

解を目的とした物理探査の解析コードを開発するとともに、開発した解析コードに必要な岩石の物性値のデータを室内試験で取得しました（図20）。物理探査によって取得される比抵抗および弾性波（P波）速度の分布に対して、室内試験で取得される飽和度変化に伴う物性値の変化を当てはめながら解釈することで、不均質構造の原因を特定できることが期待できます。

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については、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、令和2年度に抽出・整理した技術的な課題に基づいて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について、既往の調査⁽¹⁾を基に検討し、その手順を室内の模擬ボーリング孔で確認しました。

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係る品質保証体系の構築については、品質保証体系を構築するために必要となる緩衝材の流出挙動を把握するための試験を継続しました。緩衝材ブロックと岩盤の間に隙間がある施工方法については、湧水量の比較的多い条件（約1.0 L/min）での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十分な湧水量を試験孔で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、湧水量による緩衝材の流出挙動への影響を確認しました。また、緩衝材ブロックと岩盤の間の隙間にケイ砂を充填する施工方法については、平成31年度に実施した1か月程度の流出試験により、隙間に何も充填しない場合と比較して緩衝材の流出濃度が少ない状態が維持されることが確認されました。この緩衝材の流出挙動の長期的な継続性や、孔内湧水量と緩衝材流出量の関係を確認するため、数か月に及ぶ長期的な緩衝材の流出試験を開始し、排水中の緩衝材の量、緩衝材に地下水が膨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。



(a) 坑道側面に設けた切欠き部



(b) 吹付けの実施状況

図 18 ベントナイトの吹付けによる施工方法の工学規模試験実施状況

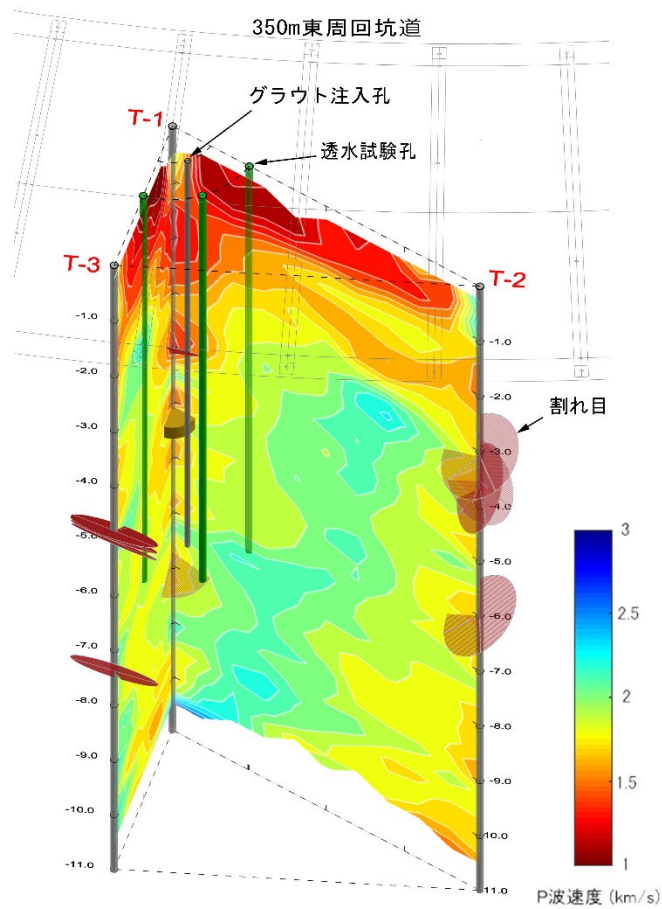


図 19 掘削損傷領域の連続性調査（弾性波（P波）速度分布図）

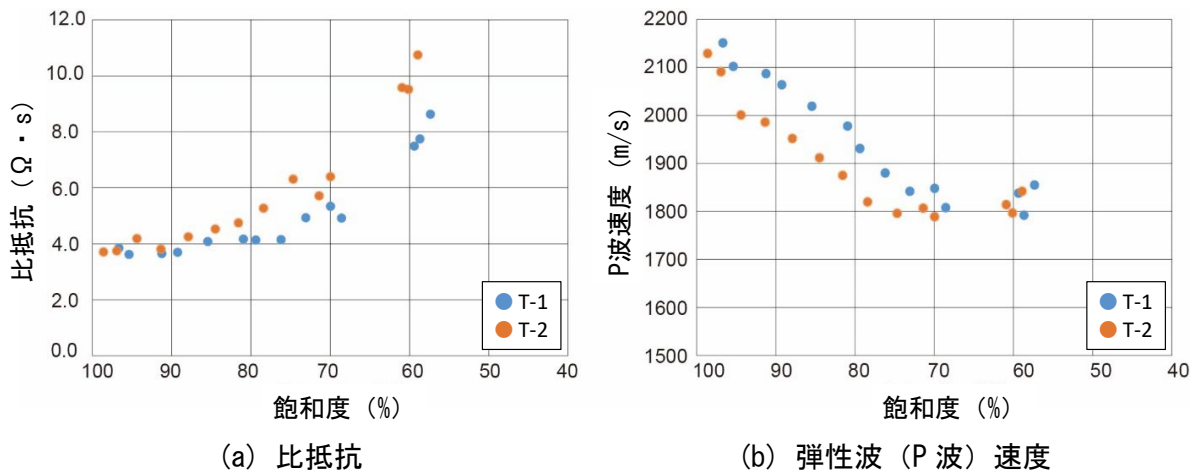


図 20 室内試験により取得された稚内層の健岩部における飽和度と比抵抗および弾性波 (P 波) 速度の関係

令和 4 年度は、搬送定置・回収技術の実証に関する試験については、コンクリート試験体の暴露試験を継続するとともに、定期的に試験体の分析を行い、地下環境でのコンクリートの劣化挙動に係るデータの取得を進めます。また、坑道閉塞後を模擬した二次元多相流解析を実施し、坑道閉塞後の坑道周辺岩盤の飽和度や二酸化炭素、メタンガス濃度の予測解析を実施します。

閉鎖技術の実証として、①埋め戻し材やプラグなどの長期的な性能の考え方の提示については、令和 3 年度に実施した連成解析に引き続き、力学現象も考慮した上で、埋め戻し材の安全機能が変わる可能性について検討を進めます。また、過年度の成果を含め、本検討で仮設定した坑道が主要な移行経路となりうるというシナリオの現実性について取りまとめを行います。さらに、埋め戻し材の安全機能を変化させる要因となりうるベントナイトの流出挙動に関し、坑道埋め戻しの状況を模擬した室内試験を継続し、流出挙動の発生メカニズムも考慮した上で、その発生条件の検討を行います。

②埋め戻し材の設計評価に必要なとなる緩衝材膨出抑制機能の把握については、令和 3 年度までに実施してきた緩衝材と埋め戻し材の力学的相互作用を考慮した縮尺模型試験を継続し、膨潤変形挙動に係るデータの拡充を図るとともに、埋め戻し材の設計評価に資するデータとしての取りまとめを行います。

③掘削損傷領域の連続性を遮断するための施工技術の実証については、これまで試験坑道 3 の底盤部で実施してきた透水試験を継続します。また、令和 3 年度の工学規模試験で坑道側面の切欠き部に吹付けたベントナイトのサンプリング調査を実施し、吹付けベントナイトの乾燥密度や含水比のばらつきなどの施工品質をより詳細に確認します。

④掘削損傷領域の調査技術の高度化については、試験坑道 4 周辺の掘削損傷領域を対象とした物理探査を継続し、解析コードの開発およびその解析コードの適用により掘削損傷領域の経時変化を評価するとともに、グラウト注入後のトモグラフィ調査などを実施し、高精度な三次元計測により高度化した物理探査技術を適用して評価を行います。

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については、ボーリング孔の閉塞方法として令和 3 年度に室内試験で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（図 21）を実施し、閉塞方法の適用性評価を行います。

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係る品質保証体系の構築については、令和 3 年度に開始した、緩衝材ブロックと岩盤の間の隙間にケイ砂を充填する施工方法における、緩衝材の流出試験を継続して緩衝材の流出量などを計測します。緩衝材の流出に関する長期的な挙動を確認するとともに、孔内湧水量と緩衝材流出量の関係から、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推定する方法を検討していきます。

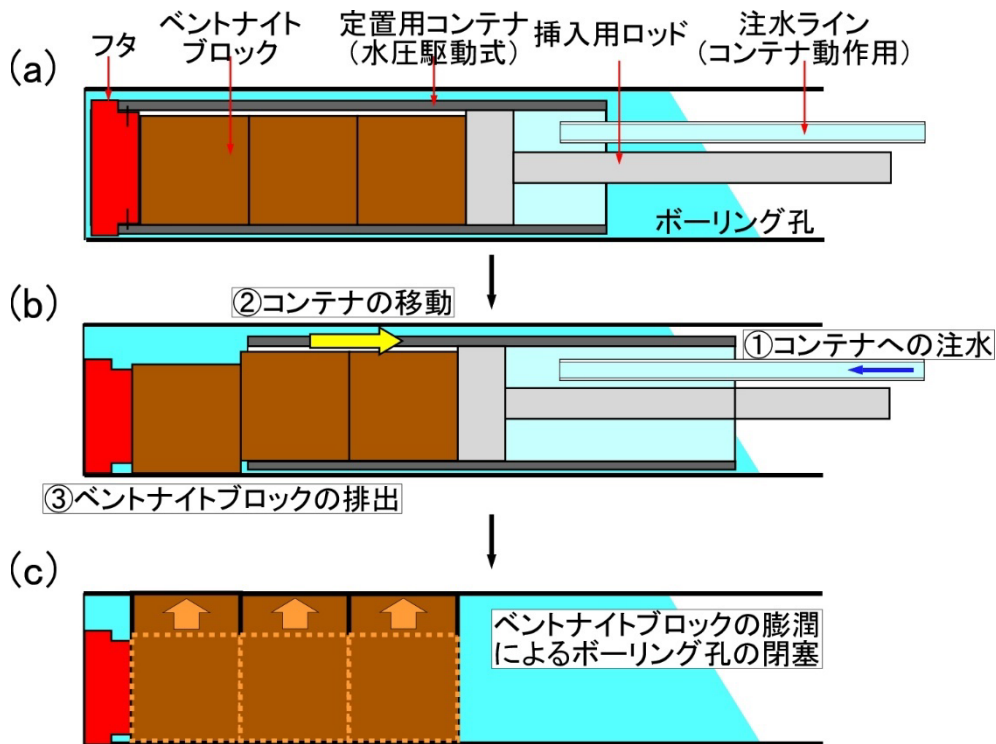


図 21 ボーリング孔閉塞の原位置試験の概念図

設置作業中にベントナイトブロックが地下水と接触することを防ぐために、ブロックをコンテナに収納してからボーリング孔内に挿入します。(a)ベントナイトブロックを収納して密閉されたコンテナをボーリング孔内の閉塞対象となる位置まで挿入します。(b)注水ラインを通じてコンテナへ注水することでコンテナが移動してベントナイトブロックがフタとともにボーリング孔内に排出されます。(c)ボーリング孔内に排出されたベントナイトが地下水と接触して膨潤することで、ボーリング孔が閉塞します。

5.1.2 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化

令和 2 年度以降は、廃棄体の設置方法などの実証試験を通じた坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化が課題となります。そのため、人工バリアに要求される品質を踏まえて、要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法(間隔など)を確認します。具体的には、坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化、先行ボーリングによる地質環境特性調査ならびに工学的対策技術を考慮した地下施設および人工バリアの設計評価技術の体系化、多接続坑道を考慮した湧水抑制対策技術および処分孔支保技術の整備、緩衝材流出・浸入現象評価手法および抑制対策技術の整備、廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理を行います(図 22)。本研究については、「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画」の研究期間の後半に実施します。

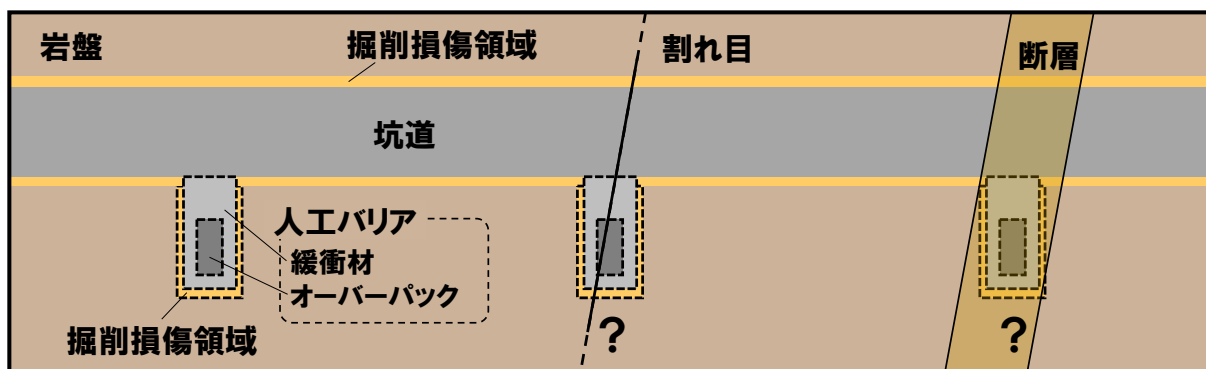


図 22 坑道スケール～ピットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化の概念図

5.2 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

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℃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℃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。

令和3年度は、緩衝材の温度が100℃を超えた状態で発生しうる現象に関する試験・解析などの事例に関して調査を行いました。例えば、令和2年度の調査で緩衝材の変質現象の1つとして抽出されたスメクタイト（ベントナイトに含まれる膨潤性の粘土鉱物）のイライト（雲母鉱物）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⁽²⁾⁽³⁾。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℃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℃までは約5%以下、140℃では約10%にとどまることが示されました(図23)。緩衝材の温度が100℃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うる⁽²⁾⁽³⁾ (反応速度がより小さくなる) ことから、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⁽⁴⁾⁽⁵⁾や、加熱により緩衝材に生じた亀裂を通じて地下水が流入することによる K^+ の供給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。

また、海外で実施されている緩衝材の最高温度が 100°C を超えた状態を模擬する原位置試験について、 100°C を超えた状態で生じうる現象の理解のために、廃棄体を模擬したヒーターの加熱に伴う各種センサーでの計測結果に関する情報を入手しました。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24)。令和4年度には、ヒーターの温度が 100°C を超えた状態でのデータが取得される予定です。

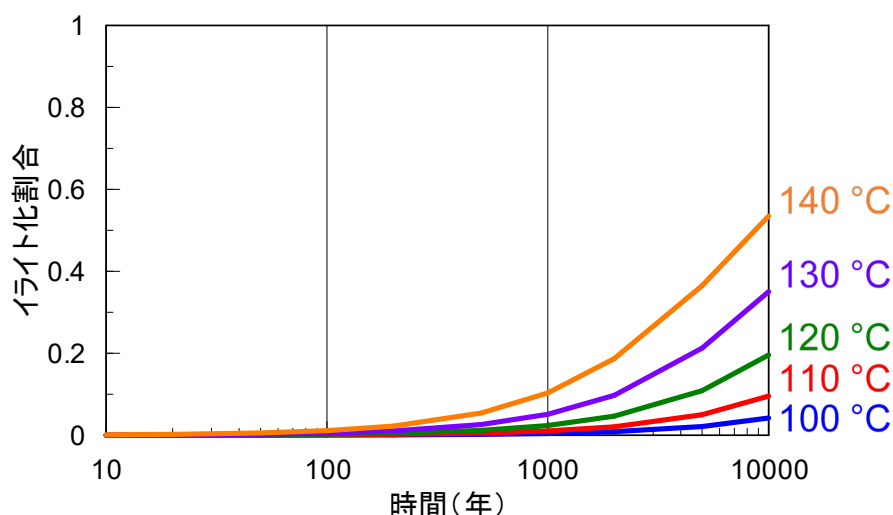
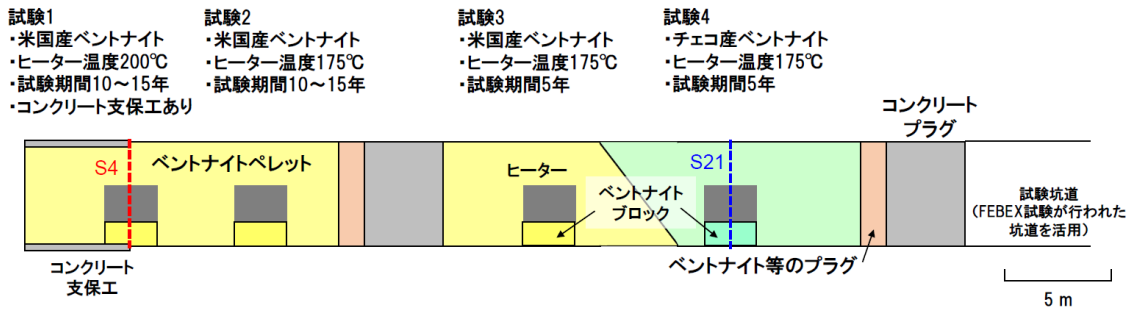
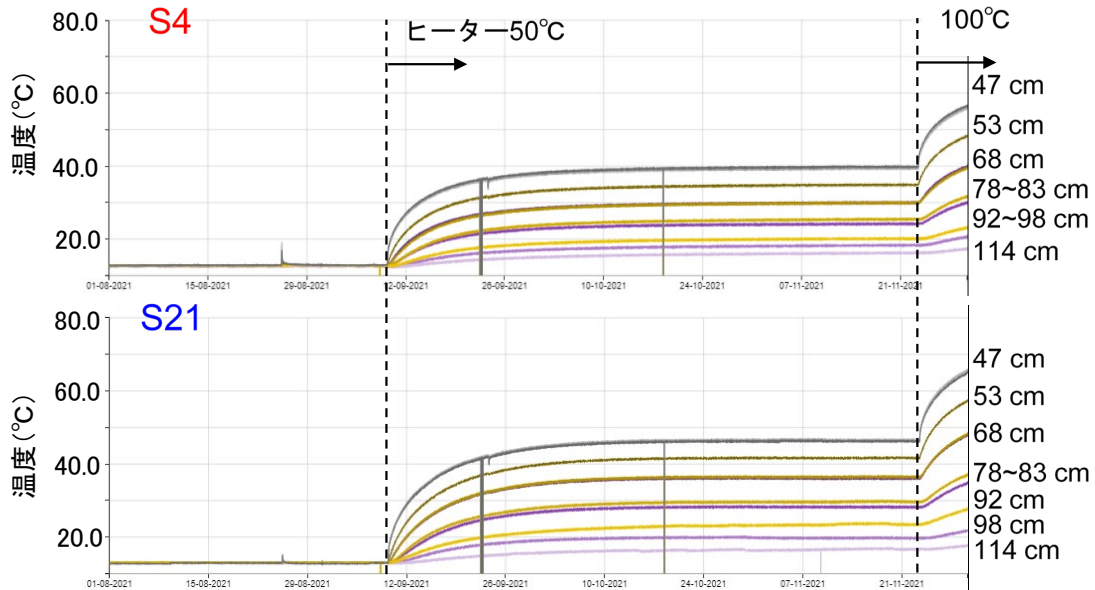


図 23 高温度におけるスメクタイトのイライト化の経時変化

参考文献(6)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(25~28 kcal/mol⁽³⁾)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。



(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 24 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うる現象などのシナリオを整理していきます（図 25）。また、その結果を踏まえて、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。

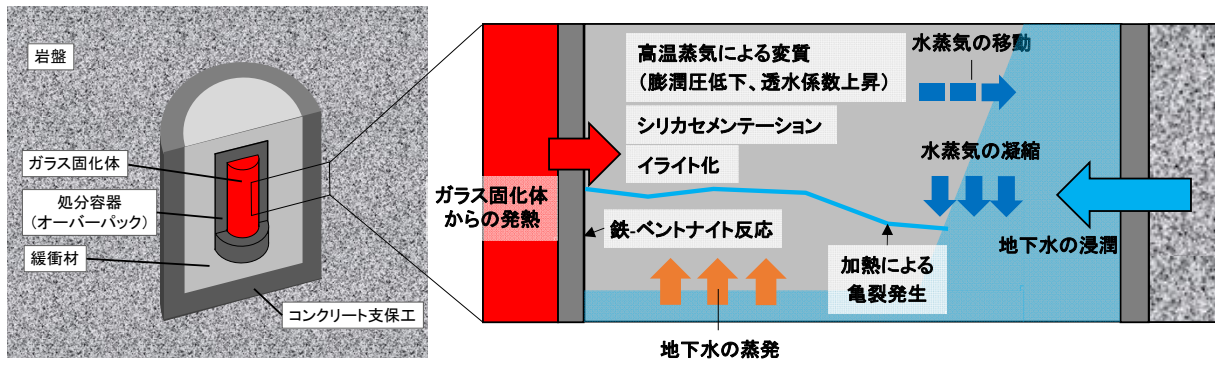


図 25 ガラス固化体からの発熱により人工バリア周辺に生じると想定される現象の概念図（令和3年度の調査結果に基づき更新）

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。

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⁽⁷⁾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⁽⁷⁾（図 26 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⁽⁸⁾を適用して図 26 に示すような新たな経験式（図 26 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 26 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 27）で説明できることが分かりました（図 26 の近似曲線のカーブの形が図 27 に基づくシミュレーション（図 26 の水色線）により、よく再現できています）。さらに、割れ目の透水性が図 26 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、0.05～2.00 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 28 上図）必要があることが分かりました。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 28 下図）。これらのことから、図 26 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う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⁽⁹⁾。

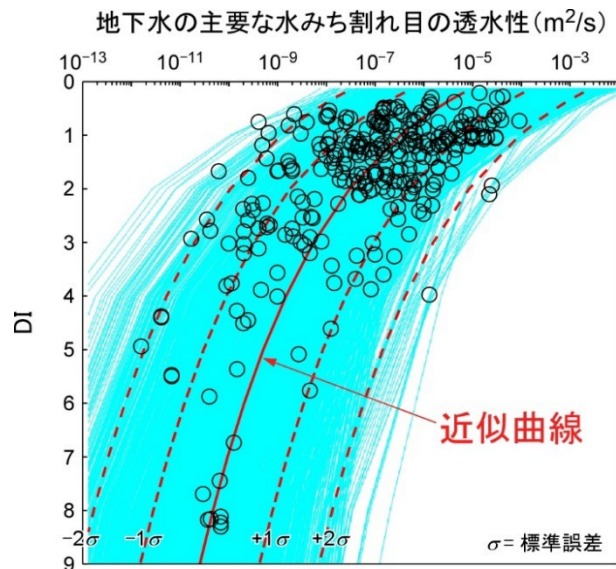


図 26 国内外の 6 つの地層における地下水の主要な水みち割れ目の透水性と DI の関係⁽⁹⁾

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⁽⁸⁾の近似法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 27 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。

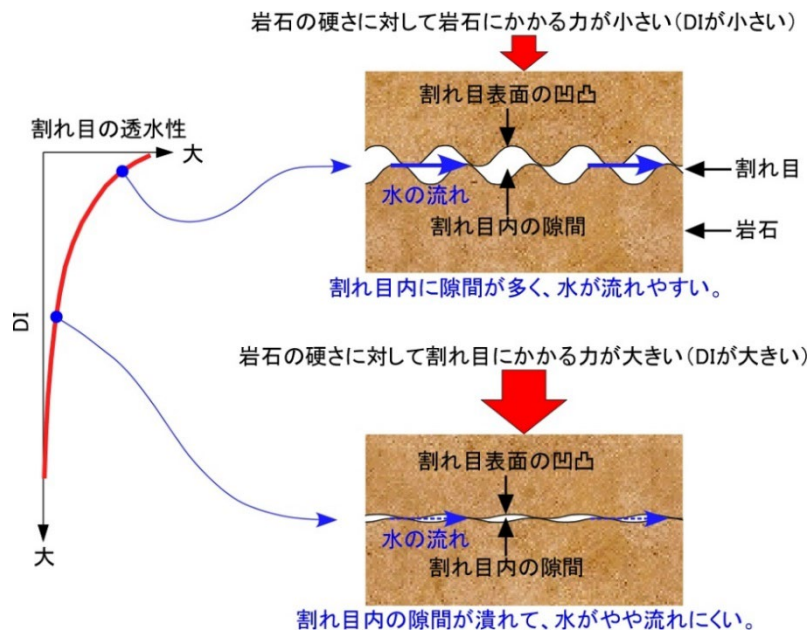


図 27 DI、割れ目内の隙間の開閉、および割れ目の透水性の関係（割れ目のずれが一定の場合）