

# 機構改革に伴う成果取りまとめと今後の研究計画

## - 深地層の研究施設計画と地質環境の長期安定性研究 -

### ② 超深地層研究所計画

平成26年3月27日

日本原子力研究開発機構  
地層処分研究開発部門

# 必要性の確認

## 必要性の確認

- **取りまとめで抽出された課題に関し、必要性を以下のチェック項目に従い確認。**

### チェック項目：

- ✓ **諸外国で開発された既存技術は存在するか？**
- ✓ **日本特有の地質環境においても上記技術は活用可能なのか？  
海外の施設と一緒にR&Dを行うことはできないのか？**
- ✓ **日本の他の地域の結晶質岩における調査、解析、評価にも活用できるのか？**
- ✓ **今、それらの課題に対する研究開発が必要なのか？  
オンサイトにおいて研究開発を行うことが、より合理的ではないか？**

# 日本特有の深部地質環境

● **変動帯に位置・若い(高温)岩体** ● **温暖湿潤な気候(降水量多い)** ● **島嶼**

- 地震・断層活動, 隆起・侵食, 火山活動(天然現象)が顕著。
- 熱水性の変質鉱物を伴う割れ目が多く存在。
- 地質構造が複雑。
- 地下水の循環が早い(希薄な水質)。
- 地下水位が高いことから, 軟弱な岩盤の出現や大量出水の可能性有。

要素	日本:瑞浪URL	スウェーデン:HRL	備考
岩体 隆起速度 地温勾配	<ul style="list-style-type: none"> <li>・7000万年前に形成</li> <li>・7000万年前から現在までの平均隆起速度は 約0.15mm/年</li> <li>・地温勾配:1.7℃/100m (日本の平均地温勾配:3℃/100m)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・18億年前に形成</li> <li>・2億年前から現在までの平均隆起速度は 約0.02mm/年</li> <li>・地温勾配:1.5℃/100m</li> </ul>	山崎他(2012) Soderlund(2008) Stanfors et al.(1999)
断層/割れ目頻度	約11本/m(深度300m坑道壁面)	2.5~6.5本/m	坑道内の調査結果
岩盤の透水係数	透水係数: $10^{-6}$ - $10^{-8}$ m/s	透水係数: $10^{-8}$ - $10^{-10}$ m/s	Mazurek(2001)
変質の程度	全体の約30%	約10%	Yoshida et al.(2009)
割れ目充填物	約30%の割れ目に粘土充填物(未固結)がある	粘土充填物はほとんど無い	
断層の認識性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・100~200mの被覆層が存在</li> <li>・断層規模が被覆層と花崗岩で異なる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・被覆層は存在しない</li> <li>・露頭調査, トレンチ調査などにより把握可能</li> </ul>	
地下水の流動 地下水の化学的特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・年間降雨量:1500mm</li> <li>・年間平均気温:13℃</li> <li>・塩分濃度:低(200-400mg/L)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・年間降雨量:675mm</li> <li>・年間平均気温:6.5℃</li> <li>・地下水の塩分濃度:高(800-14300mg/L)</li> </ul>	馬原他(1999) SKB(1999) Iwatsuki et al.(2005) Stanfors et al.(1999)

# 地質環境の特徴（瑞浪と幌延の違い）

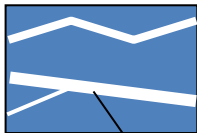
- わが国の地質は、地層処分にとって重要な特性(岩石の強度や地下水の性質)により、大きく結晶質岩系(花崗岩など)と堆積岩系(泥岩など)に区分することができる。

⇒調査機器や解析手法など、適用できる技術の仕様や適用性が異なるため、技術の実証による技術基盤の整備が必要

## 結晶質岩

### 瑞浪超深地層研究所 (岐阜県瑞浪市)

- ・岩石は塊状で硬岩に分類
- ・地下水は岩盤中の割れ目を流れる
- ・緩衝能力が小さい

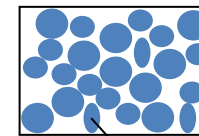


割れ目

## 堆積岩

### 幌延深地層研究所 (北海道幌延町)

- ・岩石は層状で軟岩に分類
- ・地下水は鉱物粒子の隙間も流れる
- ・緩衝能力が大きい



鉱物粒子

NUMOによる処分地選定の調査に先行して、必要な技術基盤を整備

# 取りまとめに基づき抽出された必須の課題(案) A1

## A1. 地質環境の初期状態の理解

	課題
地質・地質構造	・主要課題達成 (今後のA2, A3 の研究成果を用いて, 地質構造モデルの検証等を継続)
地下水流動	・主要課題達成 (今後のA2, A3 の研究成果や関連分野の最新技術の導入等により, 適用可能な調査解析技術についての更新や見直しを適宜実施)
地下水の地球化学	・主要課題達成 (施設閉鎖に関わる知見を地上からの調査へフィードバックし, 調査技術開発を完了)
岩盤力学	・主要課題達成
物質移動	・主要課題達成 (多様な地質環境中の物質移動特性やそれに寄与する現象を適切に把握するための調査解析技術の継続的な開発が必要)
工学技術	・主要課題達成

# 取りまとめに基づき抽出された必須の課題(案) A2

## A2. 地質環境の短期変動・回復挙動の理解

	課題
地質・地質構造	<ul style="list-style-type: none"> <li>坑道掘削に伴う損傷領域内での割れ目の変化を把握する手法の整備。</li> <li>坑道閉鎖(埋戻し)後の割れ目の閉塞・充填に関わる知見の蓄積。</li> </ul>
地下水流動	<ul style="list-style-type: none"> <li>再冠水試験や坑道埋戻し試験によって、湧水量の空間的不均質性が埋戻し材に及ぼす影響について、調査技術やモデル化・解析技術の適応性の確認。</li> <li>観測機器の耐久性向上や、遠隔モニタリング技術の開発、ガス対策を含む観測機器の維持管理方法の構築や、関連するノウハウの蓄積や、品質管理の考え方の構築。</li> <li>坑道閉鎖(埋戻し)後の地質環境特性の回復、定常化過程に関わる知見の蓄積。</li> </ul>
地下水の地球化学	<ul style="list-style-type: none"> <li>坑道閉鎖(埋戻し)後の地質環境特性の回復、定常化過程に関わる知見の蓄積。</li> <li>適切な部分閉鎖(埋戻し)方法について、研究所閉鎖時の施工方法とモニタリングにより実証。               <ul style="list-style-type: none"> <li>建設・操業時に浸透した浅層地下水を、坑道閉鎖時に元来の地下水に置換・回復するための手順。</li> <li>浅層地下水が残留した場合の中長期的な地球化学特性の解析技術。</li> <li>坑道・グラウト周辺のpH分布、酸化還元状態の長期変化。</li> </ul> </li> </ul>
岩盤力学	<ul style="list-style-type: none"> <li>EDZの連成挙動の理解(再冠水時のEDZの岩盤挙動の理解)。</li> <li>熱応力負荷等による破壊現象のモデル化、計測事例の提示。</li> <li>坑道閉鎖(埋戻し)時のEDZの挙動の把握、推定方法の高度化。</li> </ul>
物質移動	<ul style="list-style-type: none"> <li>URLを用いた原位置物質移動試験とその結果の解析評価の実施</li> <li>地下施設近傍領域の物質移動に寄与する構造や物質移動特性の三次元的な不均質性分布及びその短期的変化を把握可能な調査評価技術の構築</li> </ul>
工学技術	<b>施工対策技術</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>ポストグラウトを含むウォータータイトトンネル技術開発。</li> <li>人工材料の周辺岩盤、地下水への影響評価(プラグ・埋め戻し材)。</li> <li>坑道閉鎖技術開発。</li> <li>坑道維持管理技術の有効性の確認。</li> <li>地震時の施設安全性評価。</li> </ul>

A2-1:  
長期モニタリング技術  
の開発

A2-2:  
地質環境機能回復評  
価に関わる調査評価  
技術の開発

A2-4:  
低透水性領域での亀  
裂ネットワークモデル  
化手法の開発

A2-3:  
地下水抑制技術  
(ウォータータイトグラ  
ウト技術)の開発

# 取りまとめに基づき抽出された必須の課題(案) A3

## A3. 地質環境の長期変動・回復挙動の理解

	課題
地質・地質構造	<ul style="list-style-type: none"> <li>地質環境の長期変動に関わる知見の蓄積によるモデル化精度の向上と、多分野を含むモデル化・解析に関連する不確実性の評価手法の構築。</li> <li>断層などの天然現象の地質環境への影響範囲を把握する手法の提示。</li> </ul>
地下水流動	<ul style="list-style-type: none"> <li>考慮すべき自然事象や、それらが影響を及ぼす地下水流動特性の抽出に関わる体系的な調査・解析・評価技術を構築。</li> <li>地震に伴う地下水圧変化の発生メカニズムや、それが水理特性や地下水流動特性に与える影響の把握。</li> </ul>
地下水の地球化学	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震後の長期的な水圧変化に応じた水質変動幅の予測と検証。</li> <li>施設閉鎖時後の地球化学特性の変化幅の把握、地質学的長期変動幅との比較、安全評価への反映の考え方を整理。</li> </ul>
岩盤力学	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震時のEDZの挙動の理解。</li> <li>施設閉鎖後の地質学的時間スケールにおける初期応力状態、EDZの長期変動幅の推定。</li> <li>EDZのセルフシーリングのメカニズムの評価とモデル化。</li> </ul>
物質移動	<ul style="list-style-type: none"> <li>地質構造発達・地質環境変動に伴う地下施設近傍・遠方領域の物質移動特性の長期変動幅を推定可能な調査評価技術の構築</li> <li>地質学的時間スケールでの物質移動特性変動のモデル化技術の構築</li> </ul>
工学技術	—

A1-1:  
深部地下水の起源・  
滞留時間の理解

A3-1:  
地質環境の長期  
変遷解析技術の  
開発

・地質環境の長期安定性に関する研究  
 ・地質環境長期安定性評価  
 確証技術開発(エネ庁受託  
 研究)

# 必須の課題(案)とその概要

## 【A1:地質環境の初期状態の理解】

	これまでの成果	達成目標	概要
<p>深部地下水の起源・滞留時間の理解</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地層処分の観点から重要な地下の地質環境を確認するための地上からの調査・解析・評価手法を整備。</li> <li>地層処分の観点から安定した地下の地質環境を確認するための地上からの調査・解析・評価手法を整備。地下の地質環境に関しては、特に、研究所の深度1,500m以深付近には塩水系地下水が存在し、長期滞留環境である可能性を推定。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 深度500mからの深層ボーリング調査により、深度500m以深の地下水(塩水)の分布と起源を把握し、地下深部の地下水の長期滞留状態を例示。</li> </ul>	

## 【A2:地質環境の短期的変動・回復挙動の理解】

	これまでの成果	達成目標	概要
<p>長期モニタリング技術の開発</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下施設の建設前から建設中の地下水の水圧・水質の継続的な測定をとおして、水理学的に不均質性の大きな地下水流動場においてモニタリング技術とそれを用いた調査・解析手法の妥当性を確認。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 周辺モニタリング孔のレイアウト方法、適切な観測装置、観測頻度の提示。</li> <li>✓ 坑道内の水圧/水質/力学モニタリング装置の埋設・維持方法、遠隔モニタリング技術の提示。</li> <li>✓ モニタリング資機材の長期機能・材質状態の例示。</li> </ul> <p>(注: 欧州モニタリング共研 MoDeRnの内容/NUMOニーズも踏まえて具体的な研究計画(実証内容)を策定)</p> <p>青字:H26までに実施予定</p>	



# 必須の課題(案)とその概要

## 【A2:地質環境の短期的変動・回復挙動の理解】

	これまでの成果	達成目標	概要
<p>地質環境機能回復評価に関わる調査評価技術の開発</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>研究坑道の掘削に伴い、<b>表層水の浸透が認められる深度、混入割合</b>を確認。地下水圧の回復過程は、<b>低透水性の断層等に囲まれたコンパートメント構造の影響</b>を受けることを確認。</li> <li>坑道の再冠水の予備解析により、<b>地下水圧は比較的早く回復すること、セメント材料などによりpHが上昇する範囲は再冠水後の数年間において、地下水流動に応じて数十cm～数m程度</b>であることなどを推定。</li> <li>坑道掘削により、<b>割れ目などの存在から、局所的に不連続的な挙動</b>を示すことを確認。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>再冠水試験の準備。</li> <li>坑道周辺の地質環境調査技術、坑道閉鎖手順の提示。</li> <li>坑道閉鎖(埋戻し)後の地質環境特性(坑道周辺の力学・水理・化学特性)の変遷などの現象把握とそれに関わる解析技術の提示。</li> <li>空洞安定性に関わる熱応力の作用を含めた岩盤の破壊現象とその長期挙動のメカニズム解明。</li> <li>坑道閉鎖などに係わる<b>工学技術</b>の提示。</li> </ul>	<p>概要</p>
<p>低透水領域での亀裂ネットワークモデル化手法の開発</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>本研究所や釜石原位置試験で得られた知見により、日本の岩盤中の割れ目は、<b>割れ目の形状、充填物の種類、変質の程度や種類</b>を組み合わせることでモデル化することにより、<b>割れ目の透水性や吸着機能</b>という観点で分類可能であり、本研究所での成果を他の日本の岩盤でも応用可能であることを確認。</li> <li>亀裂ネットワークモデルに関しては、高透水性領域の岩盤における物質移動解析により、<b>割れ目の密度・長さ</b>などが解析結果に影響を与えることを確認。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>物質移動現象の把握。</li> <li>物質移動特性調査技術の整備。</li> <li>実際の割れ目の性状を考慮した亀裂ネットワークモデルの構築手法の整備。</li> <li>不連続構造周辺の物質移動特性モデルの構築手法の整備。</li> <li>地下水水質の変化及びコロイド・有機物・微生物等、物質移動の影響因子の評価。</li> </ul> <p>青字:H26までに実施予定</p>	<p>物質移動に関する調査研究</p> <p>●割れ目の透水性と地質学的特徴との関係</p> <p>割れ目データセット・解析ケース別破過曲線</p> <p>ブロックスケールの岩モデルとパーティクルトラッキング解析結果の一例</p>

# 必須の課題(案)とその概要

## 【A2:地質環境の短期的変動・回復挙動の理解】

	これまでの成果	達成目標	概要
地下水抑制技術(ウォータータイトグラウト技術)の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>研究所において、割れ目が多く、高湧水量・高水圧等の地質環境における<b>湧水抑制対策技術(グラウト技術)</b>を開発・実証。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>プレグラウトとポストグラウトの組合せにより、処分環境においても、坑道への湧水量が人工的にコントロール可能な<b>ウォータータイトグラウト施工技術</b>の実証。</li> </ul>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>プレグラウト</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>ポストグラウト</p> </div> </div> <div style="text-align: right; margin-top: 10px;"> <p>グラウト浸透理論に基づく湧水量抑制割合の検討例</p> </div>

## 【A3:地質環境の長期的変動・回復挙動の理解】

	これまでの成果	達成目標	概要
地質環境の長期変動解析技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>研究所周辺における将来の地下水流動の予測解析により、<b>隆起/侵食や断層活動による地形の変化、気候変動による地表水の涵養量の変化が、将来の地下水流動に影響を与える可能性がある</b>ことを確認。</li> <li>水位・水圧の長期モニタリングにより、<b>地震に起因し地下水圧が一時的に変化すること、これらの変化は地震による広域の歪みの変化に起因することを確認。</b></li> <li>「地質環境の長期安定性に関する研究で開発された<b>地下で遭遇した断層の活動性の調査技術</b>」を活用し、<b>研究坑道に遭遇した断層の年代測定手法の適用性を確認。</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震時の地下水流動、地球化学変動事例の<b>提示。</b></li> <li>断層などの<b>天然現象の地質環境への影響範囲の提示。</b></li> <li>過去の地質環境の変遷の<b>解明に基づき、将来変遷の予測手法の提示。</b></li> <li>施設建設・操業・閉鎖に伴う<b>中長期変化と地質環境の長期変遷の統合解析技術の提示。</b></li> </ul> <p>青字:H26までに実施予定</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p><b>地質環境</b></p> <p>過去から現在までの天然FEP(気候変動、隆起・削割・沈降、断層活動、地下水流動、水-岩石-微生物相互作用など)の整理、シナリオ解析</p> <p>周辺モニタリング孔における中長期的変化の観察</p> <p>URLにおける中長期的変化の観察</p> <p>各々の天然現象に対するアナログ元素の移動状態の把握</p> </div> <div style="width: 45%; text-align: right;"> <p><b>天然バリア</b></p> <p>将来の人為FEP+天然FEPのシナリオ解析</p> <p>施設建設・操業・閉鎖に関わる人為FEPの整理</p> <p>建設影響領域の形成と回復</p> <p>観察、シナリオに基づく長期変遷の予測解析</p> <p>人工材料の変質</p> <p>アナログ元素の移動予測</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">* :天然現象や地質学的情報に関しては、「地質環境の長期安定性に関する研究」などの他の研究成果を活用</p>

# 必須の課題とその意義①

## 【研究開発課題と意義】

### ◆ 深部地下水の起源・滞留時間の理解

- 降水の多さに起因して地下水が豊富という日本特有の地質環境において、深部地下水の洗い出しの現象を加味しても、地下水が長期滞留する環境(地層処分における安定した地質環境)の存在を例示することが期待できる。
- 過去から現在までの隆起・侵食や気候変動などの天然現象に伴う涵養量、動水勾配の変化といった、天然現象が地下水流動に与える影響に関わる評価手法(地質環境の長期変遷解析技術の開発)を確立することが可能となる。

### ◆ 長期モニタリング技術の開発

- 涵養量の多さや複雑な水理地質構造(例えば、低透水性の断層で囲まれたコンパートメント構造)のため、坑道周辺の地下水が浅部の地下水に急速に置換しやすい日本特有の地質環境において、地下施設建設から閉鎖後までの長期間にわたり適用可能なモニタリング技術(観測レイアウト、装置、測定頻度など)を確立することが可能となる。
- 諸外国でも技術の実証は処分事業の進展に応じて段階的に進められているため、埋め戻される地下構造物に対する長期モニタリングの実例は少なく、機器性能の実証や知見の蓄積が必要な課題である。

### ◆ 地質環境機能回復評価に関わる調査評価技術の開発

- 坑道周辺の地下水が浅部の地下水に急速に置換しやすい日本特有の地質環境であり、堆積岩と比較して化学的緩衝能力が小さい結晶質岩において、施設閉鎖方法決定のための地下水流動・地球化学解析技術や長期力学挙動解析手法・グラウト材やプラグ設置による周辺岩盤への影響の計測・解析手法を確立することが可能となる。
- 既往の安全評価シナリオでは、施設閉鎖後の地質環境は初期状態に戻ると仮定しているが、施設閉鎖方法によっては戻らない可能性もあるため、初期状態に戻りやすい施設閉鎖方法を策定するための地下水流動・地球化学解析技術、戻らない場合の対処方法を検討し、地質環境の変化過程や変化量の幅を把握することが必要となる
- 地質環境の初期状態を大きく変化させてしまうような実証的試験は先行的に処分地以外で行うべき課題である。

# 必須の課題とその意義②

## 【研究開発課題と意義】

### ◆低透水性領域での亀裂ネットワークモデル化手法の開発

- 安定大陸の結晶質岩と比較して、高透水性の割れ目が多く、かつ割れ目充填物や変質を伴うなど、様々な特性を有する割れ目が混在する日本の地質環境においても、地下水流動や物質移動を適切に評価し、安全裕度の評価の信頼性を向上することが可能となる。
- 本課題は、「地質環境機能回復評価に関わる調査評価技術の開発」、「地下水抑制技術の開発」などにも共通する課題であるとともに、割れ目の形成過程を加味することにより、将来変遷の予測も可能となる。

### ◆地下水抑制技術(ウォータータイトグラウト技術)

- 断層や割れ目が多く、それに起因して坑道内への湧水量も多い日本の地質環境においても、緩衝材のパイピングや浸食による人工バリアシステムの性能低下を防ぐために、処分坑道や処分孔への湧水量に厳しい設計要件が課される可能性があり、これに対応が可能な地下水抑制技術が確立できる。
- 地質環境の初期状態を大きく変化させてしまうような実証的試験は先行的に処分地以外で行うべき課題である。

### ◆地質環境の長期変遷解析技術の開発

- 日本学術会議の指摘(天然現象の不確実性への適切な配慮など)に対し、変動帯に位置するために地震・断層活動、隆起/侵食が顕著であり、それによる地質環境変化の不確実性が大きい日本においても、地下水流動、岩盤挙動、物質移動などの過去の変遷の調査手法、及び過去の変遷に基づき、これらの将来の長期変動を評価する手法を確立して変動幅を予測し、地層処分の安全性を現実的に評価していくことが可能となる。

# 超深地層研究所計画における今後の必須の課題

## A2. 地質環境の短期変動・回復挙動の理解

- A2-1 長期モニタリング技術の開発
- A2-2 地質環境機能回復評価に関する調査評価技術の開発
- A2-4 地下水抑制技術(ウォータータイトグラウト技術)の開発
- A2-3 低透水領域での亀裂ネットワークモデル化手法の開発

## A3. 地質環境の長期変動/ 回復挙動の理解

- A3-1 地質環境の長期変遷解析技術の開発

## A1. 地質環境の初期状態の理解

- A1-1 深部地下水の起源・滞留時間の理解のための研究開発

地下施設建設前  
～建設中～閉鎖  
に至る地質環境  
の長期変遷の調  
査・解析・評価手  
法として統合

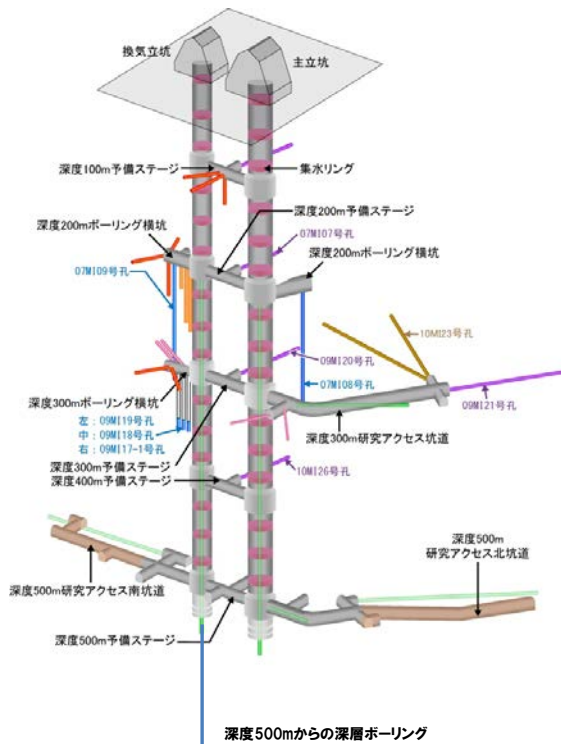
## 想定される主な成果:

処分事業の精密調査段階から操業・閉鎖段階に実施主体が必要とする地質環境調査技術・工学技術と安全規制が必要な確認評価手法を提示

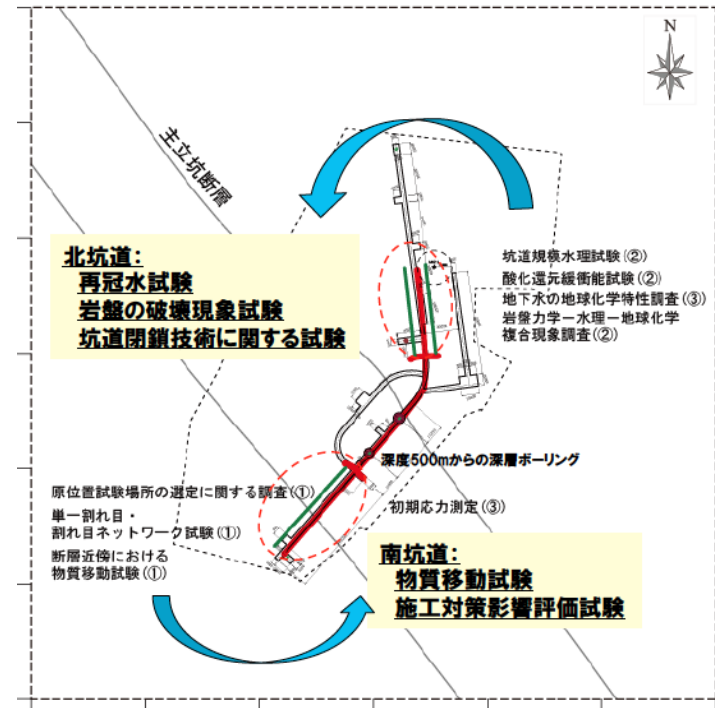
- 地上・地下坑道から地質環境特性を評価するための物理探査, ボーリング調査, 解析技術と調査計画に関わる留意点(新たな調査結果に基づく更新)
- 施設操業・閉鎖に関わるモニタリング事例とその手法, 要素技術, 留意点
- 坑道閉鎖に関わる要素技術, 地質環境特性の回復を踏まえた閉鎖手順・施工管理技術, 閉鎖後の水理・化学・力学特性に関わる解析技術
- 地質環境特性の中長期変化(定常状態化プロセス)に関わる予測解析技術, 断層活動等の影響を含めた地質環境特性の長期変遷解析技術

# 今後の研究の展開(案)

- 超深地層研究所計画における第3段階までの必須の課題(案)に対する成果を効率的に統合するため、深度500mまでの研究坑道における調査試験に資源を集中して展開。



研究坑道・ボーリング孔レイアウト(鳥瞰図)



深度500mレベル坑道の平面展開図(含む新旧比較)

---

# 参考資料

## 超深地層研究所計画の 今後の必須の課題(案)の概要

# 研究開発の意義

## — 日本特有の深部地質環境 —

● **変動帯に位置・若い(高温)岩体** ● **温暖湿潤な気候(降水量多い)** ● **島嶼**

- 地震・断層活動, 隆起・侵食, 火山活動(天然現象)が顕著。
- 熱水性の変質鉱物を伴う割れ目が多く存在。
- 地質構造が複雑。
- 地下水の循環が早い(希薄な水質)。
- 地下水位が高いことから, 軟弱な岩盤の出現や大量出水の可能性有。

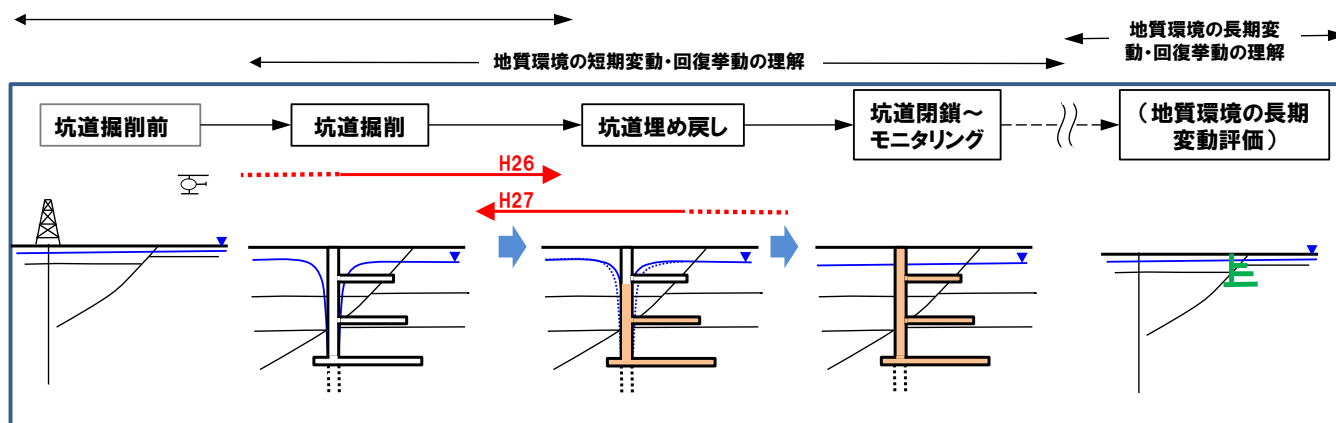
要素	日本:瑞浪URL	スウェーデン:HRL	備考
岩体 隆起速度 地温勾配	<ul style="list-style-type: none"> <li>・7000万年前に形成</li> <li>・7000万年前から現在までの平均隆起速度は 約0.15mm/年</li> <li>・地温勾配:1.7℃/100m (日本の平均地温勾配:3℃/100m)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・18億年前に形成</li> <li>・2億年前から現在までの平均隆起速度は 約0.02mm/年</li> <li>・地温勾配:1.5℃/100m</li> </ul>	山崎他(2012) Soderlund(2008) Stanfors et al.(1999)
断層/割れ目頻度	約11本/m(深度300m坑道壁面)	2.5~6.5本/m	坑道内の調査結果
岩盤の透水係数	透水係数: $10^{-6}$ ~ $10^{-8}$ m/s	透水係数: $10^{-8}$ ~ $10^{-10}$ m/s	Mazurek(2001)
変質の程度	全体の約30%	約10%	Yoshida et al.(2009)
割れ目充填物	約30%の割れ目に粘土充填物(未固結)がある	粘土充填物はほとんど無い	
断層の認識性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・100~200mの被覆層が存在</li> <li>・断層規模が被覆層と花崗岩で異なる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・被覆層は存在しない</li> <li>・露頭調査, トレンチ調査などにより把握可能</li> </ul>	
地下水の流動 地下水の化学的特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・年間降雨量:1500mm</li> <li>・年間平均気温:13℃</li> <li>・塩分濃度:低(200-400mg/L)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・年間降雨量:675mm</li> <li>・年間平均気温:6.5℃</li> <li>・地下水の塩分濃度:高(800-14300mg/L)</li> </ul>	馬原他(1999) SKB(1999) Iwatsuki et al.(2005) Stanfors et al.(1999)



# 研究開発の意義

## — 深地層の研究施設を利用することの意義 —

- 地下深部に大規模な地下施設を建設し、長期間の操業の後、閉鎖する地層処分において、信頼性の高い安全性の評価を行うためには、その段階ごとに地質環境特性を理解しておくことが不可欠。地下施設周辺の地質環境特性の初期状態から掘削に伴う変化を段階的に把握するための技術を実証している研究サイトは、日本では瑞浪(結晶質岩)と幌延(堆積岩)のみである。
- 実際の処分場では実施することが難しい課題(e.g. 地質環境の初期状態を乱してしまうような、実際の処分場では極力避ける必要がある実証的課題)について、研究開発を行うことが可能である。
- 規制指針等の策定のニーズに対応して、日本特有の天然現象や地質環境に対して必要な判断(規制)方法や評価指標の策定に資する研究開発(e.g. 地下で遭遇した断層の活動性評価)を先行的に行うことができる。
- 日本学術会議の回答(2012)を発端に議論が進められている急務の課題(e.g. 地層の安定性に関する研究など)に資する研究開発を行うことができる。
- 国内(釜石原位置試験)や国外(スウェーデン、カナダ)でのこれまでの研究成果を踏まえ、結晶質岩での評価の重要因子とそのバリエーションを統合的に考慮した研究開発を行うことで、瑞浪以外の地域の結晶質岩への適用の際の考え方を提示可能である。



# A1. 地質環境の初期状態の理解

## ① 深部地下水の起源・滞留時間の理解

---

### 必要性

- 地層処分を行う上で、地下に長期的に安定な地質環境が存在することを示すことは、長期の安全性を示すためにも必要である。
- 降水の多さに起因して地下への涵養量が多いという日本特有の地質環境において、それによる深部地下水の洗い出しの現象を加味しても、地下水が長期滞留する環境が存在すること、それらに影響する断層などの構造を検証することが、日本において地層処分における安定した地質環境の存在を例示するためにも必須の課題。
- 深部地下水の起源・滞留時間を理解することにより、「地質環境の長期変遷解析技術の開発」における過去から現在までの隆起・侵食量や気候変動などの天然現象に依存する涵養量、動水勾配の変化を合わせ、天然現象が地下水流動に与える影響に関わる評価手法を確立することが可能となる。

# A1. 地質環境の初期状態の理解

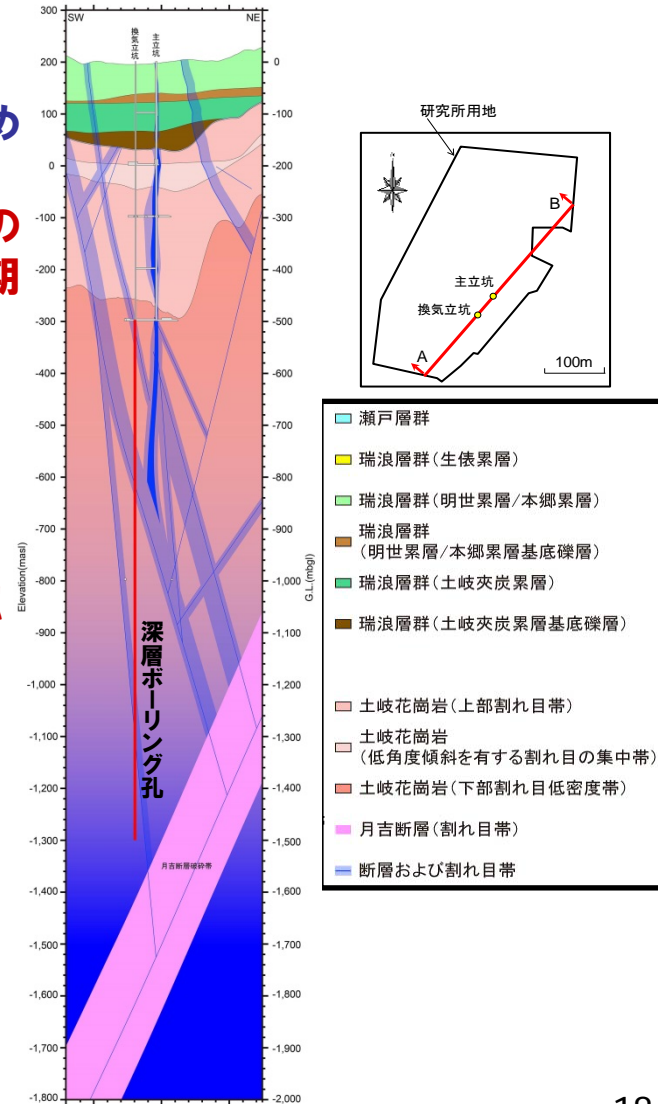
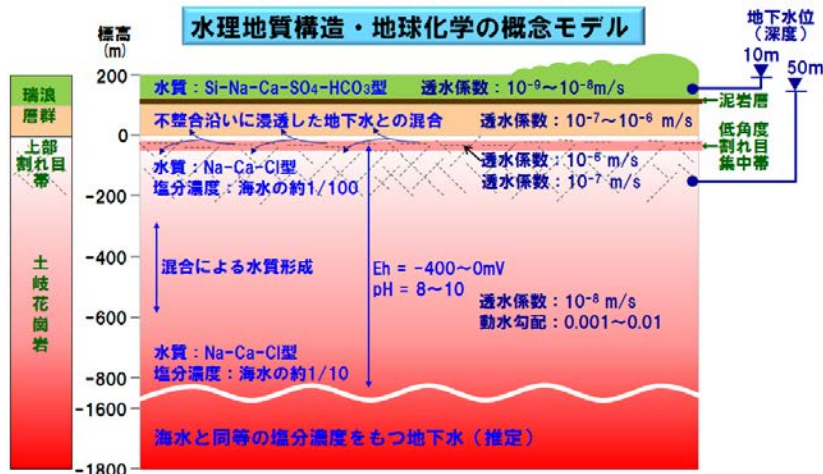
## ① 深部地下水の起源・滞留時間の理解

### 達成目標(青字:第2期,赤字:第3期~)

- 第2段階調査により第1段階モデルを確認し,それらを把握するために必要な調査技術や各段階で得られる情報(事例)を取りまとめる
- **深度500mからの深層ボーリング調査により,深度1,500m以深の地下水(塩水)の分布と起源を把握し,地下深部の地下水の長期滞留状態を例示する**

### 実施概要

- 深度500m南北坑道での坑道掘削,ボーリング調査に基づく第1段階モデル(断層分布,コンパートメント構造,水圧・水質分布,初期応力など)の確認
- **深度500mからの深層ボーリング調査による第1段階モデルの確認**



## A2. 地質環境の短期変動・回復挙動の理解

### ①長期モニタリング技術の開発

#### 必要性

- 地下施設の建設から埋戻し後までの長期間におけるモニタリング機能の維持や坑道閉鎖後の地質環境のバリア性能の保持の観点から、観測機器の耐久性向上や遠隔モニタリング技術、観測機器のメンテナンスといったハード・ソフト両面の開発・整備が必要である。
- 諸外国でも技術の実証は処分事業の進展に応じて段階的に進められているため、埋め戻される地下構造物に対する長期モニタリングの実例は少なく、知見の蓄積が必要な課題である。
- 瑞浪での知見から、高透水性の割れ目の多い結晶質岩では、地下施設を建設した場合の湧水量が多いこと、また、日本では涵養量が多いため、操業期間中に坑道周辺の地下水が相対的に浅部の地下水に急速に置換する(地下水自体の入れ替わりが早い)ことから、地質環境の初期状態が諸外国より大きく変化する可能性が示唆される。さらに、このような地下水流動の変化は、透水性の異なる水理地質構造(例えば、低透水性の断層で囲まれたコンパートメント構造など)の影響を受けること、日本では、諸外国より、このような構造が、より多いことが示唆される。そのため、モニタリングの事例を蓄積し、このような日本特有の地質環境条件において適用可能なモニタリング技術(観測レイアウト、装置、測定頻度など)を整備しておくことが必須である。
- 地質環境機能回復評価を確立するために必要なモニタリングデータが提示可能となる。

## A2. 地質環境の短期変動・回復挙動の理解

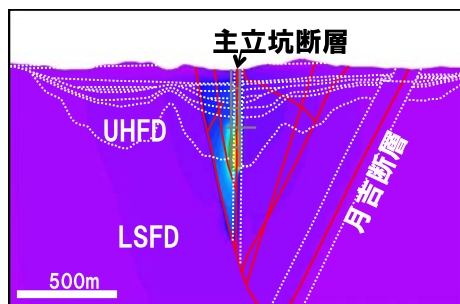
### ①長期モニタリング技術の開発

#### 達成目標

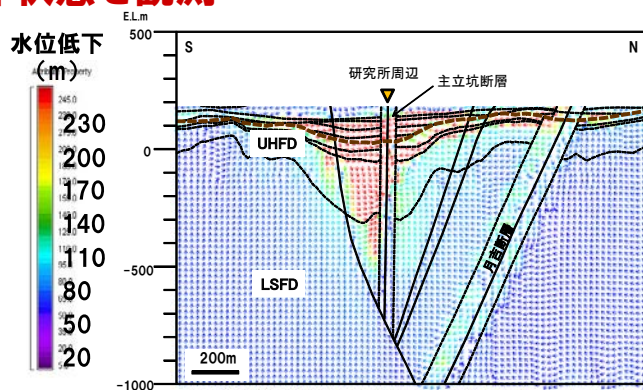
- 周辺モニタリング孔のレイアウト方法, 適切な観測装置, 観測頻度の提示
- 坑道内の水圧/水質/力学モニタリング装置の埋設・維持方法, 遠隔モニタリング技術の提示
- モニタリング資機材の長期機能・材質状態の例示

#### 実施概要

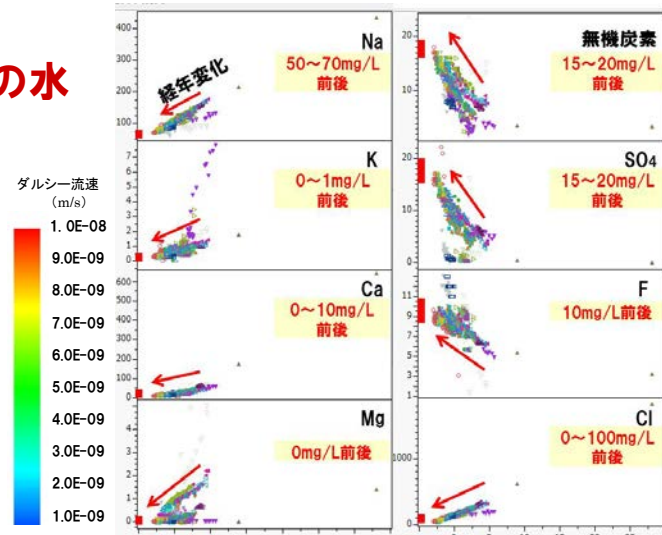
- 水圧・水質観測と非定常地下水流動解析による水圧変化予測の検証, 主成分分析による水質変化予測の検証
- 深度500m坑道に設置したモニタリング装置の計測部を上位の坑道, もしくは地上に移設し, 遠隔モニタリング技術を検証
- 深度500mからの深層ボーリングの掘削, 施設閉鎖前・中・後の水圧, 高塩分地下水の上昇状態を観測



長期作業時の定常状態の水位低下予測



長期作業時の定常状態の流速分布



長期作業時の坑道周辺の水質予測

## A2. 地質環境の短期変動・回復挙動の理解

### ②地質環境機能回復評価に関わる調査評価技術の開発

#### 必要性

- 地層処分に関わる既往の安全評価シナリオでは、処分場閉鎖後の地質環境が施設建設前の初期状態に戻ると仮定しているが、閉鎖方法によっては元に回復しない可能性もある。そのため、人工材料の影響を含め、初期状態に戻すための施設閉鎖方法を決定するための地下水流動・地球化学解析技術、戻らない場合の対処方法を検討するために地質環境の変化過程や変化量の幅を把握することが必要である。また、施設閉鎖方法を確立して行く上で、力学的に弱部となる割れ目などによる掘削影響を考慮した力学的長期挙動の解析手法や、グラウト材やプラグ設置による周辺岩盤への影響の計測・解析手法が必要になる。
- 諸外国でも技術の実証は処分事業の進展に応じて段階的に進められているため、処分場閉鎖後の地質環境が施設建設前の初期状態に戻るという仮定を実際に例証・検証した実例は諸外国を含めて少なく、施設閉鎖方法決定のための地下水流動・地球化学解析技術や力学的長期挙動解析手法・グラウト材やプラグ設置による周辺岩盤への影響の計測・解析手法は知見の蓄積が必要な課題である。
- 瑞浪での知見からも、安定大陸における結晶質岩と比較して高透水性の割れ目が多く、かつ割れ目充填物や変質を伴うなど、様々な特性を有する割れ目が混在すること、涵養量が多いため、操業期間中に坑道周辺の地下水が相対的に浅部の地下水に急速に置換する(地下水自体の入れ替わりが早い)こと、このような地下水流動の変化は、透水性の異なる水理地質構造(例えば、断層で囲まれたコンパートメント構造など)の影響を受けることが示唆される。そのため、このような日本特有の地質環境条件において適用可能な施設閉鎖方法決定のための地下水流動・地球化学解析技術や力学的長期挙動解析手法・グラウト材やプラグ設置による周辺岩盤への影響の計測・解析手法を整備しておくことが必須である。また、この問題は、堆積岩と比較して緩衝能力が小さいと考えられる結晶質岩ではより重要な検討課題である。
- 実際の処分場の初期状態を大きく変化させてしまうような実証的試験は先行的にサイト以外で行うべき課題である。

# A2. 地質環境の短期変動・回復挙動の理解

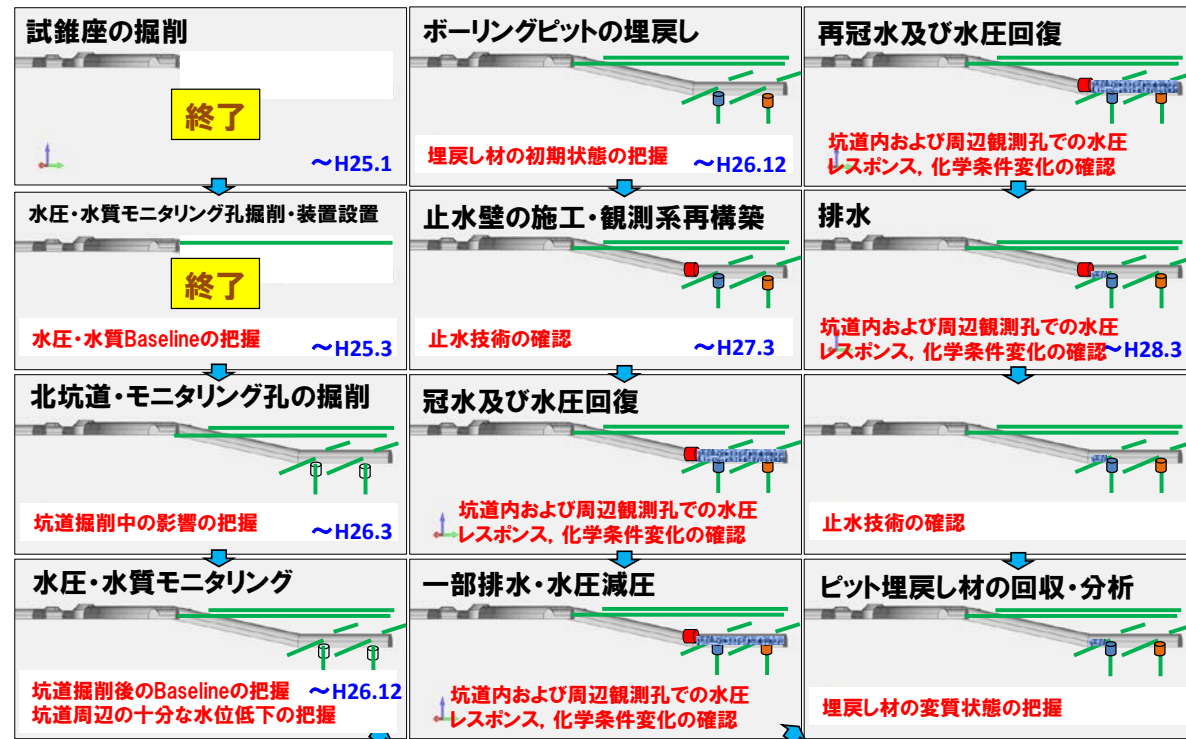
## ②地質環境機能回復評価に関わる調査評価技術の開発

### 達成目標

- 再冠水試験の準備
- 坑道周辺の地質環境調査技術, 坑道閉鎖手順の提示
- 坑道閉鎖(埋戻し)後の地質環境特性(坑道周辺の力学・水理・化学特性)の変遷などの現象把握とそれに関わる解析技術の提示
- 空洞安定性に関わる熱応力の作用を含めた岩盤の破壊現象とその長期挙動のメカニズム解明
- 坑道閉鎖などに係わる工学技術の提示

### 実施概要(その1)

- 再冠水試験, 坑道の閉鎖(埋戻し)
- 非定常地下水流動解析による水圧回復の予測と水圧観測に基づく検証
- 熱力学解析による水質変化の予測と水質観測に基づく検証
- 等価連続体・不連続体モデルに基づく掘削影響解析と検証

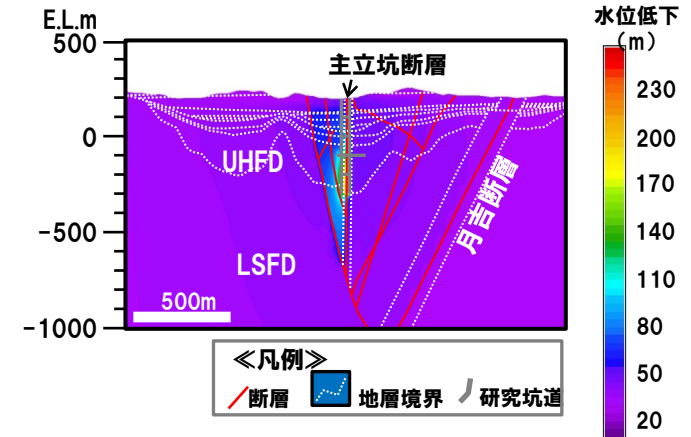


# A2. 地質環境の短期変動・回復挙動の理解

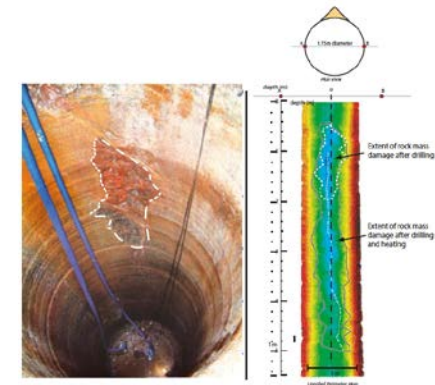
## ②地質環境機能回復評価に関わる調査評価技術の開発

### 実施概要(その2)

- 短期的に全坑道を閉鎖(埋戻し・再冠水)する, 時間をかけて下位の坑道から順番に閉鎖するなど, 坑道閉鎖条件毎の水圧・水質回復状態を予測解析
- コンパートメント構造や割れ目媒体の特性を踏まえて, 施設閉鎖時の留意点を整理
- 大口径ボーリングあるいはピラー掘削に伴う岩盤の破壊現象を原位置計測および数値解析により評価
- 坑道閉鎖に伴う, プラグや充填材の設計・施工やそれらの中長期的安定性を評価
- 再冠水試験で設置するプラグについて周辺岩盤の挙動を含めて計測。また, プラグ周辺の掘削影響領域を修復するためのグラウトの適用性評価, ならびに, グラウト材料と周辺岩盤との相互作用を評価
- 施設埋め戻し時の留意点や方法を整理



長期操作時の定常状態の水位低下予測



SKB HRLにおけるピラーの安定性に関する原位置試験



## A2. 地質環境の短期変動・回復挙動の理解

### ③低透水性領域での亀裂ネットワークモデル化手法の開発

---

#### 必要性

- 地層処分の観点から重要な低透水性領域における地下水流動や物質移動を適切に評価するための、高透水性から低透水性までの割れ目を対象とした調査技術や、実際の割れ目の性状を考慮した亀裂ネットワークモデル化手法が必要である。この亀裂ネットワークモデルは、性能評価に含まれる裕度の評価に必要である。
- 日本の結晶質岩では、安定大陸における結晶質岩と比較して高透水性の割れ目が多く、かつ割れ目充填物や変質を伴うなど、様々な特性を有する割れ目が混在し、低透水性岩盤における物質移動の評価に大きく影響する。そのため、低透水性岩盤における原位置試験に基づき、亀裂ネットワークモデルが日本の結晶質岩に特徴的な複雑な割れ目における地下水流動や物質移動を適切に評価できるのかを確認することが必須である。
- 本課題で得られる現在の時間断面での割れ目のモデル化に、「地質環境の長期変遷解析技術の開発」において得られる割れ目の形成過程を加味することにより、将来変遷の予測にも資することが可能となる。
- 「地質環境機能回復評価に関わる調査評価技術の開発」、「地下水抑制技術の開発」には、日本特有の地質環境に適用可能な亀裂ネットワークモデルが必要である。

# A2. 地質環境の短期変動・回復挙動の理解

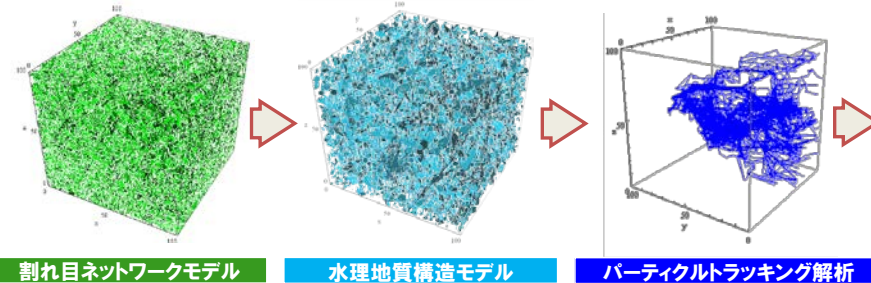
## ③ 低透水性領域での亀裂ネットワークモデル化手法の開発

### 達成目標

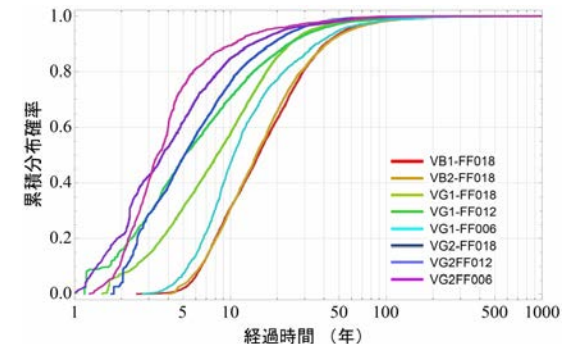
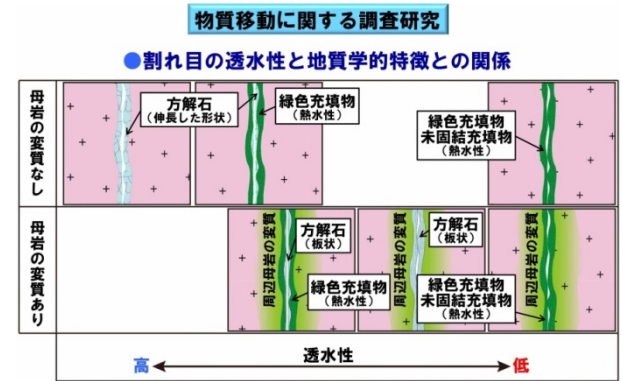
- 物質移動現象の把握
- 物質移動特性調査技術(高透水性から低透水性までの割れ目を対象した調査手法)の構築
- 実際の割れ目の性状を考慮した亀裂ネットワークモデルの構築手法の整備
- 不連続構造周辺の物質移動特性モデルの構築手法の整備
- 地下水水質の変化及びコロイド・有機物・微生物等, 物質移動の影響因子の評価。

### 実施概要

- 低透水性領域での割れ目調査手法の構築および亀裂ネットワークモデルの開発。
- 割れ目周辺の物質移動特性モデルの改良。
- 物質移動試験結果による亀裂ネットワークモデルの検証。



ブロックスケールの各モデルとパーティクルトラッキング解析結果の一例



割れ目データセット・解析ケース別破過曲線

## A2. 地質環境の短期変動・回復挙動の理解

### ④地下水抑制技術

#### 必要性

- 「地質環境機能回復評価に関わる調査評価技術の開発」の課題に関連して、地下施設建設に起因する地下水環境(地下水の水圧・水質)の変化を最小化する観点から、坑道掘削時に認められる湧水の抑制対策技術(グラウト技術)の高度化が必要である。特に、低透水性領域に設置されると考えられる処分孔近傍では、緩衝材のパイピングや浸食による人工バリアシステムの性能低下を防ぐために、設計要件としてより厳しい湧水抑制が求められることが予想される。そのため、低透水性領域において湧水量を限りなく少なくするための湧水抑制対策技術の開発と原位置での実証が必要となる。
- 日本では断層や割れ目が多く、それに起因して湧水量も多いことから、諸外国よりも高湧水の環境から、低湧水の環境まで混在する岩盤にも対応可能な、湧水量を限りなく少なくするための技術(ウォータータイトグラウト技術)の開発が必須である。
- 実際の処分場の初期状態を大きく変化させてしまうような実証的試験は先行的にサイト以外で行うべき課題である。

## A2. 地質環境の短期変動・回復挙動の理解

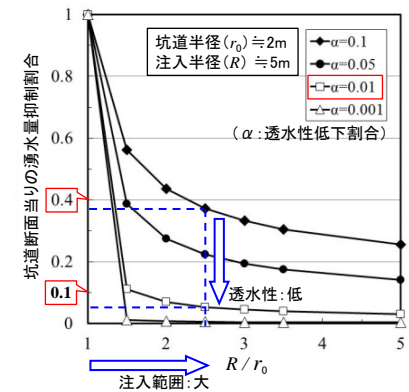
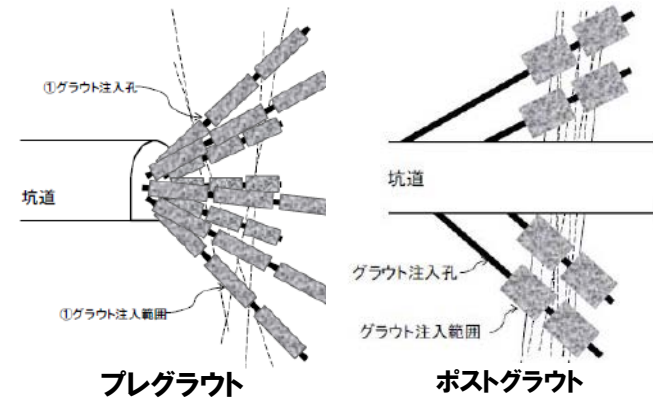
### ④地下水抑制技術

#### 達成目標

- プレグラウトとポストグラウトの組合せにより、処分環境においても、坑道への湧水量が人工的にコントロール可能なウォータータイトグラウト施工技術の実証。
- グラウト効果および地質環境への影響の時間的な変化の理解。

#### 実施概要

- 粘性流体(グラウト材)注入に伴う亀裂の開閉挙動の調査。
- グラウト浸透理論に基づく解析による湧水抑制対策及びグラウト流出抵抗性解析。
- エスポHRLにおける原位置試験結果との比較。
- 処分施設の各々の場所に求められると想定される湧水低減量に応じた湧水抑制対策技術を提示。



グラウト浸透理論に基づく湧水量抑制割合の検討例

## A3. 地質環境の長期変動・回復挙動の理解

### ①地質環境の長期変遷解析技術の開発

---

#### 必要性

- 地層処分システムの安全評価では、施設の建設・操業・閉鎖に伴う短期変動（人為的な影響と閉鎖後の回復過程）と天然現象による地質環境の長期変動を統合して、将来の地質環境の変動幅を予測し、地層処分の安全性を現実的に評価していくことが必要である。
- 日本は変動帯に位置するため、諸外国と比較し地震・断層活動、隆起/侵食が顕著であり、天然現象（断層活動、隆起/侵食、気候/海水準変動）による地質環境変化に伴う不確実性が大きい。このような日本特有の天然現象による地質環境（地下水流動、岩盤挙動、物質移動など）の過去の変遷の調査手法、及び過去の変遷に基づき将来の地質環境の長期変動を評価する手法を確立することが必須である。
- 日本学術会議において、震災の経験から、天然現象の不確実性への適切な配慮などが指摘されており、処分事業を進める上でも急務の課題である。

# A3. 地質環境の長期変動・回復挙動の理解

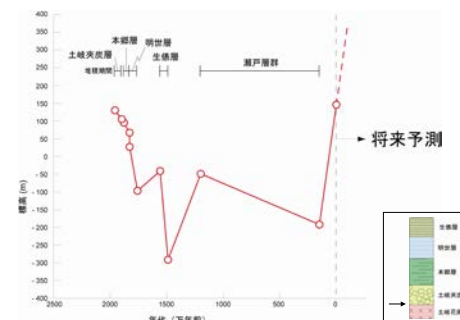
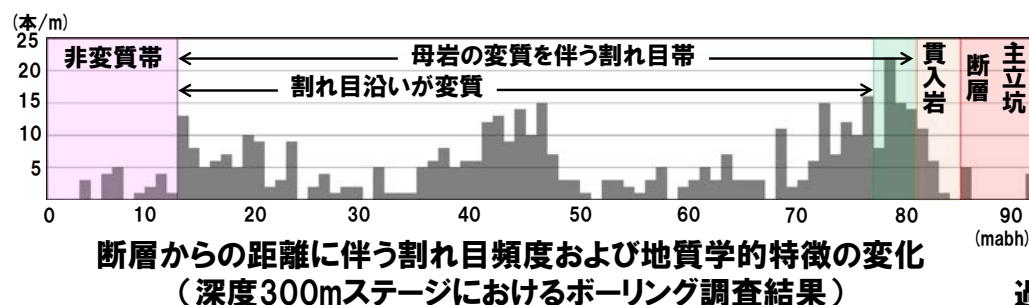
## ①地質環境の長期変遷解析技術の開発

### 達成目標

- 地震時の地下水流動, 地球化学変動事例の提示
- 断層活動などの天然現象の地質環境への影響範囲の提示
- 過去の地質環境の変遷の解明に基づき, 将来変遷の予測手法の提示
- 施設建設・操業・閉鎖に伴う中長期変化と地質環境の長期変遷の統合解析技術の提示

### 実施概要(その1)

- 深度500mステージの先行ボーリングおよび深部地質環境を調査する深度500mからの深層ボーリング調査により, 割れ目の出現頻度等に基づき, 断層活動などの影響範囲を検討
- 地表および各坑道の観測孔における地震時のモニタリングデータを蓄積
- 深度500mからの深層ボーリング調査により月吉断層前後の深部塩水の起源を同定
- 割れ目充填物の年代など, 地質体に記録されている過去の地質環境に関する情報を取得し, 過去から現在までの地質環境の変遷を明らかにし, 将来予測手法を提示



# A3. 地質環境の長期変動・回復挙動の理解

## ①地質環境の長期変遷解析技術の開発

### 実施概要(その2)

- 過去の天然FEPに対するアナログ元素移動の“感度”を分析
- URLでの観察経験に基づき建設・操業・閉鎖に関わる人為FEPを整理
- 過去の地質現象の整理結果に基づき人為FEPと天然FEPの相互関連、関連の強弱を整理
- 将来のFEPシナリオに基づき地質環境の予測
- 予測された地質環境下でのアナログ元素の移動予測、過去との比較・相対化  
(天然現象や地質学的情報に関しては、「地質環境の長期安定性に関する研究」などの他の研究成果を一部活用)

