

【資料33-3-1参考】

**第3期中長期目標期間における
研究開発の成果(事後評価)
〔詳細版〕**

令和4年1月31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
地層処分研究開発推進部**

- | | |
|------------------------|-------|
| 1. 超深地層研究計画 | p. 2～ |
| 2. 幌延深地層研究計画 | p.23～ |
| 3. 地質環境の長期安定性に関する研究 | p.48～ |
| 4. 高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発 | p.65～ |
| 5. 使用済燃料の直接処分研究開発 | p.79～ |
| 6. プレス発表 | p.89～ |

* 本研究は、以下の経済産業省資源エネルギー庁委託事業の成果の一部を利用した。

- ・地層処分技術調査等事業
- ・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[JP007597])

1. 超深地層研究計画

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)

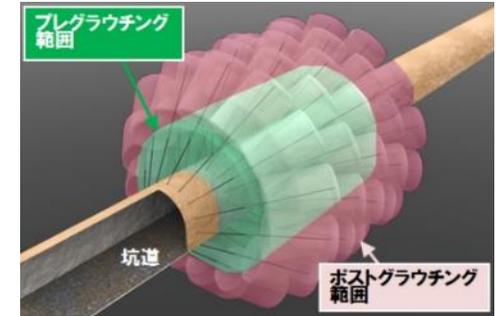
高レベル放射性廃棄物の地層処分場は深度300mより深い所に建設することが法律上定められているが、通常の地下土木構造物の建設は比較的浅い深度を対象としていることから、地下深部における高い水圧の状態下において十分な湧水抑制対策が行える技術の確立は今後の地層処分事業の実施において重要な課題の一つである。瑞浪超深地層研究所では、地下深部における高水圧の湧水を抑制することを目的として、セメント溶液などを岩盤に注入するグラウチングの技術開発を進めてきた。

(実施内容)

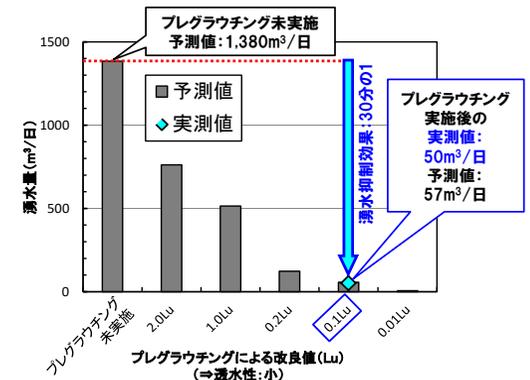
グラウチング後の湧水抑制目標を達成するために必要な岩盤の透水性低下割合や注入範囲を設定するために、グラウチング効果を考慮できる理論式を考案し適用した。また、岩盤の透水性に合わせてグラウチングに用いる材料を使い分けることにより、高水圧下においても湧水抑制の効果を期待できるグラウチング技術を開発した。さらに、深度500mにおいては坑道掘削後にポストグラウチングを追加実施することにより、さらなる湧水抑制を目指した。

(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)

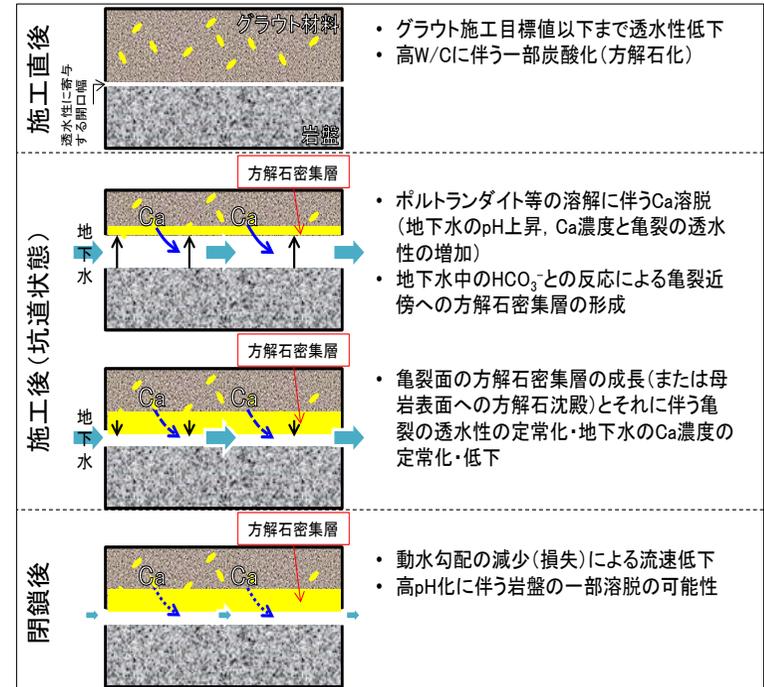
地下構造物の建設では、坑道の空洞安定性確保等でセメントや鋼材等の人工材料の使用が想定される。これらは、空洞を維持する間に時間経過とともに劣化し、それにより空洞周辺の地質環境に変化が生じる可能性があるものの、これらの人工材料が坑道周辺の地質環境に与える影響の定量的検討は実施していない。このため、瑞浪超深地層研究所の研究坑道周辺に注入したグラウト材(主にセメント)に着目し、それが坑道周辺の地質環境に及ぼす影響を把握・評価するための技術開発を実施した。

(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)

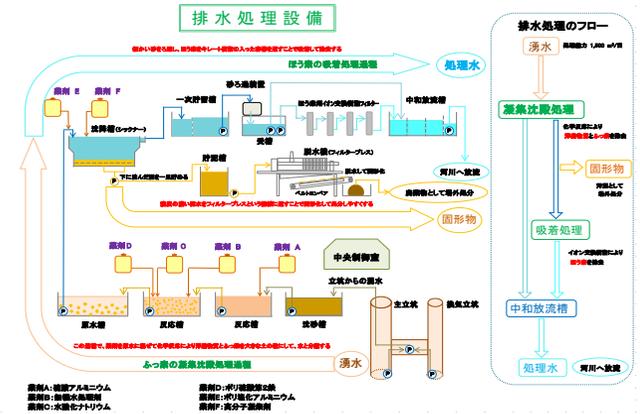
近年、公共工事などでも自然由来の重金属による地下水汚染や土壌汚染への対策が求められている。瑞浪超深地層研究所の研究坑道への湧水には、自然由来のふっ素(3.5~10mg/L)、ほう素(0.57~1.8mg/L)が含まれている(2005年10月から2017年11月までの湧水中の濃度)ため、凝集沈殿処理およびイオン交換処理によってふっ素及びほう素を除去している。排水処理は、大規模地下施設の建設・維持管理における環境負荷低減並びにコスト低減の観点から重要な課題であることから、ふっ素及びほう素の処理に関する最新の技術的知見を調査し、排水処理の効率化の可能性について検討を行った。

(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、技術開発の方向性等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。

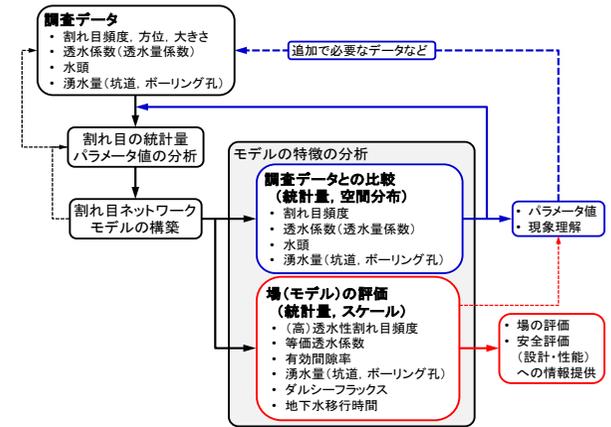
(実施内容)

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。

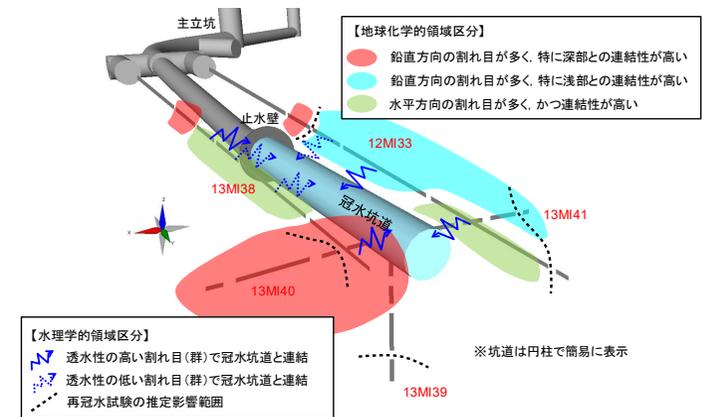
- ・DFNモデルの構築
- ・DFNモデルの特徴の分析

(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)

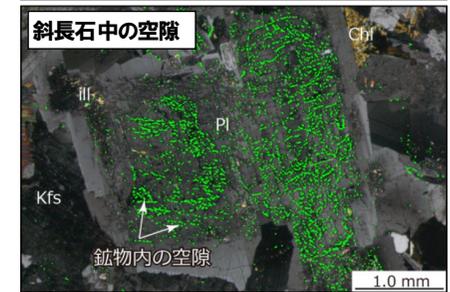
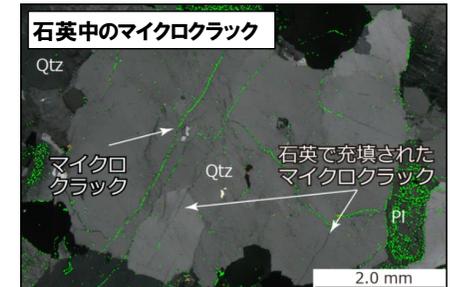
岩盤中での物質の移動特性を直接的に測定する手法として、国内外においてトレーサー試験が行われており、割れ目の開口幅や割れ目内分散長、分配係数等が推定されている。日本の結晶質岩は、割れ目頻度が高く、割れ目には充填物が含まれていることが多い。このような岩盤を対象として、物質移動特性を把握する手法を提示することを目標に技術開発を実施した。

(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。

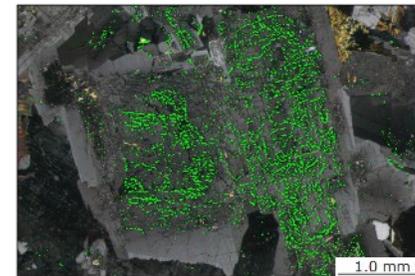
(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 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。

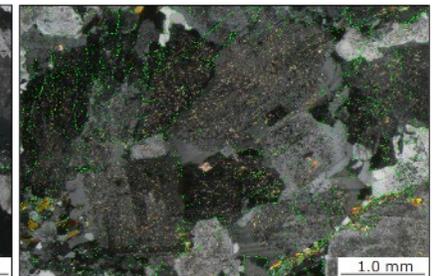


土岐花崗岩中の微小空隙(緑色の領域)

土岐花崗岩



グリムゼル花崗閃緑岩



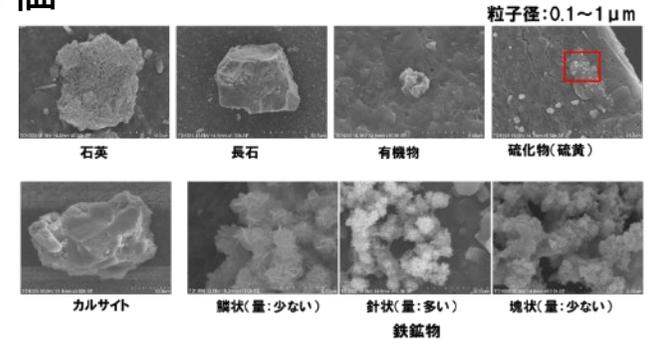
土岐花崗岩とグリムゼル花崗閃緑岩の微小空隙(緑色の領域)

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

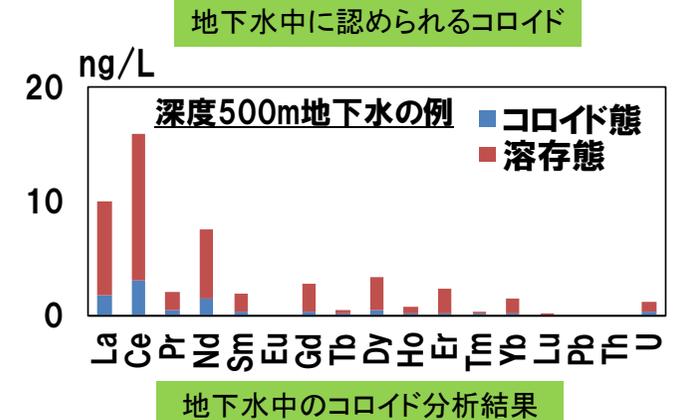
(研究の背景・狙い・目標・意義)

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°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。

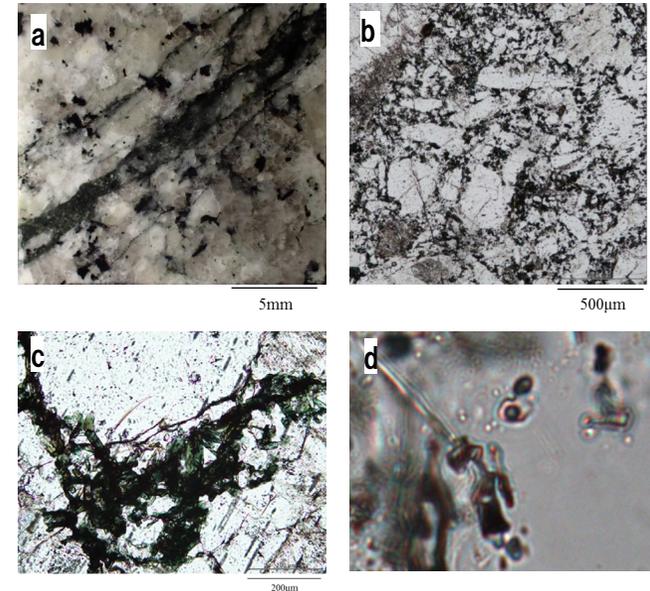
(実施内容)

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)

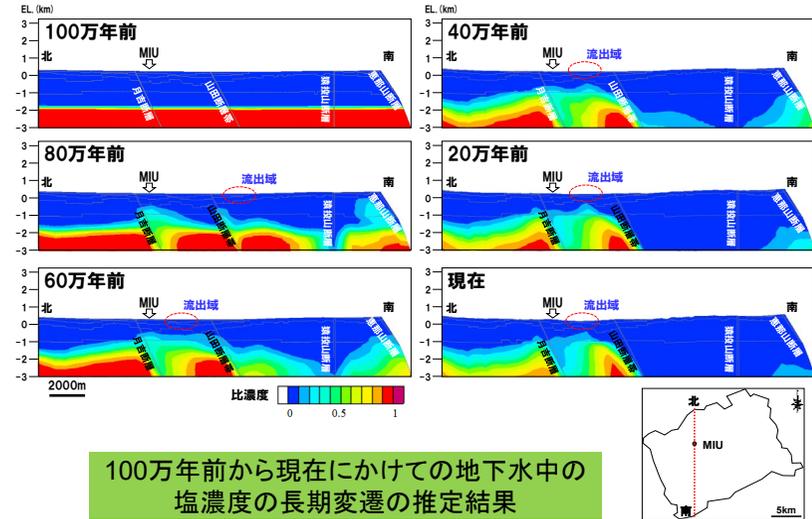
東濃地域(主に土岐川周辺)に存在する深部塩水の起源についてはこれまで様々な地球化学的手法を用いて検討がなされてきたが、その塩濃度が深度1,000mで海水の約1/10であり諸外国の事例に比べて希薄な塩水であり、Br/Cl比や同位体比など地球化学的指標を用いた解析でも、起源を断定することができず解明されていない。一方で、日本では、研究事例が少ないことから深部花崗岩における塩水の存在を一般化するに至っていないものの、国外の事例を見る限りある程度の深度以深の花崗岩深部での塩水の存在は普遍性を有する可能性があるため、その存在要因を理解しておくことは非常に重要である。

(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¹⁴C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、³⁶Cl、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。



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)

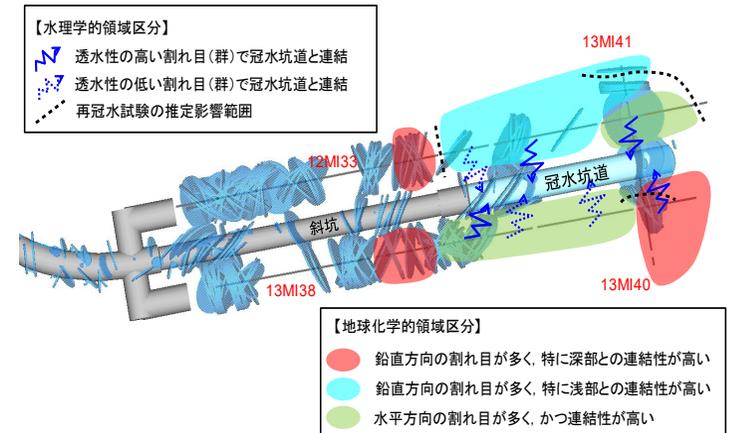
処分事業の安全性評価にあたっては、処分施設の建設・操業により乱された地下水環境の施設閉鎖後の状態を推定し、評価を行う必要がある。瑞浪を例として、地下水環境の回復過程や長期的な定常化過程にかかわる現象を理解するとともに、それらを調査・解析するための技術を整備する。

(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)

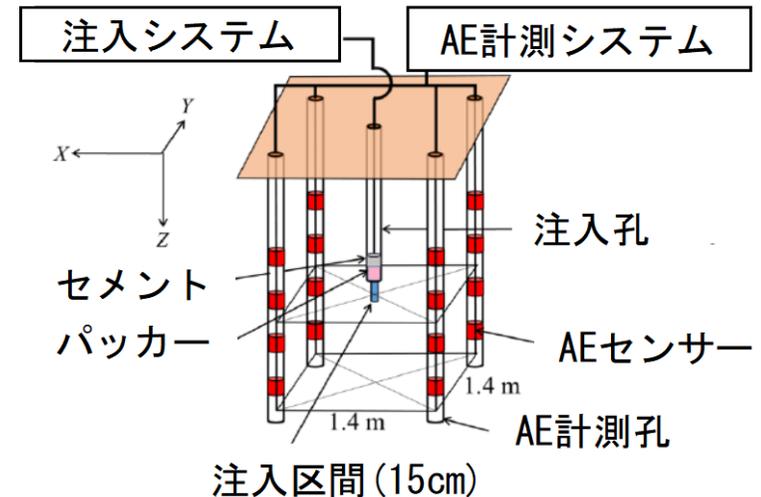
地下深部に空洞を掘削すると、空洞規模によらず周辺岩盤中に掘削影響領域が発生するが、地下約700mの地点における原位置試験研究で実施した掘削影響試験では、発破などの掘削行為以外に坑道周辺に再配分された応力の集中による物理的損傷(破壊現象)も生じた。この現象は、掘削工法に依存しないため、その範囲や物性変化のメカニズム・程度を把握することは地層処分の安全性評価の観点から重要である。このため、深度500m研究坑道を利用して原位置試験を実施し、岩盤の破壊現象メカニズムなどについて検討した。

(実施内容)

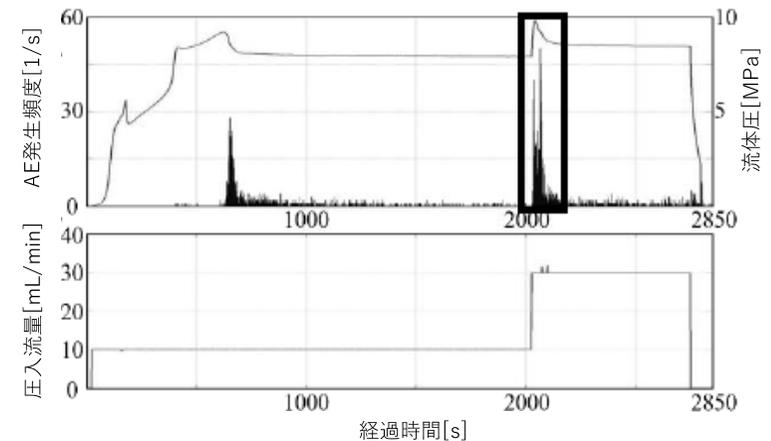
主に空洞周辺に生じる応力的な破壊現象を対象に、その範囲や物性変化のメカニズム・程度の把握と評価手法の構築を目的として、粘性流体注入による割れ目進展挙動の観察を行った。

(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)



埋め戻し試験の様子

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 全断面吹付け施工を実施し、地下坑道での施工性(施工速度、吹付け速度)及び施工した埋め戻し材の品質(有効粘土密度)を確認した。今回適用した全断面吹付け工法は、地層処分事業における埋め戻し工法として実用に耐える工法の一つになり得ると評価できると考える。
- 一方、本埋め戻し試験で取得した様々なデータの分析結果から、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。

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)

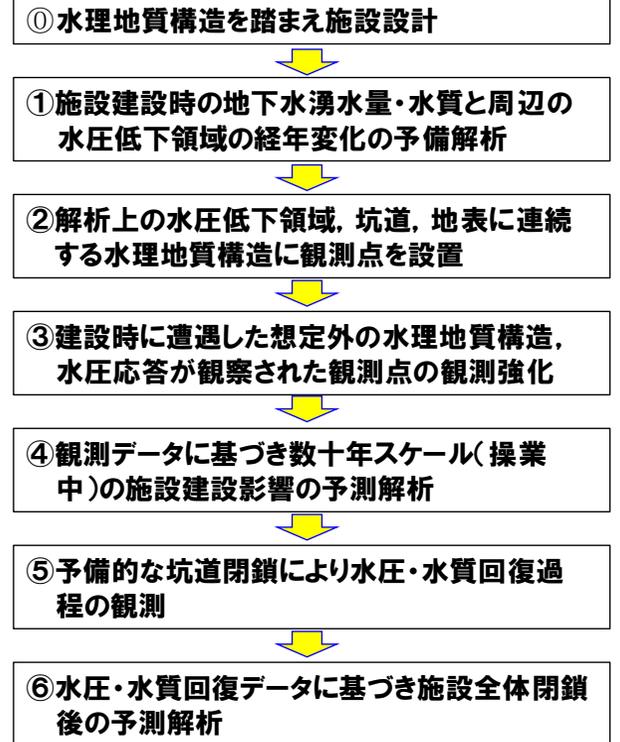
長期的な環境条件の予測解析技術を構築するため、施設建設前～閉鎖後のモニタリング手法及び解析技術を開発する。

- ・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

【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

【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。

【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。

主な共同研究

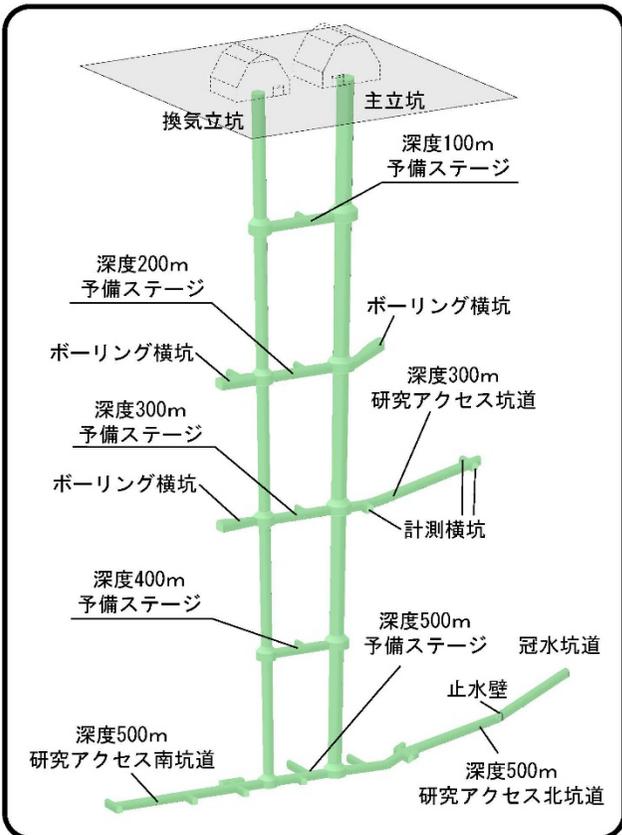
電力中央研究所	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水年代調査および評価技術の開発 ・物質移動特性調査および評価技術の開発
産業技術総合研究所	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の水理・化学・生物連成現象に関わる研究
原子力環境整備促進 ・資金管理センター	<ul style="list-style-type: none"> ・無線計測技術の適用性に関する研究
東京大学	<ul style="list-style-type: none"> ・地下環境の形成に関わる微生物プロセスの評価技術の研究
京都大学・大林組	<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共同研究
鹿島建設	<ul style="list-style-type: none"> ・地中レーダー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
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
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

主な施設供用

東濃地震科学研究所	<ul style="list-style-type: none"> ・坑内への地震計・歪計の設置
名古屋大学	<ul style="list-style-type: none"> ・ニュートリノ捕捉用原子核乾板の保管・観測
早稲田大学	<ul style="list-style-type: none"> ・ダークマター観測に資するための環境中性子線の観測

令和2年度以降の状況について(坑道埋め戻し)

参考資料



埋め戻し完了範囲

坑道埋め戻し進捗状況

- ・換気立坑: 2021.12.2完了
- ・主立坑: 2021.11.18完了
- ・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



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搬、巻上機設備により運搬



主立坑の埋め戻し作業

- ・深度100m予備ステージ
(予備ステージ: 幅3m、高さ3m)
- ・(主立坑: 直径6.5m)



水平坑道の埋め戻し作業

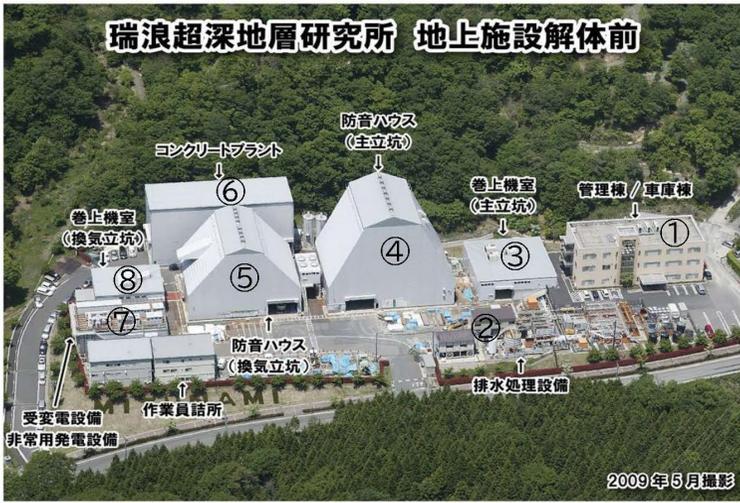
- ・写真の坑道規模: 幅4m、高さ3.5m



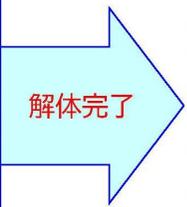
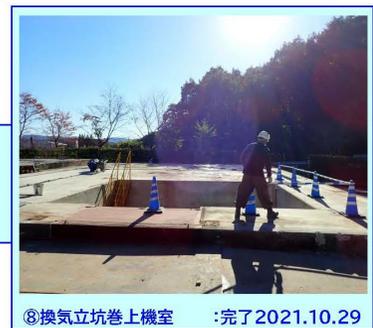
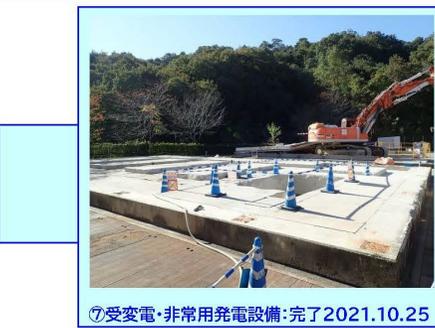
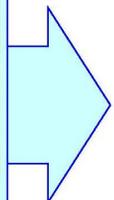
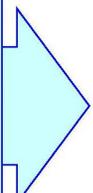
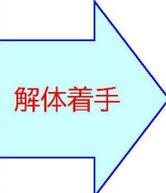
換気立坑の埋め戻し作業

- ・深度90m付近(直径4.5m)

令和2年度以降の状況について(地上施設撤去)



瑞浪超深地層研究所 坑道埋め戻し等工事 地上施設解体作業 実績

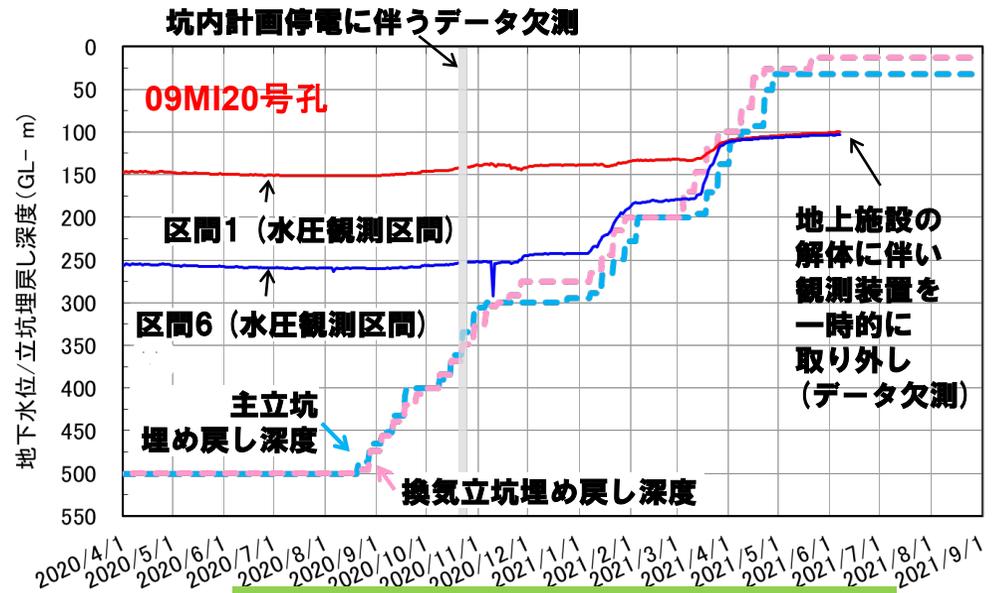


○地下水の水圧・水質の観測結果例

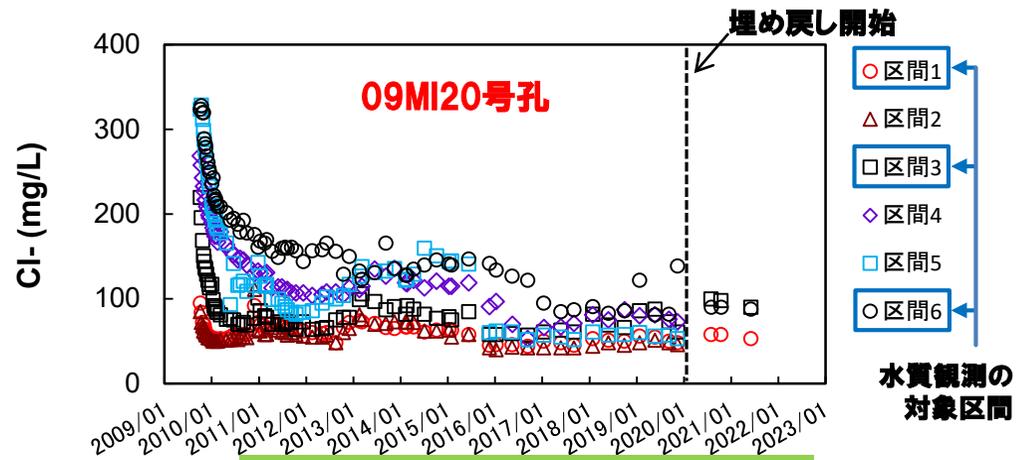


環境モニタリング調査の位置図(研究坑道内)

- 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、地表まで採水管を延長し、本システムを完成させた。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予定。



埋め戻しの進捗に伴う地下水の水圧変化の例



地下水の塩化物イオン濃度の変化の例

2. 幌延深地層研究計画

幌延深地層研究計画

1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

1.1 人工バリア性能確認試験※

1.2 オーバーパック腐食に関わる原位置試験※※

1.3 物質移行試験

2. 処分概念オプションの実証

2.1 処分孔等の湧水対策・支保技術※

2.2 人工バリアの定置・品質確認などの実証試験※※

2.3 高温度(100℃以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

3.2 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化※

3.3 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

※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. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

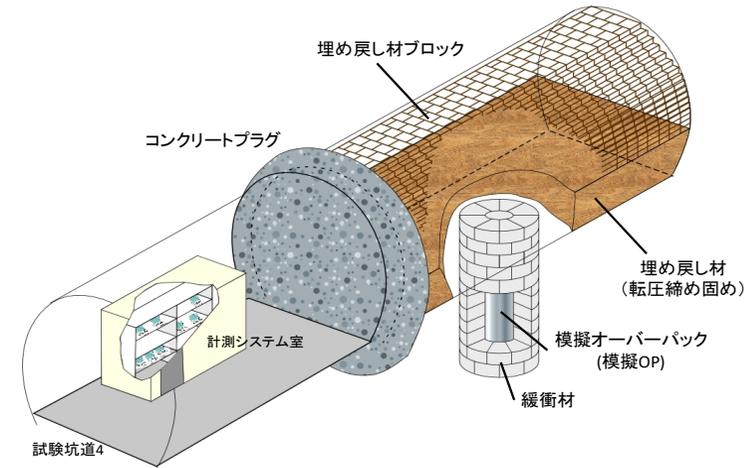
1.1 人工バリア性能確認試験

(研究の背景・狙い・目標・意義)

人工バリア性能確認試験は、実際の地質環境下における処分孔竖置き方式を対象とした熱-水-応力-化学連成現象に関する試験をとおして、設計や連成挙動評価手法の適用性の確認、ならびに施工方法などの工学的実現性の例示等を行い、設計、施工および評価・解析といった一連の技術に関する基盤情報を整備する。

(実施内容)

- 人工バリア(緩衝材、オーバーパック)に関する設計手法と製作・施工及び品質管理手法の適用性確認
- 埋め戻し材、プラグに関する設計手法と製作・施工及び品質管理手法の適用性確認
- 熱-水-応力-化学連成評価手法の整備と適用性確認



人工バリア性能確認試験の概念図

緩衝材ブロックの設置



模擬オーバーパックの設置



埋め戻し転圧



埋め戻し材ブロックの設置



人工バリア性能確認試験 施工の様子

1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

1.1 人工バリア性能確認試験

<p>主要な成果</p>	<p>○人工バリア(緩衝材、オーバーパック)、埋戻し材、プラグ、処分孔掘削技術に関する設計手法、製作・施工及び品質管理手法を実証</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>緩衝材及びオーバーパックに関する設計手法を構築し、試設計を実施し、設計要件に基づく設計の実施が可能であることを確認</u> ・ <u>真空把持装置を用いた緩衝材ブロックの定置を実証</u> ・ <u>堆積岩に対する、処分孔掘削技術の実証実験により、処分孔掘削技術(オーガー掘削:機械的な掘削方法の一種)の有効性を確認</u> ・ <u>掘削スリ混合埋め戻し材を製作し、締固め、ブロック方式等による原位置施工や品質管理手法の適用性を確認</u> ・ <u>加熱・注水時の人工バリアの挙動に関する原位置データを取得し、解析ツールの力学モデルの高度化により、原位置データの再現性が向上することを確認</u> ・ <u>緩衝材の膨潤変形による密度変化に伴う熱特性、水理特性及び力学特性の密度依存性を考慮できるようモデルを高度化</u> ・ <u>気液二相流THM連成解析により緩衝材中の気相が水分移動だけではなく力学現象(応力や変位)にも影響を及ぼす可能性があることを確認</u>
<p>事業等への反映</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 精密調査段階における安全性・合理性等を考慮した手順・工法の選定に寄与 ・ 地層処分後の安全評価における初期状態の把握やオーバーパックの寿命を評価する際の人工バリア周辺の環境条件の設定等への反映
<p>成果の公表</p>	<p>学術論文12件、学会での口頭発表15件、JAEA技術資料25件、特許0件</p>

1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

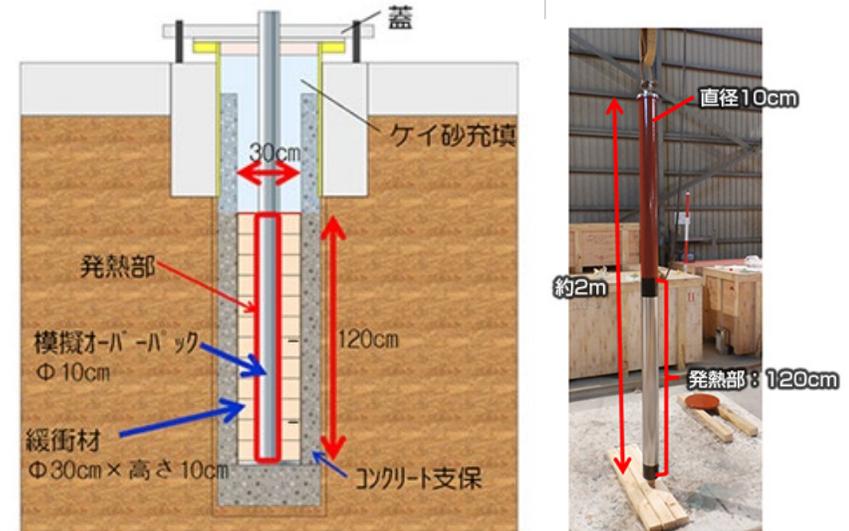
1.2 オーバーパック腐食に関わる原位置試験

(研究の背景・狙い・目標・意義)

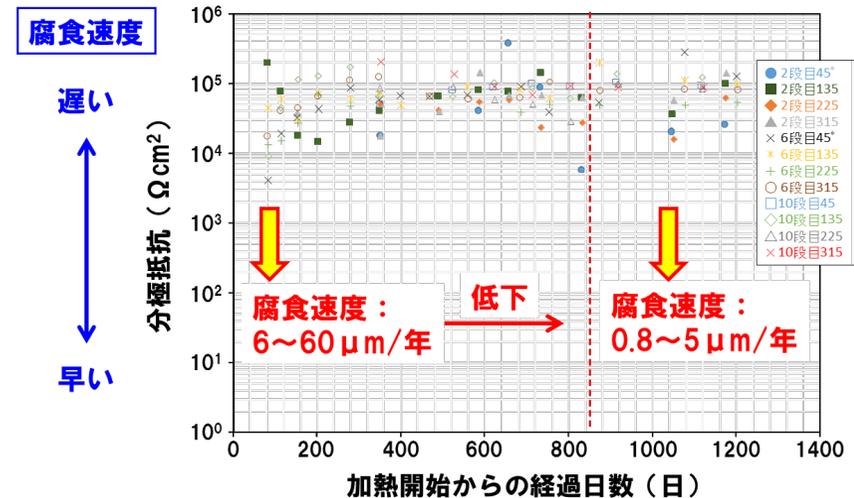
- 緩衝材の再冠水過程では、飽和度等の環境条件の不均一性によって不均一な腐食の可能性がある。また、環境条件の変化に伴って腐食挙動も経時的に変化すると考えられる。
- このような挙動を把握するには、ある程度のスケールの試験が必要であり、室内試験では限界があることから、工学的スケールでの検討が必要である。
- 緩衝材の再冠水～飽和の過程を工学規模で再現し、オーバーパックの腐食量や不均一性のデータを取得して既往の腐食量評価手法の妥当性、適用性を確認する。更に、環境条件の不均一性に加えてオーバーパック溶接部に代表される材料側の不均一性も伴う系での不均一腐食挙動を確認する。

(実施内容)

- 試験坑道に掘削した試験孔に緩衝材と模擬オーバーパックを設置して(図1)腐食試験を実施した。
- 約3年間にわたる環境条件や腐食挙動のモニタリングデータを取得し、経時的な変化を把握した(図2)。



オーバーパック腐食試験の模式図と模擬オーバーパックの外観



腐食センサーによるモニタリングの結果

1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

1.2 オーバーパック腐食に関わる原位置試験

主要な成果	<p>○実際の地下環境においてオーバーパック腐食試験を現地で行い、これまでの地上での腐食試験結果の妥当性を確認</p> <ul style="list-style-type: none">・ <u>オーバーパックの溶接部と母材(本体)で腐食挙動に有意な差は認められないことを確認</u>・ <u>腐食センサーを用いたモニタリングが少なくとも数年間以上は可能であることを確認</u>・ <u>室内試験に基づく既往の評価手法の保守性、妥当性を確認</u>
事業等への反映	・オーバーパックの設計や寿命評価に寄与
成果の公表	学術論文4件、学会での口頭発表1件、JAEA技術資料14件、特許0件

1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

1.3 物質移行試験

(研究の背景・狙い・目標・意義)

- 幌延地域に分布する泥岩は断層等の構造的な割れ目が分布することが知られているため、岩盤基質部(=健岩部)における拡散および割れ目を介した移流・分散が主要な移行形態として考えられる。したがって、割れ目を有する堆積岩での物質移行特性を総合的に評価することが必要。そのために、幌延の泥岩を事例として、健岩部および割れ目の双方を対象とした原位置トレーサー試験等を実施し、それぞれの構造の物質移行特性評価手法を構築することが重要。また合わせて、世界的にも事例が少ない泥岩中の割れ目を対象としたトレーサー試験手法を確立することも重要。

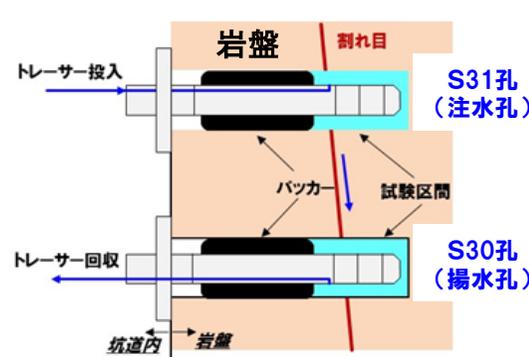
(実施内容)

【割れ目を対象とした試験】

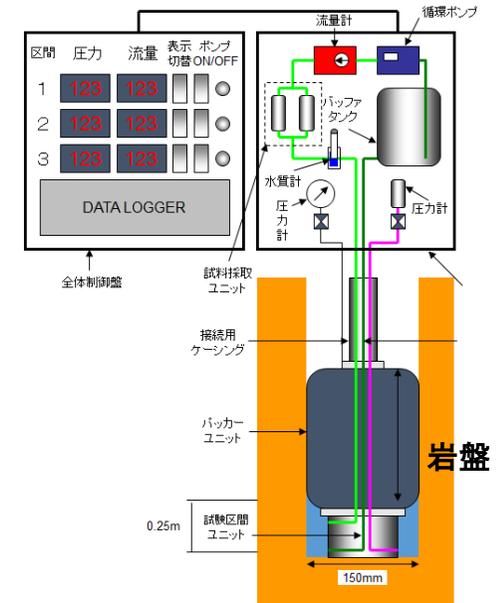
- 割れ目を対象としたトレーサー試験(ダイポール試験)を実施
- 単一の割れ目を対象としたトレーサー試験を事例とし、溶存ガス環境下でのトレーサー試験における最適な試験条件を検討
- トレーサーが移行した直接的な痕跡の情報に基づき、割れ目帯中の物質移行概念を検討

【健岩部を対象とした試験】

- 健岩部を対象とした原位置拡散試験を実施し、その後オーバーコアリングを実施
- 試験区間内のトレーサー濃度減衰データおよび岩石試料中の濃度プロファイルから物質移行パラメータを取得



ダイポール試験のイメージ



拡散試験のイメージ

1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

1.3 物質移行試験

<p>主要な成果</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>室内試験と実際の地下環境におけるトレーサー試験により、健岩部や割れ目における物質の移動現象を適切に評価することが可能な手法を確立</u> • <u>1次元の解析結果と実測値が整合的であり、1次元の解析でも健岩部における移行挙動を解釈可能であることを確認</u> • <u>原位置試験及び室内試験で得られた各トレーサーの物質移行特性(実効拡散係数と収着分配係数)は同じ傾向を示しており、原位置試験データの妥当性を確認</u> • <u>割れ目内の選択的な流れを考慮したモデルにより、割れ目内の不均質な流れにおけるトレーサーの移行挙動を解釈可能となったこと</u> • <u>単一の割れ目を対象としたトレーサー試験を事例とし、溶存ガス環境下でのトレーサー試験における最適な試験条件を確認</u>
<p>事業等への反映</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 地層処分事業における「核種移行解析と線量評価」において、新第三紀堆積岩を対象とした母岩の核種移行モデルを構築する際の基盤情報として活用 • 核種移行モデル及び利用される核種移行パラメータに含まれる不確実性をより低減することで、核種移行解析結果の保守性をより合理的なものにするための基盤情報として活用
<p>成果の公表</p>	<p>学術論文19件、学会での口頭発表30件、JAEA技術資料1件、特許0件</p>

2. 処分概念オプションの実証

2.1 処分孔等の湧水対策・支保技術

(研究の背景・狙い・目標・意義)

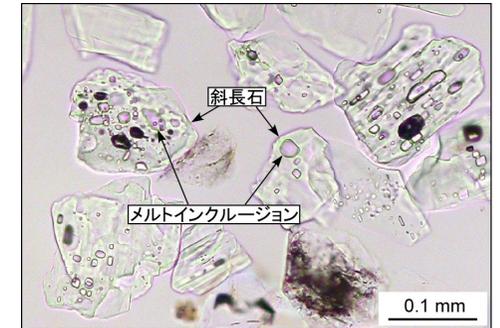
- 地層処分場の建設時には、高地圧・高間隙水圧条件が予想される。また、堆積軟岩の場合には割れ目・断層に狭在物が存在する影響で従来のセメント系材料の注入が難しいことなども想定される。さらに、グラウトの周辺岩盤や人工バリアシステムに与える影響評価、多連接坑道を対象とした湧水対策効果を評価する手法の整備なども重要である。
- 地層処分の地下環境条件を考慮した湧水抑制対策技術やグラウト材の浸透評価手法の開発など、実際の地質環境における一連の湧水抑制対策技術の実証を目標とする。
- 国内外の地下空洞開発事例において、支保設計、情報化施工技術、支保及び岩盤の計測技術が構築されている。
- このような事例がある中で、地層処分場で想定されるような、広範囲に及び、なおかつ深度300m以深という大深度に展開される大規模地下施設においても、既存の技術が適用可能かどうかを確認し、課題がある場合には技術の整備を行う必要がある。そこで、立坑や水平坑道における支保技術、情報化施工技術、長期的な計測技術を整備することを目標とする。

(実施内容)

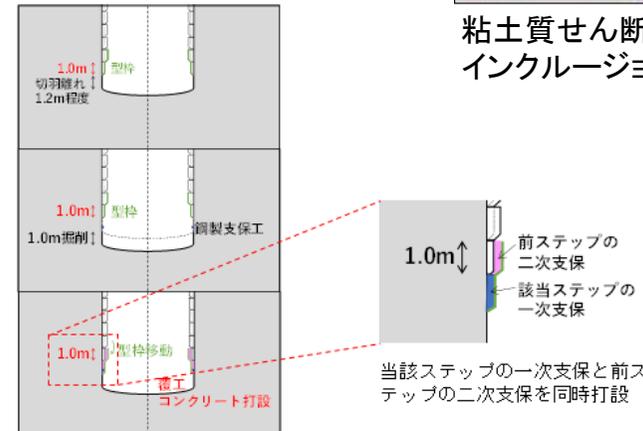
- 突発的な大量湧水を回避するための予測手法の開発
- グラウト材の浸透評価手法の検討
- 海水条件下で使用可能なグラウト材料の開発
- 立坑掘削時の情報化施工技術の構築
- 低強度・高地圧地山における大深度立坑支保設計手法の開発
- 岩盤および支保工の安定性を長期的に計測する技術の構築(二重支保の適用可能性の検討)



大量湧水発生状況



粘土質せん断帯に含まれるメルトインクルージョン*の顕微鏡写真



深度380m以深において適用可能な二重支保の概念

*マグマが噴火時に急冷してガラスとなった物質

2. 処分概念オプションの実証

2.1 処分孔等の湧水対策・支保技術

<p>主要な成果</p>	<p>○堆積岩に対する、湧水抑制技術の実証実験により、これらの技術の有効性を確認</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>突発的な大量湧水の発生の原因となりうる粘土質せん断帯の分布の予測手法として、メルトインクルージョンに着目した湧水抑制対策(グラウト)の事前予測が有効であることを確認</u> ・ <u>等価多孔質媒体モデルによるグラウト浸透解析の結果と、現場透水試験の結果は整合的であり、設定したグラウトの改良範囲が妥当であることと、解析の有効性を確認</u> ・ <u>海水条件下で処分孔まわりの低透水領域を改良することが可能となる溶液型グラウト材料を設計</u> <p>○堆積岩に対する、支保技術の実証実験により、これらの技術の有効性を確認</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>立坑掘削前のパイロットボーリング孔の情報やグラウト施工情報を基に、覆工コンクリートの高さを決定するフローを構築</u> ・ <u>吹付コンクリート・鋼製支保工応力計測と、弾性波トモグラフィ調査を組み合わせた解釈により、長期的に岩盤と支保工の両方の安定性をモニタリングすることが可能になったこと</u> ・ <u>光ファイバー式変位計の長期岩盤変位計測技術としての有効性を実証</u>
<p>事業等への反映</p>	<p>・「処分場の設計技術の向上」や「処分場建設の安全性を確保する技術の高度化」に寄与</p>
<p>成果の公表</p>	<p>学術論文6件、学会での口頭発表29件、JAEA技術資料7件、特許0件</p>

2. 処分概念オプションの実証

2.2 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証研究

(研究の背景・狙い・目標・意義)

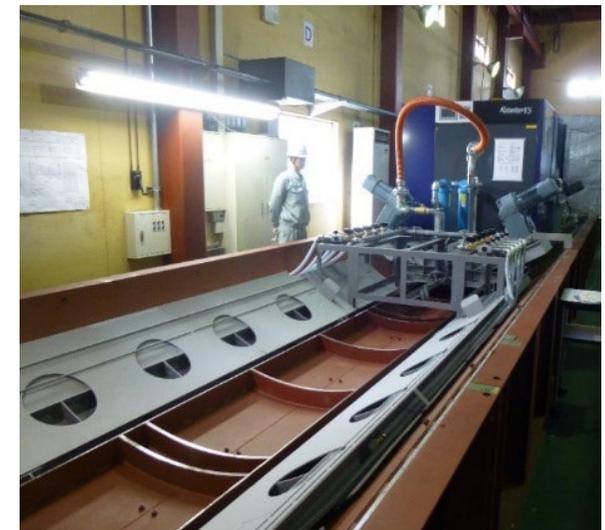
処分場の操業(廃棄体の搬送定置・回収、処分場の閉鎖を含む)に関わる人工バリアの搬送・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証を目的として、幌延の地下施設を事例に、原位置試験を実施し、人工バリアの搬送定置・回収技術を実証する。

(実施内容)

- 処分坑道横置き定置方式について、PEM(Prefabricated Engineered barrier system Module)方式の搬送定置・回収技術の実証
 - ✓ 搬送・定置技術: エアベアリング方式を用いた搬送装置の地下環境への適用性確認
 - ✓ 回収技術: PEM-坑道間の狭隘な隙間に対する、隙間充填技術および充填材の除去技術の整備、実証
- 閉鎖技術(埋め戻し方法: プラグ等)の実証
- 搬送定置・回収技術の実証(緩衝材や埋め戻し材の状態に応じた除去技術の技術オプションの整理、回収容易性を考慮した概念オプション提示、回収維持の影響に関する品質評価手法の提示)
- 人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いに係る品質保証体系の構築



試験坑道の整備



エアベアリング方式のPEMの定置・回収装置(実機)

2. 処分概念オプションの実証

2.2 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証研究

<p>主要な成果</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <u>堆積岩に対する、搬送定置・回収技術等の実証実験により、これらの技術の有効性を確認</u> • <u>現場打設のコンクリート坑道面においてもエアベアリング方式で重量物が搬送可能であることを確認</u> • <u>走行時の牽引力や空気供給量などのデータを取得し、実機の製作・運転方法などに反映</u> • <u>模擬PEM-坑道間の隙間に対し、下部狭隘部にはペレット方式、上部空間には吹付け方式による隙間充填試験を実施し、適用性を確認</u> • <u>坑道の埋め戻し方法の違い(締固め、ブロック方式等)による埋め戻し材の基本特性(密度や均一性)を把握</u> • <u>緩衝材への水の膨潤を把握するための試験により、自然湧水環境では緩衝材が膨潤し隙間が埋まるに従い緩衝材が流出しなくなることを確認</u>
<p>事業等への反映</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 合理的に人工バリアを回収するための手法の提示, 回収可能性を維持した場合の処分場の安全性への影響に関する品質評価手法の提示 • 将来的に処分場を閉鎖する際に適用される閉鎖技術に求める性能を設定する際やその性能を担保するために必要となる設計・施工技術を選択する際の基盤情報
<p>成果の公表</p>	<p>学術論文2件、学会での口頭発表22件、JAEA技術資料13件、特許0件</p>

2. 処分概念オプションの実証

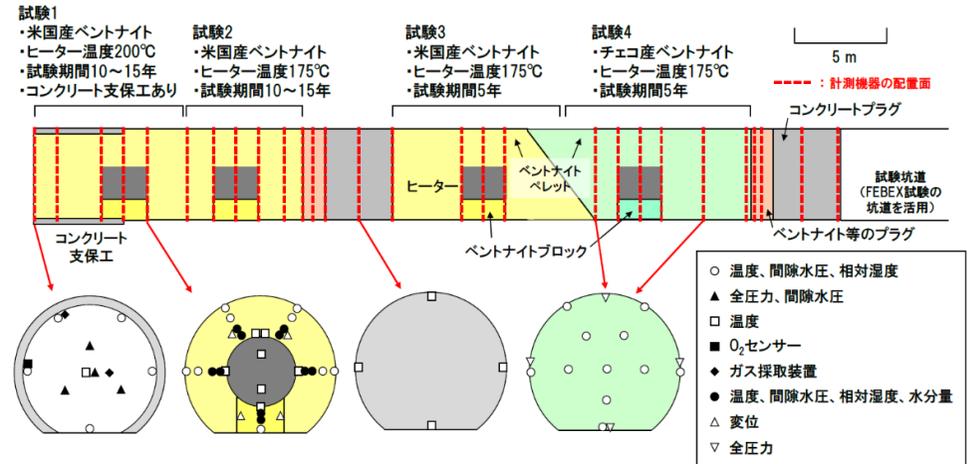
2.3 高温度(100℃以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

(研究の背景・狙い・目標・意義)

- 人工バリア設置環境の深度依存性を考慮し、種々の処分概念オプションの工学的実現性を実証し、多様な地質環境条件に対して柔軟な処分場設計を行うことを支援する技術オプションを提供する。
- 実際の処分事業では、オーバーパック表面が100℃以下になるように処分することが基本であるが、想定外の要因によって100℃を超えた状態になることを想定して、人工バリアシステムの安全裕度を検証する。

(実施内容)

- 限界的条件下での現象のシナリオの整理、海外での原位置試験に関する情報等の入手



高温条件下における人工バリア試験の施工状況ならびに計測機器の配置断面図(海外での研究事例)

<p>主要な成果</p>	<ul style="list-style-type: none"> 高温度状態では空気の影響が出るため、空気や水蒸気を考慮した解析を行った結果、空気考慮の有無が膨潤挙動に影響を及ぼすことが分かったこと 緩衝材の最高温度が100℃を超えた場合に緩衝材に生じうる変質現象に関して、過去の知見と、今後詳細に調査すべき項目を整理
<p>事業等への反映</p>	<ul style="list-style-type: none"> 従来の地層処分場の設計における温度条件の制限を緩和できる可能性がある 想定外の要因により緩衝材の温度が100℃を超えた場合の人工バリアの挙動の検討や、高温条件下での人工バリアの安全裕度の評価が可能
<p>成果の公表</p>	<p>学術論文0件、学会での口頭発表0件、JAEA技術資料0件、特許0件</p>

3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

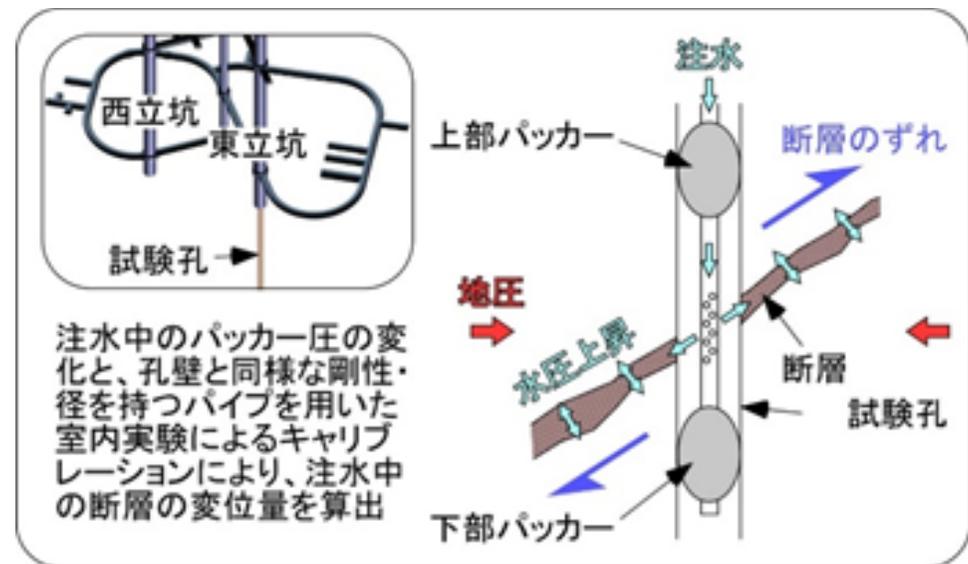
3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

(研究の背景・狙い・目標・意義)

- 岩盤中には大小様々な断層が存在するが、小規模なものいくつかは処分場に取り込まざるを得ない可能性がある。それらの断層が地震や隆起などの地殻変動の影響を受けた場合に、その透水性がどの程度まで上昇し得るかを検討しておく必要がある。
- 断層の透水性は断層の変形様式に大きく依存する。脆性的な変形が起こると断層の透水性は有意に上昇しやすいが、延性的な変形の場合は透水性が上昇しにくい。生じる変形が脆性的か延性的かは、変形時の岩石強度、応力などに依存する。
- 本研究では、地殻変動に対する緩衝能力が潜在的に高いことから堆積岩に重点を置き、断層の変形様式を支配する岩石の強度・応力状態を計測且つマッピングが可能なパラメータで指標化することを試みる。そのようなパラメータと断層の透水性の潜在的な上限を関係付けることができれば、処分場閉鎖後の断層の透水性について現実的な状態設定が可能となる。

(実施内容)

- 断層の変形様式(脆性的or延性的)を支配し得る岩石の強度・応力状態を表す指標を考案するために、関連する既存研究のレビューを行うとともに、机上検討やコア観察・室内実験(破壊実験)を実施
- 水圧擾乱試験を実施し、モデルの有効性を検証
- 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握(ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験)
- DI(ダクティリティインデックス)を用いた透水性評価の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備
- 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備



水圧擾乱試験の概要

3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

<p>主要な成果</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○<u>地下水の流れに関し、堆積岩の緩衝能力(自己治癒能力)を定量化するため、堆積岩での地震動が透水性に与える影響範囲を推定</u> ○これまでの検討では、断層の幅が数cmの規模の小さな断層に着目し、試験を行い、断層の透水性への地震動の影響などを確認。手法の妥当性が確認できたため、この手法を使って、処分場の設計・施工や安全評価とリンクした形で研究を進めることが可能となったこと <ul style="list-style-type: none"> ・<u>DIが断層のダメージゾーンの変形様式と定量的な対応付けが可能であることが確認でき、DIが指標として有効であることを確認</u> ・<u>地殻変動(応力状態の変化)に対する断層の透水性を予測できることを確認</u> ・<u>水圧擾乱試験では、断層内の水圧を人工的に上昇させることによって断層内にせん断変形を誘発させ、それに伴う断層の透水性の変化を観測</u> ・<u>水圧擾乱試験を行った結果、新たにせん断変形が起こったり、有効応力が低下しても、断層帯亀裂の透水性はDIの経験式の範囲を超えないことを確認</u> ・<u>以上のように、数cmの規模の小さな断層を対象に水圧擾乱試験を実施し、DIを用いた地殻変動と断層の透水性の関係を示すモデルの有効性を確認</u> ・<u>上記モデルの有効性を水理力学連成モデルによるシミュレーションと海外地下研の水圧擾乱試験の結果により再検証</u> ・<u>上記経験式の信頼性を確認するための簡便な方法として、水圧擾乱試験方法を開発</u>
<p>事業等への反映</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・「地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化」や「ニアフィールドにおける状態変遷を考慮した核種移行解析モデルの構築」に貢献
<p>成果の公表</p>	<p>学術論文9件、学会での口頭発表7件、JAEA技術資料0件、特許0件</p>

3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

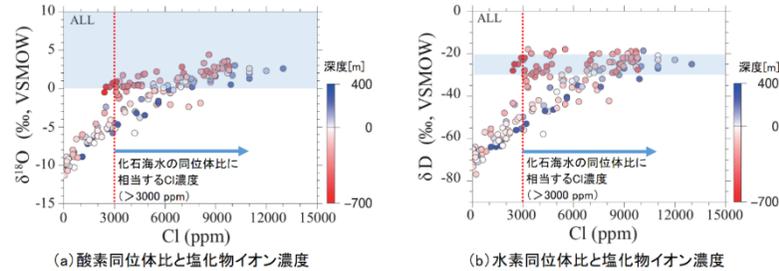
3.2 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化

(研究の背景・狙い・目標・意義)

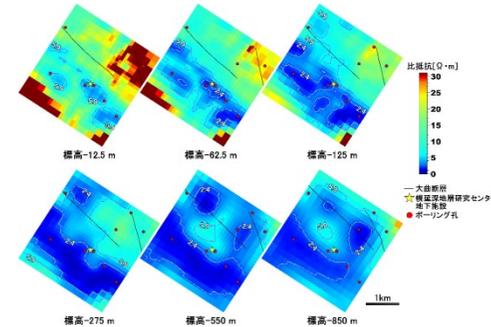
地下水の流れが非常に遅い領域(化石海水領域に相当と仮定)の分布を把握することは、処分事業における処分場選定の際に有用な情報になり得る。このため、地上からの調査により、化石海水の三次元分布を評価する既存技術の高度化を図る。

(実施内容)

- 地下水の塩濃度分布の推定手法の検討の実施
- 化石海水領域の三次元分布を把握するための物理探査の実施とボーリング調査の開始



酸素・水素同位体比と塩化物イオン濃度の関係



<p>主要な成果</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 地下水の流れが非常に遅いと推定される領域がClの分布図とおおむね一致していることを示すことができたこと。化石海水の指標として、Cl及び水の安定同位体を基に分布を推定 • 既存の水理・物質移動評価手法を基に塩濃度分布を推定 • 電磁探査及び準三次元反射法地震探査を実施して、化石海水が分布する可能性が高い領域を効率的に判読できることが分かったこと
<p>事業等への反映</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 概要調査における、地下水の流動が緩慢な“低流動域”の空間的な拡がり地表から効率的に調査・評価する技術に寄与
<p>成果の公表</p>	<p>学術論文7件、学会での口頭発表17件、JAEA技術資料13件、特許0件</p>

3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

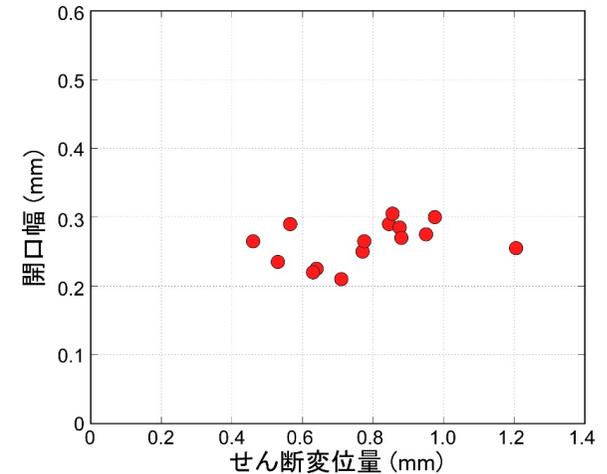
3.3 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

(研究の背景・狙い・目標・意義)

地震・断層活動等の地殻変動に対する堆積岩の力学的・水理学的な緩衝能力(自己治癒能力)を定量的に検証し、堆積岩地域における立地選定や処分場の設計を、より科学的・合理的に行える技術と知見を整備する。

(実施内容)

- 緩衝材や埋め戻し材の膨潤圧が掘削影響領域の亀裂の透水性に与える影響について亀裂を対象に実施した既往の樹脂注入試験結果の解析、坑道埋め戻し後の掘削損傷領域の透水性を推定するモデルの構築



掘削損傷領域の割れ目で計測された開口幅とせん断変位量の関係

<p>主要な成果</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 国内外の関連する研究事例を収集 • <u>DIの経験式を用いた掘削影響領域(EDZ)の透水性予測結果は実測値と概ね整合しており、埋め戻し後の予測の見通しが得られたこと</u> • EDZ割れ目への樹脂注入と詳細観察が、坑道埋め戻し後のせん断変位による割れ目開口の可能性を検討する上で有効であることを確認
<p>事業等への反映</p>	<p>・「処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備」や「ニアフィールドにおける状態変遷を考慮した核種移行解析モデルの構築」に貢献</p>
<p>成果の公表</p>	<p>学術論文7件、学会での口頭発表25件、JAEA技術資料12件、特許0件</p>

必須の課題	実施項目	主要な成果	成果の公表※
1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認	1.1 人工バリア性能確認試験	人工バリア(緩衝材、オーバーバック)、埋戻し材、プラグ、処分孔掘削技術に関する設計手法、製作・施工及び品質管理手法を実証	学術論文: 12件 口頭発表: 15件 技術資料: 25件
	1.2 オーバーバック腐食に関わる原位試験	実際の地下環境においてオーバーバック腐食試験を現地で行い、これまでの地上での腐食試験結果の妥当性を確認	学術論文: 4件 口頭発表: 1件 技術資料: 14件
	1.3 物質移行試験	室内試験と実際の地下環境におけるトレーサー試験により、健岩部や割れ目における物質の移動現象を適切に評価することが可能な手法を確立	学術論文: 19件 口頭発表: 30件 技術資料: 1件
2. 処分概念オプションの実証	2.1 処分孔の湧水対策・支保技術	堆積岩に対する、湧水抑制技術や支保技術の実証実験により、これらの技術の有効性を確認	学術論文: 6件 口頭発表: 29件 技術資料: 7件
	2.2 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	堆積岩に対する、搬送定置・回収技術等の実証実験により、これらの技術の有効性を確認	学術論文: 2件 口頭発表: 22件 技術資料: 13件
	2.3 高温度(100℃以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験	高温度状態では空気の影響が出るため、空気や水蒸気を考慮した解析を行った結果、空気考慮の有無が膨潤挙動に影響を及ぼすことが分かったこと	学術論文: 0件 口頭発表: 0件 技術資料: 0件
3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証	3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化	地下水の流れに関し、堆積岩の緩衝能力(自己治癒能力)を定量化するため、堆積岩での地震動が透水性に与える影響範囲を推定できるようになったこと	学術論文: 9件 口頭発表: 7件 技術資料: 0件
	3.2 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化	物理探査を組み合わせて実施することにより、化石海水が分布する可能性が高い領域を効率的に判読できることが分かったこと	学術論文: 7件 口頭発表: 17件 技術資料: 13件
	3.3 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験	DIの経験式を用いた掘削影響領域(EDZ)の透水性予測結果は実測値と概ね整合しており、埋め戻し後の予測の見通しが得られたこと	学術論文: 7件 口頭発表: 25件 技術資料: 12件

主な研究協力と共同研究

原子力環境整備促進・ 資金管理センター	<ul style="list-style-type: none"> ・搬送定置・回収技術に関する研究 ・地層処分実規模試験施設を利用した研究開発
電力中央研究所	<ul style="list-style-type: none"> ・地質・地下水環境特性評価に関する研究 ・地下施設建設時の坑道掘削影響領域の調査技術に関する研究
産業技術総合研究所	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の水理・化学・生物連成現象に関する研究 ・海陸連続三次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータ取得手法に関する研究
幌延地圏環境研究所	<ul style="list-style-type: none"> ・堆積岩を対象とした岩盤力学や微生物などに関する研究
名古屋大学	<ul style="list-style-type: none"> ・炭酸カルシウムのコンクリーション化による掘削影響領域および水みち割れ目の自己シーリングに関する研究
北海道大学	<ul style="list-style-type: none"> ・堆積岩中における物質移行に関する研究
京都大学	<ul style="list-style-type: none"> ・掘削影響領域の可視化手法に関する研究
京都大学、東北大学	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水中の微量元素と微小な物質(コロイド・有機物・微生物)との相互作用に関する研究
東京大学	<ul style="list-style-type: none"> ・微生物を指標とした堆積岩中の水みち調査手法の開発
室蘭工業大学	<ul style="list-style-type: none"> ・三次元レーザスキャナを用いた坑道壁面の地質観察手法の開発
(株)大林組	<ul style="list-style-type: none"> ・光計測技術による岩盤挙動や掘削影響領域の長期挙動のモニタリングに関する研究
原子力規制庁	<ul style="list-style-type: none"> ・坑道閉鎖措置に関わる研究(原子力機構安全研究センターと実施する共同研究への協力)

● 令和3年度確認会議開催実績

- 第1回(4/16), 第2回(5/18), 第3回(6/7), 第4回(6/15), 第5回(7/16)
※第2回～第4回はオンライン開催

- 令和2年度の成果、令和3年度の計画、および稚内層深部(深度500m)における研究の実施に関する検討結果についてご説明し、約250件のご質問に回答した。

● 令和3年度確認会議における主な確認事項

- 確認事項に関する文書を北海道および幌延町より受領(7/30)
 - ・ 外部評価において、令和2年度の研究が計画に沿って進められており、令和3年度以降の計画も令和2年度の成果を踏まえて設定されていることや計画の進捗状況と今後の予定などについて特段問題ないとの評価を得ていること。
 - ・ 令和2年度の研究成果によって、深度500mには深度350mとは異なる性質の地層が存在していることがより確かになったこと。深度500mで研究を行うことで、技術の実証性を確かなものとするができることとともに、より幅広い地質環境を対象とした技術や経験を得ることができること。
 - ・ 現時点でNUMOとの共同研究について具体的に決まったものはないが、仮にNUMOの資金や人材を活用する場合でも、NUMOへの譲渡や貸与を行わないことを前提に機構が主体となり機構の研究目的や課題と整合し機構の責任において、研究施設を運営・管理すること。

500mにおける研究の実施について

前提

稚内層深部において行う研究は、「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」の必須の研究課題の範囲内

原子力機構の判断ポイント

- ✓ 稚内層深部における研究を実施したとしても、令和2年度以降の研究期間を前提とした研究工程であること。
- ✓ 稚内層深部での研究を通じて成果を得ることにより、稚内層浅部（深度350m）での研究を通じて得られた成果と合わせて、技術基盤の整備により一層寄与できること。

500mにおける研究の実施について

研究工程

		R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
		第3期			第4期中長期目標期間						
1. 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認											
1.1	人工バリア性能確認試験	浸潤時・減熱時のデータ取得、連成モデルの適用性確認 国際プロジェクトにおける解析コード間の比較検証、改良・高度化						※			
1.2	物質移行試験	掘削影響領域での物質移行に関するデータ取得 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行試験、等									
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	搬送定置・回収技術、閉鎖技術の実証									
2.1.2	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					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 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理、等					
2.2	高温(100℃以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験	100℃超の階にニアフィールドにおいて発生する現象の整理 国際プロジェクト情報の収集・整理、等									
3. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証											
3.1	水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化										
3.1.1	地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握	数10cmの幅の断層を対象とした水圧擾乱試験 断層の活動性評価手法の整備、等									
3.1.2	地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化	地下水の流れが非常に遅い領域(化石海水領域)の調査・評価技術の検証、等									
3.2	地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験	人工バリアの緩衝材や坑道埋め戻し材が掘削影響領域の力学的・水理的な緩衝能力に与える影響を把握する解析手法の開発									
【施設計画】											
	坑道掘削			掘削準備	350m調査坑道	立坑(西、東、換気)	500m調査坑道				
【維持管理】											

※本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく

※ 人工バリア性能確認試験については、材料の水分量や密度、腐食の度合いなど詳細なデータ取得するための解体調査を当初令和5、6年度に予定していたが、500m掘削中(令和5～7年度)は、安全管理上、作業が2箇所(2切羽)までに限定され、規模の大きな作業が困難になるため、令和8、9年度に実施することとしました。

■ 個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題(2.1.2)に統合して実施する。
■ 2.1.2を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

500mにおける研究の実施について

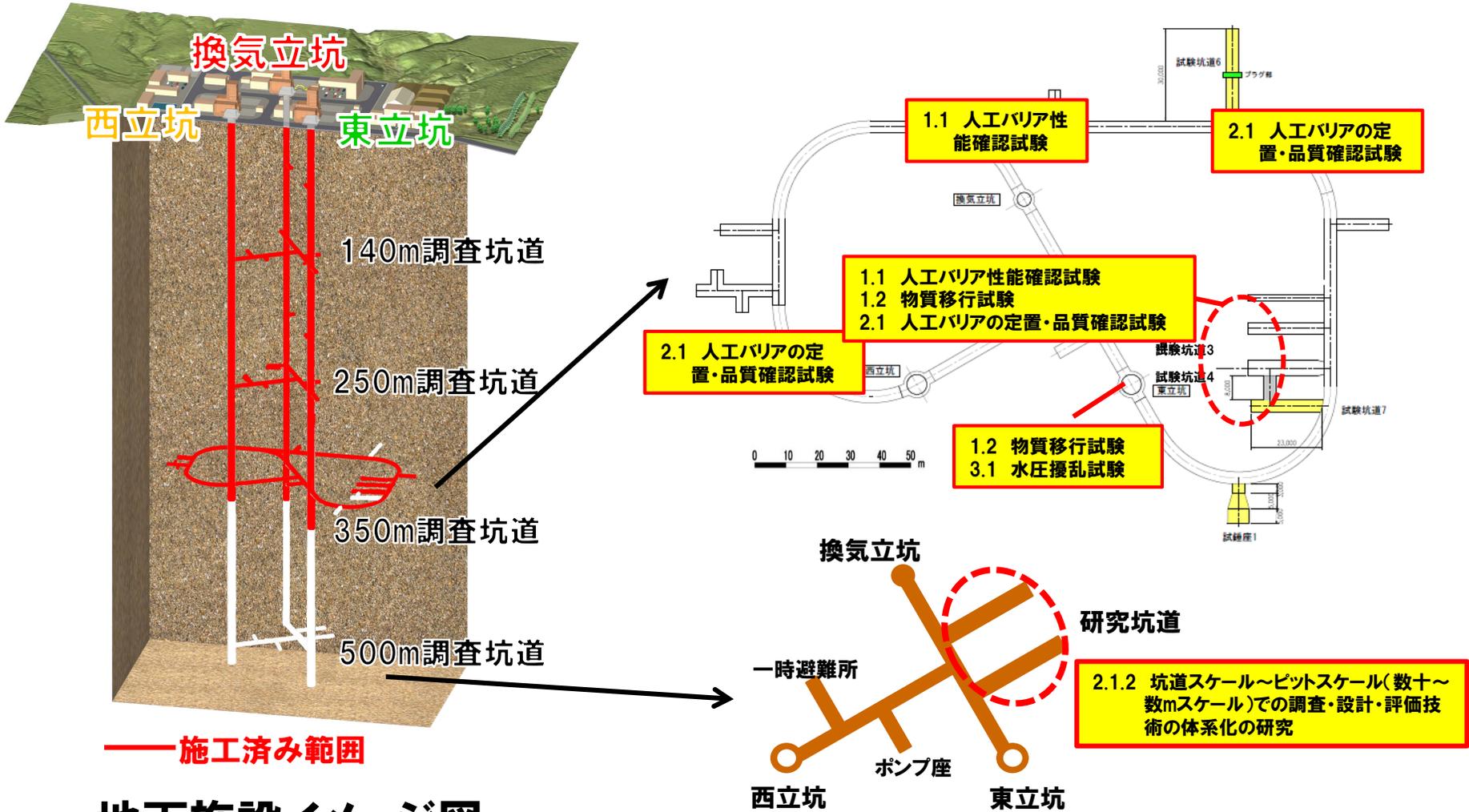
●深度500mでの研究の必要性について

令和2年度の研究成果によって、深度500mには深度350mとは異なる性質の地層が存在していることが、より確かになりました。

地下坑道の設計・施工上の観点などから、より難しいと考えられる稚内層深部（500m）を対象として、坑道を展開して研究に取り組むことで、技術の信頼性向上を目的に、主に以下の成果が得られ、技術基盤の整備に、より一層貢献できるため、必要と判断しました。

- 高い地圧がかかり坑道の設計・施工上の難易度が高い地質条件下で、処分技術に関わる基盤技術を実証します。
- 物質が動きにくい環境で岩盤が有する物質を閉じ込める性能が実証でき、人工バリア等の技術仕様の精緻化が提案できます。
- 水の流れに大きな影響を及ぼす掘削影響領域を含めた安全評価技術を体系的に実証可能になります。

500mにおける研究の実施について 坑道のレイアウト・試験実施場所(案)



地下施設イメージ図

令和3年8月更新

国際共同プロジェクトの目的、内容、スケジュール

【目的】

「令和2年度以降の幌延深地層研究計画」の研究課題について、多国間で協力しながら研究開発を推進し、先進的な安全評価技術や工学技術に関わる研究成果を最大化するとともに、知識と経験を共有し次世代を担う国内外の技術者や研究者を育成する。

【内容】

OECD/NEA(経済協力開発機構/原子力機関)国際共同プロジェクトとして国際的に関心の高い以下の項目を対象とする。

- 物質移行試験
- 処分技術の実証と体系化
- 実規模の人工バリアシステム解体試験

※国際共同プロジェクトは、令和10年度末までの期間を限度として実施する。

【これまでの対応】

- 令和3年10月26日:OECD/NEAより国際共同プロジェクト準備会合への参加を募集
- 令和3年10月27日:JAEAより国際共同プロジェクト準備会合の募集開始を行う旨をプレスリリース

【今後の予定】

- 準備会合への参加機関間で実施内容や役割分担の確認を行い、最終的に参加を決定した機関の間で、共同研究契約を締結(令和4年度下期予定)する。

3. 地質環境の長期安定性に関する研究

地質環境の長期安定性に関する研究

1. 調査技術の開発・体系化

- 1.1 断層の活動性に係る調査技術※※
- 1.2 地殻構造の高空間分解能イメージング技術※※
- 1.3 深部流体の分布に関する調査技術※※

2. 長期予測・影響評価モデルの開発

- 2.1 稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術※※
- 2.2 時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術※

3. 年代測定技術の開発

- 3.1 ウラン系列放射年代測定法の実用化※
- 3.2 光ルミネッセンス(OSL)年代測定法の実用化※
- 3.3 アルミニウム-26(^{26}Al)年代測定法、塩素-36(^{36}Cl)年代測定法、ヨウ素-129(^{129}I)年代測定法の実用化※※
- 3.4 希ガス同位体を用いた地下水年代測定法の実用化※
- 3.5 高分解能のテフラ同定手法の開発※
- 3.6 地質試料を対象とした年代測定法及び化学分析手法の高度化※

※ 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. 調査技術の開発・体系化

1.1 断層の活動性に係る調査技術

(研究の背景・狙い・目標・意義)

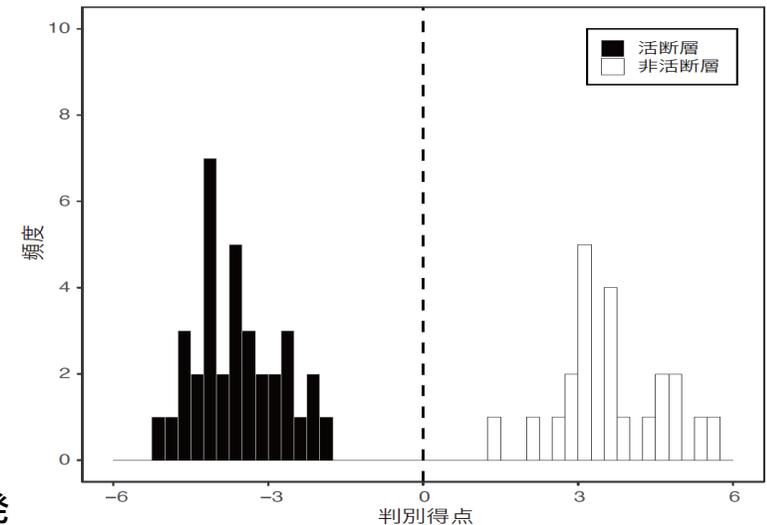
ボーリング孔や坑道等の掘削によって地下で遭遇した断層の活動性の評価には、活断層の調査で通常用いられる上載地層法を適用することが困難となる。本技術開発では、上載地層が分布しない断層に対する活動性評価手法の確立を目指して、断層破碎帯内物質等の微細構造観察、鉱物・化学組成分析、放射年代測定といった物質科学的アプローチによって、当該手法の実用化に資する情報を蓄積する。

(実施内容)

- 断層岩の構造地質学、鉱物学、地球化学的解析による評価手法の開発
- 鉱物脈等の変位マーカーに基づく評価手法の開発
- 上載地層の編年手法の高度化

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- [断層破碎帯内物質中の石英粒子や粘土鉱物の表面構造の解析が、最近の断層運動の有無を推定する一助となることを示した](#)。これらの微細構造観察に基づく検討は、[「もんじゅ」敷地内破碎帯の追加地質調査](#)にも適用された。また、より定量的な評価に結び付けることを目的として、[断層岩模擬試料の摩擦実験](#)や、[石英の水和層厚さの計測に基づく検討](#)を進めた。
- 断層の年代測定について、[IRSL法](#)、[FT法](#)、[K-Ar法](#)、[U-Pb法](#)等に関する基礎実験(水熱実験や粉碎実験等)や実試料への適用を進めることにより、各手法の適用性・適用限界に関する情報を蓄積した。
- [機械学習\(化学組成データ等を用いた多変量解析\)に基づき、活断層か既に活動を終えている断層\(非活断層\)かを判別できる可能性がある見通しを得た](#)。以上の成果は、概要調査や精密調査において、新たに遭遇した断層の調査・評価に反映できるほか、防災等の他分野における断層調査への応用が期待できる。



断層破碎帯内物質の化学組成を用いた多変量解析による活断層と非活断層の分類結果の例

1. 調査技術の開発・体系化

1.2 地殻構造の高空間分解能イメージング技術

(研究の背景・狙い・目標・意義)

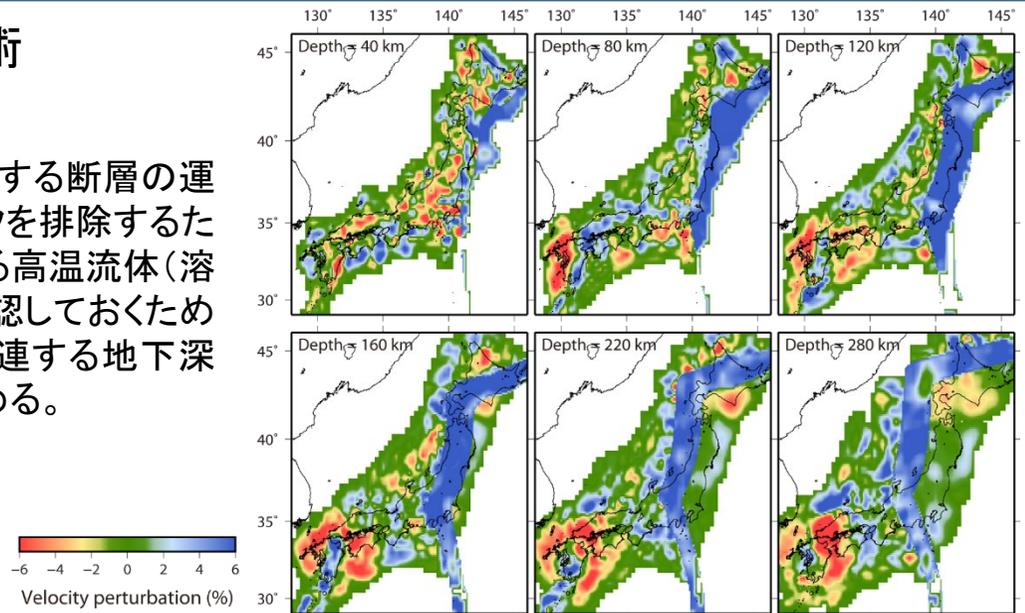
将来の火山・火成活動や深部流体の流入、地下に伏在する断層の運動等により地層処分システムが重大な影響を受けるリスクを排除するためには、地表からの調査段階において、地下深部における高温流体(溶融体を含む)や震源断層等の存否や構造をあらかじめ確認しておくための調査技術が必要となる。本技術開発では、これらに関連する地下深部の不均質構造を把握するための技術基盤の整備を進める。

(実施内容)

- 地下深部構造イメージング技術の高度化
- 測地学的手法を用いた震源断層の調査技術
- 沿岸部における地殻構造の調査技術

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 将来の火山・火成活動の発生に係る評価に資するため、マントル・ウェッジにおける高空間分解能の地震波トモグラフィ解析に必要な地震データを収集・拡充し、解析により大局的な流体分布を推定するとともに空間分解能の向上を図った。
- マグマの影響範囲を把握する技術の信頼性向上のため、火山活動が広範囲に及ぶ単成火山群を事例としたMT法電磁探査を行い、地下の部分溶融域の分布に基づきマグマ活動範囲を把握することの妥当性を提示した。
- 2014年長野県北部地震の震源域における観測等により、震源断層の構造を把握する上でMT法電磁探査を適用することが有効であることを示した。
- GNSS観測、地震波解析、地形解析、地表踏査(小断層解析等)を組み合わせ、地形的に不明瞭な活構造を把握する手法を提示した。
- 震源決定精度の改善のため、地震波速度が極めて遅くなる堆積層などの層厚分布を考慮した震源再決定を行ったうえで、地震波トモグラフィ解析を実施し、沿岸部における地殻構造の解析精度を向上させた事例を提示した。



地震波トモグラフィによるS波速度偏差分布

1. 調査技術の開発・体系化

1.3 深部流体の分布に関する調査技術

(研究の背景・狙い・目標・意義)

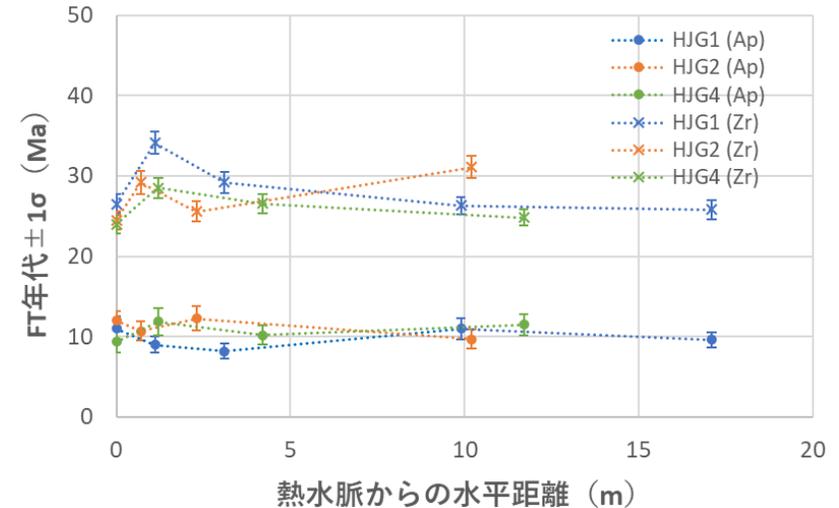
非天水起源の深部流体には、高温で低pH、炭酸化学種濃度が高いものが存在する。そのため、これらが流入する範囲では地質環境として好ましくない熱環境や化学場が生成される可能性があり、概要調査等においてその影響を排除することが望ましい。本技術開発では、深部流体の存在が知られている地域を対象とした事例研究を通じて、深部流体の熱的及び化学的特徴についての知見の蓄積を進める。また、複数の地球物理学的手法や地質学的手法を活用して、深部流体の分布や流入経路に関する情報を得るための調査技術を提示する。

(実施内容)

- 深部流体の性状に関する知見の蓄積
- 深部流体の形成・移動メカニズムに関する知見の蓄積
- 深部流体の分布に関する調査技術

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 流体包有物分析と熱年代解析を組み合わせたアプローチにより、熱水の温度、滞留時間、活動時期、熱影響の範囲等を制約した事例を提示し、当該アプローチの適用性と適用限界を整理した。
- 化学的特徴から深部流体を判別する指標として、ヘリウムやヨウ素の同位体等に関する知見や分析手法を整理・整備した。
- 深部流体の分布を把握する技術として、MT法電磁探査及び地震波トモグラフィの組み合わせによるアプローチが有効であることを示した。
- 地震波線追跡及びS波スプリッティング解析から推定されるクラック密度の空間分布、及び地表踏査における割れ目分布等から、深部流体が地表付近へ上昇する際の移行経路を把握する事例を提示した。



熱水の活動時期や熱影響の範囲の検討のため、熱年代データと熱水脈からの水平距離との関係を検討した例

2. 長期予測・影響評価モデルの開発

2.1 稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術

(研究の背景・狙い・目標・意義)

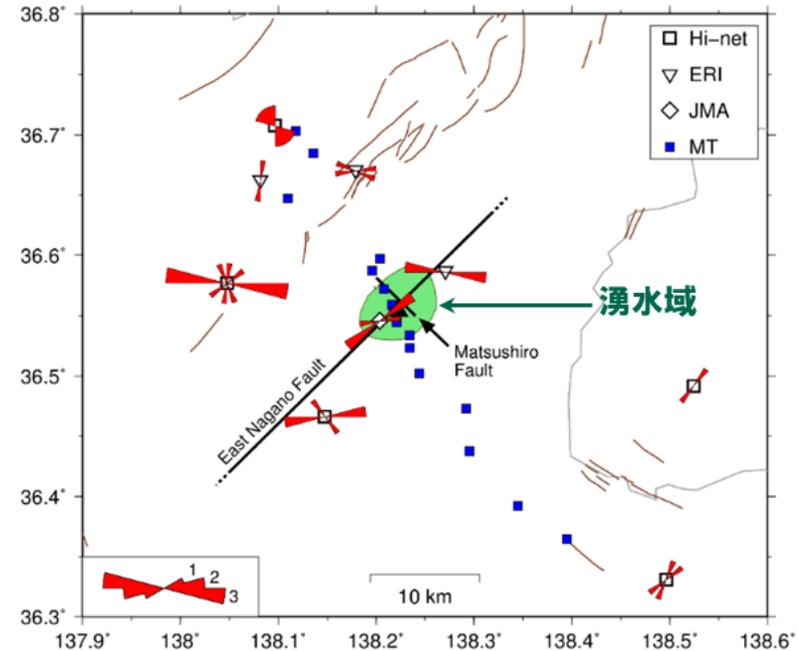
2011年東北地方太平洋沖地震は、1000年に1回程度の頻度で発生する海溝型巨大地震であるが、これに伴い内陸地震が活発化したのみならず、沿岸域での異常湧水が発生した。特に、この異常湧水の原因については不明な点が多い。このような稀頻度の自然現象が地質環境特性に及ぼす影響は、変動シナリオを考慮した安全評価にとって重要な課題となる。本技術開発では、稀頻度自然現象に伴う地質環境の変動スケールやそのレジリアンス(復元性)を把握するための数値解析による手法を検討するとともに、特に地震に伴う異常湧水が長期間継続している事例を対象とした調査・解析事例を蓄積する。

(実施内容)

- 海溝型巨大地震の発生に伴う地質環境の影響評価
- 内陸地震の発生に伴う地質環境の影響評価
- 短時間の地形変化に伴う地質環境の影響評価

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 2011年東北地方太平洋沖地震に伴って活動を開始した群発地震の活動域を事例とした地殻変動シミュレーションにより、その発生や周囲で生じる応力場や隆起には深部流体の存在が関与している可能性を示した。
- 地震発生に伴う異常湧水等の国内外の既往の事例を収集し、影響の程度や範囲及びメカニズム等に関する情報を整理した。
- 2011年東北地方太平洋沖地震後に誘発された福島県浜通りの地震、及び1965-1968年長野県松代群発地震における異常湧水発生域を事例対象としたMT法電磁探査やS波スプリッティング解析等を組み合わせた調査・解析に基づき、地下の流体賦存域及び移行経路の存在が評価の指標となり得る可能性を示した。



松代群発地震における異常湧水発生域を事例対象としたS波スプリッティング解析により、速いS波の振動方向の局所的な変化を検討した例

2. 長期予測・影響評価モデルの開発

2.2 時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術

(研究の背景・狙い・目標・意義)

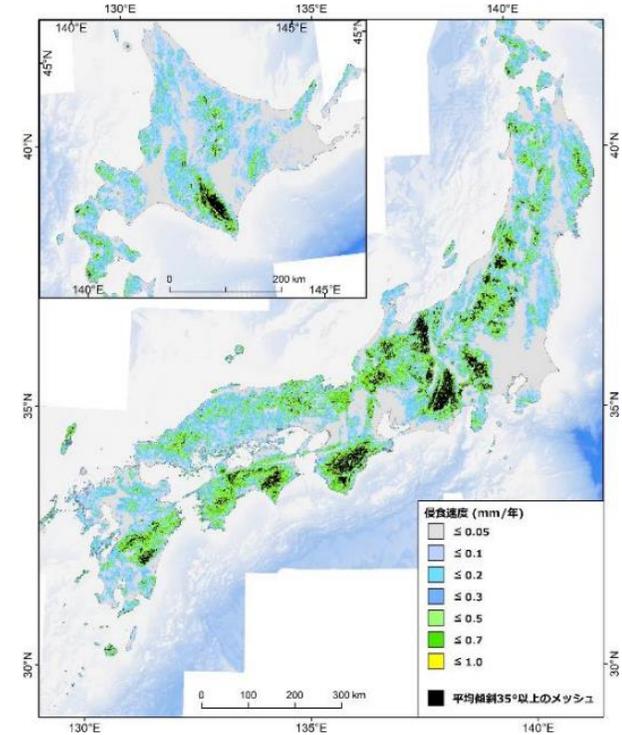
地層処分における将来の地質環境の予測・評価は、過去の自然現象の偏在性や変動傾向に基づき、将来へ外挿することが基本となる。しかしながら、過去のイベントや変動パターン・規模に係る記録は、遡る年代や地域によって識別できる分解能が異なることから、予測結果に伴う不確かさも様々である。また、時間スケールごとの変動方向や速度が大きく異なる場合、その地域は変動の一様継続性が成立しておらず、単純な外挿による予測には大きな不確実性を伴う。本技術開発では、このような不確実性を考慮して過去～現在までの地質環境の長期変遷をモデル化する上で必要な技術を整備する。また、緩慢ながらも連続的に進行する隆起・侵食については、多様な地質環境に対応した調査・評価技術の拡充を進める。

(実施内容)

- 時間スケールに応じた地殻変動の一様継続性の評価
- 地質環境長期変動モデルの構築
- 超長期の変動に関する確率論的評価手法の開発
- 地形・地質学的情報に基づく隆起・侵食の調査・評価技術の高度化

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 過去～現在までの地質環境の変化を三次元的に表現できる地質環境長期変動モデルを構築するとともに、そのモデル化及び不確実性の評価を支援する個別要素技術の開発として、**地下構造の不均質性を考慮したシミュレーション技術の構築と検証**や、**山地の発達に関わる地質環境の変遷を明らかにする後背地解析技術の高度化等**を進めた。
- 隆起・侵食の調査・評価技術の拡充として、**熱年代学的手法**、**離水地形のマルチ年代測定に基づく手法**等の高度化を進めるとともに、**海底地形や堆積構造から沿岸部の地殻変動を読むために必要な手法の整理、宇宙線生成核種法や熱年代等の最新知見を反映した隆起・侵食データマップの整備等**を行った。



宇宙線生成核種・熱年代等の最新のデータを反映した数百～1万年間の侵食速度分布図

3. 年代測定技術の開発

3.1 ウラン系列放射年代測定法の実用化

(研究の背景・狙い・目標・意義)

これまでの手法で補完できなかった10万年前後の断層の活動性の評価を行うため、長い半減期を持つウラン系列の年代測定技術開発に着手する。分析対象試料としては、断層岩の割れ目を普遍的に充填する炭酸塩鉱物を想定し、第2期中期計画期間に新たに整備したレーザーアブレーション付きマルチコレクター誘導結合プラズマ質量分析装置(LA-ICP質量分析装置)を用いて、鉱物中等の微小領域に対応した年代測定を行うとともに、測定結果の評価を適切に行うため、元素のマッピングや挙動を把握することにも重点を置く。ウラン系列放射年代測定法の実用化に向けて、いくつかの先行研究が行われているジルコン試料のU-Pb法を中心に技術基盤の整備を進め、次に炭酸塩鉱物への応用を試みる。

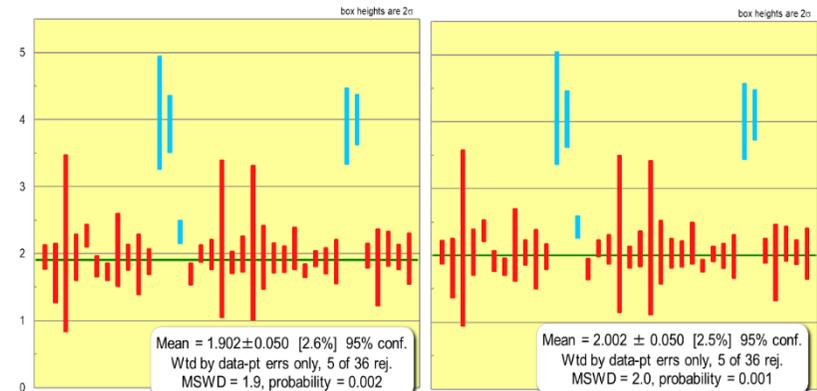
(実施内容)

- ジルコンの年代測定
- 炭酸塩鉱物の標準試料の選定
- 割れ目を充填する炭酸塩の分析
- 年代測定の高精度化・高度化と評価
- 2 Maより形成年代の若いジルコンをU-Pb法により精度良く年代測定する手法の検討

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 1000-50Ma程度の年代値の異なる複数のジルコンについて、U-Pb法による年代測定を実施し、既報値との整合性を確認した。
- 実用化した技術を用いて各種ジルコンの年代測定を実施した。
- 2 Maよりも形成年代の若いジルコンについて、マグマとジルコンとの間のU-Th非平衡を考慮したU-Pb年代測定技術を整備した。
- 炭酸塩鉱物のU-Pb年代測定を目的として、標準試料の選定・開発およびイメージング分析技術の整備を実施した。
- 炭酸塩質の示準化石試料の局所分析によるU-Pb年代測定に成功した。

この技術は、地下水の流動経路の変遷の解明、および古環境・古気候の復元に関する研究に貢献する。



黒部川花崗岩体から採取されたジルコンの年代測定結果の例
(青で示したデータは加重平均の算出で除外したデータ。放射非平衡の補正前(左)、補正後(右))

3. 年代測定技術の開発

3.2 光ルミネッセンス(OSL)年代測定法の実用化

(研究の背景・狙い・目標・意義)

OSL年代測定法は、微弱な自然放射線を浴びることによって鉱物結晶内に捕獲された不対電子が、光刺激を受けたときに正孔と再結合することで放出されるルミネッセンス(蛍光)を利用する手法であり、数十年から数十万年までの年代推定が可能と考えられている。また、原岩の形成年代に依存しない、石英や長石等の堆積物の埋没年代によって陸成堆積物の形成年代を推定することも可能である。第3期中長期計画では、段丘堆積物等を利用した隆起・侵食速度の推定等に資するためのOSL年代測定法の実用化を図る。

(実施内容)

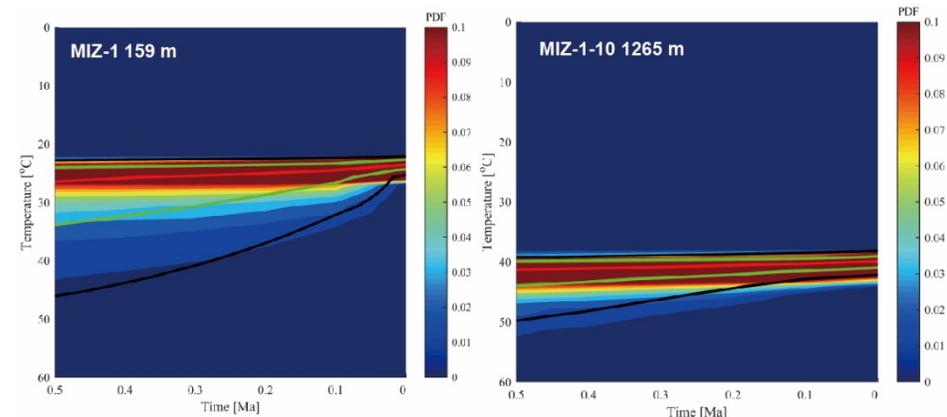
- 河成段丘堆積物のOSL年代測定
- OSL/TL信号特性の決定条件に関する検討
- OSL熱年代の適用性の検討

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 土岐地球年代学研究所のOSL測定装置を用いた石英・長石のOSL年代測定技術を整備した。
- 様々な岩種や加熱条件の試料について、光に対する反応速度の違いに基づきOSL信号特性を区分することにより、OSL年代測定の適用性を確認する手法を提示した。
- 10万年スケールの数十℃の熱史の検討に資するOSL熱年代法の測定技術を整備した。
- 侵食速度が遅い地域(0.1-1.0mm/yr程度)に対して大深度ボーリングコアを用いた長石のOSL熱年代測定を実施した結果、侵食速度と調和的な熱史が得られ、適用可能性を示した。



土岐地球年代学研究所に導入されたOSL測定装置(Riso製 TL/OSL DA-20)。



OSL熱年代法による熱史解析を実施した例
(東濃地域で掘削されたボーリングコア:MIZ-1)

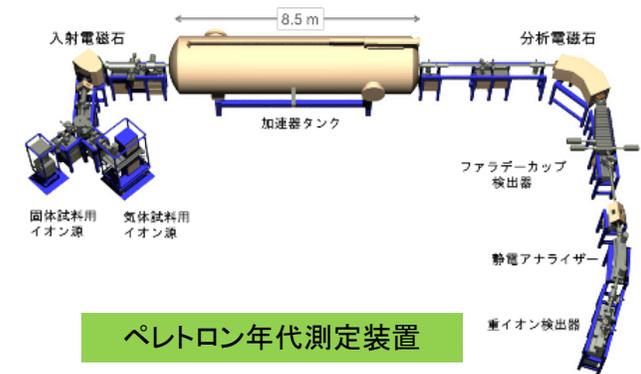
3. 年代測定技術の開発

3.3 アルミニウム-26 (^{26}Al) 年代測定法、塩素-36 (^{36}Cl) 年代測定法、ヨウ素-129 (^{129}I) 年代測定法の実用化

(研究の背景・狙い・目標・意義)

宇宙線は大気中の元素や地表物質と反応し、各種の放射性核種を生成する。宇宙線生成核種であるアルミニウム-26 (^{26}Al) や塩素-36 (^{36}Cl) を用いた年代測定法は、数千～数千万年及び数千～200 万年の年代測定が可能であり、岩石の露出年代や地下水年代の推定に有用な手法である。

第3期中長期計画では、土岐地球年代学研究所で保有しているタンデム型加速器質量分析計(ペレトロン年代測定装置: 図1)を用いて、 ^{26}Al 、 ^{36}Cl 及び ^{129}I の定量法を確立し、 ^{26}Al 、 ^{36}Cl 及び ^{129}I 年代測定法を実用化する。さらに、加速器質量分析計で測定可能な他の宇宙線生成核種等を用いた年代測定法について検討するため、試料調製法や測定法等に係る文献調査にも着手し、検出器の改良などに関する研究開発も行っていく。



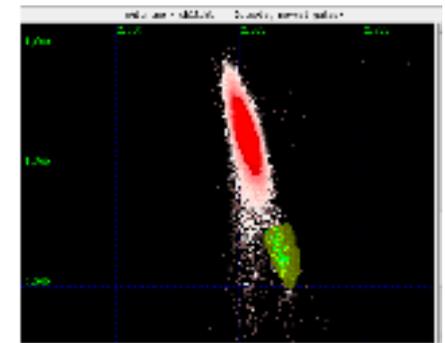
ペレトロン年代測定装置

(実施内容)

- ^{26}Al 年代測定法の実用化
- ^{36}Cl 年代測定法の実用化
- ^{129}I 年代測定法の実用化
- 他の宇宙線生成核種等を用いた年代測定法実用化に向けた研究開発

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- ^{26}Al 年代測定法の技術基盤の整備では、試料調製法及び測定条件の最適化等を進めた。また、東京大学タンデム加速器研究施設(MALT)の協力を得て施設間比較試験を実施した結果、両施設でほぼ同様な結果が得られたことから実用化が図られた。
- ^{36}Cl 年代測定法の技術基盤の整備では、標準試料の前処理および試験測定を実施し、高同位体比測定について測定可能であることを確認した。
- 新たな宇宙線生成核種等を用いた年代測定法として、 ^{129}I 年代測定法の実用化を検討し、整備を開始した。試料調製方法の検討及び測定条件の最適化への検討等を行い、地下水への ^{129}I 年代測定法の実用化に向けた整備を完了した。



^{36}Cl の測定結果(緑色が ^{36}Cl のスペクトル, 標準試料04-1)

3. 年代測定技術の開発

3.4 希ガス同位体を用いた地下水年代測定法の実用化

(研究の背景・狙い・目標・意義)

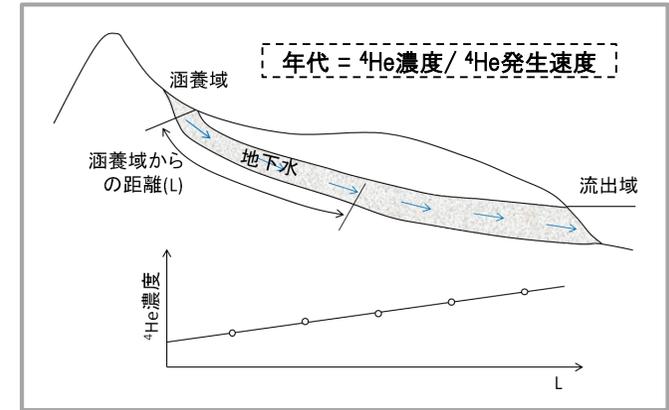
過去から現在までの地下水流動や水質の変化のシミュレーション結果等によるモデルの妥当性を示すためには、地下水の年代値等のデータを得ることが重要である。このため、地下水中に溶存するヘリウム-4 (^4He) やネオン-21 (^{21}Ne)、アルゴン-40 (^{40}Ar) を用いた年代測定技術を開発する。第3 期中長期計画では、これらの地下水に溶存する希ガス元素を用いた年代測定を行うために、地下水からの希ガス元素の回収技術の開発、及びこれら核種の定量とその際に必要になる同位体分析の高度化を行うとともに、経年的な変化量を算定する際に問題となる、時間変化に比例しない成分の影響を評価する。

(実施内容)

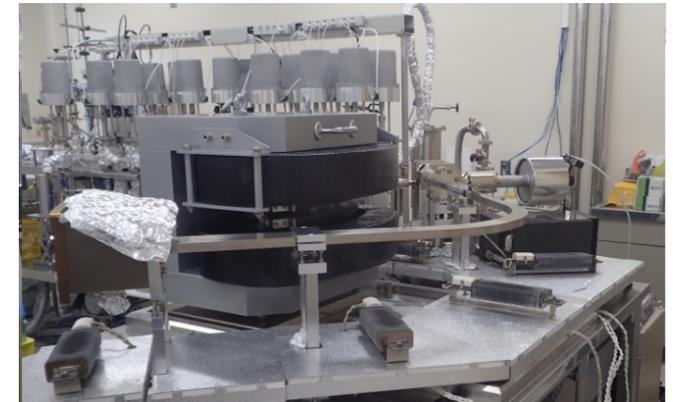
- 地下水からの希ガス元素の回収技術の開発
- 各希ガス元素の定量法の開発
- 地下水の年代測定法の実用化

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- マルチコレクター型希ガス質量分析装置及び前処理装置を東濃地科学センター土岐地球年代学研究所に整備した。
- 上記の装置を用い、従来のシングルコレクターの装置に比べ、高精度のヘリウムやネオンの同位体測定等に成功し、地下水の希ガス同位体分析手順を確立し、実試料の測定を行った。
- 耐圧サンプリング容器を用いた地下水採取容器を構築した。
- これらの成果は、希ガス同位体を用いた地下水の高精度年代測定を可能にするものである。



希ガス同位体を用いた地下水年代測定概念図



東濃地科学センターに導入したマルチコレクター型希ガス質量分析装置及び前処理・精製装置

3. 年代測定技術の開発

3.5 高分解能のテフラ同定手法の開発

(研究の背景・狙い・目標・意義)

火山列島からなる日本では、テフラを年代指標とした地層の堆積年代の決定と層序対比が非常に有効となる場合が多い。これまでの研究開発により、多量屈折率測定地質解析法(RIPL法)^{*}やメルトインクルージョン(結晶成長の過程で取り込まれたメルトの化石)の化学組成によってテフラを同定する手法を提示した。さらに近年、レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析(LA-ICP-MS)技術が進展し、局所領域の化学組成や同位体組成を高精度で迅速に測定できるようになってきていることから、第3期中長期計画では、LA-ICP-MSによるテフラ中のジルコンのU-Pb年代測定や、火山ガラスの微量元素組成分析等によってテフラを同定する手法を開発する。また、未だ既往研究による情報が十分でなかった北海道～東北地方を中心とした鮮新世以降(約500万年前以降)のテフラカタログを整備する。

^{*}多量屈折率測定地質解析法(RIPL法):火山ガラスの屈折率の多量測定とその統計解析によって、肉眼で確認できないような微量のテフラ起源物質を同定する手法。

(実施内容)

- 石英、ジルコン等を用いたテフラ同定手法の開発
- テフラ粒子の直接年代測定の検討
- テフラデータベースの整備
- 火山ガラスの微量元素組成分析の技術整備

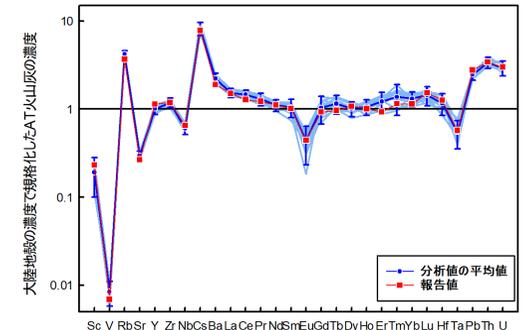
(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 北海道～東北地方を中心とした鮮新世以降のテフラカタログを整備した。
- ジルコンのダブル年代測定により、テフラの堆積年代を直接決定することに成功した。
- LA-ICP-MSを用いた火山ガラスの主成分・微量元素の同時分析に基づくテフラの同定手法を提示した。
- 東濃での火山ガラスの元素分析技術整備を行い、その手順書を作成した。
- 整備した火山ガラスの元素分析手法を用いてテフラ層の同定を行った。

これらの成果は、テフラを用いた堆積物の年代測定技術の適用性の拡大に大きく寄与する。



土岐地球年代学研究所でのテフラの微量元素分析に使用したレーザーアブレーション(LA)装置(左)とICP質量分析装置(右)



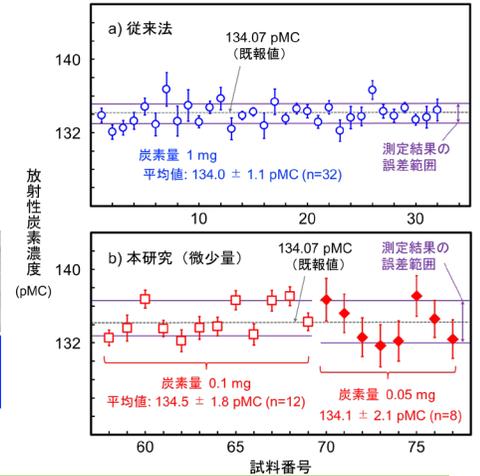
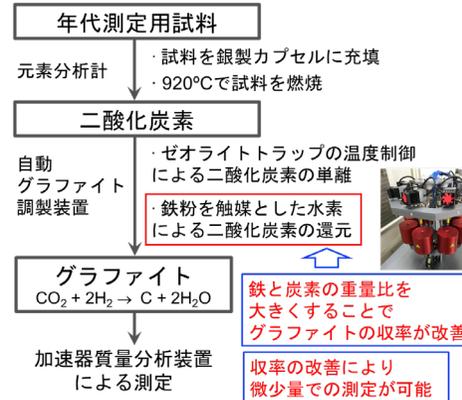
整備した技術を用いて分析したAT火山灰の分析値と報告値との比較

3. 年代測定技術の開発

3.6 地質試料を対象とした年代測定法及び化学分析手法の高度化

(研究の背景・狙い・目標・意義)

地質試料の生成プロセスは複雑であり、年代値の逆転に加え、前処理方法や測定手法の違いによる年代値の差異など、解決すべき問題がある。近年の年代測定技術の発展によって、データ取得については迅速・簡便化されつつあるが、現状では最終的に得られたデータの解釈が困難になるケースが多い。正確な年代軸を構築し過去の環境を復元するためには、岩石、土壌、炭酸塩沈殿物、地下水等、それぞれの試料の特性及び生成環境に適応した分析手法の開発が必要である。本研究では、種々の天然試料に適応可能なサンプリング手法、試料選別、前処理手法の改良や測定装置の最適化を実施する。



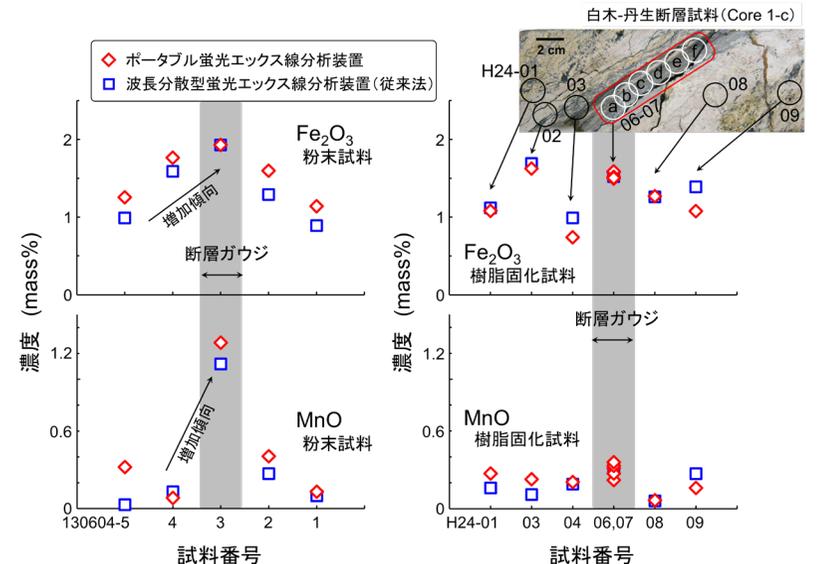
(実施内容)

- 年代測定法の高度化
- 化学分析手法の高度化
- 微小領域の年代測定と化学分析手法の構築

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 自動グラファイト調製装置を導入し最適化することで、炭素-14年代測定の前処理作業を完全自動化し、作業の効率化を進めた。
- 自動グラファイト調製装置による炭素-14年代測定の前処理作業を改良し、従来法の20分の1となる微量試料の調製手法を構築した。
- 化学分析の高度化として、キレート樹脂を用いたオンサイトでの希土類元素の濃縮・回収を実現させた。
- ポータブル蛍光エックス線分析装置の最適化を行い、岩石試料等の主成分及び微量成分の迅速な定量分析手法を構築し天然試料への応用展開を進めた。

自動グラファイト調製装置による微量量での炭素-14測定



ポータブル蛍光エックス線分析装置による断層岩試料の化学分析

【地質環境の長期安定性に関する研究】

以下のような成果が得られている。

1. 調査技術の開発・体系化 (成果のまとめ)

- 断層の活動性に係る調査技術については、断層破碎帯内物質の化学組成を用いた多変量解析による活断層と非活断層の分類等が、最近の断層運動の有無を推定する一助となることを示した。
- 地殻構造の高空間分解能イメージング技術については、GNSS観測、地震波解析、MT法電磁探査等の地球物理学的手法に加え、小断層解析等の地質学的手法も適用し、高温流体や震源断層等による地下深部の不均質構造を把握するための技術基盤を整備した。
- 深部流体の分布に関する調査技術については、熱年代解析やヘリウム同位体比等の解析により、深部流体の熱的及び化学的特徴についての知見を蓄積するとともに、複数の地球物理学的手法や地質学的手法を活用して、深部流体の分布や流入経路に関する情報を得るための調査技術を提示した。

(地層処分事業や他分野への貢献)

- ⇒断層の活動性に係る調査技術の成果は「もんじゅ」敷地内破碎帯の追加地質調査にも適用されており、上載地層法の適用が困難な断層の活動性の評価に寄与する重要な成果の一つと考えられる。
- ⇒地殻構造の高空間分解能イメージング技術の成果は、特に概要調査において、火山・火成活動や地震・断層活動等による著しい影響を回避する上で重要な知見である。
- ⇒深部流体の分布に関する調査技術の成果は、概要調査～精密調査において深部流体が地層処分システムに及ぼす影響を調査・評価する際に活用できる。

2. 長期予測・影響評価モデルの開発

(成果のまとめ)

- 稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術については、特に地震に伴う異常湧水が長期間継続している事例について、国内外の情報を収集・整理するとともに、2011年東北地方太平洋沖地震後に誘発された福島県浜通りの地震、及び1965-1968年長野県松代群発地震における異常湧水発生域を事例対象とした地球物理学的調査・解析に基づき、地震に伴う異常湧水の発生ポテンシャルの評価指標を提示した。
- 時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術については、過去～現在までの地質環境の変化を三次元的に表現できる地質環境長期変動モデルの構築及びそれを支援する個別要素技術の開発(後背地解析技術等)を進めるとともに、熱年代学的手法や離水地形のマルチ年代測定に基づく手法等を適用し、多様な地質環境に対応した隆起・侵食の調査・評価技術の拡充を進めた。

(地層処分事業や他分野への貢献)

- ⇒ 稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術の成果は、地震に伴う異常湧水等の稀頻度の自然現象が地質環境特性に及ぼす影響を地層処分の安全評価に適切に取り入れる際に重要な知見となる。
- ⇒ 時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術の成果は、過去～現在までの地質環境の長期にわたる変遷を不確実性を考慮しながらモデル化し、地層処分における将来の地質環境の予測・評価に反映する上で重要な知見となる。

3. 年代測定技術の開発

(成果のまとめ)

- ウラン系列放射年代測定法の実用化については、各種ジルコンの年代測定を実施した。また、2 Maよりも形成年代の若いジルコンについて、マグマとジルコンとの間のU-Th非平衡を考慮したU-Pb年代測定技術を整備した。
- 光ルミネッセンス(OSL)年代測定法の実用化については、石英・長石のOSL年代測定技術及び長石のOSL熱年代測定技術を整備するとともに、OSL年代測定法及びOSL熱年代法の適用性を確認した。
- アルミニウム-26 (^{26}Al)年代測定法、塩素-36 (^{36}Cl)年代測定法、ヨウ素-129 (^{129}I)年代測定法の実用化については、それぞれの手法について着実に実用化を進め、 ^{26}Al 及び ^{129}I 年代測定についてはルーチン測定を開始した。
- 希ガス同位体を用いた地下水年代測定法の実用化については、マルチコレクター型希ガス質量分析装置及び前処理装置を東濃地科学センター土岐地球年代学研究所に整備した。
- 高分解能のテフラ同定手法の開発については、東濃での火山ガラスの微量元素を含む元素分析技術整備を行い、その手順書を作成した。また、整備した火山ガラスの元素分析手法を用いてテフラ層の同定を行った。
- 地質試料を対象とした年代測定法及び化学分析手法の高度化については、放射性炭素年代測定に必要な試料量の低減や、ポータブル蛍光エックス線分析装置の最適化による簡便な定量分析手法の構築を進めた。

(地層処分事業や他分野への貢献)

⇒地質環境の長期安定性評価における共通的基盤技術として、幅広い年代域($10^4 \sim 10^7$ 年)やさまざまな自然現象・試料に対応可能な年代測定手法の開発・整備を進め、断層の活動性、隆起・侵食速度の把握等の調査・評価技術開発に貢献した。

主な共同研究

愛知教育大学	・火山岩の放射年代測定法と古地磁気年代測定法に関する研究
石川県立大学	・断層内物質の年代測定による断層活動性評価手法に関する共同研究
環境科学技術研究所	・加速器質量分析装置によるヨウ素-129測定法に関する研究
関西電力・富山大学	・断層岩化学組成データベースの構築と断層活動性評価への活用に関する研究
岐阜大学	・堆積物等の詳細分析に基づく気候・環境変動に関する研究
京都大学	・地質環境の長期安定性評価に係る地形・地質・断層調査技術の高度化に関する共同研究
国立歴史民俗博物館	・日本産樹木年輪による炭素14年代較正曲線の整備
東京大学	・第四紀の隆起・沈降速度の推定手法の高度化に関する共同研究
東京大学 ・深田地質研究所	・断層中のメタンガス高精度検出に関する共同研究
富山大学	・機械学習に基づいた断層の活動性評価手法の開発に関する共同研究
奈良女子大学	・地質試料の年代測定法の拡充のためのチャネリングを利用した同重体分別の基礎研究
日本大学	・断層破碎帯の内部構造解析に関する共同研究
弘前大学	・第四紀地殻変動の評価手法の高度化に関する共同研究
福井県立恐竜博物館	・化石試料の年代測定を通じた高精度年代測定手法の妥当性評価に関する共同研究
山形大学・東京大学 ・学習院大学	・岩石・年代学的手法を用いた自然現象の影響評価手法の高度化に関する研究

4. 高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発

高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発

1. 処分システムに関する工学技術の信頼性向上

- 1.1 人工バリア等の基本特性データベースの拡充及びデータベース開発 ※
- 1.2 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究 ※
- 1.3 工学技術の信頼性向上 ※

2. 安全評価手法の高度化

- 2.1 システム性能評価に係る手法の開発※※
- 2.2 放射性核種の移行に係る現象理解とデータベース開発 ※

※資源エネルギー庁受託事業を活用して実施

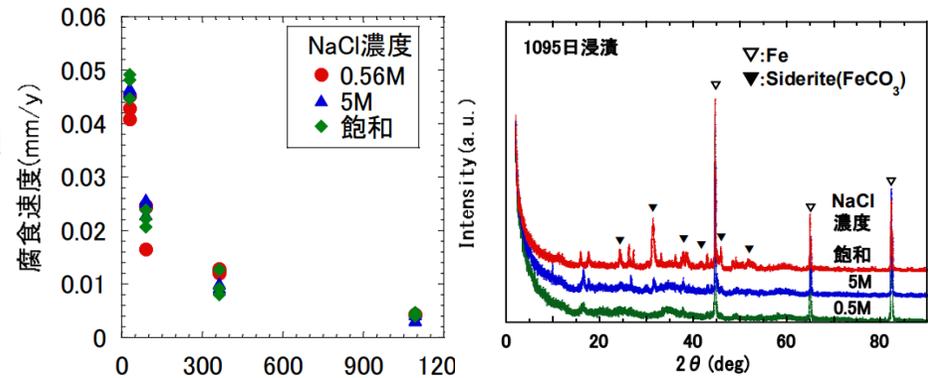
※※一部を資源エネルギー庁受託事業を活用して実施

1. 処分システムに関する工学技術の信頼性向上(1/3)

1.1 人工バリア等の基本特性データベースの拡充及びデータベース開発

(研究の背景・狙い・目標・意義)

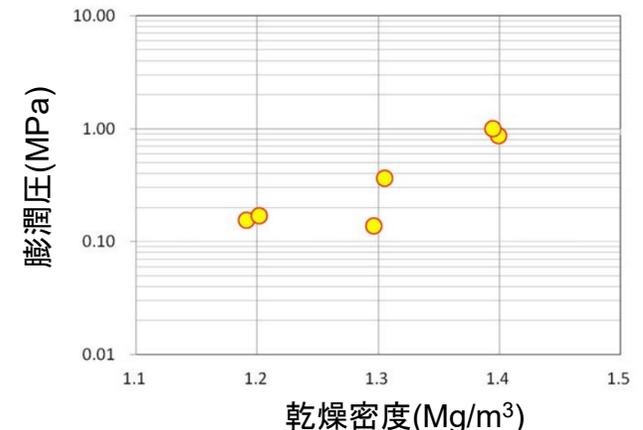
オーバーパックの腐食挙動や緩衝材の基本特性は地下水水質等の環境条件による影響を受けるため、地質環境特性に応じた適切な人工バリア設計や、長期的な環境条件の変遷に応じた人工バリア挙動の評価を行うには、幅広い地質環境条件とその時間的な変化を考慮した広範な条件に対してデータを整備することが重要である。また、その知見の幅広い活用を図る観点から、既に開発したデータベースを最新の情報に更新することも必要である。



(実施内容)

緩衝材中における炭素鋼の腐食に及ぼすNaCl濃度の影響

- オーバーパックの腐食について高塩濃度の地下水や酸性条件の地下水等の設計の前提条件を逸脱した環境条件を含む幅広い条件に対して腐食試験、埋め戻し材の基本特性については幌延深地層研究センターで発生した掘削ズリを用いた試験を実施してそれぞれデータを拡充し(右図)、データベースを更新した。オーバーパックデータベースについては、本中期計画期間で181件のデータを追加。計1,892件のデータが登録済。緩衝材基本特性データベースについては、本中期計画期間で51件のデータを追加。計2,219件のデータが登録済。
- オーバーパックの長期腐食挙動や緩衝材の長期圧密挙動に関する現象理解と長期挙動評価のための長期試験に着手した。



(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 高塩濃度の地下水や酸性条件の地下水および環境条件が過渡的な期間における地下水水質の変化などを含めて、幅広い条件に対する人工バリアの適用性や堅牢性、長期的な挙動の推定に資するための基礎的情報が得られた。

幌延深地層研究センターで発生した掘削ズリを用いた埋め戻し材の膨潤圧試験の結果

1. 処分システムに関する工学技術の信頼性向上(2/3)

1.2 人工バリア等の長期複合挙動に関する研究

(研究の背景・狙い・目標・意義)

ニアフィールドを構成する人工バリア等の材料の劣化・変質や材料間の相互作用などによりニアフィールドの環境条件は時間とともに変化し、バリア構成要素の安全機能や核種移行挙動に影響を与える可能性がある。そのため、ニアフィールドの環境変遷を評価する技術の開発とその妥当性の確認が必要である。過渡期におけるオーバーパックの腐食挙動の経時変化および緩衝材中のpHの変遷を連続的に計測可能なセンサーの開発やニアフィールドの環境変遷を評価するための連成解析コードの開発等を実施する。

(実施内容)

➤ 原位置計測技術の開発

室内試験と原位置試験により緩衝材中の環境条件やオーバーパック腐食挙動等を評価するための計測技術の適用性を確認した。

➤ 人工バリアの連成現象評価技術の開発

幌延深地層研究センターやスイスのグリムゼル試験場での原位置試験の計測データ等を活用し、過渡期の熱-水-力学連成解析モデルの妥当性の確認を行った。また、閉鎖後長期を対象にニアフィールド複合挙動の評価に向けて複数のモデルの統合化を図り、水-力学-化学連成解析のプロタイプシステムを開発した。

➤ ナチュラルアナログ研究

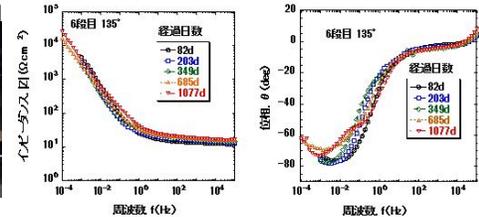
セメンテーションのナチュラルアナログとして月布鉱床のベントナイト原鉱石を選定し、基本特性(膨潤圧、透水係数等)把握のための手法を構築し、セメンテーションにより膨潤圧が低下することを示唆する結果等を得た。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

原位置試験を活用した人工バリアの挙動に関する計測技術や連成現象解析技術の適用性の確認とともに、閉鎖後長期のニアフィールド複合挙動を評価するためのシステム開発を進め、人工バリア挙動をより現実的に把握できる技術の構築に貢献した。

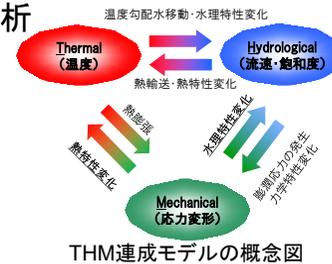


原位置試験設置状況(幌延)

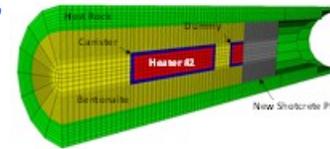


腐食センサーによる測定結果例

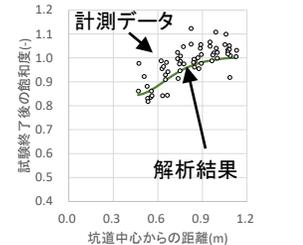
原位置計測技術の開発



THM連成モデルの概念図

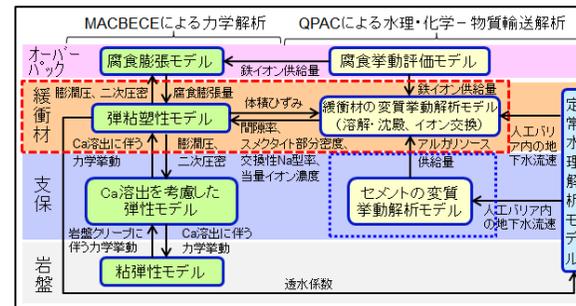


グリムゼル試験場での原位置試験のメッシュ図

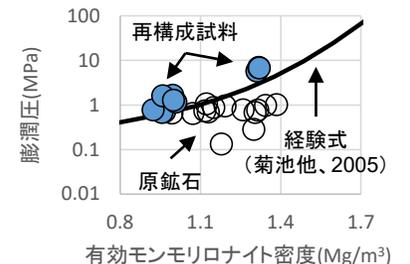


解析結果と計測データとの比較例

人工バリアの連成現象評価技術の開発



ニアフィールド複合挙動評価のためのモデル間の相関図
ニアフィールド複合挙動評価技術の開発



月布鉱床のベントナイト原鉱石を用いた膨潤圧試験

ナチュラルアナログ研究

1. 処分システムに関する工学技術の信頼性向上(3/3)

1.3 工学技術の信頼性向上

(研究の背景・狙い・目標・意義)

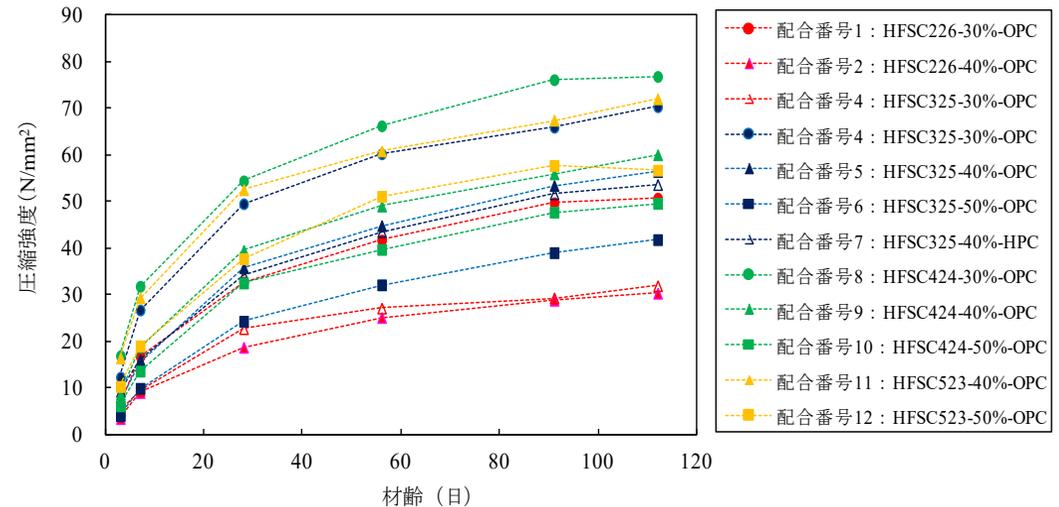
地質環境への化学的な影響の少ない支保工等のコンクリート構造物の材料として低アルカリ性セメント(HFSC)が開発され、幌延URLを活用して地下坑道への施工性についても確認されている。一方、比較的新しいセメント系材料であることから、施工後の坑道周辺の力学的安定性や長期挙動、岩盤への化学的な影響等に関わる基本特性データが必要である。また、実際の地下施設の設計では岩盤条件に応じて適切な配合を選定する必要があり、幅広い地質環境条件への対応をはかる観点から種々の配合に対してデータを整備する必要がある。

(実施内容)

- 低アルカリ性セメントを用いた支保工(場所打ちコンクリート)に関して配合をパラメータとした基本特性データ(圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比、割裂引張強度)を取得した。
- 幌延URLに広く分布する堆積軟岩を用いて含水比をパラメータとした力学特性試験を行い、力学挙動に対する含水比の影響の特徴を把握した。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 岩盤の力学条件等に応じた配合選定が可能となる低アルカリ性セメントを用いた支保工の基本特性に関するデータを整備した。
- 堆積軟岩を対象に、坑道の設計に反映するための岩盤の力学挙動を評価する手法の確立に向けた知見を整備した。



低アルカリ性セメントの配合をパラメータとした基本特性データの例(材齢と圧縮強度の関係)

HFSCの後の数値は、セメント(C)、シリカフェーム(SF)、フライアッシュ(FA)の重量比を示す。OPC:普通ポルトランドセメント、HPC:早強ポルトランドセメント

2. 安全評価手法の高度化(1/6)

2.1 システム性能評価に係る手法の開発 【地表環境の変遷を考慮した安全評価手法の開発】 (研究の背景・狙い・目標・意義)

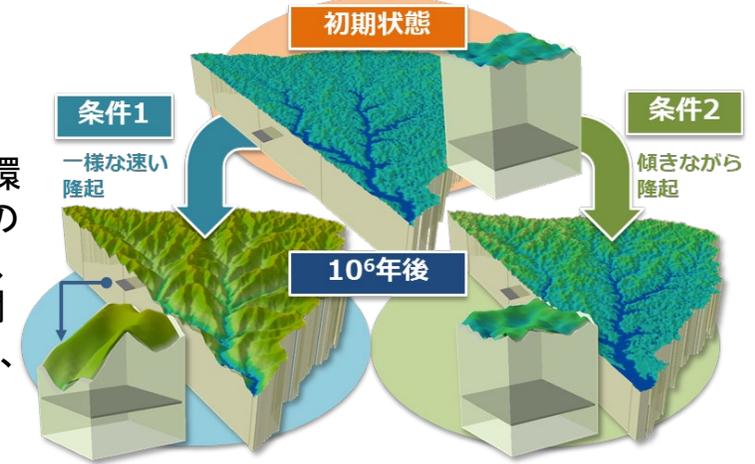
処分地が特定されていない段階での地層処分の安全性の評価では、地表環境が将来も継続することを前提として評価が行われてきた。しかし、処分選定の調査が進み概要調査地区が特定されると、具体的な地表環境が明らかとなり、その長期的な変遷の評価も可能となってくる。より現実的な安全評価手法の開発を目的とし、地表環境の長期的な変遷の一つである隆起・侵食を対象として、地形の長期的な変化を評価可能なツールの開発を行った。

(実施内容)

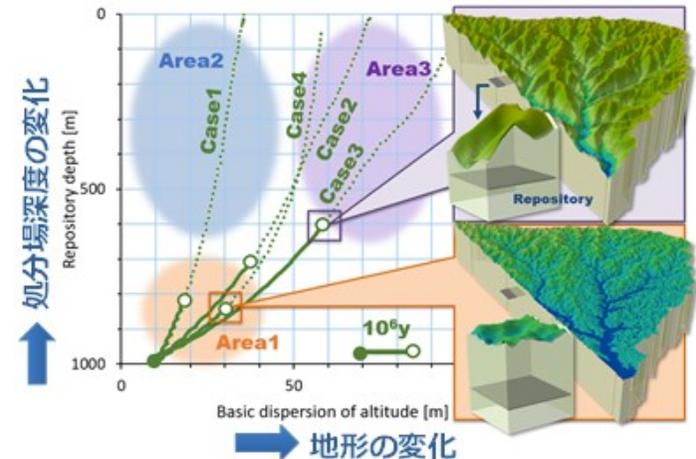
- 隆起・侵食による地形と処分場深度の時間変化を、初期条件の地形、隆起・侵食の程度、処分場の位置等の条件を変えて迅速に計算できるツールを構築した。
- 構築したツールにて隆起速度をパラメータとした解析を行い、隆起・侵食に起因する複数の地形・深度変化をパターン化(Area1~3)できることが示された。
- 本ツールを用いて上記のどのパターンに近いかを推定することで、隆起・侵食の影響を考慮した性能評価において重要となる影響やその伝搬を推定できる。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 処分候補地の隆起・侵食による地質環境の長期的な変遷を評価することが可能となり、精密調査地区選定に貢献できる。
- 構築したツールで評価される地形と処分場深度の時間変化を地下から地表への水理解析及び各種移行解析にも反映することで、地表環境の変遷を考慮した安全評価手法の開発につながる。



地形変化・処分場深度変化の計算例



地形変化・処分場深度変化の計算例

2. 安全評価手法の高度化(2/6)

2.1 システム性能評価に係る手法の開発 【生活圏被ばく線量評価の信頼性向上】 (研究の背景・狙い・目標・意義)

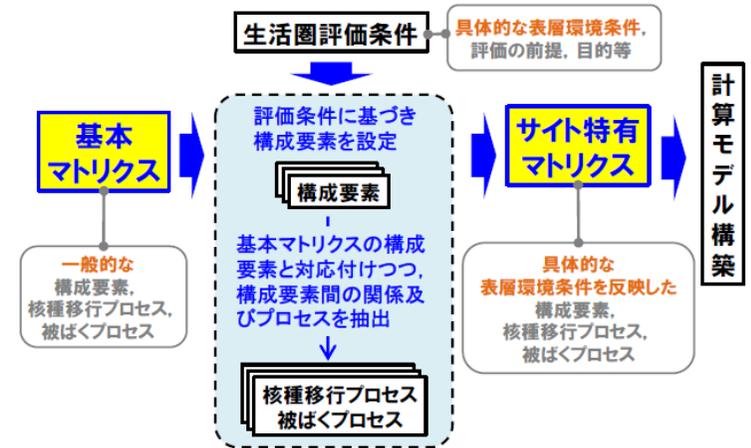
処分選定の調査が進み概要調査地区が特定される段階においては、具体的な表層環境が明らかとなり、その長期的な変遷の評価も可能となってくる。対象とすべき表層環境条件及びその変遷の状況が具体化された場合に、それらの特徴を踏まえた生活圏評価モデルを構築することを目指し、具体的な地表環境条件及びその変遷を考慮した生活圏評価手法を整備した。

(実施内容)

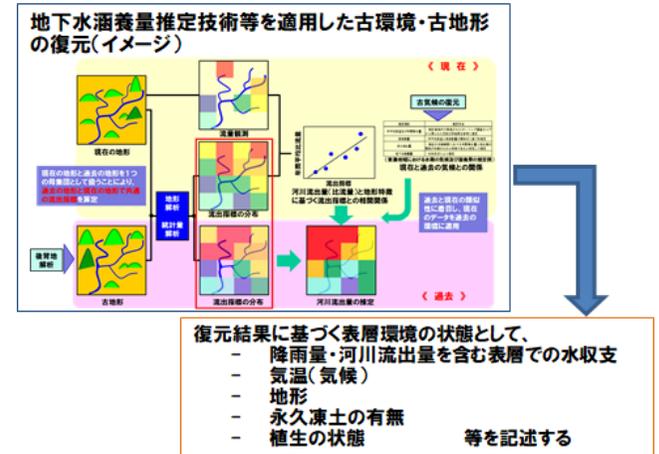
- 多様な表層環境条件の構成要素の特徴とそれらの間で考えられる物質移行・被ばくプロセスを整理し、具体的な表層環境条件が与えられたときにその特徴に応じたプロセスの抽出・組合せにより生活圏評価モデルを構築する手法を整備した。
- 表層環境の時間的変遷を考慮した地表環境モデル構築の一環として、地形変化シミュレーションや地下水涵養量推定技術等による古環境・古気候の復元結果を活用した表層環境の状態変遷の設定方法を検討した。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 処分候補地の表層環境条件を考慮した生活圏評価モデルを構築することが可能となり、精密調査地区選定に貢献できる。
- 検討した表層環境の状態変遷の設定方法を踏まえ、表層環境の変遷を考慮した生活圏評価モデルを構築することができる。



表層環境条件に応じた生活圏評価モデル構築手法の概要



時間的変遷を考慮した表層環境の状態変遷の設定方法

2. 安全評価手法の高度化(3/6)

2.1 システム性能評価に係る手法の開発 【地層処分における過酷事象の概念構築】

(研究の背景・狙い・目標・意義)

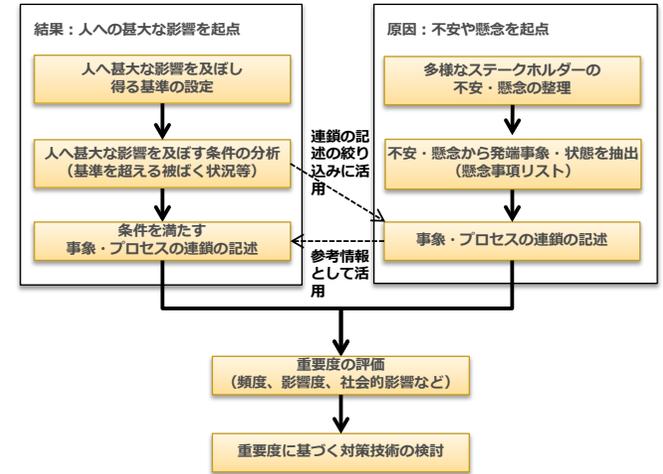
2011年3月11日の東北地方太平洋沖震及びそれに伴う津波によって引き起こされた東京電力福島第一原子力発電所の事故を踏まえ、これまで想定外とされていた未知の事象(過酷事象)を探索し、地層処分の安全性を示していく必要がある。そこで、地層処分システムにおける過酷事象を探索できるようにするため、影響を起点としたアプローチや不安や懸念を起点としたアプローチ等、これまでの安全評価と異なる考え方を導入して事象・プロセスの連鎖を記述するための手順を構築・試行した。

(実施内容)

- 地層処分において人への甚大な影響を起点、多様なステークホルダーの不安や懸念を起点とする2つの観点から事象・プロセスを抽出し、過酷事象を検討するフローを構築した。
- 地震・断層活動を事例とした試行では、安全機能の劣化・喪失の組み合わせを起点に過酷事象につながるシナリオを効率的に抽出し、それらと人工バリアのせん断変形等に係る個別事象の知見を関連づけることで、こうしたシナリオが成立させるためには極めて発生可能性の低い複数の条件を同時に想定する必要があることを系統的に示すことができる見通しを得た。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 過酷事象の探索をステークホルダーの不安・懸念を考慮しつつ行うことで、地層処分の信頼性向上と理解促進に資する新たな知見を創出することが可能となる。



地層処分システムにおける過酷事象の検討フロー

不安や懸念	発端事象	地質環境の変化	処分システムへの影響	状態の変化	
火山、地震等が多い日本での地層処分は選択すべきではないのか？	1-A マグマ上昇経路の変化・新生	処分施設を直撃するマグマの貫入	火山の噴火(溶岩の流出) 火山の噴火(火山灰の噴出) 火山の噴火(火砕流の発生)	破壊・溶融された廃棄物が溶岩と一緒に噴出する 廃棄体の破片や溶融した廃棄体が火山灰と一緒に噴出する 廃棄体の破片や溶融した廃棄体を含む火砕流が発生する	・地表放出 ・地表放出 ・地表放出
		火山噴火の未遂	地表には達しないが、廃棄体が破壊されバリア機能が損なわれる	・溶解の促進	
		1-B	マグマが処分場近傍に達して、地下水が高温、低pHとなる	分配係数、溶解度に変化し、バリア機能が劣化する	・溶解の促進 ・核種濃度の増加
		1-C	カルデラの形成	破壊された廃棄体が火山灰や火砕流と共に噴出する	・地表放出
	1-D 爆発的噴火	処分施設を直撃する爆発的噴火	火山灰の噴出 火砕流の発生	廃棄体の破片や溶融した廃棄体が火山灰と一緒に噴出する 廃棄体の破片や溶融した廃棄体を含む火砕流が発生する	・地表放出 ・地表放出
		1-E	爆発的噴火による火山体の崩壊	火山体の崩壊によって廃棄体の埋没深さが浅くなる 廃棄体を含んだ崩壊土砂が下流に堆積する	・移行経路の短縮 ・露呈
		1-F	断層の派生または新規発生	岩盤の破壊・破砕帯の形成 岩盤の破壊を伴う水みちの形成 廃棄体の破壊を伴わない水みちの形成	廃棄体と地下水の接触面積が増加し、新たな移行経路が形成される。 廃棄体の近傍に新たな移行経路が形成される
	岩盤の破壊を伴う深部流体上昇経路の形成		廃棄体と地下水の接触面積が増加し、廃棄体が高濃・低pHの地化学環境にさらされる。また、新たな移行経路が形成される	・溶解の促進 ・移行経路の短縮	
			廃棄体の破壊を伴わない深部流体上昇経路の形成	廃棄体周辺の地化学環境が高濃・低pH環境に変化する	・溶解の促進 ・移行経路の短縮

事象・プロセスの連鎖の記述例
(上図右側の下段)

2. 安全評価手法の高度化(4/6)

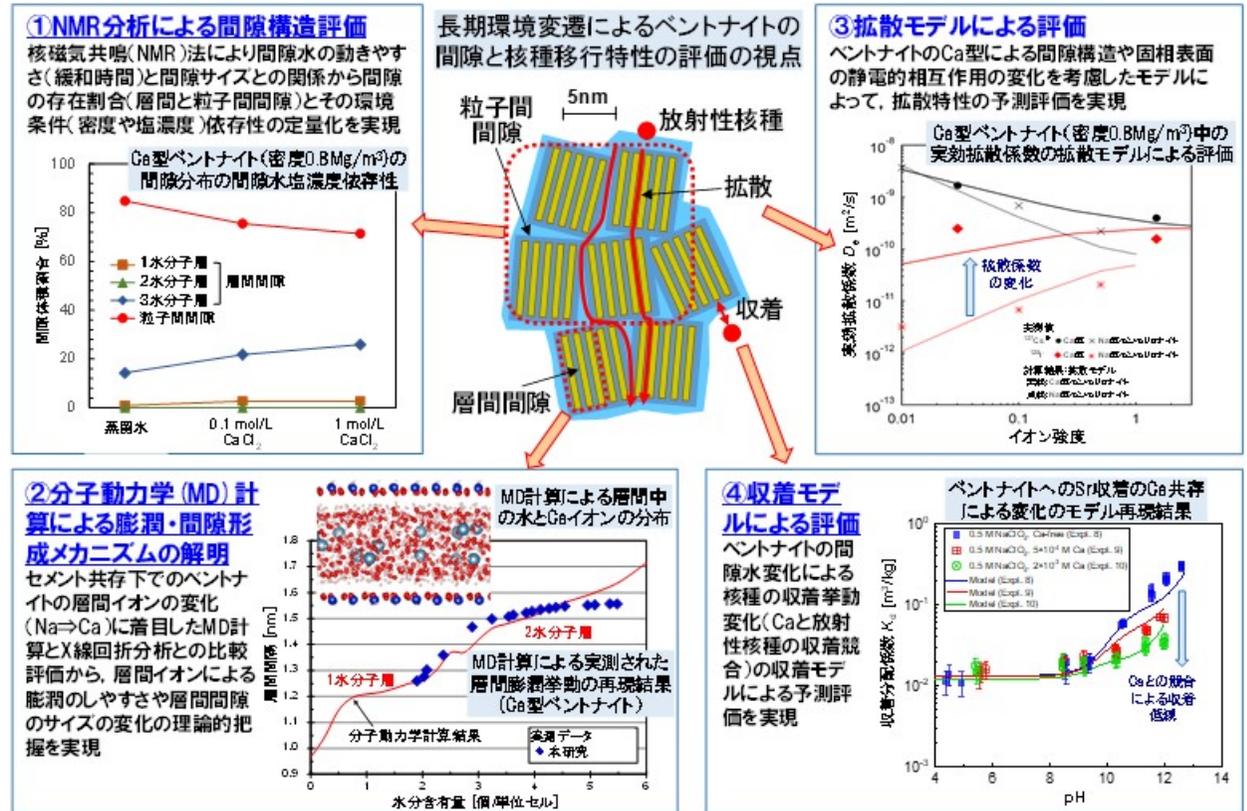
2.2 放射性核種の移行に係る現象理解とデータベース開発

(研究の背景・狙い・目標・意義)

緩衝材及び岩石中の核種移行をより現実的に評価するため、多様な室内・原位置試験や先端的分析・計算科学技術の適用によって現象解明を図り、それを反映した地層処分システムを構成するバリア材の相互作用を含む処分システムの長期変遷や有機物・微生物等を含む実際の地質環境の特徴の影響を反映可能な核種移行モデルとデータベースを開発・確証する。

(実施内容①: 緩衝材中の核種移行)

- バリア材料間の相互作用による環境変遷と、それに伴う核種移行への影響評価を実現するため、オーバパックやセメントとの相互作用に伴う緩衝材ベントナイト中の環境変遷と核種移行特性の変化に関する現象解明と定量評価モデルを構築した。
- このうち、セメント系材料の共存によるベントナイトのNa型からCa型への変遷を対象に、先端的分析・計算科学技術の適用によって、膨潤特性と間隙構造の変化、それに伴う収着・拡散挙動の変化を予測可能なモデルを提示した。(右図)
- これらデータを含む国内外の最新の知見・データを反映した核種移行データベース(熱力学・収着・拡散)を更新・公開した。



Ca型ベントナイトの間隙構造・間隙水特性と核種移行評価モデルの研究成果例

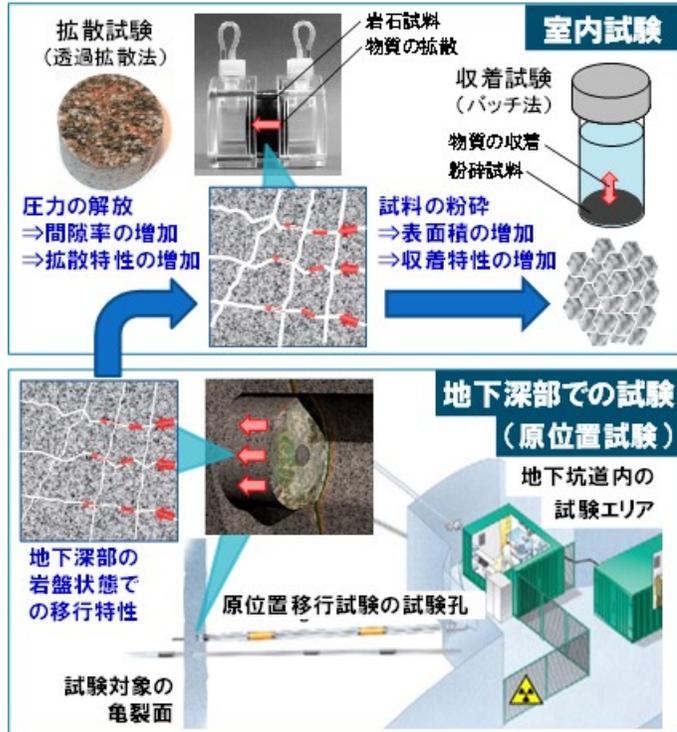
2. 安全評価手法の高度化(5/6)

2.2 放射性核種の移行に係る現象理解とデータベース開発

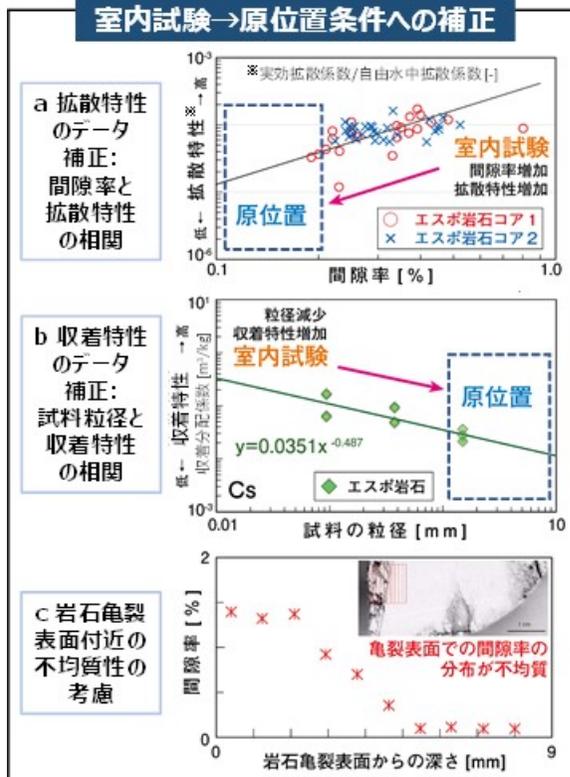
(実施内容②): 岩盤中の核種移行

- 結晶質岩(スイスグリムゼルやスウェーデンエスポ等)と堆積岩(幌延)の岩石マトリクス及び割れ目部を対象に、体系的な室内・原位置試験を通じて、岩盤中の核種移行現象解明とより精緻な核種移行モデルを構築。
- エスポやグリムゼルの国際共同研究を通じて、室内試験と原位置試験で得られたデータの差異とその原因を特定し、室内試験データから地下深部での移行特性を評価する手法を構築(本成果は、国際誌Water Resources Researchに掲載され、2021年12月にプレス発表を行い、複数の新聞やラジオ放送で取り上げられた)。

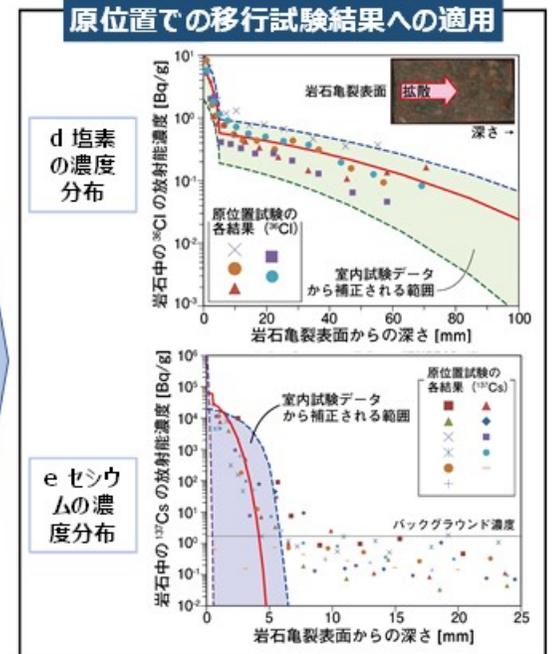
地下深部と室内試験での岩盤状態の差異の補正手法



室内試験→原位置条件への補正



原位置での移行試験結果への適用



スウェーデンエスポの原位置・室内データを活用した補正手法の適用例

2. 安全評価手法の高度化(6/6)

2.2 放射性核種の移行に係る現象理解とデータベース開発

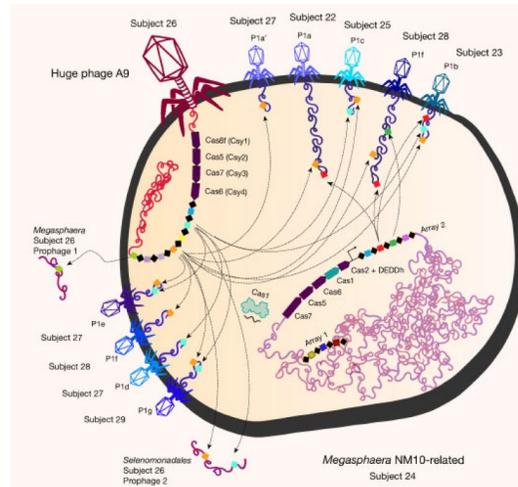
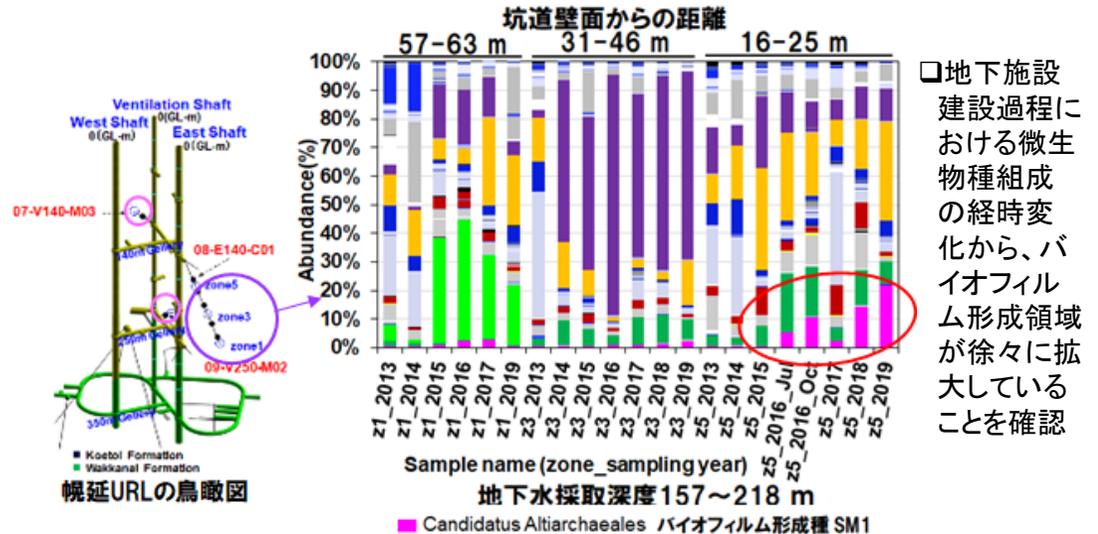
(実施内容③):コロイド・有機物・微生物の影響評価)

- 幌延URLを活用して、コロイド・有機物・微生物の影響評価に係る室内および原位置でのデータ取得(コロイド密度、有機物錯生成、微生物種・代謝等)と、核種移行への影響評価モデルを構築。
- 幌延URLにおける深部原位置地下水を対象に、全コロイド(無機/有機)およびバイオコロイドへの希土類元素の収着特性データを拡充したほか、地下深部の微生物を含む代謝機能解明に関する最先端の科学的知見を提示(カリフォルニア大学との共同研究成果として、Nature誌に掲載)。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 処分システムの長期環境変遷や実際の地質環境の特徴を反映した緩衝材・岩石中の核種移行モデルとデータベースを提示するとともに、今後実際のサイト条件が与えられた際の岩石中の核種移行や有機物・微生物等影響評価手法の構築と妥当性確認の手順を提示した。
- 上記の研究開発を通して核種移行モデル・データベース等の整備・拡充を進めるとともに、諸外国の最新知見も反映した最新の核種移行パラメータ設定手法を構築し、NUMOの包括的技術報告書(2021.2公開)に反映した。

地下施設建設に伴う周辺環境の経時変化調査(微生物種組成の例)



微生物のメタゲノム解析による代謝機能の解明研究事例

巨大なゲノムサイズのバクテリオファージを幌延URLからも発見し、これらは地球上の様々な環境に分布すること、**他の生物に寄生しやすくするための新規の生物学的戦略を有すること**を示した。処分環境における微生物生態系を理解する上で、ウイルスの宿主情報や生態戦略の解明は重要な情報。

Al-Shayeb et al. (2020)Nature
(カリフォルニア大学との共同研究成果)

【高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発】

以下のような成果を得た。

1. 処分システムに関する工学技術の信頼性向上

(成果のまとめ)

- 高塩濃度の地下水や酸性条件の地下水および環境条件が過渡的な期間における地下水水質の変化などを含めて、幅広い条件に対する人工バリアの適用性や堅牢性、長期的な挙動の推定に資するための基礎的情報が得られた。
- 原位置試験を活用した人工バリアの挙動に関する計測技術や連成現象解析技術の適用性の確認とともに、閉鎖後長期のニアフィールド複合挙動を評価するためのシステム開発を進め、人工バリア挙動をより現実的に把握できる技術の構築に貢献した。
- 岩盤の力学条件等に応じた配合選定が可能となる低アルカリ性セメントを用いた支保工の基本特性に関するデータを整備した。
- 堆積軟岩を対象に、坑道の設計に反映するための岩盤の力学挙動を評価する手法の確立に向けて、含水比が力学挙動に大きな影響を及ぼす等のデータを整備した。

(地層処分事業や他分野への貢献)

⇒この技術開発成果は、幅広い地質環境条件に対応した人工バリアや地下施設の設計に寄与する重要な成果の一つと考えられる。

⇒NUMOの技術の蓄積や技術報告書作成等に資する技術情報を提供できる。

⇒原子力発電所の解体に伴い発生する炉内構造物等の廃棄物の中深度処分における人工バリアや地下施設の設計にも貢献できる。

【高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発】

2. 安全評価手法の高度化

(成果のまとめ)

- 地表環境の変遷を考慮したより現実的な安全評価を行うために、隆起・侵食を対象として、地形の長期的な変化を迅速に評価可能なツールを開発した。また、地層処分システムにおける過酷事象を探索可能な手法の構築を行った。
- 処分システムの長期環境変遷や実際の地質環境の特徴を反映した緩衝材・岩石中の核種移行モデルとデータベース、及びサイトが与えられた際の岩石中の核種移行や有機物・微生物等影響評価手法の構築と妥当性確認の手順を提示した。
- 上記の研究開発を通して核種移行モデル・データベース等の整備・拡充を進めるとともに、諸外国の最新知見も反映した最新の核種移行パラメータ設定手法を構築し、NUMOの包括的技術報告書(2021.2公開)に反映した。

(地層処分事業や他分野への貢献)

- ⇒これらの研究開発成果は、今後の実際の処分サイトを対象とした、より現実的な処分システムの安全評価を実施するための重要な技術基盤となる。
- ⇒今後のNUMOの安全評価や技術報告書、安全規制の検討において反映される。
- ⇒原子力発電所の解体に伴い発生する炉内構造物等の廃棄物の中深度処分や、福島事故廃棄物処分における安全評価の基盤としての活用も期待できる。

主な共同研究(地層処分研究開発)

主な共同研究

原子力発電環境整備機構	・ニアフィールドシステムの状態変遷に伴うバリア材及び核種の長期挙動評価のための研究
原子力環境整備促進・資金管理センター	・オーバーパック溶接部等の耐食性に関する研究 ・地層処分環境における金属材料溶接部の耐食性に関する研究
電力中央研究所	・実地下水中のコロイドへの核種の収脱着メカニズムに関する研究
物質・材料研究機構	・計算科学手法を適用した核種移行メカニズムの評価に関する研究
北海道大学	・廃棄体由来化学物質等のバリア材料に及ぼす影響の研究 ・ベントナイトのナチュラルアナログ研究 ・深部地下環境下における鉄鉱物の生成とセレンとの相互作用に関する研究
京都大学	・廃棄体由来化学物質等の放射性核種の挙動に及ぼす影響の研究 ・熱・応力による岩盤不連続面の透水特性変化の評価に関する研究 ・ジルコニウム及びハフニウムの熱力学データ選定に関する研究
大阪大学	・セメント水和物等の熱量測定に関わる研究
東京大学	・堆積軟岩の力学挙動評価手法の開発に関する研究
岡山大学	・物質移行解析の詳細化へ向けたGPGPU並列計算の適用性に関する研究 ・メソスケールシミュレーションによる緩衝材の特性評価に関する研究
千葉大学	・バリア材の間隙構造と元素収着形態の核磁気共鳴分析による評価に関する研究
東北大学	・DEMによるバリア材料の変質を考慮した長期力学挙動モデル開発に係る研究

5. 使用済燃料の直接処分研究開発

使用済燃料の直接処分研究開発

1. 使用済燃料の直接処分に関する工学技術の開発

1.1 人工バリアの設計 ※

1.2 地下施設の設計 ※

1.3 直接処分方策に関する調査 ※

(本小項目は「核不拡散・核セキュリティ総合支援センター」が実施しているため本中間評価の対象外)

2. 使用済燃料の直接処分に関する安全評価手法の開発

2.1 使用済燃料からの核種溶出挙動の理解 ※

2.2 システム性能評価に係る手法の開発 ※※

3. その他代替処分オプションの調査

※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. 使用済燃料の直接処分に関する工学技術の開発(1/2)

1.1 人工バリアの設計

(研究の背景・狙い・目標・意義)

直接処分における人工バリア設計では、廃棄体の形状・寸法や発熱量、放射線量などガラス固化体とは異なる特性を考慮する必要がある。また、臨界安全性への対応など特有の課題がある。更に、燃料の種類(PWR,BWR)や燃焼度、濃縮度など多様性を考慮する必要がある。

よって、ガラス固化体での設計の知見を活用しつつ直接処分特有の設計上の課題に対応した設計検討を行う必要がある。

(実施内容)

- 処分容器について、臨界安全性、遮へい性、構造健全性、緩衝材制限温度等の観点から解析を実施し、燃料集合体の収容体数、容器厚さ等の仕様を例示するとともに、臨界安全性評価について、処分後の現実的な材料の状態や配置等の変化を取り込んだ合理的な評価手法の構築に必要な情報を整備。
- 処分容器の閉じ込め性向上に向けて、純銅や代替材料の耐食性等に関する試験、調査を実施し、我が国で想定される地質環境条件におけるそれら材料の適用条件の評価等に資するデータを拡充した。
- 緩衝材について、岩盤のクリープ変形、廃棄体の自重沈下、処分容器の腐食膨張変形等を考慮した複合解析を実施し、ガラス固化体の場合と同様の緩衝材仕様によって応力緩衝性や廃棄体の支持性能などの要件を満足することを確認。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

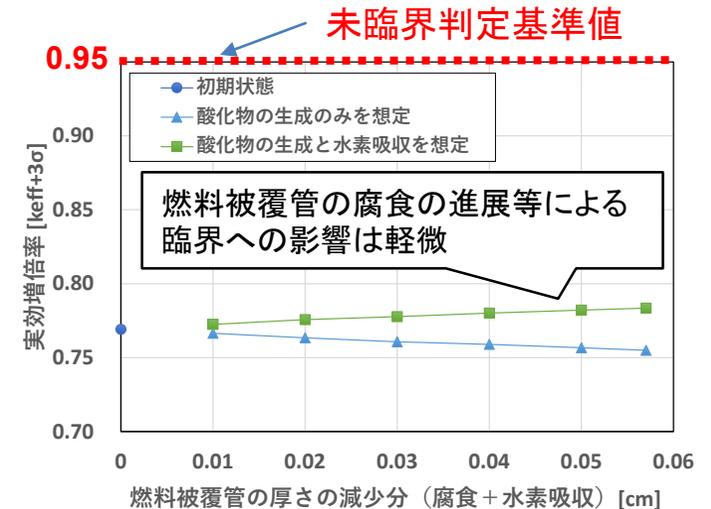
- ガラス固化体での技術や経験を直接処分での設計に適用できる見通しを得るとともに、使用済燃料の特徴や多様性に対応した設計事例を例示した。
- 耐食層に銅を用いる処分容器を想定した人工バリアの設計解析手法等は、ガラス固化体での代替オーバーパックに対応した人工バリア設計においても活用可能となることが期待される。

電位 [mV vs. SSE]	NaCl濃度[M]					
	0.5	1.0	1.5	1.75	2.0	3.0
+380	○	○	○	●	●	
+360	○	○	○	●	●	●
+340	○	○	○	●	●	
+320	○	○	○	○●	●	
+300	○	○	○	○	○	

ニッケル基合金のすきま腐食試験結果

試験方法: 定電位試験, 材料: C-276, 温度: 80°C

凡例 ○: すきま腐食なし, ●: すきま腐食あり



燃料被覆管の腐食進展による実効増倍率への影響に関する臨界解析例

1. 使用済燃料の直接処分に関する工学技術の開発(2/2)

1.2 地下施設の設計

(研究の背景・狙い・目標・意義)

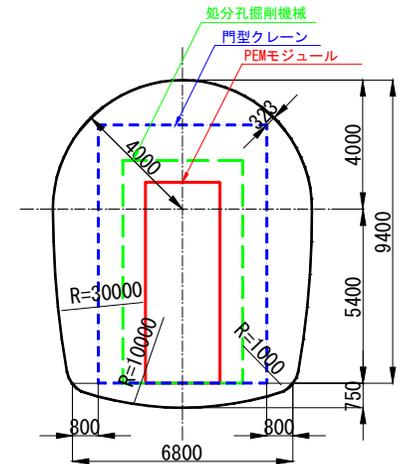
使用済燃料の直接処分における坑道や処分孔の設計では、人工バリア設計と同様に廃棄体の形状・寸法・重量や発熱量、放射線量などガラス固化体とは異なる特性を考慮する必要がある。特に、廃棄体の形状が長尺となることからガラス固化体の場合よりも大きな内空断面積の坑道に対する設計検討が必要となる。

(実施内容)

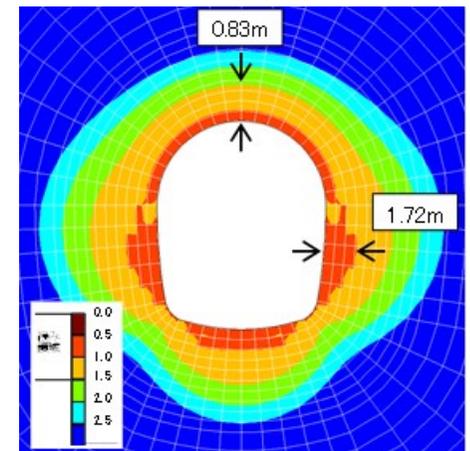
- わが国の使用済燃料廃棄体の特性(サイズ、重量、発熱量、放射線量など)と地質環境条件(岩盤の力学特性、初期地圧、水理・地質特性等)を考慮し、代表的なケースに対応した処分坑道および処分孔の力学的安定性評価等を行うとともに、坑道掘削において適用候補となる掘削方式とその適用範囲について整理。
- 人工バリアの定置方式の多様な組み合わせに対し、坑道の断面形状の選定と掘削技術の適用性や力学的安定性の総合的な評価を実施。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- [わが国における使用済燃料の特性や地質環境条件に対して技術的に実現可能な廃棄体・緩衝材の定置方式や搬送・定置設備とそれに対応した地下施設の概念設計事例を示した。](#)
- 地質環境条件や定置方式に対して地下施設設計の技術的な成立性等を幅広く検討した結果は、ガラス固化体での地下施設設計における技術的な選択肢の抽出において活用可能となることが期待される。



廃棄体寸法等を考慮して設定された処分坑道断面の例



処分坑道の力学的安定性評価例 (局所安全率)

2.1 使用済燃料からの核種溶出挙動の調査

(研究の背景・狙い・目標・意義)

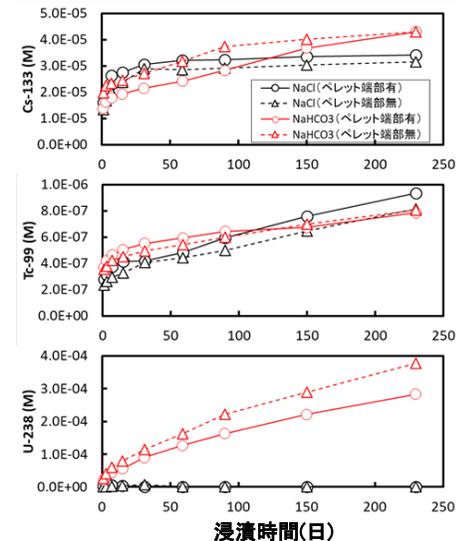
処分容器が破損したあとの放射性核種の燃料集合体からの溶出挙動(速やかな放出、ゆっくりした溶解)の核種移行評価上の取扱い(瞬時放出率、長期溶解速度の設定)は、核種移行評価結果に比例的に影響するため、重要なパラメータに位置づけられる。このパラメータ設定を目的として、使用済燃料からの核種放出の評価に関する調査研究を行う。

(実施内容)

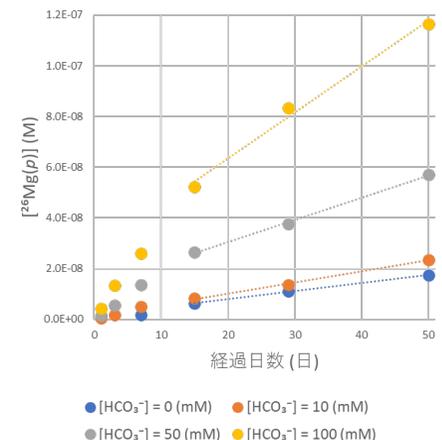
- 瞬時放出率と長期溶解速度について、諸外国の直接処分安全評価報告書や欧州プロジェクトの成果等をレビュー。
- 瞬時放出率について、レビューした文献情報を基に設定手法を構築。さらに、使用済燃料を用いた浸漬試験に着手し、実燃料からの核種の溶出挙動を調査。
- 長期溶解速度について、二酸化ウランの溶解速度に及ぼす炭酸影響の実験的研究を実施し、還元雰囲気下における二酸化ウランの溶解について、一度溶解したウランの再沈殿を示唆する結果が得られたため、溶解指標物質(Mg)を用いた溶解速度評価手法を構築し、溶解速度が炭酸濃度に依存して増加する可能性を指摘。また、浸漬試料の表面分析から、炭酸共存下におけるウランの溶解挙動を考察。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 瞬時放出率について、[文献情報に基づく設定手法の構築について学術論文で公開した](#)。また、[使用済燃料からの核種の溶出挙動の調査結果を公開した](#)。
- 長期溶解速度について、地下水中に想定される炭酸濃度に着目した文献情報に関する[レビュー結果を学術論文で公開し](#)、また[実験的研究結果を国際学会で報告した](#)。さらに、[表面分析による溶解メカニズムの評価について学術論文で公開した](#)。



使用済燃料浸漬試験結果例



溶解指標物質の溶解速度に及ぼす炭酸濃度影響

2. 使用済燃料の直接処分に関する安全評価手法の開発(2/2)

参考資料

2.2 システム性能評価に係る手法の開発

(研究の背景・狙い・目標・意義)

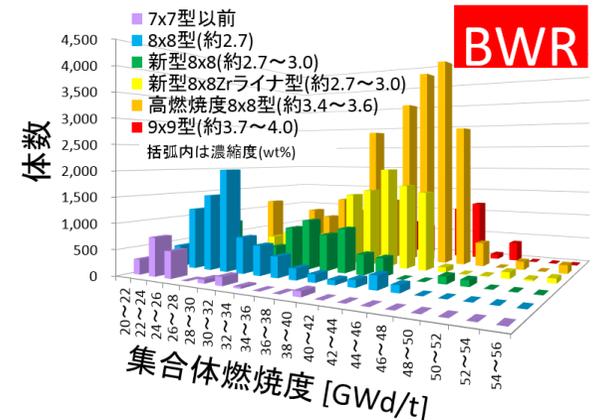
使用済燃料直接処分を対象としたシステム性能評価に係る手法の開発においては、ガラス固化体の地層処分での知見や技術を活用するとともに、ガラス固化体の場合と使用済燃料直接処分の場合との違いを把握し、その違いを使用済燃料直接処分の性能評価に適切に取り込んでいくことが重要となる。そのため、使用済燃料の多様性や使用済燃料直接処分に特有な挙動等に着目し、それらに応じたシステム性能を評価するための手法等の検討を進めてきた。

(実施内容)

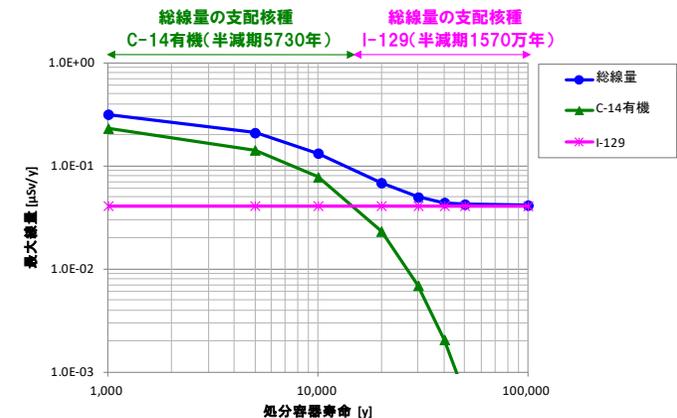
- 使用済燃料の多様性
 - モデル計算による燃料の多様な条件(炉型、燃料タイプ、燃烧度、冷却期間等)に応じた使用済燃料の発生量の推定を試行。
 - 試行を通じて、条件に応じた発生量分布やインベントリの違いを把握できる見通しが得られた。
- 使用済燃料の直接処分に特有な挙動
 - 使用済燃料の直接処分での線量評価結果の支配核種(C-14やI-129)について、特に半減期約5700年のC-14に着目し、処分容器の長寿命化の効果を検討。
 - 5万年程度までの長寿命化は線量の低減に対して一定の効果が見られることが示唆された。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- わが国で想定される燃料の多様な条件に応じた使用済燃料の発生量分布やインベントリの違いを俯瞰することができた。
- また、処分容器の長寿命化による総線量の最大値の低減効果を定量的に把握することができた。
- 本成果は、使用済燃料直接処分の設計検討における処分容器長寿命化の重要性や目標設定等に寄与するものである。



モデル計算による発生量の推定結果例



処分容器寿命と線量の関係例

3. その他代替処分オプションの調査

(研究の背景・狙い・目標・意義)

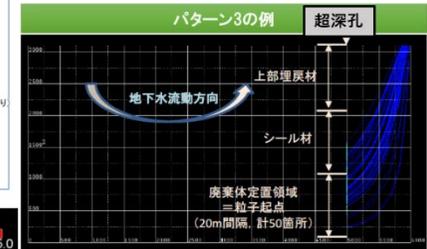
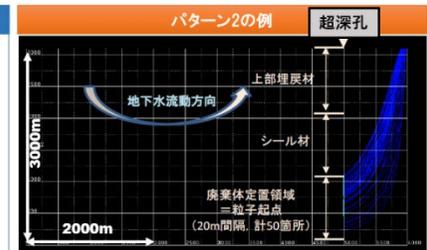
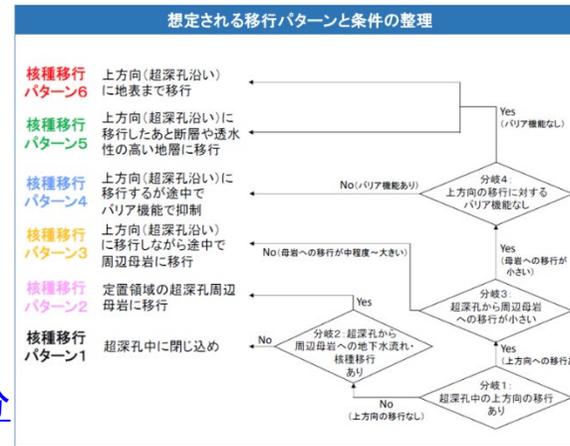
使用済燃料の直接処分以外の代替処分オプションについては、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針(平成27年5月22日閣議決定)」において、「国及び関係研究機関は、幅広い選択肢を確保する観点から、使用済燃料の直接処分その他の処分方法に関する調査研究を推進するものとする。」との考え方が示されている。このような背景を踏まえ、超深孔処分について、わが国の諸条件を考慮した場合の適用性・成立性の検討に向けた調査研究を行った。

(実施内容)

- 超深孔処分及び関連分野の最新情報の収集・整理
 - 先行する米国の検討事例の調査を行うとともに、超深孔処分実施の基盤となる掘削技術、地質環境調査技術、データ取得技術の3つの技術に着目して情報の収集・整理を実施。
 - 米国の検討事例での超深孔処分の安全性に係る検討では、熱や地温勾配による熱対流による影響が重視され、地下水流れによる核種移行については、予備的な検討にとどまることを確認。
 - また関連技術については、例えば掘削技術について、地熱関係を中心に高温環境で超深部までの掘削実績は少なからずあるものの、超深孔処分で想定される径(例えば50cm程度以上)については超深部まで掘削した事例はなく、掘削そのものの、さらに廃棄体の定置のための孔の健全性維持や定置の実施等も大きな技術的課題になることを確認。
- 超深孔処分の成立性に影響する因子の分析・整理
 - 閉鎖後安全性に影響する可能性のある超深孔処分に特徴的な移行経路や移行挙動のパターン化やその影響についての予察的な解析を実施。
 - 移行経路や移行挙動が、主に「地下水流動の方向」、「母岩の透水係数」、「超深孔の透水性(含む、バリア機能の有無)」のバランスにより特徴づけられる可能性が示唆された。

(成果・地層処分事業や他分野への貢献)

- 本成果は、その他代替処分オプションとしての超深孔処分のわが国への適用性・成立性の検討において重要となる留意点や課題の具体化等に寄与するものである。



【使用済燃料の直接処分研究開発】

以下のような成果が得られた。

1. 使用済燃料の直接処分に関する工学技術の開発

(成果のまとめ)

- ガラス固化体での技術や経験を直接処分での人工バリア設計に適用できる見通しを得るとともに、使用済燃料の特徴や多様性に対応した設計事例を例示した。
- わが国における使用済燃料の特性や地質環境条件に対して技術的に成立しうる地下施設の設計事例を示した。
- 臨界安全性について、処分容器や燃料被覆管等の現実的な状態・配置の変化を取り入れて評価モデルを構築することの重要性を確認するとともに、いくつかの状態・配置の変化のパターンについてその影響を考慮可能な評価モデルを提示した。
- 処分容器の腐食挙動に着目した試験研究を通じて、わが国での地質環境条件の特徴・多様性に対する処分容器の長寿命化などについての見通しを得た。

(地層処分事業や他分野への貢献)

⇒この技術開発成果は、わが国における地層処分に適用可能な工学技術の基盤構築に寄与すると考えられる。

また、使用済燃料直接処分の安全評価の対象となる直接処分システムの具体化等にも寄与すると考えられる。

【使用済燃料の直接処分研究開発】

2. 使用済燃料の直接処分に関する安全評価手法の開発

(成果のまとめ)

- 使用済燃料の直接処分で特徴的な放射性核種の燃料集合体からの溶出挙動(速やかな放出、ゆっくりした溶解)を性能評価で考慮するための重要なパラメータ(瞬時放出率と長期溶解速度)について、主に文献情報に基づく設定例を示すとともに、設定値の信頼性向上に向けたデータ取得として特に地下水中に想定される炭酸濃度の影響に着目した実験的研究を行った。
- 使用済燃料の多様性や使用済燃料直接処分に特有な挙動に着目した評価手法等の検討として、モデル計算による使用済燃料の発生量の推定、線量評価結果の支配核種(C-14:半減期約5700年)に着目した処分容器の長寿命化の効果の把握等を行った。

(地層処分事業や他分野への貢献)

⇒この技術開発成果は、わが国における地層処分に適用可能な安全評価技術の基盤構築に寄与すると考えられる。

また、使用済燃料直接処分の設計検討における処分容器長寿命化の重要性や目標設定等にも寄与すると考えられる。

【使用済燃料の直接処分研究開発】

3. その他代替処分オプションの調査

(成果のまとめ)

- 超深孔処分及び関連分野の最新情報の収集・整理を通じて、先行する米国での検討の現状と課題等を把握するとともに、超深孔処分実施の基盤となる掘削技術，地質環境調査技術，データ取得技術についても現状と課題等を把握。
- また、超深孔処分の成立性に影響する因子の分析・整理として、閉鎖後安全性に影響する可能性のある超深孔処分に特徴的な移行経路や移行挙動のパターン化を行うとともに、移行経路や移行挙動をつげる因子のついでの見通しを得た。

(地層処分事業や他分野への貢献)

⇒ この技術開発成果は、わが国における地層処分に適用可能な工学技術の基盤構築に寄与すると考えられる。

主な共同研究

東北大学

- ウラン酸化物の溶解速度に及ぼす水質影響に関する研究
- 高耐食性金属の直接処分容器材料としての特性に関する研究



東北大学との共同研究
(溶解指標物質を固溶させた UO_2 ペレットを用いた浸漬試験の実施)

研究開発成果のプレス発表

第3期中長期目標期間における研究開発成果 (参考)研究開発成果のプレス発表(1)

参考資料

○断層運動で損傷した岩盤の自己修復機能の確認 (瑞浪)

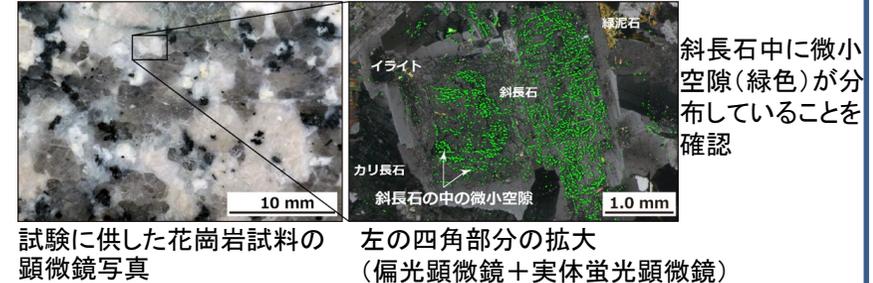
深度300m及び500mの坑道で、岩体の形成時から現在までの割れ目の状態変遷の詳細な調査により、断層運動により一度地下水が通りやすくなった断層周辺も、そのほとんどが鉱物による割れ目の充填といった自己修復により、地下水や物質の通りにくい場となっていることを発見した。本成果は、日本における地層処分の安全性の議論において、断層に対する新たな発想による評価が期待される。

⇒ [国際誌に掲載](#) (平成28年6月)、[プレス発表](#) (平成28年6月)

○岩盤が有する遅延機能に関する新たな発見 (瑞浪) (右上図)

深度500m坑道で採取した花崗岩ブロックを使った室内拡散試験によって、花崗岩中に物質移動の遅延が期待できる新たな機能を発見した。本成果は国内の他の花崗岩にも適用可能であり、地層処分の安全性を評価する上で、重要な知見の一つである。

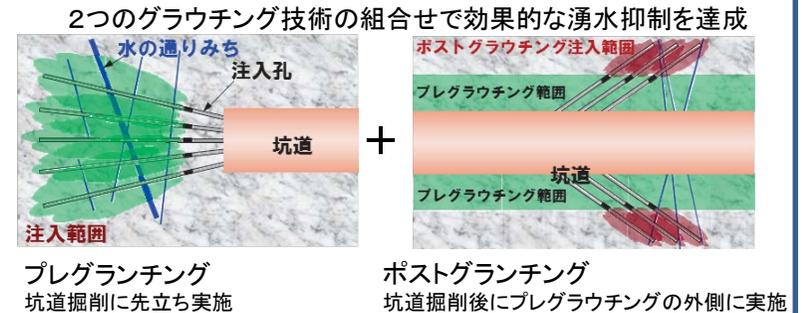
⇒ [日本原子力学会バックエンド部会奨励賞受賞](#) (平成29年3月)、[プレス発表](#) (平成28年8月)



○高水圧下でも適用可能な湧水抑制技術を開発 (瑞浪) (右中図)

ナノスケールの微粒子材料等の適切な使い分けと、注入圧力操作の工夫により、グラウチングを実施しない場合の予測に対して湧水量を約100分の1まで低減することができた。本成果は他の大規模地下構造物の建設においても活用が期待される。

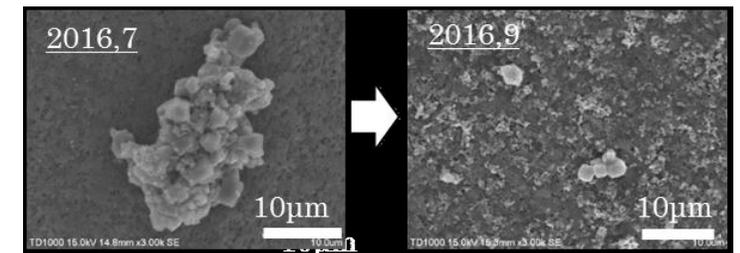
⇒ [土木学会にて発表](#)、[プレス発表](#) (平成28年12月)



○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 (瑞浪) (右下図)

高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性元素と化学的な性質が似ている天然元素(希土類元素)の冠水坑道内における濃度が、本来の地下水中の濃度に比べて明らかに低下していることを発見し、地下水から除去されるメカニズムを解明した。本成果は坑道閉鎖後の閉じ込め能力を実際の坑道で示した世界初の事例となった。

⇒ [国際誌に掲載](#) (平成29年6月)、[プレス発表](#) (平成29年7月)



第3期中長期目標期間における研究開発成果 (参考)研究開発成果のプレス発表(2)

参考資料

○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(瑞浪)

深度300メートルの花崗岩から採取した地下水に、マグマ由来のメタンをエネルギー源とする微生物から成る生態系が存在することを新たに発見し、それらが地下環境の還元性維持に関与することを確認し、地球微生物学へ貢献した。

⇒[プレス発表](#)(平成29年9月)、[国際誌に掲載](#)(平成30年1月)

○湧水対策が困難な地質構造を地上から把握する方法を開発(幌延)(右上図)

湧水対策が困難な粘土質せん断帯を、マグマガラス含有を指標として地上から把握する方法を開発した。粘土質せん断帯の拡がりを数キロにわたって追跡することに、世界で初めて成功。本成果は一般土木分野(湧水対策)への展開が期待できる。

⇒[プレス発表](#)(平成29年9月)、[国際誌に掲載](#)(平成29年10月)

○地下深くの亀裂の連結性を地上から評価する方法を開発(幌延)(右中図)

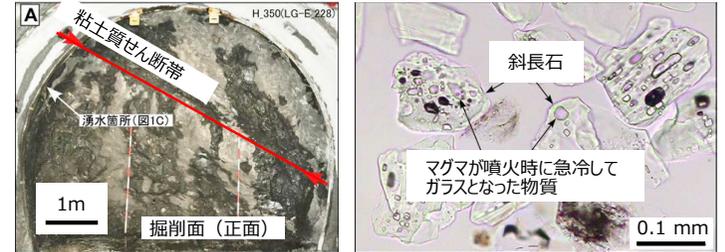
亀裂の連結性が限定的である場合に透水試験で得られる独特な水圧挙動に着目し、地上から地下深くの亀裂の連結性を適切に評価する新たな評価方法を考案した。本成果は、地層の亀裂中に貯留する資源の探査などへの応用も期待できる。

⇒[国際誌に掲載](#)(平成30年5月電子版)、[プレス発表](#)(平成30年5月)

○国内初、炭酸塩鉱物の微小領域の年代測定手法を開発(東濃)(右下図)

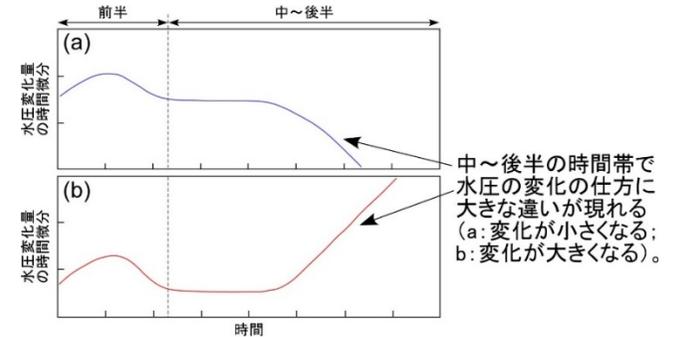
地層中の炭酸塩鉱物を対象に、分析可能な領域を判別する同位体イメージング技術等を用いて、髪の毛の太さ程度の小さな領域の質量分析を行う技術開発に成功し、地質環境の長期安定性の評価技術の高度化や古環境の復元に係る科学的研究の発展に貢献した。

⇒[プレス発表](#)(平成30年11月)、[国際誌に掲載](#)(平成30年12月)

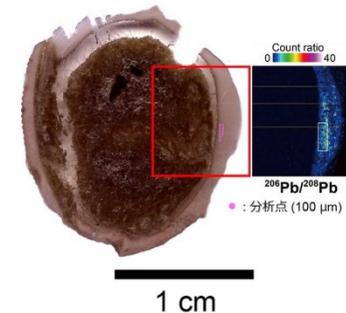


地下施設で遭遇した粘土質せん断帯の写真

マグマが噴火時に急冷してガラスとなった物質の顕微鏡写真



中～後半の時間帯で水圧の変化の仕方に大きな違いが現れる
(a: 変化が小さくなる;
b: 変化が大きくなる)。



LA-ICP質量分析法によるウミツボミの分析例

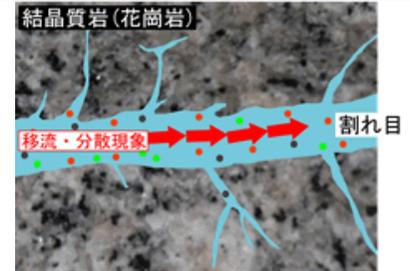
第3期中長期目標期間における研究開発成果 (参考)研究開発成果のプレス発表(3)

参考資料

○結晶質岩(花崗岩)の割れ目評価のための新知見を発見(瑞浪)(右上図)

結晶質岩中に発達した割れ目は地下水や物質の移動経路となるが、その割れ目の分布特性と岩体内の領域ごとの温度履歴との間に相関があることを発見した。本成果は、深部岩石領域の活用事業(天然ガス・石油の地下貯蔵など)における安全性や妥当性評価へ貢献できる。

⇒[国際誌に掲載](#)(平成31年1月)、[プレス発表](#)(平成30年12月)



結晶質岩(花崗岩)内の割れ目における地下水・物質移動の概念図

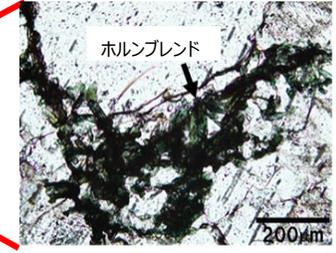
○山地形成過程の解明に国内初の手法を提示(東濃)

堆積物の供給源推定のための国内初の手法として、電子プローブマイクロアナライザ(EPMA)を用いた効率の高い鉱物分析手法を開発した。地質環境の長期安定性の評価技術の高度化や山地の形成過程の解明に係る地球科学分野の研究の発展への寄与を期待。

⇒[プレス発表](#)(平成31年3月)、[国際誌に掲載](#)(平成31年1月)



超臨界流体の流路の痕跡
(白矢印の割れ目)



岩石薄片試料に認められた
超臨界流体の痕跡
(割れ目中のホルンブレンド)

○白亜紀の花崗岩中に超臨界流体の痕跡を世界で初めて発見(東濃)(下図)

この痕跡の周りの岩盤中に微小な割れ目網が発達して地下水などの流路になっていることを明らかにした。本成果は、地層処分における地質環境の長期変遷解析の高度化に貢献し、トンネルなどの地下構造物の湧水対策に関わる土木分野に応用可能。

⇒[プレス発表](#)(令和元年11月)、[国際誌に掲載](#)(令和元年8月)

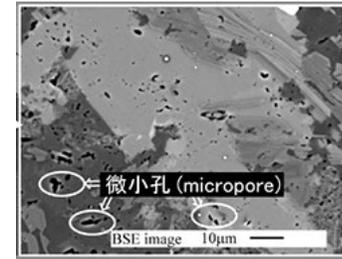
第3期中長期目標期間における研究開発成果 (参考)研究開発成果のプレス発表(4)

参考資料

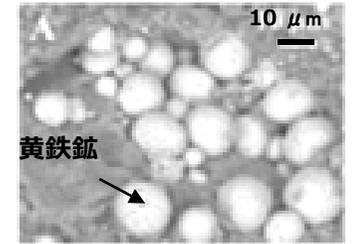
○花崗岩内の物質移動経路に関する新知見(瑞浪)(左上図)

断層運動による割れ目が発達していない岩盤の高透水化に超臨界流体の関与を裏付ける、超臨界流体の痕跡を世界で初めて発見。また、花崗岩中に多く含まれる斜長石の熱水変質現象で生じる移動経路としての微小孔の成因と役割を解明。深部地質領域を活用する事業(天然ガス・石油の地下貯蔵)への応用が期待。

⇒[国際誌に掲載](#)(平成31年1月電子版)、[プレス発表](#)(平成31年4月)



土岐花崗岩中の微小孔
(電子顕微鏡写真)

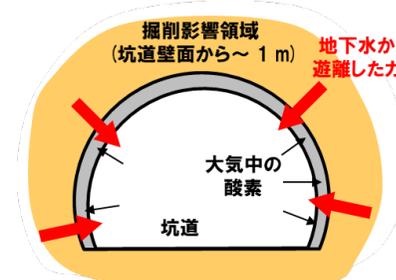


大気との接触を極力抑えて処理・分析した岩盤のX線分析結果

○坑道周辺の酸化抑制メカニズムを世界で初めて解明(幌延)(右中図)

坑道周辺の亀裂が発達する領域において岩盤の酸化還元状態の変化に関する研究を行い、地下水から出てきたガス(メタンガス、炭酸ガス)が岩盤への空気(酸素)の侵入を抑え、掘削後5年が経過しても、坑道の周りが酸素のない状態にあることが分かった。本成果は、地層処分の安全評価において、処分場の閉鎖後に生じる変化を予測・評価する上で重要な知見。

⇒[プレス発表](#)(令和2年3月)、[国際誌に掲載](#)(令和2年3月)

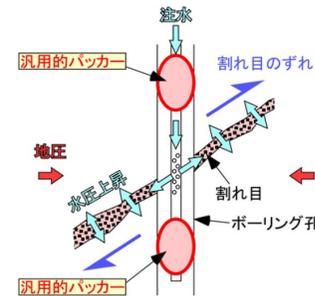


坑道周囲の化学環境
に関する概念モデル

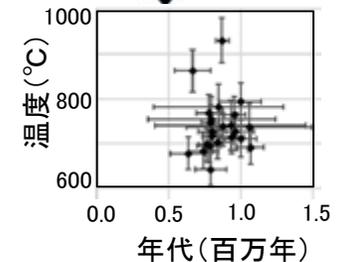
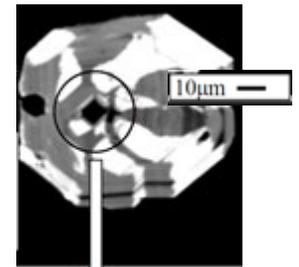
○汎用的な装置で地下の岩石の割れ目をずらすことに世界で初めて成功(幌延)(下左図)

汎用装置を活用して、人工的に岩盤中の割れ目をずらす原位置試験手法を開発した。観測できるずれ幅が、これまでの数mmから数cmへ改善した。処分場のレイアウトを検討するうえで考慮すべき地震等で生じる割れ目のずれが地層の透水性にもたらす影響について、従来より幅広い条件で評価が可能となった。天然ガス・石油の地下貯蔵等の様々な地下利用分野の課題解決に広く貢献可能。

⇒[国際誌に掲載](#)(令和2年8月)、[プレス発表](#)(令和2年9月)



汎用装置を応用した岩盤中の
割れをずらす試験の概念



黒部川花崗岩の画像と
温度時間履歴の測定結果の例

○深成岩の冷却や隆起過程の調査・評価技術の手法を新たに開発(東濃)(下右図)

岩石中のジルコンに含まれ、岩体形成時の温度を推定する指標となるチタンの濃度測定とU-Pb年代測定をピンポイントで同時にできる分析手法を開発した。本成果は、天然ガス・石油の地下貯蔵等の地下利用分野で重要な知見を与えることが可能

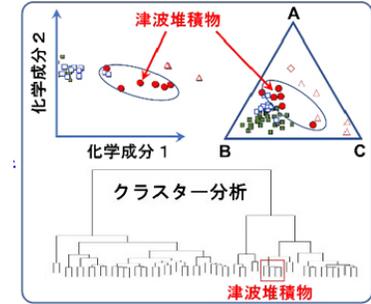
⇒[国際誌に掲載](#)(令和2年7月電子版)、[プレス発表](#)(令和2年11月)

第3期中長期目標期間における研究開発成果 (参考)研究開発成果のプレス発表(5)

○津波防災に貢献できる津波堆積物の特定方法を提案(東濃)(右上図)

静岡平野で発生した約1000年から4000年前の津波堆積物の化学組成を明らかにし、得られた化学組成をもとに統計解析等を行うことで、静岡平野で発見された津波による堆積物と他の堆積物とを区別することに初めて成功。本研究で用いた手法は、沿岸域における津波被害への防災・減災に貢献可能。

⇒ [国際誌に掲載](#) (令和3年10月オンライン掲載)、[プレス発表](#) (令和3年11月)

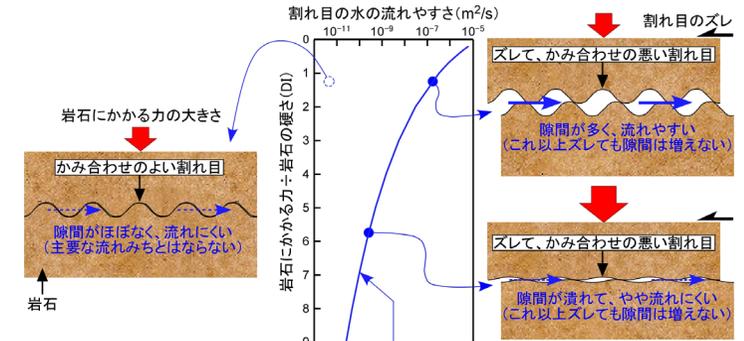


津波堆積物の地球化学的判別手法のイメージ図

○地下深部の割れ目の水の流れやすさに関わる法則性を発見(幌延)(右中図)

地下水の主要な流れみちとなる割れ目の水の流れやすさは、岩石にかかる力と岩石の硬さ、そして割れ目のかみ合わせの程度の3つの要素の組み合わせによって普遍的に決まるという法則性があることを解明。より少ない本数のボーリング調査で、高レベル放射性廃棄物の地層処分場やCO2地中貯留層周辺の割れ目の水の流れやすさを推定する際に役立つ。本成果は、高レベル放射性廃棄物の地層処分場やCO2地中貯留層周辺の割れ目の水の流れやすさを推定等に貢献可能。

⇒ [プレス発表](#) (令和3年12月)、[国際誌に掲載](#) (令和3年12月)



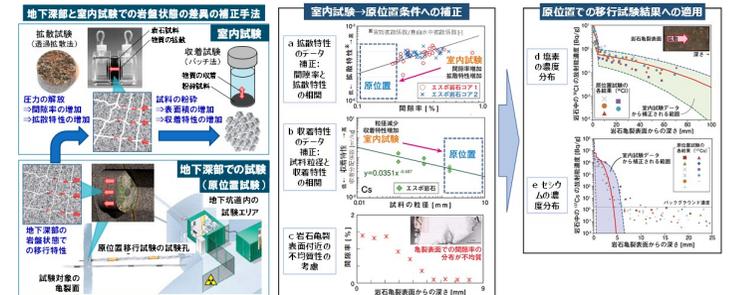
地下水の主要な流れみちとなる割れ目の水の流れやすさを表す曲線 (実際に存在し得る割れ目の水の流れやすさの上限値に相当)

○地下深くの岩盤中の放射性物質の動きをより正確に推定する手法を構築(基盤)(右下図)

地下深部の岩盤中における放射性物質の動きやすさ(移行特性)を、実際の地下深部環境と地上の室内試験との岩盤状態の差異に基づき推定する新たな評価手法を構築。本評価手法は、今後の地層処分の候補サイトの岩盤を対象とした、効果的な調査・試験や信頼性の高い安全評価の実現に貢献することが期待。

⇒ [国際誌に掲載](#) (令和3年11月)、[プレス発表](#) (令和3年12月)

地下深部の割れ目の水の流れやすさ(割れ目内の隙間の多さ)とそのメカニズムを表す概念図



室内試験データから原位置条件での移行特性の推定手法とその適用性の確認結果