

超深地層研究所計画（瑞浪）に関する必須の 課題成果とりまとめについて

－報告書案に対する委員会からのコメント対応結果 と必須の課題成果の総括的まとめ－

2019年1月15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**

必須の課題成果の総括的まとめ

―①地下坑道における工学的対策技術の開発―

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
成果のまとめと達成度	・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 ・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 ・排水処理技術開発は環境分野などでも盛んに行われており, 施設計画時点で求められる基準値に適した手法をの選択により対応可能 ・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 →目標達成
さらなる技術レベルの向上に向けた方策・提案	・長期的な耐久性を有するグラウト材やグラウチング方法の検討

成果総数: 技術開発報告書類:21件、学術論文15件

必須の課題成果の総括的まとめ

②物質移動モデル化技術の開発

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
成果のまとめと達成度	・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に関する調査技術を構築 ・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 →目標達成
さらなる技術レベルの向上に向けた方策・提案	・結晶質岩を対象とした地下水流動解析結果の妥当性確認手法の構築(坑道スケールから広域スケールへの透水不均質性のアップスケーリング手法など)

成果総数: 技術開発報告書類:43件、学術論文49件

必須の課題成果の総括的まとめ

―③坑道埋め戻し技術の開発―

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
成果のまとめと達成度	・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 ・既往の無線通信技術は掘削された稼働中の坑道内での結晶質岩中での計測に適用可能であることを確認 ・止水壁のような高い耐圧性能を有する地下構造物の建設・補修方法を事例として提示し，技術的ノウハウとして蓄積 →目標達成
さらなる技術レベルの向上に向けた方策・提案	・埋戻し材による坑道埋戻し時の地質環境回復過程のモニタリングおよびシミュレーション技術の開発

成果総数： 技術開発報告書類：35件、学術論文7件

委員からの主なコメントと対応結果

－全体－

No.	コメント	対応結果
1	今回与えられた使命は、「必須の課題に対する成果のとりまとめ」に対する評価であるが、この委員会で必須の課題に対する議論はこれまで行われていないのではないかな。 すなわち、なぜここに示された課題が必須であり、必須であることの条件は何で、それをどうクリアすれば達成されたとするかについては、委員会内での共通認識はないように思う。したがって今回提示された研究成果について、その実施内容の範囲内での評価は可能であっても、それをもって必須の課題が達成されたと評価することは難しいと考える。	必須の課題については、設定理由などをこれまでの委員会の場において説明してきている。また、設定にあたっては、国内外の専門家との議論を通じて、妥当性についても確認している。 今回の報告書では、必須の課題の設定の考え方を説明していると考えているものの、不足しているところのご指摘を踏まえ、以下の記述を追加しました。 「なお、必須の課題の設定にあたっては、国内外の専門家との議論を行い、その妥当性を確認している。」

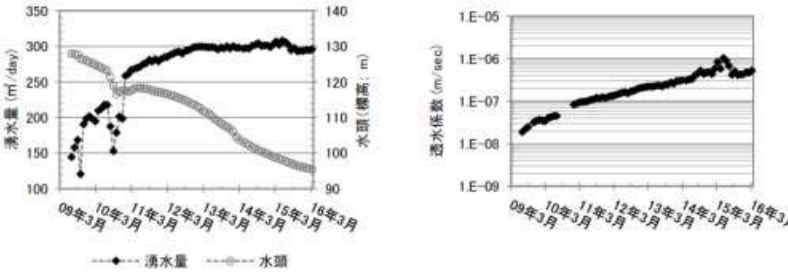
委員からの主なコメントと対応結果 —全体—

第2期中期計画期間における研究成果取りまとめから抽出された課題と必須の課題 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	- 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。 - 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。	
地下水流動	- 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。 - 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。 - 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。	A2-1: 長期モニタリング技術の開発
地下水の地球化学	- 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。 - 建設・作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。 - 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。 - 坑道・グラウト周辺のpH分布、酸化還元状態の長期変化。 - 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。	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
岩盤力学	- EDZの連成挙動の理解(再冠水時のEDZの岩盤挙動の理解)。 - 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。 - 坑道閉鎖(埋戻し)時のEDZの挙動の把握、推定方法の高度化。	
物質移動	- 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 - 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及びその短期的変化を把握可能な調査評価技術の構築 - 地下施設近傍領域の物質移動特性の三次元的な不均質性分布やその短期的変化を把握可能な調査評価技術の構築	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
工学技術	施工対策技術 - 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。 - 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)。 - 坑道閉鎖技術開発。 - 坑道維持管理技術の有効性の確認。 - 地震時の施設安全性評価。	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

委員からの主なコメントと対応結果

①地下坑道における工学的対策技術の開発

No.	コメント	対応結果
10	(原文 p.15 3.1.1.2 施工対策影響評価技術の開発) 深度300m 研究アクセス坑道周辺のボーリング孔の水圧は、研究坑道の延伸に伴い低下しているものの、研究アクセス坑道全体への湧水量は施工後約5 年間増加していた。この変化は、注入後のグラウト材の変化により、プレグラウチング領域の透水性が高くなったために生じたと推察される。  (コメント) 39行目、「変化」は劣化では？また何が変わるのか？また、この部分の結論は理解できるが、これは7年間で2オーダー近く透水性が変化するという事実でもある。これが数十年オーダーでどうなるのか、問題とならないのか？	「変化」という記述は、「グラウト材の劣化」のみで後述する現象が発生しているのか否かが不明確である(分析技術の進歩でグラウト材が接している部分の岩盤の状態変化が出てくる可能性もある)ので、現状「変化」で止めております。 高レベルの地層処分では、グラウチングは単に処分場の建設を合理的に進め人工バリアの設置環境を整えるということだけが期待されていると認識しておりますので、数千年オーダーの話の影響は今回記載したようにセメント材料から出る高pH溶液の影響の有無と考えております。

委員からの主なコメントと対応結果

②物質移動モデル化技術の開発

No.	コメント	対応結果
1	(原文 P.6) 物質移動モデル化技術の開発 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。 (コメント) 実際にどのようなデータを取得して、モデル化して、計算し、その結果を検証したのか、について記述が必要。 また、そのデータが割れ目系の実態をどの程度反映しているのかどうか、についての記述も必要。	本報告書に記載したDFNモデルの構築や検証に用いたデータの種類を表3.2.1.1-1に整理するとともに、データの概要やモデル化の流れを追記しました。個別の調査データの詳細については、報告書の文量や他項目とのバランスを考えて、引用文献に記載しています。 達成目標とした割れ目の分布特性の統計量の再現はできたものの、適用したデータが割れ目の分布特性を十分に表現している情報であったかの確認については、より詳細な割れ目の情報を用いてDFNモデルを検証することが必要と考えています。その旨を”成果”のa)の最後に追記しました。なお、上記のデータについては、エネ庁受託「岩盤中地下水流動評価技術高度化開発」の成果も参照する予定です。

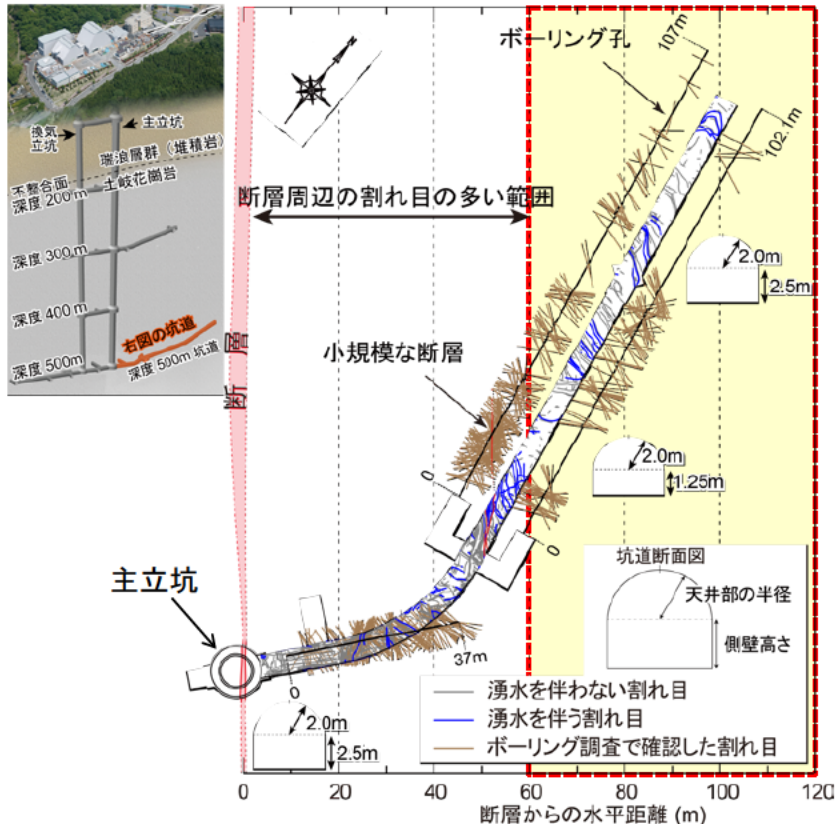
委員からの主なコメントと対応結果

②物質移動モデル化技術の開発

➤ DFNモデル構築に使用した調査データ

表3.2.1.1-1

調査種別	取得データ	データ適用先	
		モデル構築	モデル検証
坑道壁面観察 (総延長約90m)	割れ目の方位, トレース長, 頻度	○	-
	割れ目の湧水量	○	-
ボーリング調査 (水理試験: 12点)	岩盤の透水係数	-	○

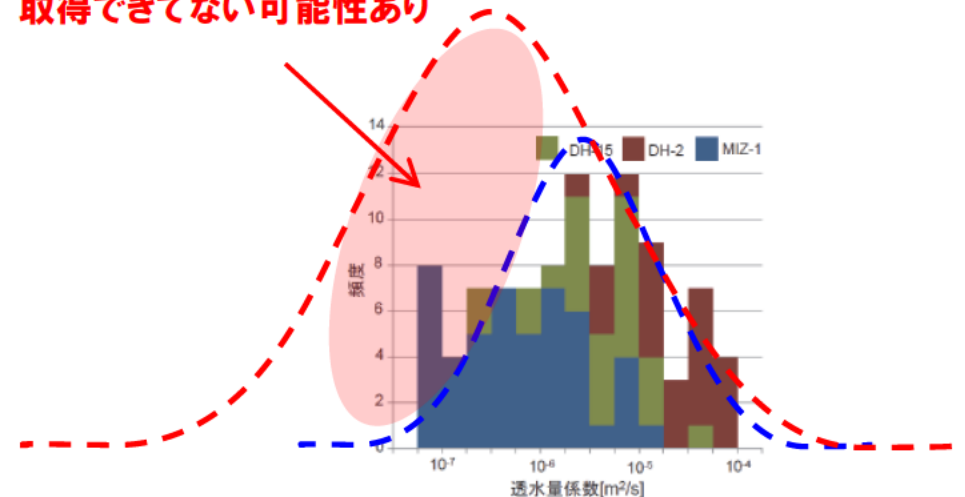


➤ 割れ目の水理学的情報の不足

- ✓ 既往調査では、主に水みちとなる透水性の高い割れ目区間を対象とした試験を実施
- ✓ 岩盤が有する幅広い透水不均質性を理解するための水理学的な情報を取得することが必要

⇒エネ庁受託「岩盤中地下水流動評価技術高度化開発」で実施する調査で取得される情報で補完する

低透水割れ目に関する情報が取得できてない可能性あり



電気伝導度検層結果に基づく割れ目の透水量係数分布の一例

委員からの主なコメントと対応結果

②物質移動モデル化技術の開発一

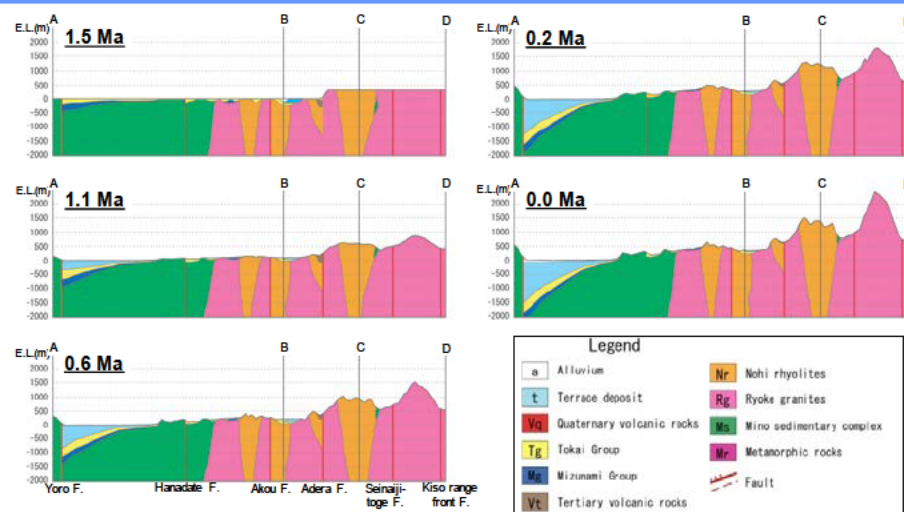
No.	コメント	対応結果
8-11	(原文 p.74 3.2.2.2 深部塩水の起源) (コメント) 人工バリアへの影響や地下水流動評価の必要性も踏まえて、花崗岩中の深部塩水の起源、普遍性、存在深度等を他の地域の花崗岩中の地下水質特性と比較しつつ、存在要因および想定深度等についてコメントすると共に、花崗岩を処分地層とする場合の懸案(検討?)事項に加えても良い事象だと思う。 海成層(瑞浪層群)の堆積時に花崗岩中にどのようなドライビングフォースを持って1000m程度の深度まで海水が浸入できるかについての説明がないと化石海水化した根拠が弱くなると思う。密度流で侵入したとして、その後ポテンシャル流で流されることなく滞留しているプロセスについて矛盾なく説明できないと変遷の理解が困難。	塩水の起源について、海水由来の例(フィンランドやスウェーデンなどバルティック楕状地:約1,000m)、海水・蒸発岩由来の例(チェコボヘミアン地塊やスイス北部花崗岩)、長期にわたる鉱物-水反応由来の例(カナダ楕状地:深度約1,000~1,800m)を示した上で、日本では研究事例が少なく、その存在を一般化するに至っていないが、ある程度の深度以深で塩水の存在は普遍性を有する可能性があること、その存在要因を理解しておくことは非常に重要である、旨を「はじめに」に加えました。 海水の地下深部への浸透プロセスと深部塩水の滞留プロセスとして次ページの記載と図を追加しました。

委員からの主なコメントと対応結果

②物質移動モデル化技術の開発

➤ 海水の地下深部への浸透プロセス

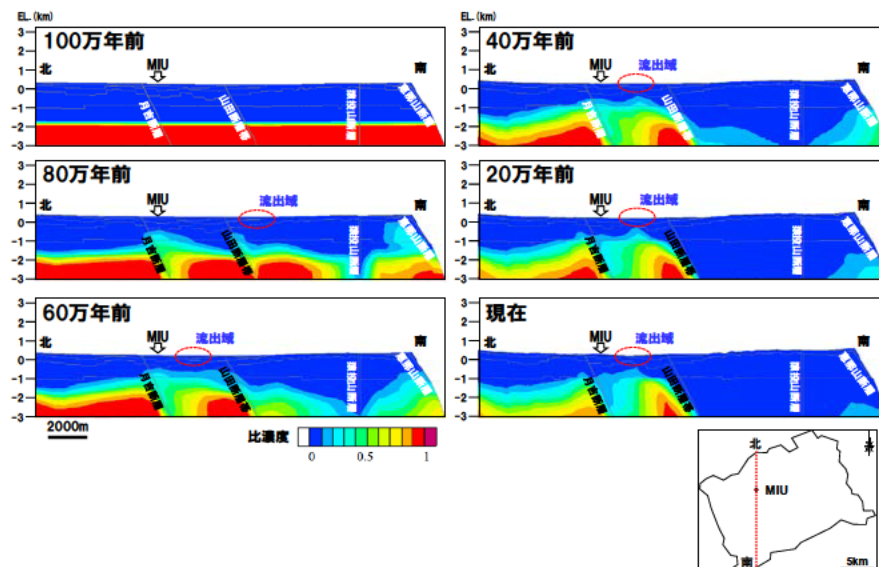
- 東濃地域の長期変遷研究では、150万年前には山地の隆起がなく平坦な地形が広がっていたと考えられており、地下水の流速は現在と比べて3オーダー程度遅い可能性が示されている。
- 海成層堆積時(17–15Ma)も平坦な地形であり、動水勾配が小さい滞留域が形成されていたと推定されている。
- 深部花崗岩への海水の浸透メカニズムとしては、岩盤中の割れ目や断層などを主な水みちとした密度流による浸透が想定される。



東濃地域を対象とした古地形分布の復元結果(尾上ほか, 2009)

➤ 深部塩水の滞留プロセス

- 100万年前から現在にかけての地形変化を考慮した移流分散解析結果では、研究所周辺の地下深部は相対的に滞留的条件が継続する場所となっている。
- 海成層堆積時(17–15 Ma)に浸透した海水が化石海水化して長期に存在するための必要条件は満たしている。



100万年前から現在にかけての地下水中の塩分濃度の長期変遷の推定結果(日本原子力研究開発機構, 2017)

委員からの主なコメントと対応結果

②物質移動モデル化技術の開発

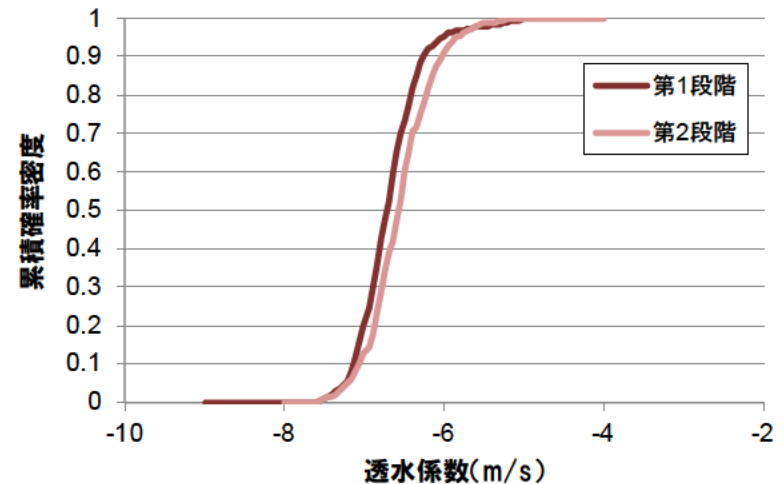
No.	コメント	対応結果
16	(原文 p.32) 冠水坑道周辺岩盤を対象としたDFNモデルの構築手法の検討の結果、割れ目の湧水の有無に着目したデータ解析や割れ目半径との相関性を考慮した透水性設定といった考え方や手法が、岩盤中の割れ目の分布特性や、それらによる透水性のばらつきを統計的に再現する上で有効であることが明らかとなった。 (コメント) ここで実施した解析手法が「有用であることが明らかとなった」とありますが、過去のどんな手法と比較して有効なのかの説明を追加してほしい。	第1段階および第2段階の検討では、水理試験や電気伝導度検層結果を用いて対数正規分布を仮定した割れ目の透水量係数分布の推定を試みていたが、6桁以上に及ぶ岩盤の透水性のばらつきを再現できていませんでした。 本稿では、割れ目半径との相関性を考慮した透水量係数の設定により6桁以上に及ぶ岩盤の透水性のばらつきを再現することができました。 その旨を本文に追記しました。

委員からの主なコメントと対応結果

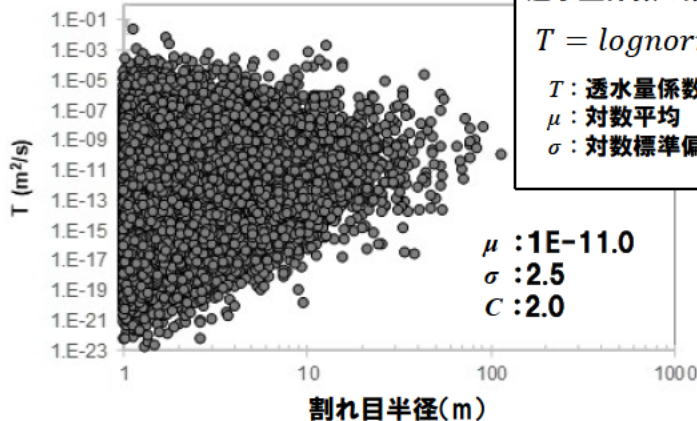
②物質移動モデル化技術の開発

➤ 既往研究:対数正規分布を仮定した透水量係数の設定(JAEA-Research 2015-011)

- モデル領域内の全割れ目に対して、割れ目の透水量係数が対数正規分布(対数平均値: $1\text{E-}06\text{m}^2/\text{s}$,標準偏差1.0)になるように確率論的に割り当てる



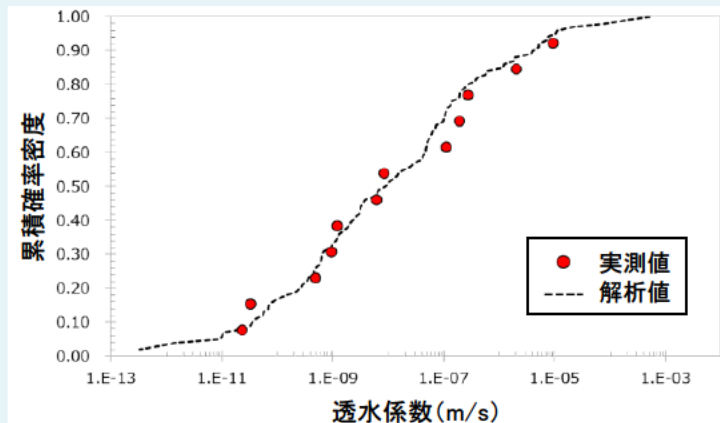
➤ 割れ目半径との相関性を考慮した透水量係数の設定



透水量係数の設定に用いた関数

$$T = \text{lognorm}(\mu, \sigma) \times r^C$$

T : 透水量係数 r : 割れ目半径
 μ : 対数平均 C : 定数
 σ : 対数標準偏差



⇒割れ目分布に起因した6桁以上に及ぶ
岩盤の透水性のばらつきを再現

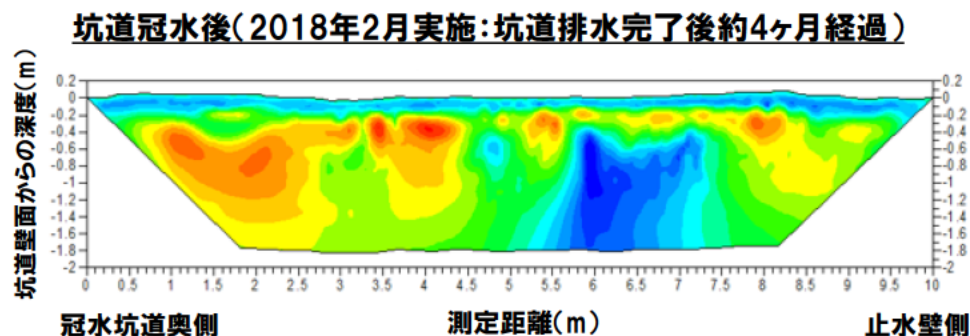
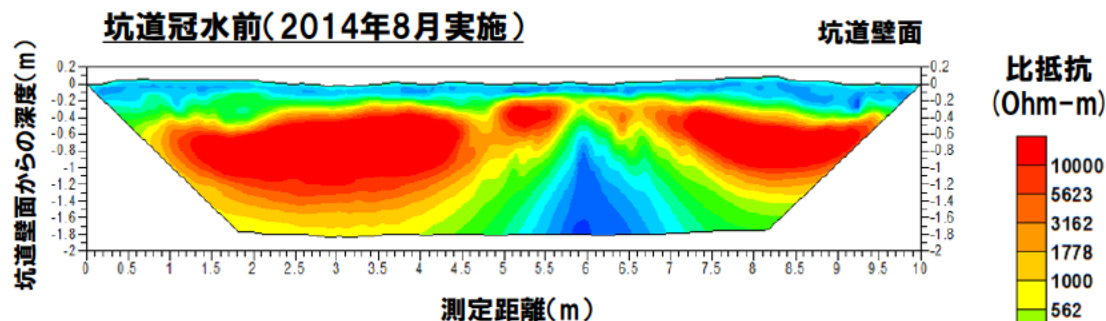
委員からの主なコメントと対応結果

－③坑道埋め戻し技術の開発－

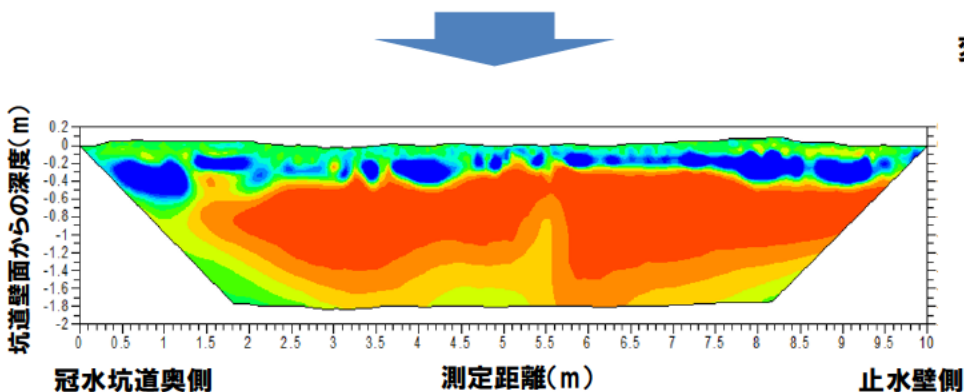
No.	コメント	対応結果
3	(原文 p.88 再冠水試験) ・冠水坑道周辺岩盤は、割れ目の分布に起因した水理学的な連結性が乏しい数m～数十m 規模の水理学的な不連続性(コンパートメント構造)を有する。 ・止水壁近傍のEDZからの湧水が発生するものの、(中略)閉鎖坑道近傍に限定される。 (コメント) 「コンパートメント構造」(水理学的不連続性)の力学的な意味について解説をお願いします。 EDZはどういう状態を想定しているのか？がよく理解できません。 比抵抗の経時変化を図3.3.1.(1)-2から代表断面を作って比抵抗の深度分布の経年変化図を作成してはどうでしょうか？	コンパートメント構造は、水理学的な情報に基づき解釈されたものであり、低透水部に挟まれた比較的透水性が高い部分に相当することから、岩盤内の割れ目分布やその連続性に起因して形成されたものと推察しています。その補足説明を”背景および概要”に追記しました。 EDZ(Excavation Damaged Zone)は岩盤内に地下坑道を建設する際に、掘削の衝撃や応力再配分による岩盤の破壊、既存割れ目の開口、新たな割れ目の発生などによる坑道周辺岩盤の物理的な損傷を受けた領域を想定しています。その補足説明を”背景および概要”に追記しました。 図3.3.1.1(1)-3に冠水坑道壁面で実施した比抵抗の時間変化率の図を追加いたしました。

委員からの主なコメントと対応結果

—③坑道埋め戻し技術の開発—



冠水坑道壁面で実施した比抵抗探索結果



冠水坑道壁面で実施した比抵抗の時間変化率

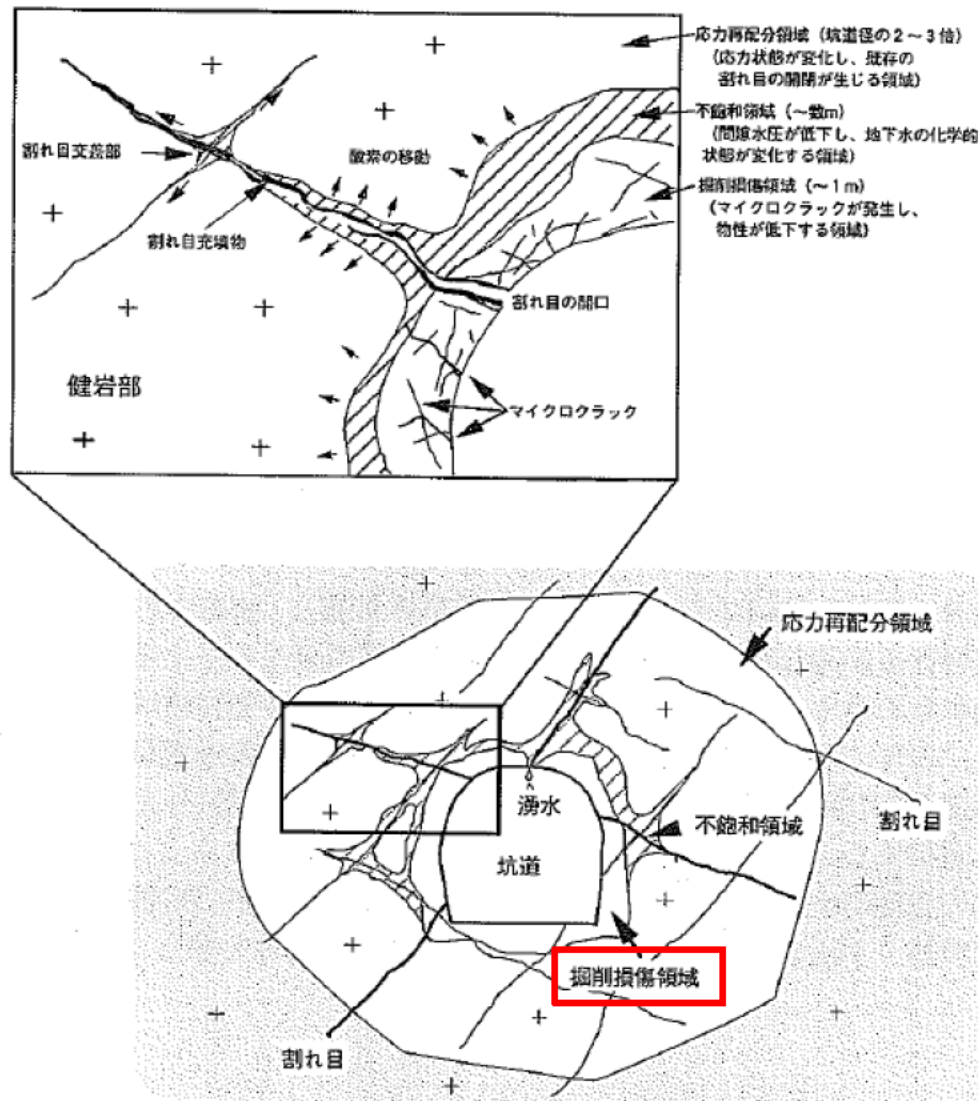
図3.3.1.1 (1) -3に冠水坑道壁面で実施した比抵抗の時間変化率の図を追加

- 冠水前と比較して、冠水後には坑道壁面付近の浅層部における低比抵抗構造にはほとんど変化が見られない
- 一方で、深度30cm以深から1m程度の高比抵抗部分において全体的に比抵抗が低下

変化率(%) ⇒この比抵抗の低下は、湧水割れ目の有無等に関わらず一様に見られることから局所的なものではなく、坑道の冠水に伴い岩盤に浸透した地下水によって岩盤内部に形成されていた不飽和領域の飽和現象を捉えたと解釈

委員からの主なコメントと対応結果

－③坑道埋め戻し技術の開発－



坑道掘削後の比抵抗, 弾性波トモグラフィ
→掘削損傷領域(EDZ): 坑壁～30cm

冠水試験前後の比抵抗探査

→掘削擾乱領域(EdZ): 坑壁～1m
坑道に沿った掘削擾乱領域(EdZ)
の連続性は未明

止水壁近傍のEDZの状態について

冠水試験時の止水壁周りの漏水を踏まえると,

- ・スムースブラスティングで彫り込んだ止水壁のエッジ周囲に, 30cm程度のEDZが形成されている可能性

or

- ・坑道に沿った幅1mのEdZを, 止水壁のエッジ(約1m深)で遮断できていない可能性

委員からの主なコメントと対応結果

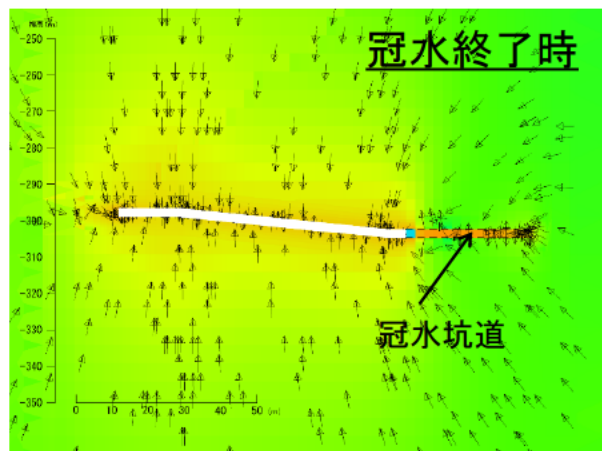
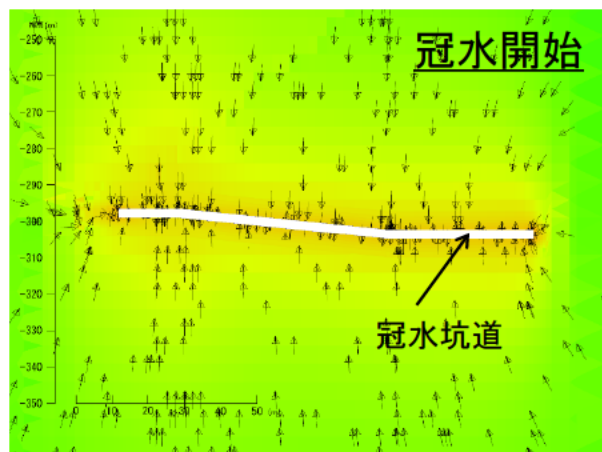
－③坑道埋め戻し技術の開発－

No.	コメント	対応結果
9	(原文 p.88) 図3.3.1.1(1)-1 岩盤の割れ目分布の概念と割れ目の調査結果の比較 (コメント) このようなコンパートメント構造は坑道を掘らなければわからないのか、あるいは地表からもある程度評価できるのか、記述が必要。坑道を掘ってから明らかになった場合、不都合なこともあるように思えるが、それに関して記述が必要。	コンパートメント構造は、地上からの調査段階に比べて調査密度が高い地下坑道からの調査段階で把握しやすいこと、コンパートメント構造の存在によって、坑道への湧水量が処分孔設置の基準値を超えるなどの不具合が生じる可能性があるため、コンパートメント構造は地下坑道や処分孔のレイアウトの設計などに反映させるべき重要な水理地質構造であることを、“まとめ”に追記しました。
11	(原文 p.97) 水圧回復の程度は岩盤の透水性だけでなく止水壁の性能や坑道周りのEDZなどの周辺環境条件に依存する・・・ (コメント) 坑道に沿う水の流れてありうることについて、評価する必要があるように思う。	地下水圧が定常化した後の水圧分布に着目し、冠水坑道周辺岩盤内では岩盤側から冠水坑道に向かう地下水の流れが形成されていること、冠水坑道内や岩盤と坑道壁面境界部の隙間などが水みちとなり、坑道奥側から手前側への坑道に沿った地下水の流れが形成されているといった考察を“成果”に追記しました。

委員からの主なコメントと対応結果

—③坑道埋め戻し技術の開発—

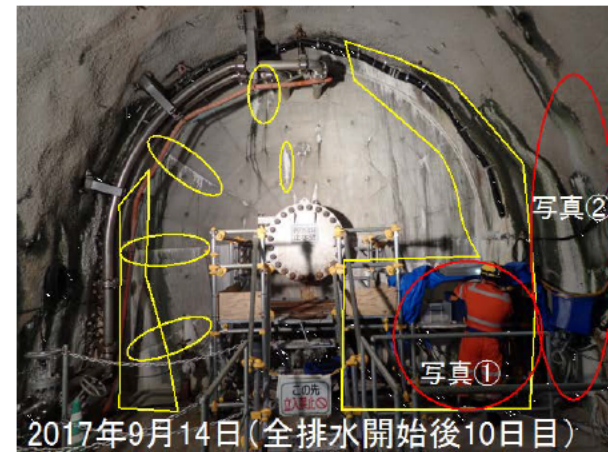
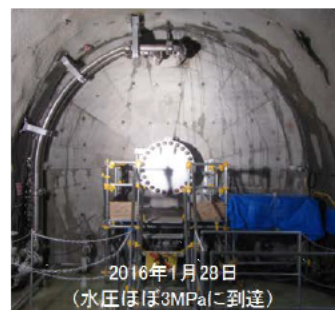
冠水坑道周辺の地下水の流向・流速分布の推定結果の一例



流速(m/年)

1.0e+003
1.0e+002
1.0e+001
1.0e+000
1.0e-001
1.0e-002
1.0e-003
1.0e-004

止水壁および近傍の状況



黄色囲みは、コンクリートからのカルシウム溶脱跡が顕著な場所



水圧モニタリング装置の青面。
白い部分は溶脱したカルシウム
が固化したと思われる部分



止水壁内計測装置のケーブルラ
イン。一部から常時湧水あり

⇒岩盤と坑道壁面境界部の隙間などが水みち
となり、坑道奥側から手前側への坑道に沿っ
た地下水の流れが形成

⇒冠水後、冠水坑道に向かう地下水の流れとともに、大気圧解放状態にある斜坑部に向かう
地下水の流れが形成

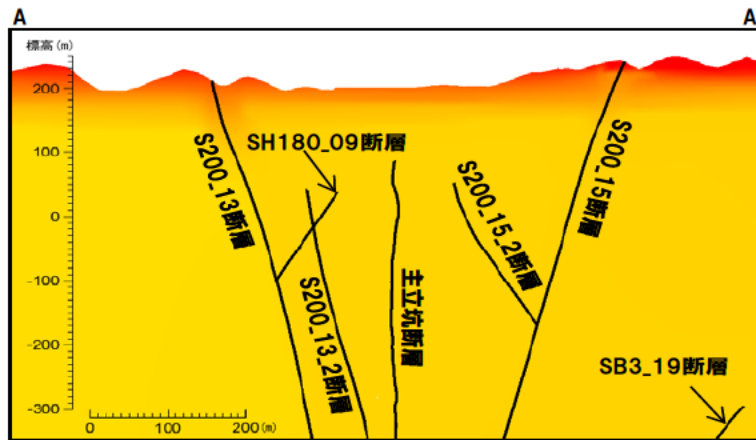
委員からの主なコメントと対応結果

－③坑道埋め戻し技術の開発－

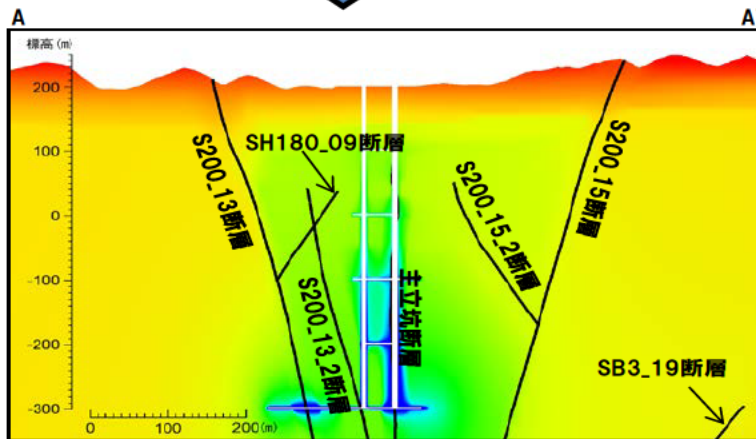
No.	コメント	対応結果
20	(原文 p.113 3.3.2 モニタリング技術の開発) (コメント) 地下水のモニタリングが必要なのは確かであるが、掘削・操業中に地下水環境が大きく変わってしまうような場でも処分場になるのか、疑問。	掘削・操業中の地下水環境の変化は、地質環境に応じて異なると考えられ、掘削・操業に伴う変化の内容とその程度に関わるモニタリング結果を取りまとめております。 掘削・操業中に地下水環境が大きく変わってしまうような場でも処分場になるのか？ については、人工バリアを含めた多面的な観点で事業者が判断する必要があり、本報告書では触れられませんでした。

委員からの主なコメントと対応結果

—③坑道埋め戻し技術の開発—



全水頭分布



全水頭分布

- 掘削・操業による環境影響は、岩盤により異なる。
- 割れ目が少なく透水性が低い岩体では、わずかな湧水でも環境影響が大きく、割れ目や涵養量の大きい岩体では、湧水による環境影響が早期に回復する可能性もある。

排水量:数百トン/日
水位低下:15年で約150m

委員からの主なコメントと対応結果

－③坑道埋め戻し技術の開発－

No.	コメント	対応結果
21	(原文 p100 冠水坑道周辺の物質移動特性の調査) 本試験では、坑道から岩盤側への物質移動速度を推定できるような動水勾配の低い環境が形成できなかったため、冠水坑道周辺の割れ目の連結性や物質移動速度に関わるパラメータは取得できなかった。上記のような低動水勾配環境を形成するためには、より高い遮水性能を有する止水壁の建設が必要となる。 (コメント) ④「まとめ」の記述は、評価する側としてはその程度の「まとめ」しか記述できないのかと本当にがっかりします。何回も同じことを申しますが、素晴らしい仕事をしていきますので、もっと胸を張って「まとめ」を記述してください。	坑道規模のトレーサー試験を実施して坑道閉鎖後の動水勾配の低い環境下における岩盤中の物質移動に関わるパラメータの取得を試みましたが、止水壁の打ち継ぎや止水壁周囲からの地下水の漏水により、想定していた地下水流動場が形成できずに上記のパラメータを得ることはできませんでした。 一方で、坑道規模のトレーサー試験を実施することで、地下坑道の閉鎖時における閉鎖坑道から解放された坑道側への地下水の流動状態や移行経路に関する知見を得ることができましたので、その旨を追記しました。 また、閉鎖坑道における物質移動特性の閉鎖性については、「3.2.1.3 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」に詳述しております。