

超深地層研究所計画 － 研究トピックス －

平成27年10月20日

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
結晶質岩地質環境研究グループ

必須の課題(平成27～31年度)

①地下坑道における工学的対策技術の開発

◆大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術

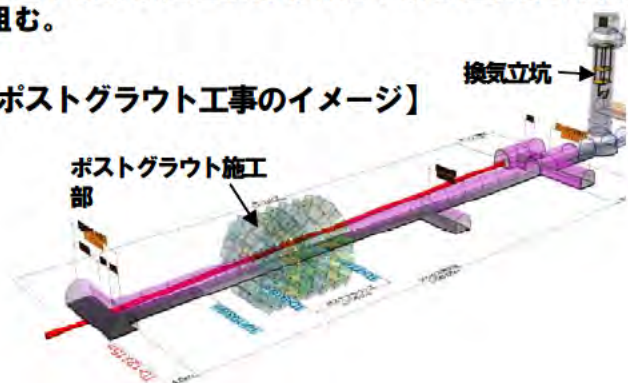
◆地下水管理技術

【概要】

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

また、地下水排水処理技術等の地下水管理技術の高度化にも取り組む。

【ポストグラウト工事のイメージ】



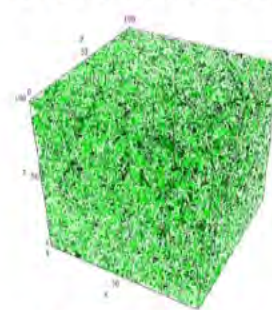
②物質移動モデル化技術の開発

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

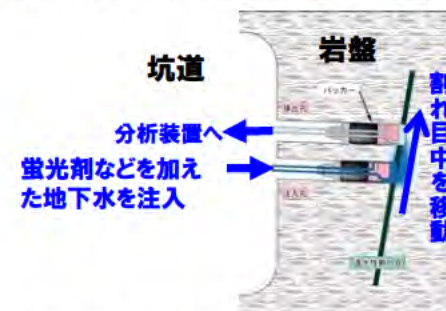
【概要】

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

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



【割れ目分布モデル】



【研究坑道内での物質移動試験の例】

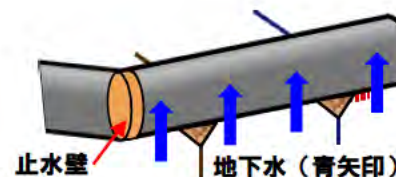
③坑道埋め戻し技術の開発

◆坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術

◆長期モニタリング技術など

【概要】

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



【再冠水試験のイメージ】



【モニタリング装置】

必須の課題(平成27～31年度)

①地下坑道における工学的対策技術の開発

◆大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術

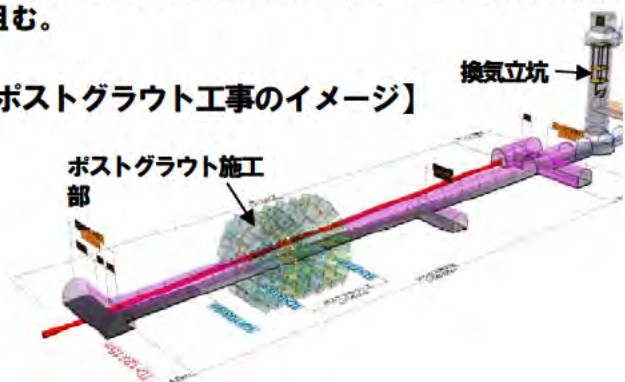
◆地下水管理技術

【概要】

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

また、地下水排水処理技術等の地下水管理技術の高度化にも取り組む。

【ポストグラウト工事のイメージ】



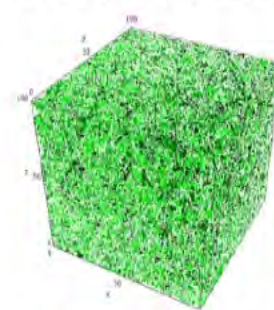
②物質移動モデル化技術の開発

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

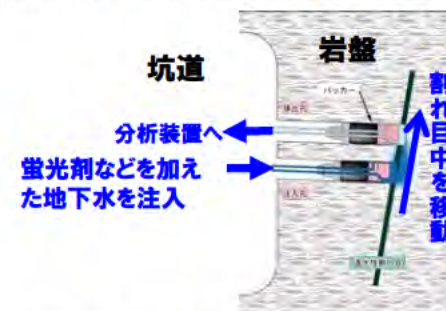
【概要】

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

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



【割れ目分布モデル】



【研究坑道内での物質移動試験の例】

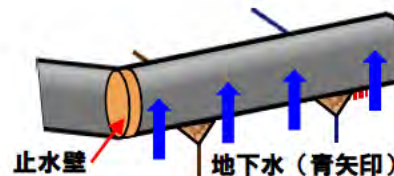
③坑道埋め戻し技術の開発

◆坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術

◆長期モニタリング技術など

【概要】

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

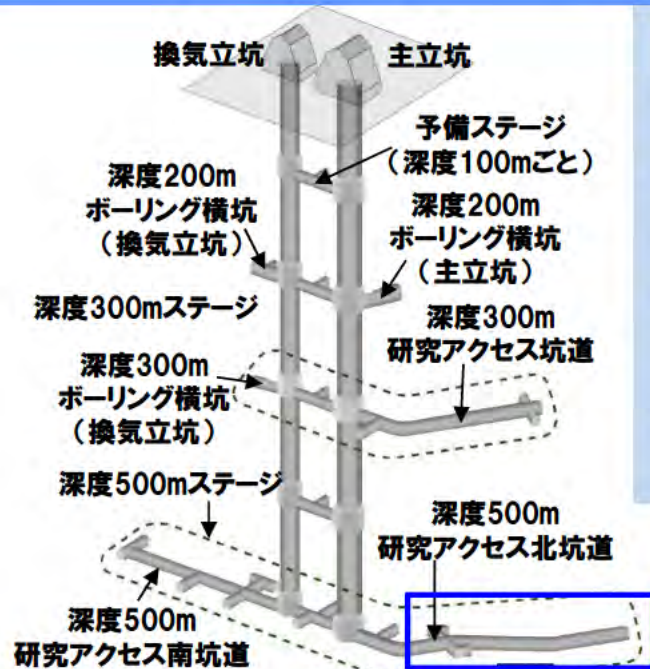


【再冠水試験のイメージ】



【モニタリング装置】

再冠水試験の全体概要

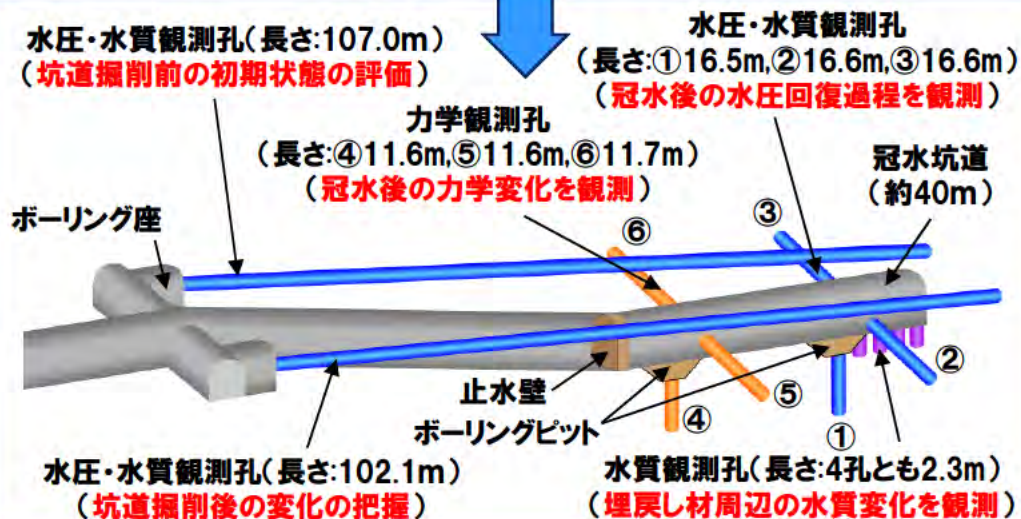
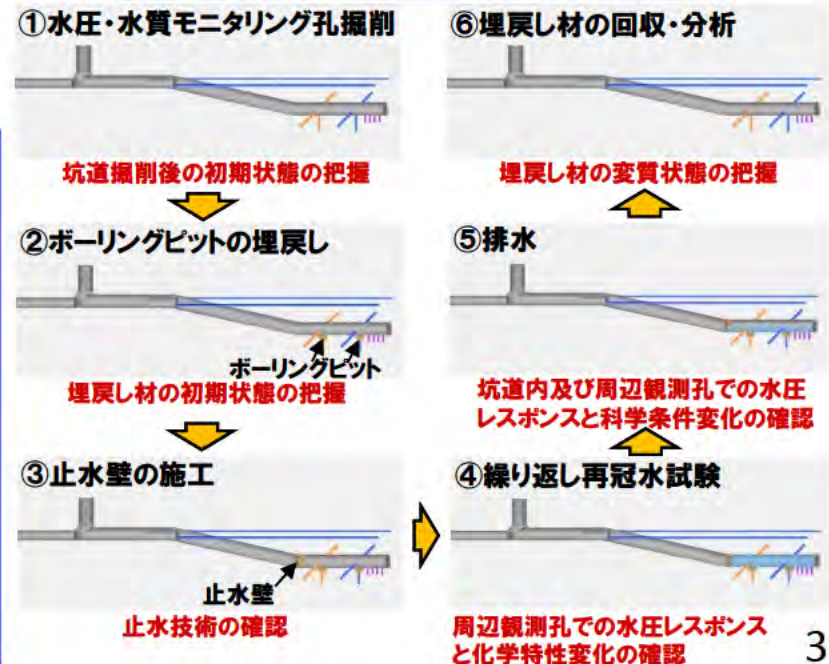


【坑道埋め戻し技術の開発の目的】

地層処分の長期安全性に関わる不確実性低減に向け、

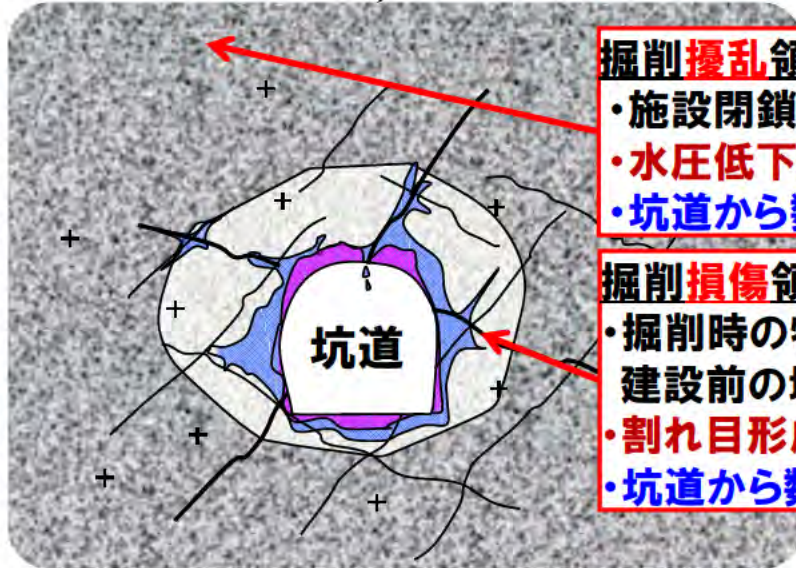
- ・坑道掘削・閉鎖に伴う地質環境の変遷等の現象理解及び予測技術の構築
- ・坑道周辺の地質環境調査技術(特にモニタリング技術)の整備
- ・地質環境の回復に有効な坑道閉鎖手順・工法等の坑道閉鎖技術の整備

《再冠水試験の手順》



施設建設～閉鎖後の地質環境特性のシナリオ

(空間の視点) → 地下研での観察により確認可能



掘削擾乱領域 (Excavation disturbed Zone [EdZ])

- ・施設閉鎖後に建設前の地質環境に回復する可能性のある領域
- ・水圧低下, 浅層地下水の浸透 etc.
- ・坑道から数m～数kmの範囲

掘削損傷領域 (Excavation Damaged Zone [EDZ])

- ・掘削時の物理的損傷やセメント材料などの使用により, 施設閉鎖後, 建設前の地質環境に回復し難い領域
- ・割れ目形成, 力学的緩み, 不飽和帯形成, 酸化, アルカリ化 etc.
- ・坑道から数m～数十mの範囲(人工材料周辺)

(時間の視点) → ナチュラルアナログ, 数値解析による推察

建設前	建設・操業	閉鎖後⇒	水圧回復		
10 ⁴ m					
10 ³	水位低下, 水質変化			水圧回復	水質回復(地下水年代に依存)
10 ²	割れ目・不飽和・酸化帯の形成 etc	透水性変化 アルカリ化	不飽和状態の回復	還元状態の回復	pH状態の回復?
掘削擾乱領域					
掘削損傷領域					
←百年間→		閉鎖	十年後	百年後	千年後
					万年後

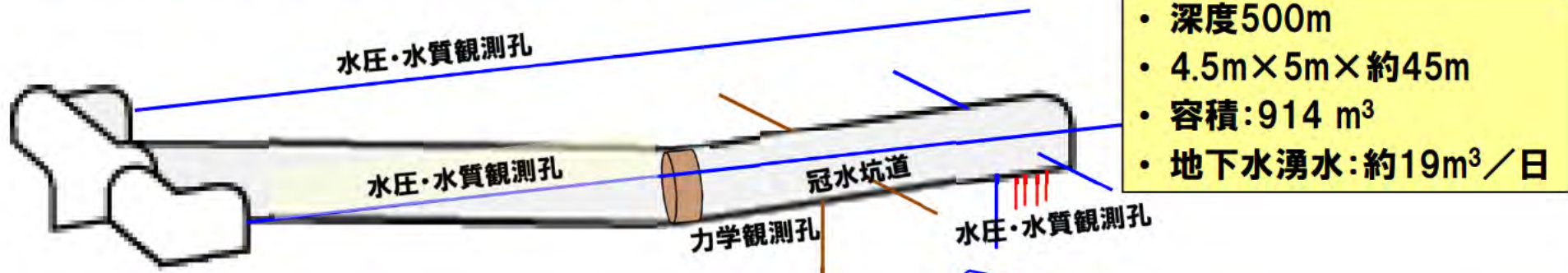
千年後の地質環境の変化量が, 安全評価上の許容範囲内か否かを判断する技術が重要

閉鎖環境での試験研究

(冠水坑道における再冠水試験)

坑道閉鎖時、閉鎖後の地質環境変化の基礎的知見の取得

- ・冠水前後の**岩盤変位**、力学的損傷領域や非損傷領域の応力再配分
- ・坑道周辺(健岩部・割れ目部)の**水圧低下と回復**、人工材料充填に伴う**割れ目の透水性変化**、閉鎖後の坑道を横切る**地下水流束**
- ・酸化環境から**還元環境への回復**(酸化還元緩衝能力)、**地下水のアルカリ化**
- ・坑道から岩盤への**物質移動**(水みちの分布、コロイド／有機物、微生物など)



施工・観測技術の構築

- ・閉鎖技術:止水プラグによる**岩盤損傷領域(EDZ)の止水技術**
- ・埋め戻し技術:**埋め戻し材料**の候補となるセメントや粘土材料の**物性確認や施工技術**
- ・シミュレーション技術:**力学-水理-化学(-微生物)連成解析技術**
- ・モニタリング技術:無線式データ通信技術や光給電技術など

地質環境特性変化の観測

水圧・水質観測孔

12MI33, 13MI38: 各6区間

13MI38-41: 各4区間

13MI45-48: 各1区間

坑道内 4地点

岩盤変位観測孔

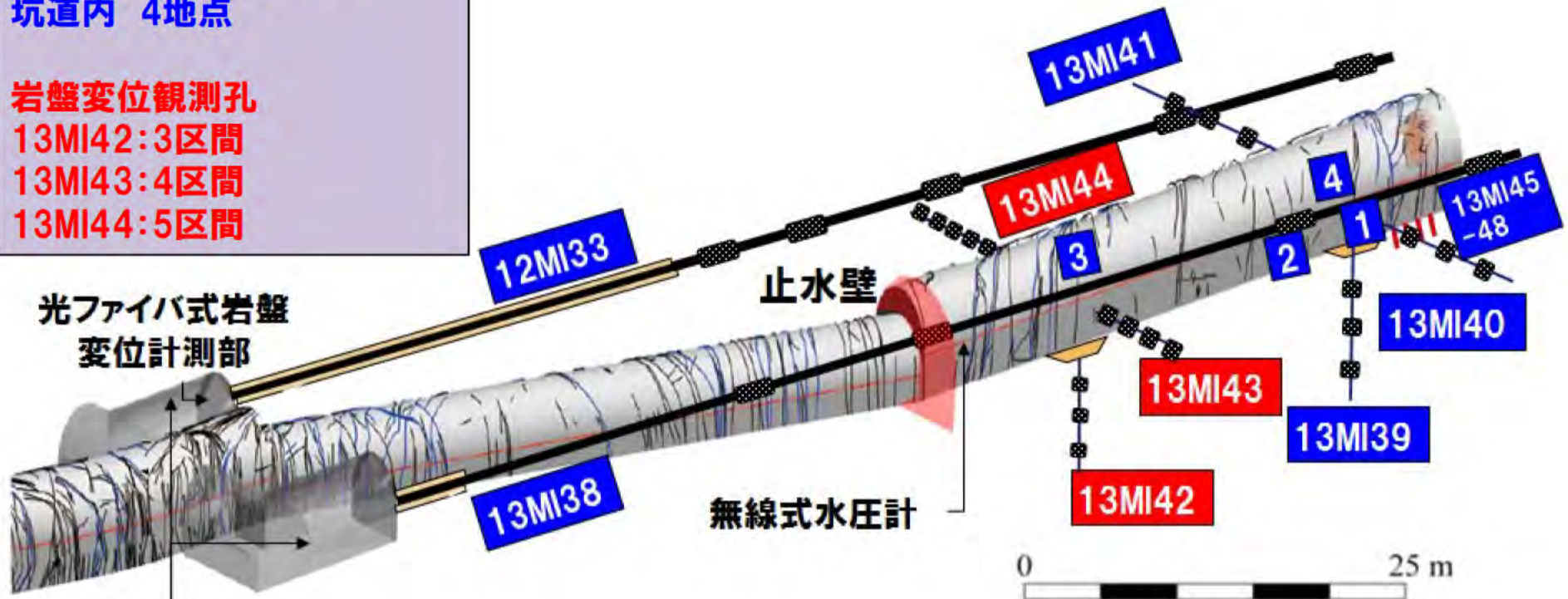
13MI42: 3区間

13MI43: 4区間

13MI44: 5区間

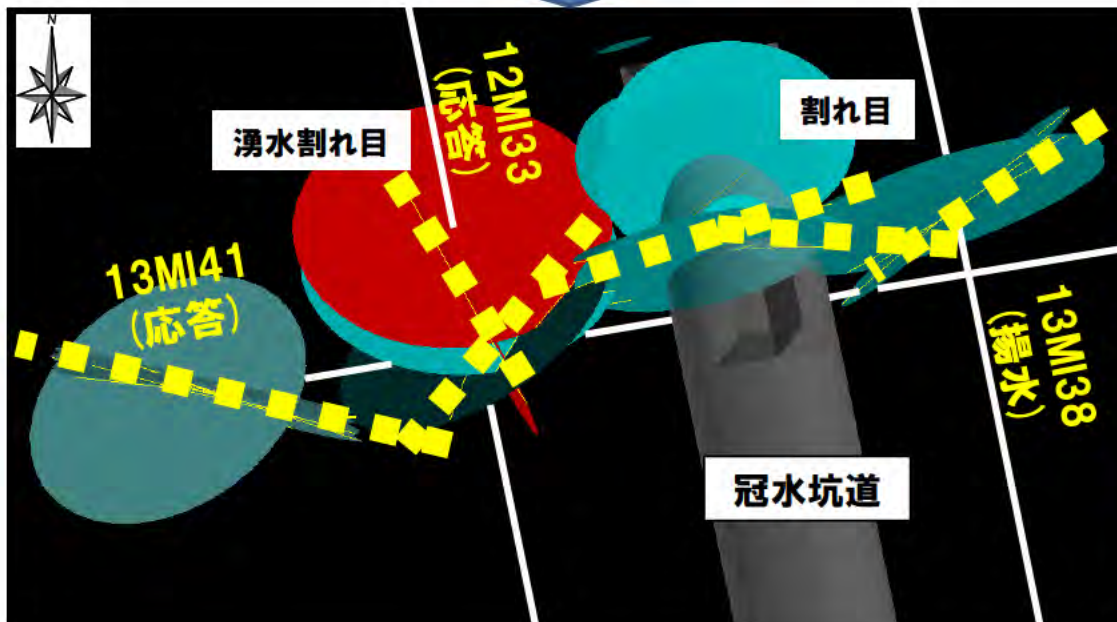
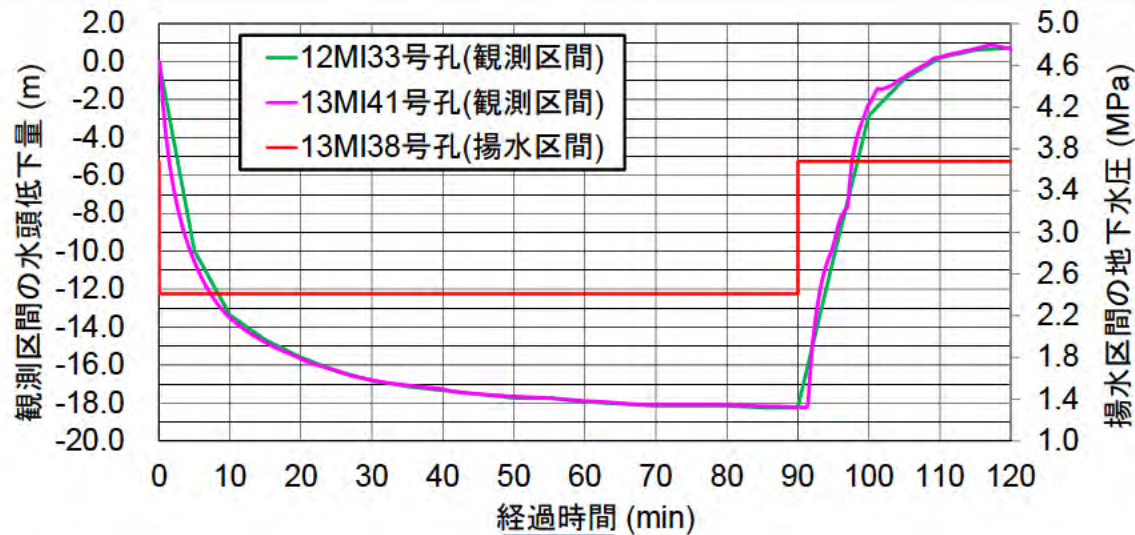
光ファイバ式岩盤
変位計測部

水圧・水質
モニタリング装置



冠水坑道の壁面から約15m奥の岩盤側まで、32点の水圧・水質観測点と12点の岩盤変位観測点を設置

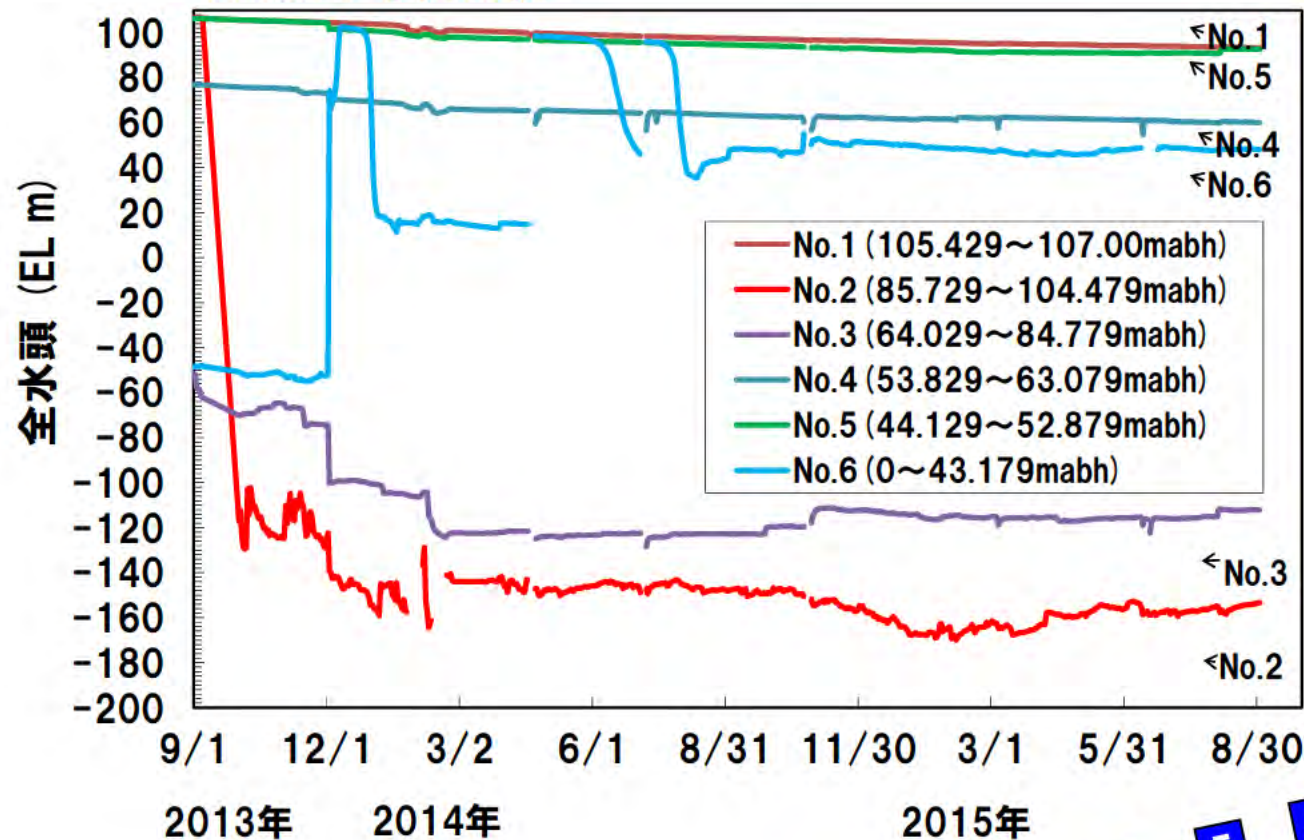
水理地質特性の把握(地質観察と孔間応答試験)



- 割れ目低密度帯
- 岩盤等級:B~CH級
- 水圧応答, 坑道壁面やボーリング孔での割れ目観察により, 数か所の湧水割れ目の連結性を確認
- 割れ目面交差部を主な水みちと仮定し, 割れ目の連結性をモデル化

水理地質特性の把握(水圧低下と地質構造)

12MI33号孔の例

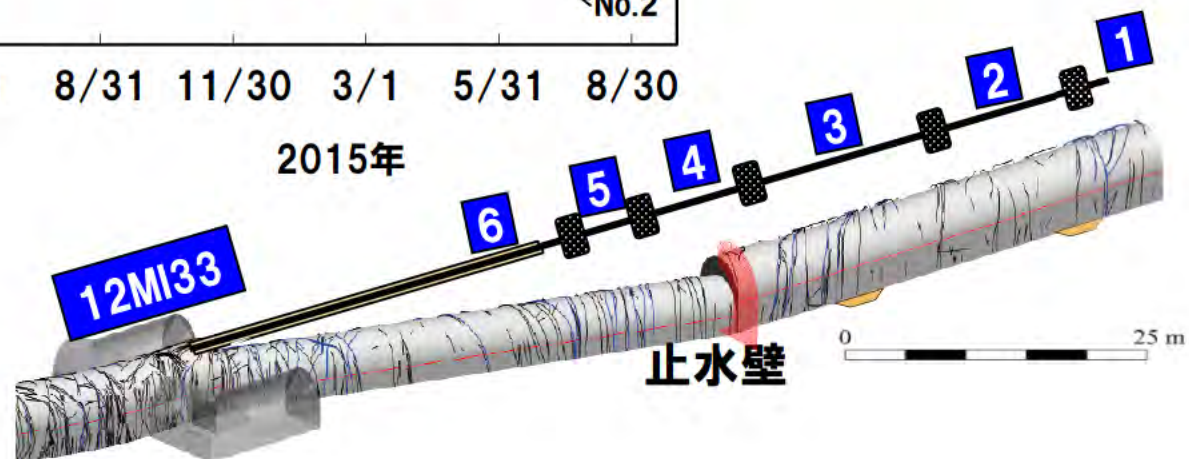


・冠水坑道に連結する割れ目を含む観測区間 (No.2, No.3)において、水圧が低下

・健岩部においては坑道直近においても水圧の低下量は小さい

⇒冠水坑道周辺においては、岩盤中の割れ目の連続性が低い傾向がある

坑道から各観測区間までの
離間距離は約5m



不均質な透水性構造を考慮した水理地質構造のモデル化

不均質な透水性構造を考慮した水理地質構造のモデル化の取り組み

原位置調査
(ボーリング調査, 坑道壁面地質調査)

割れ目の分布特性の統計量の推定
(幾何学的特性, 水理学的特性)

確率論的な割れ目ネットワークモデルの構築
(100リアライゼーション*)

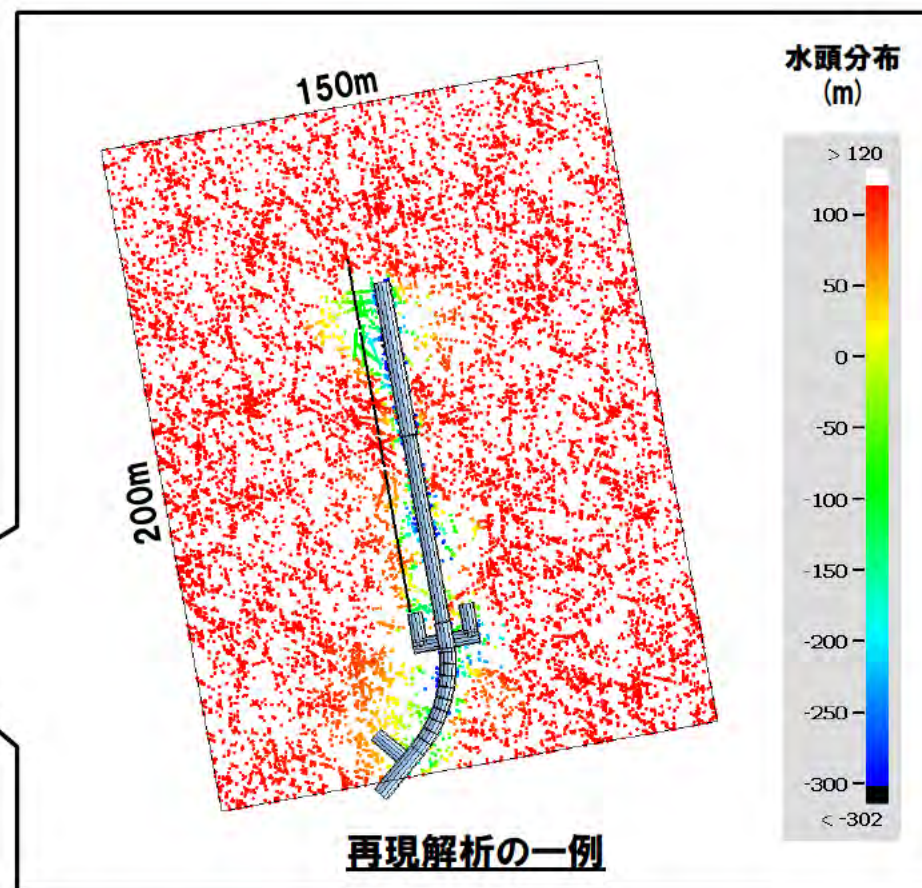
冠水坑道掘削に伴う坑道への湧水量および
周辺の水圧変化の再現解析

解析結果の統計的整理および
実測値を合理的に説明可能なモデルの抽出

再冠水試験に伴う坑道周辺の
水圧変化の予測

割れ目ネットワークモデルの構築フロー

*割れ目ネットワークモデルの構築を複数回実施すること

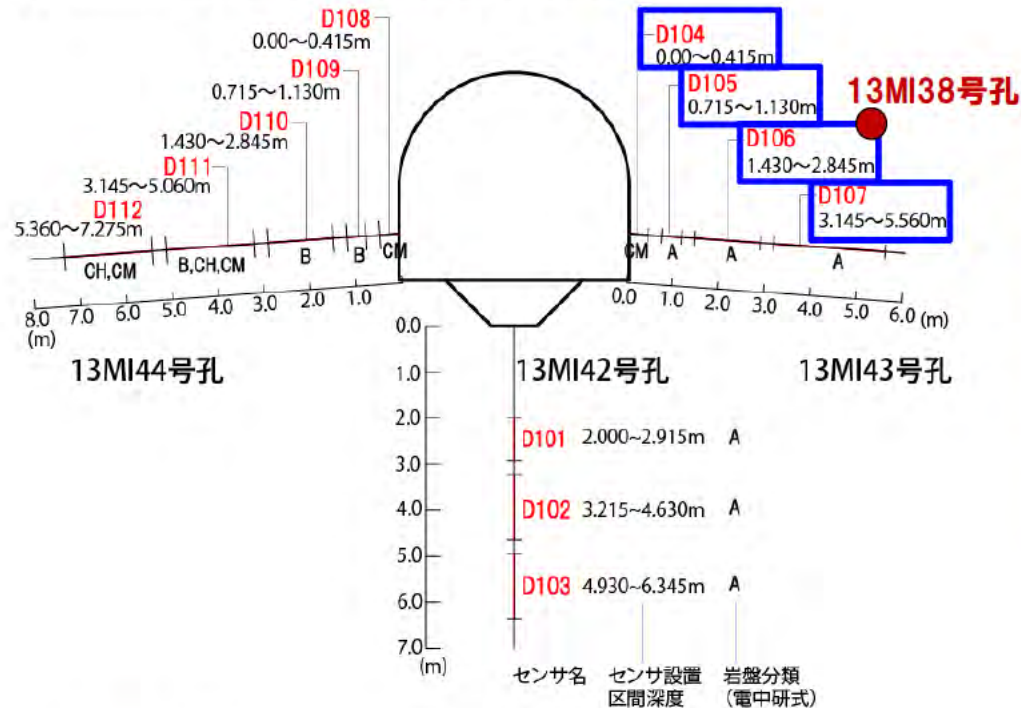


再現解析の一例

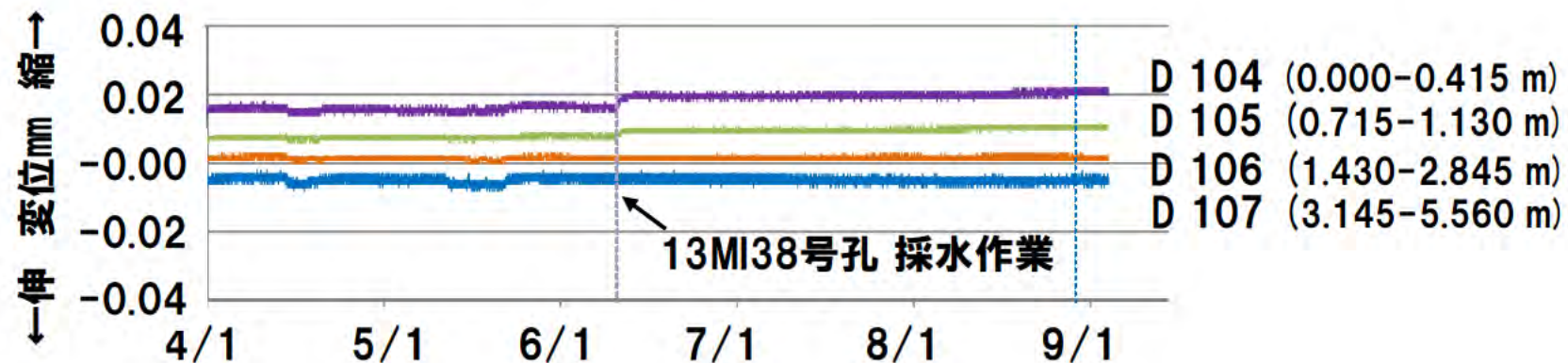
・坑道周辺の割れ目の分布特性が再現解析に及ぼす影響(リアライゼーション間のばらつき)を確認

岩盤変位の把握

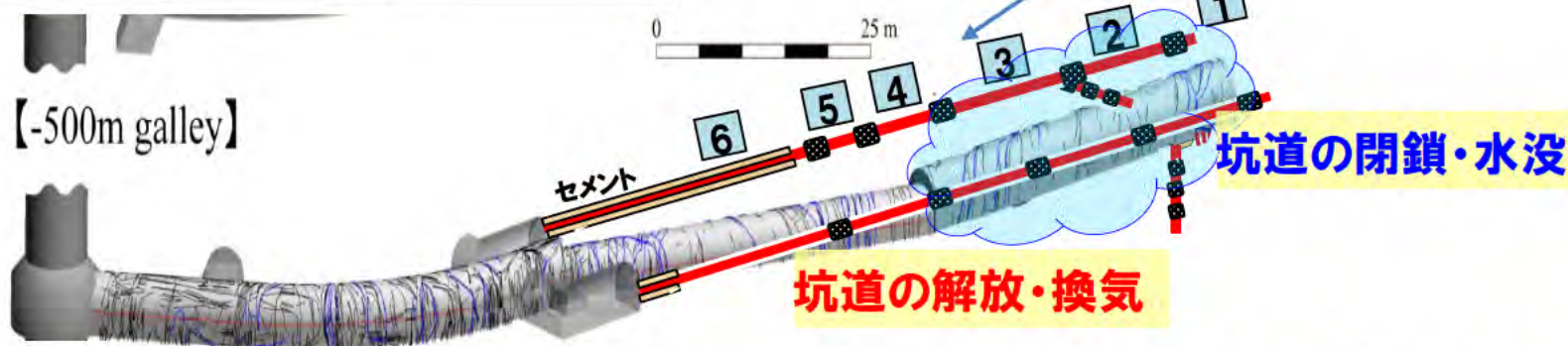
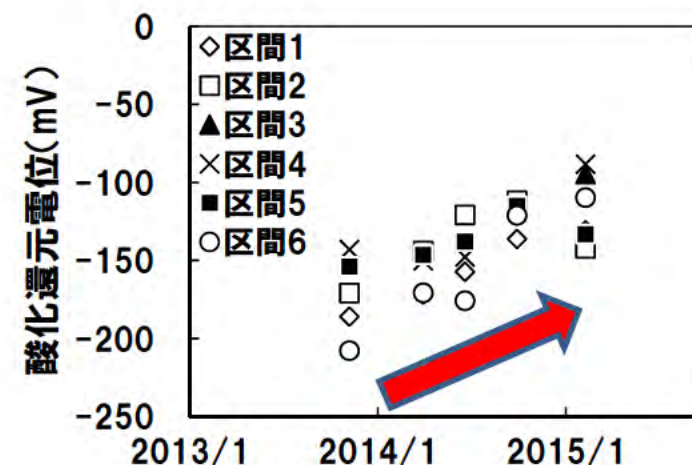
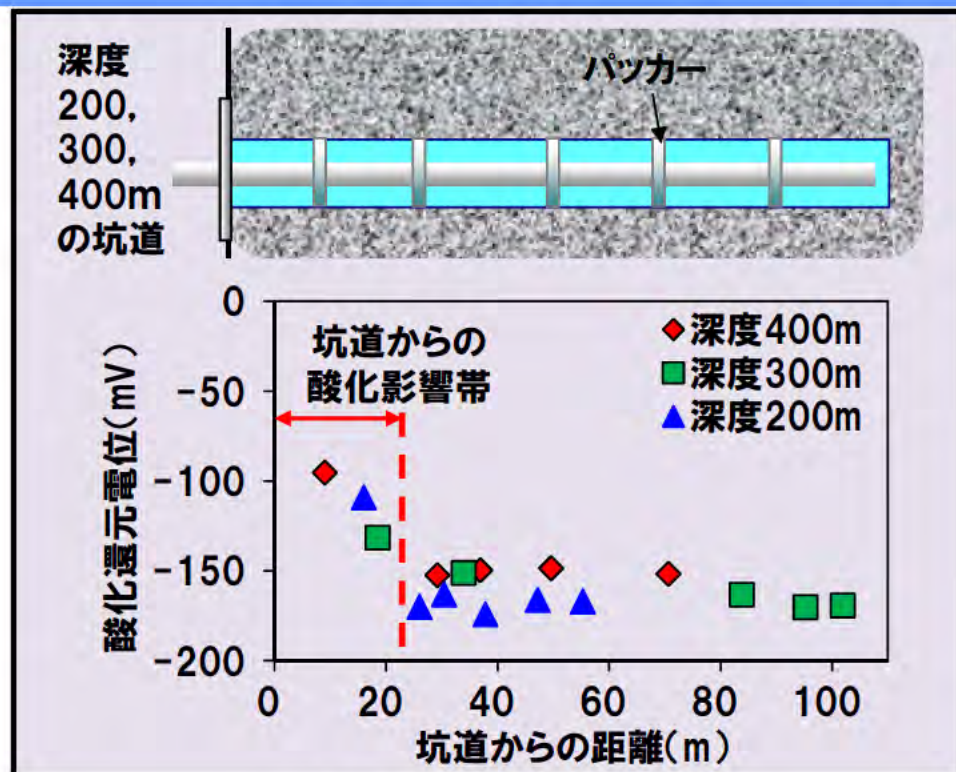
光ファイバ式岩盤変位計測定位置



- 光ファイバ式岩盤変位測定システムは、0.01mmオーダーでの計測が可能となっていることを確認
- 近傍での地下水の採水作業による一時的な圧力低下に伴うと考えられる変化が生じており、このデータから、見かけの岩盤の弾性係数を推定できるかどうかを検討中

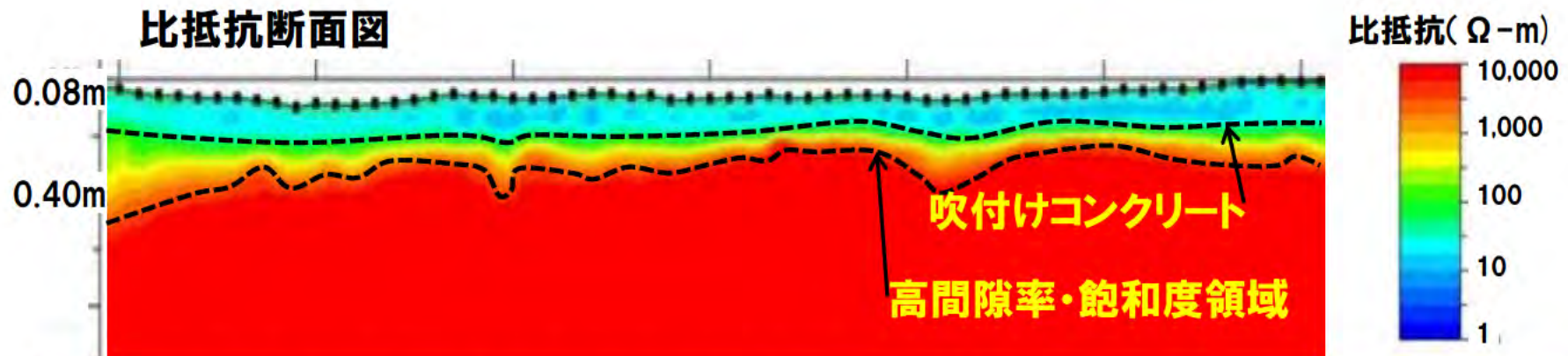
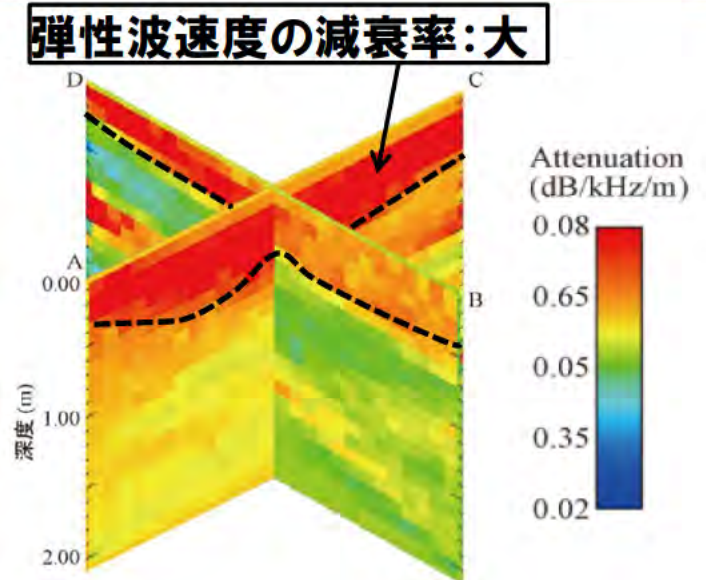
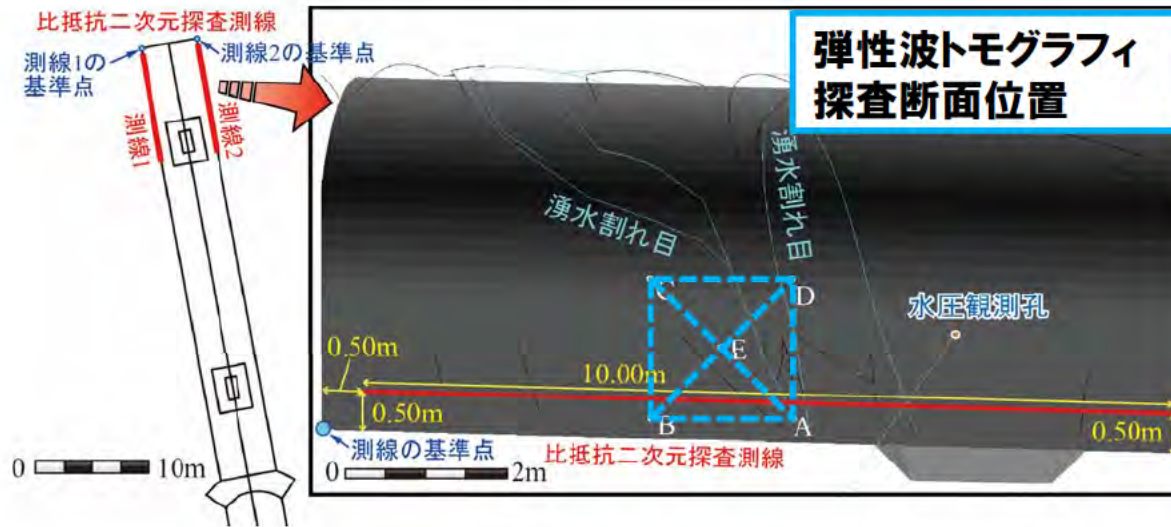


酸化還元状態の変化の把握



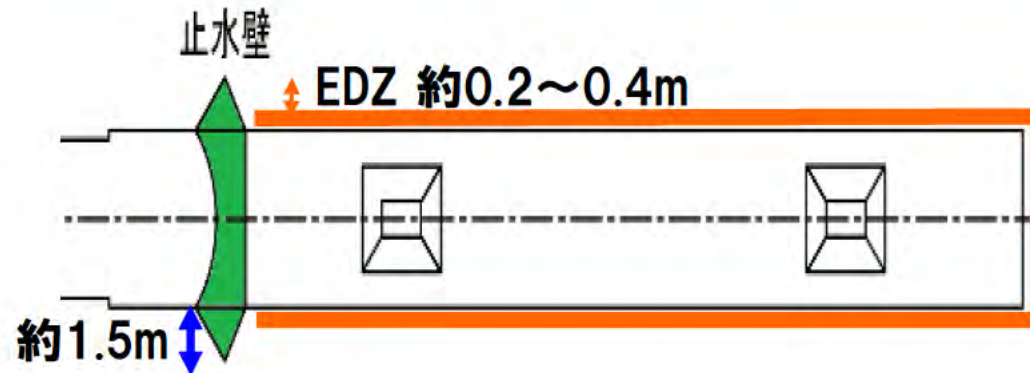
坑道掘削後2年間で、割れ目の分布に関係なく多数の観測区間で酸化還元電位が上昇

EDZの把握(弾性波・比抵抗トモグラフィ)



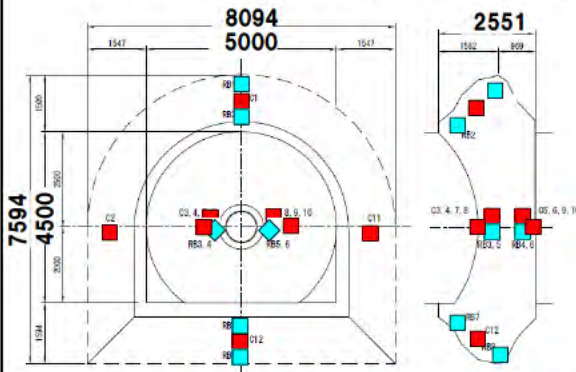
- 物性値(弾性波速度・比抵抗値)の変化領域に基づいて、岩盤の力学的損傷領域を坑道壁面から約20~40cm程度と推定
- 弾性波速度については、特に減衰率に着目することで差が明瞭になることを確認

止水壁の設置と観測機器配置

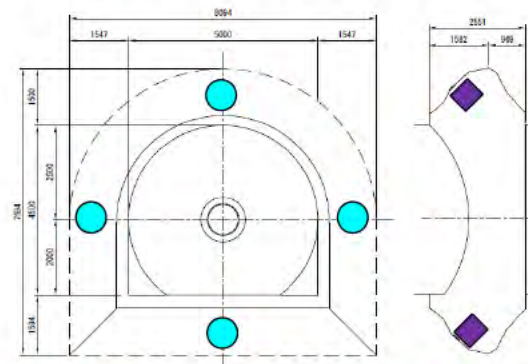


観測機器レイアウト

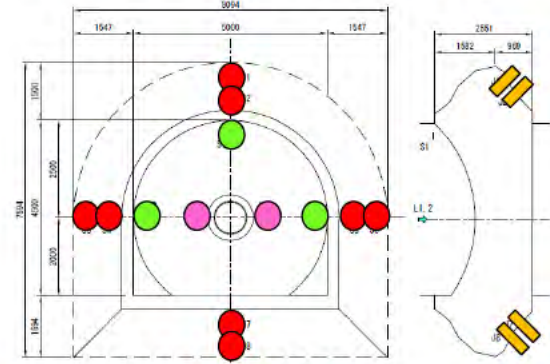
【止水壁内部の応力計測】



【止水壁～岩盤間に作用する応力の計測】



【止水壁～岩盤間の変位計測】



鉄筋応力計(RB)



コンクリート内部
応力計(C)



土圧計(応力計)



継目計



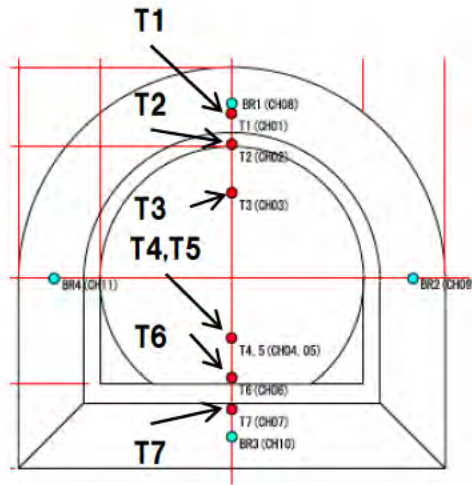
シリンダー式変位計



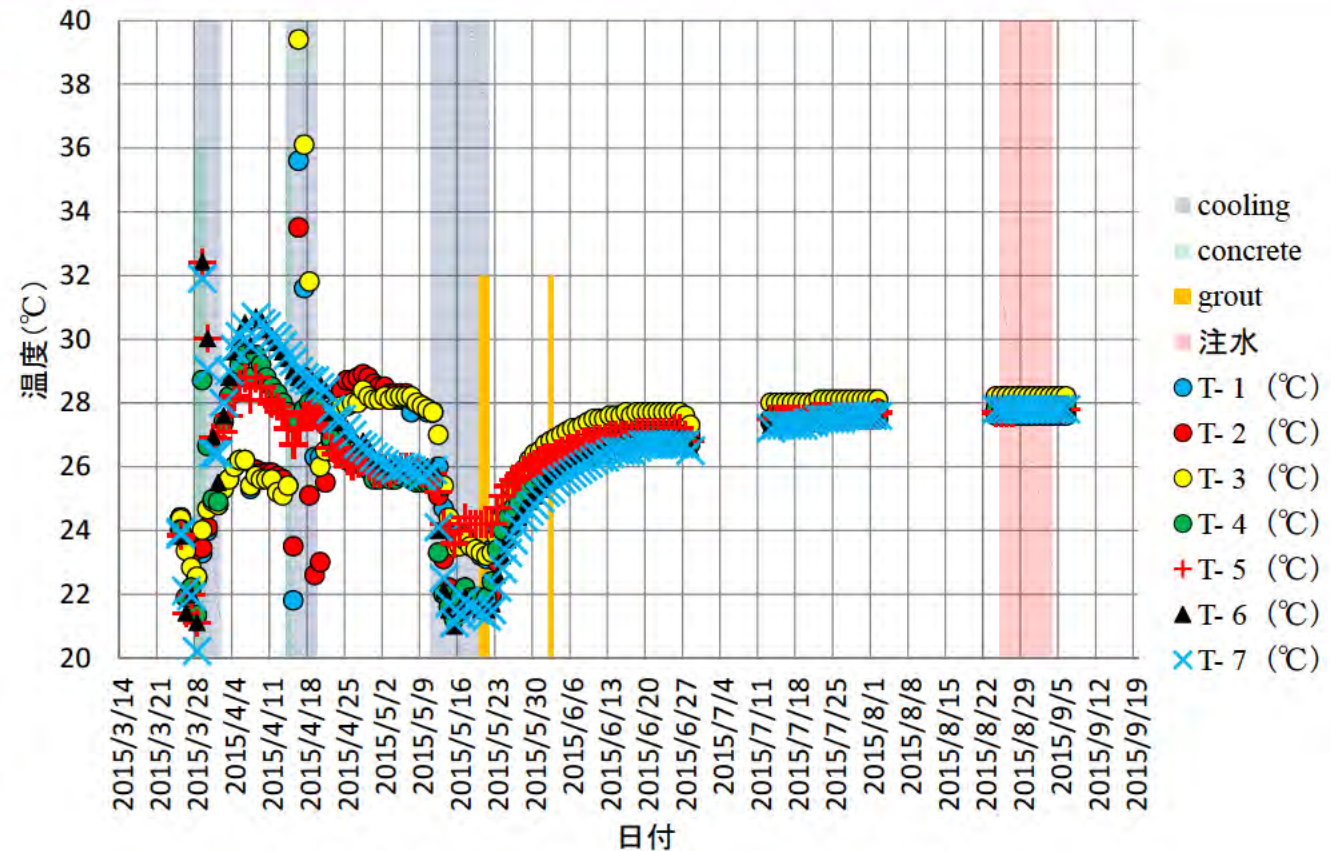
レーザー変位計



止水壁内部のモニタリング例



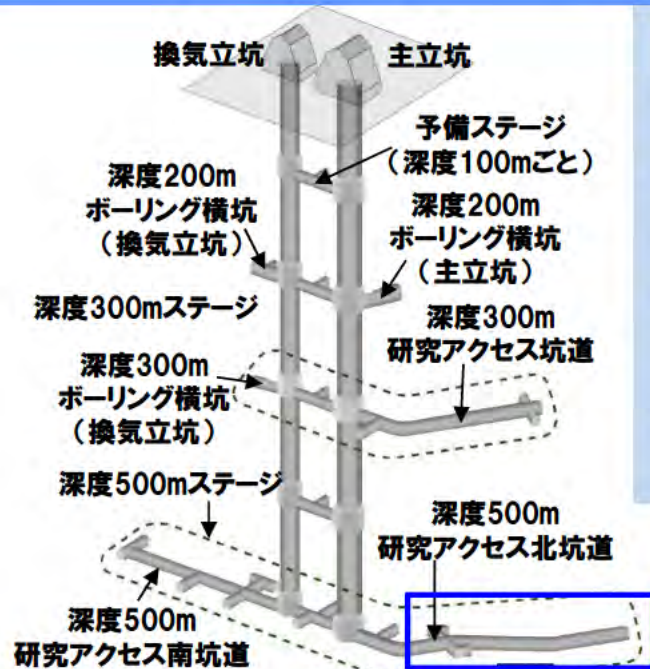
止水壁内部の
温度測定センサー位置



止水壁内部の温度のモニタリング結果

- ・温度応力によるひび割れ低減のために設置したクーリングシステムによる、コンクリート硬化時の温度上昇の抑制効果(冷却効果)を確認。止水壁の温度は、地温・水温で定常化
- ・コンクリートの引張強度(設計時の想定では5MPa)を超える応力が作用している鉄筋部分があるため、止水壁の目視観察を継続中

再冠水試験の全体概要

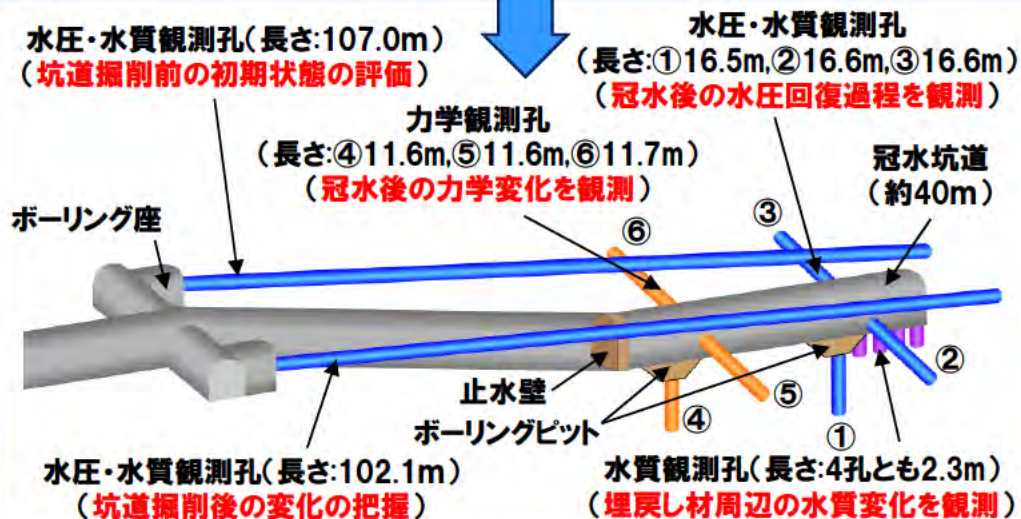
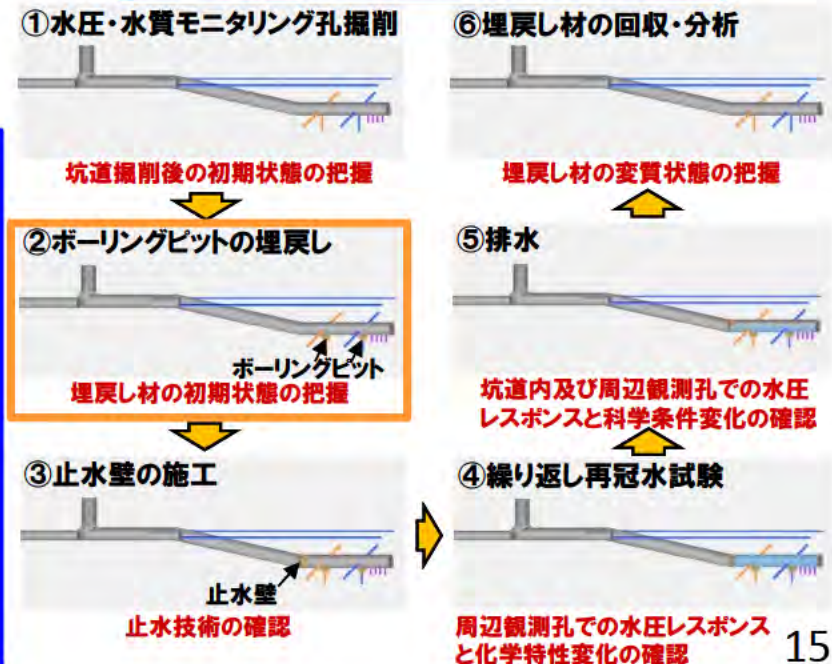


【坑道埋め戻し技術の開発の目的】

地層処分の長期安全性に関わる不確実性低減に向け、

- ・坑道掘削・閉鎖に伴う地質環境の変遷等の現象理解及び予測技術の構築
- ・坑道周辺の地質環境調査技術(特にモニタリング技術)の整備
- ・地質環境の回復に有効な坑道閉鎖手順・工法等の坑道閉鎖技術の整備

《再冠水試験の手順》

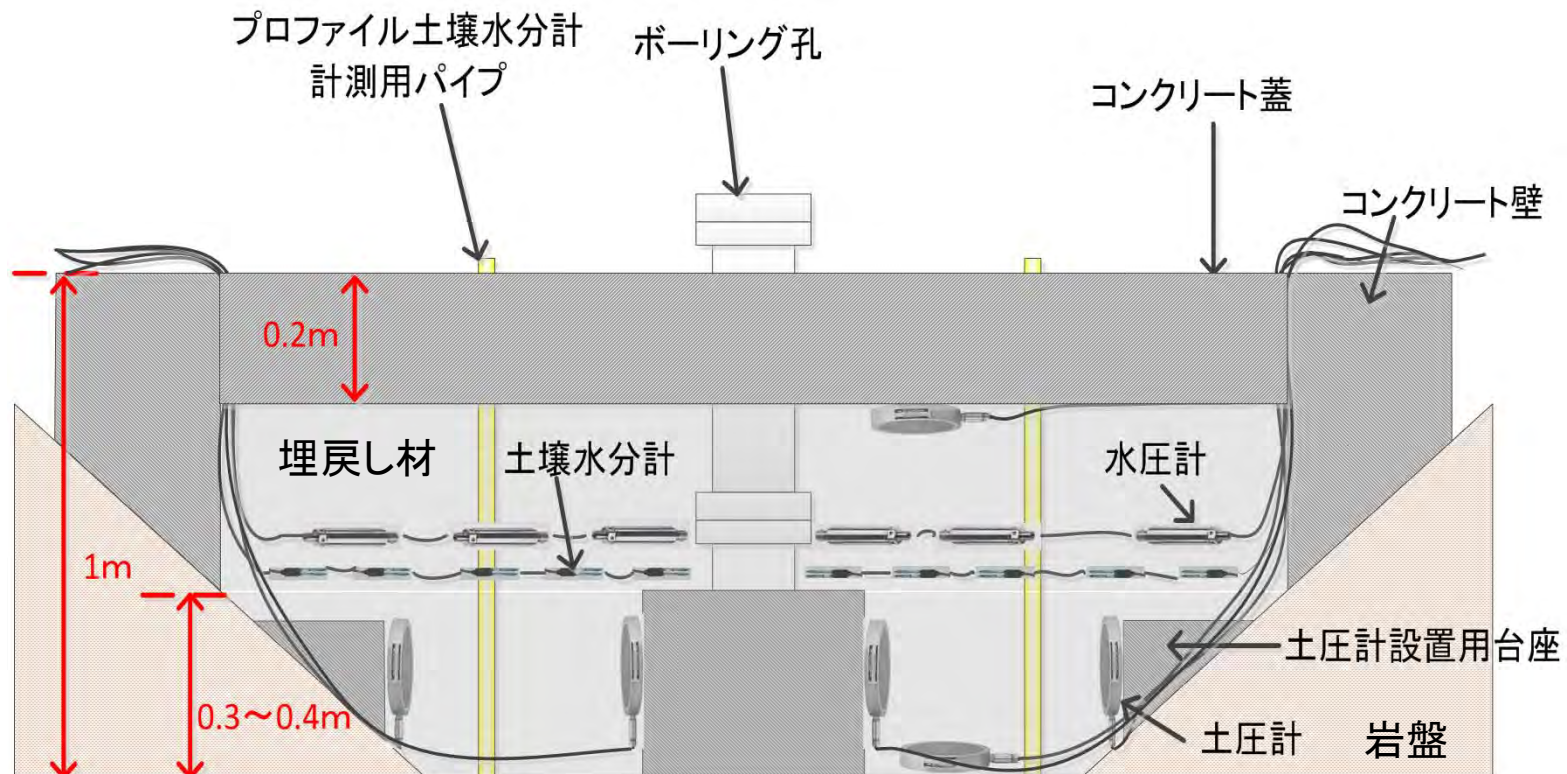


ボーリングピットの埋戻し

目的: 坑道埋戻し試験のための埋戻し材の検討
埋戻し材による周辺環境への影響の把握
測定用各種センサーの適用性評価

埋戻し材: 碎石・砂・ベントナイト (50:35:15)、砂・ベントナイト (85:15)

作業日: 2014年9月11日、9月15日



ボーリングピットの埋戻し



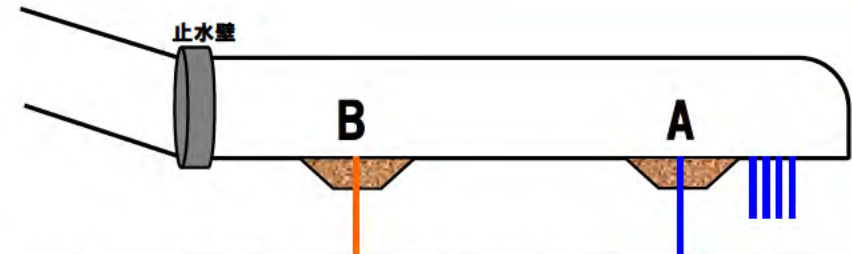
約4×3mのピット



粘土(クニゲルV1) 粘土(クニゲルGX)



砂 砕石



ピット位置	粘土	砂	砕石
Aピット(奥:切羽側)	15	35	50
Bピット(手前:立坑側)	15	85	-

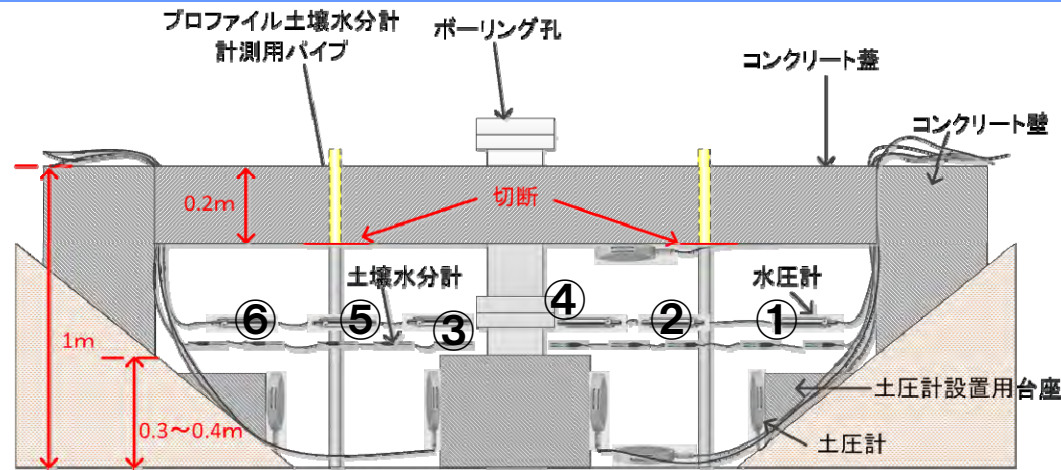


観測機器を埋設しながら、7～8層にわたって転圧

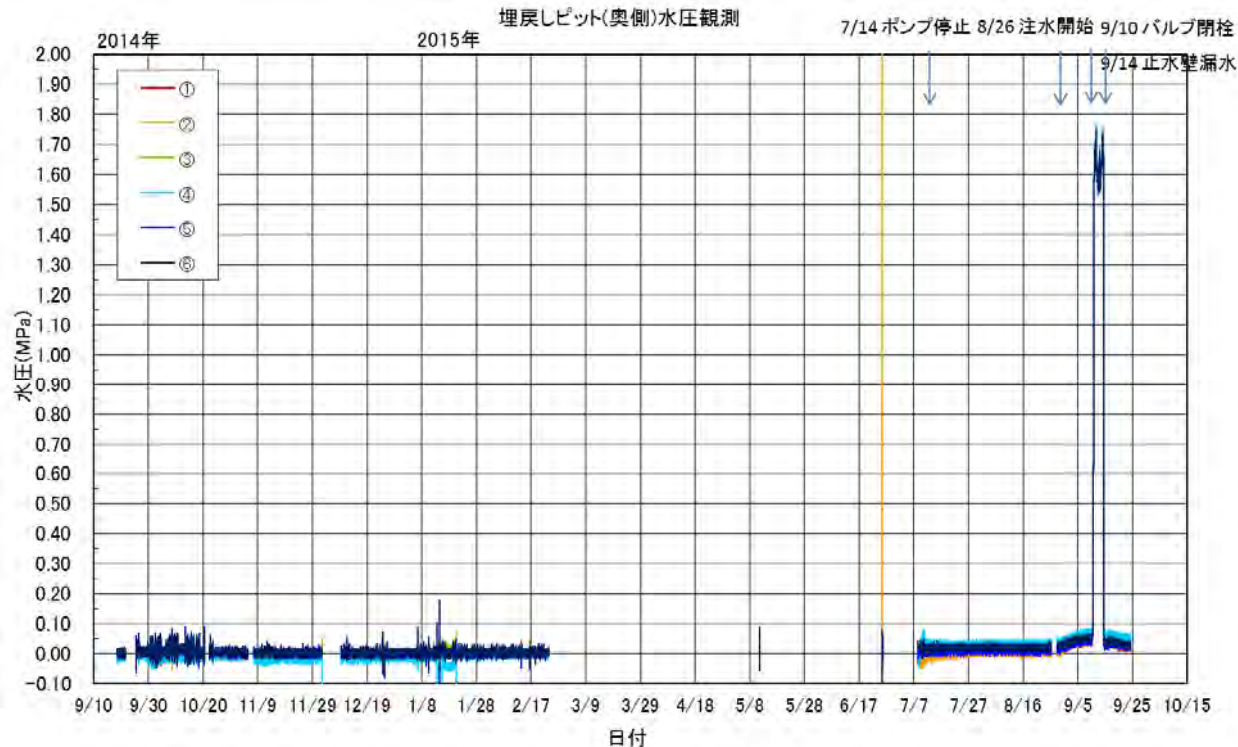


凡例	センサー	個数	観測機器の確認内容
	土圧計	6	膨潤圧
	水圧計	7	水圧回復、飽和過程
	土壌水分計	11	飽和・不飽和状態

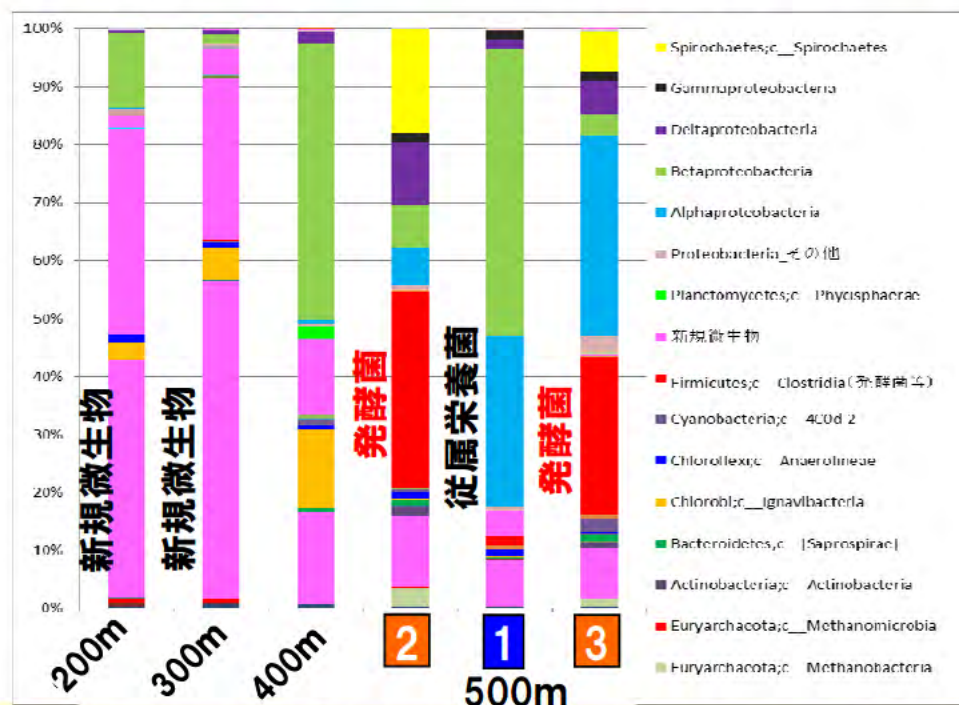
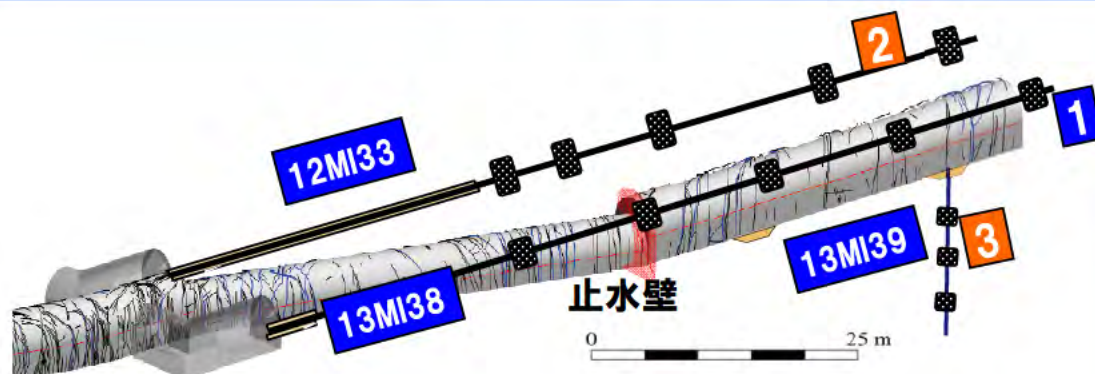
埋め戻材中の地質環境特性計測(水圧の例)



埋め戻し材中の水圧は、
止水壁性能確認試験開始前まで、ほぼ0MPa。
冠水坑道内の水圧上昇に
応答して、同等の
圧力まで上昇



埋め戻し材周辺の微生物特性の変化



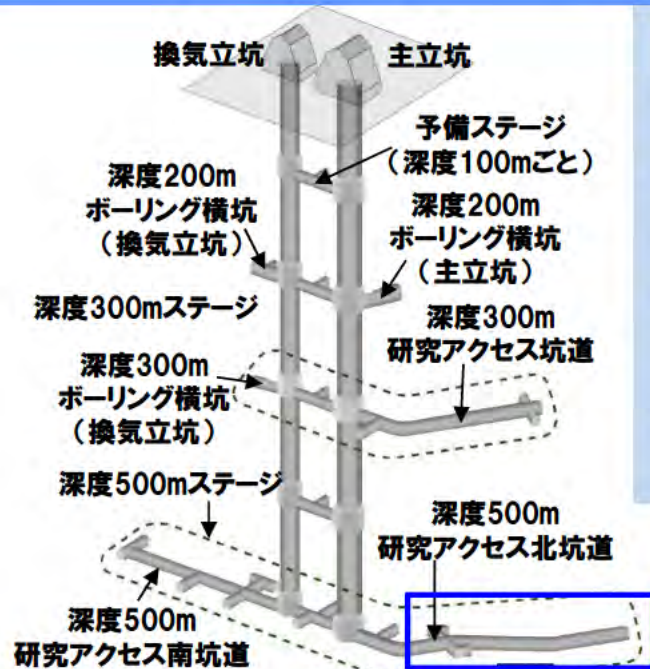
通常の地下水中の微生物
(10MI26 区間1)



埋め戻し材料周辺の微生物
(13MI39 区間3)

埋め戻し材周辺とそれに水みちが連結する区間では発酵菌の割合が高く、埋め戻し材由来の有機物を利用した発酵反応が起こっている。

再冠水試験の全体概要



【坑道埋め戻し技術の開発の目的】

地層処分の長期安全性に関わる不確実性低減に向け、

- ・坑道掘削・閉鎖に伴う地質環境の変遷等の現象理解及び予測技術の構築
- ・坑道周辺の地質環境調査技術(特にモニタリング技術)の整備
- ・地質環境の回復に有効な坑道閉鎖手順・工法等の坑道閉鎖技術の整備

《再冠水試験の手順》

①水圧・水質モニタリング孔掘削



⑥埋戻し材の回収・分析



②ボーリングビットの埋戻し



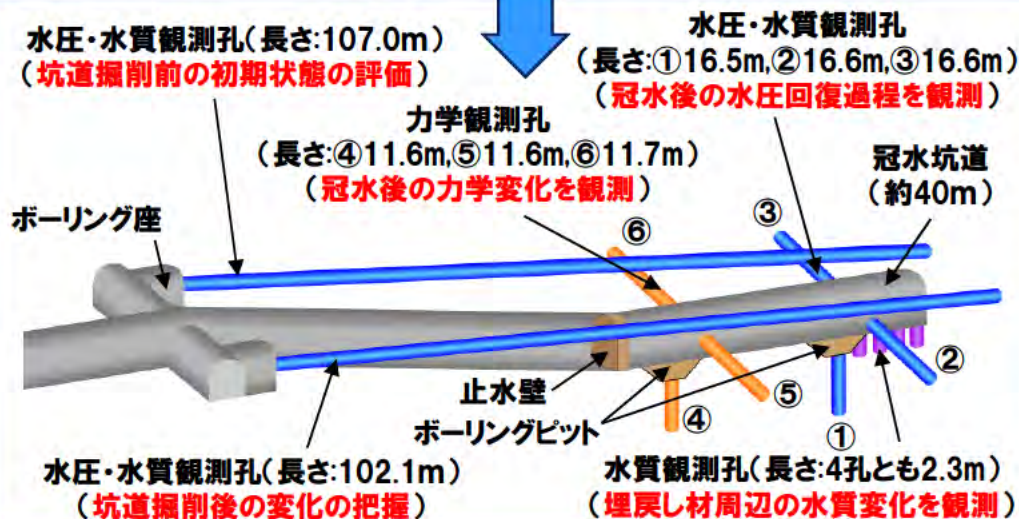
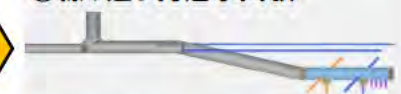
⑤排水



③止水壁の施工



④繰り返し再冠水試験



冠水坑道のこれまでの状況



必須の課題(平成27～31年度)

①地下坑道における工学的対策技術の開発

◆大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術

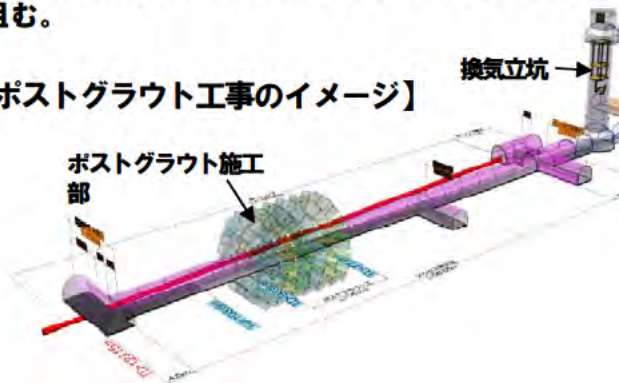
◆地下水管理技術

【概要】

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

また、地下水排水処理技術等の地下水管理技術の高度化にも取り組む。

【ポストグラウト工事のイメージ】



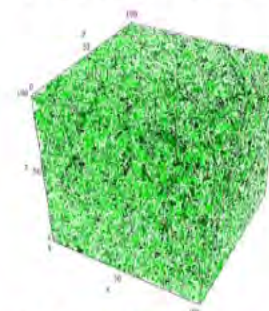
②物質移動モデル化技術の開発

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

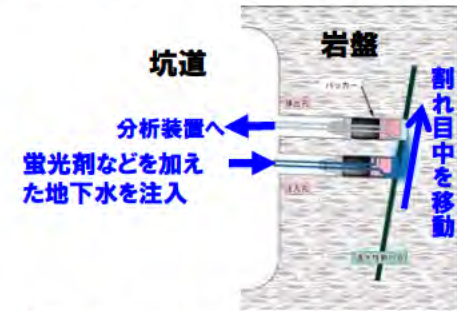
【概要】

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

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



【割れ目分布モデル】



【研究坑道内での物質移動試験の例】

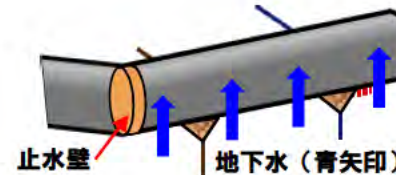
③坑道埋め戻し技術の開発

◆坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術

◆長期モニタリング技術など

【概要】

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

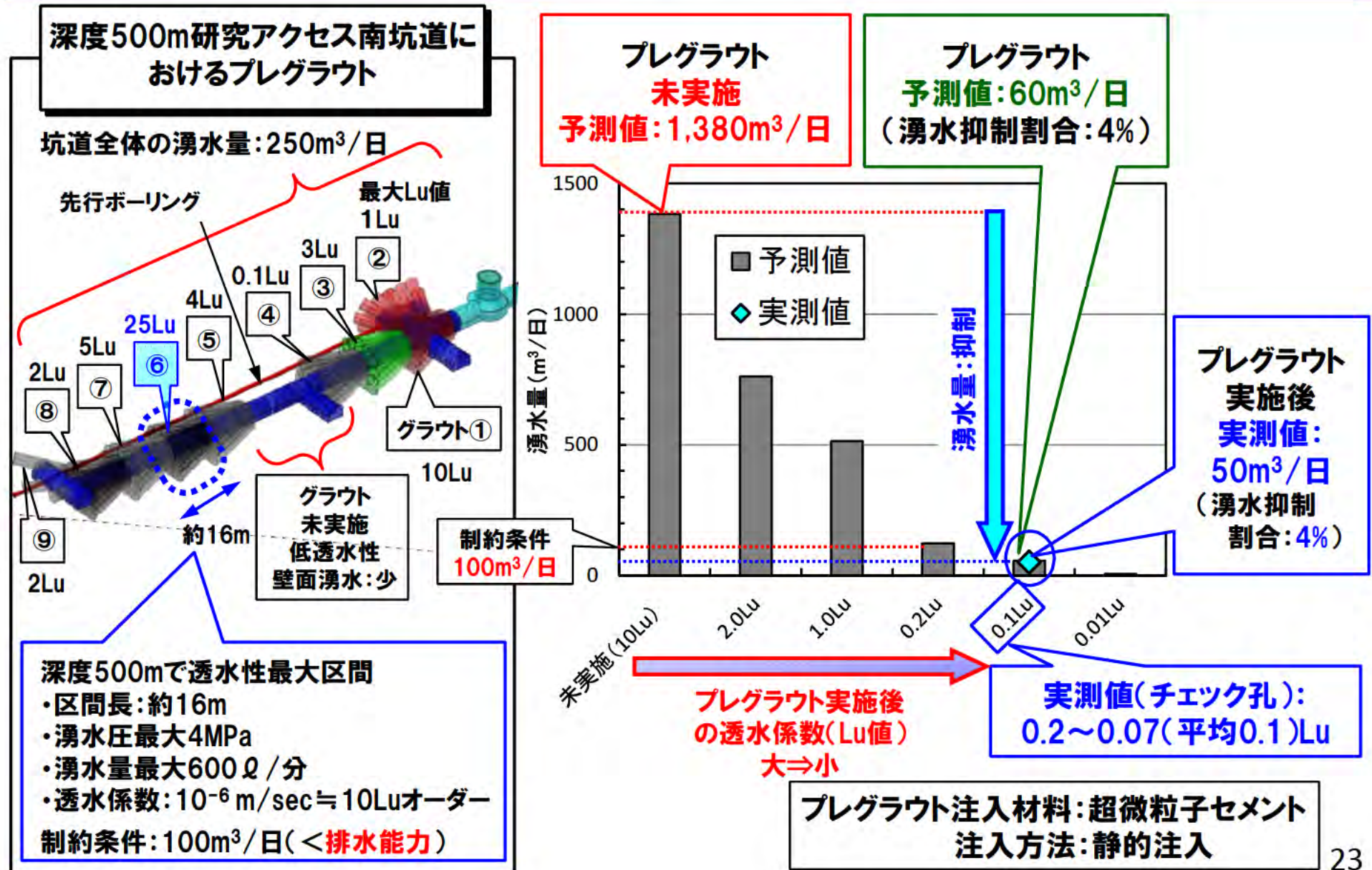


【再冠水試験のイメージ】

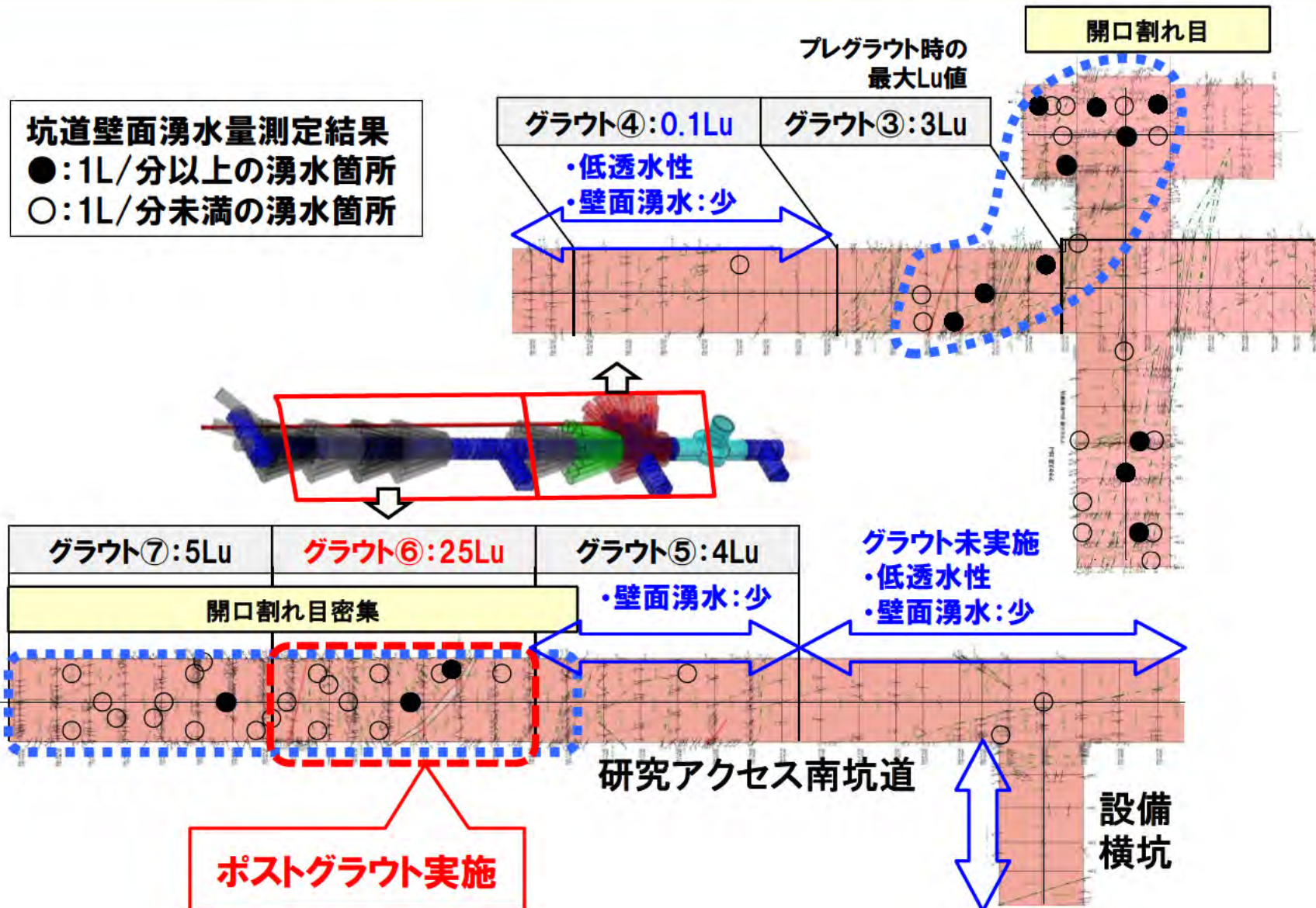


【モニタリング装置】

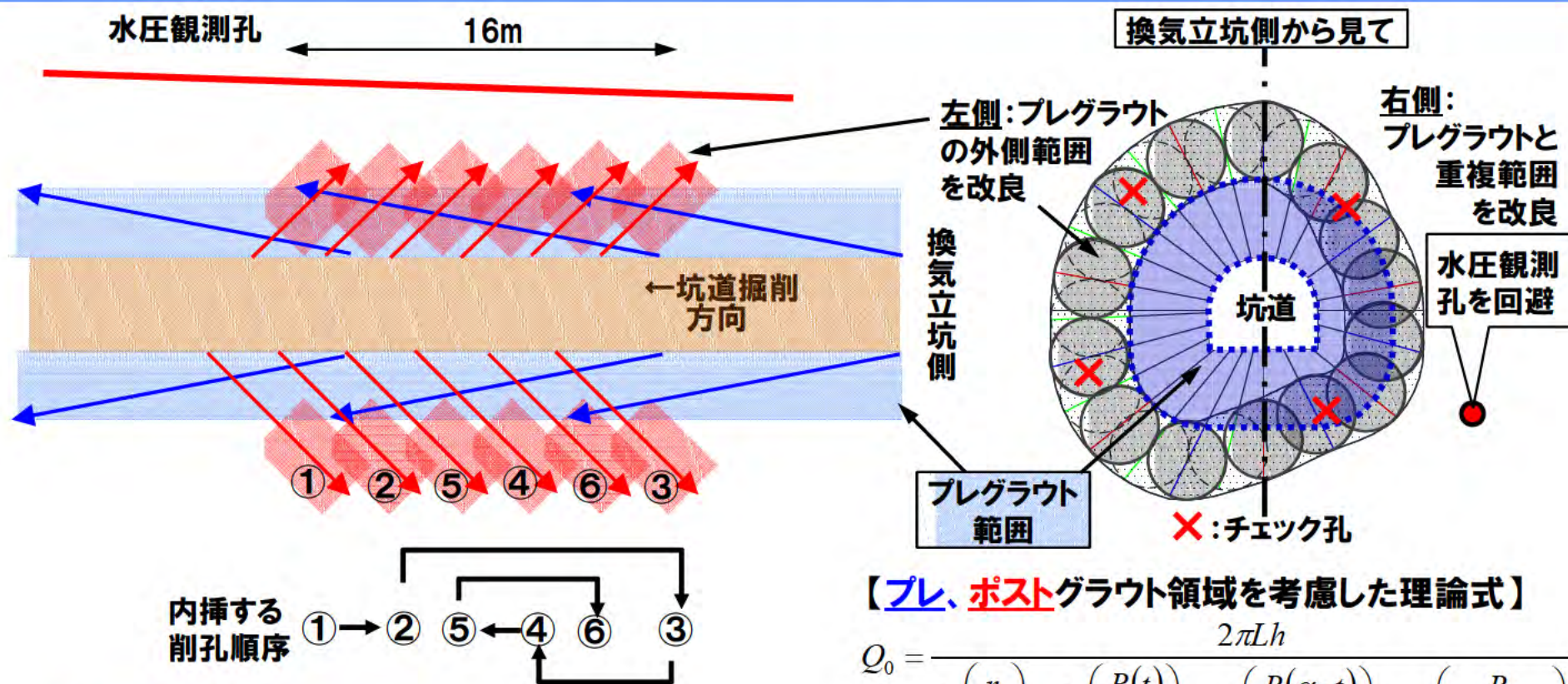
施工結果(プレグラウト)の評価



坑道掘削後の地質・湧水状況



ポストグラウトの実施:さらなる湧水の抑制を目指して



ポストグラウトの標準仕様

- プレグラウトと逆向きに削孔し外側を改良
- 削孔長5.5～9m(プレグラウト16m)
- ①～⑥の位置で削孔(内挿する順序)
- 標準削孔数: 26本/1箇所×6箇所
26本: 1、2次孔7本、3次孔8本、
チェック孔4本(プレグラウト: 25本/1箇所)

グラウト材料

①上部: 超微粒子、下部: 溶液型、②～⑥: 溶液型

注入方法

①静的、②上部: 複合動的、下部: 静的、③～⑥: 複合動的

【プレ、ポストグラウト領域を考慮した理論式】

$$Q_0 = \frac{2\pi Lh}{\frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}{k_0} + \frac{\ln\left(\frac{R(t)}{r_1}\right)}{k_{pre}} + \frac{\ln\left(\frac{R(\alpha \cdot t)}{R(t)}\right)}{k_{post}} + \frac{\ln\left(\frac{R_1}{R(\alpha \cdot t)}\right)}{k_w}}$$

プレグラウトの項 ポストグラウトの項

ポストグラウトの注入材料と注入方法

溶液型グラウト

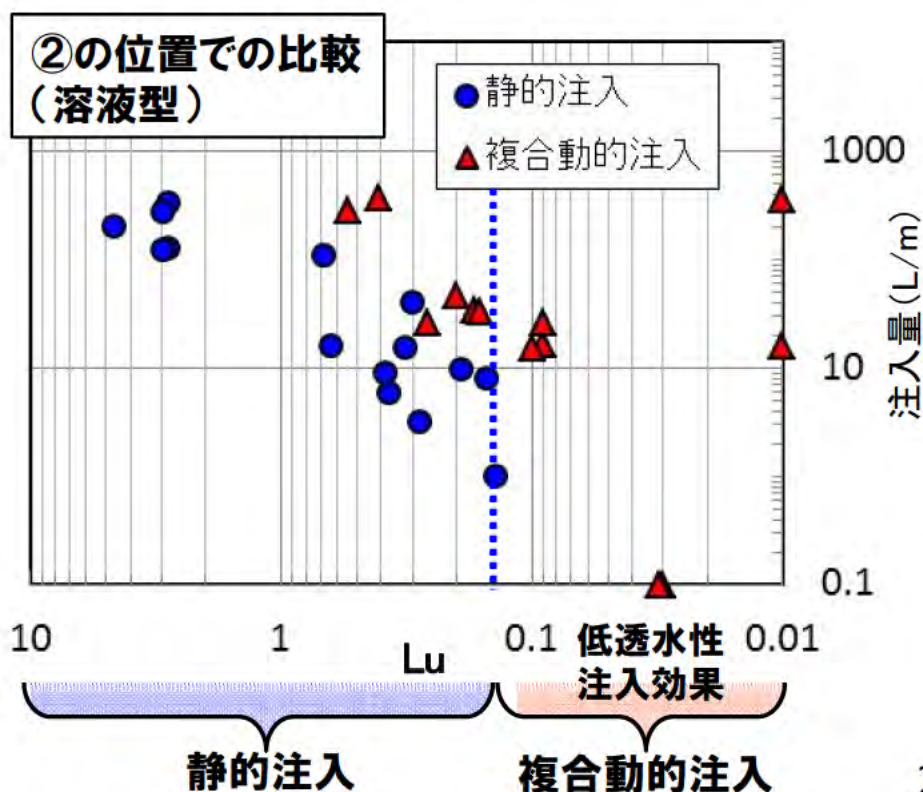
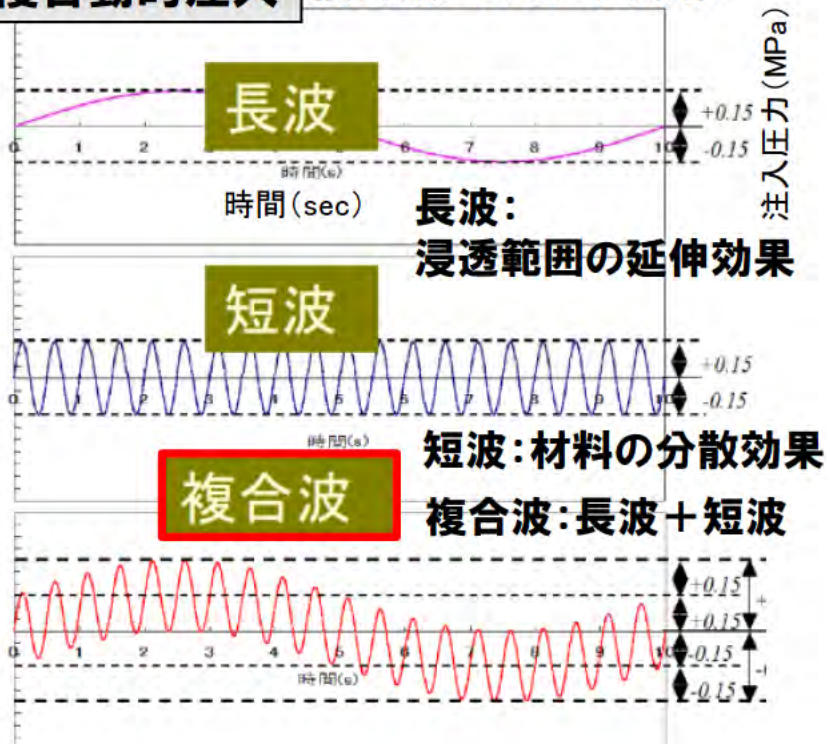


【コロイダルシリカ】【硬化促進剤】【練混後】
(主成分 SiO_2) + 水

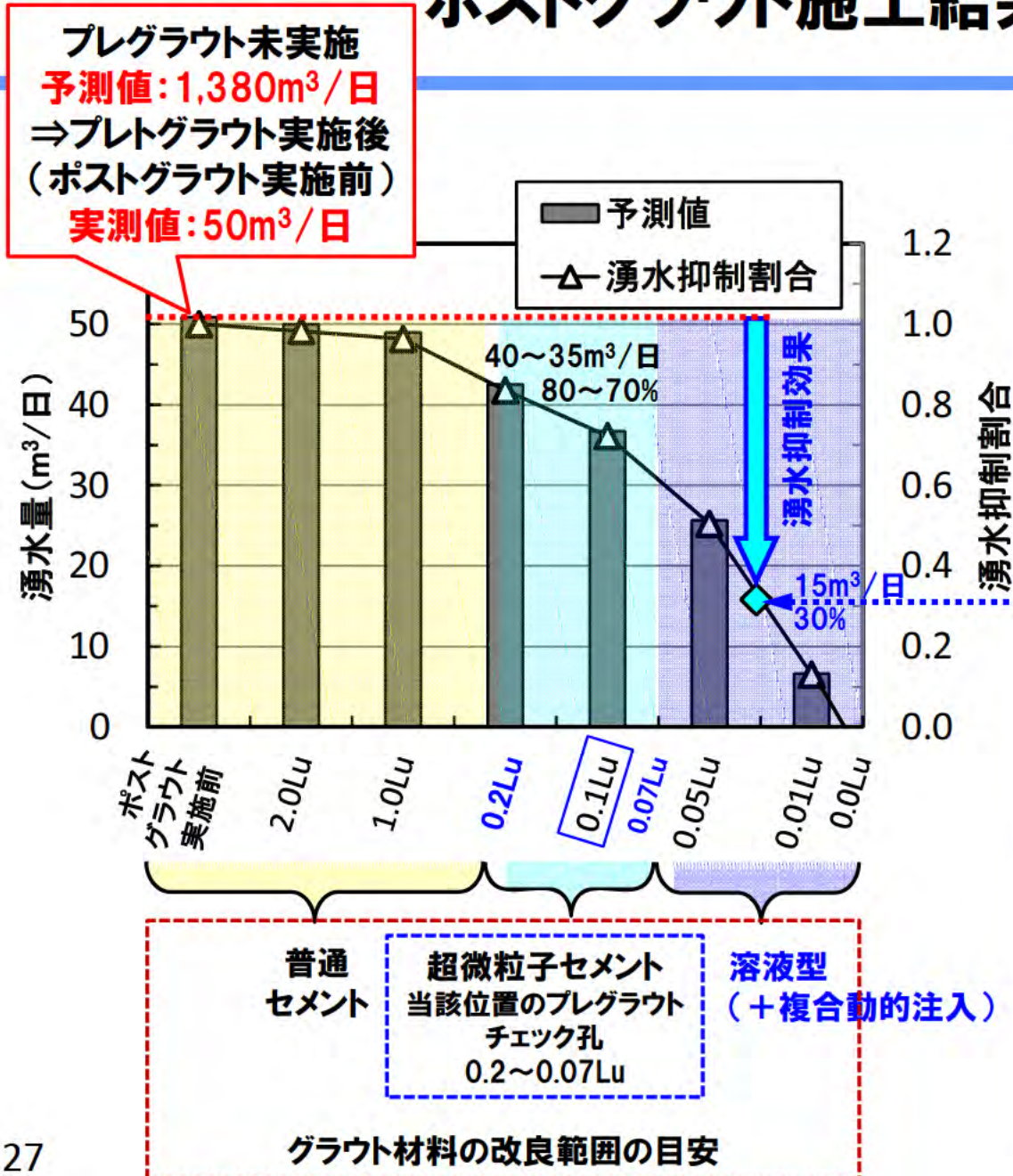
【硬化後】

- 高い浸透性: 粒径10~20nm程度
超微粒子セメントの1/1000程度
(超微粒子は普通セメントの1/10~1/5程度)
- ゲルタイム調整が可能
- 優れた耐久性: 劣化因子(Naイオン)を除去

複合動的注入 複合波による注入効果



ポストグラウト施工結果の評価



【プレグラウト】

プレグラウト未実施の予測値
 $1,380\text{m}^3/\text{日}$ (坑道延長16m
区間)に対して、

- ・実施後の実測値 $50\text{m}^3/\text{日}$
- ・予測値の4%に低減
(湧水抑制効果96%)

【ポストグラウト】

$50\text{m}^3/\text{日}$ を $15\text{m}^3/\text{日}$

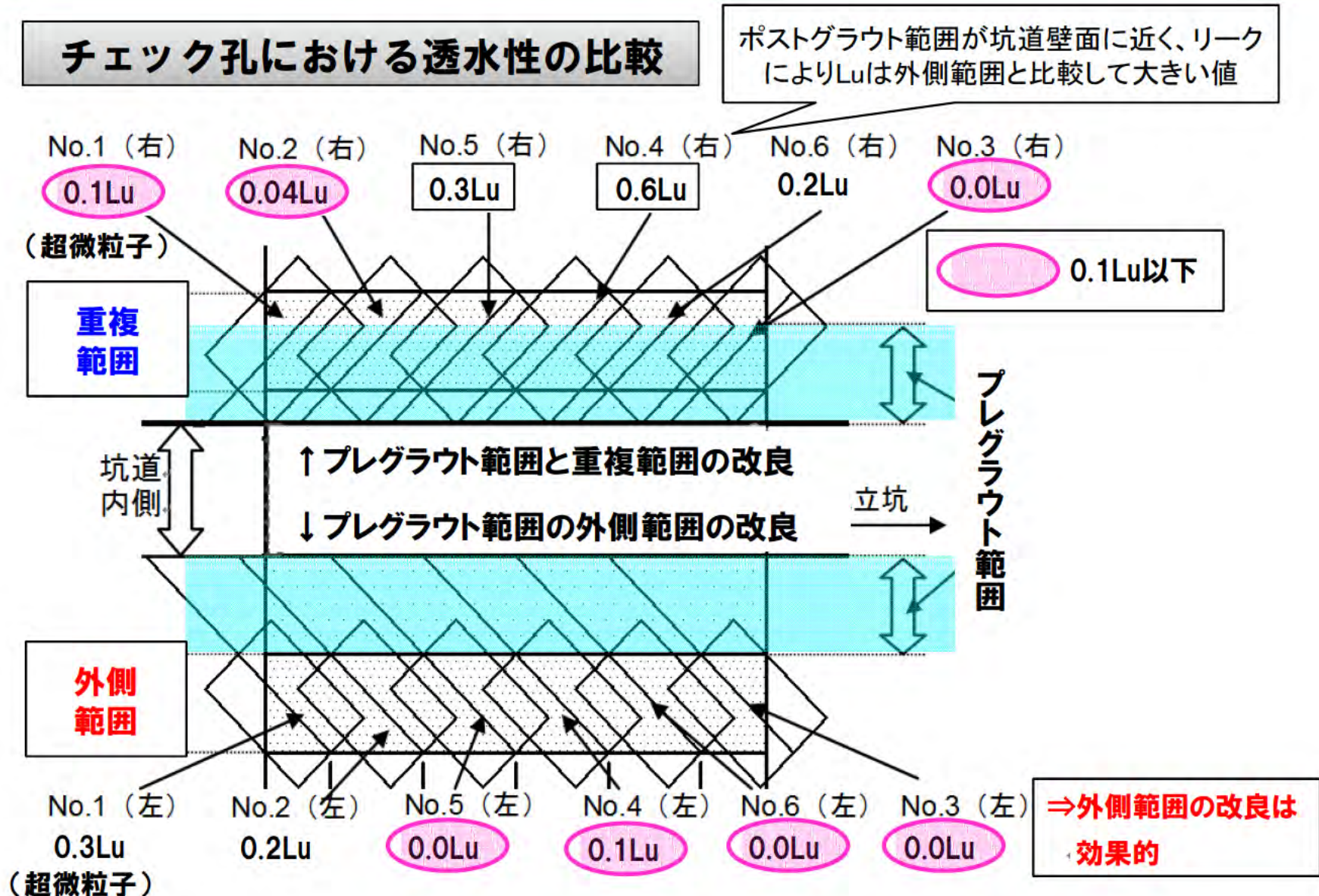
- ・実施前の30%に低減
(湧水抑制効果70%)
- ・透水係数(チェック孔):

0.0~0.6(平均0.1)Lu

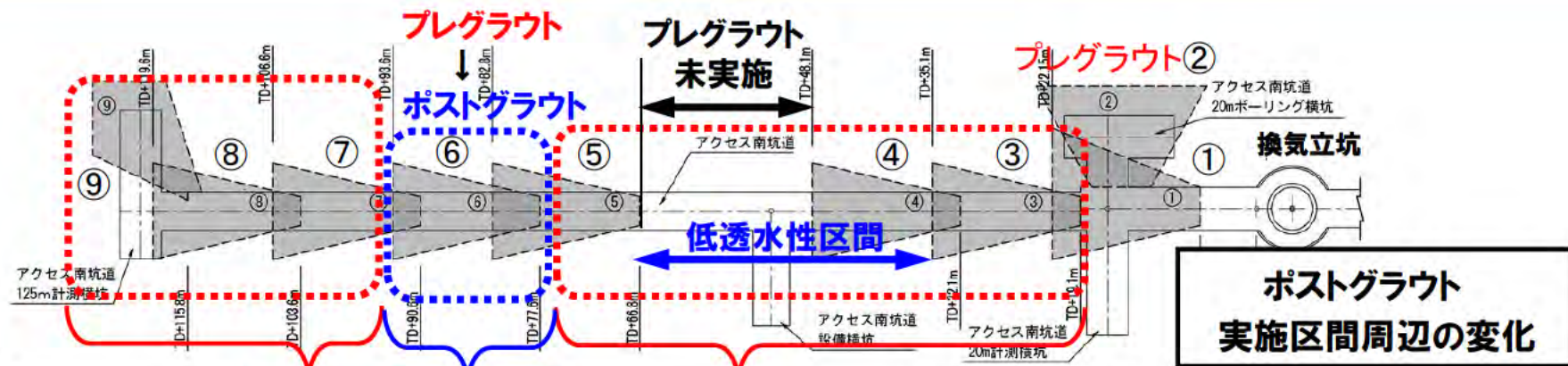
⇒・ポストグラウトによる湧水抑制
効果を確認

- ・プレ及びポストグラウトにより、
坑道掘削においてグラウト未実
施の予測に対して、およそ
1%(≒プレ4%×ポスト30%)
に低減(湧水抑制効果99%)

ポストグラウト範囲の透水性低減効果



ポストグラウトによる湧水抑制効果



湧水量 (m ³ /日)	南側	実施区間	換気立坑側	測定区間合計
実施前	50	50	40	140
実施後	55	15	50	120
変化量	5増加	35減少	10増加	20減少

・実施区間: 50 ⇒ 15m³/日 (30%)
(35m³/日減少)

・実施区間の南側と換気立坑側において増加

坑道延長1m当り
湧水量(41m)
実施前: 1.2m³/日/m
実施後: 1.3m³/日/m
変化量: 0.1m³/日/m
(増加)

坑道延長1m当り
湧水量(16m)
実施前: 3.1m³/日/m
実施後: 0.9m³/日/m
変化量: 2.2m³/日/m
(減少)

坑道延長1m当り
湧水量(69m)
実施前: 0.6m³/日/m
実施後: 0.7m³/日/m
変化量: 0.1m³/日/m
(増加)

- ポストグラウト実施区間
周辺へ湧水が回り込む
傾向
- プレとポストグラウトにより、
プレグラウト未実施周辺
の低透水性区間と同等
の湧水量に抑制

必須の課題(平成27～31年度)

①地下坑道における工学的対策技術の開発

◆大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術

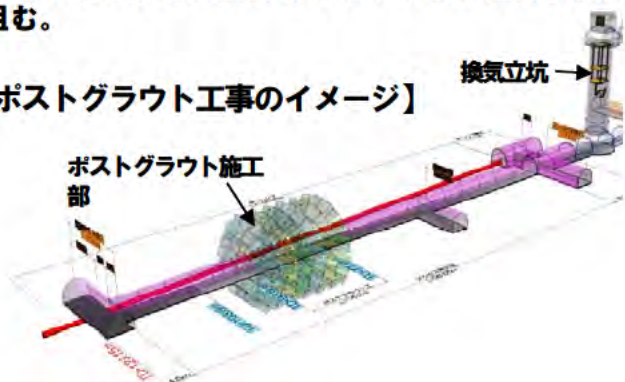
◆地下水管理技術

【概要】

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

また、地下水排水処理技術等の地下水管理技術の高度化にも取り組む。

【ポストグラウト工事のイメージ】



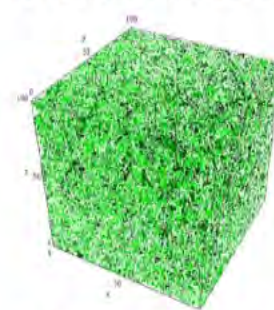
②物質移動モデル化技術の開発

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

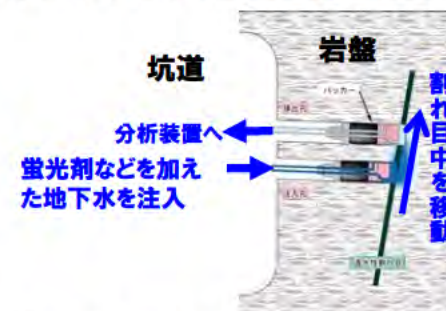
【概要】

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

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



【割れ目分布モデル】



【研究坑道内での物質移動試験の例】

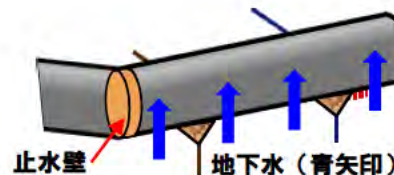
③坑道埋め戻し技術の開発

◆坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術

◆長期モニタリング技術など

【概要】

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



【再冠水試験のイメージ】



【モニタリング装置】

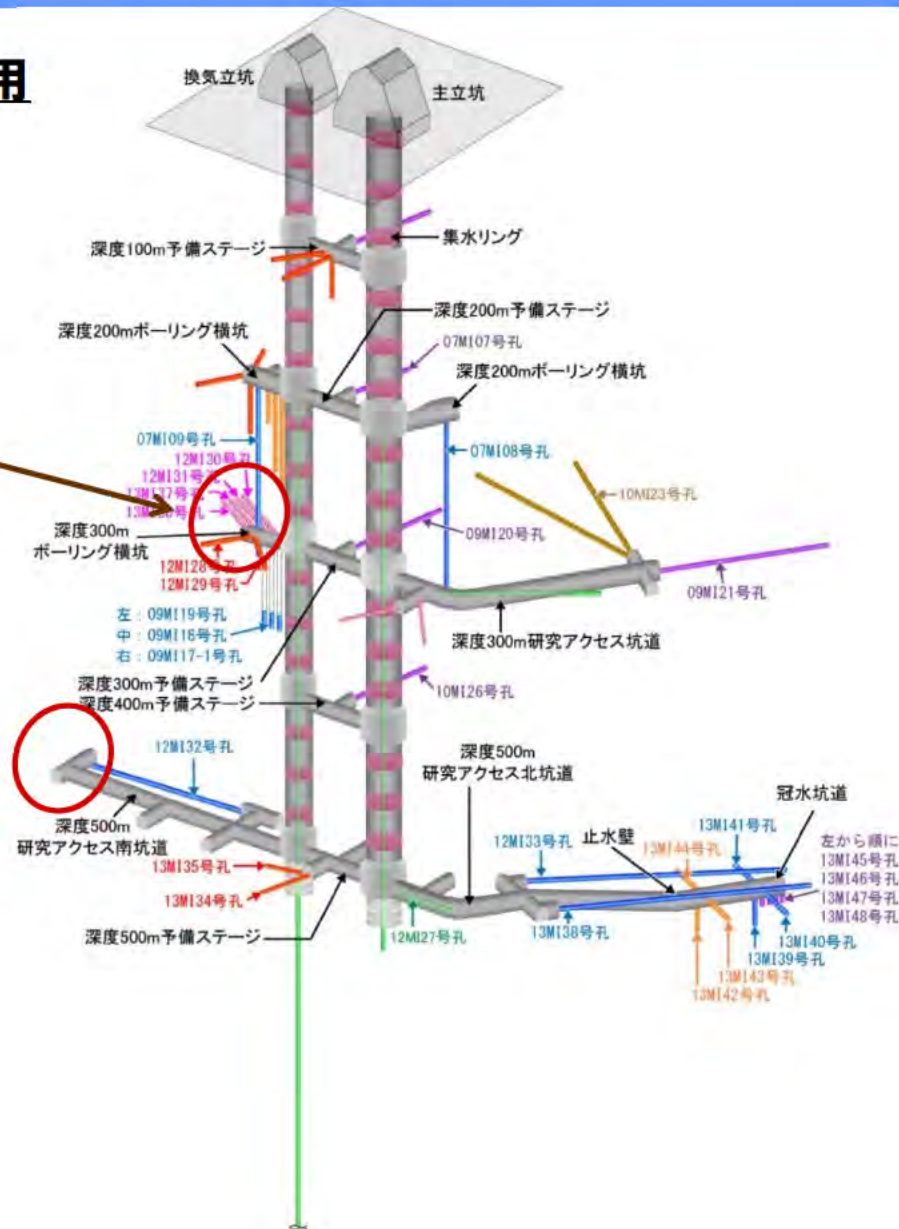
物質移動モデル化技術の開発

電力中央研究所との共同研究を活用
しつつ実施

トレーサー試験

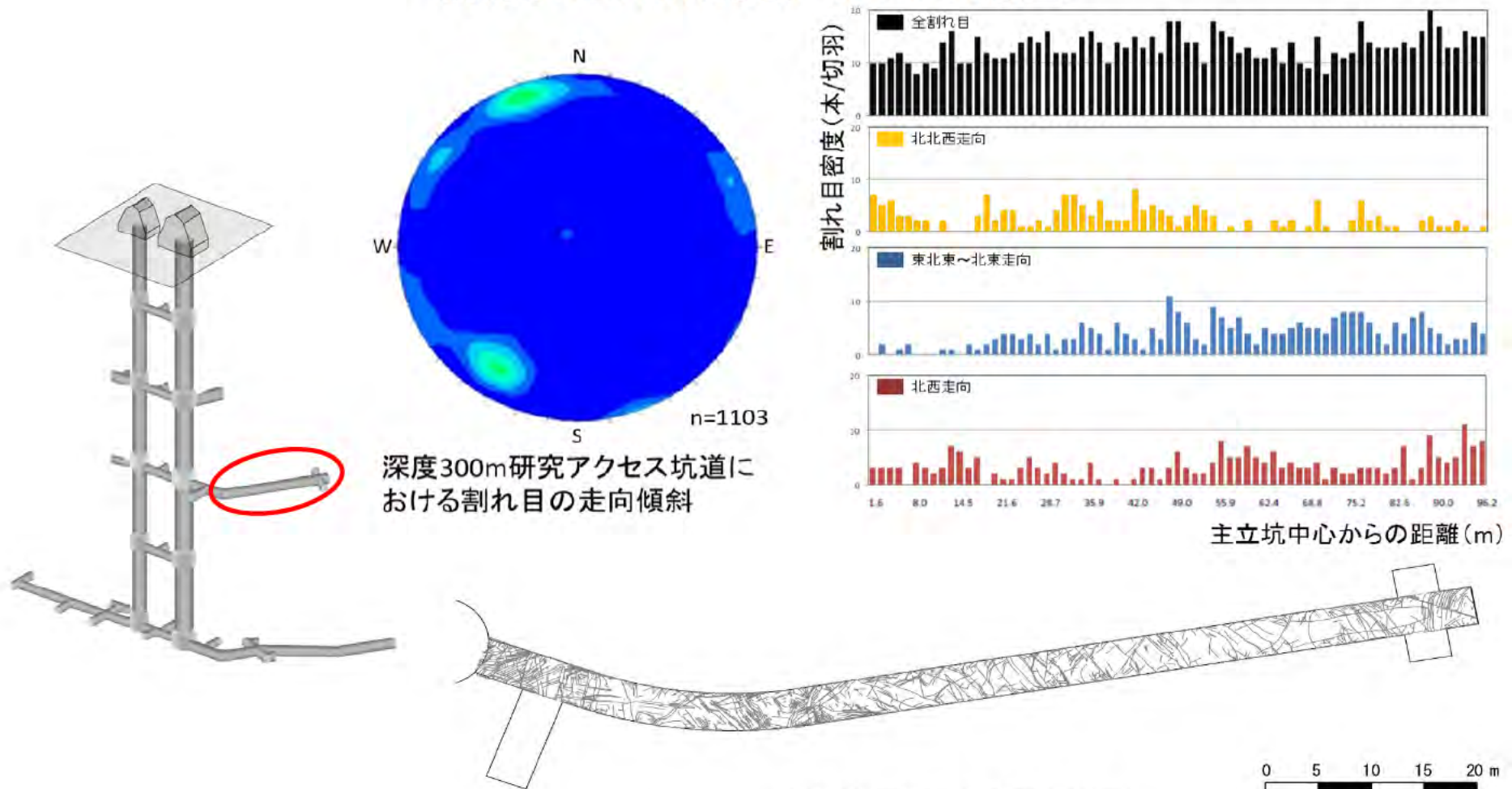
新規ボーリング孔
掘削

- 地下水水質観測ボーリング孔
- 岩盤変位計測・ひずみ計測ボーリング孔
- 断層・割れ目に関するボーリング孔
- 地下水水圧観測ボーリング孔
- パイロットボーリング孔
- 初期応力測定ボーリング孔
- 岩盤中の物質移動に関するボーリング孔



坑道壁面観察などによる割れ目分布調査

深度300m研究アクセス坑道

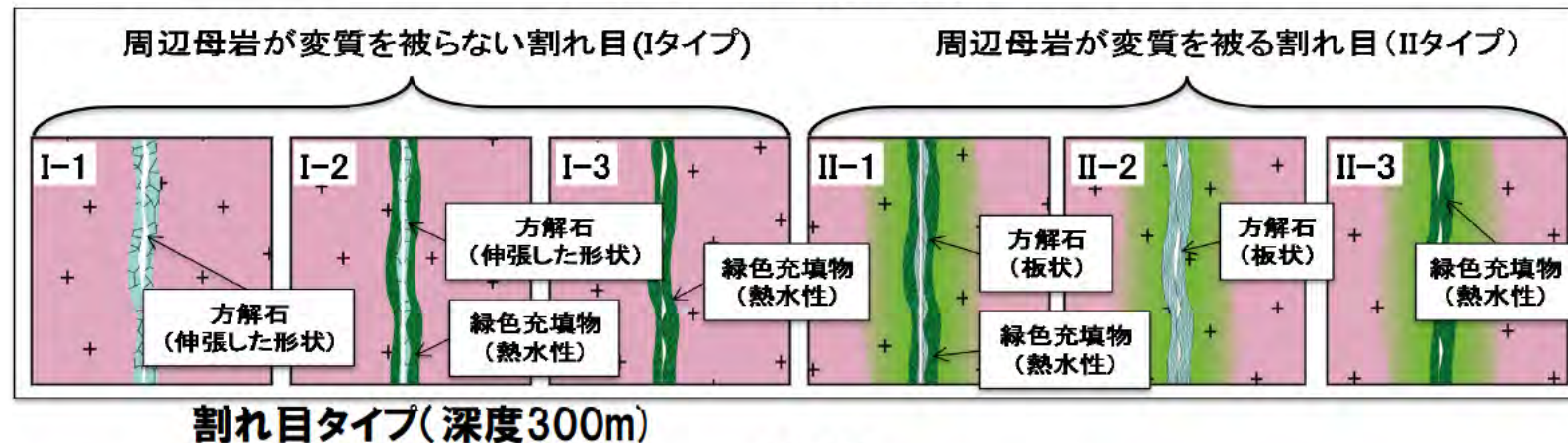


坑道壁面観察結果

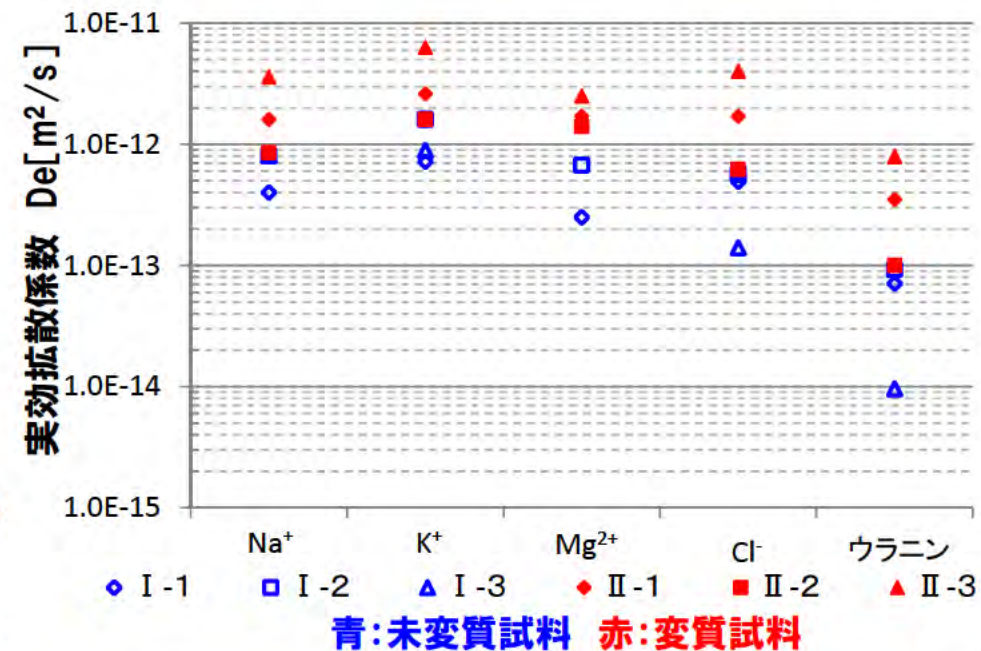
窪島ほか, 2012(JAEA-Research 2012-037)

室内拡散試験による物質移動特性調査

透過型拡散試験

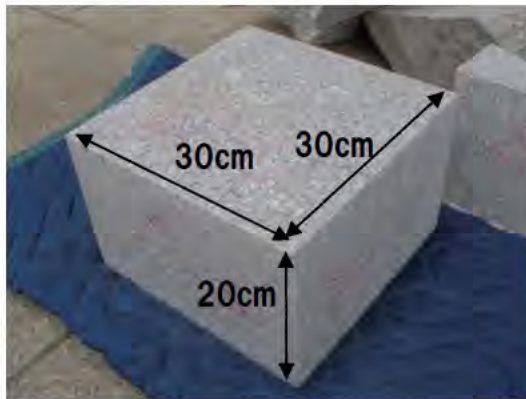


- ✓ 母岩が**未変質**の供試体の実効拡散係数は母岩が**変質**しているものより概ね低い値
- ✓ 割れ目タイプによる傾向の違い無



室内拡散試験による物質移動特性調査

岩石ブロックを用いた拡散試験



【試験期間】

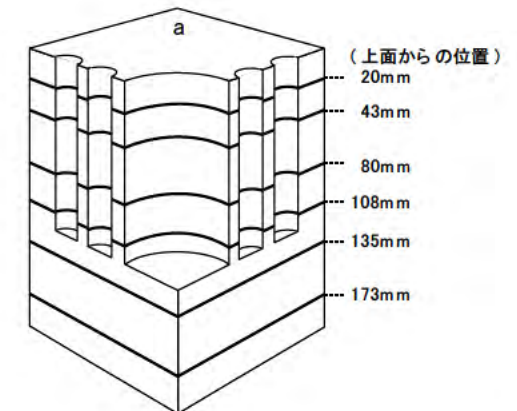
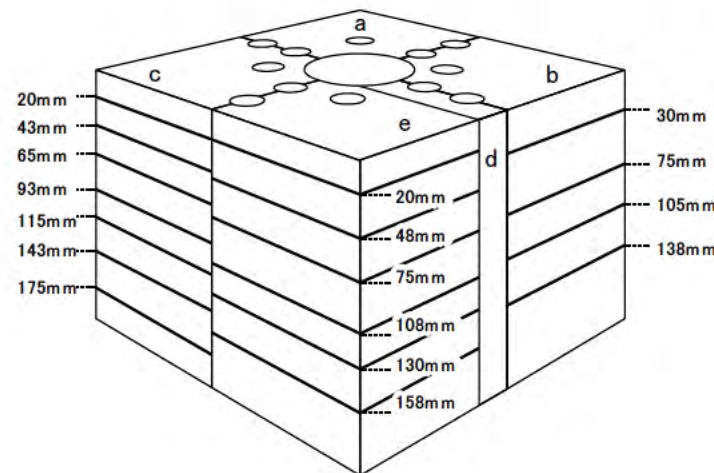
403日

【トレーサの種類】

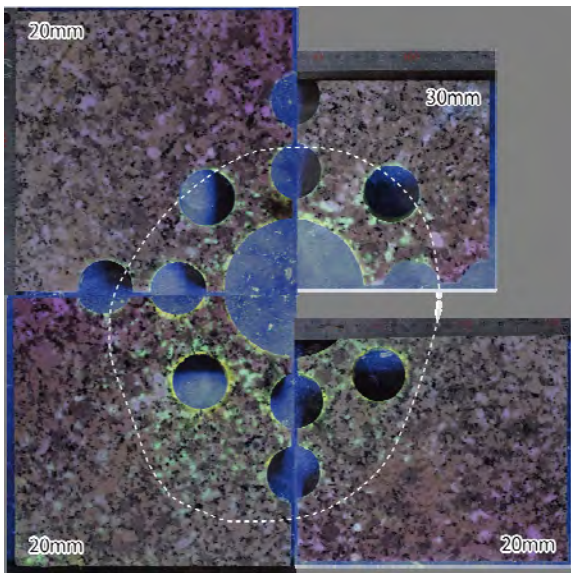
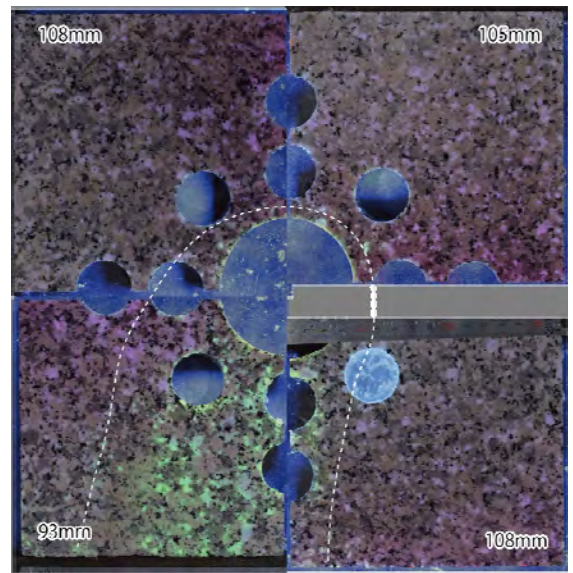
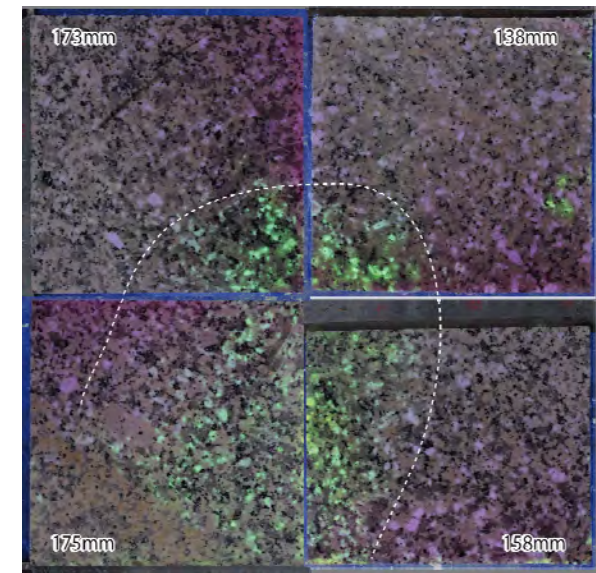
ウラニン, Na, K, Mg, Cl

【観察方法】

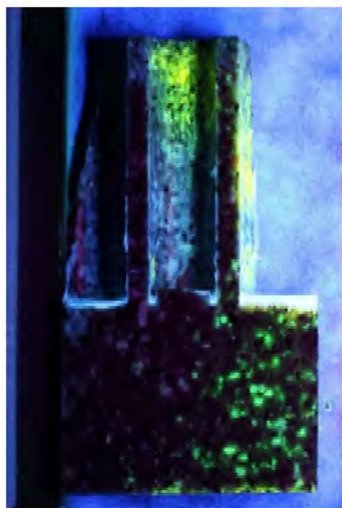
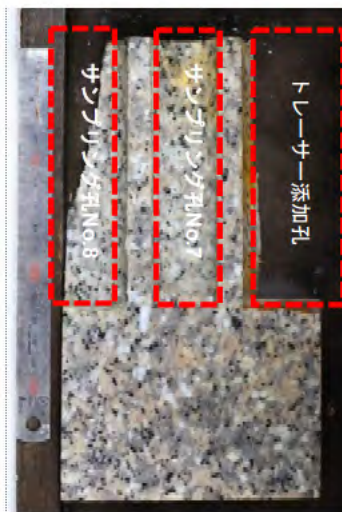
- ①ブロックを切断し縦断面の観察試料と横断面の観察試料を作成
- ②UVライト下で観察・写真撮影
- ③ウラニンの分布状態を観察



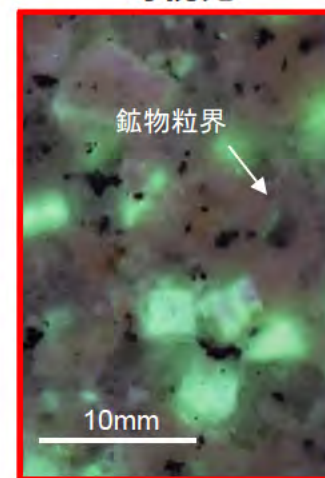
室内拡散試験による物質移動特性調査

上段(2~3cm)	中段(約10cm)	下段(13~17cm)
		
ほぼ同心円状	南南西方向	南西方向

室内拡散試験による物質移動特性調査



可視光



紫外線

