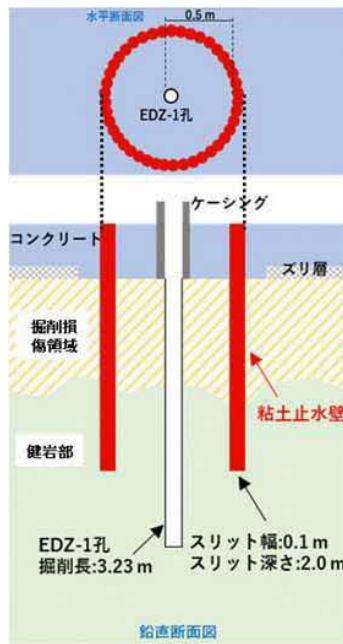
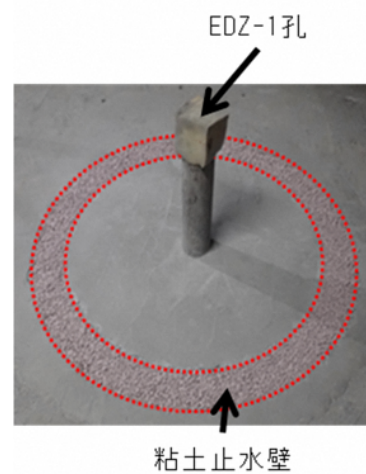




(a) 試験概念図



(b) 試験場所の状況

図 39 EDZ シーリング試験の概要図



図 40 試験領域の透水係数の経時変化

プラグの設計・施工に際して必要な EDZ の範囲を評価するために弾性波トモグラフィおよび比抵抗トモグラフィ調査を実施しました。坑道内における弾性波トモグラフィ調査では、これまでの研究から坑道内部の人工物が探査結果に影響を与える可能性があることが明らかになっていたため、調査に先立ち、これらの影響の有無を考慮した数値解析を実施して最適な観測点配置を検討しました。この結果、坑道壁面や坑道床面に発生した EDZ をボーリング孔を利用して調査する場合、全てのボーリング孔を鉛直に掘削するのでは

なく、一部の孔を斜めに掘削し、調査範囲を取り囲むように観測点を配置することにより、坑道内部の人工物の影響の有無に関わらず信頼性の高い調査が可能となることが推定されました。この解析結果に基づき、原位置における測線を設定し、試験坑道 6（図 2 参照）で弾性波トモグラフィ調査および比抵抗トモグラフィ調査を実施しました。調査の結果、弾性波トモグラフィでは坑道周辺に広がる低速度領域の範囲を特定することに成功し、その低速度領域は BTV で確認された亀裂の多い領域の深度と整合的でした（図 41）。

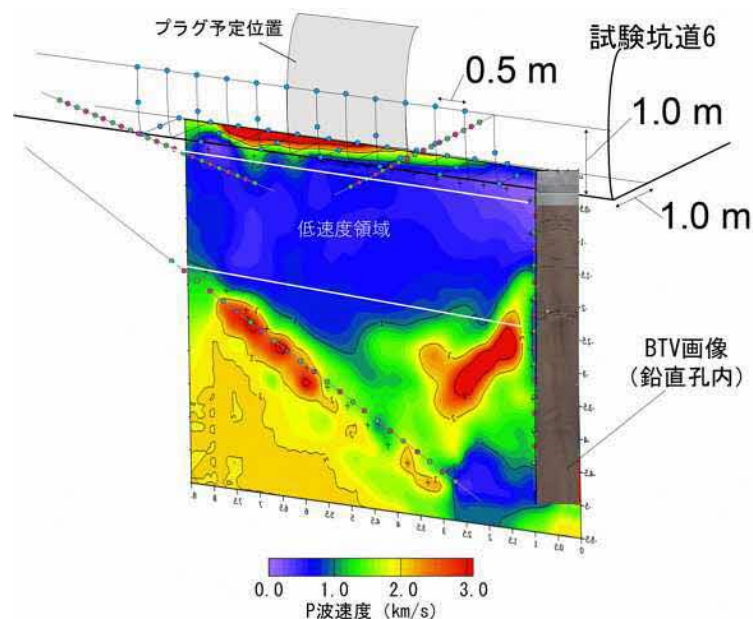


図 41 坑道床面で実施した弾性波トモグラフィ調査の結果

処分場を埋め戻す際には、地下施設の建設のために地上から掘削された調査ボーリング孔が地上へ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して放射性物質の移行の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すことのないように、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の閉塞について、ボーリング孔にベントナイトブロックを設置する方法^⑨を検討しています。これまでの検討で、ボーリング孔へ流入する地下水の流量がある程度多い場合には、設置したベントナイトブロックを短期間で膨潤させる工夫が必要となること

が課題として挙げられました。そこで、令和 5 年度はボーリング孔でベントナイトブロックが膨潤する過程を理解するための室内試験を実施しました。試験では、直径 75 mm、高さ 100 mm、乾燥密度が 1.6 Mg/m^3 となるように締め固めて作製したベントナイトブロックを内径 100 mm、長さ 110 mm 程度の横向きのアクリル容器内に設置して (図 42(a))、試験水に浸水させました。試験水には、イオン交換水および幌延の地下水の水質を模擬した溶液 (以下、模擬地下水) の 2 種類を用いました。浸水し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ていき、試験終了時には容器の断面方向から見ると断面全体を塞ぐようにベントナイトブロックが膨潤している様子が確認されました (図 42(b)および図 43)。また、イオン交換水と模擬地下水で比較すると、イオン交換水のほうが膨潤が進むのが早く、容器の断面全体を塞ぐまでに要する時間が短いことが確認できました。

試験終了後には、図 42(b)および図 43に赤丸で示したベントナイトブロックの 3 か所 (上部、中部、下部) からサンプリングし、その湿潤密度を測定しました。湿潤密度の測定結果は、イオン交換水で上部が 1.35 Mg/m^3 、中部が 1.64 Mg/m^3 、下部が 1.64 Mg/m^3 となり、模擬地下水では上部が 1.32 Mg/m^3 、中部が 1.66 Mg/m^3 、下部が 1.68 Mg/m^3 となり、膨潤前に隙間が存在していた上部において湿潤密度が低いことが確認できました。また、膨潤後の湿潤密度の分布には、試験水の水質の違いによる差がほとんど無いことが分かりました。

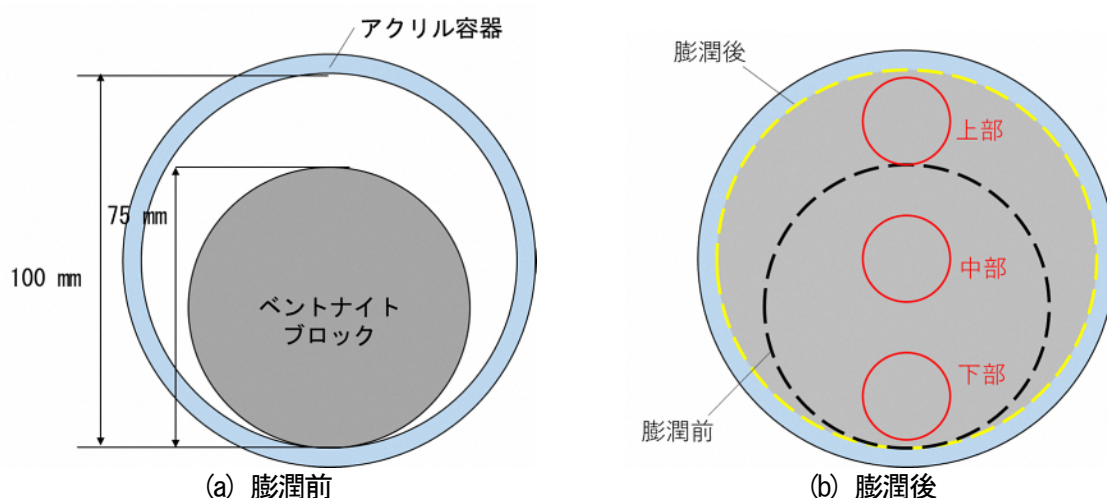


図 42 ベントナイトブロックを用いた室内試験の模式図 (断面図)

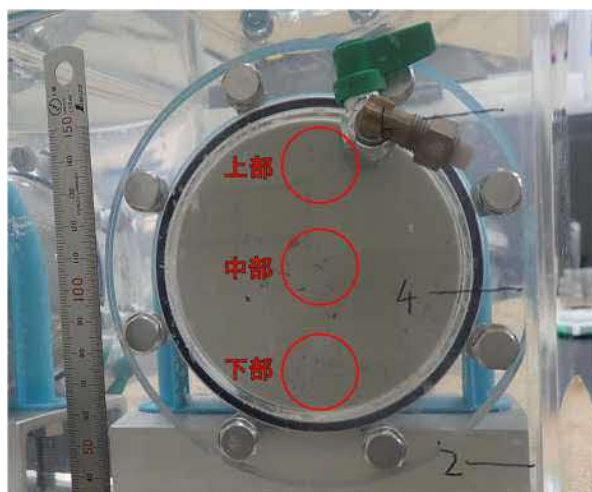


図 43 膨潤後のベントナイトブロックの状況

図 44 に、模擬地下水を浸水した試験の終了後に X 線 CT 測定を行い、ベントナイトブロックの内部の状況を非破壊で観察した結果を示します。図 44 には X 線 CT 測定で得られた CT 値の分布を示しており、CT 値が高いほど密度が高いことを表しています。膨潤前のベントナイトブロックの部分（図 44 の黒い破線の内側）で CT 値が高く、膨潤前に隙間だった部分の CT 値が低いことが分かります。サンプリングにより測定した湿潤密度と X 線 CT 測定で得られた CT 値の大小関係が良く一致しており、ベントナイトブロックの膨潤により隙間が塞がった部分では湿潤密度が低い傾向にあることが確認できました。

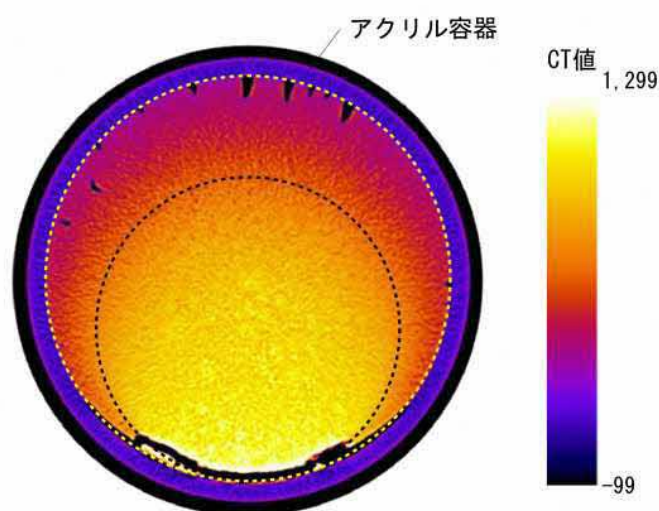


図 44 X 線 CT 測定より作成した CT 画像（模擬地下水条件）

(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

緩衝材や埋め戻し材に対して、表 2 に示すような設計要件が示されています⁽²⁸⁾。本課題では、表 2 に示されたような設計要件に対して、緩衝材や埋め戻し材の施工方法による品質の違いなどについて検討を行っています。

令和 5 年度は、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業（令和 5 年度「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[JPJ007597]：地層処分施設施工・操業技術確証試験」）を活用して、原子力環境整備促進・資金管理センター^{*15}との協力の下で、埋め戻し材の施工効率の向上が期待できる 3 つの工法について要素試験などを地上の研究施設などを利用して実施しました。具体的には、ブロック工法、斜め転圧工法およびスクリュウ工法（図 45）について、適用可能な材料の配合の範囲や施工品質などに関するデータを取得しました。

表 2 緩衝材および埋め戻し材の設計要件の例⁽²⁸⁾

	設計要件	内容	設計項目
緩衝材	低透水性	緩衝材中の地下水の流れを抑制し、放射性物質の移行を遅延すること	材料、有効粘土密度
	自己シール性	オーバーパックや岩盤との隙間など、施工時にできる隙間を充填可能な膨潤性を有すること	材料、有効粘土密度、厚さ
	製作施工性	既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術に基づき製作施工が可能であること	材料、有効粘土密度、材料の混合率
	物理的緩衝性	オーバーパックの腐食膨張による力学的な影響を緩和して、オーバーパックを保護するように物理的な緩衝性を有すること	材料、有効粘土密度、厚さ
埋め戻し材	低透水性	坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないこと	材料、有効粘土密度
	製作施工性	既存の技術または実現性の見通しのある技術で製作施工が可能であること	乾燥密度、有効粘土密度、材料の混合率

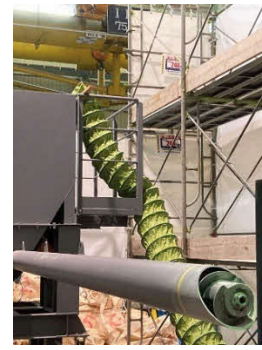
*15：公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター：RWMC（Radioactive Waste Management Funding and Research Center）は、放射性廃棄物処理処分の専門研究機関として設立されました。現在は、原子力発電環境整備機構を通して積み立てられる最終処分積立金の管理などを行う資金管理業務も実施しています。



(a) ブロック工法



(b) 斜め転圧工法



(c) スクリュー工法

図 45 施工効率の向上が期待できる埋め戻し材の施工技術

廃棄体を定置した後の処分坑道や処分場の閉鎖段階における、アクセス坑道や連絡坑道は、適切な材料で埋め戻されます。埋め戻し材には掘削土を用いることが合理的であり、低透水性を確保するために掘削土にベントナイトを混合した混合土を用いることが検討されています⁽²⁸⁾。処分場の地層ごとに透水性が異なる場合には、その透水性に応じて埋め戻し材の仕様は決定されることになります。また、埋め戻し材の仕様などに応じて異なる施工方法を用いることも考えられます。埋め戻し材の品質を保証するためには、埋め戻した坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないように、適切な乾燥密度で埋め戻されていることを確認する必要があります。

埋め戻し材の施工方法としては、これまで主に撒き出し・転圧工法と吹付け工法について、実寸大の模擬坑道を活用した実証的な試験などを実施して、施工技術としての成立性が確認されています⁽²⁵⁾。しかし、既存の施工機械を用いたこれらの工法では、施工に時間がかかるという課題があるため、施工効率の向上が期待できる図 45 に示した 3 つの工法の研究開発に取り組んでいます。なお、本研究開発では、掘削土の代わりにコンクリート用碎石・砕砂（碎石：最大粒径 20 mm、砕砂：最大粒径 5 mm）、ベントナイトはクニゲル V1 を使用して埋め戻し材を作製しました。

ブロック工法では、埋め戻し材ブロックとして成型可能な材料の範囲を把握するために、ベントナイト混合率と成型圧力をパラメータとして静的締固め試験を実施しました。供試体の直径は 100 mm、高さは約 100 mm です。試験結果の例を図 46 に示します。最大粒径 20 mm の碎石を含む埋め戻し材では、ベントナイト混合率 15% の場合には供試体の表面に多少の凹凸が見られましたが、30% 以上では外観に大きな欠けや崩れなどは見られませんでした。また、

これらの供試体の有効粘土密度は 1.0 Mg/m^3 以上でした。これらのことから、今後、スケールアップした埋め戻し材ブロックを作製するための条件を把握することができました。



(a) ベントナイト混合率：15% (b) ベントナイト混合率：30% (c) ベントナイト混合率：40%

図 46 静的締固め試験後の供試体の外観（成型圧力：20 MPa）

斜め転圧工法については、撒き出し・転圧時に埋め戻し材が斜面を滑落して材料分離が生じる可能性があるため、適切な撒き出し角度を把握するための斜め撒き出し試験（図 47(a)）を実施しました。また、設定した撒き出し角度で斜め転圧試験を実施して、施工後の品質を確認するための施工試験（図 47(b)）を実施しました。斜め撒き出し試験の結果、撒き出し角度 35° ならば埋め戻し材（最大粒径 20 mm、含水比 11%）の滑落は少なく、斜面の上部と下部で埋め戻し材の粒度のばらつきも小さいことが分かりました。また、撒き出し角度 35° で実施した施工試験の結果、空間的制約のない坑道下半部の施工であれば、既存の転圧機械を用いた水平方向の撒き出し・転圧工法と同等の乾燥密度が得られることが分かりました。



(a) 斜め撒き出し試験

(b) 施工試験

図 47 斜め転圧工法による要素試験

スクリー工法については、自然含水比程度の埋め戻し材を用いた充填方法について検討しているため、粒径の大きな碎石・砕砂とベントナイトが充填中に分離してしまうことが考えられます。そのため、充填後の埋め戻し材の均質性に影響を及ぼす主要因である掘削土（碎石・砕砂）の最大粒径とスクリーの高さの関係を把握するために、1本のスクリーを用いた充填試験を実施しました。充填試験後の埋め戻し材の外観の例を図48に示します。充填後の埋め戻し材から複数の試料を採取して、粒度試験を実施した結果から、埋め戻し材に含まれる掘削土（碎石・砕砂）の最大粒径が大きく、スクリーの設置位置が高いほど、充填後の埋め戻し材の不均質性が大きくなることが分かりました。



図 48 スクリー工法による埋め戻し材の充填後の外観

また、埋め戻し材の施工品質を確認するための計測技術についての研究開発にも取り組んでいます。埋め戻し材の乾燥密度と熱伝導率には相関関係があるため、加熱と温度測定が可能な光ファイバーケーブルを埋め戻し材中に設置（例えば、転圧施工した埋め戻し材の上に光ファイバーケーブルを敷設し、その上に再度、埋め戻し材を転圧施工するなど）して、加熱中の埋め戻し材の温度変化量から熱伝導率を算出し、ケーブルに沿った埋め戻し材の乾燥密度の分布を推定することができます。これまでに測定距離の分解能が小さく測定可能距離が短い（最大で 15 m～18 m 程度）OFDR 方式※を用いてきましたが、温度測定結果にばらつきが大きいことが課題でした⁽²⁵⁾。そのため、光ファイバーケーブルに作用するひずみの影響を受けないラマン散乱※を用いた OTDR 方式※を用いて、光ファイバーケーブルの曲げ半径を変化させた試験を実施しました。その結果、OFDR 方式に比べて OTDR 方式では、温度測定結

果のばらつきが小さいことが確認できたことから、今後の埋め戻し材の施工などの実証試験では、ひずみの影響を受けずに km オーダーの測定が可能な OTDR 方式が有効であると考えられます。

さらに、フィーダー線（アンテナケーブル）を用いた TDR 法^{*}により、埋め戻し材と坑道壁面の間に生じる可能性のある隙間を検知するための試験を実施しました（図 49）。試験では、0.5 m と 1.0 m の空隙の長さに対して、1 m ずつ埋設部を延長して測定値を確認しました。その結果、今回の試験条件では、空隙サイズ 0.5 m と 1.0 m の場合、ケーブル長さがそれぞれ 6 m と 8 m 以下ならば空隙が検知できることが分かりました。

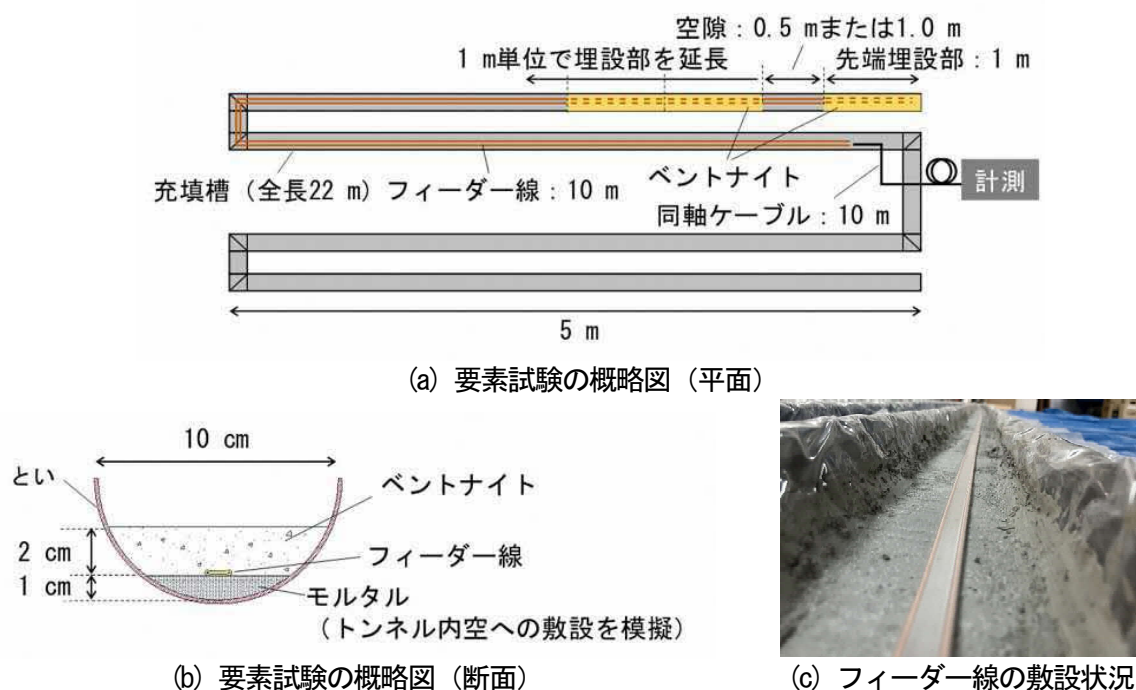


図 49 ケーブル TDR 法の計測限界長把握のための要素試験

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。本課題と関連する 4.1 人工バリア性能確認試験では、100℃以下での温度条件下において熱－水理－力学－化学連成現象に係るデータを取得していますが、ここでは、100℃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5年度は、令和4年度に策定した原位置試験の計画^⑨を基に、後述する室内試験の状況も踏まえ、試験坑道 5（図 2 参照）の 2 つの既存孔に、それぞれ緩衝材ブロック、ヒーターおよび計測センサーからなる試験体を設置し、100℃を超える温度での加熱を開始しました。緩衝材ブロックは、ベントナイト（クニゲル V1）とケイ砂（3 号と 5 号を 1 : 1 で混合）を 70:30 の割合で混合し、外径 50 cm、内径 11 cm、高さ 10 cm、目標乾燥密度約 1.8 Mg/m³（膨潤時の密度約 1.6 Mg/m³）で加圧成形しました。また、初期含水比（10.5%および 15%）および形状（ドーナツ型および 2 分割の扇形）を変えて作製し、図 50 に示す順番で積み上げました。試験体は炭素鋼製の円筒の中にカートリッジヒーターを設置するとともに、円筒に固定した蓋状の構造物で緩衝材ブロックを上下から固定する構造としました。これは、緩衝材ブロックの鉛直方向の膨潤変位を抑制し、試験体の解体や試料採取を容易にするためです。計測センサーは、試験体のスケールが比較的小さいことから、試験に大きな影響を及ぼさないと考えられる程度の種類および数量としました。試験体の設置概略図を図 51 に示します。

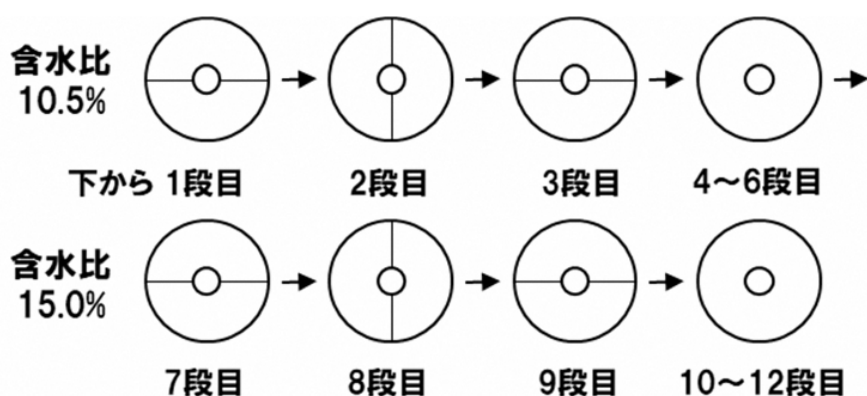


図 50 緩衝材ブロックの積み上げ順

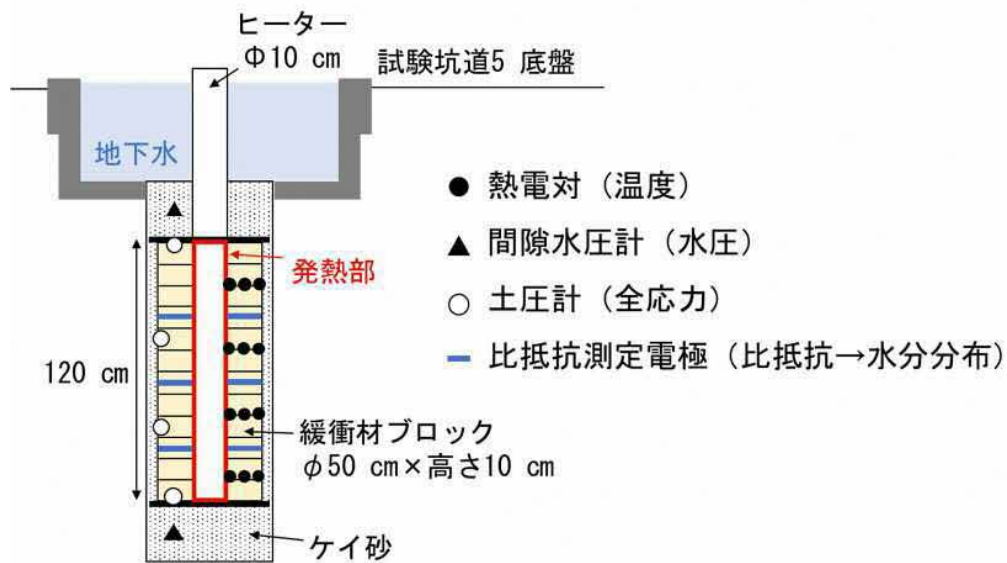
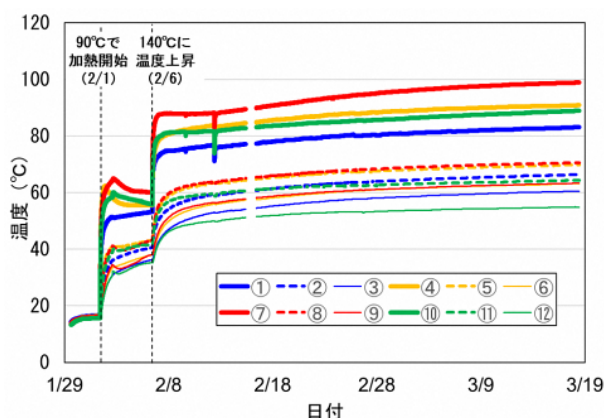
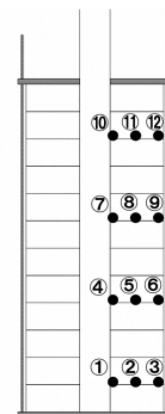


図 51 試験体の設置概略図

試験体の設置後、設置した計測センサーでの連続計測およびヒーターでの加熱を開始しました。はじめに 90℃で 5 日間加熱し、試験体や計測結果に異常がないことを確認してからヒーター設定温度を 140℃に上昇させました。140℃の加熱温度はオーバークックの耐食性への影響に関する試験データ⁽²⁹⁾や令和 3 年度に実施した緩衝材の変質に関する研究事例の調査結果⁽⁸⁾に基づいて設定しました。2 つの試験体のうち、ひとつの試験体における熱電対および土圧計での計測結果をそれぞれ図 52 および図 53 に示します。

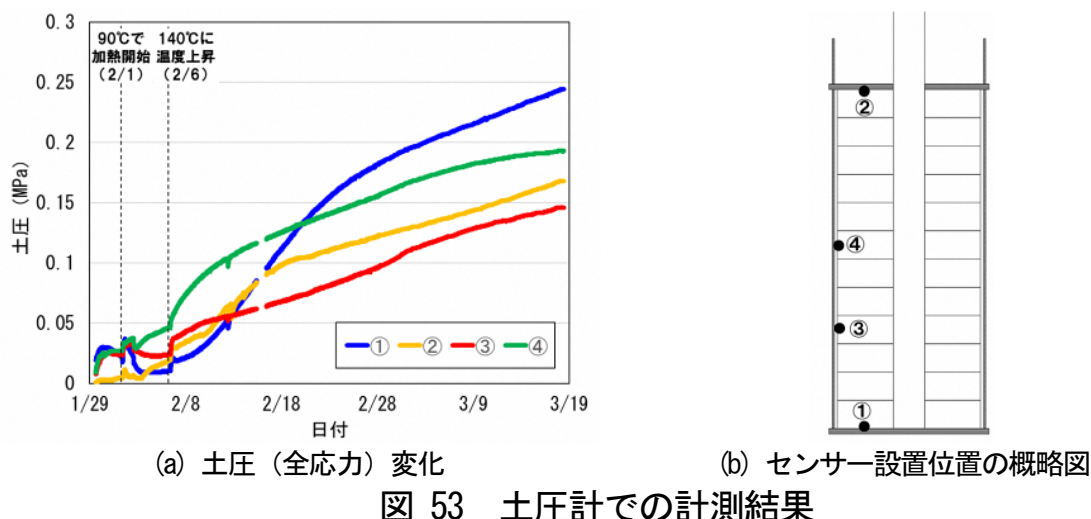


(a) 温度変化



(b) センサー設置位置の概略図

図 52 熱電対の計測結果 (温度)



また、高温条件下での緩衝材へのひび割れの発生ならびに閉塞挙動を確認するための室内試験を実施しました。試験は、初期含水比の異なる直径 5 cm、高さ 5 cm の円柱形の 2 つの供試体を 140℃で加熱した後、供試体の下端から蒸留水を浸潤させ、一定時間ごとに X 線 CT 撮影を行いました。撮影結果から換算した緩衝材の密度の経時変化を図 54 に示します。図から、140℃で加熱すると緩衝材にひび割れが生じること、緩衝材の初期含水比に応じてひび割れの発生状況は異なるものの、ひび割れが優先的な水みちとなるような浸潤挙動は確認されないこと、生じたひび割れは最長でも 2,280 時間（95 日）前後で閉塞されることが分かりました。

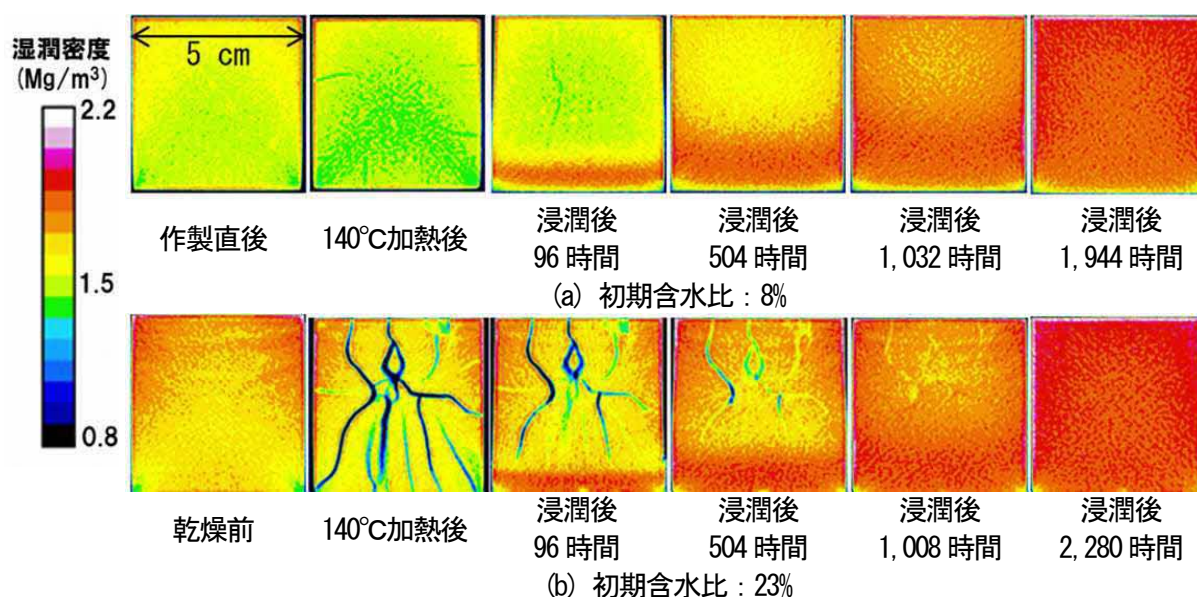


図 54 140℃での加熱および蒸留水浸潤過程での緩衝材試料の浸潤密度の変化

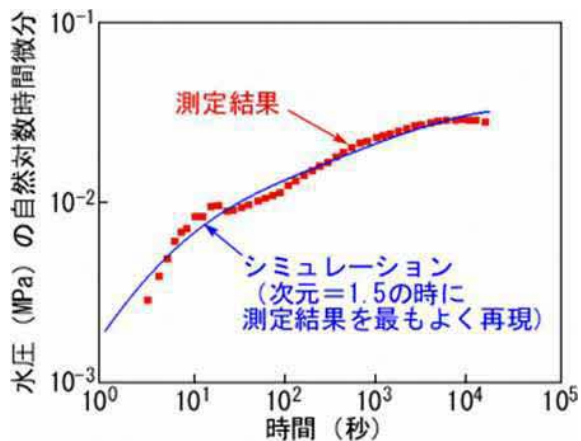
6. 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

6.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

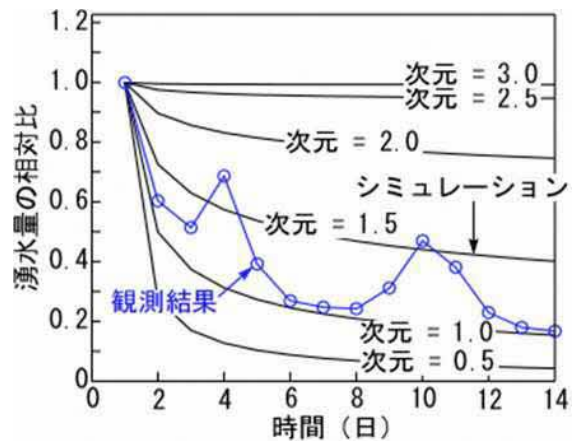
6.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

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 程度のより大型の断層における断層のずれが断層内の地下水の流れに与える影響に関して、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（力学的な安定性）評価手法の整備を行います。

令和 5 年度は、DI を用いた透水性評価手法の信頼性向上・隆起侵食の影響評価手法の整備を目的として、断層の水理学的連結性と DI の関係に関する解析を行いました。断層の水理学的連結性は断層内の水みちのつながり方の次元として数値化することができ、次元の値が小さいほど、水理学的連結性が低いことを表します。これまで定性的に判定していた水みちのつながり方の次元について解析を実施し、定量的に次元を決定しました。例えば、水みちのつながり方の次元が 3 に近いと、水みち同士の間につながりが多いのに対し、次元が 1 に近いと、水みち同士の間につながりが少ない状態が想定されます。図 55 に、ボーリング調査における断層を対象とした透水試験時の水圧変化や坑道掘削時に遭遇した断層からの湧水量変化から、断層内の水みちのつながり方の次元を決定した例を示します。解析では水みちの中を水圧がどのように伝搬したかをシミュレーションにより検討しました。解析の結果、地下施設周辺の稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元は DI の増加とともに低下する傾向があることが分かり、DI が 2 以上になると、水みちのつながり方の次元が 1.5 以下まで小さくなることが分かりました（図 56）。このような情報は、図 57 に示すような断層/割れ目の水理学的連結性と DI の関係を定量的に理解する上で重要となります。



(a) 透水試験結果の解析例



(b) 湧水量観測結果の解析例

水みちのつながり方の次元の推定値：1.5

水みちのつながり方の次元の推定値：1.0~1.5

図 55 水みちのつながり方の次元の解析例⁽³⁰⁾

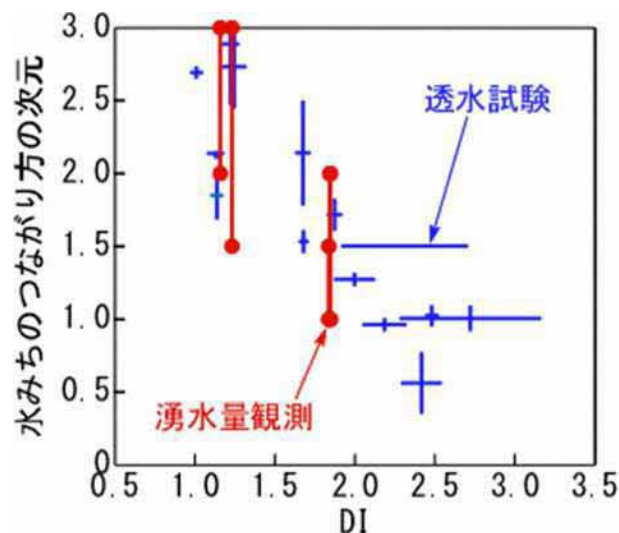
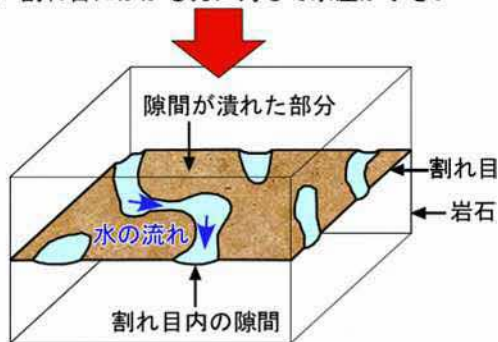


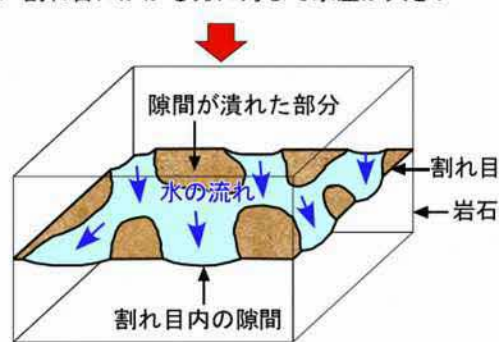
図 56 地下施設周辺の稚内層中の断層内の水みちのつながり方の次元と DI の関係⁽³⁰⁾

DI が大きい
岩石の硬さに対して割れ目にかかる力が大きい
or 割れ目にかかる力に対して水圧が小さい



水理学的連結性が低い
割れ目内の隙間が潰れて、水が流れにくい

DI が小さい
岩石の硬さに対して割れ目にかかる力が小さい
or 割れ目にかかる力に対して水圧が大きい



水理学的連結性が高い
割れ目内に隙間が多く、水が流れやすい

図 57 割れ目の水理学的連結性と DI の関係⁽³¹⁾

割れ目内の局所的な水の流れやすさに関して、既往研究により得られた知見の再検証を行いました。既往研究により、割れ目内の局所的な水の流れやすさは、割れ目に作用する力、割れ目のかみ合わせの程度、そして岩石の硬さによって決まり、これらの関係が数式で表せることが提案されています^(32、33)。このモデルの信頼性を検証するために、過年度に行った人工バリア性能確認試験の試験孔周辺の掘削損傷割れ目を対象とした透水試験の結果を検討しました。具体的には、試験孔に設置した緩衝材の膨潤圧の発生に伴う試験孔周辺の掘削損傷割れ目の水の流れやすさ（透水量係数）の変化（図 58）を上述のモデルで再現できるかを確認しました。その結果、図 59 に示すように、膨潤圧の発生によって掘削損傷割れ目に作用する力が増大し、割れ目の開口幅（透水量係数）が低下する現象をモデルで良く再現することができました。このことから、既存のモデルの信頼性を確認することができました。

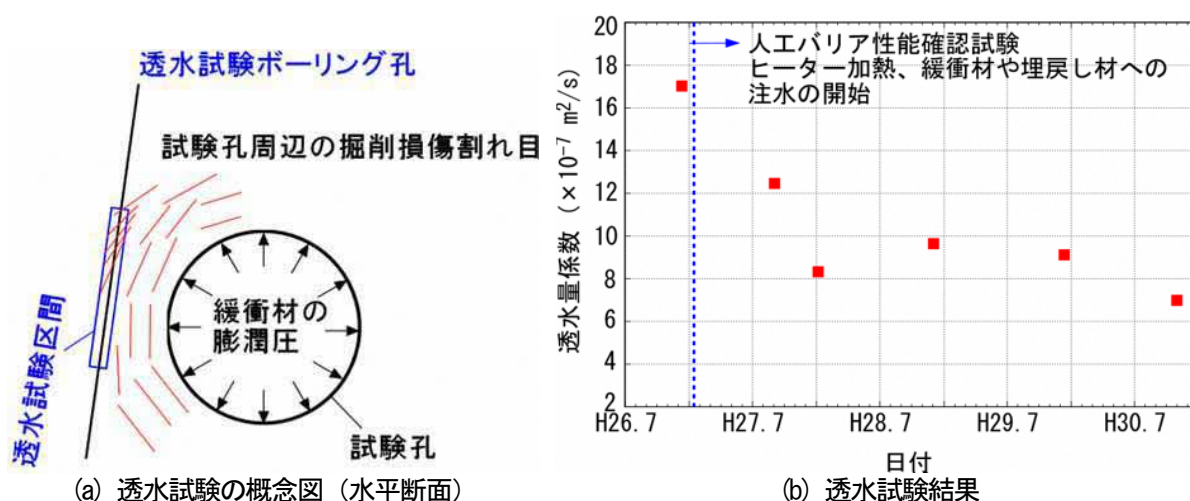


図 58 人工バリア性能確認試験の試験孔周辺の透水試験の概念図と透水試験結果

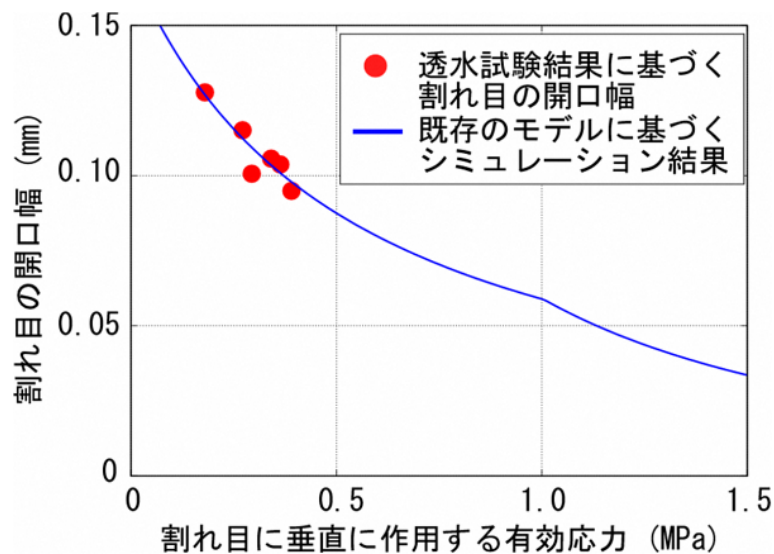


図 59 割れ目に垂直に作用する有効応力と割れ目の開口幅の関係

水圧擾乱試験による断層の活動性（力学的な安定性）評価手法の整備を目的として、過年度に実施した水圧擾乱試験の結果の解析を行いました。解析では断層の力学的な安定性を評価する上で重要となる原位置の地圧の状態を水圧擾乱試験の結果から推定する方法を検討しました。いくつかの仮定のもと（鉛直方向の地圧＝土被り圧、など）、水圧擾乱試験において発生した断層のずれの方向（図 60）を再現するような原位置の地圧の状態を求めた結果、鉛直方向の地圧、水平方向の最大地圧、および水平方向の最小地圧の大きさの比が、1.0:0.8:0.7 もしくは 1.0:0.9:0.7 であることが推定されました。断層がずれる方向と岩盤にかかる力の方向と大きさは密接に関連し、今回のケースに関して言えば、例えば鉛直方向の地圧が最も大きいと、試験中に確認された断層のずれを再現できることが分かりました。推定された地圧の状態は、近傍のボーリング孔で行われた既往の地圧試験の結果と良く一致しており（表 3）、水圧擾乱試験でも原位置の地圧の状態が推定できることが分かりました。

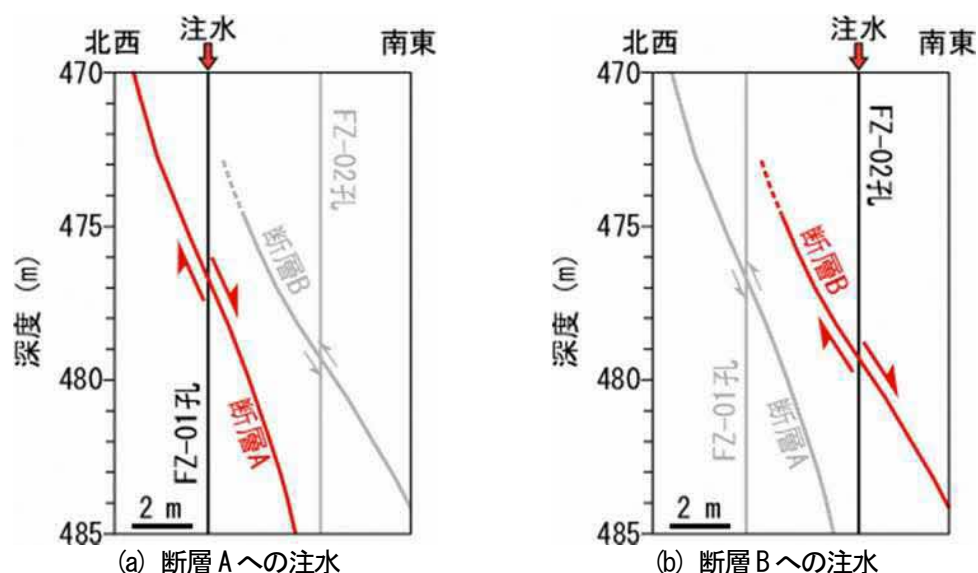


図 60 断層に注水した際に生じた断層沿いのずれの方向

断層Aは南東に、断層Bは南に傾斜しており、それぞれの断層に注水した際に断層の上盤側が下方にずれることが水圧擾乱試験で確認できました。

表 3 試験エリア（図 60）周辺で推定された地圧の状態

手法	鉛直方向の地圧、水平方向の最大および最小地圧の大きさの比
水圧擾乱試験	1.0 : 0.8 : 0.7 もしくは 1.0 : 0.9 : 0.7
地圧試験	1.0 : 0.9 : 0.7

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⁽²⁸⁾、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（以下、低流動域）を調査してモデル化する技術（三次元の分布図として示す技術）を実証することを目的としています。

本研究課題は、令和 4 年度まで、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業「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⁽³⁴⁾」を活用して取り組みました。その結

果、幌延地域の地質環境を事例として、地上からの調査である物理探査とボーリング調査により低流動域の三次元分布を推定する手順を示しました。さらに、低流動域を総合的に理解する際に考慮すべき古水理地質学的変遷※に関する因子を抽出するために、そのモデル化・解析手法の事例を示しました。

令和 5 年度は、これまでの成果に基づき、地層処分事業のサイト調査を踏まえて、低流動域の分布を推定する際の地上からの調査の進め方を検討しました⁽³⁵⁾。化石海水は海水に由来することから、塩化物イオン (Cl⁻) 濃度が化石海水の存在を確認するひとつの指標として用いることが可能です。幌延地域の地質環境では、Cl⁻濃度は地下の比抵抗と強く相関するため⁽³⁶⁾、電磁探査が化石海水の広がりやを推定する際の有効な調査です。地下水の Cl⁻濃度は、ボーリング調査における地下水採水とその化学分析によって取得されます。これら電磁探査とボーリング調査のデータを用いたクリギング（地球統計学的手法）により Cl⁻濃度の空間分布を予測することが可能であり、他の指標（例えば水の安定同位体比※⁽³⁷⁾）も考慮することにより、低流動域の分布を推定することが可能です。図 61 は既存情報に基づく数十 km 四方の調査範囲の設定から、数 km 四方の低流動域の三次元分布の推定までの手順を示しています⁽³⁵⁾。数十km四方の調査に関しては、空中電磁探査※によって、その探査深度は地下施設設置の深度に比べて浅い（約 150 m 程度）ものの、調査範囲全域の三次元比抵抗分布を取得します。さらに、二次元側線の MT 法※電磁探査で得られる深部の比抵抗分布により、深部の比抵抗分布を補足することができます（図 62）。これらの結果に基づき低流動域として推定できる低比抵抗領域が浅い深度に分布している範囲を抽出することで、調査範囲を数km四方に絞り込みます。数km四方の調査に関しては、AMT 法※と MT 法を併用した高密度電磁探査⁽²⁰⁾により取得される深度 1,500 m 程度までの三次元比抵抗分布に基づき、化石海水の広がりやを推定します。この妥当性をボーリング調査によって確認します。そして、これらの調査の取得データに基づく地球統計学的解析により低流動域の三次元分布を推定します。幌延地域の場合、数 km 四方の範囲に最低 2 地点のボーリング調査を実施することで、低流動域の三次元分布を推定可能です⁽⁹⁾。以上の検討には、令和3年度および令和4年度に幌延深地層研究センター周辺において実施した HFB-1 孔のボーリング調査のデータを用いており、これを研究開発報告書としてまとめました⁽³⁸⁾。

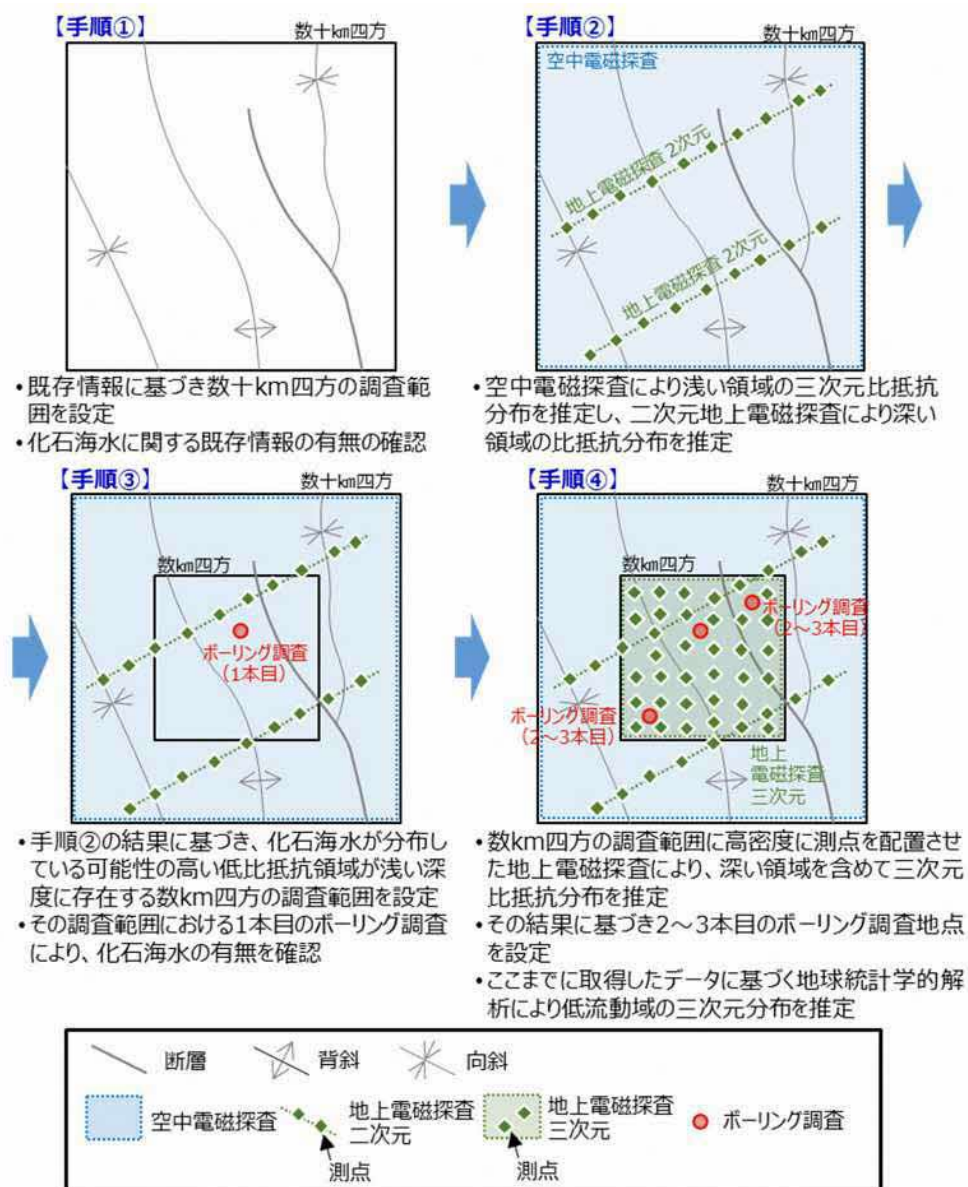


図 61 化石海水の三次元分布を推定するための電磁探査およびボーリング調査の手順⁽³⁵⁾

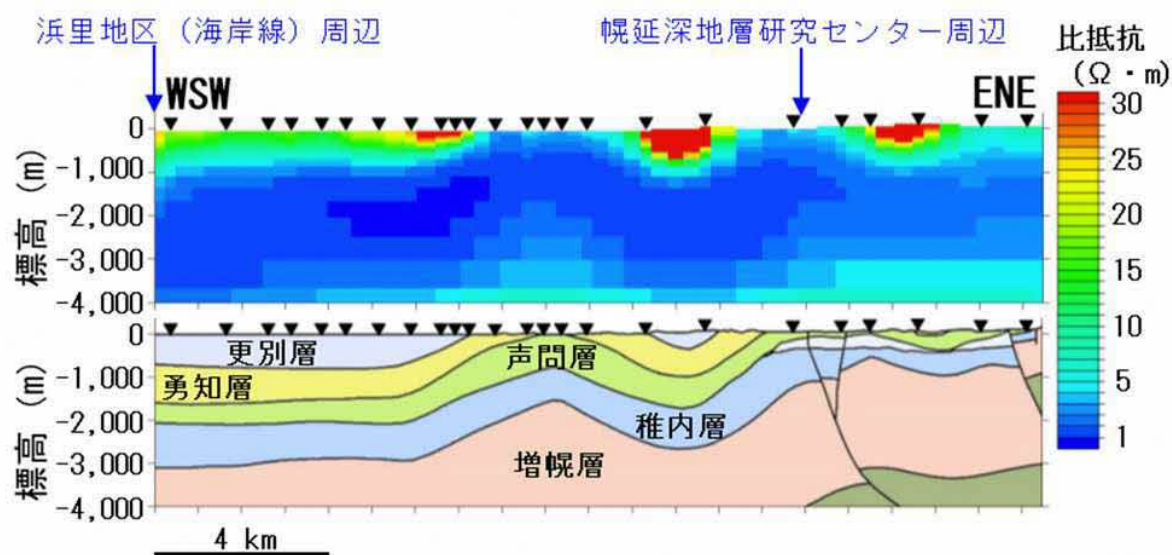


図 62 数十km四方の調査における二次元側線の MT 法電磁探査の結果の例
 浜里地区と幌延深地層研究センター周辺を通過する西南西-東北東方向の二次元断面における比抵抗分布(上)と地質断面(下)を示しています。二次元比抵抗分布を求める解析には既存のデータ^(39, 40)を使用しました。図中の黒三角は測点の位置を示しています。低比抵抗の領域を低流動域である可能性が高い領域として読み取ることにより、声問層や稚内層が地表付近に分布する褶曲の背斜周辺を数 km 四方の調査範囲として絞り込むことができます。

地下水の流れが非常に遅い領域の三次元分布を調査する際には、電磁探査とボーリング調査を組み合わせた調査が有効ですが、この調査の前提として、ボーリング調査では地下水の水質や年代に基づく地球化学的な評価により地下水の流れが非常に遅いことを確認する必要があります。令和 5 年度は、割れ目と岩石間隙中の地下水の水質の違いから地下水の流れの有無を評価する既往研究^(41, 42, 43)に地下水の放射性炭素 (^{14}C) 年代から得られた情報を組み合わせることで、地下水の流動状態の長期的な変遷を推定する手法を構築し、論文として取りまとめました⁽⁴⁴⁾。その結果によれば、天水が浸透した領域のうち浅部では最終氷期以降(後氷期: 約 1 万年前以降)に浸透した天水が流動していること、深部では最終氷期に浸透した天水が現在は滞留していることが分かり、両者の流動状態の違いは最終氷期と後氷期での鉛直方向の動水勾配(地下水を動かす駆動力)の違いに起因すると考えられます(図 63)。

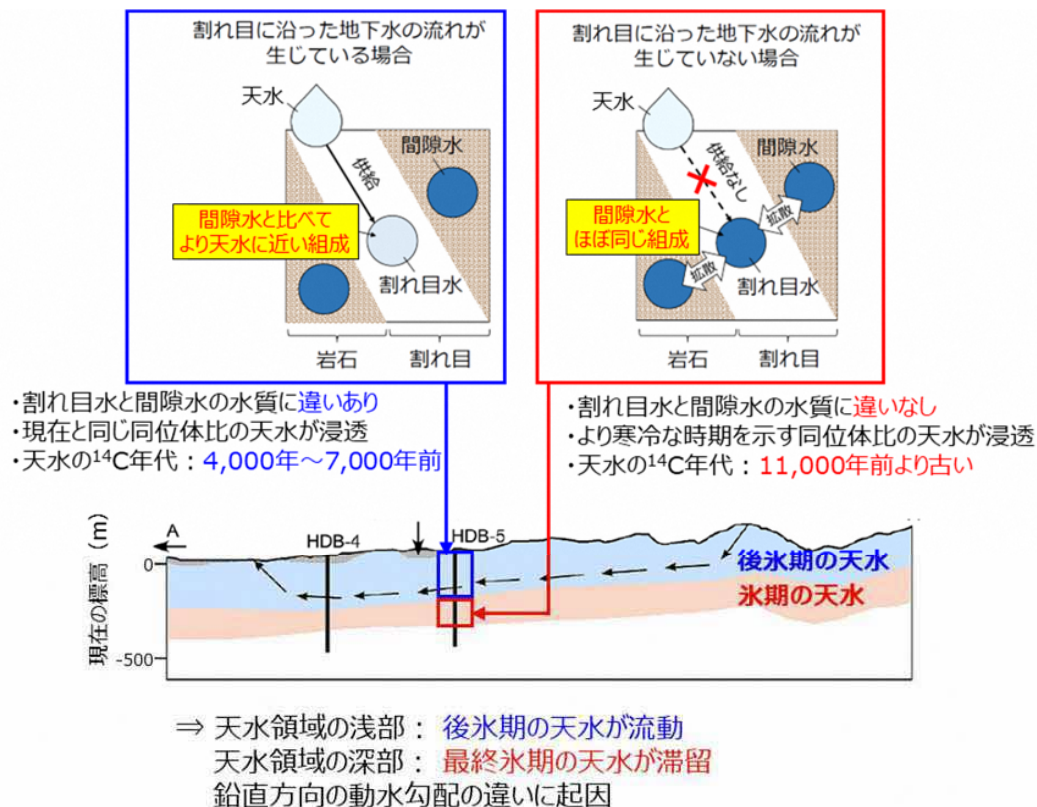


図 63 割れ目水と間隙水の水質の違いと地下水の ^{14}C 年代に基づき解釈した地下水流動概念⁽⁴⁴⁾

また、産業技術総合研究所との共同研究として、令和 4 年度に引き続き、海陸連続三次元地質環境モデルの妥当性の検証を目的とした海上からの物理探査と、調査孔を用いた地下温度測定を行いました。海上からの物理探査については令和 4 年度の実績に基づき探査手法を見直した上で、幌延町沿岸部の浅海域において令和 4 年度と同じ測線を中心に調査を実施しました。その結果、探査に用いる音波（弾性波）の発振源を調整することで、より深い領域である海底下約 1,000 m までの地下構造を把握することができました。これにより、これまで探査が困難であった浅海域の地下構造のより詳細な情報を入手することが可能となりました。また、深部の地下水流動解析結果の検証データを取得するために、浜里地区に設置されている調査孔の深度 350 m までの地下温度を測定しました。その結果、本測定により得られた地下温度プロファイルから、当該地域の地下深部の地下水の流れが非常に遅いことを確認することができました。この結果は、地下水流動解析の結果と整合しており、このことから、原位置データである地下温度プロファイルにより解析結果が妥当であることを確認できました。

7. 令和2年度以降の必須の課題への対応に必要なデータ取得

令和2年度以降、人工バリア性能確認試験や物質移行試験などの処分システムの設計・施工や安全評価に関わる基礎情報、例えば、岩盤の水の流れやすさや岩石の鉱物組成や化学組成、地下水の pH や酸化還元電位^{*}、化学組成などのデータの取得などについては、令和2年度以降の必須の課題への対応に必要であることから、引き続き必要最低限のデータを取得し、処分システムの設計・施工や安全評価に関する研究を行う試験場所の地質環境特性を明確にし、それらの手法の評価に用いることとなります。なお、処分システムの設計・施工手法や安全評価手法の信頼性を確認するために必要となるデータが取得できているかを含めて評価することが必要であるため、計測手法の妥当性を確認し、必要に応じて調査技術・機器の改良を行います。

(1) 岩盤の水理

岩盤の水理に関しては、坑道掘削後の地質環境の変化を把握するため、地上から掘削された既存のボーリング孔での水圧観測を行っています（図4参照）。令和5年度は、地下施設近傍のHDB-6孔（図3参照）における水圧観測を継続しました。図64に、平成31年（令和元年）度から令和6年3月までの水圧観測結果を示します。深度369 mの観測区間における水圧の一時的な上昇（図64の①と②）は、令和4年度にも報告したように⁽⁹⁾、宗谷地方北部を震源とする地震（どちらも幌延町は震度4）に伴う水圧上昇です。令和元年の水圧上昇（図64の①）は約2年半で元の水圧に戻りましたが、令和4年の水圧上昇（図64の②）は約2年が経過した現在も低下を続けています。

令和5年度は、9月に東立坑の深度380 m以深の掘削が再開されました（図64の③）が、深度380 m以深は岩盤の透水性が低いため、この深度に坑道を掘削しても坑道内への地下水の湧水量は大きく増加しないと想定されます⁽⁴⁵⁾。この想定に基づくと、HDB-6孔の各観測区間の水圧は、深度380 m以深の坑道掘削の影響をほとんど受けないと予測されます⁽⁴⁵⁾。令和5年度までの観測結果は、この予測と調和的です。今後も、坑道掘削による地質環境の変化を把握するため、水圧観測を継続します。