

第34回委員会の補足説明

令和5年10月30日

国立研究開発法人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

研究開発成果の広い周知について (第34回委員会でのご指摘を踏まえて)

第34回議事録の内容

- 機構の公開HPのトップページからCoolRepへのリンクが分かりにくい。
⇒ トップページからのリンクについて、改善する。

機構の公開HPのトップページからCoolRepへのリンクの見直し

JAEAトップページに「地層処分研究開発の取り組み」のバナーを新設。

クリックすると、原子力機構の地層処分研究開発成果の取りまとめHPに移動。

トップページの見やすい場所から1クリックでCoolRepや各種データベースのリンクに到達。



CoolRep

各種データベース

補足説明※1

第34回議事録の内容 (P1~2)

○ これまでの第1段階、第2段階までの成果が、文献調査や概要調査に役立つ事例はあるか。機構の成果が活用されていることをアピールできると良いと思う。

⇒ 例えば、「科学的特性マップ」に過去に火山学会が取りまとめた第四紀火山カタログが反映されている。この第四紀火山カタログは、機構の研究成果の一部である。概要調査については、まず計画策定では、地上からの調査のうち物理探査の側線やボーリング孔(案)の配置の検討に、幌延や瑞浪の第1段階の成果が活用されるのではないかと考えており、そのような成果を概要調査に反映できるように、CoolRepとして取りまとめている。(※1)

また、NUMOが取りまとめた包括的技術報告書においても、機構が作成した技術報告書、論文等が200件程度引用されており、機構の成果が事業に積極的に活用されている。

補足説明

※1:

第1段階(地上からの調査研究段階)では、例えば電気伝導度検層を利用した岩盤の透水性の評価技術の開発や、地質構造モデルの構築から水理地質構造モデルの構築及び地下水流動解析まで一連で解析可能なソフトウェアの開発を行っており、これらの調査・評価技術や技術開発の経験が概要調査に反映されることが想定される。

補足説明※2 (1/2)

第34回議事録の内容 (P3)

○ 13頁において、一部のトレーサーのパラメータが室内と原位置試験で整合的であることを確認と述べ、移行経路の不均質を考慮したモデルにより挙動を解釈可能、と述べているが、この結果を処分事業における安全評価手法に反映することを念頭に置いた場合、移行挙動を予測する際の考え方について新たに得られた知見を教えてください。

⇒ これまでのモデル開発では物質移行現象の理解に重点を置いた検討を進めてきている。これまでの成果を安全評価に繋げる検討については、今後取り組みたいと考えている。(※2)

補足説明

※2:

移行挙動を予測する際の考え方として、具体的には、水みちの特性(対象とすべき水理地質構造、水理学的連結性など)が異なる3つの岩盤(声問層、稚内層浅部、稚内層深部)に対し、その不均質性や長期変遷を考慮し、物質移行のシナリオや広い領域を含む複数のスケールを対象とした核種移行モデルを構築する。また、原位置トレーサー試験データやナチュラルアナログなどに基づく再現解析を通じ、構築した物質移行モデルの妥当性を確認する。これらの一連の物質移行モデル化手法を、実際の地質環境を対象とした岩盤中の安全評価に反映していく方策とともに取りまとめていく計画である。

補足説明※2 (2/2)

まとめ

第34回資料
当該頁

【得られた成果】

- 溶存ガスが地下水中に含まれることや水みちとして機能しうる割れ目を有する特徴をもつ幌延の泥岩を事例として、原位置試験技術および物質移行モデル化手法を整備
- 具体的には、数m程度のスケールにおける割れ目、マトリクス中の物質移行挙動を表現可能なモデル化・解析手法の適用性を確認
 - ・ 原位置拡散試験結果のモデル/解析評価により一部のトレーサー(HD0、Cs、Mo)拡散・収着パラメータやイオン種の違いに起因した拡散特性の傾向性が室内一原位置双方で整合的であることを確認
 - ・ 亀裂内や複数割れ目の寄与による移行経路の不均質を考慮した物質移行モデルにより、一部のトレーサー(ウラン、Cs)の移行挙動を解釈可能

【残された課題】

- より広い空間スケール(数10m～数100m程度)へ適用可能な物質移行特性評価手法の整備(拡散、収着メカニズムが複雑なトレーサーに適用可能なモデルの検討も含む)

本資料には、以下の経済産業省資源エネルギー庁受託事業の成果の一部を利用した。

- ・ 平成28年度 地層処分技術調査等事業(処分システム評価確証技術開発)
- ・ 平成29年度 地層処分技術調査等事業(処分システム評価確証技術開発)
- ・ 令和4年度 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)(ニアフィールドシステム評価確証技術開発)

補足説明※3 (1/5)

第34回議事録の内容 (P5)

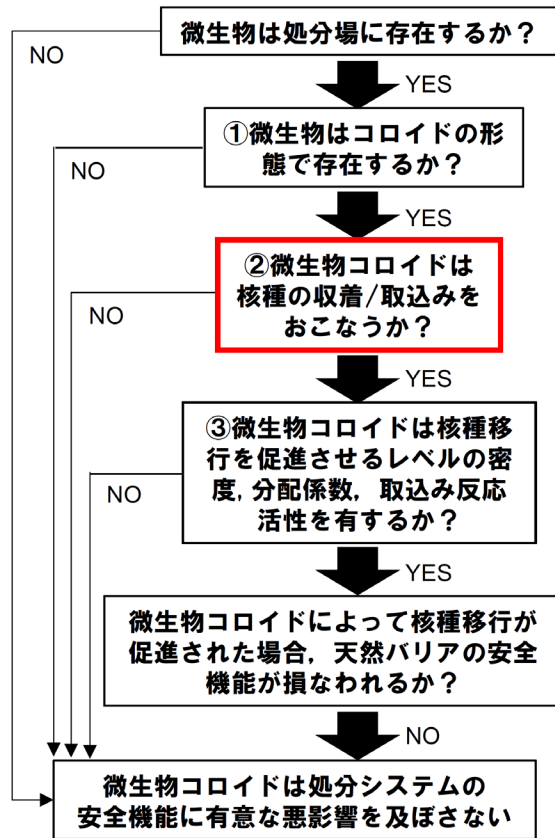
○ 24頁について、核種移行評価に繋げるためには、微生物については何をパラメータとして評価すれば良いか、見通しがあれば教えてほしい。

⇒ 微生物が地下水中で果たす役割は多岐にわたるが、コロイドと共通する項目としては、微生物の量と微生物そのものに対する核種の収着、微生物特有の項目としては、走化性や微生物細胞内への核種の取り込みが挙げられる。過去の核種移行解析において、核種移行に対する微生物コロイドの影響を、通常のコロイドと同様に量と分配係数から推定した例があるものの、検討の余地があると考えている。以上の点は核種の移行を促進させる現象である。移行を遅延しうる現象として、母岩中に形成されたバイオフィームが核種を収着することが挙げられる。これらの現象を評価するためのパラメータのうち、微生物量については、微生物コロイド・バイオフィームともに、蛍光顕微鏡法を中心とした分析から取得した情報をパラメータとして使用できると考えている。(※3)

補足説明※3 (2/5)

第34回資料
当該頁

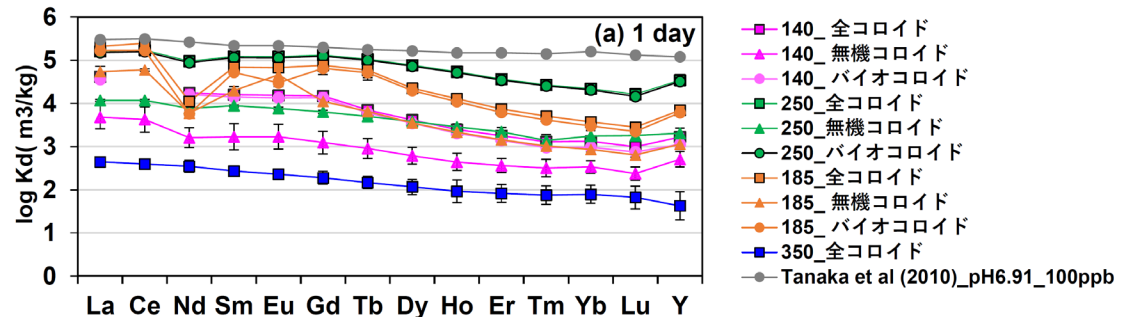
微生物の特性評価に関する成果例



● 地下水中の微生物と核種との反応性

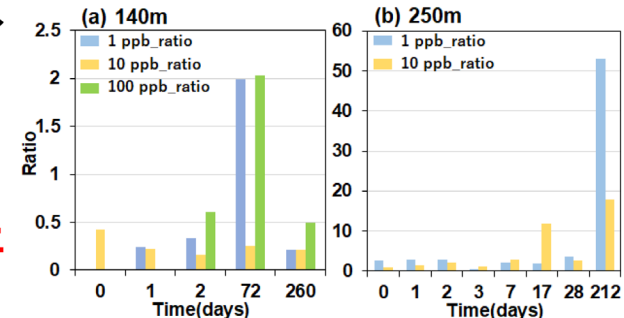
微生物コロイド/全コロイドへの希土類元素の分配係数評価:

- γ線照射により微生物コロイドを死滅させたところ、希土類元素の分配係数が全コロイドの場合よりも低下 (JAEA・RWMC, 2023)
- ✓ コロイドの核種収着能の大部分を微生物コロイドが占める可能性



幌延地下水中コロイドへの希土類元素の分配係数評価 (JAEA・RWMC, 2023)

- 深度350m地下水コロイドへの希土類元素の分配係数は相対的に低い
- ✓ 350m地下水では微生物コロイドの割合が低く、希土類元素の添加により代謝が活性化される微生物が少ないためと考えられる



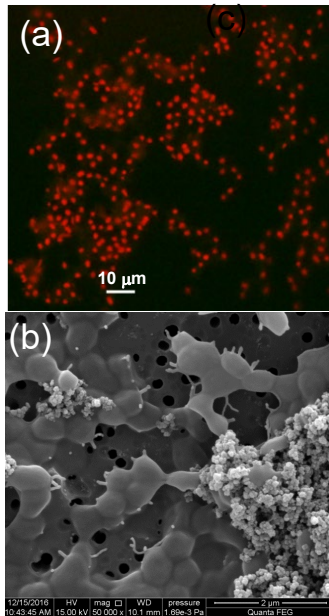
希土類元素により代謝が活性化される微生物量の対初期値比 (JAEA・RWMC, 2023)

補足説明※3 (3/5)

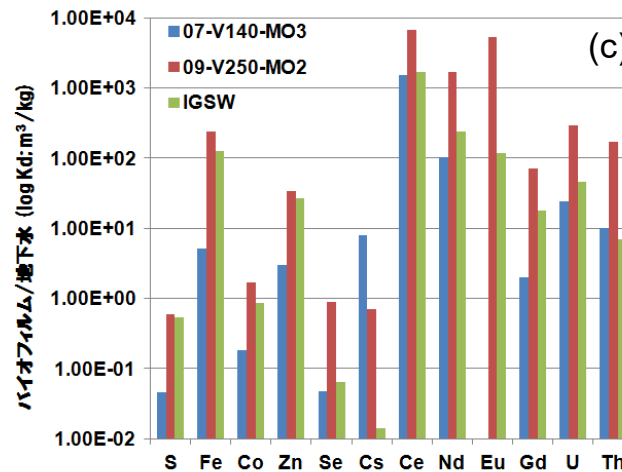
補足説明

※3:

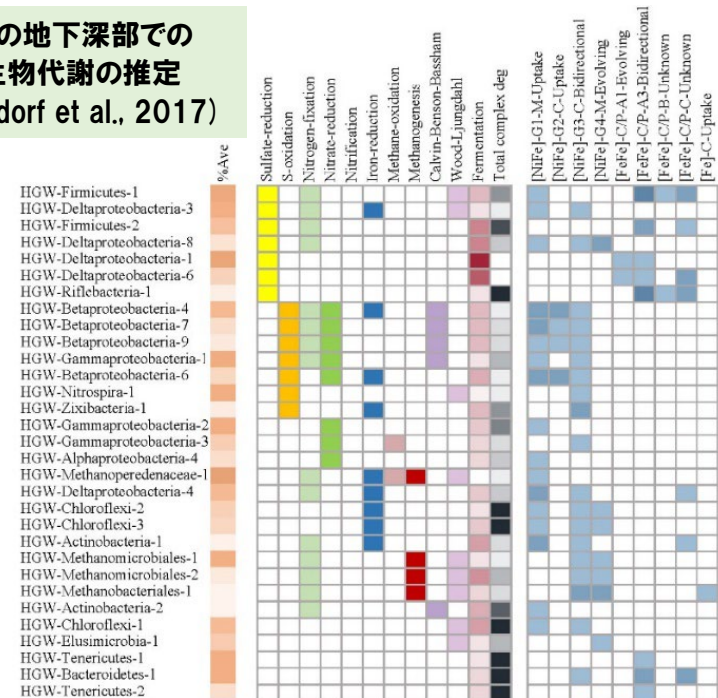
収着・取り込み挙動に関しては、元素分析手法に加えて、培養法に依存しないゲノム解析などから得られる微生物代謝機能の情報も評価に使用する必要があると考えている。



幌延地下水中のバイオフィーム
(a) 蛍光顕微鏡像、(b) SEM画像、
(c) 各元素の見かけの分配係数
(JAEA・RWMC, 2019)

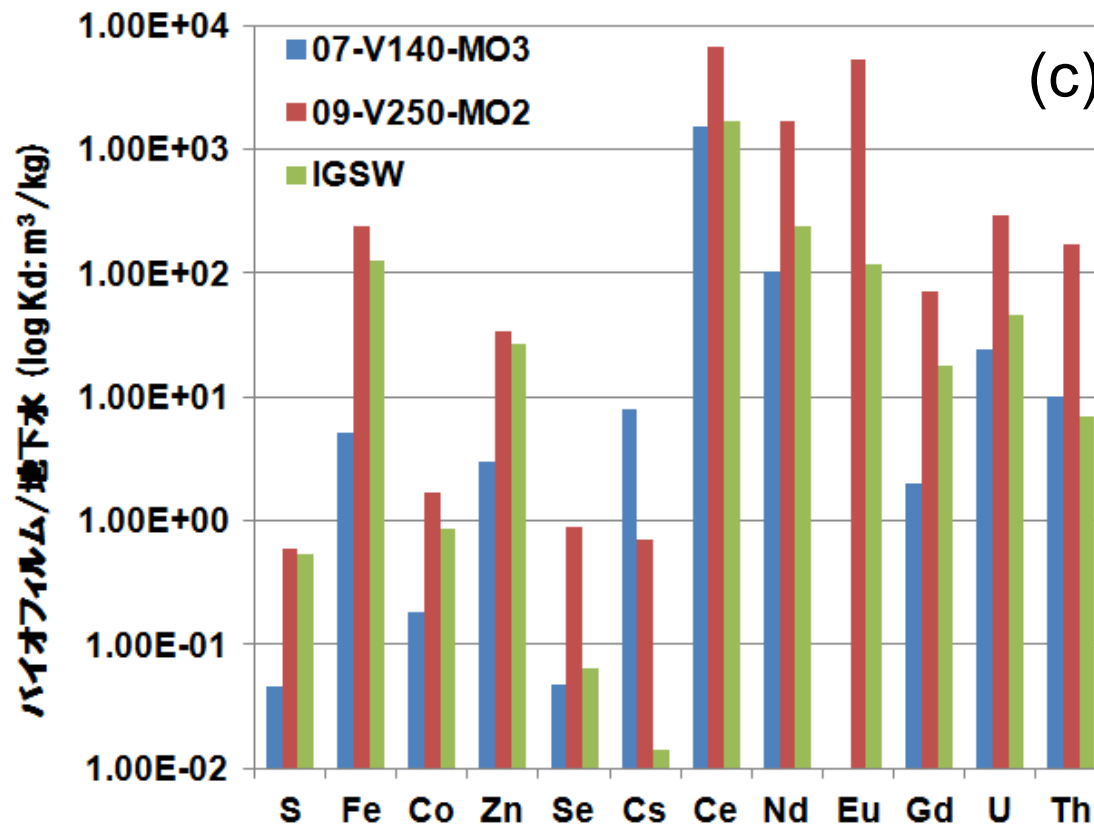
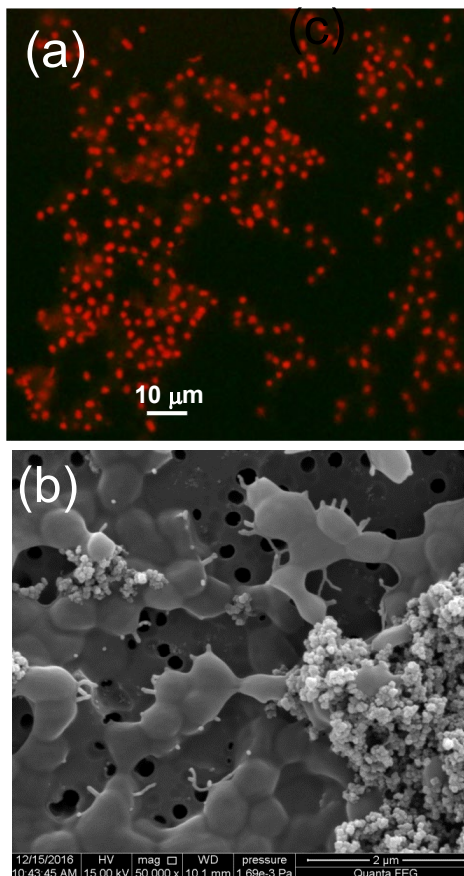


幌延の地下深部での
微生物代謝の推定
(Hernsdorf et al., 2017)



補足説明※3 (4/5)

補足説明

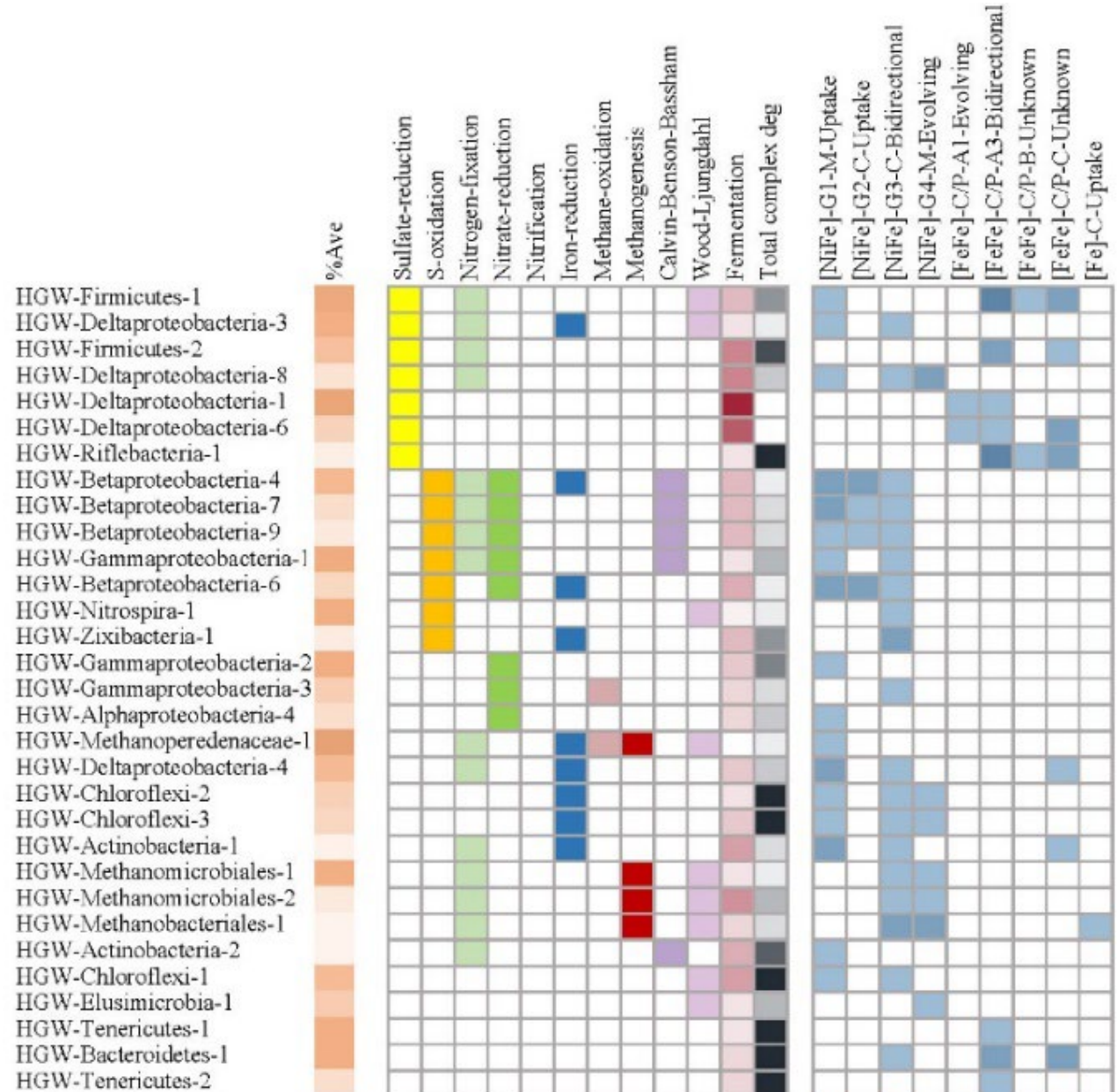


幌延地下水中のバイオフィルム
(a) 蛍光顕微鏡像、(b) SEM画像、
(c) 各元素の見かけの分配係数
(JAEA・RWMC, 2019)

補足説明※3 (5/5)

補足説明

幌延の地下深部での
微生物代謝の推定
(Hernsdorf et al., 2017)



補足説明※4 (1/4)

第34回議事録の内容 (P5)

○ 現在の検討対象は金属容器を腐食させない微生物のみかと思うが、場が変化して腐食を促進するような微生物が優勢になる可能性はあるのか。

⇒ 地下水環境が多少擾乱を被っても数年程度で元の状態に戻るとの結果も得られていることから、地下水の環境が大きく変わらない限りは腐食を促進するような微生物の影響は少ないと考えている。また、以前に幌延で実施したオーバーパック腐食試験の結果などを踏まえると、オーバーパックを取り囲む緩衝材が高乾燥密度・高膨潤圧というような期待された機能を発揮している条件下では、緩衝材中での微生物活性の維持や移動は難しいと考えている。(※4)

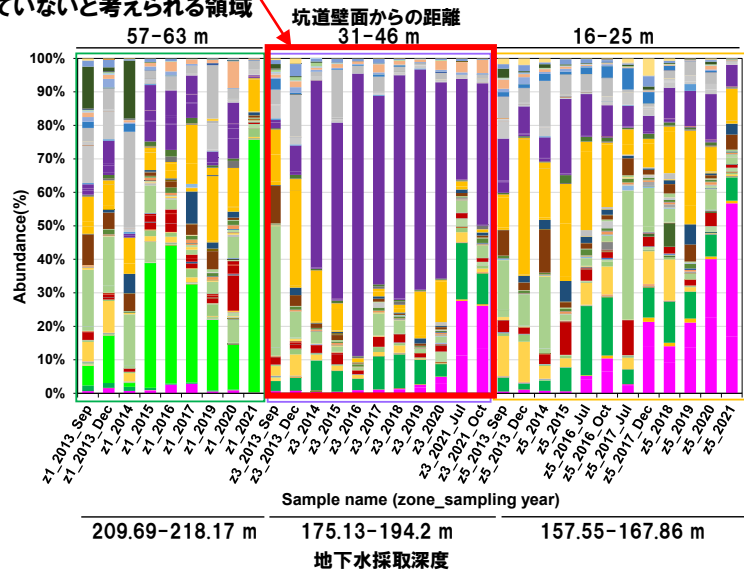
補足説明※4 (2/4)

補足説明

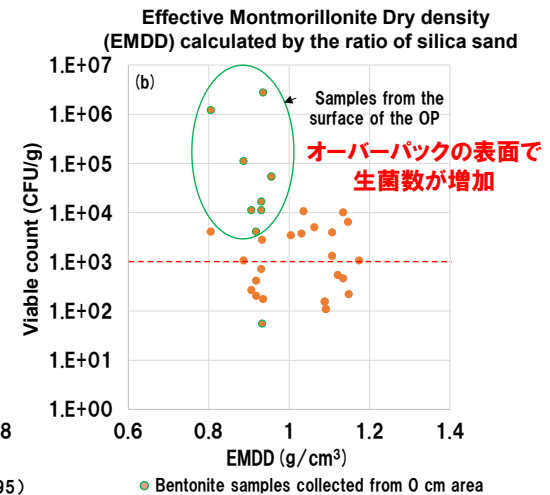
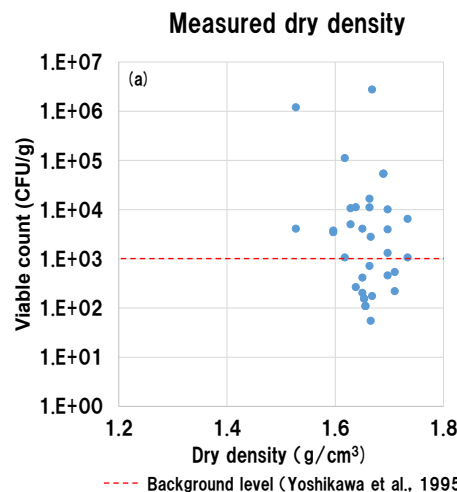
※4:

ただし、幌延での地下施設建設の擾乱を受ける前の岩盤中では、硫酸還元菌等の硫黄代謝を行う微生物が優占種として存在している可能性があることや、ベントナイトとの相互作用により地下水中で鉄還元菌の増殖が促進されるとのデータも取得されていることから、緩衝材膨潤過程や緩衝材等の人工物が天然バリア中の微生物活性挙動に及ぼす影響、またもともと岩盤中に生息する微生物が金属腐食に及ぼす影響については、今後確認していく必要があると考えている。

地下施設建設の影響を比較的受けていないと考えられる領域



地下水中の微生物組成の経時変化

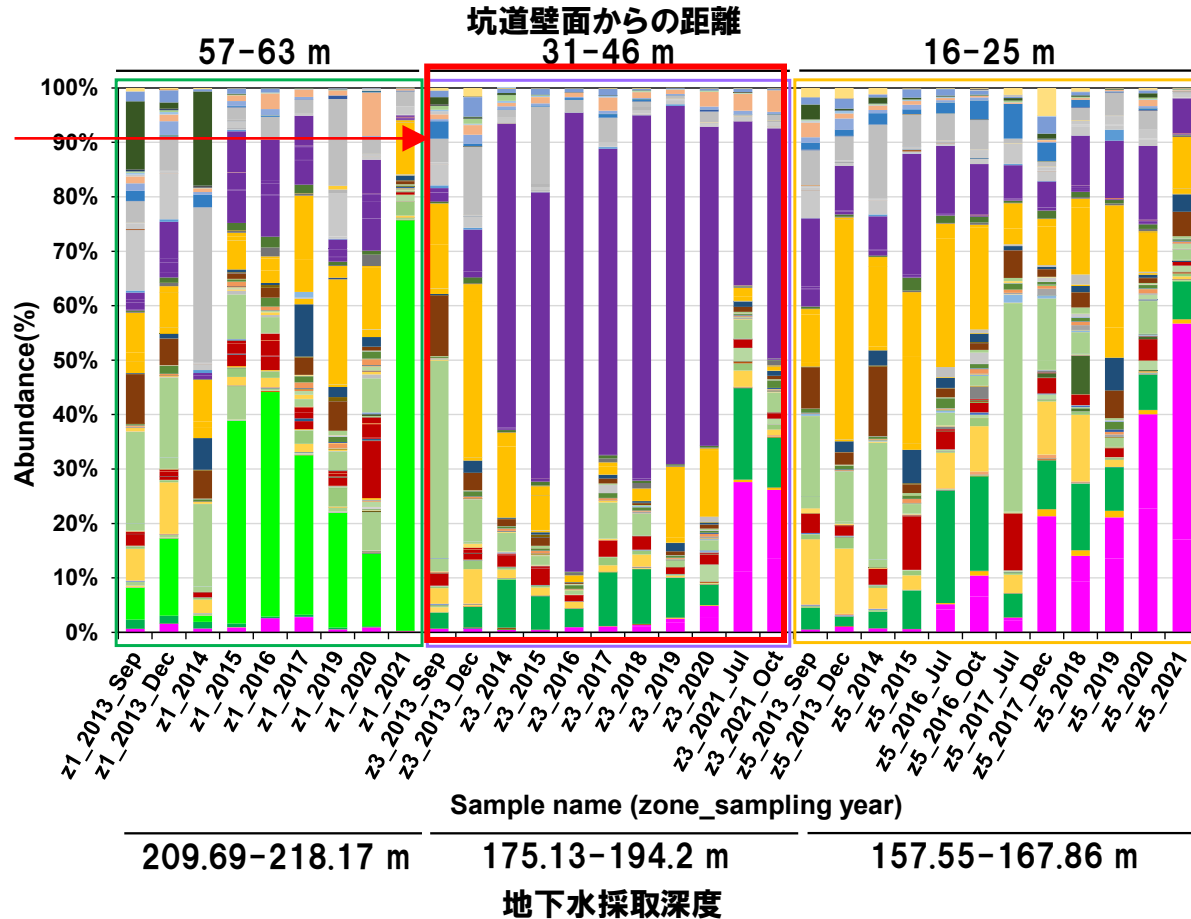


幌延URLの原位置腐食試験における微生物影響評価
緩衝材中における実測乾燥密度/算出有効モンモリロナイト密度と生菌数の関係

補足説明※4 (3/4)

補足説明

地下施設建設の影響を比較的受けていないと考えられる領域

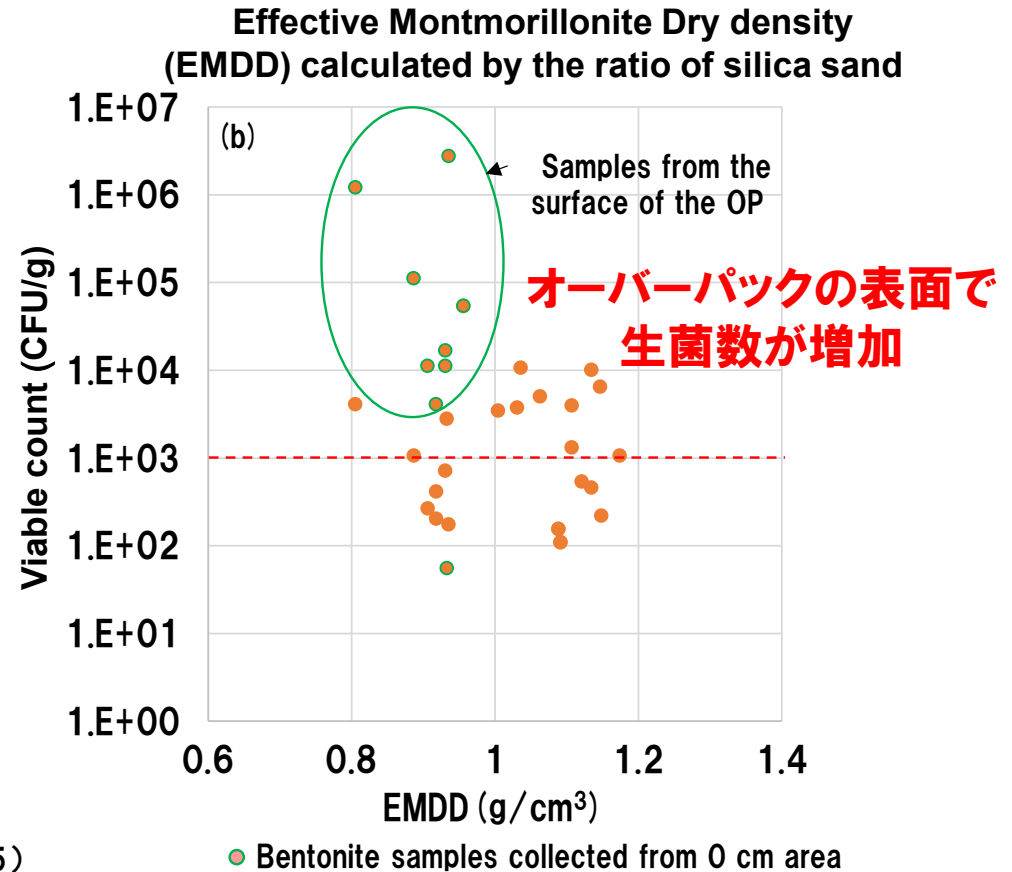
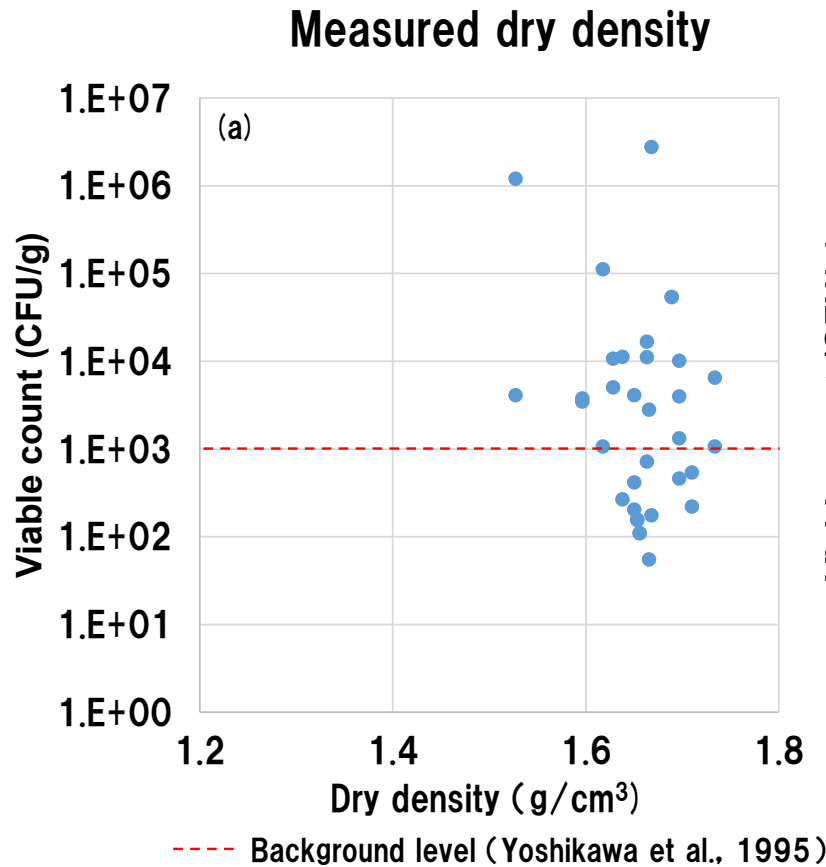


■ 鉄代謝をおこなう微生物 ■ 硫酸還元菌等の硫黄代謝をおこなう微生物

地下水中の微生物組成の経時変化

補足説明※4 (4/4)

補足説明



幌延URLの原位置腐食試験における微生物影響評価
緩衝材中における実測乾燥密度/算出有効モンモリロナイト密度と生菌数の関係

補足説明※5 (1/2)

第34回議事録の内容 (P8)

○ EDZの定義はどのように考えているか。相対的な透水係数の変化を基準として定義を考えた方が良いと思うが、いかがか。

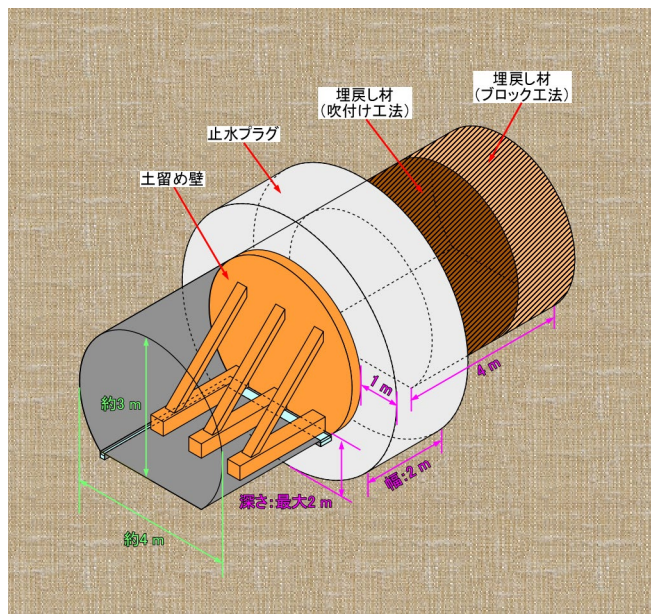
⇒ 今回の調査では割れ目の観察を踏まえ、透水係数が低下した領域をEDZとして判断している。(※5)EDZの透水係数は処分場の母岩など地質環境によるため、現時点で一概に透水係数の値を基準としてEDZを定義することは難しいと考えている。そのため、元の岩盤の透水係数と掘削による損傷を被った領域の透水係数を比較により、どの程度のEDZの透水係数に対して止水プラグによる改良が必要となるかを検討していきたい。

補足説明※5 (2/2)

補足説明

※5:

EDZの定義は、Tsang et al.(2005)によると、水理的、力学的及び化学的な変化が生じた領域のうち、物質の移行特性に大きな影響を与えた領域とされている。幌延の地下施設で計画している止水プラグの施工試験において、EDZの発生により増加した岩盤の透水性が止水プラグの要求性能へ与える影響について、岩盤の透水性の相対的な変化に着目したEDZの定量的な評価を実施していく。



止水プラグの原位置施工試験イメージ

止水プラグの原位置施工試験

坑道周辺に発生したEDZ割れ目の範囲とそれに伴う透水性の変化を調査

- コア観察、BTV観察によるEDZ割れ目の調査
- トモグラフィ測定によるEDZの広がり調査
- 坑道周辺の岩盤を対象とした透水試験・間隙水圧測定

➤ 調査結果を基に止水プラグの要求性能を具体化し、材料仕様などの設計に反映

補足説明※6 (1/2)

第34回議事録の内容 (P9)

○ 12頁において、「再冠水に伴う緩衝材の膨潤が生じても、せん断変位の増大に起因する将来的な透水係数の大きな変化はない。」とあるが、廃棄体周辺あるいは坑道周辺はケーシングまたはコンクリートで覆われると思うが、そうすると、膨潤圧の影響はその外側まで及ぶことは無いのではと思うが、どのように考えているのか。

⇒ ご指摘の通り、支保工を設置すると岩盤に対する緩衝材の膨潤の影響は無支保の場合と比較すると小さくなると思う。しかしながら、本成果は、せん断変位の大小によらず、何らかの外的要因により割れ目面に作用する垂直応力の低下が引き起こされない限りはEDZの透水係数に大きな変化は無いと結論付けたものであるため、支保工の有無が将来的な透水性に及ぼす影響は小さいと考えている。(※6)

補足説明

※6:

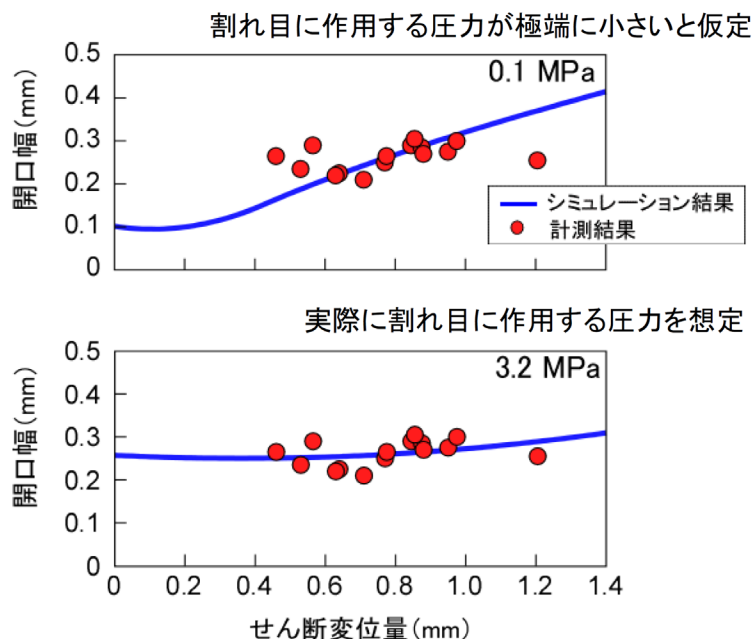
一方、支保部材の一つである吹付けコンクリート等のセメント系材料は、長期的な視点で考えると、セメント成分の溶脱等の影響により劣化し、やがて強度を発揮しなくなることが想定される。その場合は、膨潤圧が岩盤に及ぼす影響は無支保の場合と同程度になることが想定されるため、現状の検討結果が整合的な予測結果であると考えられる。

補足説明※6 (2/2)

EDZの透水係数の将来予測に関する研究

第34回資料
当該頁

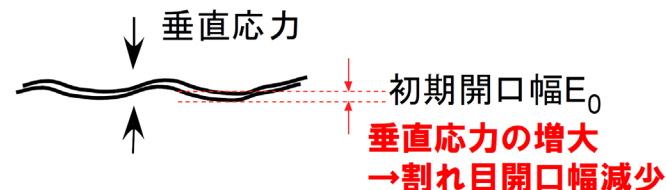
せん断変位と開口幅の関係



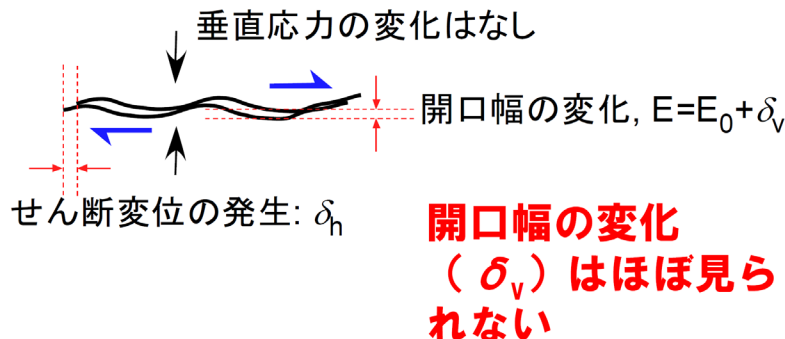
(after Aoyagi et al. (2022))

開口幅の変化の概念図

掘削直後の割れ目に作用する応力状態



せん断変位の発生



- せん断変位が増大しても有意な開口幅の変化は発生しない。
- 坑道閉鎖後の地下水の再冠水に伴う緩衝材の膨潤が生じたとしても、圧力が大きく低下しない限りは、せん断変位の増大に起因する将来的な透水係数の大きな変化はない。

補足説明※7 (1/3)

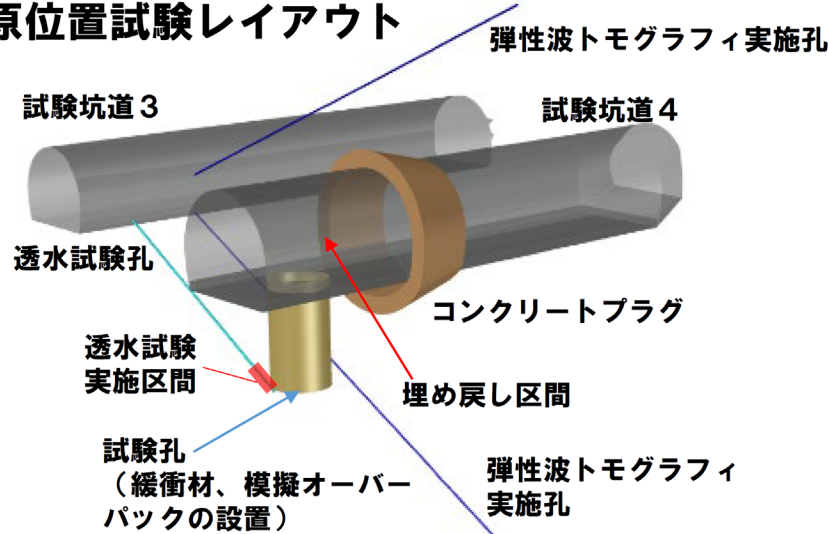
第34回議事録の内容 (P9)

○ 13頁において、透水係数の低下は緩衝材への注水開始より以前から始まっているように見える。透水係数の低下要因について再考を願いたい。

⇒ 原因については検討中であるが、ピットの掘削によりEDZ割れ目が開口した状態において透水係数の初期値を取得したが、その後ピットに緩衝材を定置し、隙間にケイ砂を充填したことで、割れ目が若干閉塞し、注水開始前に透水係数が低下した可能性がある。(※7)一方で、注水の開始以降も透水係数は僅かに低下しているが、既存の経験式により膨潤圧の発生に伴う割れ目面に作用する垂直応力の増大による開口幅の減少が説明できることが分かっていることから、緩衝材の膨潤とEDZの透水性の低下の間に因果関係は存在すると考えている。緩衝材や埋め戻し材の膨潤とEDZの透水性の低下について、解析的な検証にも今後取り組みたい。

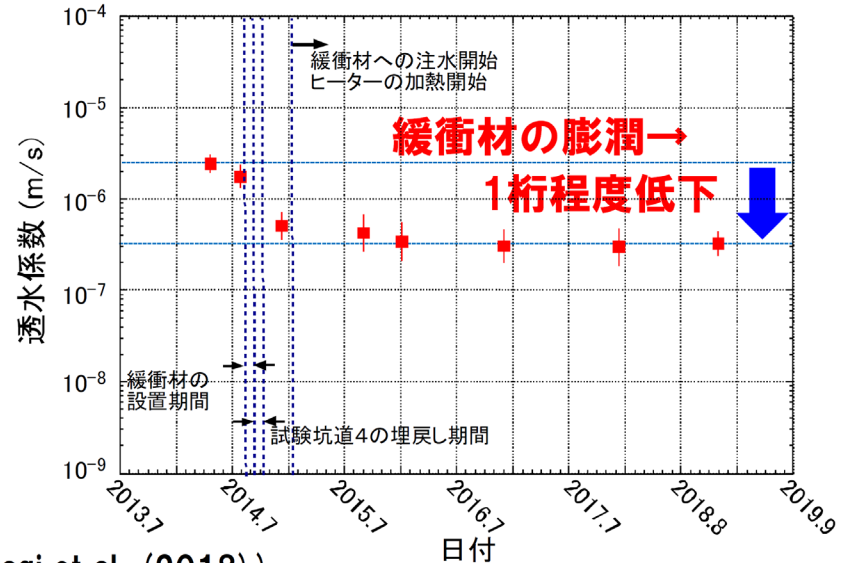
人工バリアの膨潤、坑道閉鎖に伴うEDZの透水性の将来予測

原位置試験レイアウト



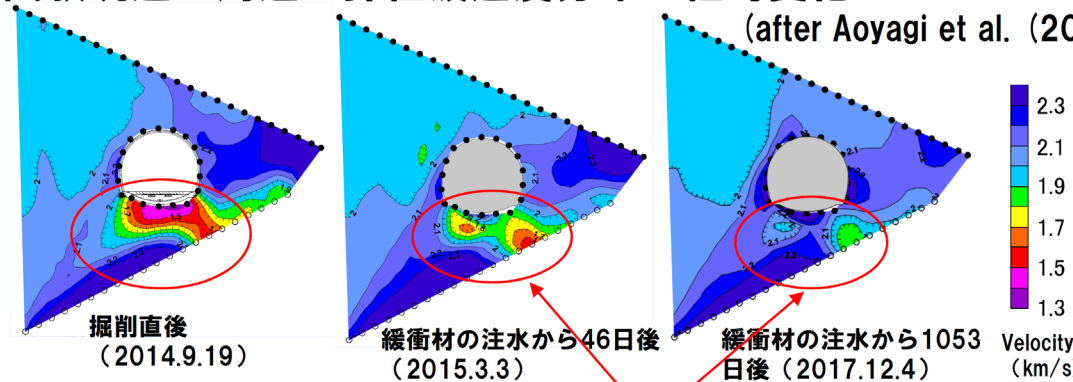
透水試験結果

(after Aoyagi et al. (2018))



試験坑道4周辺の弾性波速度分布の経時変化

(after Aoyagi et al. (2018))



緩衝材膨潤に伴う割れ目の閉塞や、閉鎖後の注水に伴う飽和度増大の影響を反映した底盤部の速度増大を確認。

坑道の一部閉鎖と地下水の冠水に伴う人工バリアの膨潤の影響により、割れ目の閉塞と若干の透水性の変化を確認。



割れ目面に作用する応力（特に垂直応力）がEDZの水理特性に影響を及ぼす。

補足説明※7 (3/3)

補足説明

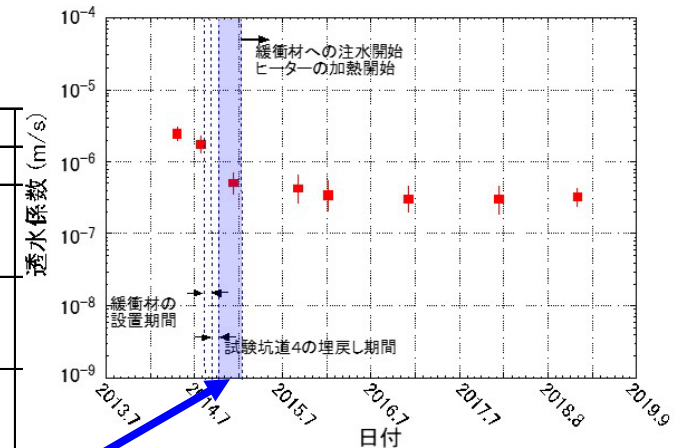
※7:

緩衝材定置後、注水する前にピット周辺の岩盤からの地下水の浸潤は既に発生しており、膨潤圧計測開始前に膨潤が発生しEDZ割れ目が閉塞したことも一因として考えられる。

人工バリア性能確認試験工程と透水試験実施日の関係

年	2013		2014		2015		2016		2017	
月	10	1	7	1	7	1	7	1	7	1
試験坑道4の掘削	■									
試験孔の掘削		■								
緩衝材、埋め戻し材の定置			■							
地下水の注水、ヒーターによる加熱				250 mL/min	150 mL/min	300-400 mL/min	1.3 L/min			
透水試験		▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼

2014年7月1日～2015年7月1日: プラグ周辺のコンタクトグラウトの実施



この期間に緩衝材に地下水が浸潤して膨潤が発生して割れ目が閉塞し、透水性が低下したことも想定される。

補足説明※8 (1/2)

第34回議事録の内容 (P14)

○ 12頁に示される図において、透水性の上限という意味は、あるDIの値における局所的な水みちの透水性が断層活動により変化したとしても、DIから予測される上限の範囲内に収まる、という理解で良いか。また、現在観察される水みち割れ目が、断層のずれる前のものなのか、ずれた後のものなのかについては、どのように判断するのか。

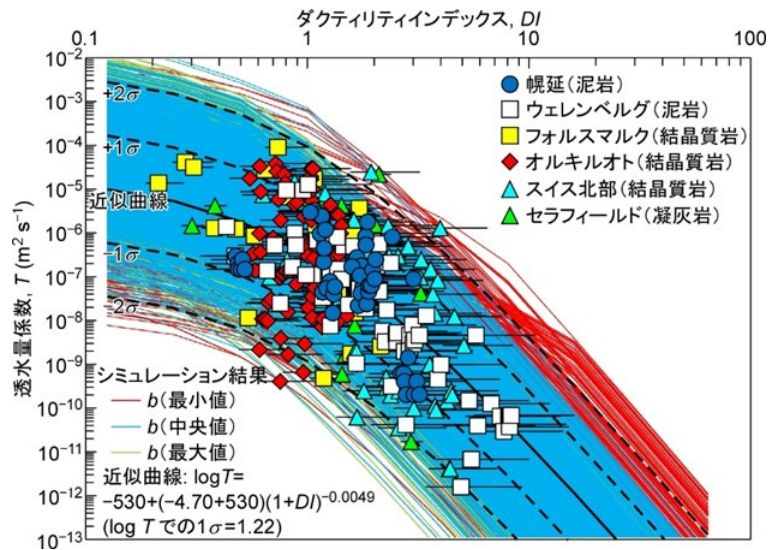
⇒ 透水性の上限という意味は、ご指摘の通りの理解である。ただし、隆起・侵食や沈降などにより応力場が変化した場合、DIの値の変化に伴い透水性の取り得る範囲も変化することになる。(※8)12頁の右側に示した石英充填鉱物の例では、試験開始時の透水性が経験式の上限に達していなかったことから、過去に鉱物充填がなされてから断層がずれていない可能性が高い。また、試験により断層をずらした後、透水性が増加したが、これは一時的な透水性の増加であり、再び石英の沈殿により水みちが充填される可能性もある。

補足説明※8 (2/2)

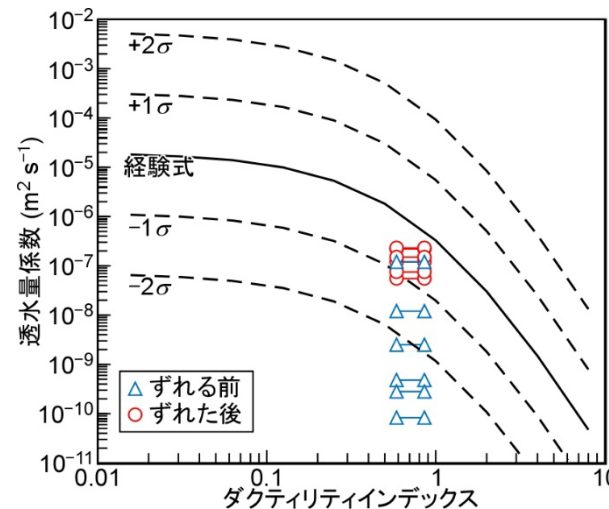
補足説明

※8:

現在観察される水みち割れ目が、断層がずれる前のものなのか、ずれた後のものなのかについては、現在の透水性から一定の推定を行うことが可能である。仮に、DIが4以下の状態で鉱物充填が発達する岩盤の断層の透水性が経験式の上限值に達している場合は、過去に断層がずれて鉱物充填が破壊された後の状態を見ている可能性が高い。上限の範囲に透水性が達していなければ、過去に鉱物充填がされた後、断層がずれていない状態を見ている可能性が高い。



透水性とDIの関係



石英などの鉱物に充填された断層がずれた後に経験式の値の範囲まで透水性が増加

グリムゼル試験場の水圧擾乱試験結果 Ishii (2021, Eng Geol)