

深地層の研究施設計画に関する 第3期中長期計画期間の成果取りまとめ (CoolRepR4・幌延)へのコメント対応結果について

**令和3年11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
幌延深地層研究センター 深地層研究部**

委員からの主なコメントと回答(コメントNo.4)

3.4.1 人工バリア性能確認試験

No.	コメント	回答
4	(1) 実施内容 ②人工バリアの製作・施工及び品質管理手法の適用性確認 (コメント) 細かいことですが、表3.4-1にある含水比の管理基準値の幅が記載されていませんが、正しいでしょうか。含水比は幅を持たせないと管理できないと思います。	混合土の含水比においては、事前に明確な管理基準値を設定していた項目ではなく、混合後の品質を確認するために含水比を確認した項目であるため、表を修正いたしました。 ブロック製作時の含水比については、事前に実施した圧縮成型機(2000tプレス機)を用いたブロックの製作性確認において、含水比9～12%であれば乾燥密度1.8Mg/m³のブロックを製作可能であることを確認しており、その中央値である10.5%を設定値として採用しています。 混合時には、設定値に対してどの程度の精度で混合できるかを確認するために、バッチ毎の含水比を測定しています(表)。その結果、10.5%の設定値に対し±0.7%以内と、ブロックの製作性に問題ないことが確認できたため、その混合土でブロックを製作しました。 今後、混合土の含水比の管理基準値を設定する場合は、ブロックを製作する機械の締固め特性に基づいて、品質管理を行うことが可能と考えられます。

委員からの主なコメントと回答(コメントNo.4)

アイリツヒミキサーにて混合した各バッチ毎の混合土の含水比測定結果

Batch No.	含水比 (%)	Batch No.	含水比 (%)	Batch No.	含水比 (%)	Batch No.	含水比 (%)	Batch No.	含水比 (%)
1	10.0	11	9.9	21	10.2	31	10.8	41	10.9
2	9.9	12	10.0	22	10.7	32	10.7	42	11.0
3	10.1	13	9.9	23	11.1	33	10.8	43	11.1
4	10.1	14	10.0	24	10.8	34	10.9	44	11.2
5	10.0	15	10.1	25	10.9	35	11.1	45	10.9
6	10.1	16	10.0	26	10.9	36	11.0	46	10.5
7	10.1	17	10.1	27	10.6	37	11.0	47	10.7
8	10.1	18	10.1	28	10.7	38	10.8		
9	10.1	19	10.2	29	11.0	39	10.9		
10	10.1	20	10.2	30	10.8	40	11.1	平均	10.5

委員からの主なコメントと回答(コメントNo.12)

3.5.2 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験

No.	コメント	回答
12	(1) 実施内容 ②閉鎖技術に関する製作・施工および品質管理手法の適用性確認 (コメント) RI法、QTMなど略称については初出時点で正式名を記すべきではないか。 また図3.5-15をもってRI法の適用性が高いと判断した理由は何か？ 図3.5-15における各手法によるばらつきに対する議論は行われているのか？など結論を得るまでのプロセスをもう少し丁寧に説明した方がいいのではないか。	該当部分の記載を以下のように修正いたしました。 「転圧締固めによる埋め戻し材の乾燥密度を砂置換法、RI (Radio Isotope) 法、QTM(熱伝導率法: Quick Thermal conductivity Method) およびレベル測量により確認した(図3.5-14)。その結果、いずれの方法においても、乾燥密度測定を実施した層において、転圧締固めの設計乾燥密度 1.2 Mg/m³以上を満たしていることを確認した(図3.5-15)。砂置換法は採取した試料の含水比と密度を直接計測するため得られる値の信頼性が高いが、現場での作業に加えて含水比の測定に時間を要する。砂置換法で得られる乾燥密度の値と比較してRI法とQTMはばらつきが多いものの、2つの方法で得られた乾燥密度の値に顕著な差は観測されなかった。レベル測量では、他の3つの方法と比較してばらつきが大きくなる結果となった。 また、現場での作業時間は、レベル測量<砂置換法、RI法<QTMという結果であった。これらの方法のうち非破壊で測定が可能なRI法、QTMおよびレベル測量を比較すると、RI法では現場にて土の湿潤密度および含水比が直接測定できる特長がある。以上を考慮すると、転圧締固めによる埋め戻し材の施工中の乾燥密度の管理手法として、現場で測定後すぐに乾燥密度が得られるRI法が比較的簡便かつ適用性の高い方法であるとの結論を得た(中山・大野、2019)。」

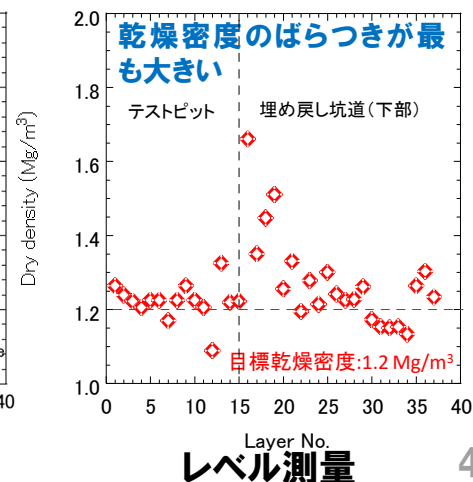
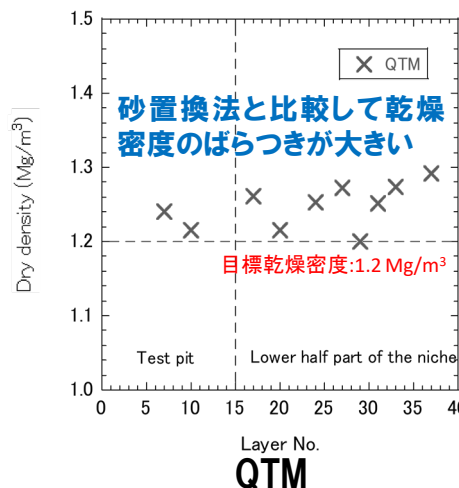
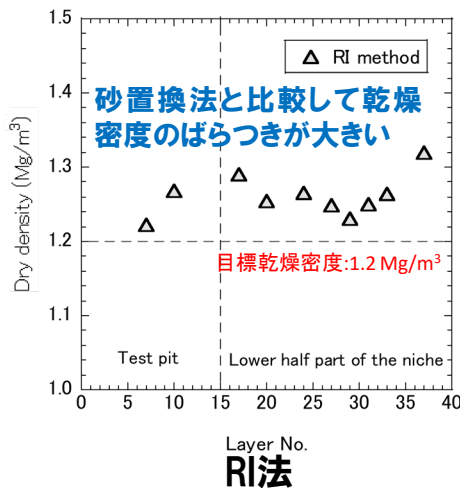
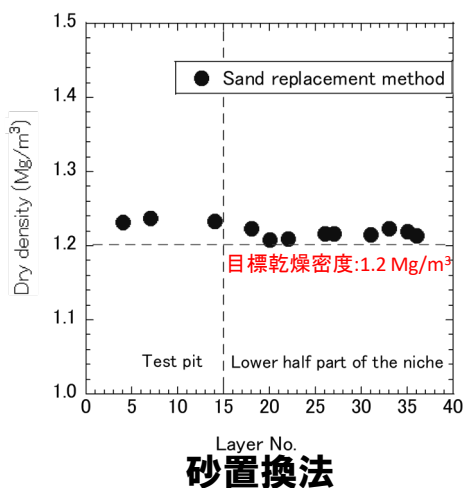
委員からの主なコメントと回答(コメントNo.12)

- 砂置換法: 施工した埋め戻し材を採取し、その代わりに砂を充填することにより採取した埋め戻し材の体積を求める。採取した埋め戻し材の含水比を測定し乾燥密度を求める。
- RI(Radio Isotope)法: 放射性同位元素を利用して土の湿潤密度および含水比を現場において直接測定する。短時間に結果を得られる。
- QTM(熱伝導率法; Quick Thermal conductivity Method): 事前に埋め戻し材の熱伝導率と含水比の検量線を作成し、現場で熱伝導率を測定して埋め戻し材の含水比を求め、他の方法で測定した湿潤密度から乾燥密度を求める。
- レベル測量: 転圧締固めした埋め戻し材の施工後の層厚を測定する。層厚と埋め戻し材の実投入量との関係から湿潤密度を算出し、投入した材料の含水比を用いて乾燥密度を求める。

砂置換法は、施工した埋め戻し材から採取した試料の含水比と密度を直接測定するため値の信頼性が高いが、現場での作業に加えて、別途含水比を測定するために時間を要する。

砂置換法以外の方法では非破壊で測定が可能であり、特にRI法では現場において密度と含水比が直接測定できる利点がある。また、現場での作業時間はレベル測量<砂置換法、RI法<QTMという結果であるが、レベル測量では得られる乾燥密度の値のばらつきが大きい。

以上を考慮すると、転圧締固めによる埋め戻し材の施工中の乾燥密度を管理する手法としては、現場で測定後すぐに乾燥密度の値が得られるRI法が比較的簡便かつ適用性の高い方法と考えられる。



委員からの主なコメントと回答(コメントNo.14)

3.5.2 人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験

No.	コメント	回答
14	(3.3.1再冠水試験 へのコメント) (3) まとめ (コメント) 「坑道閉鎖後におけるEDZの水理学的影響の推定や、坑道閉鎖時のEDZの止水技術に関する検討を進める必要がある」とありますが、重要な課題だと思います。今後の幌延での研究開発に反映されるのでしょうか。	坑道閉鎖時のEDZの止水技術に関する検討については、令和2年度以降の研究計画の中に記載されている閉鎖技術の実証の取り組みとして、資源エネルギー庁委託事業「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業(地層処分施設閉鎖技術確証試験)」(以下、エネ庁事業)の中で実施中です。 本検討では、EDZの止水技術として考えられている止水プラグに求める性能を設定するためのデータ取得を目的に、止水プラグの材料であるベントナイト系材料がどの程度の止水性能を持つかを確認するための原位置試験(次ページ)などを実施しております。これらの成果は、R4年度末に予定しているエネ庁事業の成果を取りまとめる中で記載する予定です。

委員からの主なコメントと回答(コメントNo.14)

止水プラグは、掘削損傷領域(EDZ)の幅を上回るように岩盤に切欠きを設けてベントナイト系材料を設置することにより、坑道周辺の移行経路を遮断する構造が検討されている。止水プラグに求める性能を設定するためのデータの取得を目的として、止水プラグの材料として検討されているベントナイト系材料の止水性能を確認するための試験を、350m調査坑道において実施している。

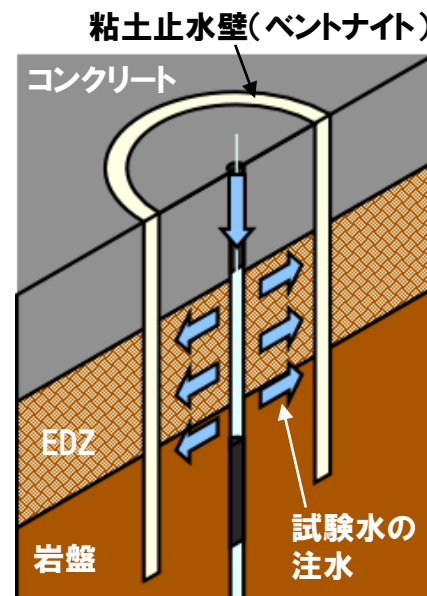
本試験では、坑道の床面に発生しているEDZを遮るようにベントナイトを用いた粘土止水壁を作り、EDZ中の水の流れを遮る効果を確認している。粘土止水壁を作る前後で透水試験を実施し試験領域の透水係数を算出することにより、粘土止水壁によりどの程度水の流れやすさが小さくなるかを評価する。



円周でくりぬいた隙間にベントナイトを充填し粘土止水壁を構築



坑道床面の表面までベントナイトを充填し粘土止水壁が完成した状態

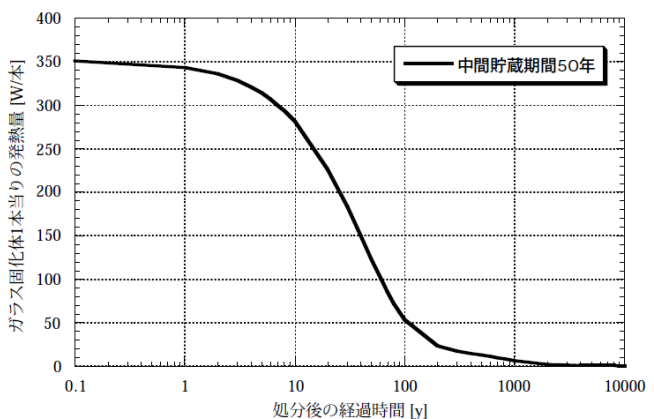


試験領域の概略図

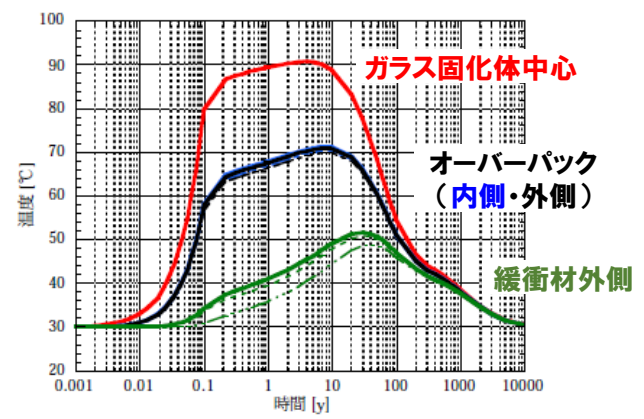
委員からの主なコメントと回答(コメントNo.20)

3.5.3 高温(100℃以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

No.	コメント	回答
20	(1) 実施内容 ・背景・目的 (コメント) 100度を上回らないと設定するよりも、それ以上になった想定外の現象を検討することは重要と思います。その検討のなかで廃棄体の発生熱量を算出することは重要と思いますが、想定はむずかしいのでしょうか？	廃棄体からの発生熱量については、第2次取りまとめですでに算出されています。たとえば、埋設時のガラス固化体からの発生熱量は、再処理までの冷却期間4年・貯蔵期間50年のとき約350W/本、貯蔵期間が30年のときは約560W/本で、時間経過にともなう発生熱量の減衰も計算により求められています(核燃料サイクル開発機構, 1999)。 想定外の現象に関しても、基本的にはこの関係に基づいて廃棄体の発生熱量は推定可能と考えられます。



ガラス固化体1本あたりの発生熱量の時間推移
(中間貯蔵期間50年の場合; 核燃料サイクル機構, 1999)



ガラス固化体からの発生熱量に基づく人工バリアの温度経時変化
(堆積岩, 坑道間距離10 m, 廃棄体ピッチ4.4 m; 核燃料サイクル機構, 1999)

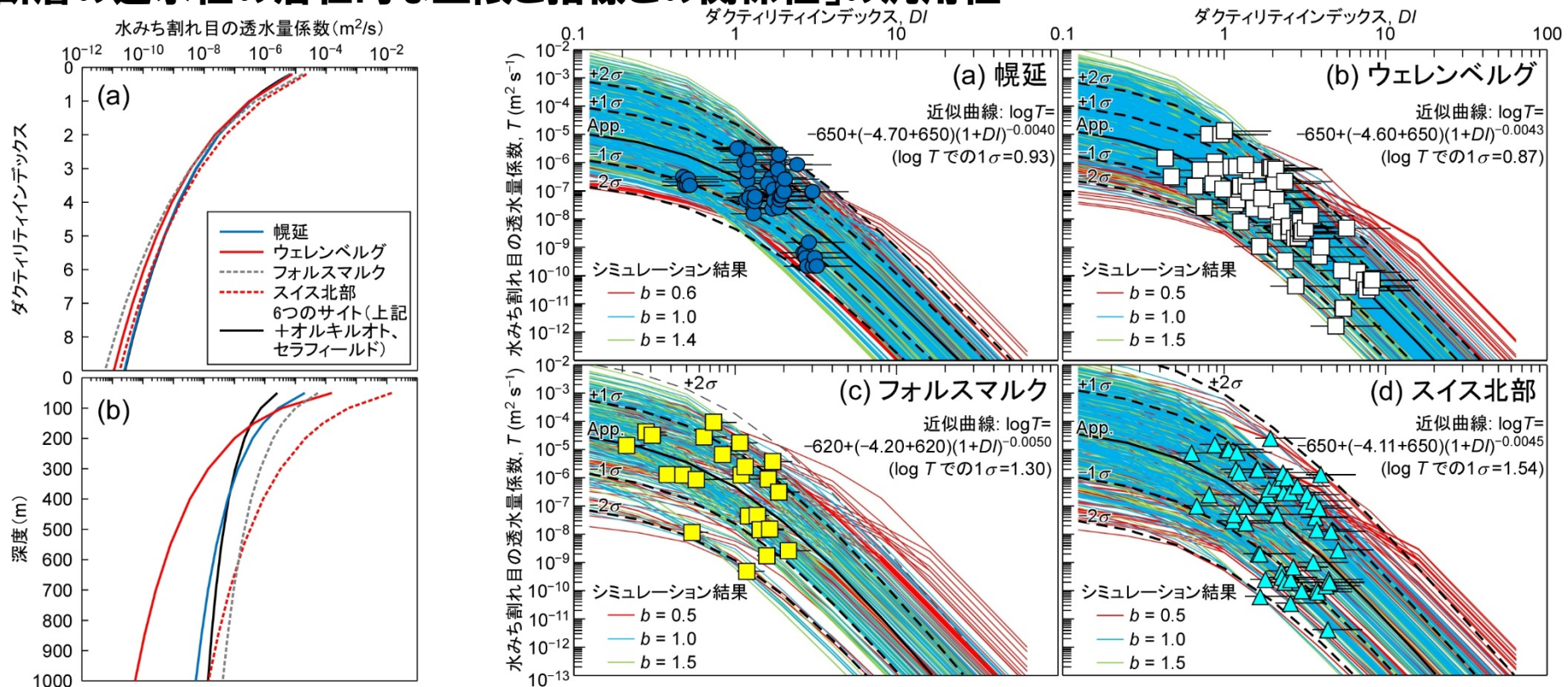
委員からの主なコメントと回答(コメントNo.24)

4.2.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

No.	コメント	回答
24	(コメント) DIの値と変形によって生じる割れ目のタイプとの関係は、声問層と稚内層という珪藻土および珪質泥岩を用いた実験によるものであり、他の一般的な泥岩と比較する記述が欲しかった。図4.2-8はあるが、いろいろな岩石が対数グラフにプロットされているので、議論がかなり粗く感じる。 水圧擾乱試験で、断層が変位しても透水係数が変わらないという知見は重要。堆積岩には、幌延のような珪質な軟岩の他に、付加体の岩石や、広義には凝灰岩も含まれるが、こういった岩石についても発展的な考察があると良いと思いました。付加体の堆積岩の場合には不均質性が大きな特徴。続成作用の進んだ堆積岩もDIで幌延の岩石と同様な評価が可能であるのか、議論できると良い。	ご指摘を踏まえ、項目「断層のダメージゾーン～強度・応力状態の指標」に以下の文言を追記しました。「今回行われた観察・実験は幌延の珪質泥岩を対象に行われたが、DI=2という閾値はグリフィス・クーロンの理論から導かれており(図4.2-3)、この結果は様々な岩種に広く適用できるものと考えられる。」 また、ご指摘を踏まえ、図4.2-8を地域ごとに細分した図により(次図)、詳しい説明を追加するとともに、片対数グラフなどの図も追加しました。 さらに、今回得られた結果が岩種に依存しない点や付加体のように不均質性が大きい場合の留意点も同項目に追記しました。

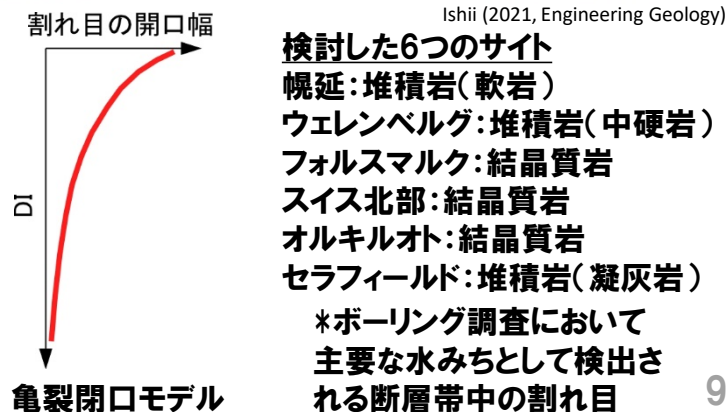
委員からの主なコメントと回答(コメントNo.24)

「断層の透水性の潜在的な上限と指標との関係性」の汎用性



(左図)水みち割れ目の透水性をDIで整理すると、検討した6サイトで一般的な関係性が認められる(深度では認められず)。

(右図)透水性とDIの関係性は、一般的な亀裂閉口モデルに基づくシミュレーションによってよく再現できる(DIの変化に伴う亀裂の弾性的な開閉現象で説明可能)。



委員からの主なコメントと回答(コメントNo.25)

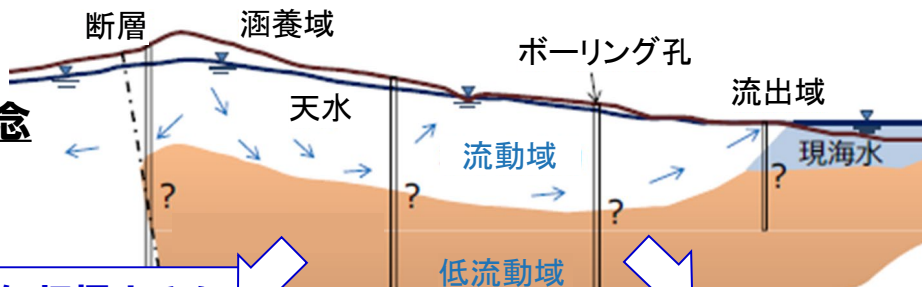
4.2.2 地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術の高度化

No.	コメント	回答
25	(1) 実施内容 図4.2-16(※) (コメント) 地下水流動のところが、流動域と低流動域とに区分されている。 化学的な判別を考えると、流動域・流動につられて動く低流動域・海水準変動で動きが変わる領域・不動領域に別れると考えている。検討してほしい。 特に現状の化石海水領域と将来にわたっても化石海水である領域を区別することは重要であると考えます。	研究所周辺では、酸素や塩素の安定同位体比から、流動域、拡散プロセスが支配的な領域、それらの中間領域に分類できます。稚内層深部は、割れ目が少なく、透水性も低く不動領域に相当すると考えられます。 また、隆起・侵食に伴う透水性の変化に付随して各領域が変化してきたと推察されます。 一方、幌延の沿岸域深部は相対的に透水性が高く、コメントのように海水準変動によって領域が変化してきたと推察されます。 それぞれの岩盤で、観察事実に基づいて領域変化を比較、考察することで、不動領域を同定する手法を整備できると考えられます。 本課題については、エネルギー事業(岩盤中地下水流動評価技術高度化開発)で実施しており、最終年度にあたる次年度に、成果の取りまとめを行います。

※修正後の本文では、図4.2-18

委員からの主なコメントと回答(コメントNo.25)

幌延地域の 広域地下水流動概念



主に原子力機構が担当

1) 低流動域の分布を効率的に把握するための技術の高度化

【目的】

物理探査やボーリング調査といった地上からの調査により、現在の化石海水の三次元分布を推定する手法の整備する。

【主な実施項目】

- ・ 施設スケール(約3km四方)を対象とした高密度電磁探査と準三次元反射法地震探査の実施
- ・ ボーリング調査による塩濃度および酸素・水素同位体比の深度プロファイルの取得
- ・ 地球統計学的手法に基づく塩濃度および酸素・水素同位体比の三次元分布の推定

化石海水を低流動域の指標としている根拠の提供

現在の化石海水の三次元分布の推定結果

低流動域の三次元分布の推定結果の反映

主に電中研が担当

2) 低流動性を確認するための技術の開発

【目的】

化石海水が分布する領域がどの程度低流動なのか、また、その領域がどのような経緯で現在の状況になったのか(古水理地質学的変遷)を明らかにする。

【主な実施項目】

- ・ 拡散で分離・分別する指標を用いた拡散場調査の有効性の検討
- ・ ^{81}Kr を用いた天水浸入の履歴確認と地下水年代測定の有効性の検討
- ・ 地史を踏まえた水質形成機構の検討(原子力機構実施)

3) 低流動域を含めた広域スケールでの水理場・化学環境の評価技術の開発

【目的】

1)と2)の成果を踏まえた広域スケールでの水理場・化学環境の評価手法を体系的に整理する。

【主な実施項目】

- ・ 地下深部の低流動域の調査・評価に関する手法の体系的な整理
- ・ 調査の進展と低流動域の三次元分布の理解度の関係に関する検討(ブラインドテスト)

委員からの主なコメントと回答(コメントNo.32)

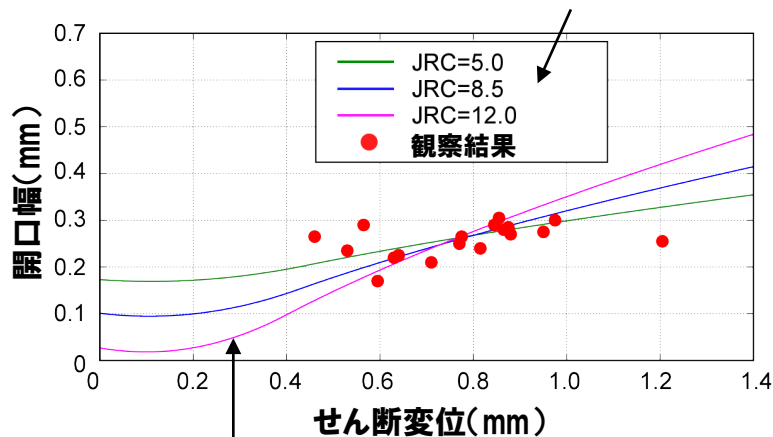
4.2.3 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

No.	コメント	回答
32	(1) 実施内容 ②地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験 (コメント) 割れ目のせん断変位量と開口幅との相関が乏しいと、なぜ、「割れ目面に垂直にかかる力が大きいため、割れ目の開口が抑制されている」ことがわかるのかわかりません。 結局EDZで増加した透水性は、埋め戻し後にどうなるのか明確に書かれていないように思いました。	項目②に開口抑制の原因についての説明、「一般に、割れ目がせん断する時、最初の僅かなせん断変位(最大で1～2 mm)で、大きく開口幅が増大する。一方で、その後はせん断変位量が増加してもあまり開口幅が増加しなくなり、ガウジが形成され始める。(中略)また、割れ目面にかかる垂直応力が大きいほど、最初のせん断変位による開口幅の増加量は小さくなる。 (中略)観察した深度350mの割れ目では、最大1mm程度のせん断変位が確認されたが、(中略)ガウジの形成は認められない。また、割れ目のせん断変位量と開口幅との相関が乏しいことを確認した。 これは、割れ目面に垂直にかかる力が大きいため、割れ目の開口が抑制されていることを示唆する」を加えました。 また、二点目の埋め戻し後の透水性については、現在、まだ解析中のため、本報告では記載を控えました。

委員からの主なコメントと回答(コメントNo.32)

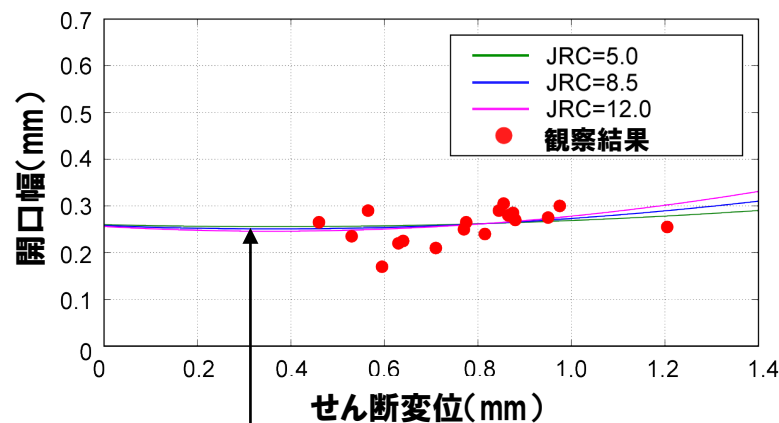
割れ目のせん断変位量と開口幅との相関が乏しいことと、割れ目面に垂直にかかる力との関係

JRC = 割れ目表面の粗さ(値が大きいほど粗い)



シミュレーション結果
垂直応力=0.1 MPaの場合

(左図)割れ目がずれると、割れ目表面の凹凸のかみ合わせが悪くなり、開口幅が増加する(せん断膨張)。



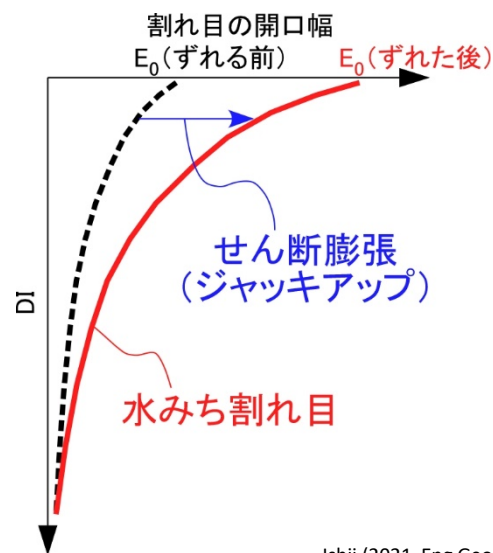
シミュレーション結果
垂直応力=3.2 MPaの場合(原位置相当)

(右図)垂直応力が大きいと、凹凸が弾性的につぶれるため、割れ目がずれても開口幅が増加しにくい。

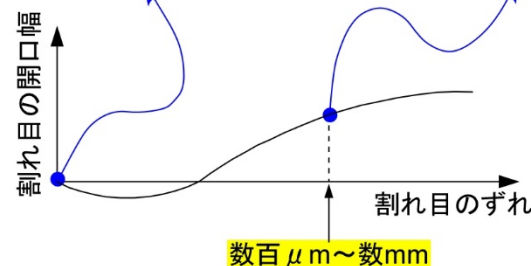
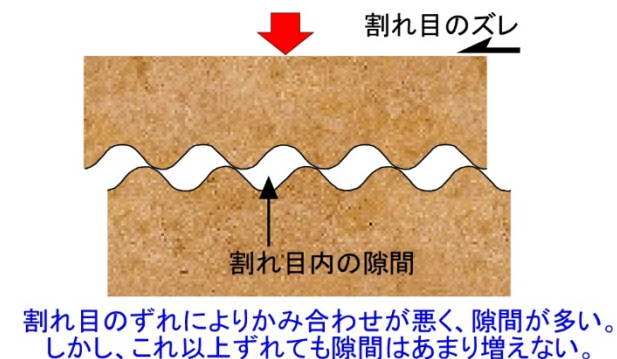
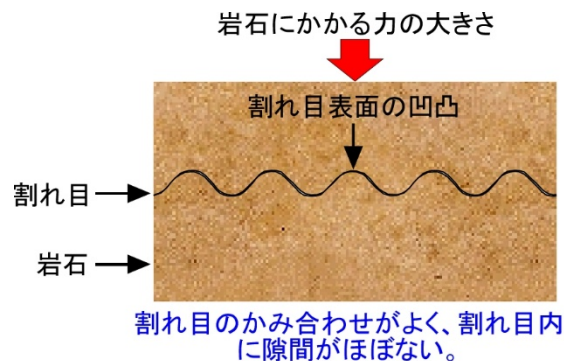
観察結果⇒深度350mのEDZ割れ目の開口幅とせん断変位の相関性が乏しい。
原因⇒垂直応力が大きいため、せん断膨張が抑制されていると考えられる。

（参考資料）

「断層の透水性の潜在的な上限と指標との関係性」の汎用性(1/2)



Ishii (2021, Eng Geol)



DIが一定の場合

Asadollahi & Tonon (2010, Eng Geol)

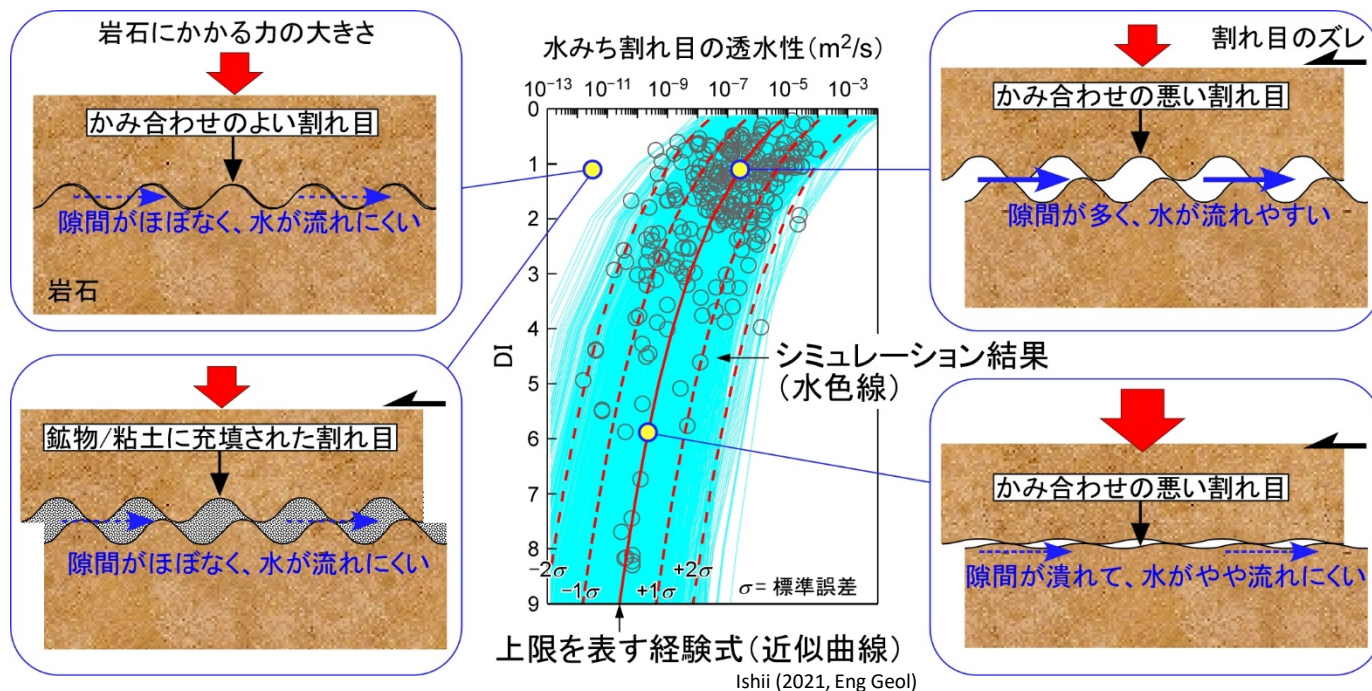
水みち割れ目の透水性(開口幅)に達するためには、**0.05～2.00 mm程度のせん断変位**に伴う割れ目のせん断膨張が必要(室内せん断実験のデータに基づく)

一般に、**数百 μm ～数mm程度のせん断変位**で割れ目のせん断強度のピークに達し、それ以上割れ目がずれても開口幅は増加しにくくなる(以降はガウジが形成し始める)。

水みち割れ目の透水性(開口幅)は、あるDIに対して、せん断膨張により増加し得る割れ目の開口幅の上限を意味する。

「断層の透水性の潜在的な上限と指標との関係性」の汎用性(2/2)

まとめると、...



- 水みち割れ目の透水性(開口幅)は、あるDIに対してせん断膨張により増加し得る割れ目の開口幅の上限を意味しており、その上限は図に示す経験式によって表せる。
- この関係は特定の岩種に限定されるものではなく、様々な岩種に適用できる。