

第3期中長期計画の研究開発における これまでの成果

①超深地層研究所計画(瑞浪)

平成31年2月21日

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

瑞浪超深地層研究所計画における研究項目

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

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)

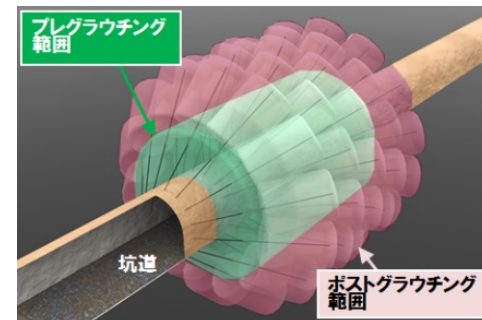
高レベル放射性廃棄物の地層処分場は深度300mより深い所に建設することが法律上定められているが、通常の地下土木構造物の建設は比較的浅い深度を対象としていることから、地下深部における高い水圧の状態下において十分な湧水抑制対策が行える技術の確立は今後の地層処分事業の実施において重要な課題の一つである。瑞浪超深地層研究所では、地下深部における高水圧の湧水を抑制することを目的として、セメント溶液などを岩盤に注入するグラウチングの技術開発を進めてきた。

(実施内容)

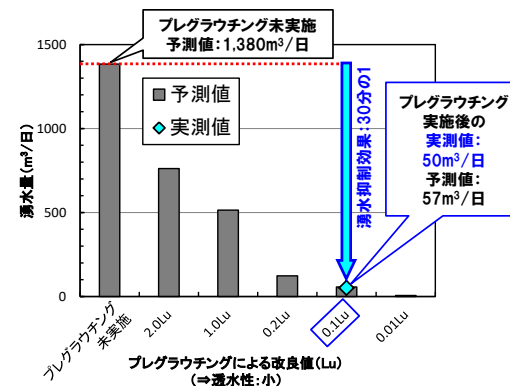
グラウチング後の湧水抑制目標を達成するために必要な岩盤の透水性低下割合や注入範囲を設定するために、グラウチング効果を考慮できる理論式を考案し適用した。また、岩盤の透水性に合わせてグラウチングに用いる材料を使い分けることにより、高水圧下においても湧水抑制の効果を期待できるグラウチング技術を開発した。さらに、深度500mにおいては坑道掘削後にポストグラウチングを追加実施することにより、さらなる湧水抑制を目指した。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 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。
- この技術開発成果は、日本における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する重要な成果の一つと考えられる。
- 本成果は高水圧下の一般建設工事に適用が期待される。



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

1. 地下坑道における工学的対策技術の開発

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)

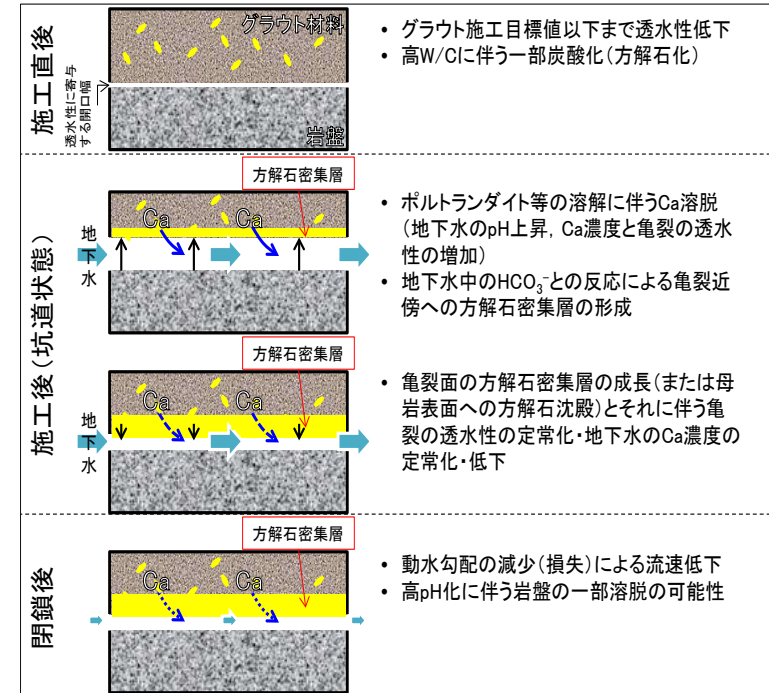
地下構造物の建設では、坑道の空洞安定性確保等でセメントや鋼材等の人工材料の使用が想定される。これらは、空洞を維持する間に時間経過とともに劣化し、それにより空洞周辺の地質環境に変化が生じる可能性があるものの、これらの人工材料が坑道周辺の地質環境に与える影響の定量的検討は実施していない。このため、瑞浪超深地層研究所の研究坑道周辺に注入したグラウト材(主にセメント)に着目し、それが坑道周辺の地質環境に及ぼす影響を把握・評価するための技術開発を実施した。

(実施内容)

瑞浪超深地層研究所内でプレ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し、グラウト材が地質環境に及ぼす影響を把握・評価するための調査手法の構築や、原位置条件下で、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の構築を実施した。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 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、グラウト材及び、グラウト材と岩盤の接触部分の分析に必要な試料の作製方法や分析方法を概ね確立するとともに、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も確認した。
- 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。



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

1. 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)

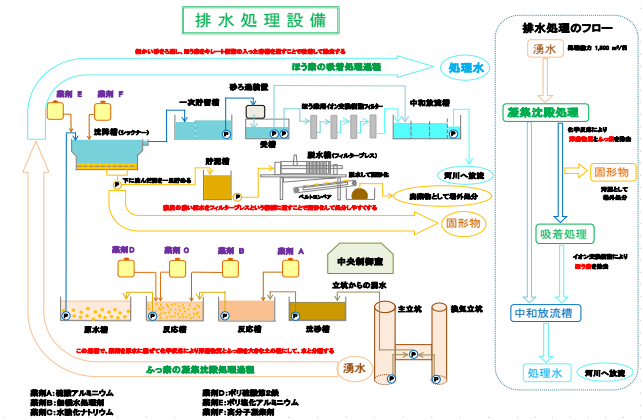
近年、公共工事などでも自然由来の重金属による地下水汚染や土壌汚染への対策が求められている。瑞浪超深地層研究所の研究坑道への湧水には、自然由来のふっ素(3.5~10mg/L)、ほう素(0.57~1.8mg/L)が含まれている(2005年10月から2017年11月までの湧水中の濃度)ため、凝集沈殿処理およびイオン交換処理によってふっ素及びほう素を除去している。排水処理は、大規模地下施設の建設・維持管理における環境負荷低減並びにコスト低減の観点から重要な課題であることから、ふっ素及びほう素の処理に関する最新の技術的知見を調査し、排水処理の効率化の可能性について検討を行った。

(実施内容)

ふっ素及びほう素に関する最新の排水処理技術に関する文献調査を実施し、技術開発の方向性などについて検討を行った。また、自然由来の重金属による汚染事例や対策技術の調査も行った。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 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、現行の処理工程の効率を上回るような処理技術は見当たらず、現行の処理方法が現時点で適切であることを確認した。
- 実証された多量の排水処理技術は、日本全国に分布する鉱山跡地から湧水する汚染水処理にも応用できる技術である。



現行の排水処理施設(写真)と処理フロー

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

(研究の背景・狙い・目標・意義)

処分事業の安全評価にあたっては、亀裂性岩盤を対象とした場合、放射性核種の主要な移行経路となる岩盤中の割れ目の分布特性や水理学的特性の評価が重要ある。割れ目の分布特性や水理学的特性は不均質であり、すべての情報を取得できないため、その不均質性を確率論的に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することを目標とした。

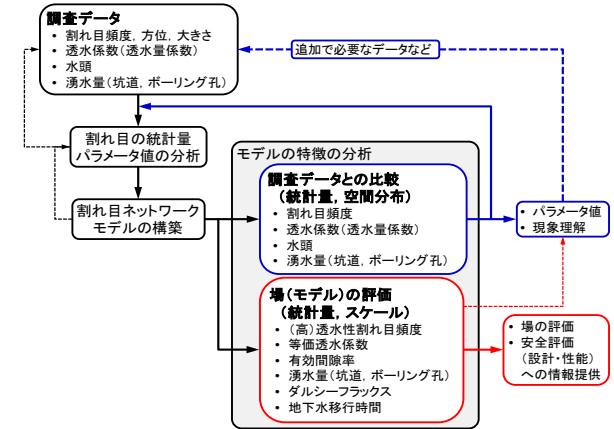
(実施内容)

DFNモデル化手法の体系的な構築を目的として、研究坑道の壁面調査やボーリング調査結果を用いて、DFNモデル化手法の有効性と限界を整理する。

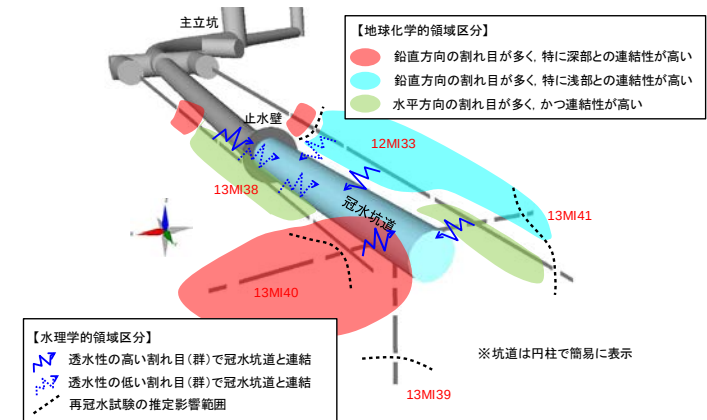
- ・DFNモデルの構築
- ・DFNモデルの特徴の分析

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 地下坑道で得られる情報を用いたDFNモデル化手法を提示した。
- 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といった考え方や手法が、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である。
- DFN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。



割れ目を対象としたモデルの構築と構築したモデルを用いた評価の流れ(概念図)



割れ目分布の不均質性を示した概念図

2. 物質移動モデル化技術の開発

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)

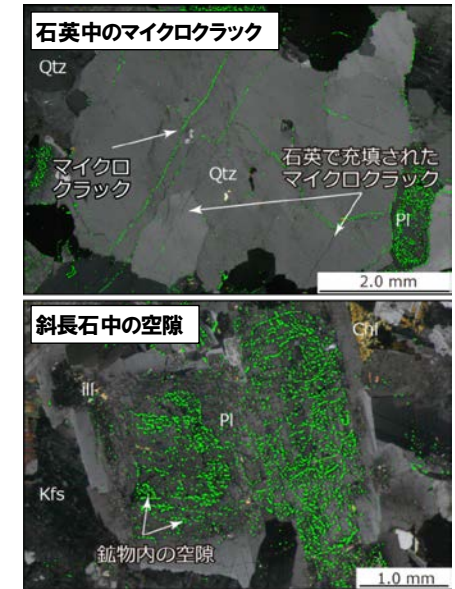
岩盤中での物質の移動特性を直接的に測定する手法として、国内外においてトレーサー試験が行われており、割れ目の開口幅や割れ目内分散長、分配係数等が推定されている。日本の結晶質岩は、割れ目頻度が高く、割れ目には充填物が含まれていることが多い。このような岩盤を対象として、物質移動特性を把握する手法を提示することを目標に技術開発を実施した。

(実施内容)

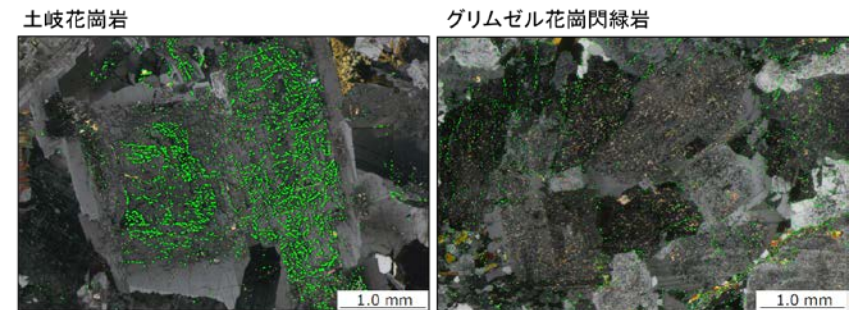
単孔式および孔間の物質移動試験、[室内物質移動試験](#)を実施し、物質移動に関するパラメータを取得した。また、花崗岩中でのミクروسケールでの物質移動現象を解明するため、透水性割れ目およびその周辺の岩石を採取し、室内における物質移動試験を実施した。長期にわたる物質移動現象を把握するために、透水性割れ目とその周辺岩盤および地下水を対象として、割れ目に沿った天然トレーサー物質(ウラン系列核種、など)の分布を把握した。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 原位置トレーサー試験技術および評価技術を整備した。
- [物質移動経路となり得る微小空隙を把握する手法を整備し、結晶質岩の大部分を占める健岩部における物質移動プロセスを明示した。](#)
- [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した。](#)



土岐花崗岩中の微小空隙(緑色の領域)



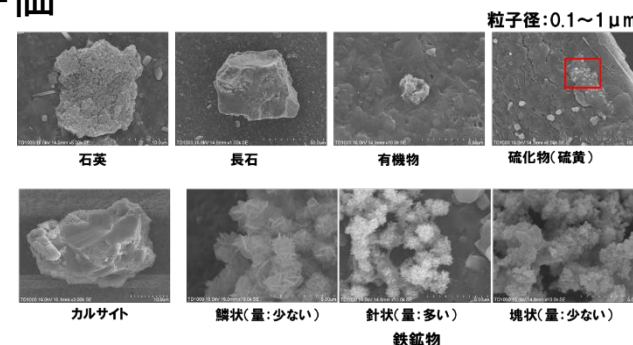
土岐花崗岩とグリムゼル花崗閃緑岩の微小空隙(緑色の領域)

2. 物質移動モデル化技術の開発

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

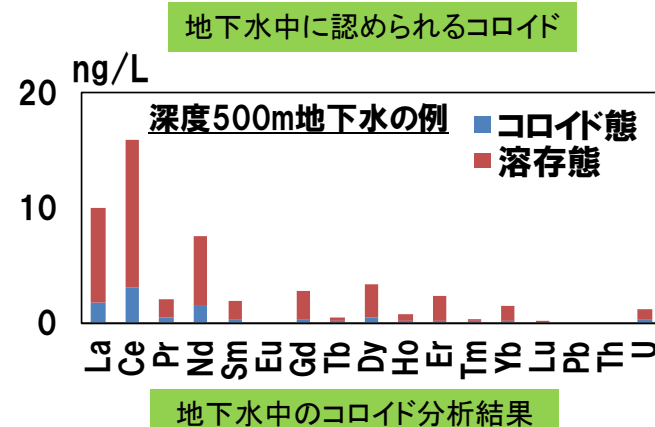
(研究の背景・狙い・目標・意義)

国内外の既往研究でコロイド、有機物、微生物とアナログ元素との相互作用の研究が行われており、コロイドが核種移行に影響する例が示されている。地下深部における、コロイド、有機物、微生物が物質移動に与える影響の基本情報を取得した上で元素の輸送・遅延量の評価手法を構築することを目標として、調査手法の構築などを実施した。



(実施内容)

ボーリング孔を利用して地下水の採取・分析を行い、天然地下水中的コロイド、有機物、微生物の存在量や各種元素との相関について解析を行った。深度500m冠水坑道中の地下水を対象として、坑道の建設・閉鎖により人為的な影響を受けた地下水中的コロイド、微生物(バイオフィルムなどの有機物を含む)についても、同様の調査・解析を行った。また、放射性元素の移動プロセスに対するそれらの影響を考察するため、アクチノイド元素と類似の化学特性を示す天然の希土類元素を指標(アナログ元素)として分析した。



(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した。
- 坑道閉鎖環境では、吹付セメントなどに溶存態希土類元素が付着することで除去され、アルカリ性のカルサイトに過飽和な地下水環境下で、希土類元素を担持した炭酸塩コロイドが凝集・沈殿することで希土類元素の移動が抑制される。
- 花崗岩地下水中には、光合成由来のエネルギー源に依存せず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する。これらの微生物種が代謝反応の過程で生成/消費する物質は、地下水の水質形成(還元環境の形成など)に影響を及ぼしている。

2. 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、岩盤の透水性に関わる長期的な地質現象の一つとして、400℃～700℃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例が示されている。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。

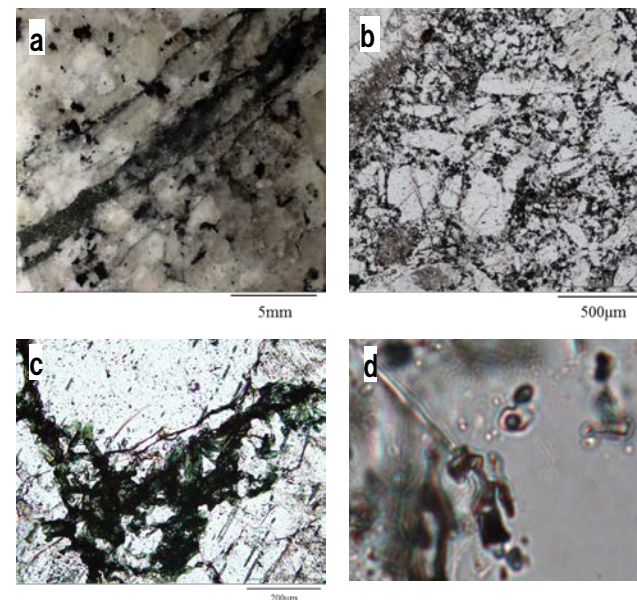
(実施内容)

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、EPMAを用いた化学組成分析・解析

- ・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の確立
- ・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))の提案

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 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。



高温流体の痕跡 (Glassy vein: ホルンブレンドタイプ)

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)。

2. 物質移動モデル化技術の開発

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)

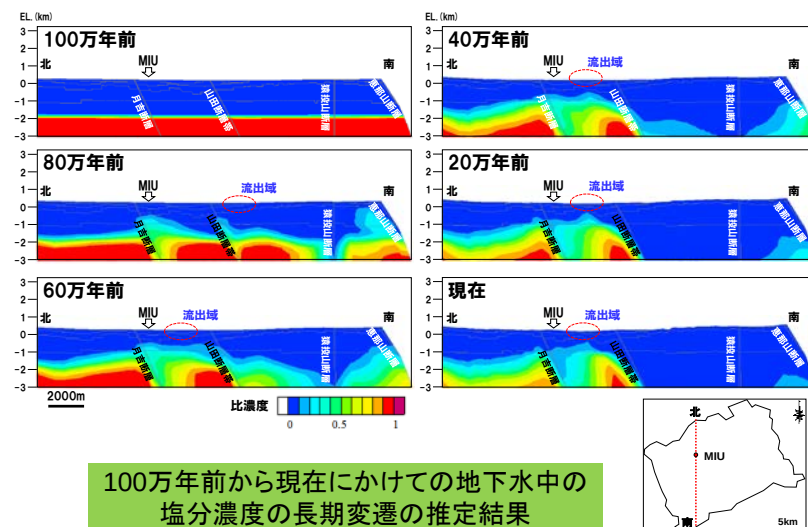
東濃地域(主に土岐川周辺)に存在する深部塩水の起源についてはこれまで様々な地球化学的手法を用いて検討がなされてきたが、その塩分濃度が深度1,000mで海水の約1/10であり諸外国の事例に比べて希薄な塩水であり、Br/Cl比や同位体比など地球化学的指標を用いた解析でも、起源を断定することができず解明されていない。一方で、日本では、研究事例が少ないことから深部花崗岩における塩水の存在を一般化するに至っていないものの、国外の事例を見る限りある程度の深度以深の花崗岩深部での塩水の存在は普遍性を有する可能性があるため、その存在要因を理解しておくことは非常に重要である。

(実施内容)

これまでに東濃地域において得られた地下水の起源、滞留時間に関わる地球化学データについて再整理した。また、新たに深度500m研究アクセス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についてまとめた。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 深部塩水の起源に関して複数の起源を示す結果が得られており、その水質は複数のプロセス(水-岩石相互作用、海水の浸透等)が複合的に作用して形成されたと考えられる。
- 海水・古海水があり地下水流動の非常に長い滞留時間を持つと予想される環境においては、 ^{36}Cl 、 ^4He 、酸素同位体シフトなどが有効な指標となる。
- 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。



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

3. 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)

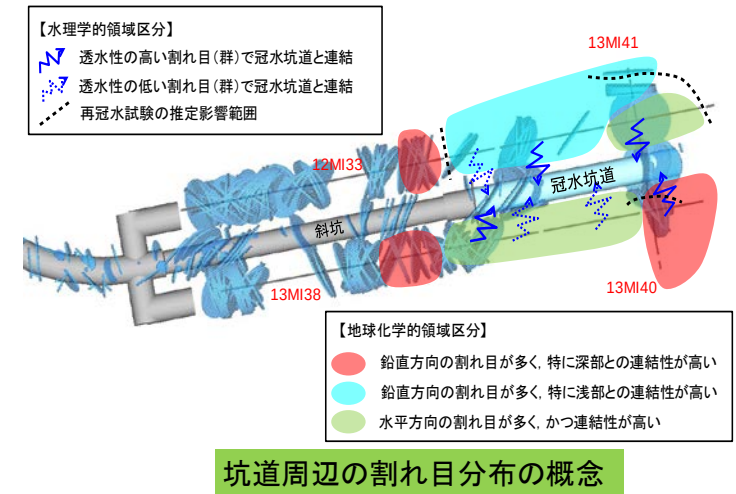
処分事業の安全性評価にあたっては、処分施設の建設・操業により乱された地下水環境の施設閉鎖後の状態を推定し、評価を行う必要がある。瑞浪を例として、地下水環境の回復過程や長期的な定常化過程にかかわる現象を理解するとともに、それらを調査・解析するための技術を整備する。

(実施内容)

- (1)坑道周辺の水理地質構造の確認
- (2)冠水時の水理-力学-化学特性の観測・解析
- (3)坑道周辺の物質移動特性の調査
- (4)予察的埋め戻し試験
- (5)モニタリング技術開発
- (6)止水技術の確認

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 坑道の冠水に伴う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
- 坑道周辺岩盤は数m～数十m程度の空間スケールで水理学的な不連続性を確認した
- 既往の連成解析ソフトウェア(COUPLYS)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した。
- 坑道閉鎖により希土類元素濃度(溶存態/コロイド態のREE)が時間とともに減少し、希土類元素が動きにくい環境が形成される。
- 湧水環境にある坑道において、ベントナイト混合土は材料混合率に関わらず室内試験と同様の膨潤性が期待できる。原位置施工後には、 10^{-9} m/s程度の均質な透水係数が期待できる。
- 無線通信技術の結晶質岩における稼働中の坑道内での計測への適用性を確認した。



3. 坑道埋戻し技術の開発

3.1.2 岩盤の破壊現象評価

(研究の背景・狙い・目標・意義)

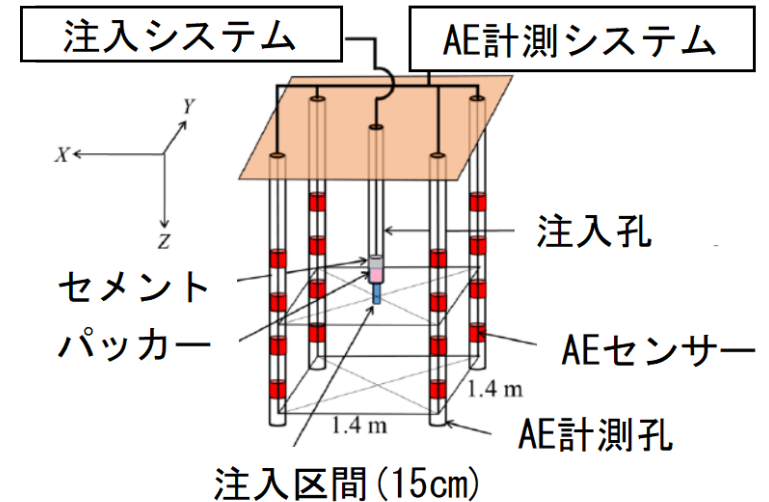
地下深部に空洞を掘削すると、空洞規模によらず周辺岩盤中に掘削影響領域が発生するが、地下約700mの地点における原位置試験研究で実施した掘削影響試験では、発破などの掘削行為以外に坑道周辺に再配分された応力の集中による物理的損傷(破壊現象)も生じた。この現象は、掘削工法に依存しないため、その範囲や物性変化のメカニズム・程度を把握することは地層処分の安全性評価の観点から重要である。このため、深度500m研究坑道を利用して原位置試験を実施し、岩盤の破壊現象メカニズムなどについて検討した。

(実施内容)

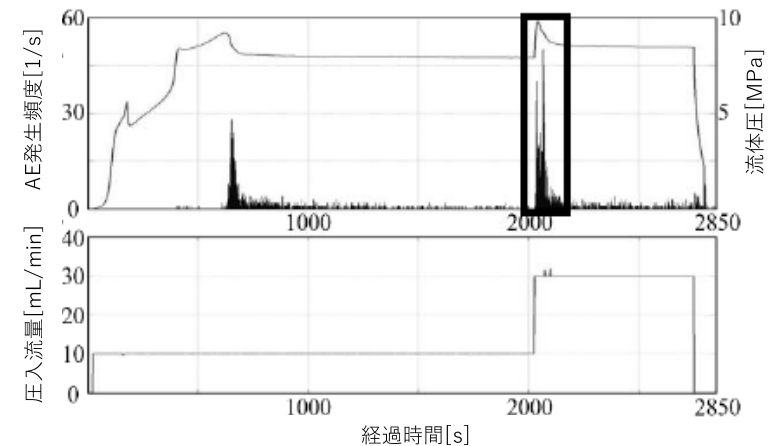
主に空洞周辺に生じる応力的な破壊現象を対象に、その範囲や物性変化のメカニズム・程度の把握と評価手法の構築を目的として、粘性流体注入による割れ目進展挙動の観察を行った。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 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ものの、新たなき裂発生時には引張破壊が発生することが明らかとなった。
- 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と考えられる。



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

3. 坑道埋戻し技術の開発

3.1.2 500m坑道での埋め戻し試験

(研究の背景・狙い・目標・意義)

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、人工バリアの構成要素のひとつである緩衝材や坑道の埋め戻し材は、坑道などが放射性核種の選択的な移行経路となることを防ぐことや、廃棄体や坑道の力学的安定性を確保するために重要な役割を担う。このため、諸外国において、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精力的に行われてきたが、水平坑道の埋戻しについての原位置試験は、スウェーデン Äspö HRL における Backfill and Plug Test に見られる程度であり、参照事例は多くはない。

そのため、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と、瑞浪超深地層研究所における埋戻しの計画策定に反映するため、以下の目的で埋戻し試験を実施する。

- i) 瑞浪超深地層研究所を利用した地下施設の埋戻しの技術開発
- ii) 地下施設埋め戻し後の埋め戻し部分の地質環境の変化に関する知見の整備と調査技術開発

(実施内容)

既設の水平坑道を利用して、研究坑道埋め戻し計画案の詳細設計を行うための埋め戻し試験を行う。

- ・埋め戻し材料選定のための各種室内試験
- ・坑道埋め戻し
- ・埋め戻し後仕様を満たしているかどうかの確認(ボーリングによるサンプリングと室内試験)

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

(現在、試験実施中)

3. 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、評価を行う必要がある。瑞浪を例として、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する。

(実施内容)

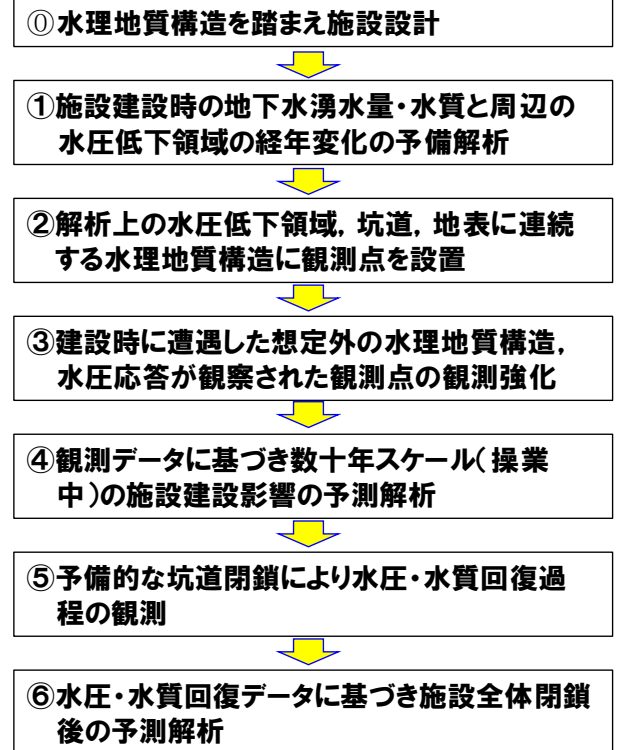
長期的な環境条件の予測解析技術を構築するため、施設建設前～閉鎖後のモニタリング手法及び解析技術を開発する。

・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

(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、解析手順を提示した。



施設建設・操業・閉鎖時のモニタリング、解析手順

成果のまとめ

【瑞浪超深地層研究所計画】

以下のような成果が得られている。

1. 地下坑道における工学的対策技術の開発

(必須の課題達成目標)

- ・湧水量を制御するウォータータイトグラウト施工技術の実証
- ・地下水排水処理技術等の高度化

(成果のまとめ)

- ・プレグラウチングとポストグラウチングを併用により湧水抑制効果を確認
- ・瑞浪超深地層研究所において適用している排水処理の効率を上回るような処理技術は見当たらず、現行の処理方法が現時点で適切であることを確認した。

(地層処分事業や他分野への貢献)

- ⇒適用した手法はグラウチングの目標設定、計画策定及び結果の検証に有効な手法であり、排水処理費の削減や、人工バリア施工時の作業環境において湧水箇所や湧水量を低減することにより施工精度の向上に寄与
- ⇒今回実証された多量の排水処理技術は、日本全国に分布する鉱山跡地から湧水する汚染水処理にも応用可能

成果のまとめ

【瑞浪超深地層研究所計画】

2. 物質移動モデル化技術の開発

(必須の課題達成目標)

- ・物質移動現象の理解・モデル化
- ・割れ目の透水性, 地下水流動・水質の長期変化, 地下水流動の緩慢さの例示

(成果のまとめ)

- ・地下坑道で得られる情報を用いた割れ目モデル化手法を提示
- ・地下坑道からの調査データに基づく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の考え方を組み込んだDFNモデルの構築手法を開発
- ・大深度の地点におけるトレーサー試験などの[物質移動調査技術](#)を構築
- ・ボーリング孔を利用した[コロイド](#)および[微生物](#)の調査技術を構築

(地層処分事業や他分野への貢献)

- ⇒この技術開発成果は, 国内の結晶質岩における物質移動の遅延能力を示す重要な成果の一つと考えられる。
- ⇒これらの手法は地層処分のみならず, 一般の地下空洞建設時の割れ目分布評価への適用が期待される。

成果のまとめ

【瑞浪超深地層研究所計画】

3. 坑道埋め戻し技術の開発

(必須の課題達成目標)

- ・坑道の一部埋め戻し, 冠水時の地質環境の回復能力等を評価
- ・地質環境に応じた埋め戻し技術の構築
- ・長期観測に必要なモニタリング技術の開発

(成果のまとめ)

- ・再冠水試験に伴う地下水の水圧変化や[水質変化の観測](#), 冠水前後の2次元比抵抗分布, 冠水坑道周辺における湧水量変化のデータ取得
- ・既往の連成解析ソフトウェア(COUPLYS)を, 岩盤の不均質性のモデル化, モデルの大規模化, 解析速度の高速化の観点で改良し, 汎用性の高いツールとして整備
- ・5MPaの水圧環境下においても, 埋め戻し材内部の土圧や水圧の観測機器は十分な耐久性を保持しており信頼性の高い観測が可能

(地層処分事業や他分野への貢献)

⇒この技術開発成果は, 実規模での地下空洞の掘削/維持/閉鎖後の環境変遷過程を解析し, かつ実データを基に妥当性を示す重要な成果である。