ 土地賃貸借期間の終了（令和4年1月）までに坑道の埋め戻し及び地上施設の撤去を完了するため、坑道埋め戻し等の作業を実施（令和元年度下期に着手）
- ◆ 研究所用地は、土地賃貸借期間終了時に一旦用地全体を返還した上で改めて下記作業に必要な部分を借用予定
- ◆ 坑道の埋め戻し期間中は、埋め戻しに伴う地下水の回復状況を確認するために整備するモニタリングシステムにより、坑道埋め戻し作業中の地下水の水圧・水質の変化を実際に観測し（地下水の環境モニタリング調査：既存の地上観測孔も使用）、実証研究を兼ねてモニタリングシステムの有効性を確認
- ◆ 坑道の埋め戻し後は、地下水の環境モニタリング調査を5年程度継続実施、また、作業期間を通して研究開始当初から実施している環境影響調査（河川水等の水質分析及び騒音・振動測定等）も継続実施
- ◆ 地下水の環境モニタリング調査終了後、地上施設の基礎コンクリート等の撤去及び地上観測孔の埋め戻し・閉塞、用地の整地を実施して全ての作業を完了

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。

埋め戻し作業の方法や工程など工事の進め方

- 瑞浪市との土地賃貸借契約に基づき、研究所用地を原状復帰する。
- 埋め戻し作業には、「①坑道の埋め戻し」と「②地上施設の撤去」の2つの工程がある。

①坑道の埋め戻し方法

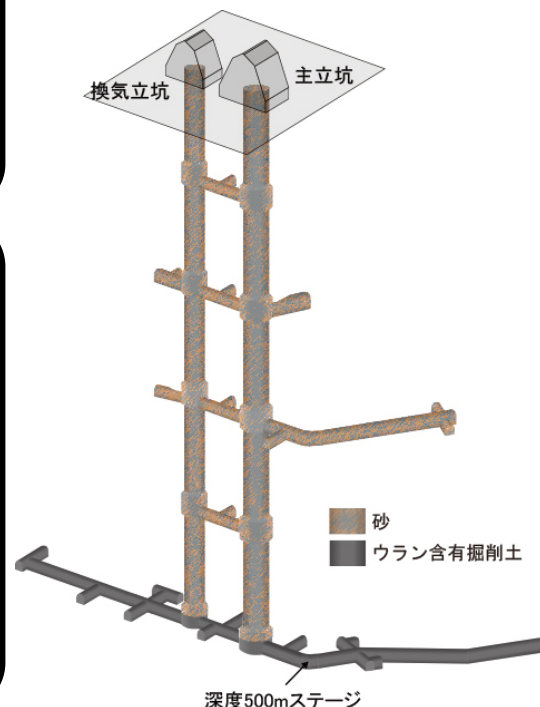
- 坑道は、砂で埋め戻す。
なお、掘削工事において発生した天然のウランを含む掘削土は埋め戻し材として深度500m水平坑道の埋め戻しに使用する。

②地上施設の撤去方法

- 地上にある施設は、坑道の埋め戻しが終了した後に撤去する（～令和4年1月）。なお、管理棟等一部の施設は坑道の埋め戻し中に先行して撤去する。
- 基礎コンクリート、杭（地中深さ約10m）は、地下水の環境モニタリング調査の終了後に撤去する（～令和9年12月頃）。
- その後、用地の整地を行い、全ての作業を完了する（～令和10年3月）。

【参考】土地賃貸借契約の取扱い

- 期間終了時（令和4年1月16日）に一旦用地全体を返還する。
- 地下水の環境モニタリング調査に必要な部分を改めて借用する予定である。

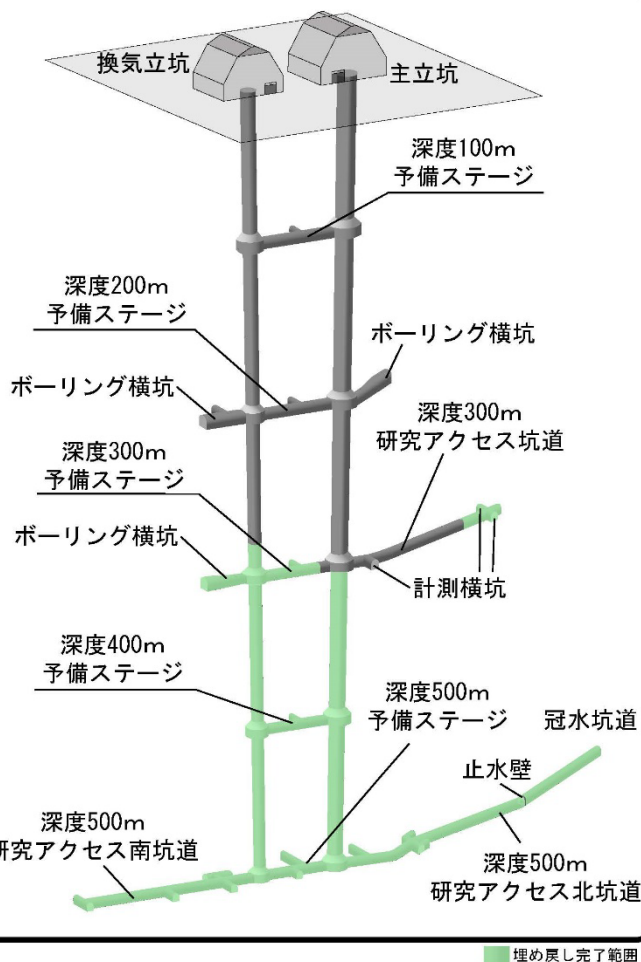


坑道埋め戻しのイメージ

坑道埋め戻し作業

埋め戻し進捗状況(2020.11.27現在)

- ・主立坑: 深度300mまで完了
- ・換気立坑: 深度275mまで完了
- ・深度400m水平坑道: 2020.10.6完了
- ・深度500m水平坑道: 2020.8.19完了



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檜、巻上機設備により運搬



- ・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)へ積み込み、運搬



- ・振動バケット装着バックホウにより埋め戻し、転圧



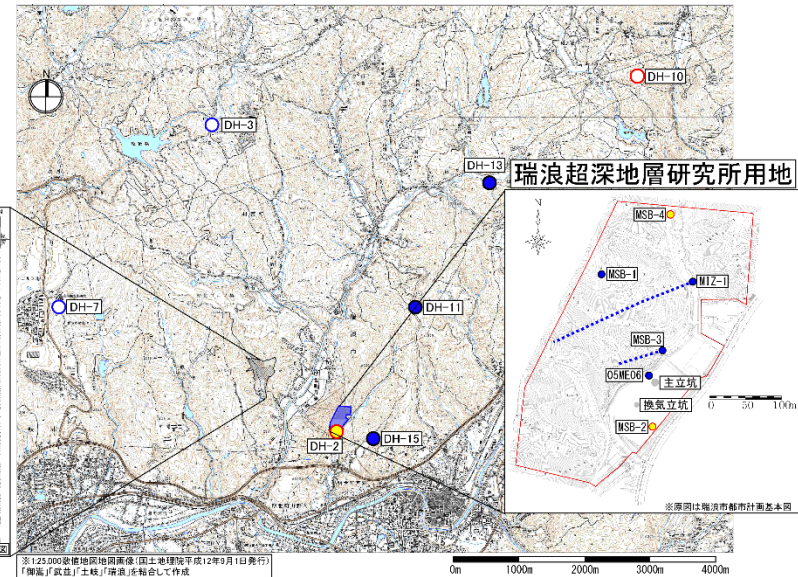
- ・写真の坑道規模: 幅4m、高さ3.5m



- ・主立坑: 内径6.5m

地下水の環境モニタリング調査

- 凡例
- 水圧観測 (連続)
 - 水圧観測 (定期)
 - 孔内水位観測 (連続)
 - 水圧・水質観測
 - は傾斜孔を示す



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



- 【観測点】
- 水圧観測点
 - 水質観測点
- 【配管等】
- 採水チューブ
 - MPケーシング
 - 水圧計測用光ファイバ

研究坑道内における環境モニタリング調査の位置図