

放射性廃棄物の処分に向けた研究

令和2年7月8日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター
地層科学研究部 研究成果統合化グループ
竹内 竜史

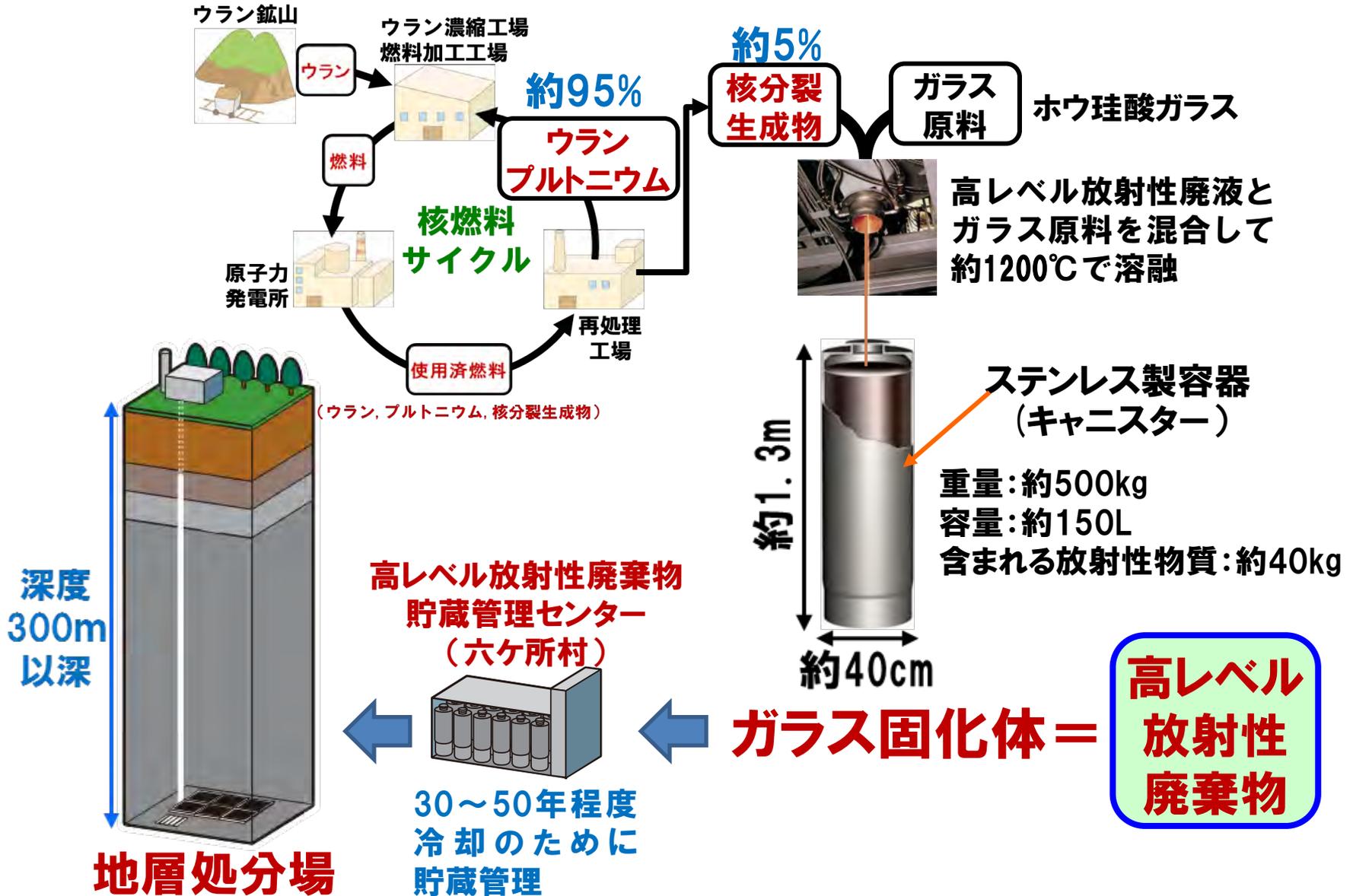
原子力災害環境影響評価論II

日程	時限	テーマ	担当	
7/6	8:40- 9:55	福島第1原子力発電所事故後のJAEAの取り組み	川瀬 啓一	福島研究開発部門 企画調整室
	10:10- 11:25	放射性セシウムの吸脱着メカニズム	本田 充紀	原子力科学研究部門 物質科学研究センター
	12:15- 13:30	高度化する無人モニタリング技術	佐々木 美雪	福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター
	13:45- 15:00	放射能マップはこうしてできあがる	阿部 智久	福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター
7/7	8:40- 9:55	福島長期環境動態研究	新里 忠史	福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター
	10:10- 11:25	環境中の放射性核種分析方法の研究	藤原 健壮	福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター
	12:15- 13:30	原子力災害対応ロボットと楢葉遠隔技術開発センター	山田 大地	福島研究開発部門 福島研究開発拠点 楢葉遠隔技術開発センター
	13:45- 15:00	燃料デブリ取り出しに向けた研究	佐藤 一憲	福島研究開発部門 福島研究開発拠点 楢葉遠隔技術開発センター
7/8	8:40- 9:55	事故に由来する廃棄物の管理と放射性核種の汚染ふるまい	駒 義和	福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター
	10:10- 11:25	放射性廃棄物の処分へ向けた研究	竹内 竜史	核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター

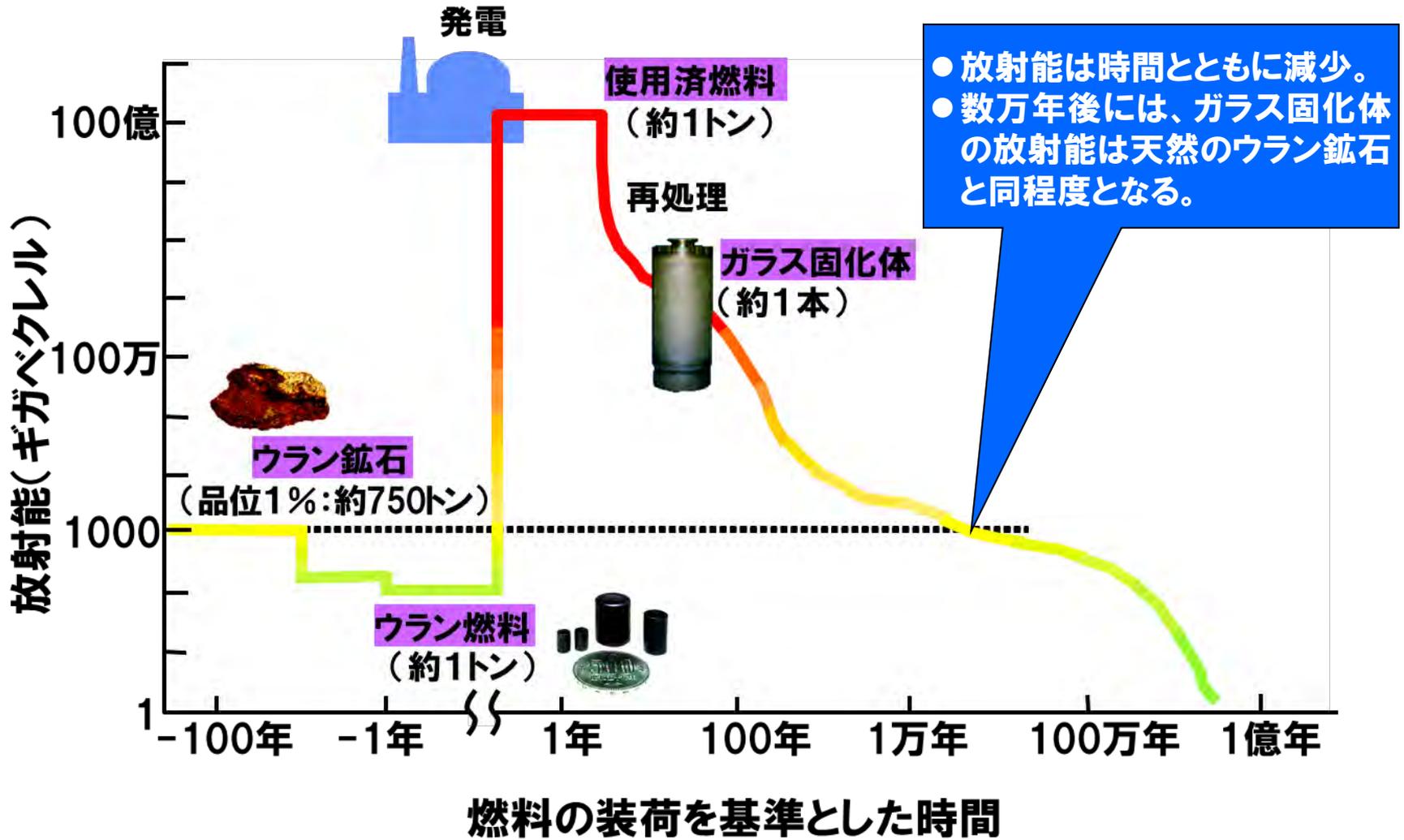
本日の内容

1. 高レベル放射性廃棄物の地層処分とは？
2. 広域地下水流動研究
3. 超深地層研究所計画
4. さいごに

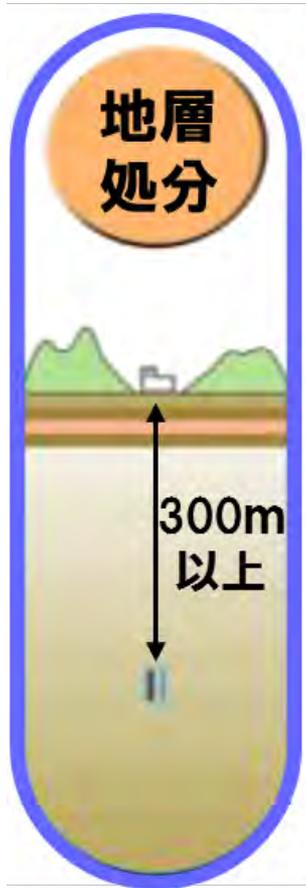
高レベル放射性廃棄物の地層処分



高レベル放射性廃棄物の放射能の変化



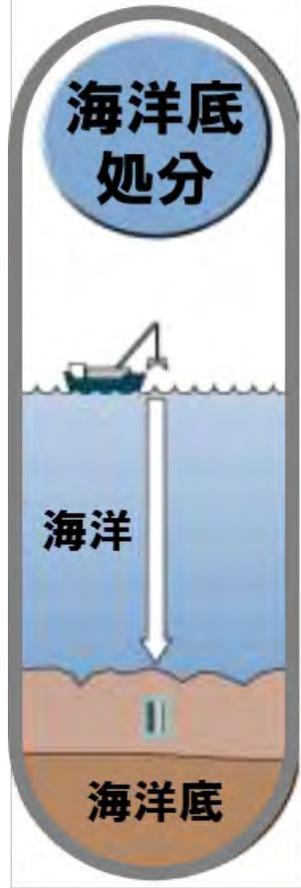
地層処分が選択された理由



地層が持っている物質を閉じ込める性質を利用



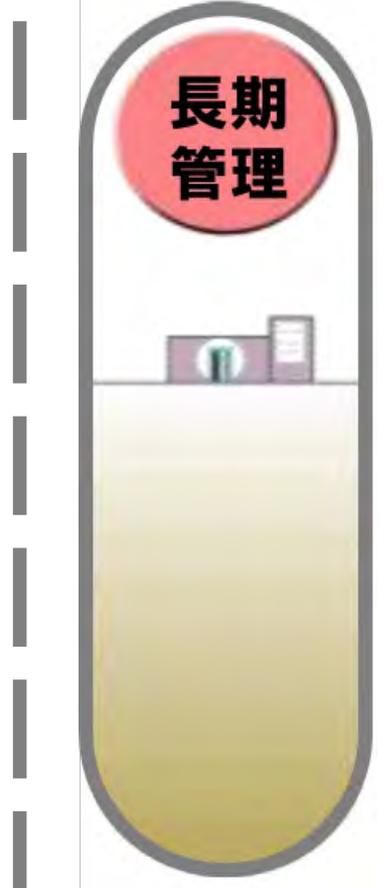
発射技術等の信頼性に問題



ロンドン条約により禁止

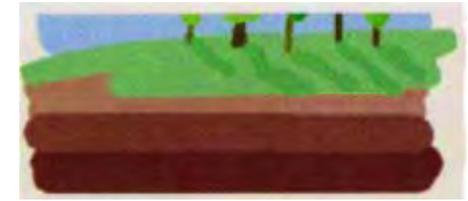


南極条約により禁止



人間による恒久的な管理が困難

地表と地下の比較



地表 (人間による管理)

地下 (地層処分)

火山, 断層, 地震, 隆起・浸食, 台風, 津波, 地滑り, 隕石 など

自然現象



火山, 断層, (地震), 隆起・浸食

破壊, 爆発, 火事, 公害, 事故, 戦争, テロ など

人の行為



掘削 (資源)

空気: 台風 数秒程度
水 : 河川 数分程度

物質の動き
(100mの移動時間)



空気 : なし
地下水: 数万年程度

文字: 数千年程度
建物: 数千年程度

残されて
いるもの



化石: 数億年程度
地層: 数十億年程度

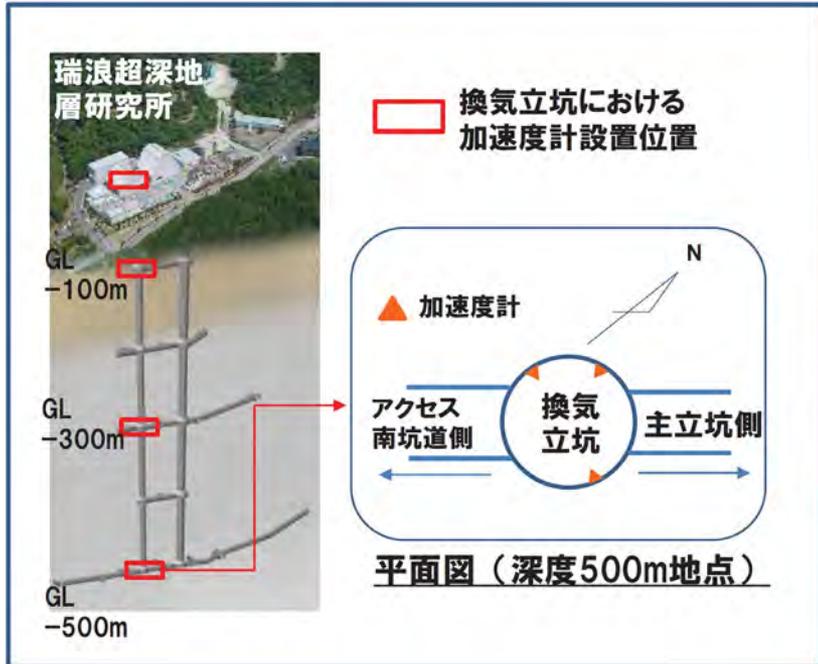
・地下での様々な変化は地質学的時間スケールで起こり, 地表に比べると極めて「緩慢」

地震に伴う地下の揺れ

瑞浪超深地層研究所の、

- ・ 地表
- ・ 地下100m
- ・ 地下300m
- ・ 地下500m

において、地震に伴う揺れ（加速度）を観測

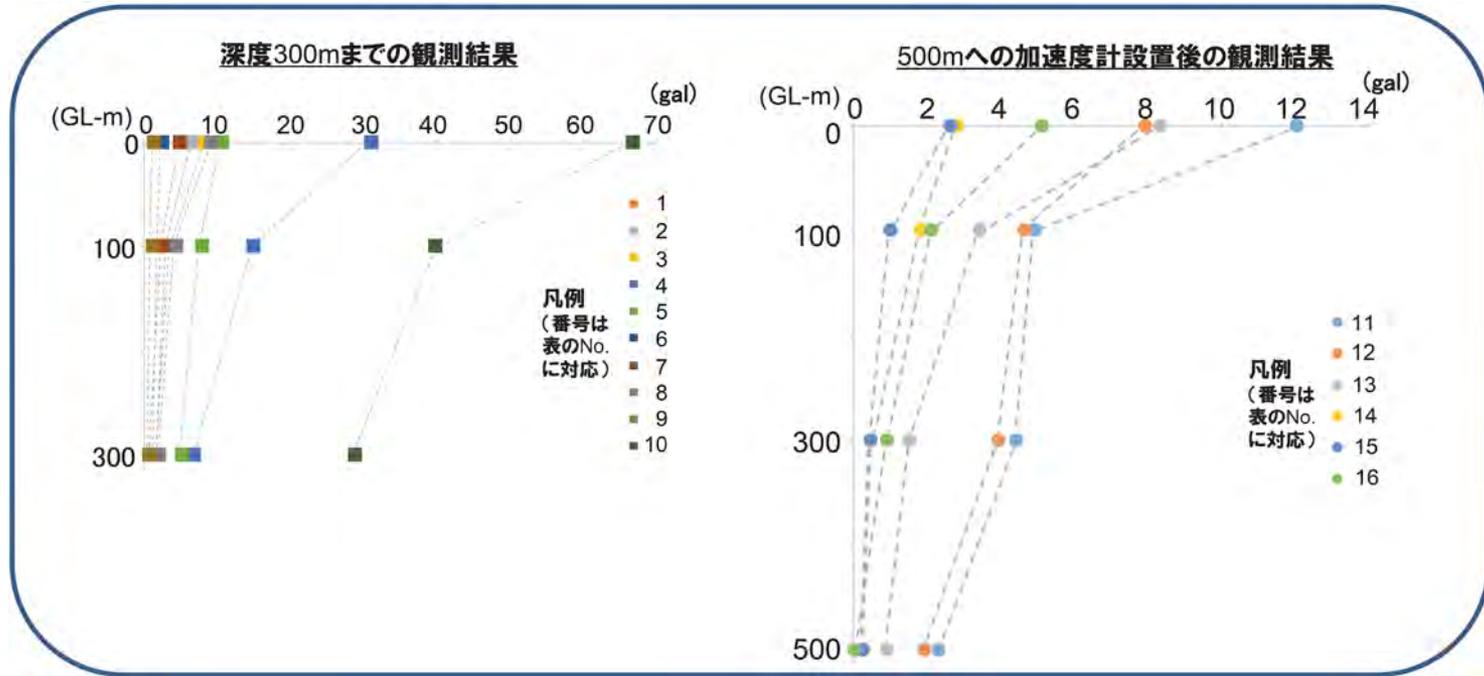


地震発生時の加速度

No.	発生日時	震源	瑞浪市の震度	最大加速度【gal】とその方向			
				地表	GL-100m 接続部	GL-300m 接続部	GL-500m 接続部
1	2009.5.25 20:26	静岡県西部 深さ26km, M 4.7	2	5.6 EW	3.1 EW	1.8 NS	
2	2009.7.14 03:57	岐阜県美濃東部 深さ50km, M 3.5	2	6.5 EW	3.2 EW	1.9 NS	
3	2009.7.27 09:44	愛知県西部 深さ41km, M 4.0	2	8.2 NS	3.1 NS	1.9 EW	
4	2009.8.11 05:07	駿河湾 深さ23km, M 6.5	3	30.8 EW	14.7 NS	6.6 EW	
5	2011.3.11 14:46	三陸沖 深さ24km, M 9.0	3	10.4 NS	7.7 NS	5.0 UD	
6	2011.3.11 15:15	茨城県沖 深さ43km, M 7.6	2	2.3 EW	2.0 NS	1.3 UD	
7	2011.3.12 03:59	長野県北部 深さ8km, M 6.7	2	4.8 NS	2.4 NS	1.0 NS	
8	2011.3.15 22:31	静岡県東部 深さ14km, M 6.4	2	9.1 EW	4.2 NS	1.8 NS	
9	2011.4.11 17:16	福島県浜通り 深さ6km, M 7.0	1	1.3 NS	1.0 NS	0.58 NS	
10	2011.12.14 13:01	岐阜県美濃東部 深さ49km, M 5.1	3	66.6 EW	39.6 EW	28.6 EW	
11	2012.5.5 18:56	愛知県西部 深さ45km, M 4.3	2	12.0 EW	4.9 EW	4.4 NS	2.3 NS
12	2013.2.6 13:42	愛知県西部 深さ48km, M 4.1	1	7.9 EW	4.6 EW	3.9 NS	1.9 EW
13	2013.8.3 09:56	遠州灘 深さ34km, M 4.9	2	8.3 NS	3.4 NS	1.5 EW	0.88 NS
14	2014.3.14 02:06	伊予灘 深さ78km, M 6.2	1	2.8 NS	1.8 EW	0.46 NS	0.24 NS
15	2014.9.16 12:28	茨城県南部 深さ47km, M 5.6	2	2.6 NS	0.97 EW	0.43 NS	0.21 NS
16	2014.11.22 22:08	長野県北部 深さ5km, M 6.7	2	5.1 NS	2.1 NS	0.88 UD	0.0022 EW

*UD:上下方向

地表と地下の違い(地震に伴う揺れの例)

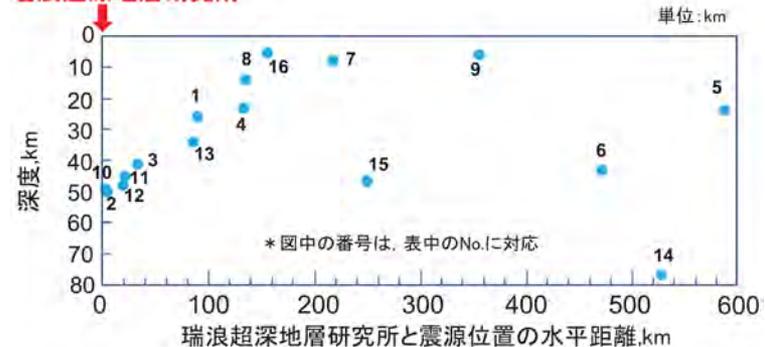


観測深度と最大加速度との関係

震源からの距離によらず、地震の揺れは地下に向かうほど小さい

- 深度300mで地表の1/3程度
- 深度500mで地表の1/4程度

瑞浪超深地層研究所



観測位置と震源位置との関係

地層処分の安全確保の仕組み

火山、活断層、侵食・・・

日本の地質環境

地下水の存在

人間と廃棄体との接近

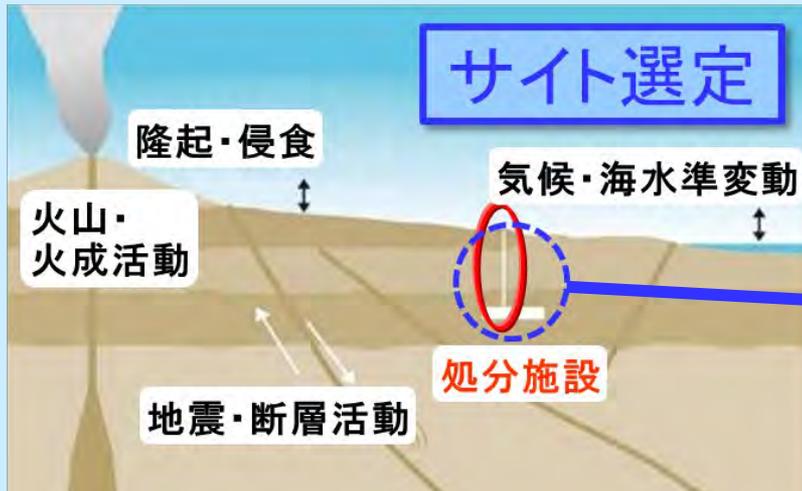
影響の可能性

地下水による放射性物質の運搬

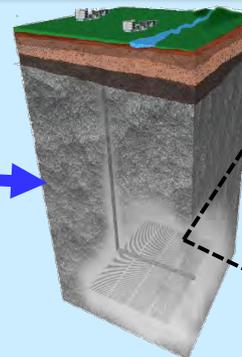
対策

火山や断層等を避けることで
地層処分にとって安定な場所を選択

適切な多重バリアシステムを構築



工学的対策

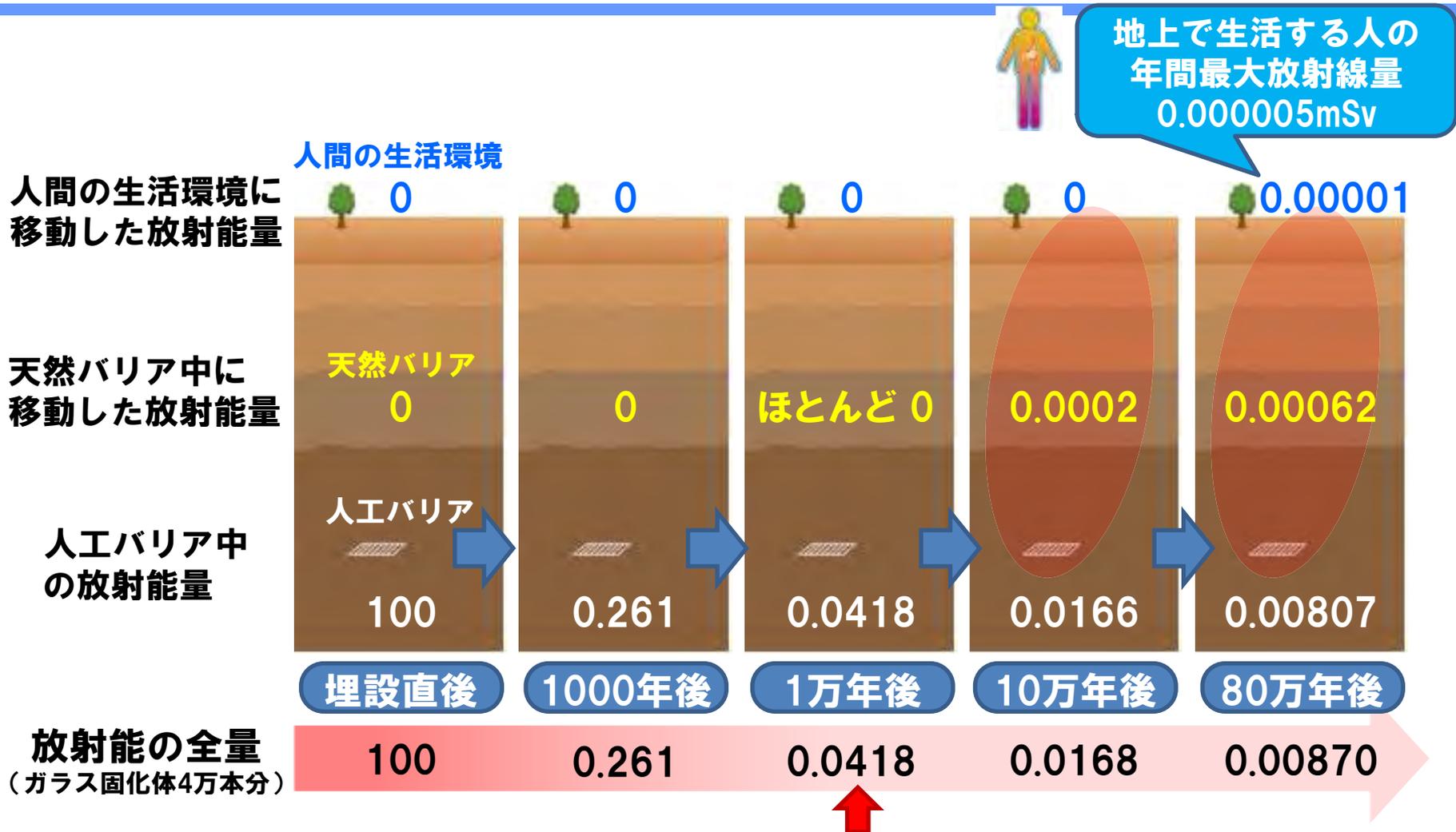


安全性の確認

安全評価

処分場の長期安全性を予測的に評価

地層処分の安全評価結果の例



人工バリア内で放射能の99.96%を閉じ込める

※数値はガラス固化体4万本の埋設直後の放射能の全量を100(%)とした比率
 ※『第2次取りまとめ』における安全評価結果(レファレンスケース)

諸外国の地層処分事業の現状

国名	処分サイト	岩種	処分施設の深さ	対象廃棄物
日本 	未定	未定	300m 以深	ガラス固化体
フィンランド 	エウラヨキ自治体オルキルオト ○2016年12月:処分場建設を開始 ○処分開始予定:2020年代	結晶質岩	約400~ 450m	使用済燃料
スウェーデン 	エストハンマル自治体フォルスマルク ○2011年3月:立地・建設許可申請 ○処分開始予定:2029年頃	結晶質岩	約500m	使用済燃料
フランス 	ビュール地下研究所の近傍 ○2010年:地下施設展開区域の決定 ○処分開始予定:2030年頃	粘土層	約500m	ガラス固化体

参考文献:「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について(2019年度版)」経済産業省資源エネルギー庁

その他、スイス、ドイツ、イギリス、アメリカ、カナダ等で、地層処分の実施に向けたサイトの選定作業や研究開発が進められています。

地層処分特有の研究ニーズ

地層処分は時空間的に特殊

時間

安全評価の期間は、処分場を**100年**程度の操業後、10万年～**数十万年オーダー**

- ◆土木工学などの既存工学技術で対象とする期間は、通常**100年**程度まで
- ◆工学技術の対象より長い期間を扱う地質学では**100万年**が最小単位

空間

対象は地下**1,000m**程度まで

- ◆土木工学などで対象とする深度は、通常、**50m**程度まで
- ◆地質学では**1,000m**は最小単位
- ◆山岳トンネルや鉱山では地下数百mが対象
 - 地層処分では、安全評価や施設設計のため、詳細な地質環境情報を必要とする

- ◆地層処分以外のニーズではカバーされていない
 - = これまでに調査研究されていない、工学的に検討されていない
- ◆既存技術を含め有効性について検証が必要

原子力機構における地層処分技術開発

東濃地科学センター

- **瑞浪超深地層研究所**
 - ・地質環境特性に関する研究
(結晶質岩 [硬岩]、淡水系地下水)
- **土岐地球年代学研究所**
 - ・地質環境の長期安定性に関する研究



(イメージ図)

わが国の地質の分布 (海拔-500m)

結晶質岩 (花崗岩など) と
堆積岩 (泥岩など) に
大きく分けられる

深地層の
研究施設

幌延深地層研究センター

- ・堆積岩 [軟岩]
- ・塩水系地下水



(イメージ図)

核燃料サイクル工学研究所 (茨城県東海村)



地層処分基盤研究施設
(ENTRY:コールド施設)



地層処分放射化学研究施設
(QUARITY:ホット施設)

※ Engineering scale Test and Research Facility
※ Quantitative Assessment Radionuclide Migration Experimental Facility

本日の内容

1. 高レベル放射性廃棄物の地層処分とは？
- 2. 広域地下水流動研究**
3. 超深地層研究所計画
4. さいごに

広域地下水流動研究と超深地層研究所計画

広域地下水流動研究 主として、概要調査の技術基盤

●Regional Scale: 文献調査ステージ

文献情報により対象とする地下水流動系の範囲を把握

★広い領域のモデル化手法, 評価を行う領域 (Local Scale)
の範囲・境界条件の設定手法の構築

●Local Scale: 空中・地上, 試錐孔を利用した調査ステージ

対象とする地下水流動系を含む領域の地質環境特性を把握

★対象とする領域の地質環境特性を把握するための体系的な
調査・評価技術の構築と適用性に関する知見

超深地層研究所計画 概要調査・精密調査の技術基盤

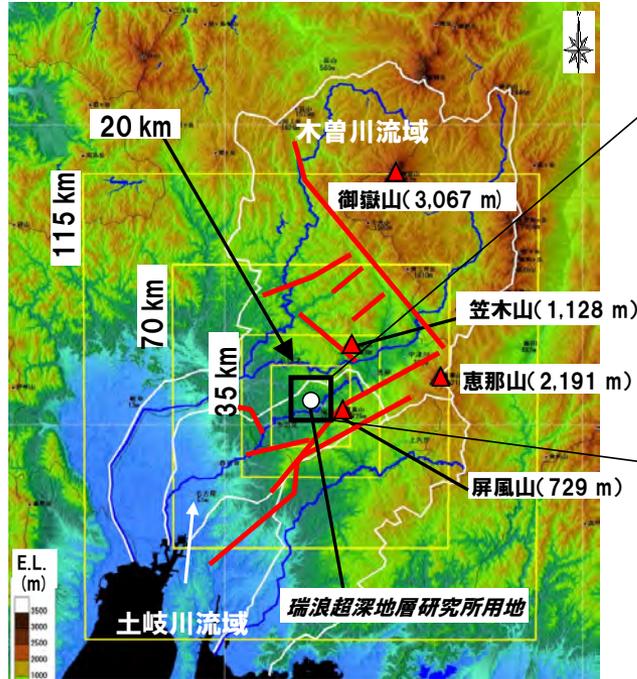
●Site, Block Scale: 地上, 試錐孔を利用した調査ステージ

研究施設周辺の地質環境特性を, より詳細に把握

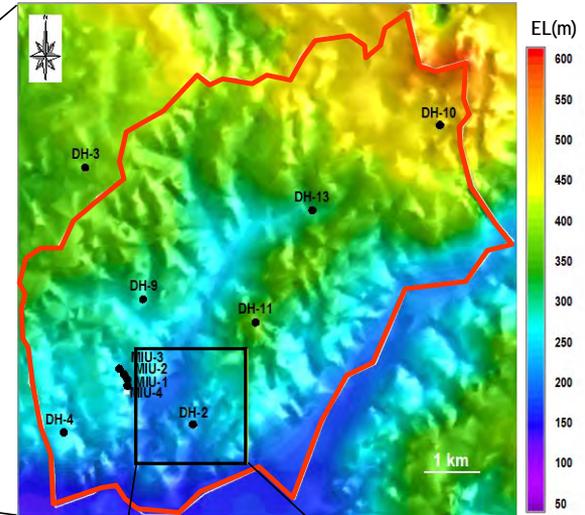
★施設周辺の地質環境の特性を把握するための体系的な調査
評価技術の構築とその適用性に関する知見

広域地下水流動研究(調査研究領域の設定)

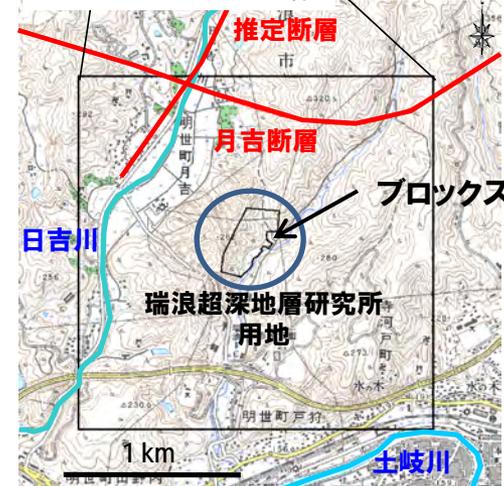
リージョナルスケール領域



ローカルスケール領域



サイトスケール領域



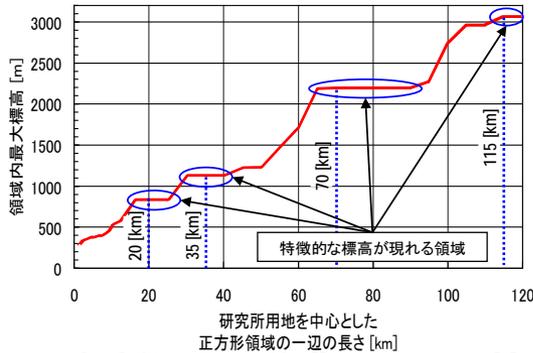
国土地理院発行1:25,000地形図「瑞浪」を使用

- リージョナルスケール(数10km四方): 深部地下水流動系(涵養域から流出域)の抽出
- ローカルスケール(約10km四方): 深部地下水流動系を包含した領域における地下水流動特性の把握
- サイトスケール(約2km四方): 研究所用地を中心として主要な地質構造の分布を考慮した領域における地下水流動特性の把握
- ブロックスケール(約数十m~数百m四方): 研究坑道近傍の詳細な地下水流動特性の把握

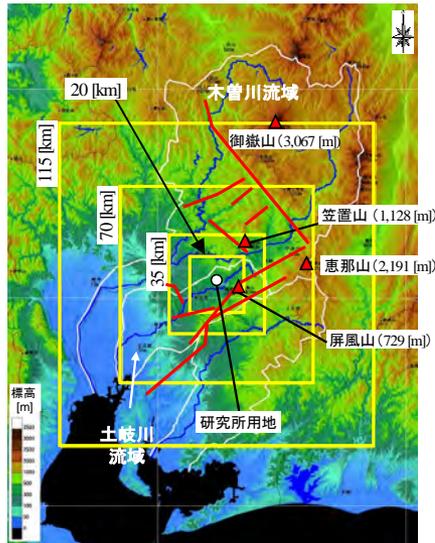
ブロックスケール領域

広域地下水流動研究(リージョナルスケール)

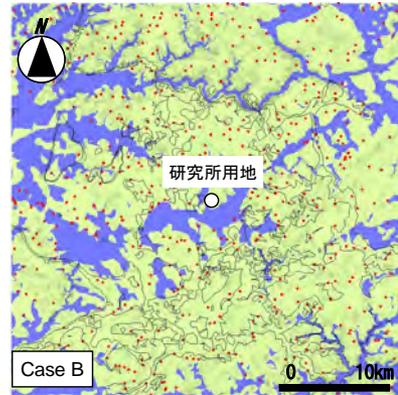
【目的】 モデル構築領域及びその境界条件を適切に設定するために、注目する地点を通過する深部地下水の涵養域から流出域までを包含する深部地下水流動系を抽出すること



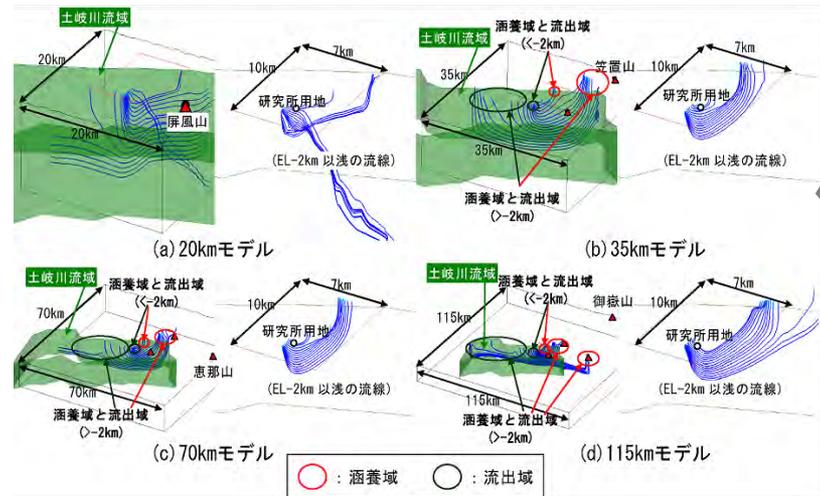
✓地形解析による後背地地形の抽出



✓水理地質構造モデルの構築
✓地下水流動解析



✓ 広範囲の地下水位分布の推定
✓ 地下水位分布を用いた解析結果の妥当性確認

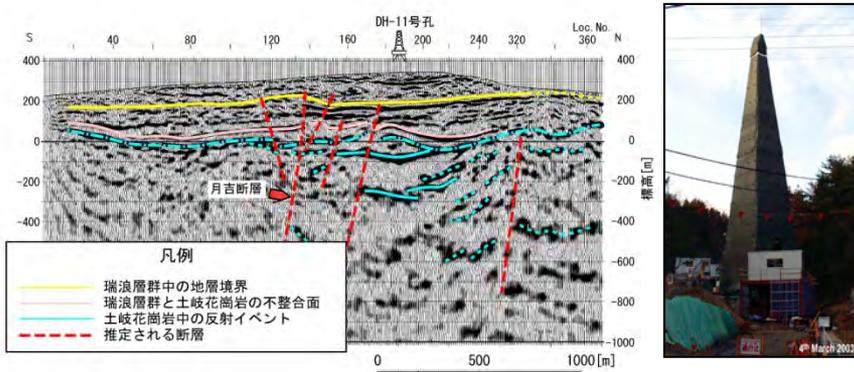


✓ 解析結果に基づく深部地下水流動系の抽出

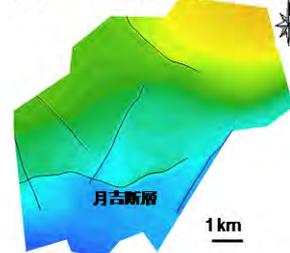
広域地下水流動研究(ローカルスケール)

【目的】

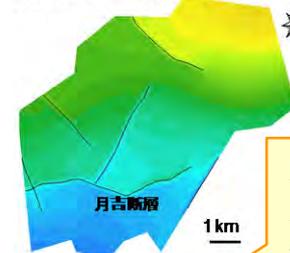
深部地下水流動系を包含する領域における地下水流動特性を評価するための調査・解析・評価技術を構築すること



(a) 標高-300m水平断面

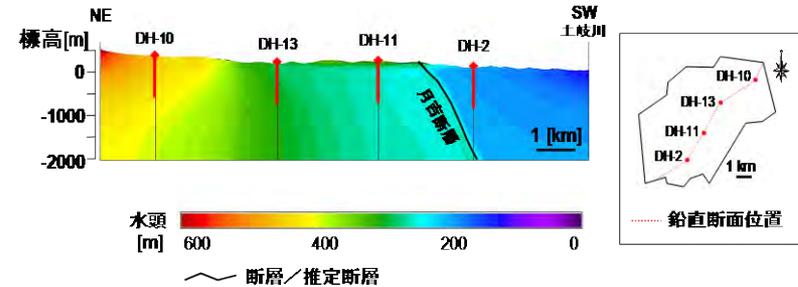


(b) 標高-500m水平断面



不連続構造の水理特性の不確実性に着目した感度解析

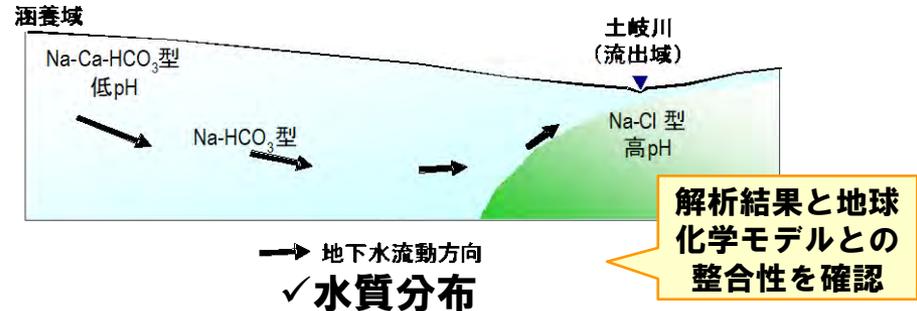
(c) ボーリング孔を結ぶ鉛直断面



地下水流動特性を把握するための考え方

- ① 空中写真判読や物理探査により、大規模な不連続構造などの存在や分布を確認
- ② 地下水流動解析から推定された地下水の主流動方向に沿った地点でのボーリング調査により、地下水流動や水質分布を把握
- ③ 地下水流動に影響を与える不連続構造の把握のためには、地下水の主流動方向にほぼ直交する断層の水理特性を優先的に調査

✓地下水流動解析結果



深度1,000m対応水理試験装置の開発

試験装置の仕様

適用温度:0-70°C

適用深度:G.L.-1,500m

適用孔径:Φ100-140mm

試験方法:間隙水圧測定

パルス試験

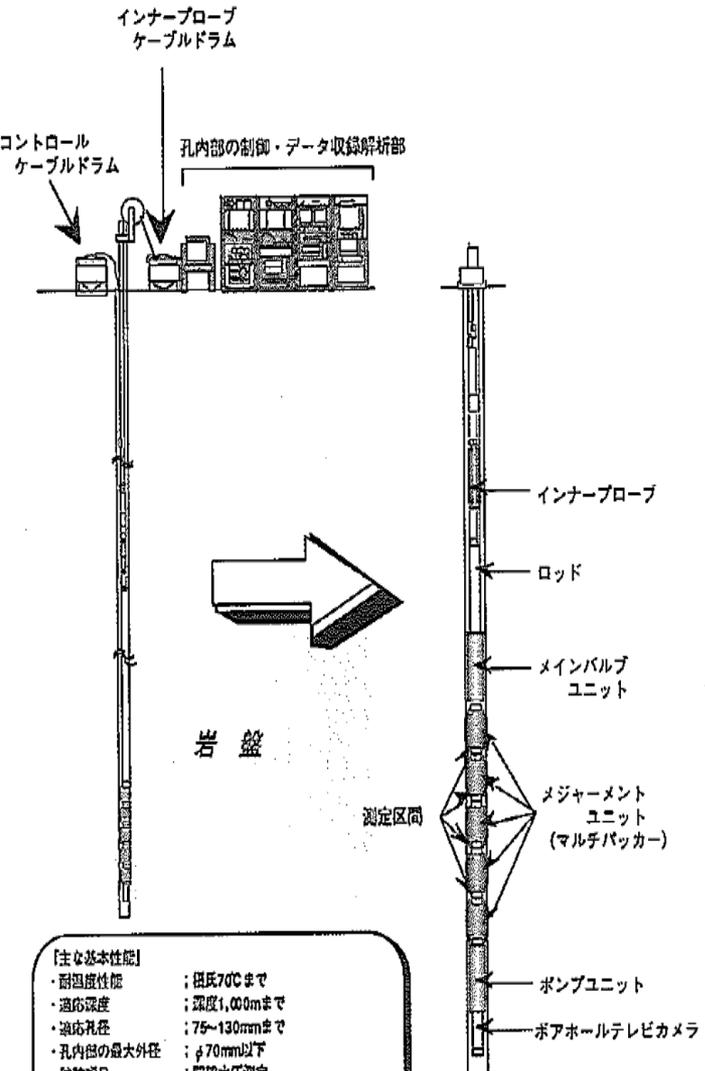
スラグ試験

揚水試験

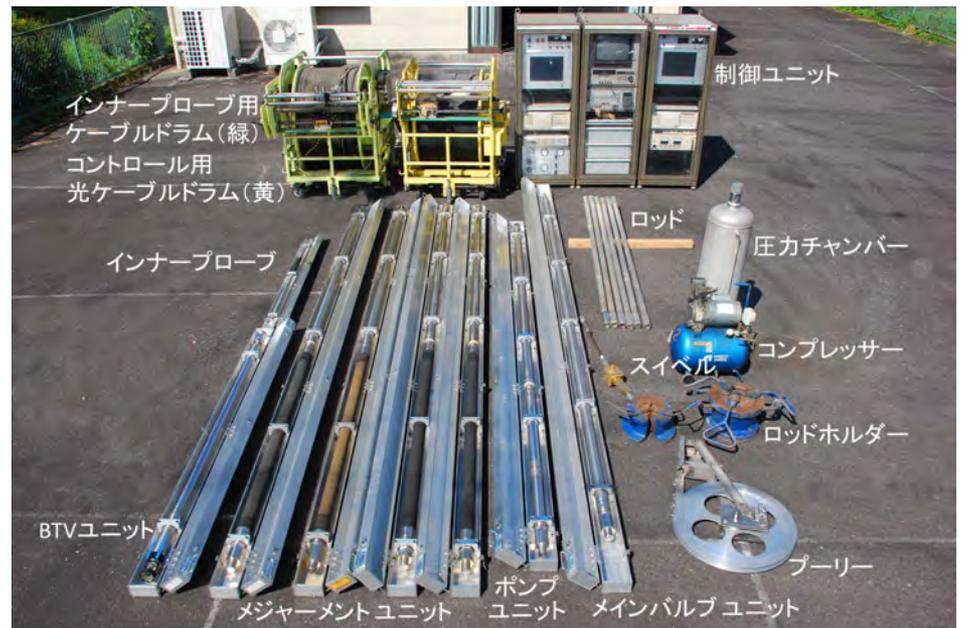
透水係数の測定範囲:10⁻⁵-10⁻¹²m/sec

その他機能:試験区間および上下区間での水圧/温度測定が可能

シングルパッカー/ダブルパッカーでの試験が可能



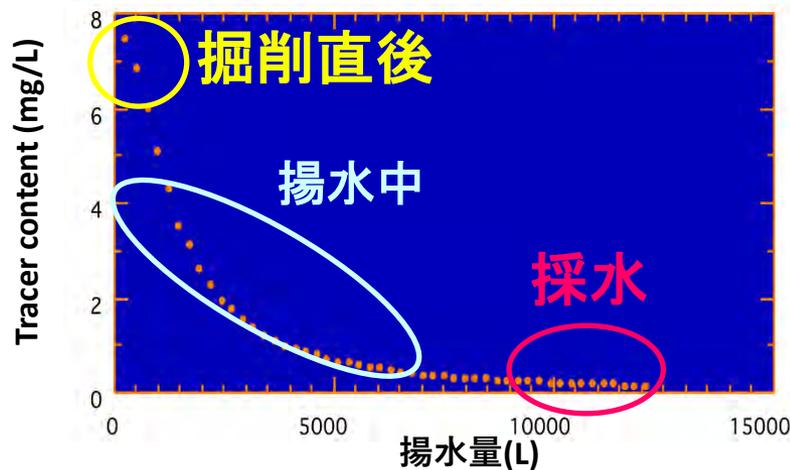
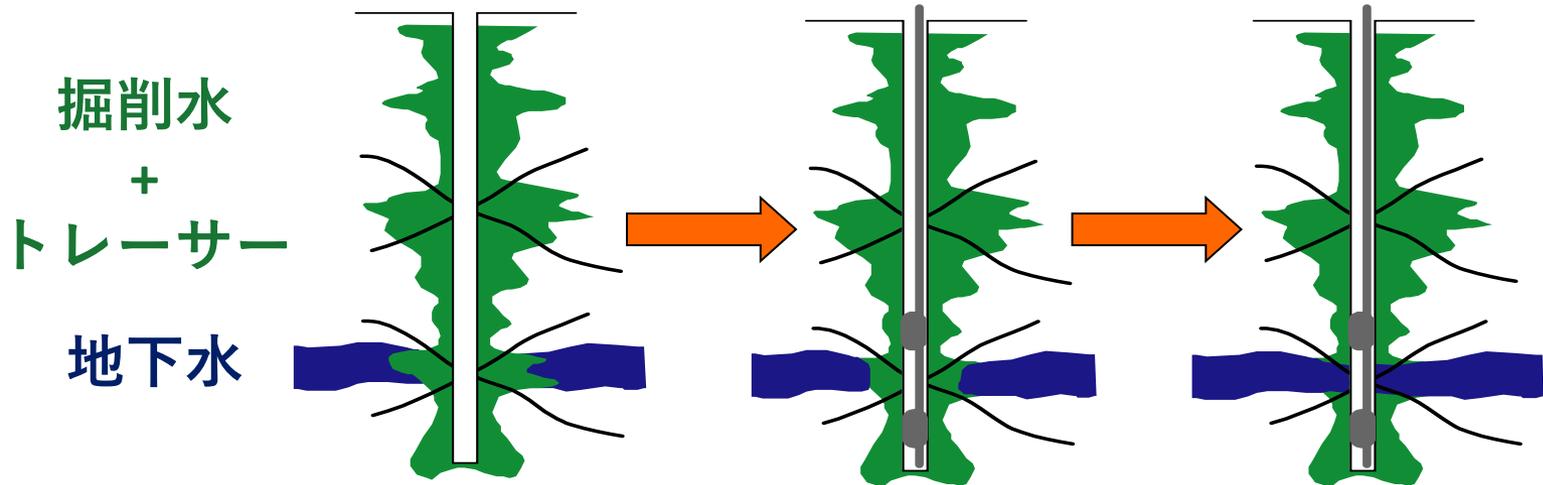
- 【主な基本性能】
- ・耐温度性能 : 摄氏70°Cまで
 - ・適用深度 : 深度1,000mまで
 - ・適用孔径 : 75~130mmまで
 - ・孔内部の最大外径 : φ70mm以下
 - ・試験項目 : 間隙水圧測定
透水試験
 - ・透水係数の測定範囲 : 10⁻⁵~10⁻¹² m/s
 - ・特殊機能 : BTV機能 (前方・側方同時観測型)



地下水の採水手順

地下水サンプリングでの考慮事項(品質確保の観点から)

- ✓ 掘削水と地下水との混合
- ✓ 原位置環境(嫌気性、加圧状態)



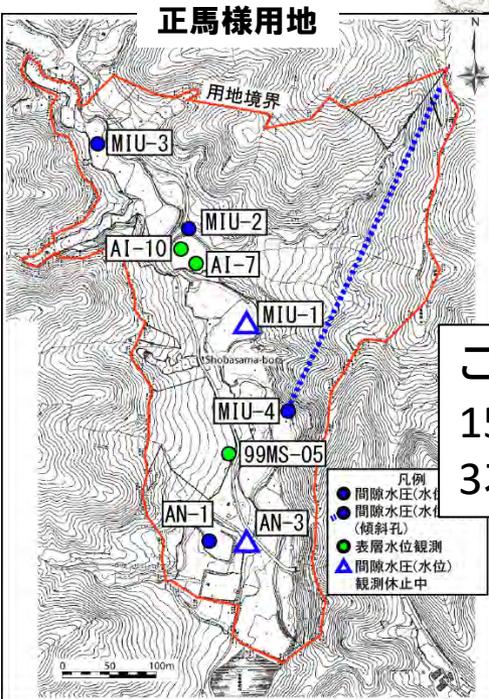
ウランin



ナフチオン酸ナトリウム

トレーサーの例

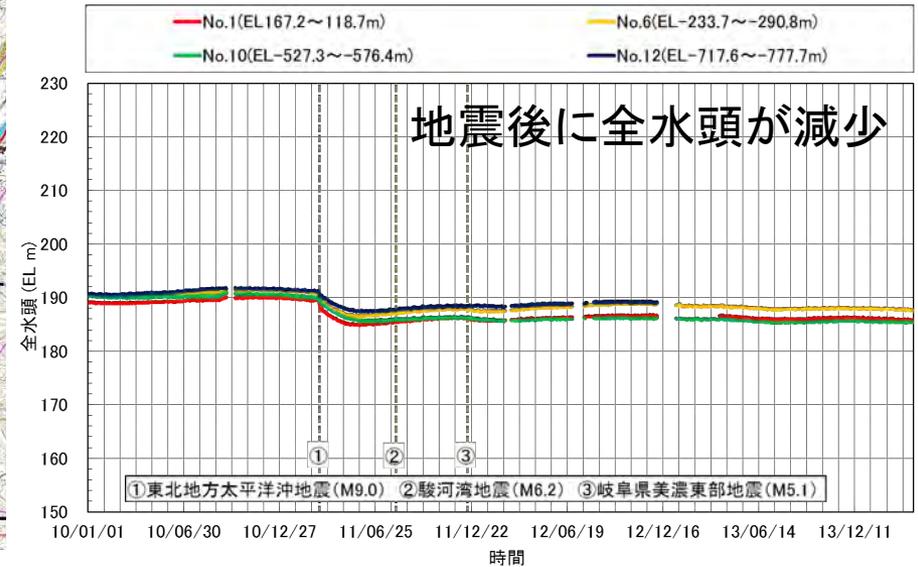
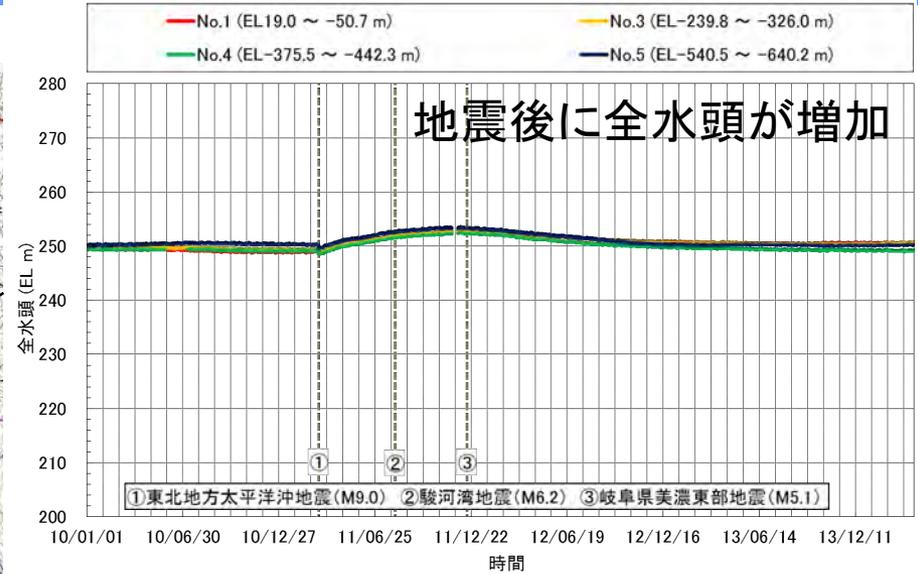
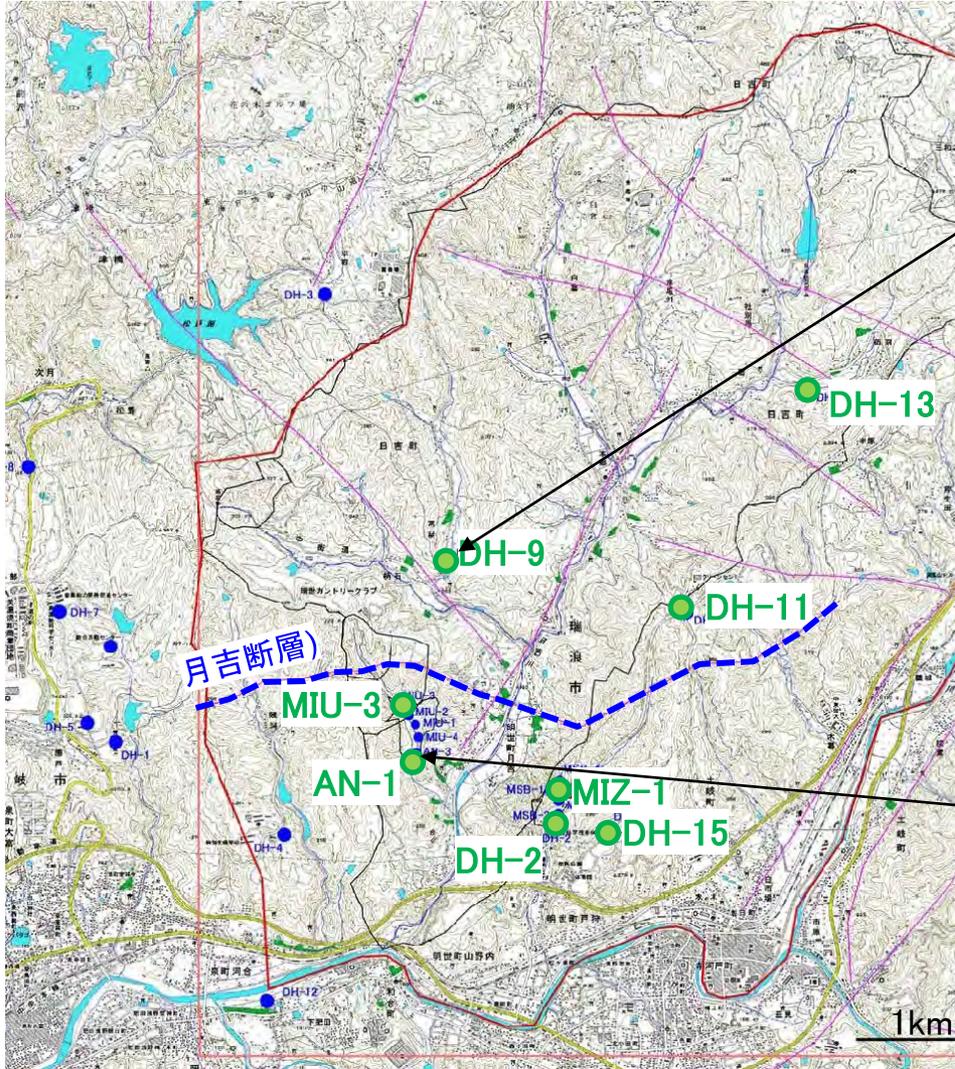
地下水の長期モニタリング



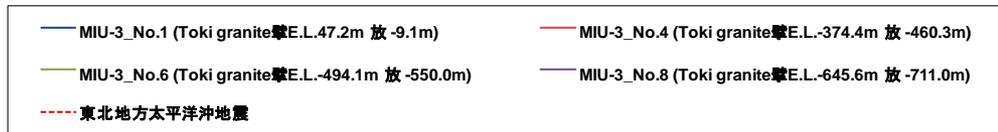
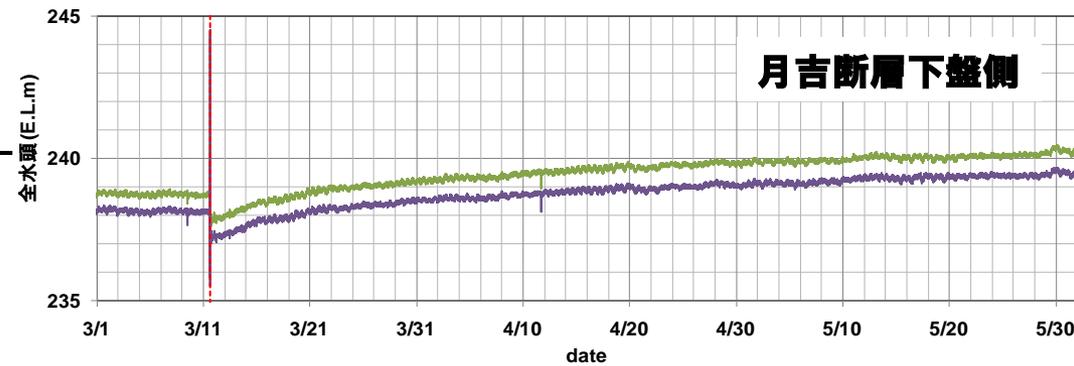
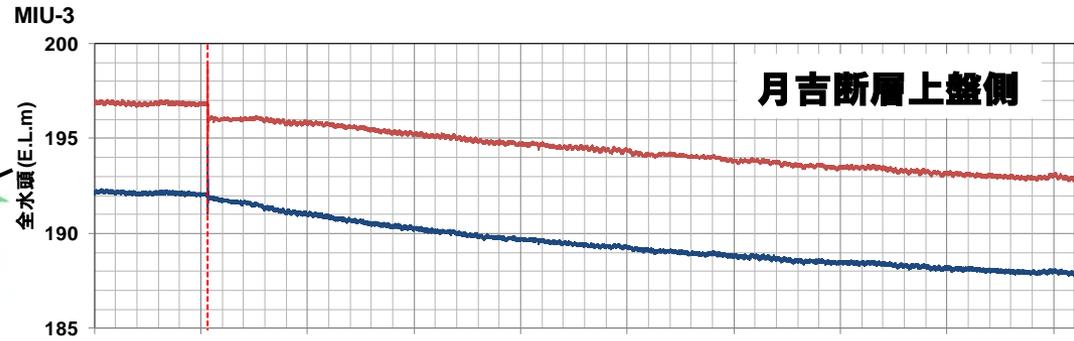
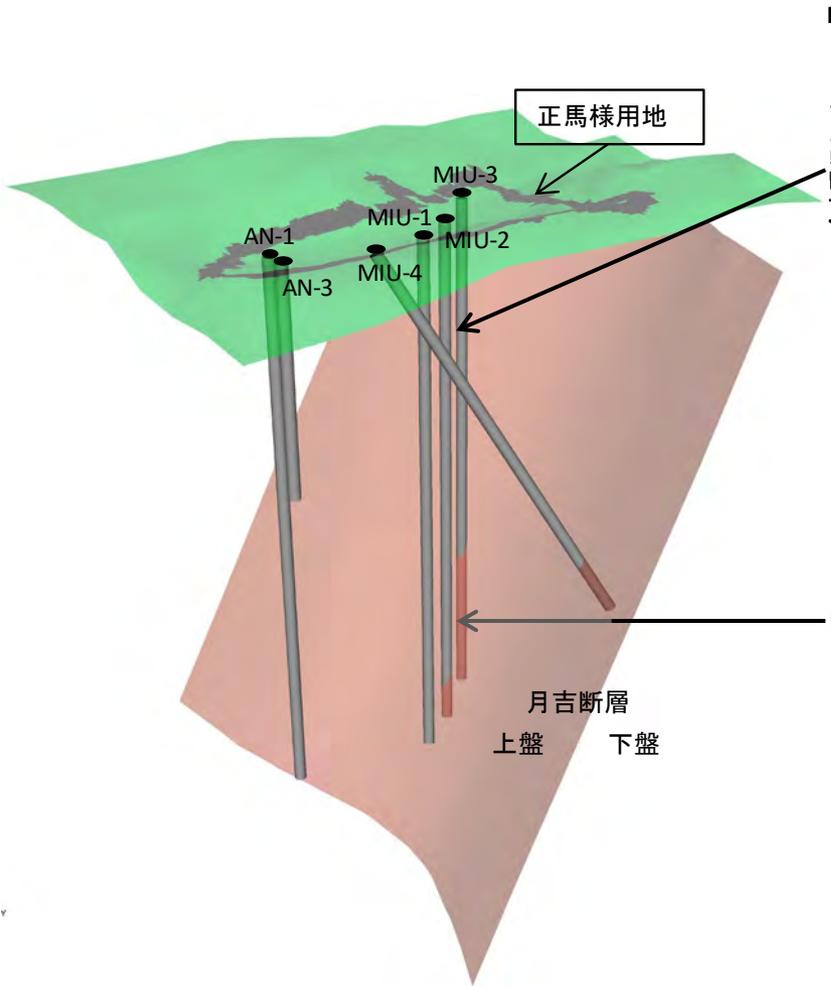
これまでに、
15本のボーリング孔で地下水の水圧観測、
3本のボーリング孔で地下水の水質観測を実施



地震に伴う水圧応答

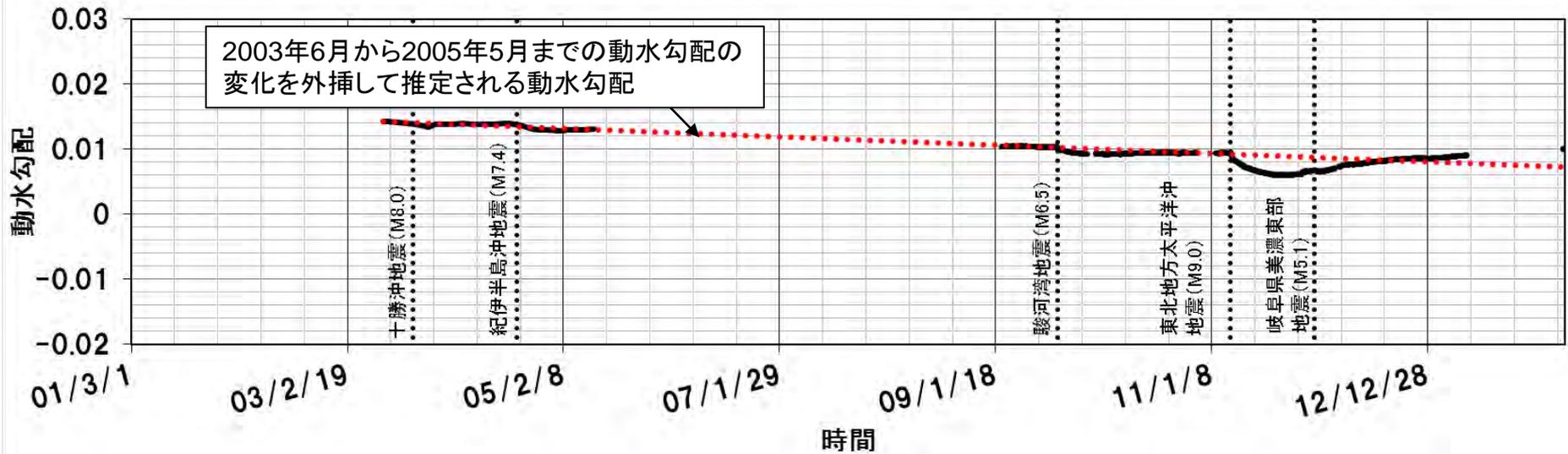


地震に伴う水圧応答



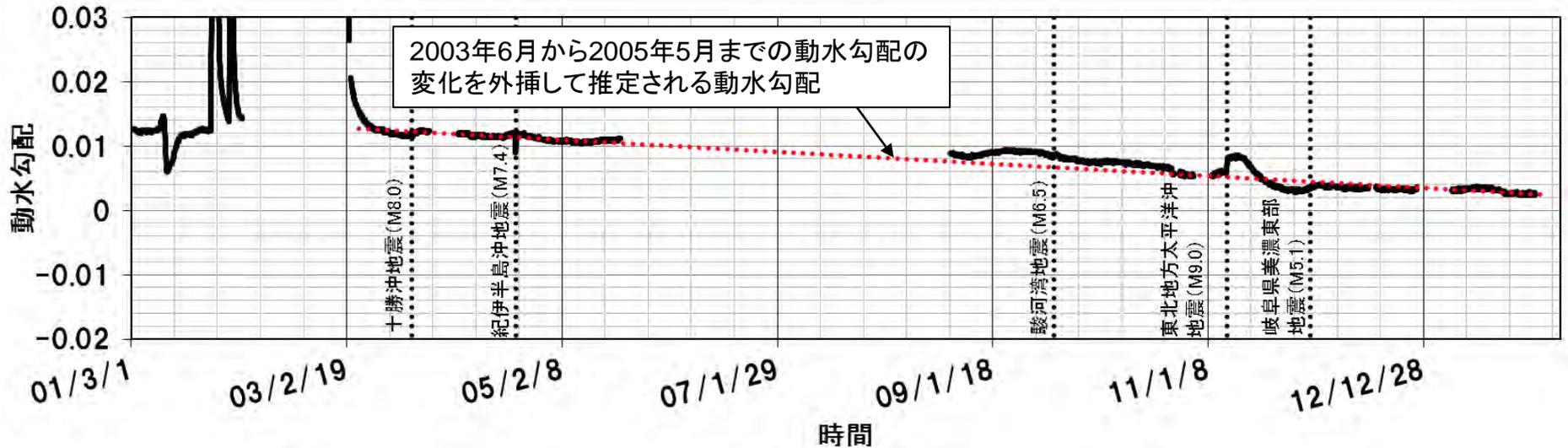
月吉断層(低透水性の断層)を挟んで、水圧応答が異なる

地震に伴う動水勾配の変化(DH-9 - MIU-3)



- ✓ 十勝沖地震, 紀伊半島沖地震, 駿河湾沖地震
 - 地震直後に動水勾配が低下
 - 地震による動水勾配の変化は1年程度で地震前の状態に回復
- ✓ 東北地方太平洋沖地震, 岐阜県美濃東部地震
 - 地震直後に動水勾配が低下
 - 地震から約2年で地震前の動水勾配に回復するが, その後の変化は, 地震前の傾向と異なる可能性

地震に伴う動水勾配の変化(MIU-3 - AN-1)



- ✓ 十勝沖地震, 紀伊半島沖地震, 駿河湾沖地震, 東北地方太平洋沖地震, 岐阜県美濃東部地震
- 地震直後に動水勾配が上昇
- 地震から数ヶ月後に地震前の動水勾配の変化傾向に収束

本日の内容

1. 高レベル放射性廃棄物の地層処分とは？
2. 広域地下水流動研究
- 3. 超深地層研究所計画**
4. さいごに

広域地下水流動研究と超深地層研究所計画

広域地下水流動研究 主として、概要調査の技術基盤

●Regional Scale: 文献調査ステージ

文献情報により対象とする地下水流動系の範囲を把握

★広い領域のモデル化手法, 評価を行う領域 (Local Scale) の範囲・境界条件の設定手法の構築

●Local Scale: 空中・地上, 試錐孔を利用した調査ステージ

対象とする地下水流動系を含む領域の地質環境特性を把握

★対象とする領域の地質環境特性を把握するための体系的な調査・評価技術の構築と適用性に関する知見

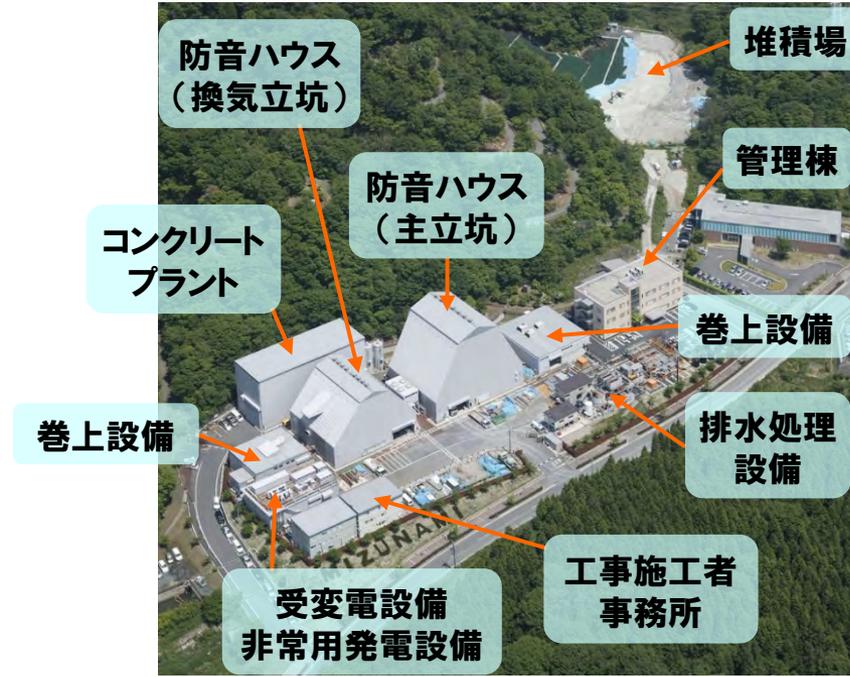
超深地層研究所計画 概要調査・精密調査の技術基盤

●Site, Block Scale: 地上, 試錐孔を利用した調査ステージ

研究施設周辺の地質環境特性を, より詳細に把握

★施設周辺の地質環境の特性を把握するための体系的な調査・評価技術の構築とその適用性に関する知見

瑞浪超深地層研究所の施設概要



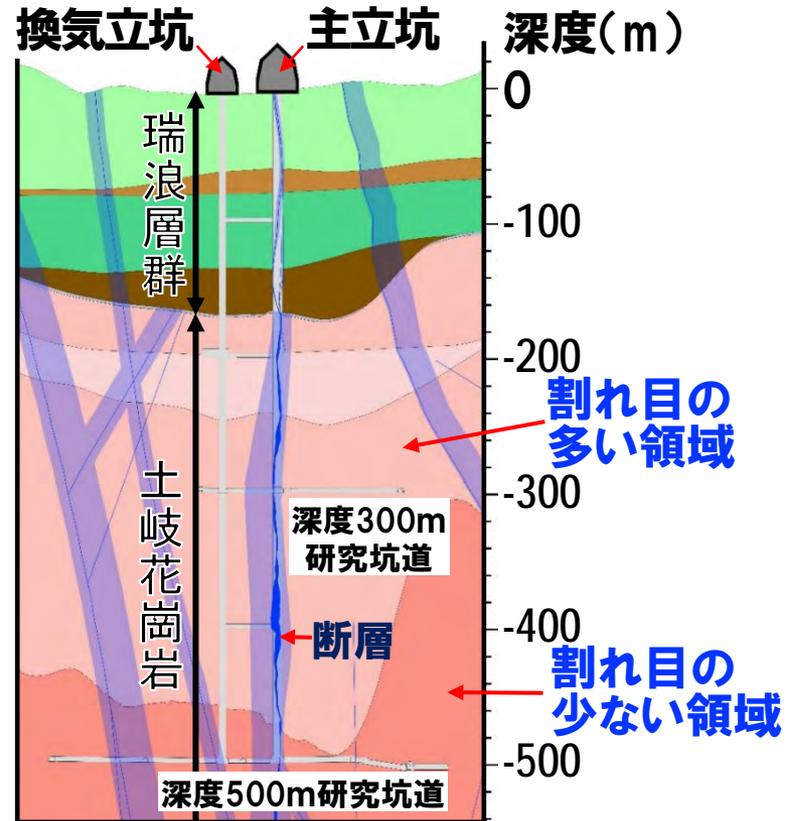
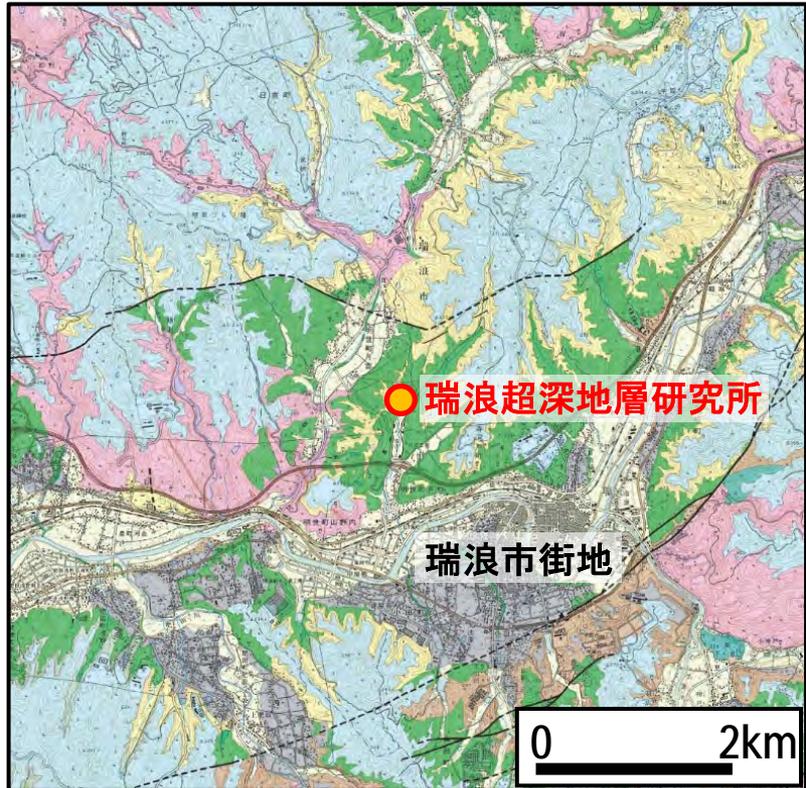
【深度500m研究アクセス南坑道】



【深度500m研究アクセス北坑道】

瑞浪深地層研究所周辺の地質概要

- 研究坑道を主に**土岐花崗岩**に展開
 ⇒**結晶質岩での地質環境**（岩盤および地下水）に関連する研究を実施



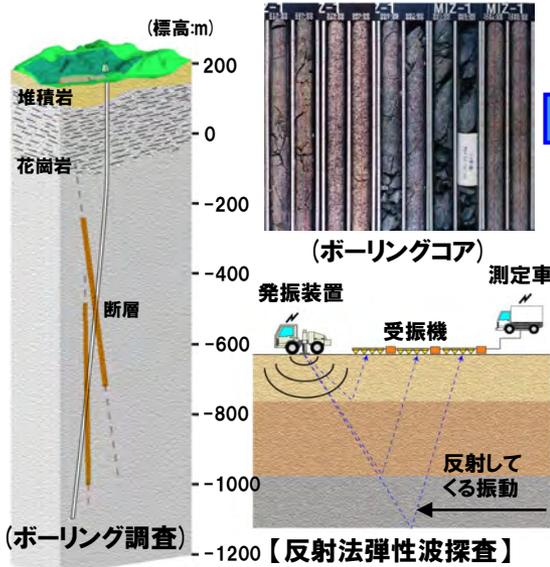
- 第四紀の堆積物
 - 新第三紀中新世後期～第四紀更新世前期の堆積岩（瀬戸層群）
 - 新第三期中新世の堆積岩（瑞浪層群）
 - 白亜紀後期の花崗岩（土岐花崗岩）
- === 断層

超深地層研究所計画の目標と進め方

目標

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

【第1段階】 地表からの調査予測研究段階



地表から調査して地下の様子を推定します



【第2段階】 研究坑道の掘削を伴う研究段階



研究坑道を掘削しながら研究します(検証)

【第3段階】 研究坑道を利用した研究段階

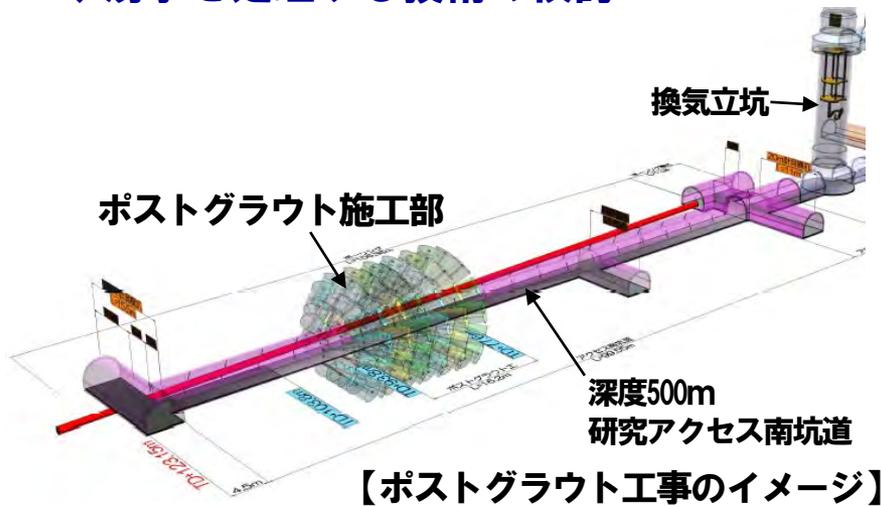


瑞浪超深地層研究所の地下の状態を知りたいのではなく、「どのような方法で調査を行えば、地下の状態を正しく知ることができるのか」が課題

第3段階における研究開発テーマ

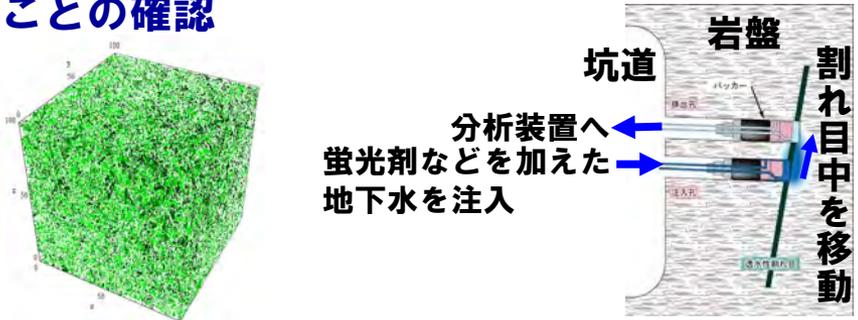
①地下坑道における工学的対策技術の開発

- ◆湧水の量を減らす技術の実証
- ◆湧水を処理する技術の検討



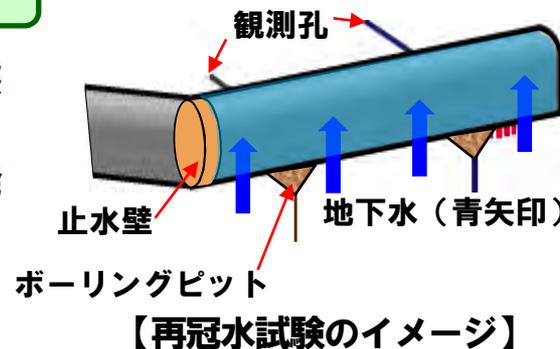
②物質移動モデル化技術の開発

- ◆地下水に溶けた物質の地下での移動現象を調査・解析する技術の開発
- ◆地下水の通りみちとなる割れ目や地下水の性質に関する将来変化に関する研究
- ◆地下深部では地下水の動きが緩慢であることの確認



③坑道埋め戻し技術の開発

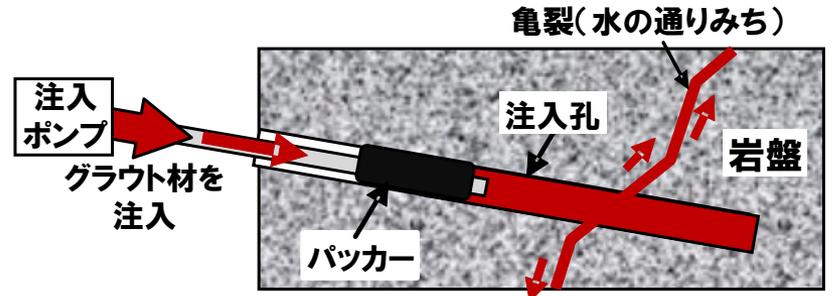
- ◆坑道を埋め戻した時に地質環境が元の状態へ回復していく現象を観測・評価
- ◆地質環境の回復現象を予測する手法の開発
- ◆坑道を埋め戻す技術の構築
- ◆長期にわたるモニタリング技術の開発



地下坑道における工学的対策技術の開発

亀裂から出る高水圧の湧水を
抑制する技術を開発
(平成28年12月9日プレス発表)

深度500m、青函トンネル施工時の約2倍の約40気圧の高水圧下で坑道への湧水量をグラウト未施工での予測値の1/100に低減することに成功。



亀裂の中にグラウト材料を注入し
グラウト施工とは：水の通りみちを塞ぐことで湧水を止める工事

【開発された新技術】

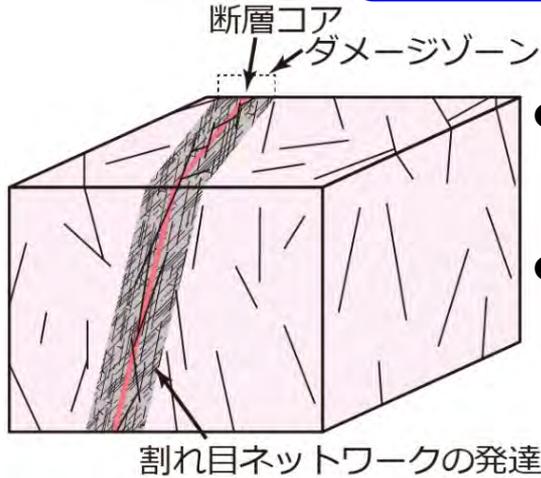
- ・高水圧下で高い止水効果が期待できるプレグラウト施工とポストグラウト施工の併用
- ・グラウト材料として浸透性及び耐久性に優れた溶剤型材料(活性シリカコロイド)
- ・高い浸透効果を発揮する複合動的注入工法
- ・グラウト施工の効果を予測するための理論式の考案

プレグラウト施工とポストグラウト施工を併用した湧水対策工事の概念図

プレグラウト施工：坑道の掘削前に実施する湧水対策工事
ポストグラウト施工：坑道の掘削後に実施する湧水対策工事

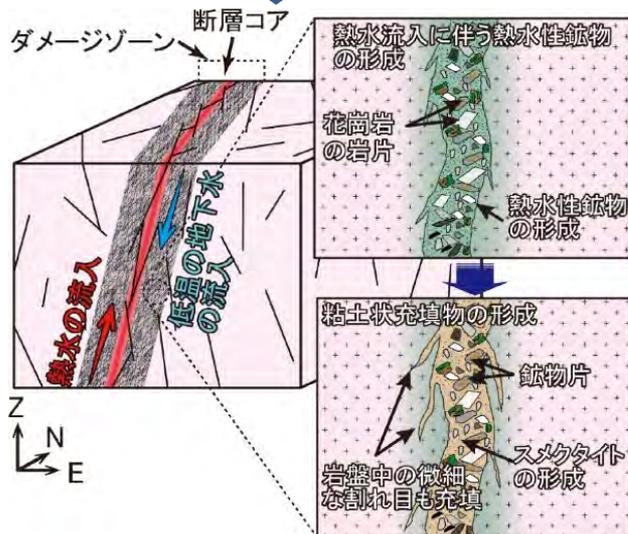
物質移動モデル化技術の開発

断層運動で損傷した岩盤の自己修復機能を確認
 (平成28年6月29日プレス発表)

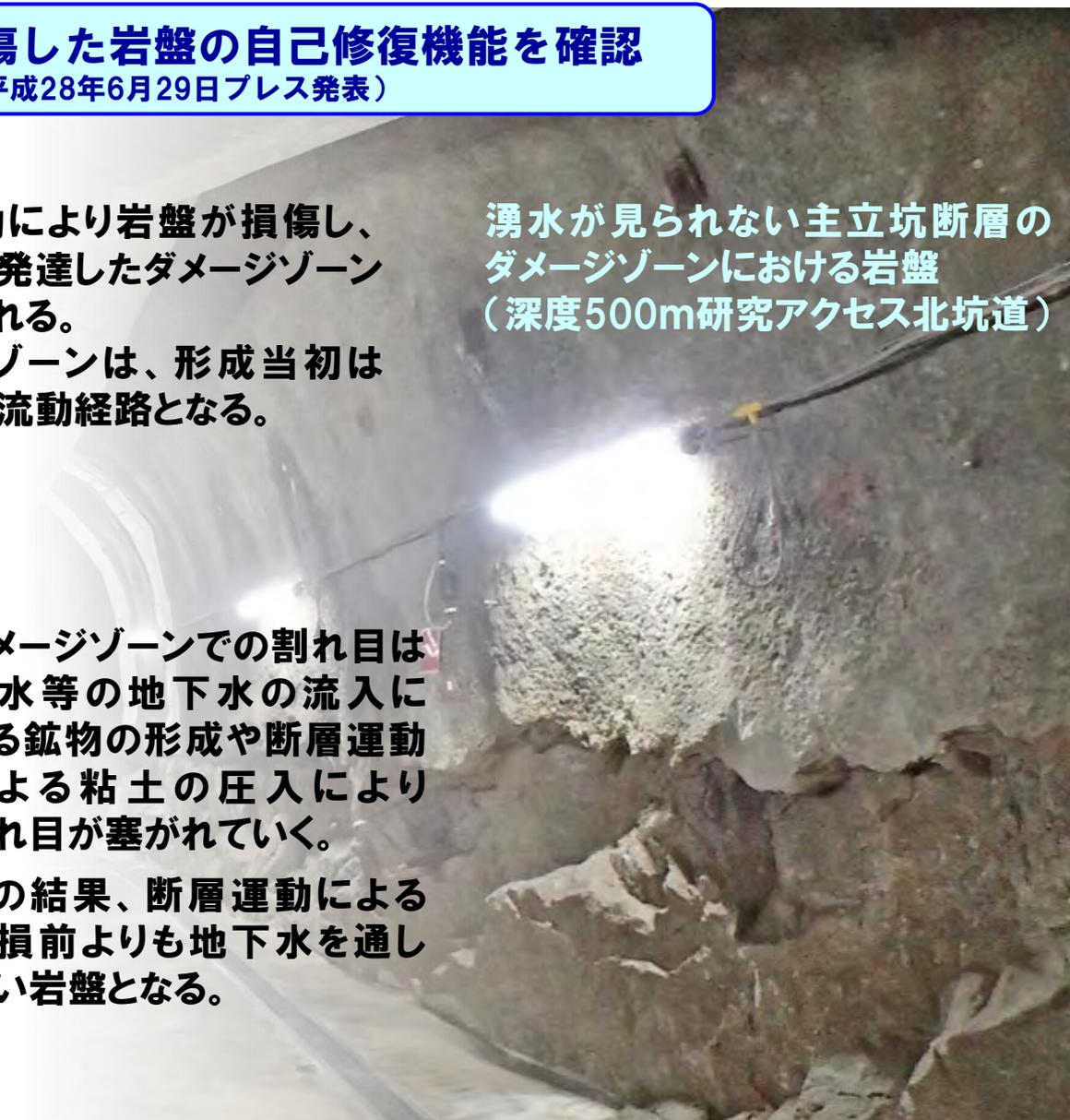


- 断層運動により岩盤が損傷し、割れ目の発達したダメージゾーンが形成される。
- ダメージゾーンは、形成当初は地下水の流動経路となる。

湧水が見られない主立坑断層のダメージゾーンにおける岩盤
 (深度500m研究アクセス北坑道)



- ダメージゾーンでの割れ目は熱水等の地下水の流入による鉱物の形成や断層運動による粘土の圧入により割れ目が塞がれていく。
- その結果、断層運動による破損前よりも地下水を通し難い岩盤となる。

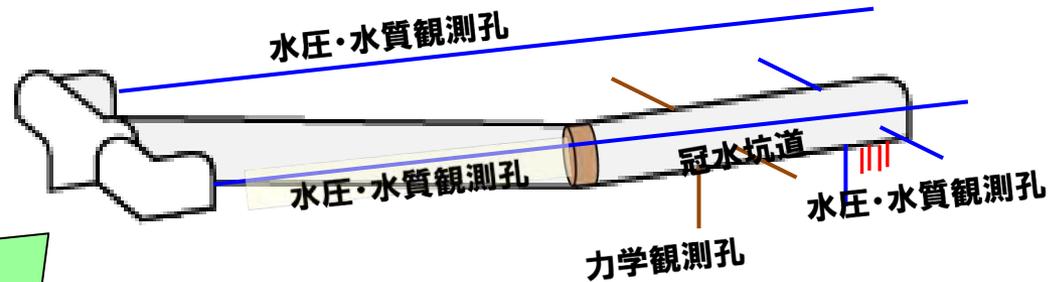
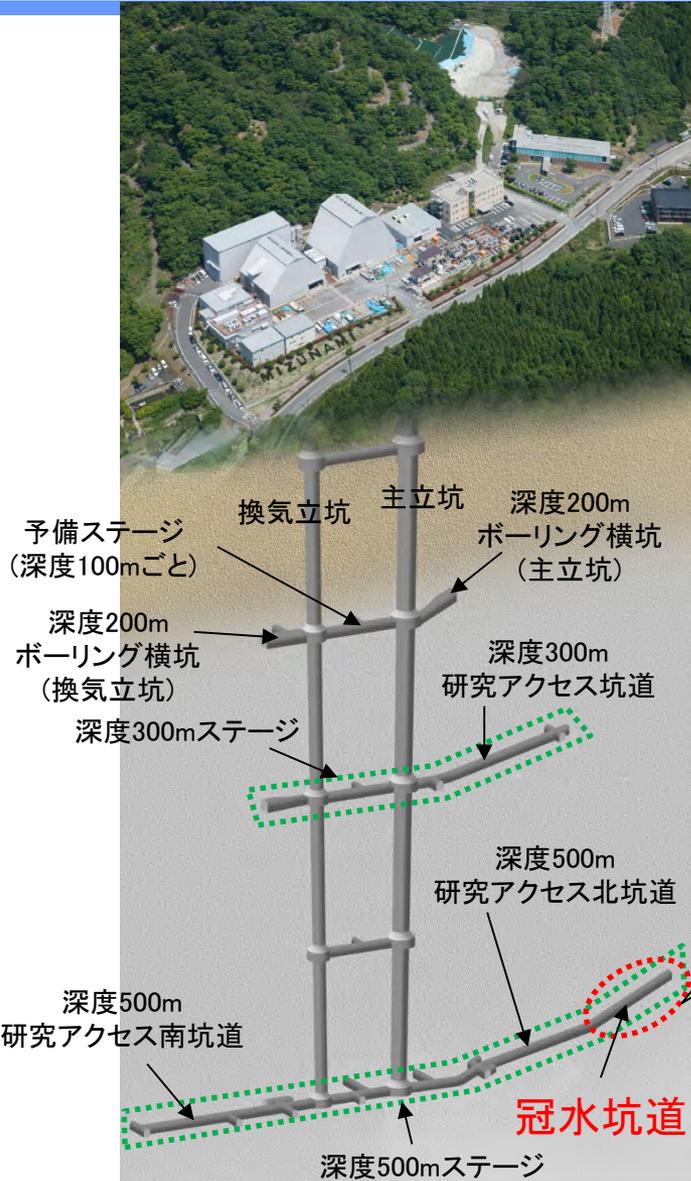


坑道埋め戻し技術の開発

－再冠水試験－

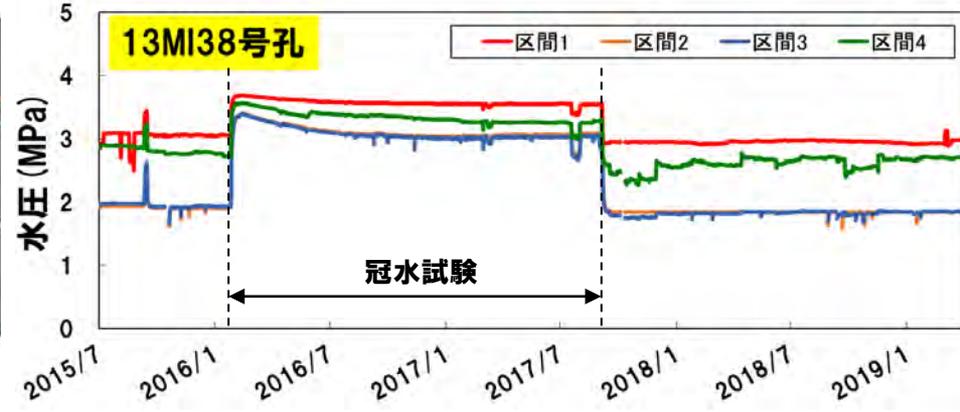
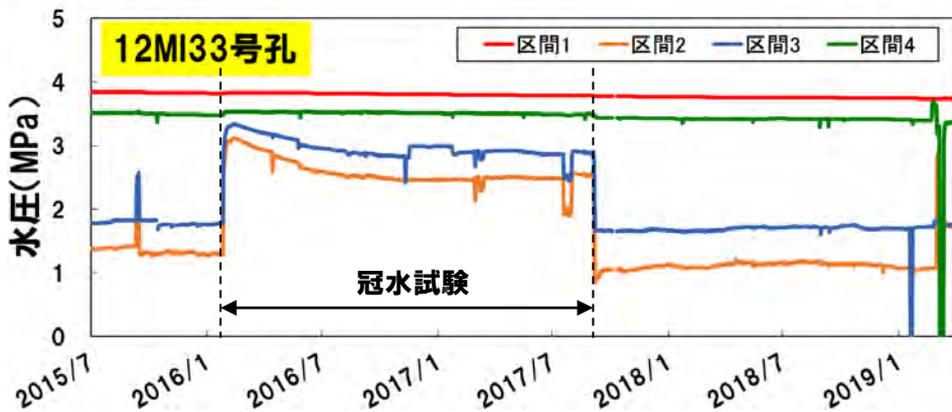
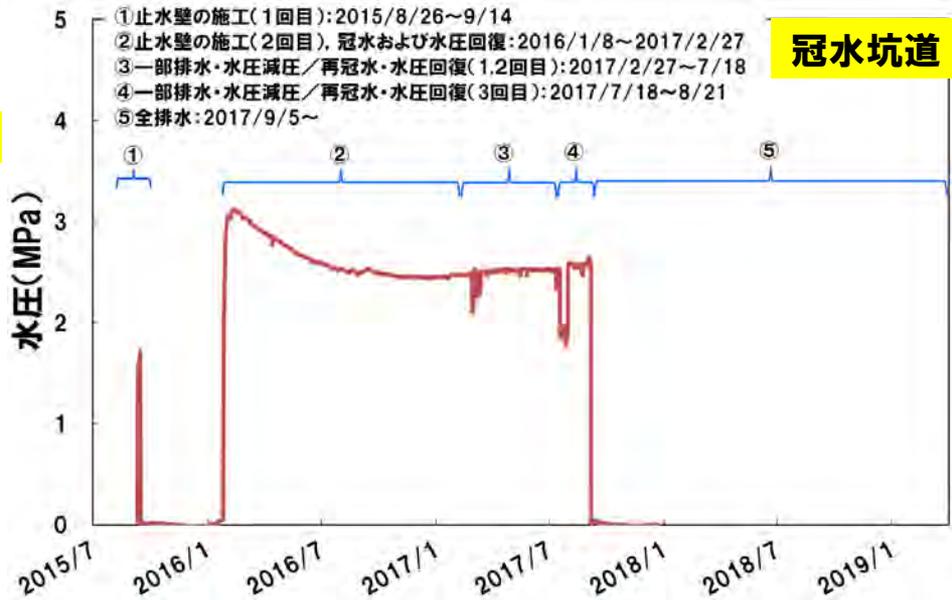
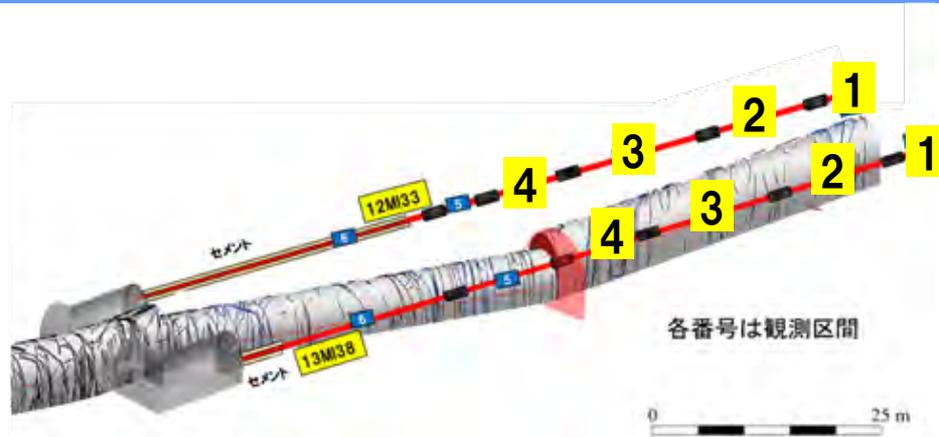
➤ 地下施設の建設・操業により乱された地質環境の回復能力の例示と関連する技術の開発

- ✓ 坑道の掘削・維持管理により乱された地質環境特性の回復・定常化過程の知見を蓄積
- ✓ 坑道閉鎖時の坑道・施設スケールでの地質環境特性の変化(回復過程)の観測・解析技術, 施設閉鎖後の地質環境の長期的変遷を推定する解析手法の開発



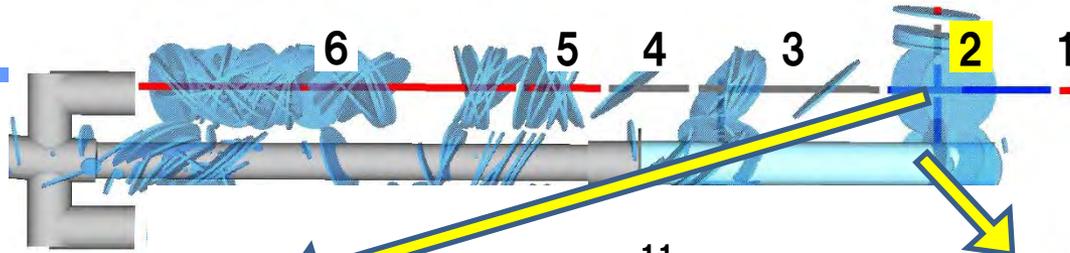


再冠水試験(水圧)

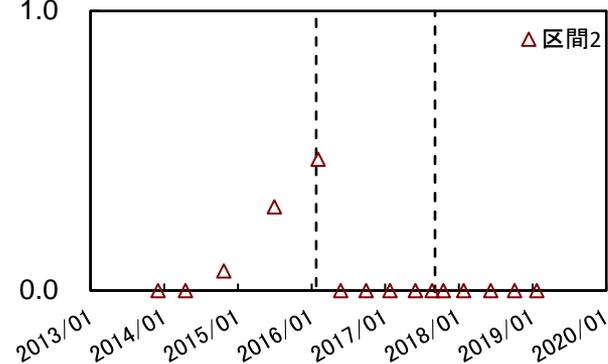
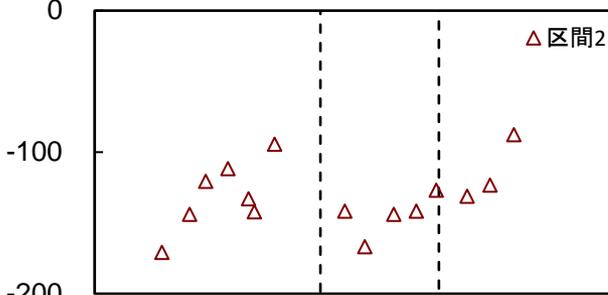
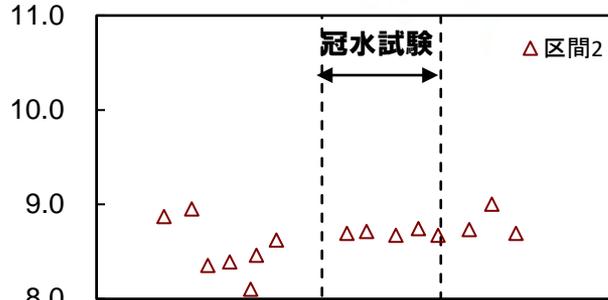


- ✓ 坑道掘削、冠水、排水に伴う水圧変化から坑道周辺の水理学的不均質性を確認
- ✓ 坑道および坑道周辺の観測孔において、冠水に伴う水圧回復を確認

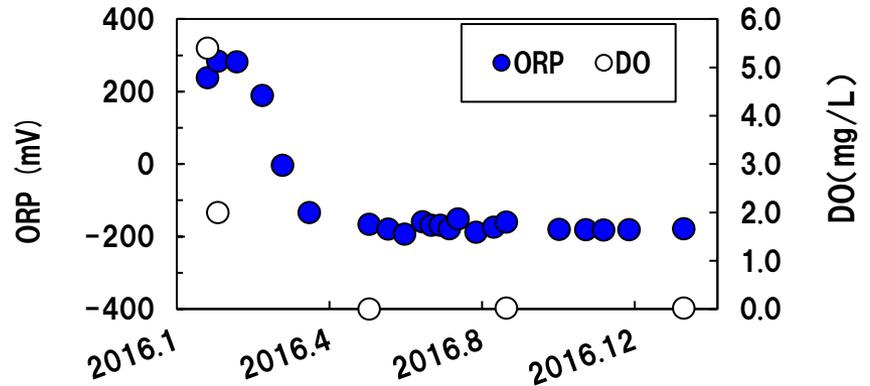
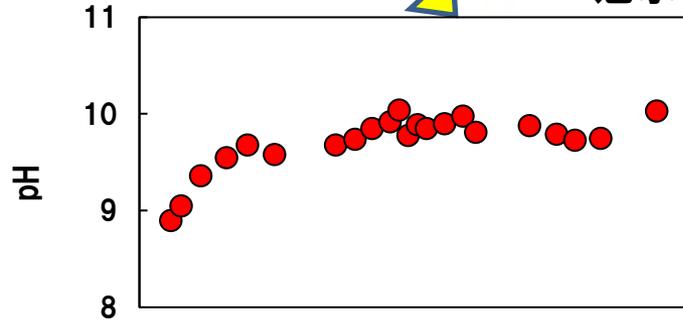
再冠水試験(水質)



12MI33号孔

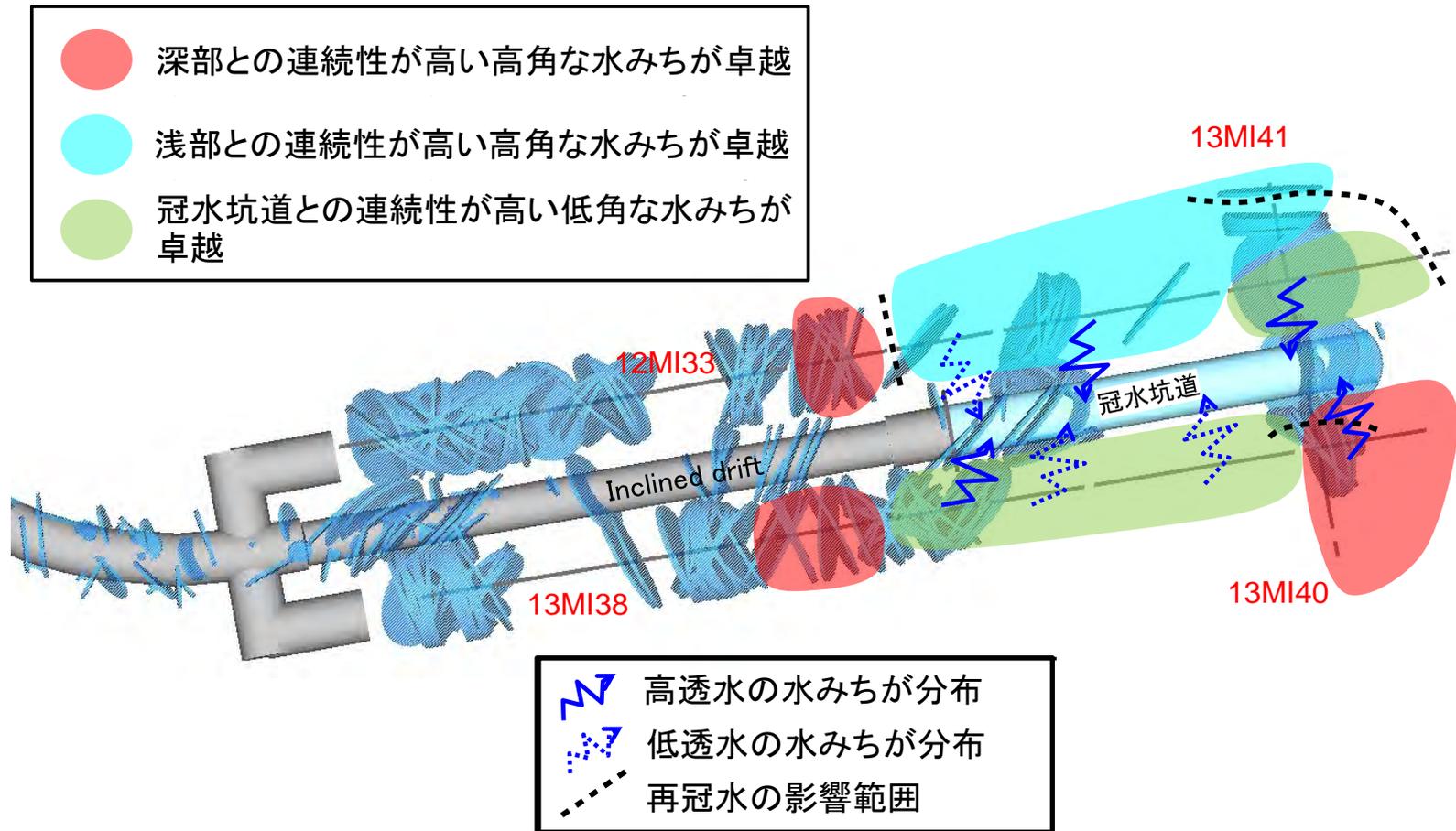


冠水坑道



- ✓ 冠水坑道内のpHは、冠水によりアルカリ性に变化
- ✓ 冠水により、冠水坑道内は数か月で還元状態に復元、また、無酸素状態も復元
- ✓ 坑道周辺は、冠水坑道掘削後から徐々に酸化的变化し、坑道冠水中は還元的に変化、排水後は酸化的变化

水理地質構造概念モデルと割れ目分布の比較



- ✓ 高透水性の水みちが分布すると推定した領域(実線)周辺に多くの割れ目を確認
- ✓ 低透水性の水みちが分布すると推定した領域(破線)周辺に確認される割れ目は少数
- ✓ 高角な割れ目は深部との連続性が高い領域(赤い領域)に分布

調査結果(割れ目分布)と概念モデルは整合的な解釈が可能⇒**透水不均質性の基礎情報**

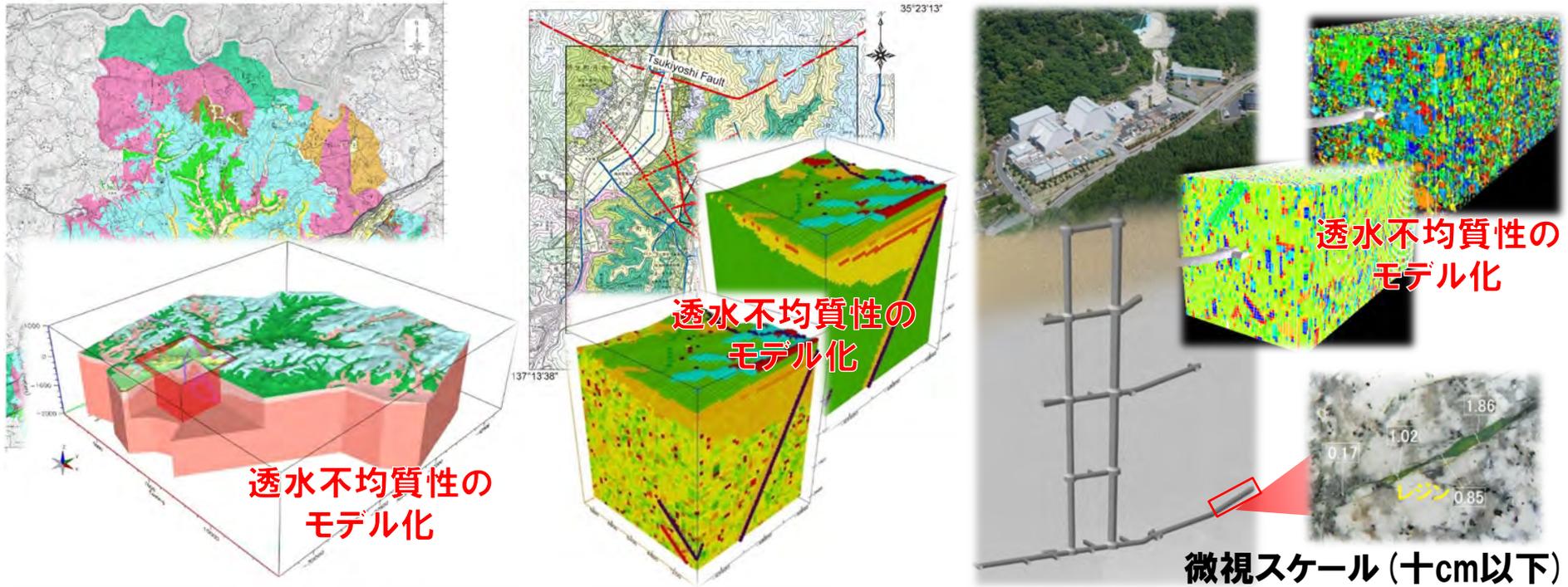
今後の検討課題

広域スケール
(数km～数十km)

施設スケール
(数百m～数km)

坑道スケール
(数m～数百m)

領域の絞り込みに伴う透水不均質性の抽出や詳細化

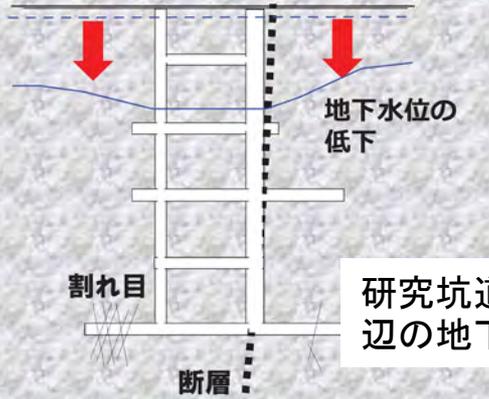


広い領域への詳細な透水不均質性の反映や平均化

⇒広域スケールの水理・物質移動特性の評価において、空間スケールによって見え方が異なる透水不均質性をスケール間でどのようにつなぐかが重要

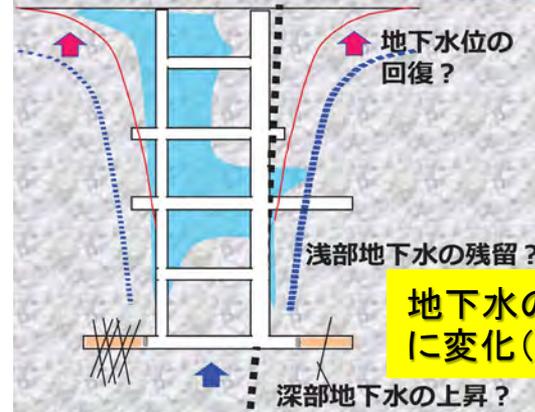
これまでの研究と今後の検討課題

1. 研究所の建設



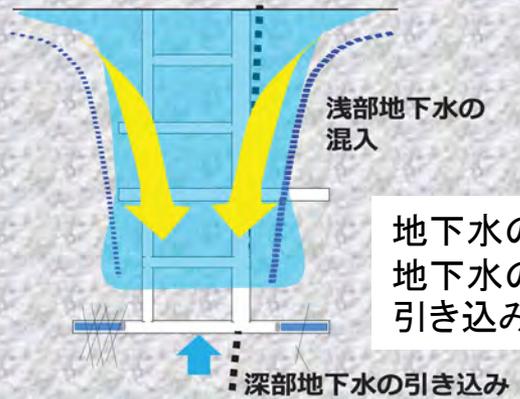
研究坑道の掘削により、坑道周辺の地下水の水圧が低下

3. 埋め戻し・閉鎖



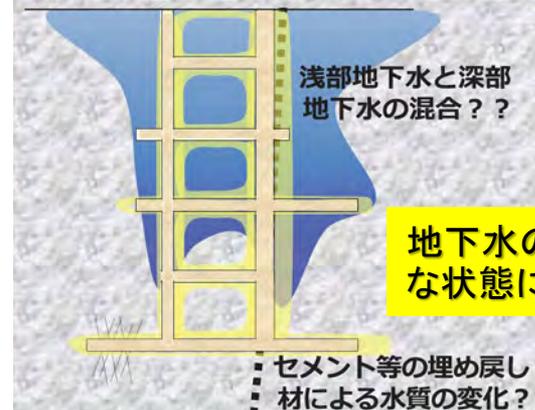
地下水の水圧や水質がどのように変化(回復)していくのか?

2. 維持管理



地下水の水圧低下に伴い、浅部地下水の混入や深部地下水の引き込みが生じ、水質が変化

4. 閉鎖後



地下水の水圧や水質はどのような状態になるのか?

さいごに

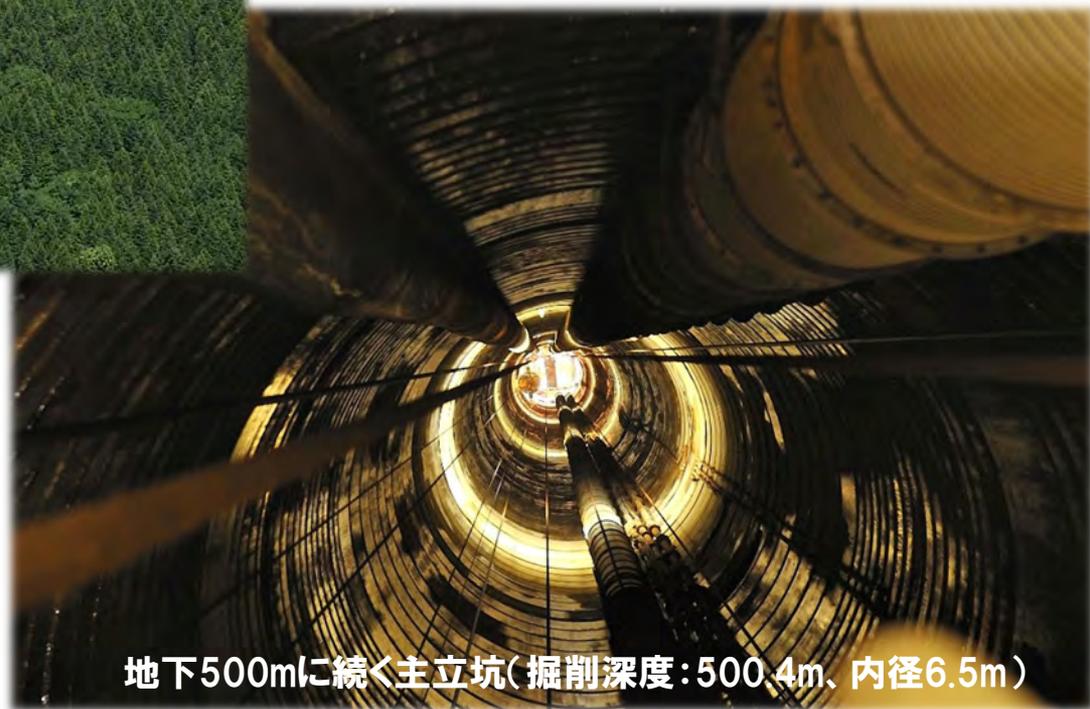
日本には、これまでの原子力発電の利用によって、既にガラス固化体で2万5千本相当にのぼる高レベル放射性廃棄物が存在します。この高レベル放射性廃棄物を、どう措置するかは、国全体の問題です。

地層処分は、この高レベル放射性廃棄物の問題を安全に解決するための方策として、世界中で採用されている方法です。日本でも安全に行うことができる見通しが得られています。

皆さん一人一人が高レベル放射性廃棄物の地層処分に興味を持ち、高レベル放射性廃棄物の地層処分について考えるきっかけになると幸いです。



瑞浪超深地層研究所(岐阜県瑞浪市明世町)



地下500mに続く主立坑(掘削深度:500.4m、内径6.5m)

ご清聴ありがとうございました。