

の関係を飽和度も併せて表示しています。岩石の飽和度が 80%から 100%までの範囲では比抵抗があまり変化しない一方で弾性波速度は急激に変化しますが、飽和度が 80%以下の範囲では弾性波速度はあまり変化しない一方で比抵抗が著しく変化します。図 60 の右図に示すとおり、深度 350 m において坑道壁面や底盤を対象とした比抵抗探査では、比抵抗の値は平均的に $3 \Omega \cdot m \sim 4 \Omega \cdot m$ であり、 $10 \Omega \cdot m$ を超えることはありませんでした。一方で、図 60 の左図示すとおり、P 波速度では、 $1,500 \text{ m/s}$ を下回る領域が孔壁側に現れています。健岩部で、なおかつ比抵抗が $10 \Omega \cdot m$ を下回る場合、図 61 に示すように P 波速度は $1,800 \text{ m/s}$ を下回ることはありません。P 波速度は、岩石の硬さや亀裂の数に影響され、変形しやすい方が遅くなる性質があります。このことから、深度 350 m の坑道壁面周辺の弾性波速度が $1,800 \text{ m/s}$ を下回るような領域では亀裂が発達していると考えられます。

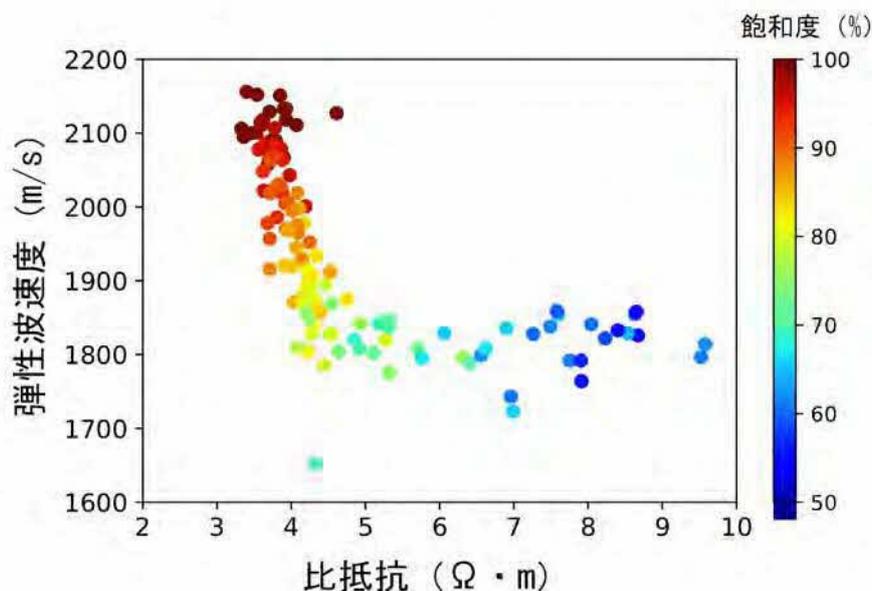


図 61 測定された弾性波速度と比抵抗の関係

取得された比抵抗および弾性波速度の関係を今後解析に取り込むことを目的として、比抵抗と飽和度および弾性波速度と飽和度の関係を岩石モデルを用いて近似しました。図 62 はアーチーの式⁽¹⁵⁾を用いて比抵抗を近似した結果で、図 63 はガスマン・ビオのモデル^(16, 17)を用いて弾性波速度を近似した結果になります。弾性波速度に関しては、岩盤の中で飽

和している部分と乾燥している部分が疎らに存在しているような仮定をしたモデル化により適切に近似することが出来ました。

これらの測定により取得された比抵抗と弾性波速度の関係は、2つの異なる物理探査手法を統合して解析するジョイントインバージョン*69に使用することができます。ジョイントインバージョンにより、異なる物理探査手法を個別に解析するよりも解析精度の向上や推定結果の不確実性を低減することが期待できます。

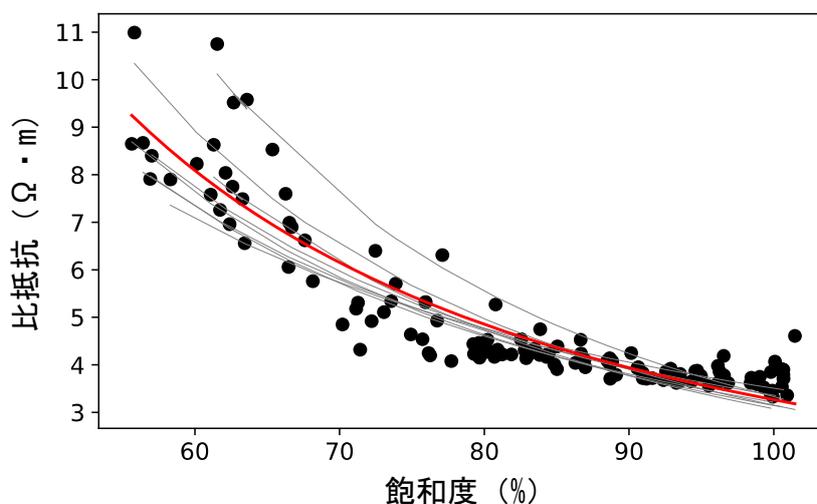


図 62 アーチーの式による比抵抗の近似

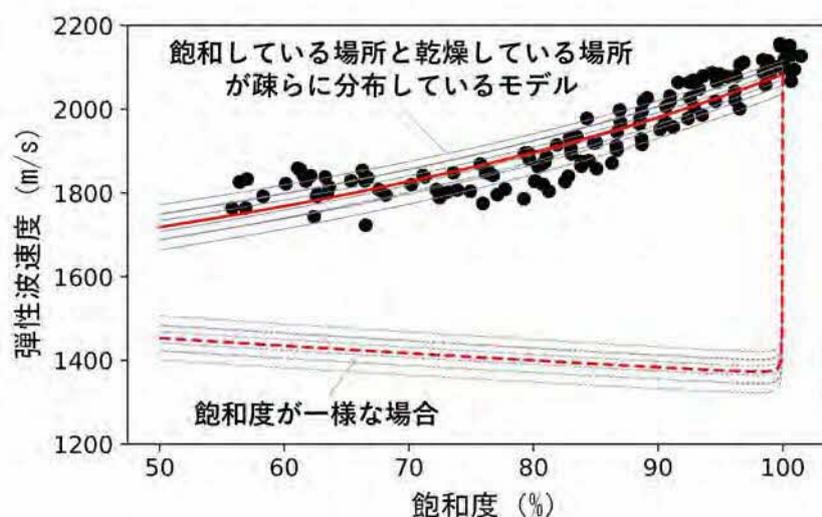


図 63 ガスマン・ビオの式による弾性波速度の近似

*69：異なる物理探査手法で取得された調査結果に関して、地下の構造や岩石の物性値に関連性を与え、解析を行うことです。

⑤ 坑道内から掘削されたボーリング孔の閉塞技術の実証

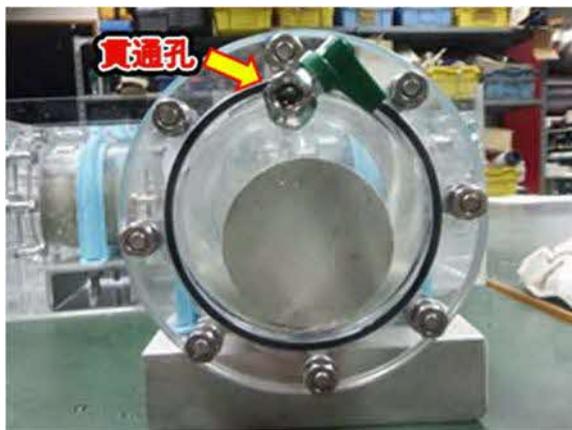
地下施設の建設のために地上から掘削される調査ボーリング孔は地上へと直結する卓越した水みちにならないよう適切な方法で閉塞することが求められています。また、地下施設の建設時には坑道内からボーリング孔が掘削される場合もあり、これらのボーリング孔が割れ目などと連結する短絡経路となることや地層処分システムの長期安全性に影響を及ぼさないようにボーリング孔を適切な方法で閉塞することが求められています。

坑道内から掘削された水平に近いボーリング孔では、閉塞作業の際に重力以外の駆動力によって目的の閉塞位置まで閉塞材料を輸送することが必要となります。また、日本のように豊富に地下水が存在する地質環境では、地下空間へ向かう方向にかかる動水勾配が大きい地下環境において、ボーリング孔への地下水流入量が比較的多い中での作業が想定されるため、高水圧、高湧水量条件下でボーリング孔を閉塞可能な技術が必要となります。

そこで、本検討では、坑道内から水平に近い向きに掘削されたボーリング孔を対象に、地下深部の地質環境条件を考慮した上で閉塞する材料の仕様を決定する考え方を整理するとともに、施工方法の適用性を検討します。令和3年度は、ボーリング孔にベントナイトブロックを設置する方法を対象に、ボーリング孔の閉塞に係るブロックの特性として膨潤状況や閉塞後の透水性を把握するための室内試験を実施しました。また、ボーリング孔内にベントナイトブロックを設置する具体的な手順を室内の模擬ボーリング孔で確認しました。

室内試験では、ベントナイトブロックの膨潤状況の確認と膨潤後密度を測定して閉塞後の透水性を把握するために必要なデータ取得を行いました。膨潤状況は目視で確認し、その状況を写真により記録しました。図64にベントナイトブロックの膨潤状況を示します。ベントナイトブロックは、クニゲルV1を直径75 mm、高さ100 mm、乾燥密度が 1.6 Mg/m^3 となるように締固めて作製しました。内径100 mm、長さ100 mm程度のアクリル製試験装置内にベントナイトブロックを設置し(図64(a))、その試験装置を幌延の地下水の水質を模擬した試験用水に浸水させました。浸

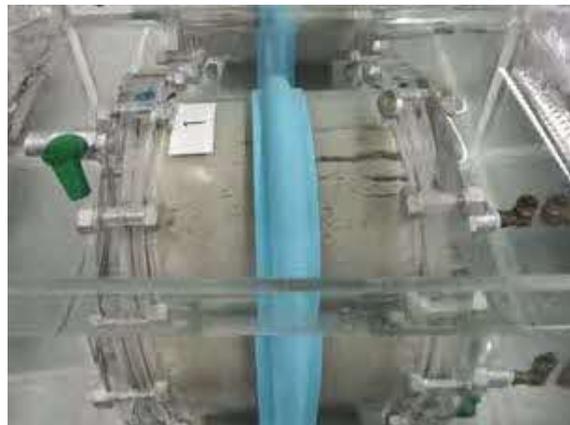
水させたベントナイトブロックは、試験開始直後から徐々に膨潤し、装置の断面方向から見ると、試験終了時には断面全体を塞ぐようにブロックが膨潤している様子（図 64(b)）が確認されました。一方で、上面方向から見ると、ブロックと試験装置の内壁との間に一部隙間が残っている様子（図 64(c)）が確認されました。隙間が残った理由としては、室内試験に用いた試験装置の両端にある注水用の貫通孔周辺までベントナイトブロックが膨潤すると、貫通孔が塞がれることにより装置内部への水の供給がなくなり、隙間付近のベントナイトの膨潤が進まなくなるためと考えられます。



(a) 試験開始時（装置断面）



(b) 試験終了時（装置断面）



(c) 試験終了時（装置上面）

図 64 ベントナイトブロックの膨潤状況

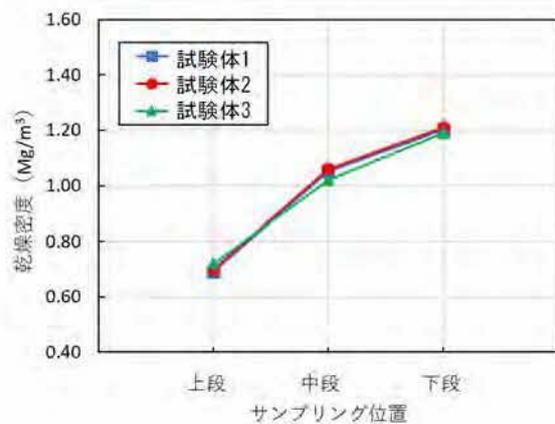
膨潤後の密度測定では、膨潤状況の確認と同様の試験装置を用いてベントナイトブロックを膨潤させたのちに、図 65(a)に示すように上段、中段、下段の 3 箇所からサンプリングを行い乾燥密度の測定を行いました。密度測定のために 3 つのベントナイトブロックを準備しました。乾

乾燥密度の測定結果を図 65(b)に示します。ブロックが均一に膨潤した場合の乾燥密度は約 0.9 Mg/m^3 となりますが、実際の測定では、いずれのブロックも上段で 0.7 Mg/m^3 程度、中段で 1.0 Mg/m^3 、下段で 1.2 Mg/m^3 であり、ブロック内で乾燥密度が不均一な状態であることが分かりました。

ベントナイトブロックを設置する手順については、令和 2 年度に抽出・整理した技術的な課題に基づいて、既往の調査⁽¹⁸⁾を基にコンテナを用いる方法を検討しました。図 66 にコンテナを用いたベントナイトブロックの設置方法の概念を示します。コンテナによるベントナイトブロックの設置手順は、まず、(a)ベントナイトブロックを収納しフタにより密閉したコンテナをボーリング孔内に挿入します。(b)設置箇所までコンテナが到達した後に、コンテナへ注水することにより、コンテナが移動してフタとともにベントナイトブロックがボーリング孔内へと排出されます。(c)コンテナをボーリング孔から抜きとったのち、ベントナイトブロックがボーリング孔内の地下水により膨潤し隙間を埋めることでボーリング孔が閉塞します。



(a) サンプル位置



(b) 乾燥密度測定結果

図 65 ベントナイトブロックの乾燥密度

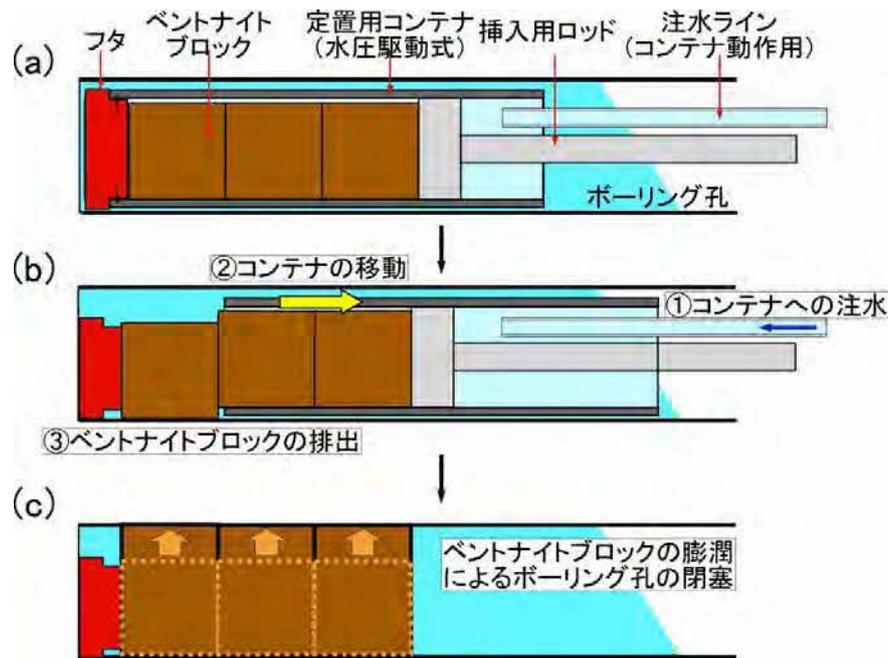
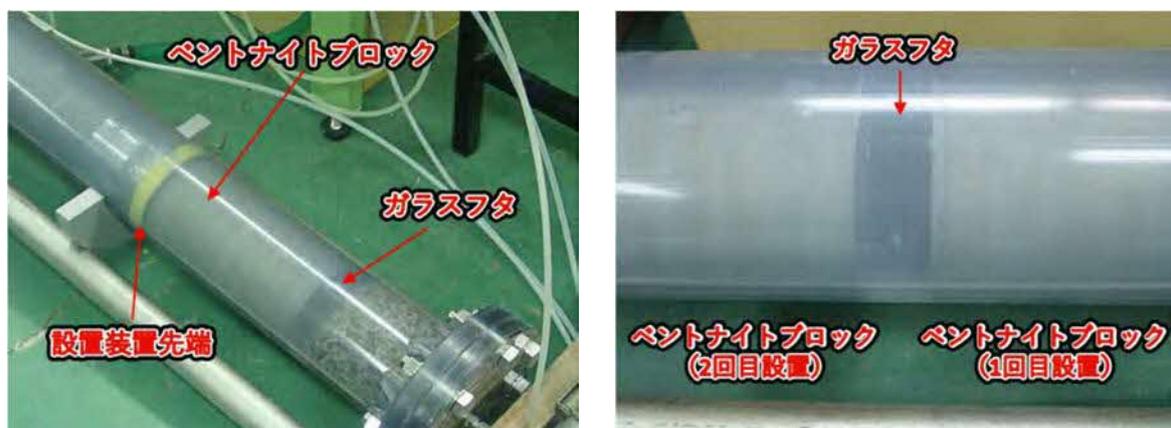


図 66 ボーリング孔内へのベントナイトブロックの設置方法

上記のコンテナによる設置手順を試験室内に構築した模擬ボーリング孔を用いて確認しました。模擬ボーリング孔の大きさは内径 100 mm、長さ 4 m とし、ベントナイトブロックの設置状況を確認するために透明塩化ビニル管を用いました。設置手順の確認のために準備したコンテナは、直径 75 mm、長さ 100 mm のベントナイトブロックを 10 個収納することができ、1 回の作業で 1 m 分のブロックを設置できます。この確認では、3 回の作業を行い 3 m 分のベントナイトブロックを模擬ボーリング孔内に設置しました。図 67 にベントナイトブロックの設置手順の確認状況を示します。ボーリング孔へ地下水が流入する状況を再現するために模擬ボーリング孔の孔底から試験用水を注水し、その状態でベントナイトブロックの設置作業を行いました。図 67(a) に示すように、コンテナに注水するとガラスフタが外れてベントナイトブロックが模擬ボーリング孔内に排出されました。コンテナからの排出中には、ベントナイトブロックが注水した試験用水と触れましたが、破損や膨潤が生じることなく排出することができました。また、2 回目以降の設置作業では、その前の作業で設置したベントナイトブロックの上にガラスフタとベントナイトブロックを排出することになりますが、図 67(b) に示すように隙間が生じることなく設置することができました。

今後は、令和 3 年度に具体的な手順などを確認した、ベントナイトブロックを設置する方法を対象として、地下施設に掘削したボーリング孔を閉塞する原位置試験を実施し、閉塞方法の適用性評価を行います。



(a) ベントナイトブロックの設置状況 (b) 設置後のベントナイトブロック

図 67 ベントナイトブロックの設置手順の確認状況

(3) 人工バリアの緩衝材と坑道の埋め戻し材の施工方法の違いによる品質保証体系の構築

経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（令和 3 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[JPJ007597]：ニアフィールドシステム評価確証技術開発）の一環として、原子力環境整備促進・資金管理センター^{*70}と協力して緩衝材流出試験を実施しました。

人工バリアの 1 つである緩衝材の定置方法として、圧縮成形したブロックを廃棄体の周りに定置する施工方法が考えられています。この方法では、処分孔の孔壁と緩衝材の間に数 cm の隙間ができます。我が国で一般的に想定される豊富に地下水が存在する環境では、緩衝材の定置完了後に岩盤から処分孔に地下水が流れ込むこと（孔内湧水）が想定されます。地下の周囲の水位が処分孔の上端よりも高い状態であれば、流れ込んだ地下水は隙間を満たした後も、上向きの流れが継続する可能性があります。緩衝材の主な成分はベントナイトであり、地下水が浸み込むことにより膨潤し、岩盤やオーバーパックと緩衝材の間の隙間を埋めること（自己

*70：公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターは、放射性廃棄物処理処分の専門研究機関として設立されました。現在は、原子力発電環境整備機構を通して積み立てられる最終処分積立金の管理などを行う資金管理業務も実施しています。

シール性) が期待されています。しかし、自己シール性が発揮されるまでの膨潤過程では、表面付近の密度の低下やゲル化する部分に湧水の流れによるせん断応力が作用して緩衝材が削り取られる可能性や、残された水みちを介して削り取られた緩衝材が処分孔外に排出される可能性が懸念されています。

これまでに、350m 調査坑道の試験坑道 5 (図 5 参照) における試験孔において流出試験 (以下、原位置試験) を実施し、隙間に何も充填しない「隙間未充填ケース」に関する 4 か月間の試験では、自然湧水環境 (湧水量 : 0.4 L/min 程度) では初期に緩衝材の流出が見られたものの、緩衝材が膨潤し、隙間が埋まるにしたがって上部に排水される水の量は減少し、約 40 日後には完全に閉塞して緩衝材が上部に流出しなくなることを確認しました。また、隙間にケイ砂を充填する「ケイ砂充填ケース」に関しては、予備試験 (1 か月間の流出試験) により、流出濃度が低く維持されることが分かりました。

令和 3 年度は、隙間未充填ケースに関して、湧水量の比較的多い条件 (約 1.0 L/min) での原位置試験を想定していましたが、自然の地下水位の低下により試験孔で十分な湧水量を確保することが難しくなりました。そこで、湧水量の多い条件を含めて、幅広い条件を想定した室内試験データを取得し、湧水量 (流量) による緩衝材の流出挙動への影響を確認しました。また、ケイ砂充填ケースに関して、緩衝材の流出濃度が少ない状態が維持される流出挙動の長期的な継続性の確認、および孔内湧水量と緩衝材流出量の関係の把握のため、数か月に及ぶ長期的な緩衝材の流出試験を開始しました。

隙間未充填ケースの室内試験は、緩衝材の自己シール性が発揮されて流出現象 (排水) が止まる条件と流出挙動に及ぼす流量の影響に関して、着目する期間中に水位差がおおむね一定である原位置の環境を考慮して、水位差を一定とした条件による流出試験を実施しました。流出試験装置の概要を図 68 に示します。緩衝材にはベントナイトとケイ砂を 70 : 30 の重量比で混合して乾燥密度 1.9 Mg/m^3 に圧縮成形したものをを用い、緩衝材周囲の隙間幅は原位置試験と同様に 20 mm としました。表 7 に示すように、試験パラメータとなる初期の通水流量は、1 mL/min、10 mL/min お

よび 20 mL/min (隙間内での初期流速が同じとなる原位置試験の流量 (湧水量) は、90 mL/min、880 mL/min および 1,760 mL/min) の 3 水準とし、それぞれの流量の水準に対して水位差を 0.5 m、1 m および 2 m の 3 水準としました。隙間の上部には土圧計を設置して隙間への緩衝材の充填を膨潤圧の発現により把握をしつつ、排水流量および緩衝材の流出濃度を経時的に測定し、それぞれの水準で隙間の閉塞 (流出の停止) の有無を確認しました。

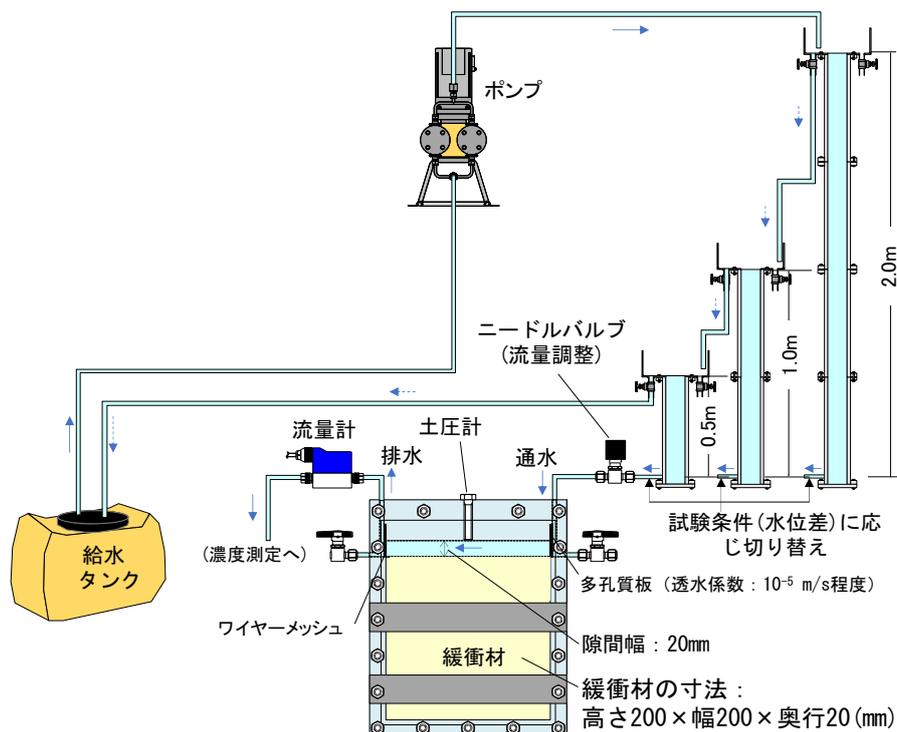


図 68 室内試験の流出試験装置の概要

室内試験の結果を表 7 に示します。流量が 1 mL/min の水準では、いずれの水位差の水準においても緩衝材の膨潤により隙間が閉塞し、排水が止まりました。流量が 10 mL/min および 20 mL/min では、閉塞する水準 (○) と閉塞しない水準 (△もしくは×) があり、流量や水位と閉塞の有無に明確な関係性は見られませんでした。試験終了後に試験装置を解体して、隙間に充填した緩衝材の状態を通水側から排水側に 3 分割 (上流、中流、下流) にして確認したところ、閉塞しなかった水準では、隙間に緩衝材中のベントナイトが流出して残存したケイ砂が集積した領域が残存していることを確認しました ([○])。一方、閉塞した水準では、ケイ砂

の集積がない領域(もしくはわずかな部分)が1箇所以上ありました([×]もしくは[△])。そのため、流路(水みち)にケイ砂の集積領域が連続して残存しなければ、閉塞して流出が止まる可能性があると考えられます。なお、ケイ砂の集積が連続していないにも係わらず閉塞しない水準(流量10 mL/min、水位0.5 m)もあるため、ケイ砂の集積と閉塞の関係についてはさらに詳細な挙動の確認が必要です。また、本試験では、隙間の向きを水平にしていますが、原位置試験の垂直方向の隙間ではケイ砂が試験孔の下部へと落下して水みちに集積(残存)しない可能性もあります。今後は、ケイ砂の集積に関する隙間の向きによる影響を確認しつつ、流量や水位の影響を把握していくことが必要と考えられます。

表 7 室内試験の結果(隙間未充填ケース)

	流量 (mL/min)	水位差 (m)			原位置試験に 換算した流量 (mL/min)
		0.5	1	2	
閉塞状況 ^{※1}	1	○	○	○	90
ケイ砂の集積 ^{※2}		[×][×][○]	[×][×][○]	[○][○][×]	
閉塞状況	10	△	△	○	880
ケイ砂の集積		[×][×][△]	[○][○][○]	[×][×][×]	
閉塞状況	20	△	○	×	1,760
ケイ砂の集積		[○][○][○]	[×][×][×]	[○][○][○]	

※1: ○: 閉塞、△: 閉塞せず(排水量が減少して一定値になり流出量は検出下限値以下)、
×: 閉塞せず(排水量が減少して一定値になり流出あり)

※2: []内は、左から順に上流、中流および下流に分割して観察した結果、水みち内のケイ砂が、×: なし、△: わずか、○: 多い

図 69 に、流量 10 mL/min、水位 1 m の水準における膨潤圧、排水の流量、流出濃度および積算流出量の経時変化を示します。排水の流量は徐々に低下して一定値になりました。膨潤圧の発現した時期は、緩衝材が膨らんで隙間が充填された時期に対応すると考えられ、また、この時期の前後で流出量に変化しています(以下、この時点を変曲点とします)。変曲点より前は隙間が充填される前で、緩衝材の表面全体から流出が起こり、比較的流出量が多い時期です。変曲点より後は、隙間が充填されて残存する水みちを介して緩衝材が流出する時期であり、比較的流出量が少ない時期であることが図 69 から確認できます。そのため、これまで変曲点の前後を区別せずに流出量の評価方法の検討をしてきましたが、変曲点の前

後に分けて流出量の評価方法を検討することで、より確からしく評価できる可能性があると考えられます。今後は、隙間未充填ケースについて、室内試験において隙間の方向（水平と垂直）の影響や水質の影響などの把握を行い、原位置試験の結果と比較して、閉塞条件に関する検討や変曲点の前後のそれぞれの流出挙動に着目した流出量予測方法に関する検討を進める予定です。

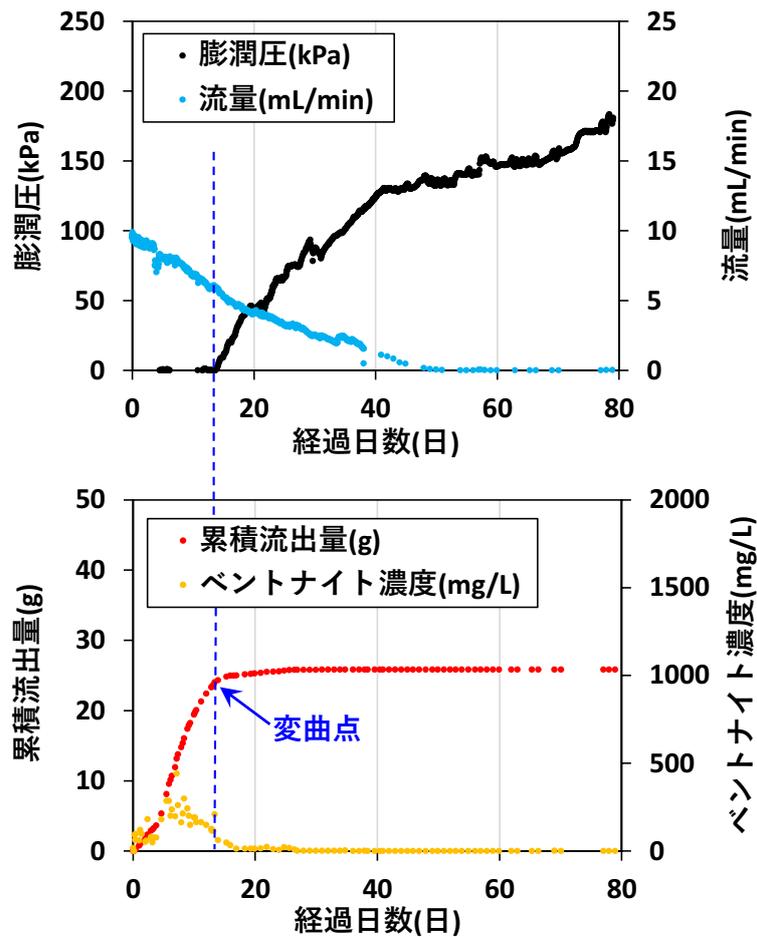


図 69 流量 10 mL/min、水位差 1 m の水準における室内試験の結果
(隙間未充填ケース)

ケイ砂充填ケースに対して数か月に及ぶ長期的な流出試験（原位置試験）を試験坑道 5 で開始し、排水中の緩衝材の量、緩衝材に地下水が浸潤して発生する膨潤圧、試験孔にかかる水圧などの計測に着手しました。試験設備（約 1/4 スケールの縮尺モデル）の概要を図 70 に、試験体の設置状況を図 71 に示します。令和 4 年度も計測を継続して流出量の経時的な挙動を確認し、孔内湧水量に対して、緩衝材流出量が要求される品質を確

保できる範囲となるかを評価する方法を検討していきます。これらの検討結果を基に、隙間未充填ケースとケイ砂充填ケースについて、緩衝材の流出特性に係る評価指標などの整理を進め、処分孔の環境（水頭差と湧水量）に応じた緩衝材の施工オプションとして整備する予定です。

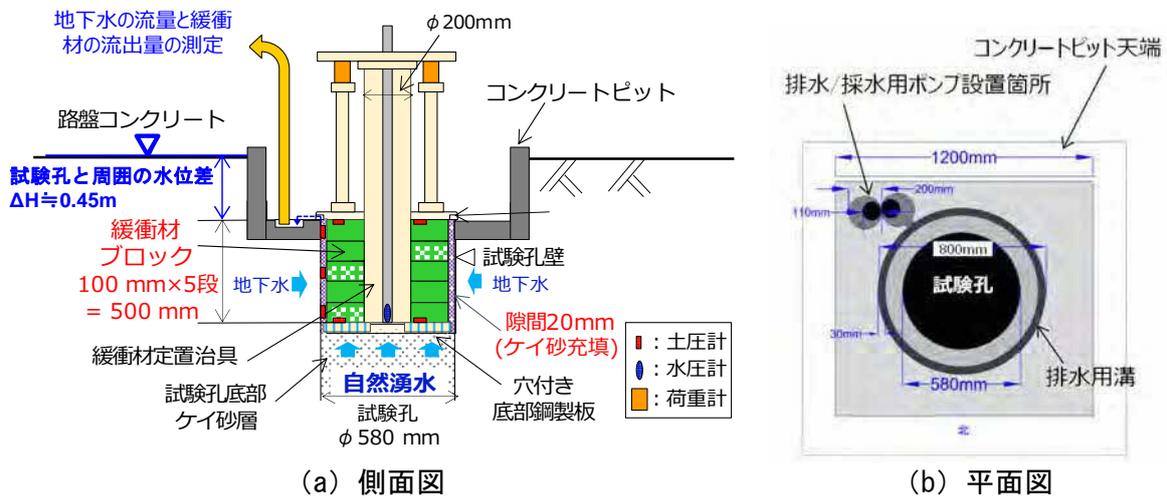


図 70 原位置での緩衝材流出試験設備の概要

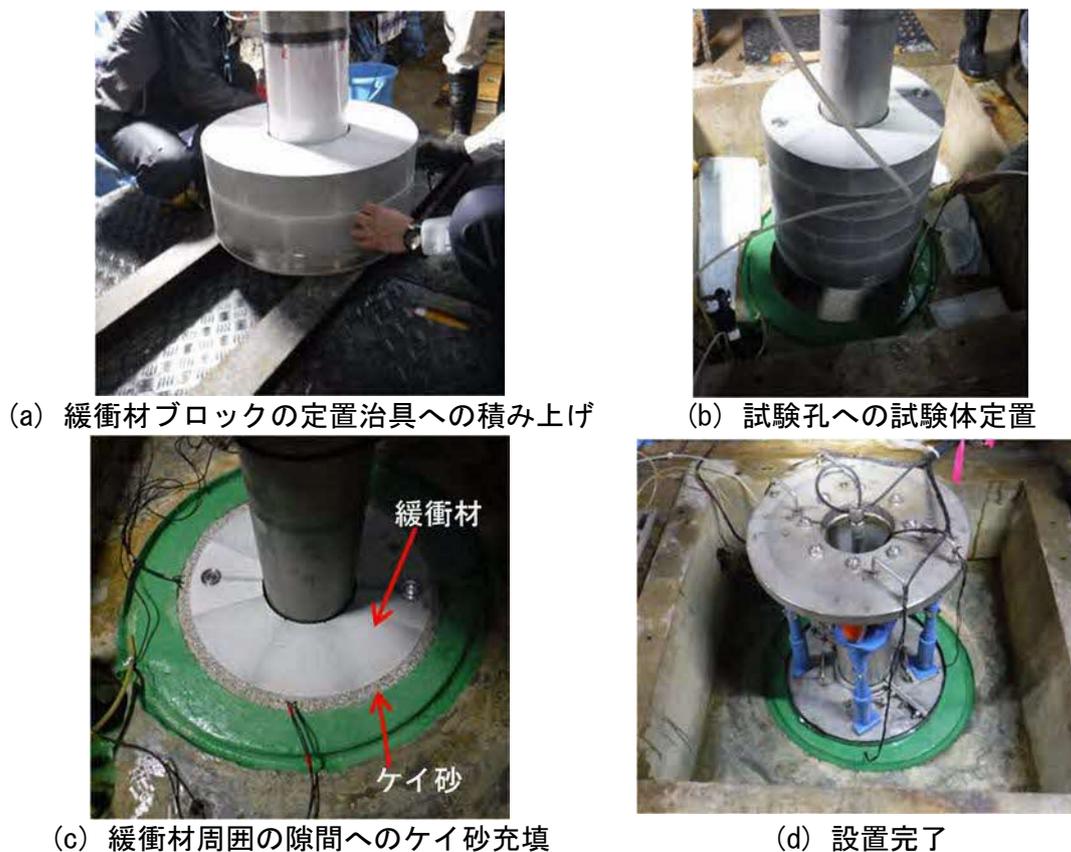


図 71 試験体設置状況

5.2 高温度(100°C以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験

令和2年度以降は、人工バリアの構成要素である緩衝材の最高温度が100°Cを超えた状態での人工バリアとその周辺岩盤の領域(ニアフィールド)において発生する現象の整理、人工バリア性能に係る試験データの整備、解析手法の開発を行うとともに、ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示します。これらの目標が達成されることにより、地層処分場において想定外の要因により緩衝材の温度が100°Cを超えた状態となった場合の人工バリアの挙動を検討できるとともに、高温条件下での人工バリアの安全裕度を評価できます。本課題は、4.1人工バリア性能確認試験と関連する課題です。人工バリア性能確認試験では、100°C以下の温度条件下において熱-水理-力学-化学(THMC)連成現象に係るデータを取得していますが、本課題においては、100°C超になった際に、これらの連成現象の熱に関わる部分においてどのような現象が生じるかを把握することになります。

令和3年度は、緩衝材の最高温度が100°Cを超えた状態で発生し得る現象に関する事例調査を進めました。我が国の処分概念や設計オプションを想定した形で整理するため、包括的技術報告書⁽¹⁹⁾において100°C以下の温度条件を想定して検討されている「緩衝材の機能低下や喪失につながる可能性がある事象(影響要因)」のうち、100°Cを超えた場合に変化し得るものを抽出する形としました。その結果、100°Cを超えた状態では以下の影響要因に変化が生じ、それにより緩衝材の膨潤性低下や透水性上昇による機能の低下、オーバーパックの腐食の促進などが生じ得ると考えられました。

- ・ イライト(雲母鉱物)化
- ・ 熱履歴
- ・ 塩濃縮
- ・ 微生物影響
- ・ ガスの発生
- ・ 鉄/ベントナイト相互作用
- ・ 高pHおよび高Ca濃度地下水による影響

・ シリカセメンテーション*71

表 8 には、各種要因について、100°C未満での想定事象と、100°Cを超えた状態になった場合を想定した調査研究事例を整理しました。

上記の影響要因のうち、比較的多数の研究事例があるスメクタイトのイライト化については、温度、時間、間隙水のカリウムイオン (K^+) 濃度、圧力、スメクタイトの化学組成などが主要なパラメータであり、イライト化反応が進行するためには K^+ の継続的な供給が必要であると報告されています⁽²⁰⁾。間隙水中の K^+ 濃度が幌延の深度 350 m における地下水と同程度の場合を想定して、100°C以上の温度におけるスメクタイトのイライト化割合を計算すると、1,000 年後のイライト化の割合は、130°Cまでは約 5%以下、140°Cでは約 10%にとどまることが示されました (図 72)。緩衝材の温度が 100°Cを超えた状態が 1,000 年以上継続するとは考えにくいこと、反応に必要な K^+ は拡散によって比較的ゆっくりと供給されると考えられること、ならびにイライト化反応の活性化エネルギーはより大きい値を取り得る (反応速度がより小さくなる) こと⁽²⁰⁾⁽²¹⁾ から、実際に生じるイライト化の割合はさらに小さいと想定されます。一方、このような計算においては、緩衝材や母岩中に含まれるカリウムに富む鉱物 (カリ長石など) の溶解による K^+ の供給⁽²²⁾⁽²³⁾ などについては考慮されていない点に留意する必要があります。

*71 : シリカ含有鉱物が高温環境などで溶解し、別のシリカ鉱物として再沈殿する現象のことです。シリカセメンテーションが生じた緩衝材では、可塑性 (固体に力を加えて変形させた後、力を取り去っても元に戻らない性質) や膨潤性の低下などが認められることがあります。

表 8 100°Cを超えた状態での緩衝材の変質に関する既往知見の整理 (1/4)

(包括的技術報告書⁽¹⁹⁾を踏まえて作成)

影響要因	内容	100°C未満での想定事象、対応策など	100°Cを超えた状態に関する主な研究事例
イライト化	地下施設周辺の地温およびガラス固化体の発熱によって緩衝材がイライトに変質し、膨潤性の低下および透水性の上昇が生じて、緩衝材の性能が低下することが懸念される。	緩衝材の温度が 100°Cを超えない状態であれば影響は小さいと考えられる。	<p>ナチュラルアナログ^{*72}：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ マグマの貫入により 100°C～140°Cで数百年間加熱されたスメクタイトは、その 40%～65%がイライト化している⁽²¹⁾。膨潤圧は、イライト化を受けていないスメクタイトに比べて最大 20%程度まで低下したが、イライト化に伴って生じたシリカセメンテーションによるものと考えられる⁽²⁴⁾。 ・ さまざまなナチュラルアナログを対象とした研究から、イライト化反応の活性化エネルギーが推定されている⁽²⁵⁾など。 ・ カリウム (K⁺) 濃度が低くアモルファスシリカ^{*73}が存在する環境下では、200°C～300°Cまでイライトが生成しないと考えられる⁽²⁶⁾。 <p>室内試験：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 室内試験では、イライト化が生じる場合と生じない場合の両方の結果が得られている^{(27) (28) (29)}など。125°C～130°C、1年間の加熱でわずかなイライト化が認められるという報告もあるが⁽²⁸⁾、おおむね 300°C前後かつ K⁺が存在する条件下でイライト化が生じる⁽²⁹⁾など。 ・ K⁺を含まない条件であれば 300°Cでもイライト化は生じないが、その場合でもシリカセメンテーションは観測される⁽³⁰⁾。 <p>原位置試験：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 100°C以上で数年間加熱した緩衝材において、明瞭なイライト化の痕跡は観測されていない⁽³¹⁾など。 <p>解析：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 室内試験と同様に、温度と K⁺濃度が影響の大きいパラメータである^{(22) (23)}。また、ナトリウム濃度が高い場合には、K⁺濃度が高くてもイライト化が抑制されると考えられる⁽²²⁾。 ・ 一方、ベントナイトや岩石中に含まれるカリウムを含む鉱物（カリ長石など）の溶解を想定すると、イライト化の割合がより高いという解析結果が得られている^{(22) (23)}。

*72：地層処分後の放射性核種の挙動や、人工バリアの腐食・変質など、地層処分システムにおいて考えられる現象と類似した、自然界で過去に起こった長期的変化に関する現象のことです。火山ガラス、遺跡などから発掘された銅鐸などは人工バリアの候補材料であるガラスや金属に類似しているため、これらの地下での長期的な変化を調べることにより、人工バリアで生じうる現象を確認したり、評価方法の妥当性をチェックすることができます。

*73：非晶質シリカとも呼ばれ、シリカゲルや珪藻土に含まれる珪藻の殻などの結晶構造を持たない二酸化ケイ素 (SiO₂) を含む物質を指します。

表 8 100°Cを超えた状態での緩衝材の変質に関する既往知見の整理 (2/4)

影響要因	内容	100°C未満での想定事象、対応策など	100°Cを超えた状態に関する主な研究事例
熱履歴	高温環境下で緩衝材の熱履歴が生じ、緩衝材の密度が低下することが懸念される。	90°C以下であれば室温条件とほぼ同等の膨潤圧であると報告されている。	<p>室内試験：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・飽和状態のベントナイトを加熱した試験⁽³²⁾⁽³³⁾⁽³⁴⁾、ベントナイト粉末を加熱・成型後に膨潤圧を測定した試験⁽³⁵⁾、高温蒸気とベントナイトを接触させた試験⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾などに大別される。3点目の高温蒸気との反応に関しては、「ガスの発生」で後述する。 ・飽和状態のベントナイトを加熱した試験では、最大 150°C・30 日間の加熱で透水係数が約 1 桁増加するという報告⁽³²⁾がある。一方、150°Cまでの加熱⁽³³⁾や 110°C・30 日間の加熱⁽³⁴⁾でベントナイトの膨潤圧および透水性に顕著な変化は認められないとの報告もある。 ・高温下で透水性が増加する主な理由として水の粘度の変化が考えられ、その他に鉱物の表面電荷や表面積、吸着している陽イオンの組成などの変化も影響する可能性がある⁽³⁹⁾。 ・ベントナイト粉末を最高 130°C、最長 120 日で加熱しても、膨潤圧特性に対する影響は小さい。ただし、最大膨潤率は低下する傾向にあり、鉛直圧やベントナイトのイオン型の影響が大きいと考えられる⁽³⁵⁾。 <p>原位置試験：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・最高温度 155°Cで 6 年間加熱した緩衝材において、膨潤圧が 10%程度減少、透水係数が 30%程度増加した⁽⁴⁰⁾。 ・最高温度 140°Cで 1 年～5 年間加熱した緩衝材において、膨潤圧および透水性に顕著な変化は生じなかった⁽⁴¹⁾など。 ・最高温度 130°Cで 1 年間加熱した緩衝材において、加熱部に近いほど膨潤圧は減少する傾向にあり、また一部の緩衝材 (Deponit Gan、Asha 505) の膨潤圧が最大で 1/3 程度に減少した⁽⁴²⁾など。 <p>解析：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・原子レベルでのシミュレーションでは、300°C超までの温度上昇で膨潤圧が増加するという結果が得られており、水分子の熱運動が増加するためと考えられている⁽⁴³⁾。
塩濃縮	再冠水期に廃棄体の発熱による温度勾配によって塩濃縮が発生し、緩衝材中の鉱物組成が局所的に変化することが懸念される。	緩衝材が地下水で飽和された後には、蓄積された塩は溶解し、拡散によって散逸すると考えられるため、長期安全性の評価において、その影響は無視することが可能とされている。	<p>原位置試験：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・海外の原位置試験では、ヒーター加熱部近傍での炭酸塩・硫酸塩鉱物の溶解および周辺の低温領域での(無水)セッコウの沈殿⁽³¹⁾、ケイ酸塩鉱物の溶解⁽⁴³⁾などが報告されている。これらは基本的に緩衝材中の鉱物が高温により溶解したものであり、地下水中の成分の濃縮によるものではないと考えられる。 ・仮に濃縮が生じたとしても、基本的には 100°C未満の場合と同様に、緩衝材が地下水で飽和された後の影響は小さいと考えられる。 ・一方、ヒーター近傍で地下水中の塩濃度が高くなると、オーバーパックの腐食を促進する可能性がある⁽⁴⁴⁾。

表 8 100°Cを超えた状態での緩衝材の変質に関する既往知見の整理 (3/4)

影響要因	内容	100°C未満での想定事象、対応策など	100°Cを超えた状態に関する主な研究事例
微生物影響	緩衝材中に存在する微生物の活動により、オーバーパックの腐食が促進されることが懸念される。	オーバーパックの腐食に影響を与える緩衝材中の微生物活動を抑制するように、材料や緩衝材の密度が設定される。	<ul style="list-style-type: none"> 高温状態により緩衝材の密度が低下すると、緩衝材中で微生物活動が活発となり、オーバーパックの腐食を促進する可能性がある。一方、微生物活動に必要な硫酸塩や硫化物の緩衝材への供給は限定的であるとも考えられる⁽⁴⁴⁾。
ガスの発生	オーバーパックの腐食、水の放射線分解ガスにより生成されるガスが人工バリア内で発生して蓄積し、破過することで水みちを形成することが懸念される。	ガス発生による亀裂が緩衝材に発生したとしても閉塞できるように、材料や緩衝材の密度が設定される。	<ul style="list-style-type: none"> 100°C未満で想定されているガス発生の事象に加えて、100°Cを超える状態が埋め戻しおよび再冠水の前に生じた場合には、水が沸騰し高温蒸気が発生し得る。 室内試験： <ul style="list-style-type: none"> 乾燥状態や、液体の水が常に存在する状態でベントナイトを 100°C以上に加熱した場合に比べて、高温蒸気と反応させた場合に膨潤能力はより大きく低下する^{(36) (45)}。 高温蒸気との反応によりベントナイトの比容量は減少し、その程度は温度 (110°C～210°C) が高いほど、また反応時間 (1日～21日) が長いほど大きい⁽³⁶⁾。 90～100°Cの高温蒸気と 30日間接触したベントナイトでは、未処理のベントナイトと比べて透水係数が 10倍以上増加、膨潤圧が数分の1に減少した⁽³⁷⁾。圧縮したベントナイトペレットにおいても、高温蒸気と 30日間接触させたところ、120°Cまでは顕著な変化はなかったが、150°Cで膨潤圧が減少した⁽³⁸⁾。
鉄/ベントナイト相互作用	オーバーパックの腐食に伴い放出される鉄との反応により、緩衝材中のスメクタイトの溶解と二次鉱物の沈殿、スメクタイトの層間陽イオンのイオン交換が発生する。これにより膨潤性や透水性が変化することが懸念される。	化学的な変質は間隙閉塞により影響範囲が限定されるため、緩衝材の大半が初期の鉱物組成で維持され、変化は小さいと予想される。	<ul style="list-style-type: none"> ナチュラルアナログ： <ul style="list-style-type: none"> 高温環境で鉄と反応したスメクタイトは、鉄スメクタイトやパーチェリンなどの中間生成物を経て、緑泥石へと変質する傾向にあると考えられる⁽⁴⁶⁾。 熱水との反応により緑泥石への変質が生じる最低温度は 200°Cと想定される。ただし、堆積物の続成作用では 40°C～60°Cでパーチェリンから緑泥石への変質が生じ得る⁽⁴⁷⁾。 室内試験： <ul style="list-style-type: none"> およそ 150°C以上の温度でパーチェリンや緑泥石などへの変質が生じる報告例が多い。ただし、300°Cでも変質が生じない例や、100°C以下で変質する例、サポナイトが生成する例もある^{(48) (49) (50)}など。 鉄共存下でのベントナイトの変質に影響を与える主要因として、温度、溶液条件、鉄/粘土比、スメクタイトの組成が挙げられている⁽⁵¹⁾。 原位置試験： <ul style="list-style-type: none"> 130°C～150°Cで最長 6年間加熱した緩衝材において、ヒーターとの接触部 (ヒーターから最大 1 cm 程度) で鉄濃度の増加が確認されている。ただし、ベントナイトの変質ではなく、鉄水和酸化物やシデライトなどの鉱物沈殿によるものと考えられている^{(43) (52) (53)}など。 最高温度 130°Cで 1年間加熱し、ヒーターとの接触部で Na型から Fe型に変化したベントナイトについて、膨潤圧や透水係数の大きな変化は認められない⁽⁵⁴⁾。

表 8 100°Cを超えた状態での緩衝材の変質に関する既往知見の整理 (4/4)

影響要因	内容	100°C未満での想定事象、対応策など	100°Cを超えた状態に関する主な研究事例
高 pH および高 Ca 濃度地下水による影響	地下水に Ca イオンが含まれている場合や処分坑道内のコンクリート製残置物などからセメントの溶脱に伴って生成する高 pH、高 Ca 濃度の地下水との反応により、緩衝材表面のベントナイトが他鉱物に変質または Ca 化され、膨潤性が低下することが懸念される。	解析から、緩衝材とセメント系材料の反応が生じて、10 万年の間、緩衝材中のモンモリロナイトが安定に存在することが示されている。ベントナイトの Ca 型化についても、変化が生じることを想定して緩衝材の密度や厚さが設計される。	<p>室内試験：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・スメクタイトを普通ポルトランドセメントや $\text{Ca}(\text{OH})_2$ などのセメント成分と接触させ、120°Cで1週間～1年間加熱すると、トバモライトを中心とした C-S-H や Mg サポナイトなどが生成する⁽⁵⁵⁾。 ・セメント系材料から生じる高アルカリ性溶液 (NaOH、KOH) とスメクタイトを 150°Cで2か月間反応させた場合、NaOH 溶液ではスメクタイト組成などに変化は生じない。一方、KOH (および $\text{KCl} \cdot \text{K}_2\text{CO}_3$) 溶液との反応では、スメクタイトの溶解、スメクタイトのイオン型変化 (Na/Ca 型から K 型へ)、二次鉱物 (石英、長石、ゼオライト、C-S-H) の沈殿が生じる⁽⁵⁶⁾。
シリカセメンテーション	高温環境下において、緩衝材中のスメクタイトあるいは随伴鉱物の溶解に伴い、アモルファスシリカなどの二次鉱物が沈殿し、セメンテーションが発生することで、膨潤性や透水性が変化することが懸念される。	緩衝材の温度が 100°Cを超えない状態であれば影響は小さいと考えられる。	<p>ナチュラアナログ：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・100°C～140°Cで数百年間加熱されたスメクタイトの膨潤圧は、熱履歴を経ていないスメクタイトの 20%程度にまで低下した。このようなスメクタイトの表面にはシリカ粒子が生成しており、超音波処理により膨潤圧が回復したことから、シリカセメンテーションの形成が膨潤圧を低下させたと考えられる⁽²⁴⁾。 ・スメクタイトから溶解したシリカによるセメンテーションは 70°C以上から生じ得るものの、数百万年オーダーのタイムスケールの反応と考えられる⁽²⁶⁾。 <p>室内試験：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・110°C・30日間および130°C・1年間の加熱でベントナイトの膨潤圧や透水性に顕著な変化は認められなかったが、シリカセメンテーションが確認されている⁽³⁴⁾⁽⁵⁷⁾。 ・120°C・約2年間の加熱でベントナイトの膨潤圧が75%に減少しており、シリカセメンテーションに起因する可能性が指摘されている⁽⁵⁸⁾。 ・「ガスの発生」において述べた、90°C以上の高温蒸気と接触したベントナイトにおいても、シリカセメンテーションが確認されている⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾。 ・先行研究を総括すると、シリカセメンテーションによる緩衝材性能の低下は 110°Cまでは顕著ではなく、130°Cでわずかに生じ、150°Cで顕著となる⁽²⁰⁾。 <p>原位置試験：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ヒーターとの接触部においてベントナイト中のケイ酸塩鉱物が加熱により溶解し、ベントナイトとヒーターの接触面を移動して再沈殿する可能性が指摘されている。この現象によるベントナイトの性能への影響は言及されていない⁽⁴³⁾。

※表 8 中の、バーチェリン、サポナイトは粘土鉱物の一種、シデライトは菱鉄鉱とも呼ばれる炭酸塩鉱物、トバモライトはケイ酸カルシウム水和物の一種です。

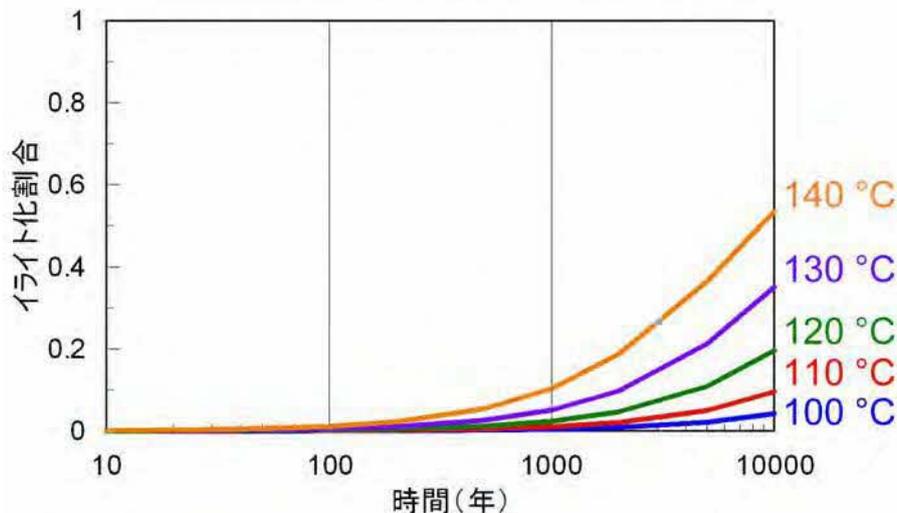


図 72 高温度におけるスメクタイトのイライト化の経時変化

参考文献(25)を参考とし、イライト化反応の活性化エネルギーは報告されている範囲(25 kcal/mol~28 kcal/mol⁽²⁰⁾)の最小値である25 kcal/mol、間隙水中のK⁺濃度は幌延の深度350 mの地下水と同程度の75 mg/Lとして計算しています。

表 8 で整理したように、高温条件下での緩衝材特性の変化に関しては、緩衝材の鉱物学的な変質、熱履歴、高温蒸気との反応など複数の要因が考えられます。緩衝材の加熱温度と、加熱に伴う膨潤圧および透水係数の変化との関係を提示した研究事例はありますが⁽²⁰⁾、このような要因の違いは考慮されていませんでした。そこで、加熱による緩衝材の膨潤圧および透水係数の変化について、シリカセメンテーションの有無および水分状態の違い(飽和/高温蒸気)に着目して先行研究の結果を整理しました。なお、ベントナイトの種類の違いによる影響を除外するため、ここでは同一のベントナイト(MX-80)を用いた試験結果のみを対象としています。図 73 に示すように、シリカセメンテーションが生じている試料の一部では、加熱前と比べて膨潤圧が半分以下に減少、および透水係数が1桁以上増加していますが、シリカセメンテーションが生じていない試料と同程度の値を示す試料も認められます。一方、図 74 に示すように、高温蒸気と反応した試料については、膨潤圧が加熱前の試料よりも低くなっており、また透水係数もすべての試料で1桁以上増加しています。膨潤圧に関しては加熱温度が高いほどより低くなる傾向が認められるものの、透水係数については加熱温度との関係は認められませんでした。また、加熱時間(70°C~170°C)と特性変化との関係は認められませんでした(図 75)。以上のことから、現状での調査結果に基づけば、高温条件下での緩

衝材特性の変化については、高温蒸気との反応の影響が大きいことが示唆されます。

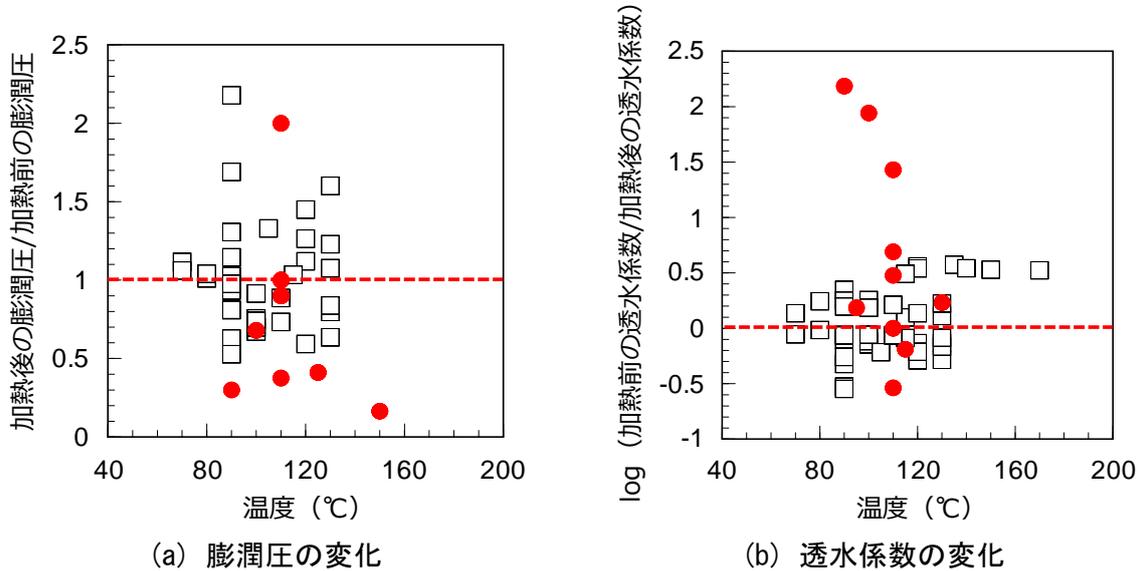


図 73 MX-80 ベントナイトにおける加熱前後の膨潤圧および透水係数の変化（シリカセメンテーションの有無による影響）

赤丸と白四角はそれぞれ、セメンテーションの生じている試料と生じていない試料を意味します。(a)と(b)の縦軸はそれぞれ、加熱前後で膨潤圧の値が何倍になったか、透水係数の桁数が何桁変化したかを意味しており、赤点線上に位置する点は、加熱前後で値が変わっていないことを意味します。参考文献：(27) (31) (33) (34) (37) (38) (40) (57) (59) (60)

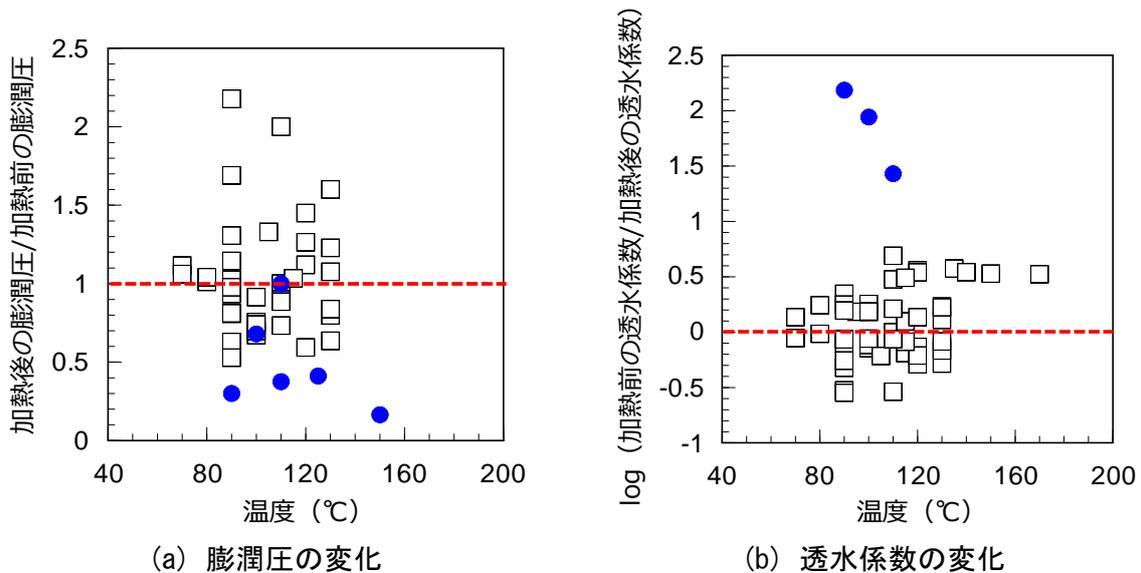


図 74 MX-80 ベントナイトにおける加熱前後の膨潤圧および透水係数の変化（水分状態の違いによる影響）

青丸と白四角はそれぞれ、高温蒸気と反応した試料と飽和状態で加熱した試料を意味します。縦軸や赤点線の意味、参照とした文献は図 73 と同様です。

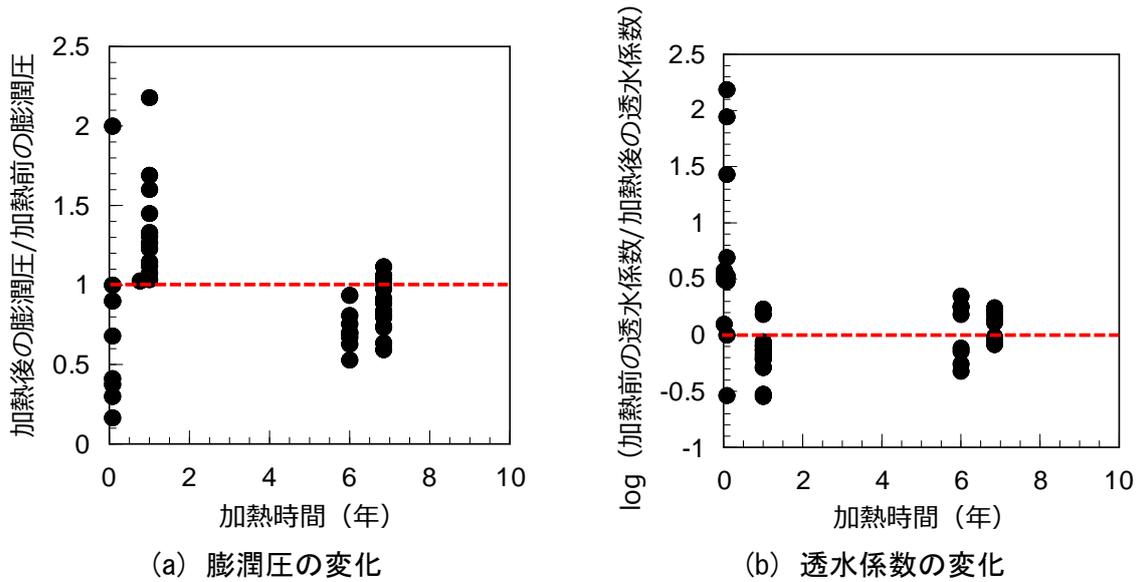


図 75 MX-80 ベントナイトにおける加熱前後の膨潤圧および透水係数の変化と加熱時間との関係

縦軸や赤点線の意味、参照とした文献は図 73 と同様です。

廃棄体埋設後に緩衝材の最高温度が 100°C を超える状態となった際に、人工バリア周辺が静水圧相当となるまでに時間を要する場合には、飽和水蒸気圧が間隙水圧を上回ることにより水が沸騰し、高温蒸気が発生すると考えられます。その場合、上述のように、高温蒸気との反応による緩衝材特性の変化が生じたり、初期飽和度によっては緩衝材にひび割れが生じたりする（図 76）と想定されます。このような現象と、それに伴う緩衝材特性の変化の理解は、 100°C を超える条件における過渡期の状態変遷を考慮する上で重要であると考えられ、今後、室内試験や原位置試験で重点的に知見を取得していく必要があると考えられます。

さらに、スイスのグリムゼル試験場では、地下施設を使用して、緩衝材の温度を最高 200°C 程度まで上昇させることを想定した人工バリア試験が実施されています（HotBENT プロジェクト）。令和 3 年度は、試験坑道内へのヒーター・緩衝材・センサーなどの設置が完了し、9 月よりヒーターの段階的な加熱が開始されました（図 77）。令和 4 年度には、ヒーターの温度が 100°C を超えた状態での、ベントナイトの内部および岩盤との接触部における温度、間隙水圧などのデータが取得される予定です。

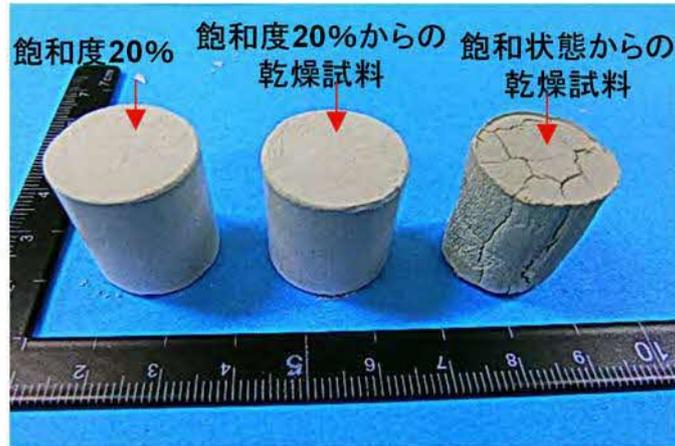
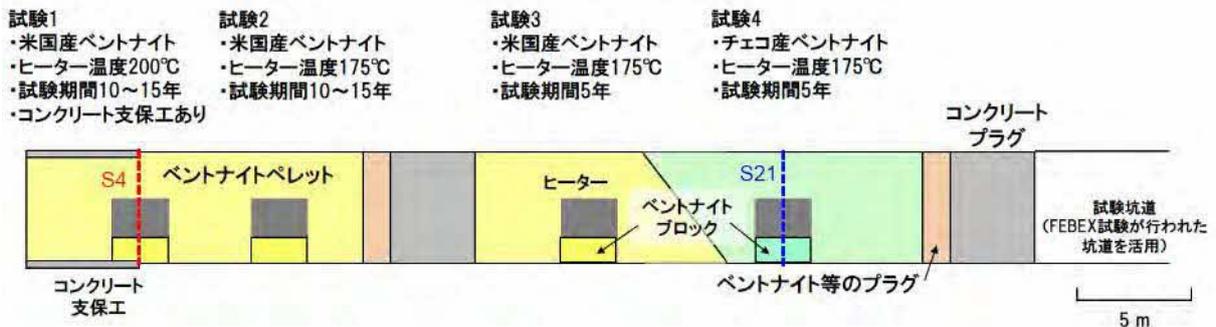
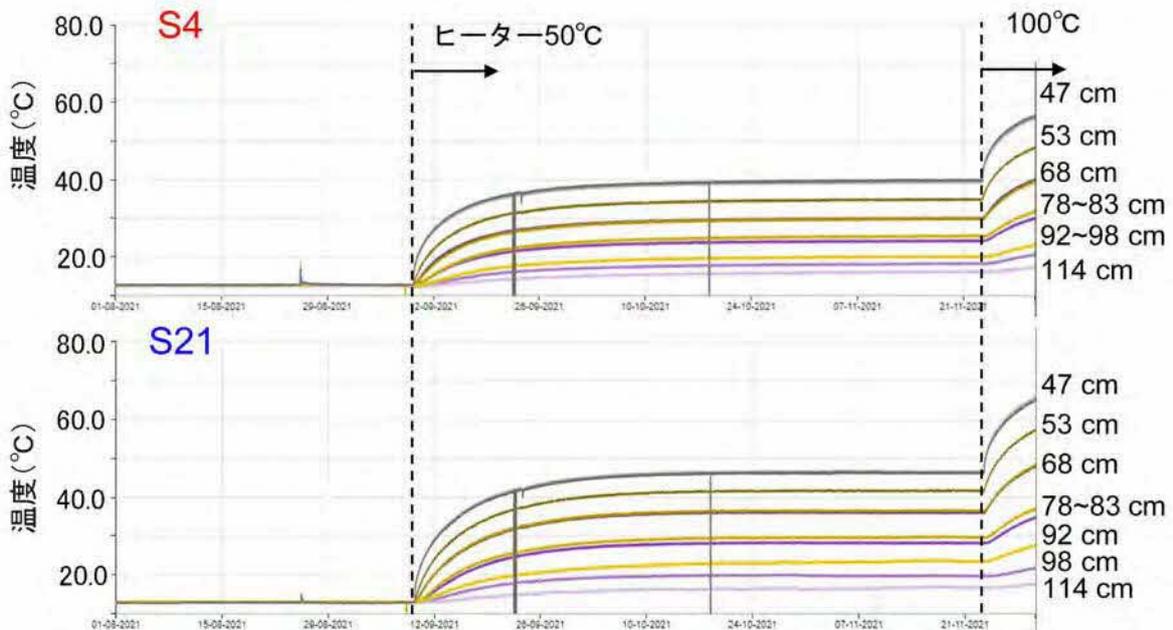


図 76 110°Cで乾燥させたベントナイト

令和3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 [JPJ007597]: ニアフィールドシステム評価確認技術開発⁽⁶¹⁾にて作製された試料。飽和状態から乾燥により亀裂が生じているのが確認できます。



(a) 試験の概念図



(b) 温度の観測結果

グラフ右側の数字は、各温度センサー設置場所のヒーターからの距離を意味します。

図 77 高温の人工バリア性能確認試験 (海外での研究事例)

令和4年度は、令和3年度までに実施した先行研究の事例調査を基に、100℃を超えた状態で生じ得る現象などのシナリオを整理していきます(図78)。また、重点的な調査が必要と考えられる現象に関する室内あるいは原位置試験の計画を策定し、準備を進めます。海外での原位置試験の情報も引き続き入手し、試験計画に反映するとともに、これらの情報と原位置試験で得られるデータを用いてより精度の高いシナリオの構築を目指します。

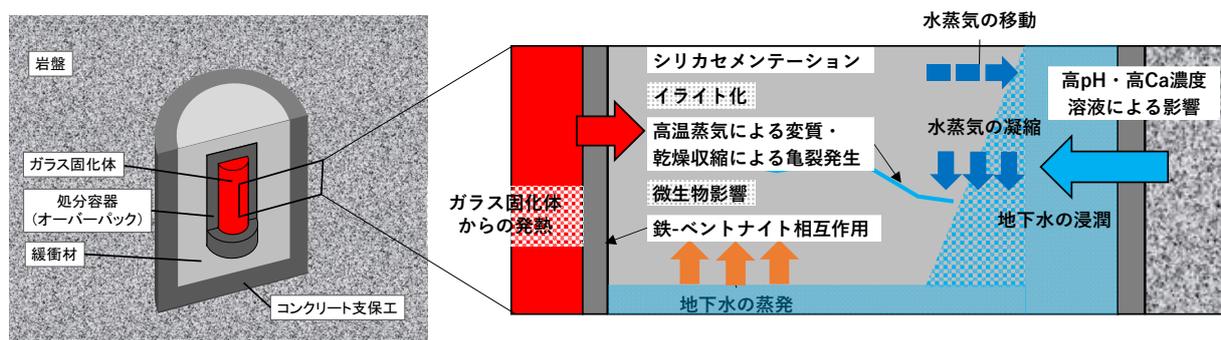


図 78 緩衝材の温度が 100℃を超えた場合に人工バリア周辺に生じると想定される現象の概念図
令和3年度の調査結果に基づき更新しています。

6. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

6.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

6.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

令和 2 年度以降は、地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握が課題となります。そのため、断層沿いに亀裂の発達する幅が数十 cm 程度よりも大型の断層における地震動や坑道掘削に伴う割れ目中の地下水の流れの変化に関して、堆積岩の緩衝能力（自己治癒能力）の評価手法の確認を行います。具体的には、地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握（ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験）、ダクティリティインデックス（DI）を用いた透水性評価の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備、水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備を行います。本課題は、割れ目や断層の中での地下水や物質の移動を把握するので、4.2 物質移行試験と関連があります。

令和 3 年度は、DI を用いた透水性評価手法の信頼性向上に向け、既存の室内試験結果や水圧擾乱試験結果を用いて DI モデル⁽⁶²⁾を再検証しました。これまで、DI と地下水の主要な水みちとなる割れ目の透水性は相関することが国内外の 6 つの地層のデータから経験的に分かっていたが⁽⁶²⁾（図 79 の○）、その相関関係をより正確に表す経験式を構築するために、Kuang and Jiao の近似法⁽⁶³⁾を適用して図 79 に示すような新たな経験式（図 79 の近似曲線）を構築しました。また、この近似曲線の物理的な意味を理解するためにシミュレーションを行った結果、図 79 の近似曲線が表す DI と割れ目の透水性の関係は、凹凸のある割れ目内の隙間の開閉現象（図 80）で説明できることが分かりました（図 79 の近似曲線のカーブの形が図 80 に基づくシミュレーション（図 79 の水色線）により、よく再現できています）⁽⁶⁴⁾。さらに、割れ目の透水性が図 79 の近似曲線の値であるために必要な条件をシミュレーション（計 88 パターン）した結果、0.05 mm～2.00 mm 程度のわずかな割れ目のずれにより割れ目のかみ合わせが悪くなることによって、割れ目内の隙間が増える（図 81 上図）必要があることが分かりました（図 82）⁽⁶⁴⁾。一般に、数百 μm～数 mm 程度までのずれは割れ目内に多くの隙間をもたらしますが、それ以上割れ目がずれてもかみ合わせの悪さは変わらず、割れ目内の隙間があま

り増えなくなります (図 81 下図)。これらのことから、図 79 の近似曲線が示す透水性の値 (誤差範囲を含む) は、ある DI 条件において、割れ目のかみ合わせが悪くなることにより増加し得る透水性の上限値を表していると理解することができました⁽⁶⁴⁾。

DI、割れ目のかみ合わせおよび割れ目の透水性の関係は以下の数式で表すことができます⁽⁶⁴⁾。

$$e = E^2 / JRC_0^{2.5} \quad (e \text{ と } E \text{ の単位は } \mu\text{m}、e > E \text{ となる場合は } e = E \text{ とします})$$

$$E = E_0(1 + bDI/0.2899)^{-1}$$

ここで、 e は割れ目の水理的開口幅 (割れ目の透水性)、 E は割れ目の力学的開口幅 (割れ目内の物理的な隙間の大きさ)、 JRC_0 は 10 cm スケールでの割れ目表面の粗さを表す数値 (通常は 0~20 の範囲の値をとり、値が大きいほど面が粗いことを示します)、 E_0 は初期開口幅 (割れ目面にかかる力がサンプルの自重相当に小さい場合の割れ目の力学的開口幅)、 b は割れ目の方向性に依存する係数 (通常は 0.5~1.5 の範囲の値) を表しています。DI 以外のパラメータで e を支配するのは JRC_0 、 b 、 E_0 となりますが、 b はそれほど e に影響を与えないことが既往の検討により分かっています⁽⁶⁴⁾。一方、 E_0 は e に大きな影響を与えるパラメータで、割れ目表面がずれて割れ目のかみ合わせが悪くなることにより増加するパラメータです。この時の E_0 の増加量は、 JRC_0 が大きい (割れ目面が粗い) ほど、大きくなります。この E_0 の大きさは「割れ目のかみ合わせ」の程度と密接に関連することから、この E_0 の大きさを「割れ目のかみ合わせ」の程度を表す指標としてここでは扱っています。

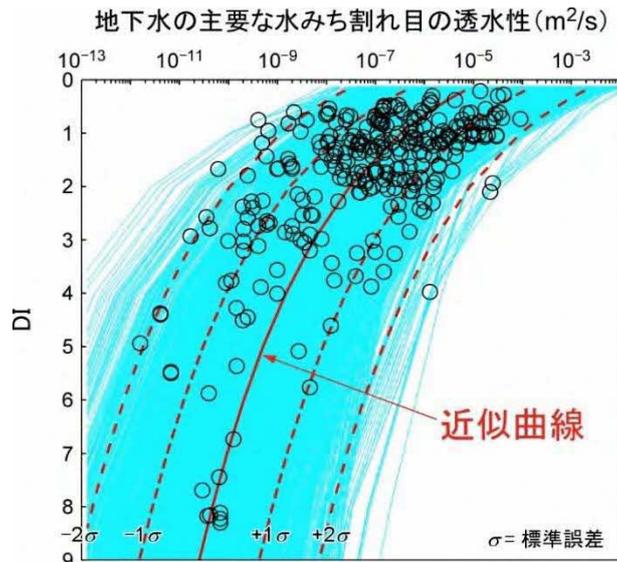


図 79 国内外の 6 つの地層における地下水の主要な水みち割れ目の透水性と DI の関係⁽⁶⁴⁾

6 つの地層は、幌延、スイス、スウェーデン、フィンランド、イギリスの地層です。赤色曲線/破線はデータ（図中の○）から Kuang and Jiao の近似法⁽⁶³⁾を適用することにより得られる近似曲線を示し、水色の曲線は図 80 に示すモデルに基づくシミュレーション結果を示します。

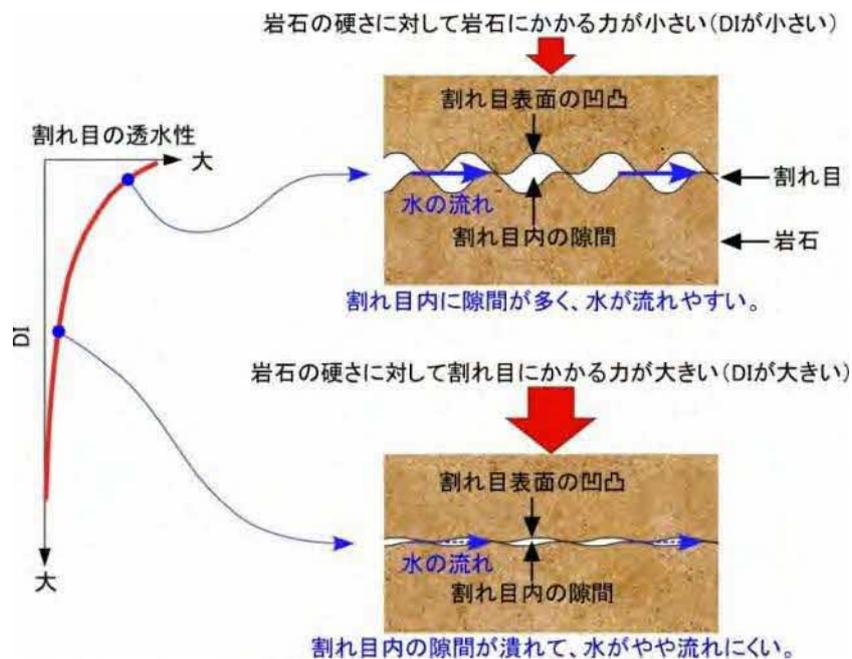


図 80 DI、割れ目内の隙間の開閉、および割れ目の透水性の関係（割れ目のずれが一定の場合）

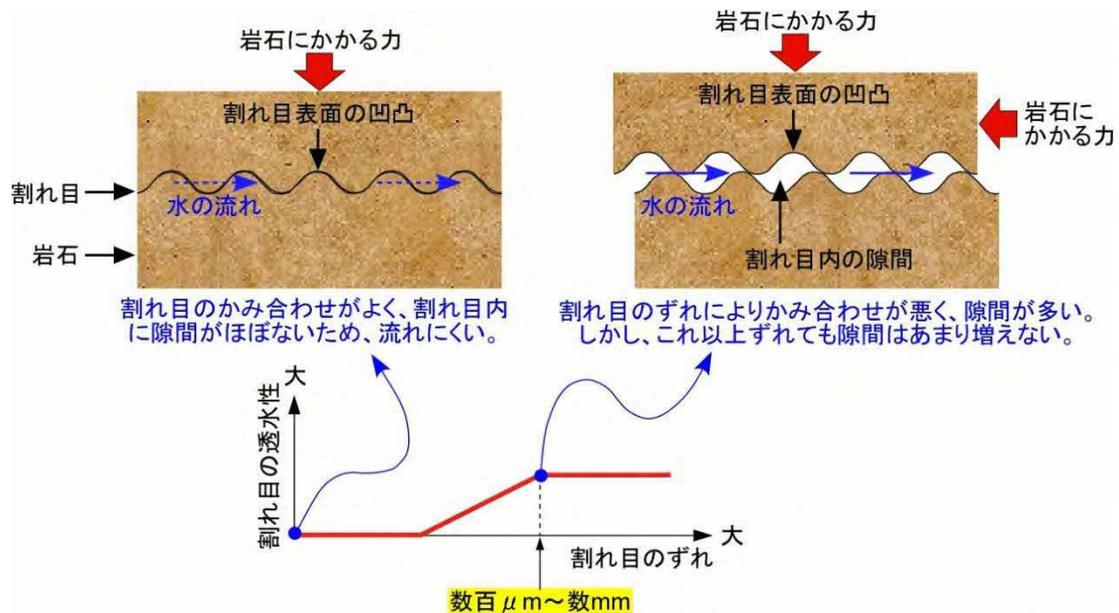


図 81 割れ目のずれ、かみ合わせ、および透水性の関係 (DI が一定の場合)

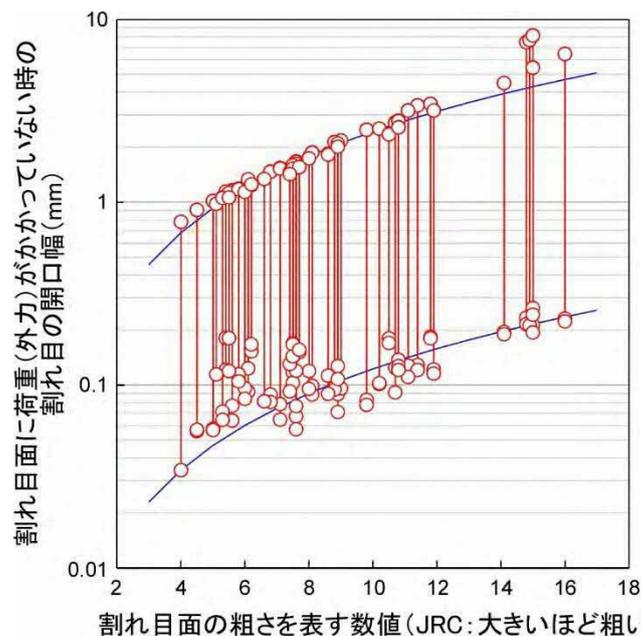


図 82 割れ目のずれに伴う開口幅の変化に関するシミュレーション⁽⁶⁴⁾

割れ目の透水性が図 79 に示す地下水の主要な水みち割れ目の透水性に達するためには、本図に示す縦軸の値が図中の 2 本の青曲線で挟まれた範囲に達する必要があります⁽⁶⁴⁾。Bandis の実験データ⁽⁶⁵⁾を用いて、様々な割れ目面の粗さを持つ割れ目がずれた場合の縦軸の値の変化をシミュレーションした結果、0.05 mm~2.00 mm ずれると青曲線で挟まれた範囲に縦軸の値が達することが分かりました(図中の上の赤丸が 2.00 mm ずれた場合、下の赤丸が 0.05 mm ずれた場合を示します)。

上記の結果に基づくと、DI に対する透水性が既に図 79 の近似曲線の値の誤差範囲に達している割れ目は、割れ目がずれてもそれ以上、透水性

が上昇しにくく（図 81）、DI が変化する場合のみ、それに応じた透水性の変化（図 80）が生じることが予想されます。このことを確認するために、国内外の地下研究施設において実施された水圧擾乱試験の結果との比較検証を行いました。その結果、幌延の地下施設では、透水性が既に近似曲線の誤差範囲に達している割れ目がずれても DI の減少量に応じた分の透水性の上昇しか発生しないことが確認できました（図 83(a)）。またスイスでは、透水性が既に近似曲線の誤差の範囲に達している割れ目がずれても透水性の変化が 1 オーダー以内に留まるのに対し（図 83(b)）、透水性が近似曲線の誤差の範囲に達していない割れ目がずれた場合は透水性が数オーダー増加し、近似曲線の範囲に透水性が達することが確認できました（図 83(c)）。これらの結果は、図 79 の近似曲線が隆起侵食により DI が低下した場合や、地震などにより断層が再活動した場合の割れ目の透水性の変化量の上限を見積もるのに有用であることを示しています⁽⁶⁴⁾。今後は、今回得られた結果を基に、令和 2 年度に実施した水圧擾乱試験の結果⁽⁸⁾との比較検証も行う予定です。

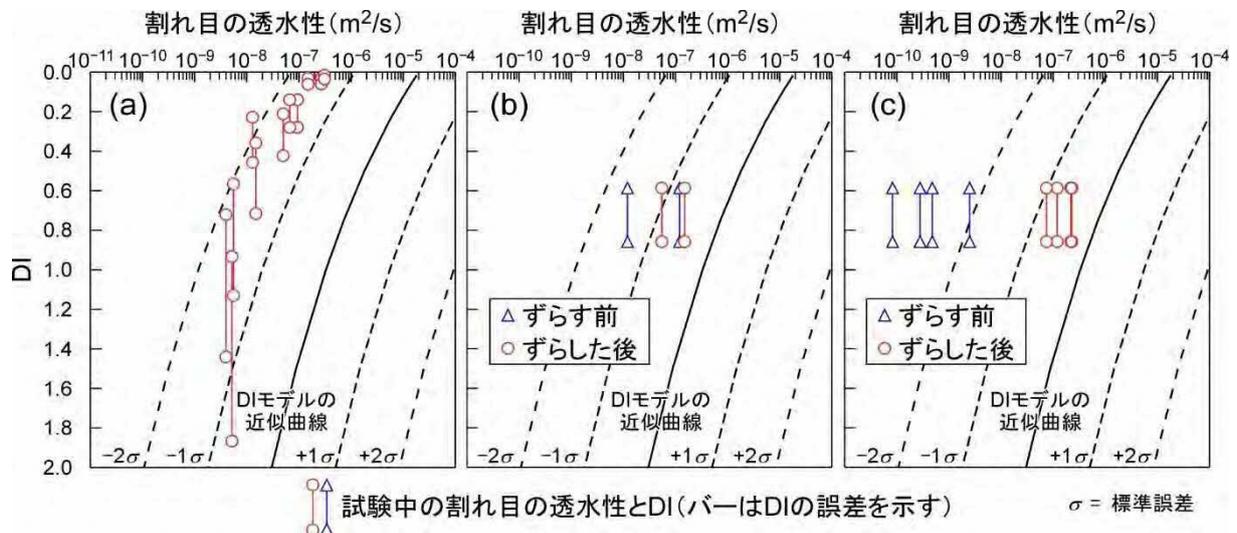


図 83 国内外の地下研究施設で実施された水圧擾乱試験の結果⁽⁶⁴⁾

(a) 幌延の例。割れ目をずらす前から DI モデルの近似曲線（経験式）の誤差（ $\pm 2\sigma$ ）の範囲に割れ目の透水性が達しており、試験中、DI の低下とともに割れ目の透水性が近似曲線に沿って増加（試験中の割れ目のずれ幅は最大数 cm に到達）しています。(b) スイスの例。割れ目をずらす前から DI モデルの近似曲線の誤差（ $\pm 2\sigma$ ）の範囲に割れ目の透水性が達しており、割れ目をずらした後の透水性の変化は 1 オーダー以内（試験中の割れ目のずれ幅は最大 1 mm）です。(c) スイスの例。割れ目をずらす前は DI モデルの近似曲線の誤差（ $\pm 2\sigma$ ）の範囲に割れ目の透水性が達していませんが、割れ目をずらした後、透水性が数オーダー上昇し、近似曲線の範囲に割れ目の透水性が到達しています（試験中の割れ目のずれ幅は最大 1 mm）。

地層の透水性は、図 79 や図 83 に示すような割れ目内の局所的な透水性（割れ目内の隙間の大きさ）のみならず、割れ目の水理学的連結性（割れ目内の隙間のつながり具合）にも大きく支配されます。令和 3 年度は、図 83 (a) に示す水圧擾乱試験で観測された割れ目の水理学的連結性に関する以下の現象についても検討を行いました。水圧擾乱試験では、高圧注水によって割れ目の水理学的連結性が上昇した後、水圧低下後も数日間、水理学的連結性が高い状態が保持され、その後に元の水理学的連結性が低い状態に戻りました（図 84）。この現象を再現するために、割れ目の透水性や幾何形状について複数のケースを想定したシミュレーションを行いました。その結果、(1) 観測された割れ目の水理学的連結性の可逆的な変化（元に戻る現象）は、水圧変化に応じた割れ目内の開口部の面積割合の変化により再現できること（図 85(a)、(c)、(d)、(f))、(2) 水圧低下後も数日間、割れ目の高い水理学的連結性が保持される現象は、ボーリング孔の試験区間（注水点）の水圧が低下した後も試験区間から 2 m 以上離れた割れ目内では高い水圧が保持されることにより再現できることが分かりました（図 85(b)、(e))⁽⁶⁶⁾。後者(2)の他の理由として、割れ目表面の微小な凹凸の側面に働く摩擦力が水圧低下後も一時的に割れ目内の隙間を保持した可能性も考えられますが⁽⁶⁶⁾、いずれの場合においても、割れ目の水理学的連結性は、水圧の変化、すなわち DI の変化に応じて可逆的に変化する可能性が高いことが分かりました（図 86）。今後は DI と割れ目の水理学的連結性の関係についてさらに検討を進めていく予定です。

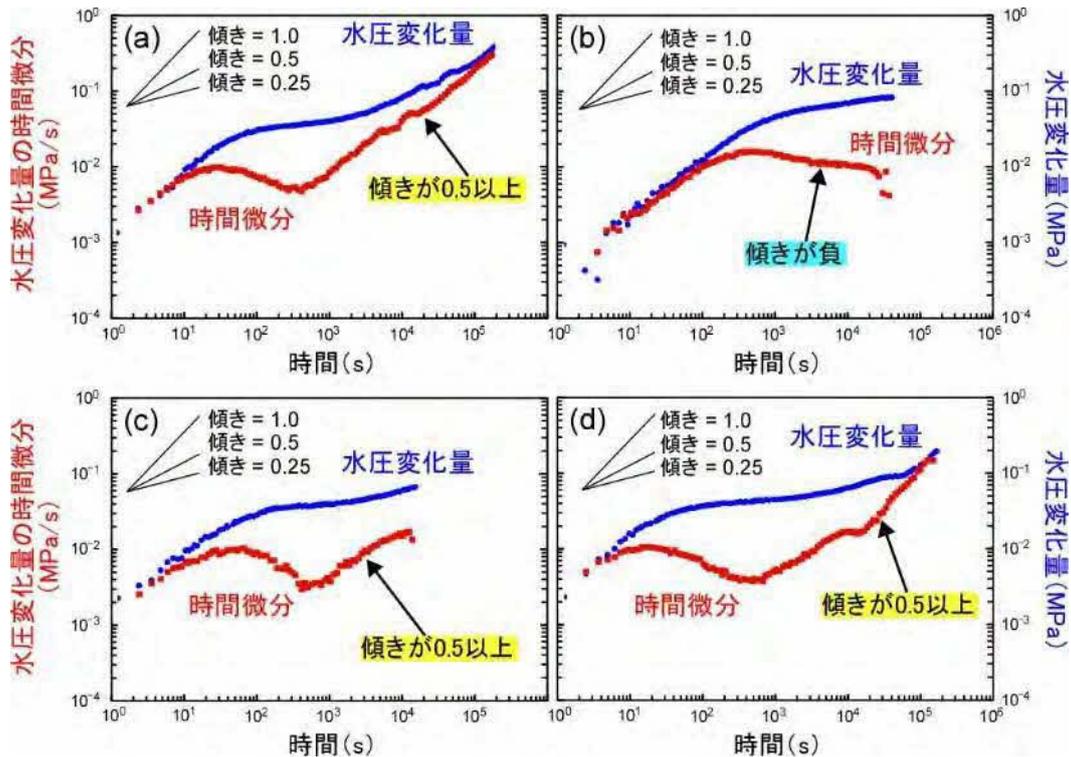


図 84 高圧注水の前後に実施した割れ目の水理学的連結性の変化を調べるための低圧注水試験結果⁽⁶⁶⁾

高圧注水の(a)直前、(b)8日後、(c)44日後、(d)72日後に実施。試験の後半の時間帯における水圧変化量の時間微分の傾きが0.5以上の場合は割れ目の水理学的連結性が低く、傾きが0か負の場合は割れ目の水理学的連結性が高いことが水圧の拡散に係る方程式より推定できます⁽⁶⁷⁾。高圧注水の8日後に実施した低圧注水試験(b)では高い水理学的連結性が推定されますが(時間微分の傾きが負)、44日後以降に実施した同試験(c)、(d)では、高圧注水の直前に実施した試験(a)と同様に低い水理学的連結性が推定されます(時間微分の傾きが0.5以上)。

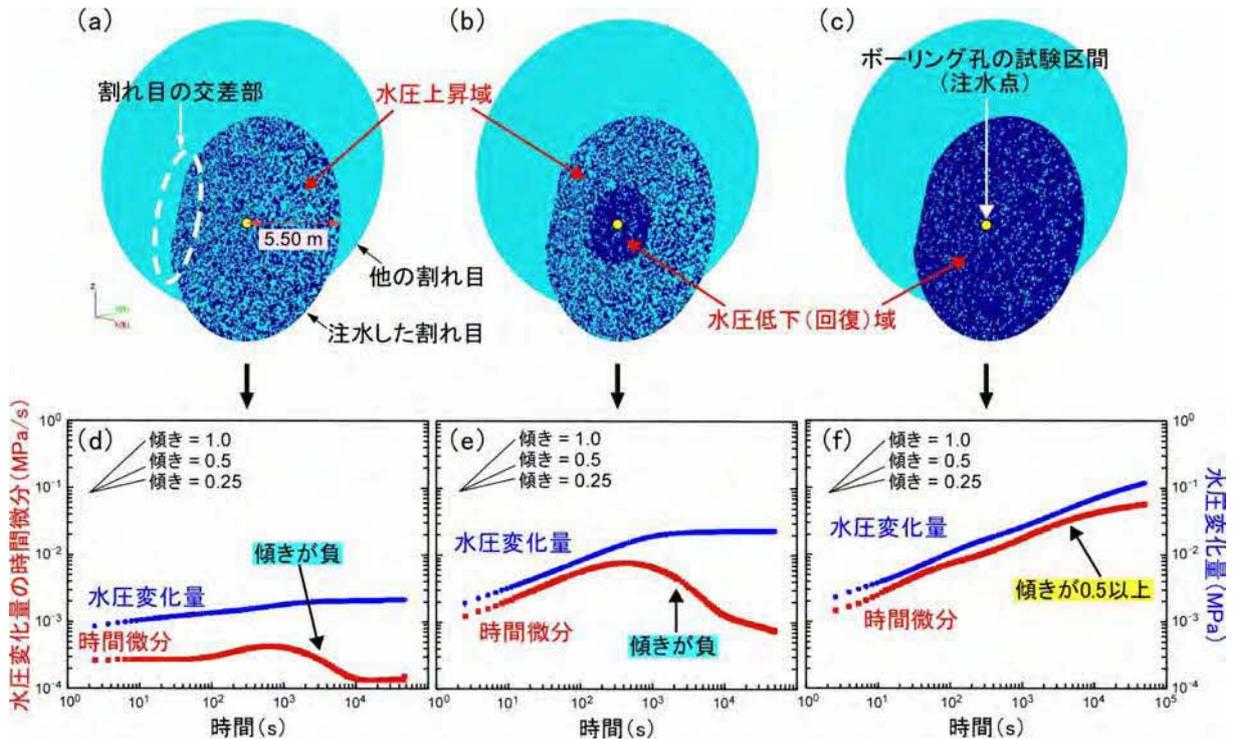


図 85 観測された割れ目の水理的連結性の変化を再現するための割れ目モデル (a) ~ (c) と解析結果 (d) ~ (f) ⁽⁶⁶⁾

(a) 高圧注水中の割れ目内の開口状態を想定したモデルです。高圧注水により注水した割れ目内の水圧が上昇しているため、注水した割れ目内の開口部（水色の斑点部分）の割合が比較的多く、割れ目内の閉口部（青色の斑点部分）と同じくらい存在すると仮定しています。注水した割れ目は他の割れ目（高透水性の割れ目）と交差して連結しています。(b) 高圧注水を終了してから数日後の注水した割れ目内の開口状態を想定したモデルです。注水点から 2 m の範囲内は水圧が既に低下（回復）しているため、閉口部の割合が多くなっていると仮定しています（青色の斑点部分の割合が多い）。この外側の領域はまだ水圧が高い状態が保持されており、開口部と閉口部の割合が同じくらいの状態が保たれていると仮定しています。(c) 高圧注水を終了してから数十日後の注水した割れ目内の開口状態を想定したモデルです。割れ目内の水圧は十分に低下（回復）しているため、高圧注水前の開口状態に戻っていると仮定しています（大部分が閉口しており、青色の斑点部分の割合が多い）。(d) ~ (f) は上記の各モデルで注水点から低圧注水を行った場合の注水点の水圧変化量とその時間微分を示します。(d) と (e) では後半の時間帯で水圧変化量の時間微分が 0 もしくは負の傾きを示し、(f) では傾きが 0.5 以上の時間微分を示します。

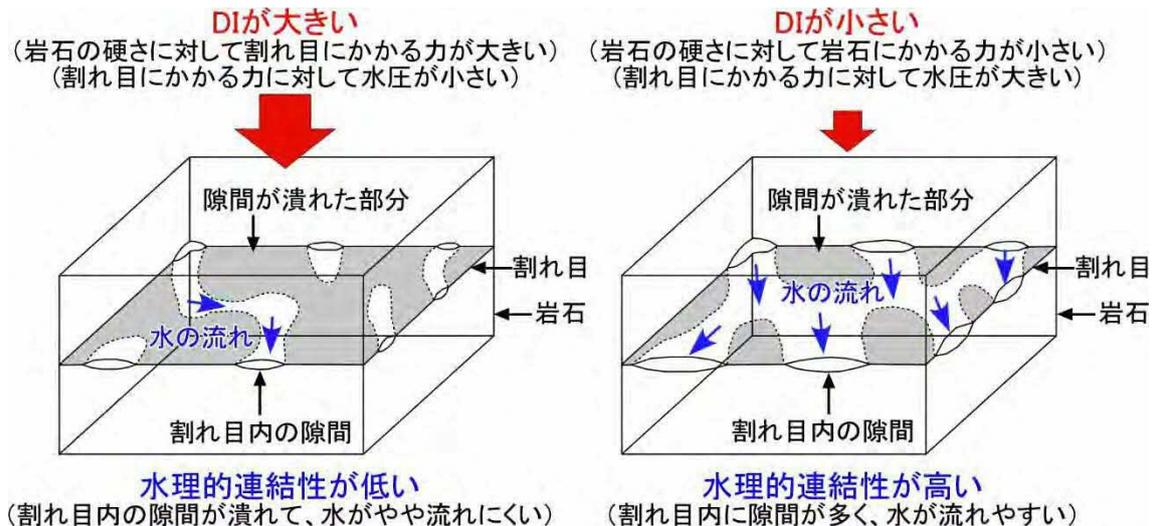


図 86 DI と割れ目の水理的連結性（隙間のつながり具合）の関係

割れ目がずれる際には、割れ目が容易にずれるかどうかという観点も、断層の活動性評価の観点からは重要です。図 83(c)に示すスイスの水圧擾乱試験では、透水性が上昇する際に、割れ目内に破壊が生じたことを示唆する水圧低下が観測される一方で、図 83(b)の透水性が有意に上昇しない試験ではそのような割れ目内の破壊を示唆するような水圧低下は観測されませんでした⁽⁶⁸⁾。原位置の割れ目の充填状況も考慮すると、前者のケースでは石英などの鉱物によってシーリングされていた割れ目がずれることにより割れ目内のシーリングが破壊されたことが考えられる一方で、後者のケースでは、シーリングされていない、あるいは過去の割れ目の再活動によって既に割れ目内のシーリングが破壊された状態の割れ目が試験中にずれたことが考えられます⁽⁶⁴⁾。図 83(a)に示す幌延の水圧擾乱試験では、割れ目がずれる際に破壊を示唆するような水圧低下が観測される一方で⁽⁶⁹⁾、令和 2 年度に幌延で実施した水圧擾乱試験ではそのような水圧低下は観測されませんでした⁽⁸⁾。割れ目がずれる際に生じる割れ目内の破壊現象の有無は、断層のずれにくさと密接に関連していると考えられます（ずれにくい場合は破壊が起きやすい）。今後はこのような観点も踏まえて、水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の検討を進めていきます。

6.1.2 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

令和2年度以降は、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が課題であり、このような領域を調査してモデル化する技術の実証を行います。処分事業のサイト選定において、地層処分における閉鎖後長期の地質環境に求められる要件は、水理場の観点では、「地下水流動に伴う放射性物質の移行時間を増大させ、その間の放射性崩壊により移行率を低減させるため、動水勾配が小さいまたは岩盤の透水性が低いことにより「地下水流動が緩慢である」こと」とされており⁽¹⁹⁾、この研究課題で整備される技術は、これを評価する際に役立ちます。本研究課題においては、化石海水が存在するような地下水の動きが非常に遅い環境を調査してモデル化する技術を実証するため、具体的には、以下を実施します。

- ① 地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）の調査・評価技術の検証
- ② 化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証
- ③ 広域スケール（十数 km×十数 km）を対象とした水理・物質移動評価手法の検証（地下水滞留時間評価）のための水理解析および塩濃度分布評価のための水理・物質移動解析

ここでいう化石海水とは、堆積時の海水が埋没続成過程で変化し、その後、長期にわたり地表からの天水の浸透の影響を受けていない地下水のことを指します。化石海水の存在は、地下水流動が非常に遅く、最も遅い物質輸送現象である拡散が支配的であることを示す証拠となります。

①では、地上からの主要な調査である物理探査とボーリング調査を対象に、化石海水領域を把握するための調査技術としての適用性やより効率的に把握するための調査仕様や手順などを検証します。②では、幌延地域において取得されたデータを用いて化石海水の三次元分布を推定し、化石海水を指標として地下水の流れが非常に遅い領域を推定するための一連の手法を整理します。③では、古水理地質学的変遷^{*74}が、化石海水の三次元分布に及ぼす影響について解析を通じた検討を行うとともに、化石海水領域の三次元分布の評価結果を踏まえた広域スケールの解析手法

*74：地質環境中における過去から現在までの地下水の流動や化学的状態などの移り変わりのことです。

について検討します。

令和3年度も令和2年度に引き続いて、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（令和3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[JPJ007597]：岩盤中地下水流動評価技術高度化開発）の一環として、上記の課題に取り組みました。

① 地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）の調査・評価技術の検証

令和2年度の電磁探査により推定した化石海水の三次元分布の妥当性を確認するために、ボーリング調査を実施しました。化石海水の存在を確認するための指標は、それが海水に由来していることから、地下水の塩濃度と酸素・水素同位体比^{*75}です。このうち、幌延地域の地質環境では、地下水の塩濃度が地下の比抵抗（電気の流れやすさ）と相関することが分かっており⁽⁷⁰⁾、塩濃度が高い場合は比抵抗値が低く（電気が流れやすく）、塩濃度が低い場合は比抵抗値が高く（電気が流れにくく）なります。このことから、広範囲にわたり地下深部の化石海水分布を把握する際には、地下の比抵抗分布を推定できる電磁探査を適用することが効果的であると考えられ、令和2年度に幌延深地層研究センターを含む約3 km四方を調査範囲とした電磁探査を実施し、三次元比抵抗分布を取得しました。その結果を図87に示します。

調査範囲の南西側は、深度約100 mより深い領域において比抵抗が低く、北東側では深度約400 mより深い領域から比抵抗が低い傾向が認められました。このことから調査範囲の南西側で比較的浅い深度に化石海水領域が分布すると推定されます。この広がりを標高-275 m（幌延深地層研究センターの地表：標高60 mを基準とした場合、深度335 m）の比抵抗の水平断面から推定すると、比抵抗の等値線は湾曲しているものの、センター付近を通る北西-南東方向のラインを境界とする範囲まで広がっていると推定されます（図87）。そこで、令和3年度においては、この推定結果の妥当性の確認として、電磁探査によって化石海水領域の広がり、すなわち、その境界を捉えることができていたのか確認するために、浅部

*75：酸素同位体比とは、質量数16の酸素に対する質量数18の酸素の割合を指します。幌延地域では、地表水で-10‰前後、深部地下水で0‰前後の値を示すことが分かっています。水素同位体比とは、質量数1の水素に対する質量数2の水素の割合を指します。水素同位体比は $\delta^2\text{H}$ または δD と表記されます。単位の‰（パーミル）は千分率で、1‰は0.1%に相当します。

から比抵抗が低くなっている領域の縁辺部においてボーリング調査を実施しました。

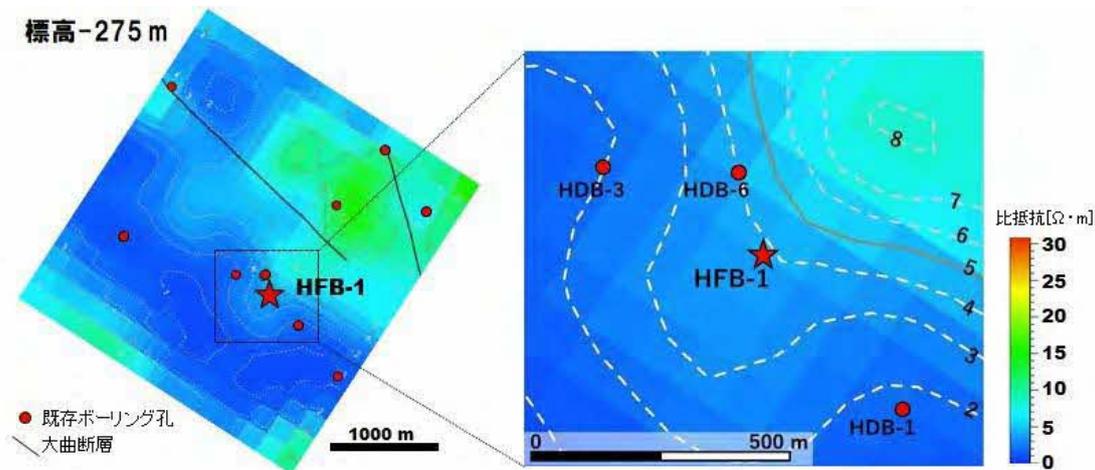


図 87 幌延深地層研究センター周辺における標高-275 mにおける比抵抗分布

この三次元比抵抗分布は令和 2 年度に実施した電磁探査の解析結果に基づきます。右図は左図の点線に囲まれた範囲の拡大です。なお、標高-275 m は、幌延深地層研究センターでは深度 335 m に相当します。

具体的には、幌延深地層研究センターから南側に数十 m 離れた地点を選定し、このボーリング調査により掘削されるボーリング孔を「HFB-1 孔」と名付けました (図 88)。この地点では声問層と稚内層の地層境界は深度約 310 m に出現すると予想されます。令和 3 年度は声問層を対象として深度 200 m まで岩石コアを採取するボーリング掘削を行いました。具体的には、採取した岩石コアを対象に割れ目観察を行うとともに、化石海水の存在を確認するために岩石コアの間隙に含まれる地下水の水質・同位体データを分析するための試料を採取し、化学分析を行いました。

図 89 に HFB-1 孔において取得された塩化物イオン濃度、酸素・水素同位体比の深度方向の分布を示します。また、図 90 に塩化物イオン濃度および酸素・水素同位体比の相関図を示します。これらの図には、HFB-1 孔の近傍で掘削された地上からのボーリング孔として、HDB-3 孔および HDB-6 孔の調査結果⁽⁷¹⁾ もあわせて示します。ただし、HDB-3 孔および HDB-6 孔の分析結果は、コア試料から圧縮抽出により得られた間隙水のものであり、本報告書で示す分析結果とは分析手法が異なることに留意する必要があります。

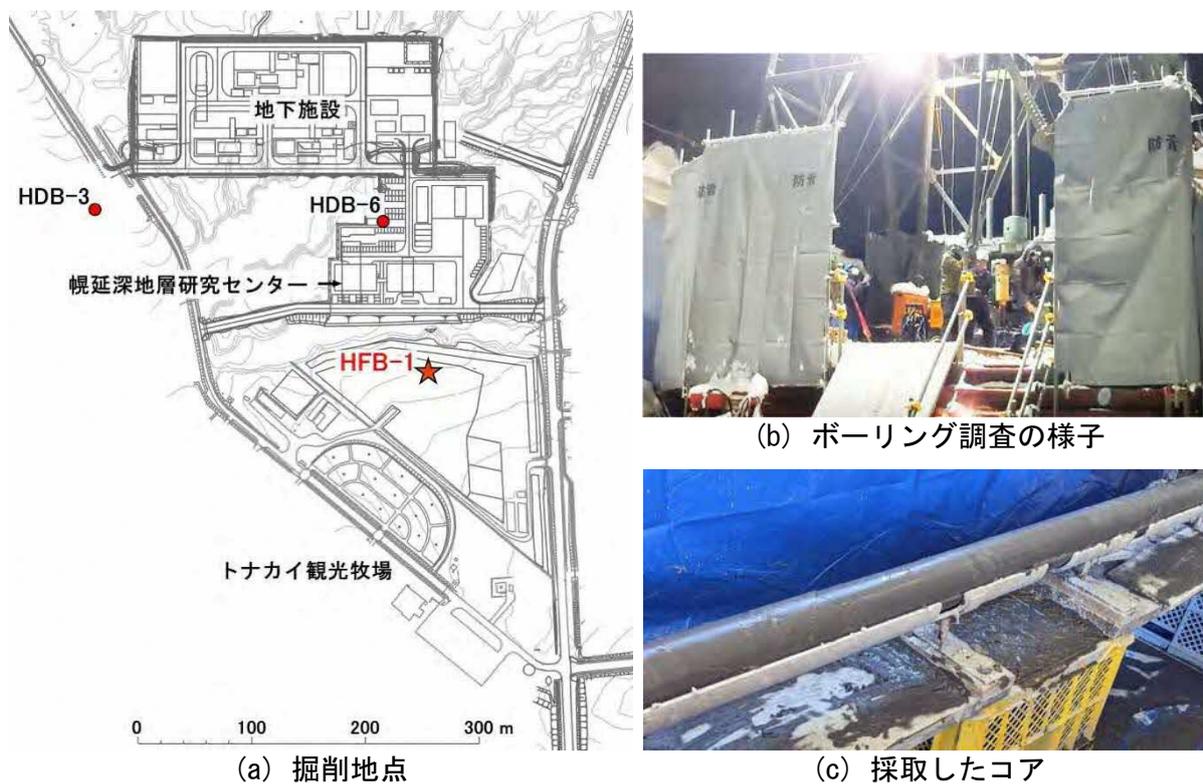


図 88 ボーリング調査 (HFB-1 孔)

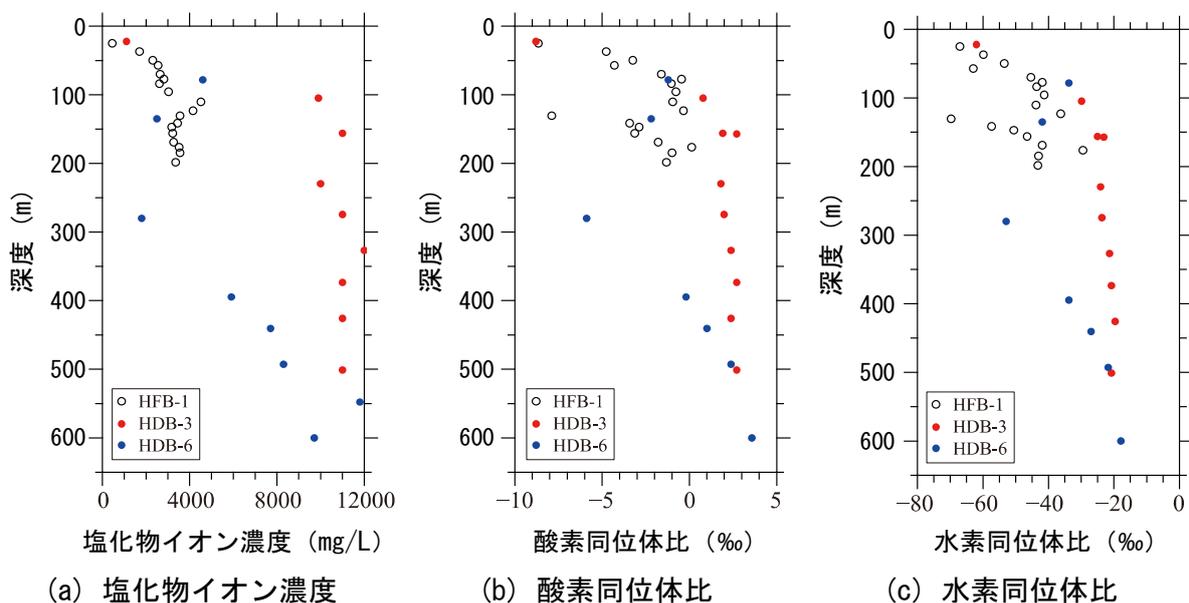


図 89 ボーリング調査から得られた塩化物イオン濃度、酸素・水素同位体比の深度分布

HFB-1 孔、HDB-3 孔、HDB-6 孔の結果を示します。令和 3 年度は、HFB-1 孔を深度 200 m まで掘削しました。

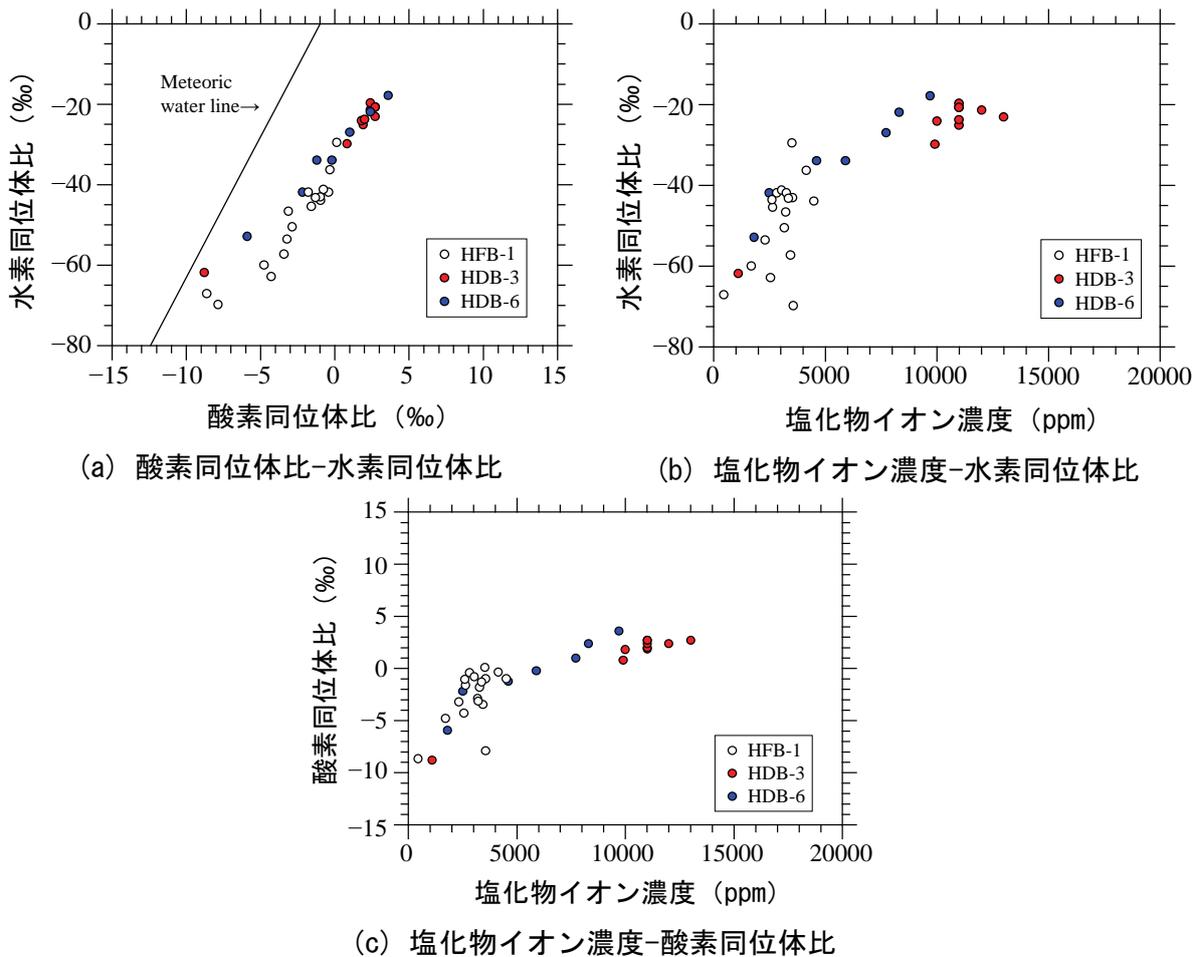


図 90 ボーリング調査から得られた塩化物イオン濃度および酸素・水素同位体比の相関図

HFB-1 孔の塩化物イオン濃度は、深度の増加に伴い徐々に上昇し、深度約 95 m では約 3,000 mg/L となりますが、深度約 95 m から 110 m の間において約 3,000 mg/L から約 4,500 mg/L へと急な値の変化があり、その後、深度 146 m 辺りから元の傾向に戻ることが分かりました(図 89(a))。一方、酸素・水素同位体比は、塩化物イオン濃度と比較してばらつきが大きい傾向があり、塩化物イオン濃度と同様に急な値の変化が認められる箇所がありますが、その深度は約 123 m から約 130 m にかけてであり、塩化物イオン濃度の急な変化が認められる深度とは異なっています(図 89(b)、(c))。図 90 に示す塩化物イオン濃度および酸素・水素同位体比の相関図を見ると、HFB-1 孔の結果は HDB-3 孔や HDB-6 孔の傾向よりばらつきが大きいですが、それから大きく逸脱することがないことが分かります。つまり、HFB-1 孔の深度 200 m までの範囲における地下水は、これ

までの解釈と違いがなく化石海水と天水との混合により形成されたと考えられます。

また、HFB-1 孔の孔壁周辺の地層の比抵抗を計測する物理検層を実施しました。図 91 に、その結果である比抵抗の深度方向の分布を、HDB-3 孔と HDB-6 孔の既存データと併せて示します。HDB-3 孔は 3 つのボーリング孔の中で最も比抵抗の低い傾向を示し、深度約 100 m 以深の声間層から化石海水に相当する地下水が確認されています。一方、HDB-6 孔では、声間層と稚内層の地層境界付近において比抵抗がわずかに高くなる傾向があり、化石海水に相当する地下水は地層境界より下の深度約 400 m 以深の稚内層から確認されています。この違いは、水理学的連結性を有する断層が分布する稚内層浅部の層厚が関係していると考えており、HDB-3 孔、HFB-1 孔、HDB-6 孔の順で層厚が厚く、その順で天水浸透の影響が大きいと考えています。

今後は、HFB-1 孔を深度 200 m から延長し、稚内層を対象に化石海水の存在を確認するための調査を継続するとともに、令和 3 年度の実施区間も含めコア試料からの間隙水の圧縮抽出による化学分析のデータを取得する予定です。その際、深度約 300 m に分布すると予測されている地層境界付近において塩化物イオン、酸素・水素同位体比および比抵抗の変化に着目することが重要になります。これらのデータを整えた後、電磁探査により推定した化石海水領域の分布の妥当性を評価します。

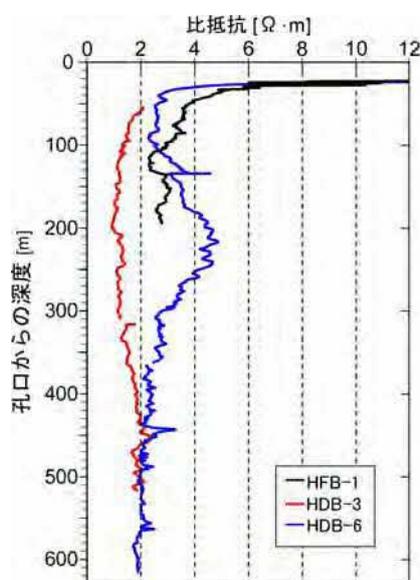


図 91 HFB-1 孔、HDB-3 孔および HDB-6 孔における比抵抗検層の結果

② 化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証

令和2年度に取得した電磁探査データを用いて、三次元比抵抗分布を解析する際の留意点を検討しました。図92に、令和2年度を含むこれまでに幌延深地層研究センター周辺において実施された電磁探査の測点の分布を示します。令和2年度は、幌延深地層研究センター周辺において約3 km四方の範囲（図92に示す四角の範囲）において高密度電磁探査を実施し、60測点のデータを取得しました。そして、既存の39測点のデータと併せて合計で99測点のデータを用いて三次元比抵抗分布を推定するための解析を実施しました。その結果を図93および図94に示します。

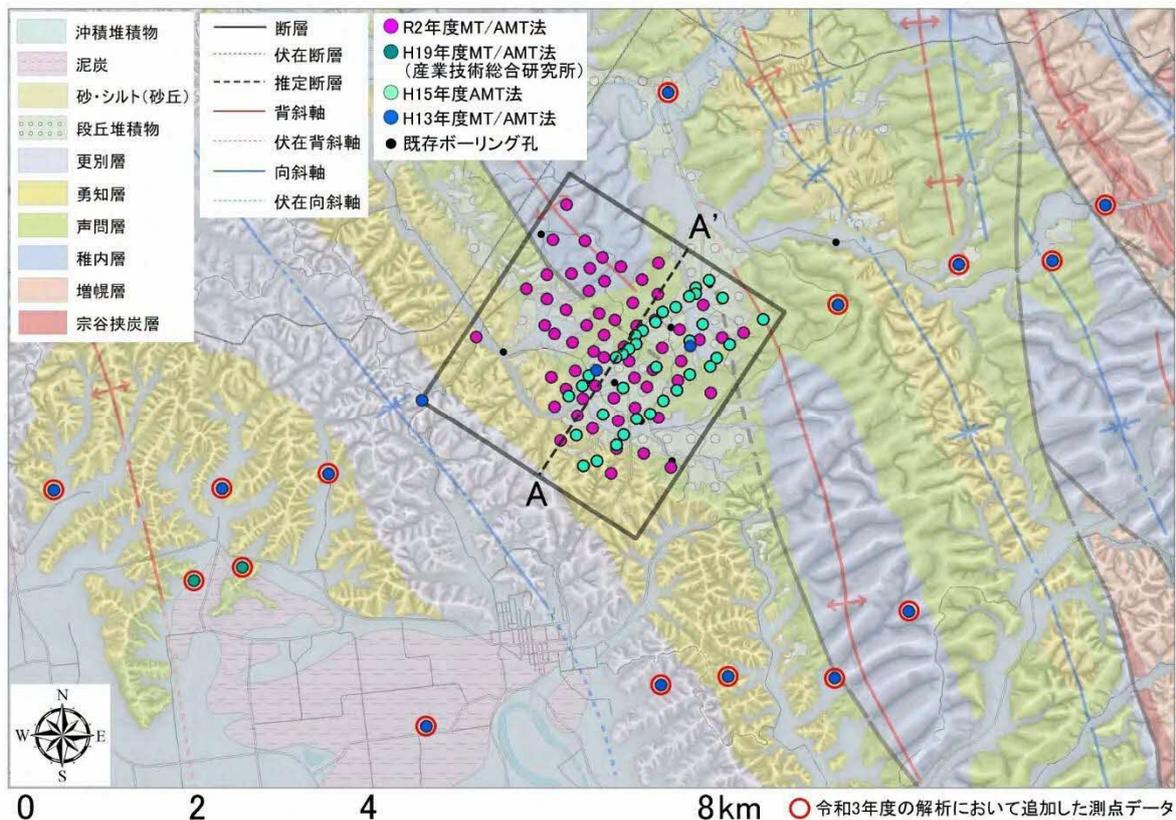


図 92 幌延深地層研究センター周辺における電磁探査の測点配置と地質・地質構造分布

過年度のデータは参考文献(72、73、74、75、76)に、地質図は参考文献(77)に基づいています。

地表付近の比抵抗はおおむね $10 \Omega \cdot \text{m}$ 以上と高く、標高約 $0 \text{ m} \sim -850 \text{ m}$ の比抵抗は、深度の増加とともに $1 \Omega \cdot \text{m} \sim 5 \Omega \cdot \text{m}$ の低い比抵抗の範囲が広がる傾向が認められます。一方、標高 -850 m より深くなると徐々

に比抵抗が高くなる傾向が認められました。また、令和2年度には、測点数を30測点に減らした場合の解析を行い、三次元比抵抗分布の推定結果に与える影響を確認しました。その結果、全体的な比抵抗の高低の傾向は99測点の場合と同様でしたが、全体的に比抵抗が高くなり、低比抵抗領域と評価できる範囲のボリュームが小さくなる傾向が認められました（図93および図94）。このように測点数によって全体的な比抵抗の高低が変化する要因として、電磁探査やその解析の手法が、本来的には比抵抗値とボリューム（あるいは厚さ）の関係を一義的に決定することを得意としていないことに起因しています。

以上を踏まえて、令和3年度の解析では、三次元比抵抗分布の解析精度を向上させるための留意点を確認するために、2つの観点の解析を実施することにしました。1つは調査範囲外の測点のデータを解析に追加することの効果の確認、もう1つは解析の際に「地層の層厚」と「地表付近の高比抵抗構造」に関する拘束条件を与えることの効果の確認です。前者については、令和2年度の解析に用いた99測点のデータに、調査領域外側の約3 km以内にある既存の15測点のデータを加え、合計114測点のデータを使用しました（図92）。一方、後者の拘束条件の追加のうち、「地層の層厚」については、令和2年度の反射法地震探査の解釈結果や既存の地質構造モデル⁽⁷⁸⁾に基づき、解析モデルに声問層/稚内層の境界面および稚内層/増幌層の境界面を設け、地層の層厚を拘束しました。また、「地表付近の高比抵抗構造」については、既存の空中電磁探査データ⁽⁷⁹⁾を用いて、表層の比抵抗を固定しました。図93および図94に、令和2年度に実施した解析結果（99測点拘束なし、30測点拘束なし）と併せて、令和3年度の結果として、114測点拘束なし、114点拘束あり、30測点拘束ありの計5ケースの解析結果を示します。

それぞれの解析結果から上述の効果を確認するために、幌延深地層研究センター周辺の既存のボーリング孔における比抵抗検層の観測値と各ケースの解析値の差の二乗平均平方根誤差（Root Mean Square Error：以下、RMSE）を深度別に算出し、比較しました（図93）。ただし、深度710 mおよび深度1,160 mについては、その深度まで掘削している既存ボーリング孔がほとんどないためRMSEを算出することはできません。114測点

拘束なしの結果は 99 測点と比較して、調査範囲の南西側に広がる低比抵抗領域の下面が浅くなり、その領域が狭くなっていますが、北東側の比較的深い領域に分布する低比抵抗領域は、上面がより浅くなったことで低比抵抗領域が広がっています。RMSE を比較すると 114 測点拘束なしの方が小さい値を示します。このことは、調査範囲の外側に測点を設けることで推定精度が向上することを意味しています。99 測点拘束なしと 30 点拘束なしの RMSE を比較すると、30 測点拘束なしの方が RMSE が大きく、推定精度が低下していることが分かります。30 測点拘束なしと 30 測点拘束ありを比較すると、30 測点拘束ありの方が RMSE が小さく、拘束条件を設けることにより推定精度が向上していることが分かります。一方、114 点拘束ありのケースは、114 点拘束なしのケースと比較して、RMSE が大きく、拘束条件を設けることで逆に推定精度が低下しています。

この結果は、拘束条件を設けることで、測点数が少ない場合に全体的な比抵抗値が高くなる傾向を抑制することができたものの、測点数が多い場合には、地層境界を比抵抗構造の境界として拘束することが逆効果になることを意味しています。既存ボーリング孔における比抵抗検層の結果において、少なくとも声問層と稚内層の地層境界が比抵抗構造の境界になっている事実は認められないため、適切な拘束条件にならなかったと考えられます。

以上の結果から、電磁探査データを用いて三次元比抵抗分布を解析する際の留意点として、①調査範囲の外側に測点を設けることが推定精度の向上につながることに、②比抵抗構造の厚さないしボリュームを仮定することにより、測点数が少ない場合の推定精度低下の対策になること、③拘束条件を与えるときはその根拠となる情報を整えることが肝要であることを示すことができました。今後は、HFB-1 孔の結果を追加し、電磁探査データを用いて三次元比抵抗分布を解析する際の留意点の検討を継続します。