

図 24 地下施設建設時の地下施設周辺のボーリング孔（HDB-6 孔および PB-V01 孔）での水圧変化から数値解析により推定された各地層の数 m～数十 m 以上のスケールで見た場合の透水性⁽²⁾

図中の No. は HDB-6 孔および PB-V01 孔の稚内層における長期水圧観測点を示します。HDB-6 孔は本断面図上から 164 m 離れた場所に位置していますが、本断面図上に垂直投影しています。斜線で示す遷移領域は断層/割れ目の水理的連結性が浅部のよい領域から深部の乏しい領域にかけて遷移的に変化する領域を表します。遷移帯上部、遷移帯下部、および全部と表記した領域は岩石の鉱物組成や硬さに基づく地質学的な領域区分を表します。

令和 5 年度は、水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備や、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、過年度に実施した水圧擾乱試験の結果の解析や、DI と断層/割れ目の水理的連結性の関係（図 25）に関する解析を令和 4 年度までの検討結果を踏まえて行います。

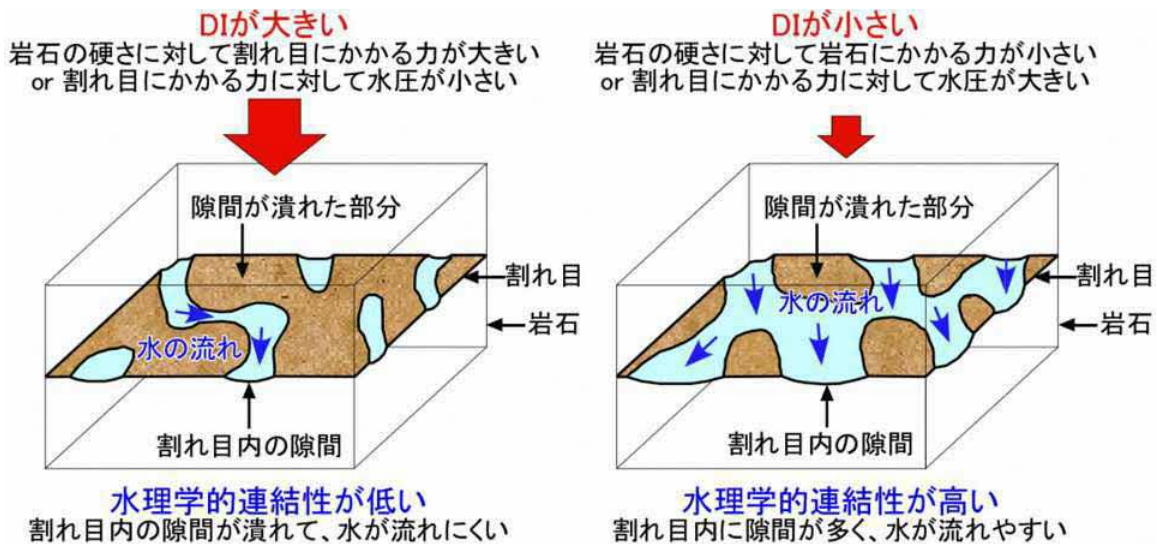


図 25 DI と割れ目の水理的連結性の関係^(18、19)

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、このような地下水の流れが非常に遅い領域を調査してモデル化する技術の実証を行います。具体的には、化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証、広域スケール(十数 km×十数 km)を対象とした水理・物質移行評価手法の検証(地下水滞留時間評価)のための水理解析、塩濃度分布評価のための水理・物質移行解析を行います。

この研究課題で整備される技術は、処分事業のサイト選定において、地質環境に求められる要件の 1 つとして挙げられている「放射性物質の移行を抑制する緩慢な地下水流動の水理場であること」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

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化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証では、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・物質移動解析では、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(古水理地質学的変遷)が、化石海水の三次元分布におよ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について検討します。これら①～③を実施することにより、地下水の流れが非常に遅い領域を調査・評価する技術を整備します。

令和4年度は、①化石海水領域の調査・評価技術の検証については、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推定結果の妥当性を確認するために、令和3年度に引き続きボーリング調査を実施しました。具体的には、令和3年度に深度200 mまで掘削したHFB-1孔を深度500 mまで延長しました。地下水が化石海水であるかどうかを判断する直接的な指標は、地下水の塩化物イオン濃度、酸素・水素同位体比です。電磁探査の結果から得られる比抵抗は、地下水の塩化物イオン濃度と相関性があり、塩化物イオン濃度が低い場合に比抵抗が高く、塩化物イオン濃度が高い場合には比抵抗が低くなります。すなわち、比抵抗が低い領域が化石海水の分布する領域と推定されます。電磁探査の結果、探査範囲の南西側では低い比抵抗の領域が深度約100 m以深に分布し、一方、北東側では深度約400 m以深に分布しており(図26)、これに対応して、

化石海水が分布すると推定しました。これに対して、HFB-1 孔の調査地点は、この南西側の深度 100 m 以深に広がる低い比抵抗領域の端に位置しており（図 26）、どの深度から化石海水が出現するのか不確実性が大きい地点です。そこで、HFB-1 孔の掘削により、深度 500 m までの岩石コアを採取し、その間隙に含まれる地下水の水質・同位体データを取得しました。その結果、HFB-1 孔の塩化物イオン濃度は、深度約 100 m までは、深度とともに上昇するものの、深度約 100 m から 340 m までは概ね一定の値で推移し、深度約 340 m 以深で再び上昇する傾向がみられました（図 27(a)）。酸素・水素同位体比も塩化物イオン濃度と同様の傾向がみられ、酸素同位体比は 0‰*以上を化石海水の目安とした場合、深度約 400 m 以深から化石海水と判断できます（図 27(b)、(c)）。例えば、既存孔である HDB-5 孔（図 3 参照）のように、電磁探査の結果から明らかに深度約 400 m から化石海水が出現すると推定される地点（図 26）では、その深度まで化石海水の特徴に変化する様子は認められません（図 27）。一方、HFB-1 孔の深度約 100 m から 400 m の間において、地下水の塩化物イオン濃度や酸素・水素同位体比が化石海水の特徴に近づく様子は、化石海水が分布する領域の境界に近いことを表しています。このことは、HFB-1 孔の調査地点で化石海水の出現深度が大きく変化すると推定したことと一致します。以上のことから、令和 2 年度に適用した電磁探査の仕様や手順が地下水の流れが非常に遅い領域であると推定される化石海水が分布する領域の三次元分布を把握する調査技術として有効であることが実証できました。

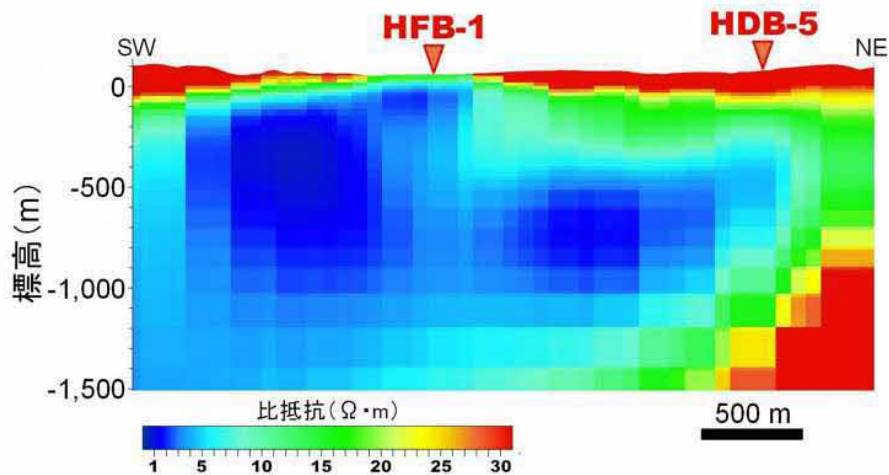


図 26 令和 2 年度の電磁探査で得られた比抵抗分布（99 測点、拘束なしの解析結果、HFB-1 孔および HDB-5 孔を通過する鉛直断面図）⁽⁸⁾

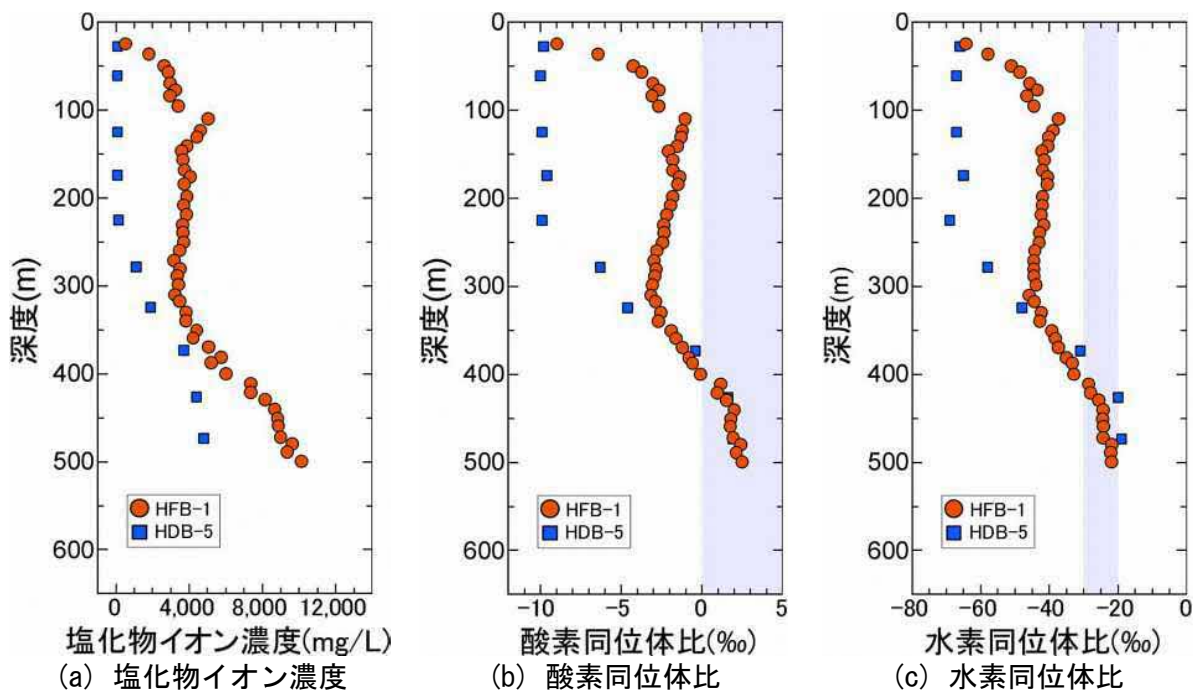


図 27 ボーリング調査から得られた塩化物イオン濃度、酸素・水素同位体比の深度分布

岩石コアからの圧縮抽出水の塩化物イオン濃度と酸素・水素同位体比の分析結果を示しています。酸素・水素同位体比の水色の領域は、化石海水の目安となる値を示しています。

②化石海水領域の三次元分布に係る調査・評価手法の検証については、ボーリング調査で取得した水質・同位体データを用いて地球統計学的解析を実施し、限られたボーリング調査データから良好な精度で酸素同位体比の三次元分布を推定できるボーリング調査地点の選定方法を検討し

ました。その際、電磁探査による比抵抗の値が酸素同位体比と相関するという特徴を利用した地球統計学的解析を適用しました。既往のボーリング孔（HDB-1 孔、HDB-3 孔～HDB-11 孔）と上述の HFB-1 孔の全 11 孔の調査結果から、任意の 1～3 孔のボーリング調査データを選択した複数のケースについて、酸素同位体比の三次元分布を推定しました。その結果、電磁探査によって得られた三次元比抵抗分布から幅広い比抵抗値を網羅できるボーリング調査地点を選択した場合に、2 孔だけの選択でも全 11 孔のデータを用いた場合と類似した推定結果が得られました。以上のことから、限られた数のボーリング調査であっても、電磁探査の結果に基づいてボーリング調査地点を選定すれば、妥当な推定結果を得られることを実証しました。

以上の①と②の結果を踏まえ、物理探査およびボーリング調査によるデータ取得から地球統計学的解析による化石海水領域の三次元分布の推定に至る一連の手法を整理しました。

③広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の検証については、令和 3 年度に引き続き、広域スケールの地下水流動解析を実施する上で考慮すべき化石海水領域の分布に影響する古水理地質学的変遷（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）に関する因子を抽出するために、過去 100 万年前から現在までの地形や海水準（陸地に対する海面の相対的な高さ）、涵養量（天水や地表水が地下に浸透して地下水として加わる水の量）などの長期的時間変化を考慮した地下水流動解析を実施しました。解析では、過去 100 万年間の地形や海水準・涵養量の変化の他に、塩水と淡水の密度差に起因した密度流の影響や地下深部で観測されている異常間隙圧（静水圧を超える地下水の圧力）の影響を調べました。その結果、地層の隆起・侵食により約 30 万年前から現在にかけて宗谷丘陵部が形成されるにつれて、地下浅部と深部で異なる地下水の流れが形成されていた可能性が分かりました。これは、地層の代表的な透水性を岩盤にかかる圧力と岩盤の硬さで予測できるとしたこれまでの成果⁽¹⁴⁾を解析モデルに反映したことによると考えられました。比較的透水性の高い稚内層浅部以浅の領域では、地表から涵養された天水がゆっくりと流れ、再び地表へと流出する地下水の流れ

が解析により確認されました。一方で、比較的透水性の低い稚内層深部には地表から涵養された天水を起源とする地下水の流れはほとんど到達せず、当該深度の地下水の流れが非常に遅いことが確認されました。この結果は、化石海水の分布領域の多くが稚内層深部以深であることと整合しています。

令和 5 年度は、これまでに得られた成果の論文投稿や研究開発報告書類の整備に取り組みます。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物理探査を行います。その際、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実施します。さらに、浜里地区などにおいて、既存ボーリング孔からの地下水の採水や水文地質データの取得を行います。

6.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

令和 2 年度以降は、地殻変動による緩衝材や坑道埋め戻し材の掘削損傷領域への自己治癒能力の実証が課題となります。そのため、ひび割れに対する自己治癒能力の実証を行います。具体的には、緩衝材や坑道埋め戻し材が掘削損傷領域の力学的・水理学的な緩衝能力（自己治癒能力）に与える影響を把握する解析手法の開発を行います。

令和 4 年度は、坑道埋め戻し後の緩衝材や坑道埋め戻し材の膨潤が掘削損傷領域の透水性に与える影響の評価手法の構築を目的に、掘削損傷領域の割れ目を対象とした既往の注水試験のデータ解析を行いました。図 28 の H4-1 孔および H4-3 孔の区間 2 で実施した段階注水試験のデータを解析した結果、試験中の割れ目の透水性は概ね図 29 の予測値の曲線（黒実線で表記；黒破線は $\pm 2\sigma$ の誤差を表す）に沿って変化し（図 29 の○と□）、同試験で行ったシミュレーションにおいても概ね予測値の曲線に沿って透水性が変化することを確認することができました（図 29 の赤曲線）。さらに、図 28 の他の区間で実施した通常の注水試験においても、得られた透水性が予測値の範囲（ $\pm 2\sigma$ ）に収まることを確認することができました（図 29 の◇）。

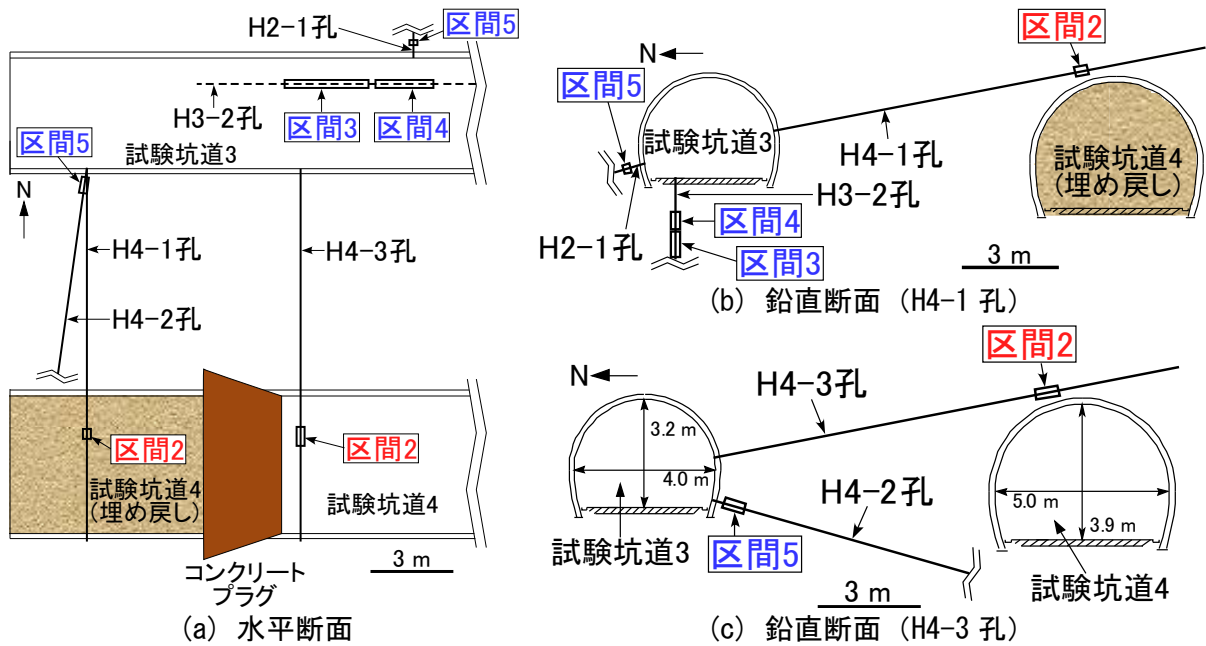


図 28 試験坑道 3 および試験坑道 4 の掘削損傷領域の割れ目を対象に実施した注水試験区間 (4, 5)

段階注水試験を実施した区間を赤字、通常の注水試験を実施した区間を青字で示します。

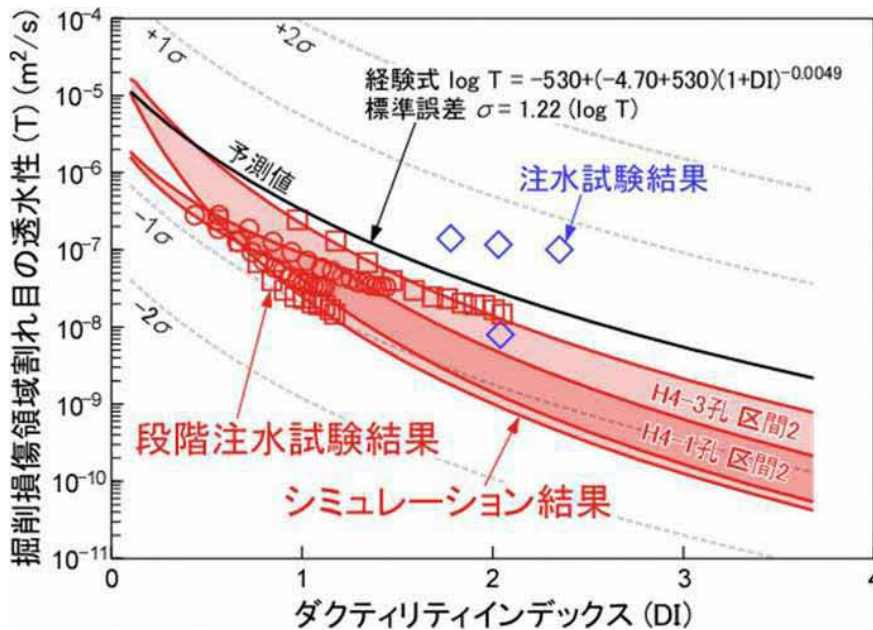


図 29 注水試験結果と DI モデルの比較

図 28 の赤字で示す H4-1 孔と H4-3 孔の区間 2 を対象とした段階注水試験結果 (○が H4-1 孔で□が H4-3 孔) とその結果に基づくシミュレーション結果 (赤い曲線) は参考文献 (4) に、青字で示すその他の区間を対象とした注水試験結果 (◇) は参考文献 (5) に、そして黒の曲線で示す予測値 (実線が対数平均値、破線が誤差 $\pm 2\sigma$) は参考文献 (1) に基づきます。段階注水試験とそのシミュレーションの結果は、割れ目面に垂直にかかる力と割れ目に平均的にかかる力の比の推定誤差を考慮しており、DI の値に幅を持たせています (薄い赤色の範囲)。

図 29 の予測値の曲線は、国内外の様々な堆積岩や結晶質岩中のボーリング孔の断層交差部で確認された地下水の主要な水みち割れ目の透水性と DI の関係を表しており⁽¹⁾、掘削損傷領域の割れ目の透水性の予測にも適用できると考えられます⁽⁵⁾。すなわち、地層中の天然の割れ目と掘削損傷領域の割れ目はそれぞれ形成過程が異なりますが、いずれの場合も、割れ目が充填物などによって閉塞されていない限り、その透水性は岩石にかかる力、岩石の硬さ、そして割れ目のかみ合わせの程度によって決まります^(1, 20)。岩石にかかる力と岩石の硬さは地層中の天然の割れ目も掘削損傷領域の割れ目も DI により表現することが可能です。割れ目のかみ合わせの程度は割れ目の初期開口幅（割れ目面に垂直にかかる力が無視できるほど小さい時の開口幅）で数値化することが可能で（割れ目のかみ合わせが悪いほど初期開口幅が大きい）⁽¹⁾、掘削損傷領域の割れ目の初期開口幅は天然割れ目の初期開口幅の範囲内に収まることが分かっています^(4, 21)。したがって、図 29 の予測値の曲線は掘削損傷領域割れ目の透水性の予測にも適用できます。

図 29 に示すように、予測値の曲線と今回行った段階注水試験（あるいは注水試験）の結果が整合するということは、予測値の曲線が緩衝材や埋め戻し材の膨潤に伴う掘削損傷領域の透水性変化の推定に適用可能であることを示しています。掘削損傷領域の透水性の変化は、次のように推定できると考えられます。例えば、緩衝材や埋め戻し材で 0.9 MPa の膨潤圧が発生し^{例えば(8)}、この力が直接、掘削損傷領域に作用すると仮定した場合、緩衝材や埋め戻し材に最も近い場所の掘削損傷領域の DI が最大で 0.3 増加します（岩石の引張強度が 1.8 MPa で、処分孔もしくは坑道の延長方向に平行な力が最も大きいと仮定した場合）。膨潤が発生する前の DI が 0.1~1.5 の範囲の値である場合、DI の曲線の傾き（図 29）により、DI が 0.3 増加するとその場所の割れ目の透水性は 1/4~1/2 まで低下することが推定されます。緩衝材や埋め戻し材に最も近い場所の透水性は一般に掘削損傷領域の中で最も割れ目の開口幅が大きく^{例えば(21)}、割れ目の本数も多い場所に相当することから^{例えば(5)}、掘削損傷領域の透水性を実質的に支配する場所と考えられます。したがって、この場所の透水性が 1/4~1/2 まで低下することは掘削損傷領域の透水性も同程度低下するこ

とを意味します。緩衝材や埋め戻し材の膨潤による掘削損傷領域の透水性の変化は、このように DI の変化と図 29 の予測値の曲線から見積もることができ、予測値の曲線の信頼性あるいは適用性は今回実施したような段階注水試験（あるいは注水試験）を行うことで確認することができます。

図 29 に示す予測値の曲線は膨大な試験データとシミュレーション結果から導き出される透水性と DI の間の平均的な関係を表すものであるため、図 29 の予測値の曲線に基づく透水性の変化の推定は、その変化の幅の期待値を推定することになります。掘削損傷領域の個々の割れ目について、その位置や諸特性が特定できる場合は、以下の式⁽¹⁾を掘削損傷領域の個々の割れ目に適用することにより、掘削損傷領域の透水性の変化を具体的に推定することも可能です。

$$e = E^2 / JRC_0^{2.5} \quad (\text{この式の } e \text{ と } E \text{ の単位は } \mu\text{m}、e > E \text{ となる場合は } e = E \text{ とします})$$
$$E = E_0(1 + bDI/0.2899)^{-1}$$

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（割れ目面に垂直にかかる力が無視できるほど小さい時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。これらの諸特性は段階注水試験やボーリングコア観察、孔壁観察を行うことにより推定可能であり^(1, 4)、個々の割れ目の透水性の変化量は図 29 のシミュレーション結果に示すように推定することができます。このような個々の割れ目の透水性の変化量を足し合わせることで、掘削損傷領域の透水性の変化量を求めることができます。

坑道埋め戻し後の掘削損傷領域の透水性は緩衝材や埋め戻し材の膨潤によって DI の増加とともに低下する可能性があるほか、掘削損傷領域の割れ目がずれることにより増加する可能性もあります。図 29 の予測値はこのような可能性を既に考慮した値となっており、割れ目のずれによって図 29 の予測値を有意に上回る可能性は低いと考えられますが^(1, 20)、割れ目のずれが透水性に与える影響を原位置で確かめる方法として、令和 3

年度に掘削損傷領域割れ目を対象とした樹脂注入試験⁽²¹⁾の適用性を確認しました。この試験で既に生じている割れ目のずれ幅と開口幅の関係を直接観察することにより、割れ目のずれが開口幅（透水性）に与える影響を評価することができます。試験坑道3（図 28 参照）で実施した既往の試験結果を検討した結果、割れ目のずれ幅の増加に伴う開口幅の変化はほとんど確認されませんでした。このことはシミュレーションでも確認することができました。したがって、今後、割れ目がずれたとしても開口幅（透水性）は増加しないと推定できます⁽²¹⁾。掘削損傷領域の割れ目のずれが開口幅（透水性）に与える影響は、このように掘削損傷領域割れ目を対象とした樹脂注入試験を行うことにより評価することが可能です。

令和2年度から3年間にわたり、坑道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤が掘削損傷領域の透水性に与える影響の評価手法を構築するために、既往の試験結果を用いた机上検討を行ってきました。その結果、坑道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤による掘削損傷領域の透水性の変化は、推定されるDIの変化と図 29 に示す予測値の曲線⁽¹⁾から見積もることができ⁽⁵⁾、この曲線の信頼性あるいは適用性は掘削損傷領域の割れ目を対象とした段階注水試験⁽⁴⁾や樹脂注入試験⁽²¹⁾を行うことにより確認できることが分かりました。掘削損傷領域の透水性の変化は、個々の割れ目の透水性の変化量を参考文献(4)や参考文献(21)で行ったシミュレーションの方法により評価し、それらを足し合わせることで推定することも可能です。これらにより、坑道埋め戻し後の緩衝材や埋め戻し材の膨潤が掘削損傷領域の透水性に与える影響を評価する手法を整備することができ、所期の目標を達成することができました。

今後は、参考資料の令和2年度以降の研究工程に示すとおり、「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」を実施する中で、情報の不足などがあつた場合に追加で試験や解析を実施します。

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なことから、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。

令和 4 年度におけるデータ取得例として、350m 調査坑道に設置している水圧・水質モニタリング装置を用いて取得された物理化学パラメータ（pH や酸化還元電位、圧力など）のモニタリング結果を示します。地下水の pH や酸化還元電位などの物理化学パラメータについては、大気中の酸素との接触や圧力の低下などの影響を低減させた原位置の地下水の値を取得する必要があるため、令和 2 年度以降も水圧・水質のモニタリングを継続しています。ここでは人工バリア性能確認試験の試験箇所周辺のボーリング孔に設置した水圧・水質モニタリング装置から得られた地下水圧のモニタリング結果を示します（図 30）。水圧については、採水やメンテナンスに伴う変化を除き、大きな変動はみられませんでした。

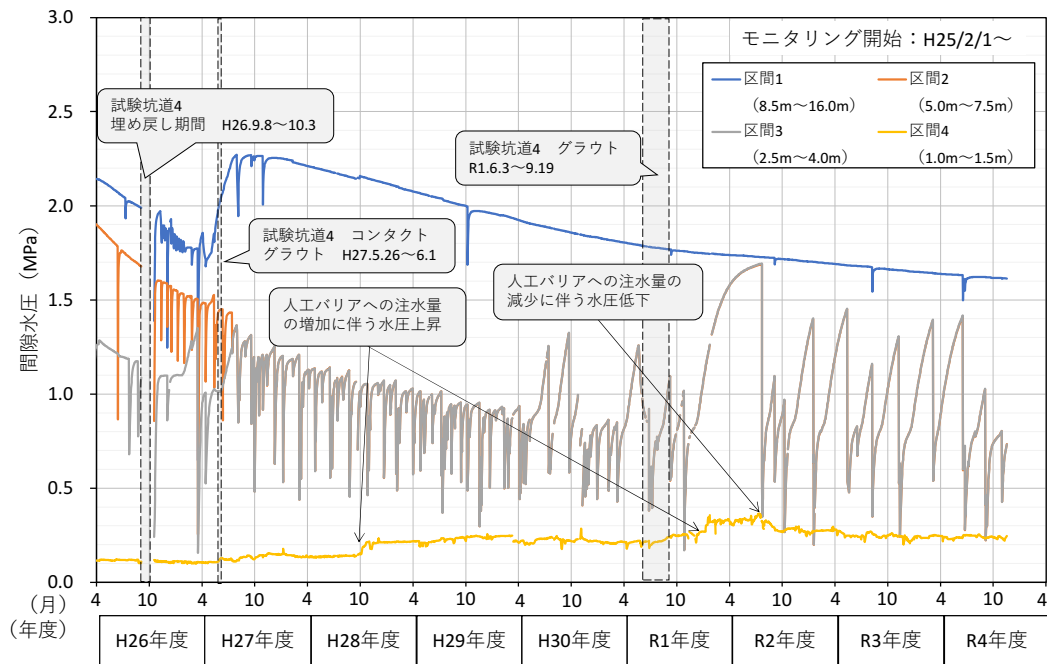


図 30 人工バリア性能確認試験の試験箇所周辺のボーリング孔 (13-350-C08 孔) における水圧の経時変化

令和5年度は、地質環境特性データとして、既存のボーリング孔や140m、250m および 350m 調査坑道を利用した地質構造・岩盤の水理・地下水の地球化学・岩盤力学に係るデータ取得などを継続するとともに、掘削工事に伴い取得されるデータについても活用します。地質構造に関しては、ボーリング調査や坑道掘削時の壁面観察で得られた地質データに基づいた地層および割れ目の空間的分布に関する特徴の整理を継続します。また、令和2年度以降の必須の課題の目的に応じて、地質構造や水理の特徴を踏まえた水理地質構造モデル^{*}を構築します。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います。地下水の地球化学に関しては、既存のボーリング孔を対象に地下水の採水調査を行うとともに、地下水の水質分布や水質の時間的な変化を把握します。また、坑道掘削の影響については、地表や坑道に設置した高精度傾斜計^{*}および坑道に設置した地中変位計などを用いて、岩盤の微小な変形の観測を継続します。さらに、地震に伴う地質環境特性の変化に関わるデータ取得のため、上幌延観測点 (HDB-2) と地下施設での地震観測を継続します。

9. 環境調査

地下施設からの排水などの水質調査および研究所用地周辺の環境影響調査を実施します。

9.1 排水量および水質調査

排水処理設備から天塩川へ放流している排水量について監視を行うとともに、排水処理前後の水質、天塩川の水質、浄化槽排水の水質について調査を行います。また、掘削土（ズリ）置場の環境への影響を監視するため、清水川および掘削土（ズリ）置場周辺の地下水についても水質調査を行います（図 31）。



(a) 天塩川の水質調査



(b) 掘削土（ズリ）置場周辺での水質調査

図 31 水質調査の様子

9.2 研究所用地周辺の環境影響調査

研究所用地周辺の環境影響調査として、清水川の水質および魚類を対象に調査を実施します（図 32）。



(a) 清水川の水質調査



(b) 清水川の魚類調査

図 32 環境影響調査の様子

10. 安全確保の取り組み

調査研究に関わる作業の実施にあたっては、安全確保を最優先とした取り組みを行います。具体的には、作業計画時における安全対策の確認を徹底するとともに、作業者に対する安全教育や訓練の実施、定期的な安全パトロールなどを通じて安全確保に努めます（図 33）。



図 33 安全パトロールの様子

11. 開かれた研究

幌延深地層研究計画で実施する地下深部を対象とした研究は、地球科学の幅広い分野にわたり、学術研究の発展にも寄与します。このため、国内外の大学・研究機関との研究協力を積極的に行うとともに、国際交流施設^{*}などを利用して国内外の専門家と意見・情報交換を行いながら、研究を進めていきます。また、幌延深地層研究センターの施設や研究フィールドを、国内外の関連する研究機関に広く開放していきます。

経済産業省資源エネルギー庁などが進めるプロジェクトなどに協力していきます。研究開発を進めるにあたっては、当初の計画の研究対象の範囲内において、国内外の機関との協力を進めます。

地層処分や研究開発に関する国民との相互理解を促進するため、幌延深地層研究センターのホームページ^{*15}での情報発信、ゆめ地創館^{*}における地下深部での研究の紹介および地下施設の見学会などによる研究施設の公開を進めていきます。また、令和2年度から幌延町広報誌「ほろのべの窓」の誌面をお借りして毎月連載している、研究内容を紹介する記事については、令和5年度も継続して行います。

11.1 国内機関との研究協力

○北海道科学大学

AI技術を活用した画像認識による坑道壁面の地質判読に関する研究

○東京大学

地下研究施設原位置における核種移行への有機物影響に関する研究
微生物を指標とした堆積岩中の水みち調査手法の開発

○名古屋大学

炭酸カルシウムのコンクリーション化による地下空洞掘削影響領域
および水みち割れ目の自己シーリングに関する研究

*15 : 幌延深地層研究センターホームページ ; <https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/>

- 京都大学
水質形成機構のモデル構築および数値解析に関する共同研究
- 京都大学、東北大学
地下水中の微量元素と有機物を対象とした地球化学研究
- 幌延地圏環境研究所*16
堆積岩を対象とした岩盤力学や微生物などに関する研究
- 産業技術総合研究所
海陸連続三次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータ取得手法の高度化
- 電力中央研究所*17
地下微生物とニアフィールド構成材料の相互作用に関する研究
実地下水中のコロイドへの核種の収脱着メカニズムに関する研究
(原子力機構 核燃料サイクル工学研究所が実施する共同研究への協力)
- 原子力規制庁
放射性廃棄物処分坑道の閉鎖措置確認に向けた掘削損傷領域およびベントナイトの透水性に関する研究 (原子力機構 安全研究センターが実施する共同研究への協力)
- 深田地質研究所、東京大学
断層中のメタンガス高精度検出に関する共同研究 (原子力機構 東濃地科学センターが実施する共同研究への協力)
- 大林組
光式 AE 計測を用いた坑道周辺のモニタリングに関する研究

上記のほか、他の大学や研究機関などとの研究協力を進めます。また、原子力や地層処分に関する人材育成のための講習やトレーニングの企画に協力します (図 34)。

*16：幌延地圏環境研究所は、公益財団法人北海道科学技術総合振興センターが設置した研究所であり、国の補助を受けて、幌延深地層研究センターの施設や設備を活用した地下空間利用を中心とする研究を実施しています。

*17：一般財団法人電力中央研究所は、電力技術の専門研究機関として設立されました。電力技術の研究として、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発を実施しています。



図 34 国際原子力人材育成イニシアティブ事業^{*}での実習の様子

11.2 国外機関との研究協力

○幌延国際共同プロジェクト (Horonobe International Project : HIP)

令和2年度以降の必須の課題のうち、実際の地質環境における人工バリアの適用性確認および処分概念オプションの実証に関わる以下の3つのタスクを設定しています。

タスク A : 物質移行試験

タスク B : 処分技術の実証と体系化

タスク C : 実規模の人工バリアシステム解体試験

具体的には、参加機関による管理委員会を開催するとともに、タスク A では、250m 西立坑側第 1 ボーリング横坑 (図 5 参照) から掘削したボーリング孔を利用し、声問層を対象とした物質移行モデルの構築に必要な水理地質構造などに関する情報を取得します。タスク B では、500m 調査坑道における試験に先立ち、断層/割れ目からの湧水や掘削損傷領域の発達に関する既存情報の収集・整理を行い、500m 調査坑道において想定される状況などについて検討します。また、廃棄体・人工バリアの定置、坑道の閉鎖、廃棄体の回収など、一連の操業技術の実証に向けて関連情報の調査・整理や要素技術の試験などを行います。タスク C では、人工バリア性能確認試験でこれまで取得してきた

情報をもとに、解体調査で取得する試料の配置や分析方法など、解体調査の詳細化に向けた検討を行います。

○DECOVALEX

人工バリア性能確認試験で取得中の原位置データや同試験に関わる室内試験データを対象とした共同解析、解析結果に関する情報交換など

○モンテリ・プロジェクト^{*18}（スイス）

オパリナス粘土層の摩擦特性試験など

○クレイクラブ（Clay Club）^{*19}

様々な粘土質媒体の特性の比較、粘土の物性や挙動および地下施設で実施される試験に関する情報交換など

○環太平洋地域における地下研究施設（URL）を活用した国際協力

各機関が課題とするテーマについて情報交換、解析技術の検討など

上記の他、国外の研究機関などとの研究協力や地下施設における原位置試験などに関わる情報交換を進めます。また、韓国の研究者を対象として、地下施設で行っている調査研究の体験を目的とした実務トレーニングを行います。

*18：堆積岩を対象とした地層処分研究に関する国際的な原位置試験プロジェクトです。スイスのモンテリ・トンネル内において地層処分に関連する各種の原位置試験が実施されています。

*19：Clay Clubは、経済協力開発機構/原子力機関（OECD/NEA）の放射性廃棄物管理委員会の下に置かれたプロジェクトの1つです。地層処分の実施・規制・研究機関を中心とした組織であり、様々な粘土質媒体の特性の比較や粘土の物性や挙動および、地下施設で実施される試験に関する技術的かつ科学的情報の交換、さらには、サイト特性調査技術の詳細な評価を実施しています。

12. 用語集

【英数字】

DECOVALEX (デコバレックス)

DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments (連成モデルの開発とその実験結果との検証) の略称で、地層処分システムの性能評価において重要な課題の 1 つである熱-水理-力学-化学連成挙動モデルの開発・確証を目的とした国際共同研究です。

HotBENT (ホットベント)

High Temperature Effects on Bentonite Buffers (ベントナイトへの高温の影響) の略称で、150°Cを超える高温がベントナイトの緩衝材としての機能に与える影響を評価するための原位置人工バリア試験です。スイスのグリムゼル試験場で実施されています。

‰ (パーミル)

1,000 分の 1 を 1 とする単位で千分率とも呼ばれます。1‰=0.001 (0.1%) です。

PFI

Private Finance Initiative (民間資金等活用事業) の略称です。公共施設などの建設、維持管理、運営などを民間の資金、経営能力、技術的能力を活用することで、国や地方公共団体などが直接実施するよりも効率的かつ効果的に事業を実施するための方策です。

【か行】

解析コード

連成現象をモデル化し、コンピュータを用いて温度や間隙水圧などの評価項目の挙動を解析する手段のことです。

回収可能性

地層処分において、処分坑道に放射性廃棄物を埋設した後においても、処分場の閉鎖までの間に何らかの理由でその取り出しが望まれた場合

に、それを取り出し、搬出する一連の行為が実現可能であることを言います。

回収方法

地層処分において、処分坑道に放射性廃棄物を埋設した後においても、何らかの理由でその搬出が望まれた場合にそれを搬出することを回収と言います。その回収方法として、機械的方法や高水圧などを利用して埋め戻し材を除去する方法が想定されています。

化石海水

地層の堆積時に地層中に取り込まれた海水が地質学的な長い時間をかけて変質した古海水のことです。化石海水が存在する場所は、地下水の流れが非常に遅いと考えられ、物質の移動が非常に遅く地層処分に適した場所と考えられます。

カルサイト

方解石とも呼ばれる鉱物の一種で、炭酸カルシウム (CaCO_3) からなる結晶です。

乾燥密度

乾燥密度とは、ある体積に含まれる土粒子のみの質量を考えた場合の密度のことを言います。

希土類元素

希土類元素は、原子番号 21 のスカンジウム (Sc) と 39 のイットリウム (Y) に、原子番号 57 のランタン (La) から 71 のルテチウム (Lu) までの 15 元素を合わせた 17 元素の総称です。レアアースとも呼ばれます。希土類元素は、高レベル放射性廃棄物に含まれるウランなどと同様の化学的性質を示すことから、希土類元素を使用した試験を行うことで、高レベル放射性廃棄物に含まれる元素の移行挙動などを知ることができます。

掘削損傷領域

岩盤が掘削により損傷し、初期の性質から変化する領域のことで、坑道の周りに形成されます。具体的には、地下空洞掘削時の周辺岩盤に生じる応力集中の影響で坑道周辺岩盤に割れ目が発達することにより、岩

盤の変形特性の変化や透水性の増大が予想されます。また、空気の侵入により地下水の酸化還元電位などの化学的な変化が生じることが想定されます。なお、掘削損傷領域を含むより広い領域で坑道への地下水排水などにより地下水圧が低下する領域のことを掘削擾乱領域といい、掘削擾乱領域では坑道埋め戻し後、低下した地下水圧が元の状態に回復することが想定されます。掘削損傷領域と掘削擾乱領域は、広義に掘削影響領域と表現されます。

経験式

理論的根拠は明らかではないが、実験や観測などによる実測値から導かれた関係を数式で表したものです。

原位置試験

試料を採取して行う室内試験に対して、実際の地下環境下で行う試験のことです。

減熱過程

人工バリアを構成するガラス固化体は、処分孔に設置した当初は発熱しており、時間の経過とともに発熱量が低下し、温度が下がっていきます。緩衝材の外側は、地下水の浸潤にともなって飽和度が上昇しますが、緩衝材の内側は発熱の影響により飽和度は低下します。温度が下がれば、地下水が緩衝材に入りやすくなり、時間の経過とともに緩衝材の内側まで地下水が浸潤します。このような熱と地下水の浸潤という同時並行的に生じる現象を原位置試験で再現するために、人工バリア性能確認試験では加熱過程、減熱過程の試験を行っています。

高精度傾斜計

通常傾斜計が測定できるのは、3,600分の1°程度であるのに対し、約1億分の6°の傾斜量を計測することができる非常に計測精度の高い傾斜計です。微小な地殻変動を捉えるために用います。

坑道スケール

実際の処分場では、地下深くに多数の坑道が掘削されます。これらの坑道がお互いにどのような影響を及ぼし合うかを検討するために必要な範囲のことを指します。

国際原子力人材育成イニシアティブ事業

文部科学省による原子力分野の幅広い人材育成を目的とした公募事業で、東京工業大学、東北大学、北海道大学などが令和2年度から令和8年度まで実施するものです。

参考

文部科学省

https://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/1419734_00001.htm

令和3年度の実習について（ANEC 北海道大学拠点）

<https://caren.eng.hokudai.ac.jp/anec/event/391/>

国際交流施設

国内外の研究者の交流活動の拠点および地域の皆様との交流を目的とした施設です。

<https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/kokusai/introduction/introduction.html>

コロイド

大きさが1 nm～1 μmの粒子が水などの液体中に浮遊し、容易に沈まない状態を指します。コロイドが地層中の放射性核種の移行に影響を及ぼすことが分かっています。

【さ行】

酸化還元電位

地下水の酸化還元状態を表します。酸化還元電位が低い地下水ほど、含まれる酸素が少なく還元状態であることを表します。

酸素・水素同位体比

水は酸素原子と水素原子からできていますが、水素と酸素の中には重さの異なる原子（同位体）が存在します。重い酸素と軽い酸素の割合を酸素同位体比、重い水素と軽い水素の割合を水素同位体比と言います。

支保（工）

地下空間の安定を保つために設ける、ロックボルト、鉄骨、コンクリートの壁などの構造物です。

収着

地下水中有る元素が、岩盤などに取り込まれる現象です。

処分概念オプション

処分概念オプションとは、地下深くの岩盤中に高レベル放射性廃棄物を埋設するという、地層処分の概念を実現するための色々な方法のことです。例えば、廃棄体や人工バリアを豎置きにするのか横置きにするのか、人工バリアの1つである緩衝材をブロックで積み上げるのか現場で固めるのか、といった処分方法、埋め戻し方法の違いおよび搬送定置・回収方法などについての選択肢のことを指します。

シリカセメンテーション

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。

人工バリア

ガラス固化体、オーバーパックおよび緩衝材からなる地層処分システムの構成要素のことで、高レベル放射性廃棄物が人間の生活環境に影響を及ぼさないようにする障壁として、人工的に形成するものです。

水圧擾乱試験

注水により断層内の水圧を上昇させ断層をずらす試験のことです。試験の前後で断層の水理特性に与える影響を確認します。

水理学的連結性

地下水の流れを評価する上で、断層や割れ目の中の隙間のつながり具合を水理学的連結性といいます。岩盤の中には、大小さまざまな断層や割れ目が存在し、これらは独立して存在したり、他とつながって存在したりします。岩盤の中での地下水の流路は、断層や割れ目内の隙間が主なものですが、隙間が広くつながっており、流路として機能する場合には、水理学的連結性が高いと表現します。一方、断層や割れ目内の隙間が一部でしかつながっておらず、地下水の流路としては機能しない場合には、水理学的連結性が低いと表現します。

水理地質構造モデル

地質構造の分布や形状に合わせて透水係数などの水理的なデータを与えて、岩盤の水理特性を二次元的または三次元的な図や数式などを用いて表現したものです。

【た行】

堆積岩の緩衝能力

地殻変動（隆起侵食）や地震動の影響により擾乱を受けた断層や割れ目の透水特性が一定の範囲に留まろうとする能力、あるいは時間経過とともに元の状態に戻ろうとする能力のことです。

ダクティリティインデックス (DI)

岩石の強度・応力状態を示すために新たに定義した指標であり、この値が高いほど、岩石は見かけ上、やわらかくなります。岩盤にかかる平均有効応力（岩石に実際にかかる平均的な負荷応力）をその健岩部の引張強度（岩石の引っ張り破壊に対する強度）で除した値で定義されます。

多相流解析

岩盤中を流れる流体の流動シミュレーションにおいて、水の流れだけではなく、空気や蒸気などの気相の流動も考慮した解析のことです。

弾性波

ここでは、岩盤の中を伝わる振動のことを指します。地震など自然に発生する振動や、人工的に岩盤を叩くなどして人工的に与えた振動が伝わる速度を弾性波速度と呼び、岩盤の状態によって変化します。そのため、様々な場所での弾性波速度の分布を調べることで坑道周辺の岩盤の状態を知ることができます。

中性化

大気中の二酸化炭素とコンクリート中の水酸化カルシウムなどの成分が反応し、コンクリート中の細孔溶液の pH が低下する現象です。中性化が進むとコンクリート中の鉄筋が腐食しやすくなり、鉄筋が腐食することでコンクリートのひび割れなどが発生し、コンクリート構造物の劣化が進みます。

電磁探査

電磁波を利用して、対象となる岩盤などの電気的特性を観測し、その性質・状態を推定する調査手法です。

透水性

岩盤の水の通り易さのことです。透水性を表す指標として、透水係数 が用いられます。透水係数： k は、以下の式で定義され、単位は長さ/時間 (m/s) となります。

$$Q=kAh/l$$

ここで、 Q ：流量 (m^3/s)、 A ：断面積 (m^2)、 h ：水頭差 (m)、 l ：長さ (m) を表します。

トモグラフィ

トモグラフィ調査は、調査対象の範囲内の物性値(速度、比抵抗など)の分布を断面として可視化する物理探査手法です。

トレーサー

地下水中に溶存する物質が地層中を移行する際の経路や収着・拡散といった挙動などを調査するために、地下水に添加する物質をトレーサーと呼びます。幌延深地層研究計画では、トレーサーとしてウラニン(蛍光染料)やヨウ素などを用いています。これらは、いずれも放射性物質ではありません。なお、幌延深地層研究計画では放射性のトレーサーを用いた試験を行うことはありません。

【な行】

熱－水理－力学－化学連成現象

地下環境に設置された廃棄体の周辺の緩衝材や岩盤で、廃棄体からの熱、地下水の流れ、緩衝材が膨潤することによって発生する応力や岩盤に作用する応力、地下水と鉱物の反応などによる化学的な変化などが複合的に生じる現象です。

【は行】

暴露試験

材料および製品を特定の環境に暴露し、その環境における材料や製品の化学的性質・物理的性質および性能の変化を調査する試験です。

必須の課題

幌延深地層研究センターでは、地層処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化に向けた基盤的な研究開発を行っています。平成 26 年度に、それまでの研究成果を踏まえて「必須の課題」を設定し、これらの課題を解決すべく、研究に取り組んできました。これらの研究課題に関して令和元年度に研究成果の評価を行い、この「必須の課題」の中で引き続き研究が必要とされたものについて、令和 10 年度までを研究期間として研究に取り組んでいます。

「令和 2 年度以降の幌延深地層研究計画」では、以下の 3 つを研究課題として取り組むこととしており、これらを「必須の課題」と呼んでいます。

- ・ 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認
- ・ 処分概念オプションの実証
- ・ 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

ピットスケール

廃棄体および人工バリアを垂直に設置する、豎置き方式の場合には処分坑道に多数の処分孔（ピット）が掘削されます。これらのピットがお互いにどのような影響を及ぼし合うかを検討するために必要な範囲のことを指します。

比抵抗

岩石の電気の流れやすさを表すもので、一般的には、粘土、シルト岩などは比抵抗が低く（電気が流れやすく）、頁岩、泥岩などは特に低い比抵抗を示す傾向があります。また、砂・礫混じりの地層は比抵抗が高い（電気が流れにくい）傾向があります。

品質保証体系

地層処分における品質とは、人工バリアや埋め戻し材に要求される性能などを指します。これらの品質保証に関する事項を体系的に整理したものを品質保証体系と呼びます。

ベントナイト

モンモリロナイトを主成分とする粘土の一種です。放射性廃棄物の地層処分では、緩衝材や処分坑道の埋め戻し材の原料として用いられ、ベントナイトの膨潤により緩衝材の透水性が低下し、放射性核種が緩衝材に吸着され、移行を抑制する効果があります。

防爆仕様

可燃性ガスが存在または存在する恐れのある場所で電気設備を設置または使用する場合、電気設備が原因となって生ずる爆発や火災等を防止するために、火花などが発生してもガスに引火しないようになっている構造です。

膨出

緩衝材と埋め戻し材に含まれるベントナイトの割合は、緩衝材の方が大きいいため、緩衝材の方が地下水と接触した際に膨らむ力が大きくなります。そのため、緩衝材と埋め戻し材の境界面では、緩衝材が埋め戻し材側に膨らんでいきます。この現象を膨出と呼びます。緩衝材が埋め戻し材側に膨らんでいくことで、部分的に緩衝材の密度が小さくなり、期待する性能が損なわれる可能性が指摘されています。

膨潤

ベントナイトは水と接触すると水を吸って膨らむ性質があり、その現象を膨潤と言います。膨潤しようとするベントナイトを膨らまないように拘束した時に発生する圧力を膨潤圧と言います。

飽和度

土や岩盤などの間隙に含まれる水の体積と間隙の体積の比を表す値です。

【ま行】

モンモリロナイト

モンモリロナイトは、ノートのようなシート（層）状の結晶構造を持つ粘土鉱物であり、通常、それらが折り重なった状態で存在しており、その層間に水分子が入り込むことによって膨潤します。また、層間に陽イオンを取り込む性質があり、放射性核種の移行を抑制する効果があります。

【や行】

ゆめ地創館

幌延深地層研究センターで行われている高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発について、ご紹介する施設です。

<https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/yumechisoukan/index.html>

参考資料

令和 2 年度以降の研究工程

1.1 人工バリア性能確認試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R5の実施内容	研究期間														
					前半					後半									
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10						
<p>実際の地質環境下における処分孔設置方式を対象とした熱-水-応力-化学連成現象（ガラス固化体設置以降の加熱時から浸潤時・減熱時を模擬した現象）に関する試験をとおして、設計や連成挙動評価手法の適用性の確認（人工バリアの解体調査および緩衝材の飽和度の確認を含む）、ならびに施工方法などの工学的実現性の例示等を行い、設計、施工および評価・解析といった一連の技術に関する基盤情報を整備する</p> <p>これらをとおして、廃棄体埋設後において、廃棄体周辺で起こる現象の理解を深め、安全評価において前提としている環境条件が達成されること確認するとともに、その予測技術を確立することで、人工バリアの設計に反映する</p>	<p>③④ 熱-水-応力-化学連成現象（ガラス固化体設置以降の加熱時(③)から浸潤時・減熱時(④)を模擬した現象)の評価手法(モデル化・解析手法)の確立</p>	<p>④浸潤時・減熱時のデータを含め、ガラス固化体設置以降の加熱・注水時から浸潤時・減熱時を全て模擬したデータに基づく熱-水-応力-化学連成現象のモデルの高度化、及び浸潤時の実際の飽和度などの確認(解体調査による)</p>	<p>④-1 注入する地下水の圧力や量を増加させ緩衝材に地下水を浸潤させた場合のデータ(浸潤時・減熱時)を取得、連成モデルの適用性確認</p>	<p>R5は実施しない</p>	<p>前半の5年程度で実施</p> <p>体系化して取り組む課題（(2)処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施</p>														
					<p>④-1 浸潤時・減熱時のデータ取得・連成モデルの適用性確認</p>														
					<p>緩衝材中発熱がおの温度の低下や間隙圧の低下を確認</p>					<p>発熱がおの温度の低下や間隙圧の低下を確認</p>					<p>令和4年度までに得られる成果 減熱過程における ○緩衝材で生じる連成現象の把握 ○解析用パラメータの整理 ○熱-水理-力学連成解析モデルの適用性の確認</p>		<p>令和9年度までに得られる成果 解体調査における ○緩衝材で生じる連成現象の把握 ○解析用パラメータの整理 ○熱-水理-力学連成解析モデルの適用性の確認</p>		
					<p>国際プロジェクト（DECOVALEX等）における解析コード間の比較検証、改良・高度化</p>					<p>④-1 国際共同研究 DECOVALEXによる連成解析コード間の比較検証の継続</p>					<p>国際プロジェクトでの解析コード間の比較検証、改良・高度化</p> <p>体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施</p>				
<p>④-2 人工バリアの解体作業および緩衝材の飽和度の確認を実施する</p>					<p>R5は実施しない</p>					<p>解析モデルや条件を設定した比較検証に移行</p> <p>令和5年度までに得られる成果 ○各国の解析コード間の比較検証を通じた解析コードの有効性の確認</p>									
<p>④-2 人工バリアの解体作業、緩衝材の飽和度の確認</p>					<p>試験施工では、埋戻し材、プラグ、試験孔、人工バリアを設置、注水開始</p>					<p>解体調査計画案(解体作業の方針および模擬施工手順・サンプリング方法)の決定</p> <p>令和4年度までに得られる成果 ○人工バリアの解体作業の方針及び施工手順・方法の決定</p> <p>令和9年度までに得られる成果 ○人工バリア周辺における連成現象の実データの取得</p>									
<p>※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直していく。</p> <p>※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。</p>					<p>個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「2.1.2 坑道スケール～ビットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」）に統合して実施する。</p> <p>「2.1.2 坑道スケール～ビットスケールでの調査・設計・評価技術の体系化」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。</p>														

1.2 物質移行試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R5の実施内容	研究期間										
					前半					後半					
					前半の5年程度で実施										
<p>・ 幌延地域に分布する泥岩は断層等の構造的な割れ目が分布することが知られているため、岩盤基質部 (=健岩部) における拡散および割れ目 (掘削損傷領域などの人為的な割れ目も含む) を介した移流・分散が主要な移行経路や形態として考えられる</p> <p>・ 有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に影響を及ぼすことが考えられる</p> <p>・ したがって、割れ目を有する堆積岩での物質移行経路や形態と物質移行に与える要因 (有機物・微生物・コロイド等) を総合的に評価することが必要</p> <p>・ そのために、幌延の泥岩を事例として、岩盤基質部 (=健岩部) および割れ目の双方を対象とした原位置トレーサー試験等を実施し、それぞれの構造の物質移行特性評価手法を構築することが重要</p> <p>・ 世界的にも事例が少ない泥岩中の割れ目を対象としたトレーサー試験手法を確立することも重要</p> <p>・ あわせて、有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に及ぼす影響を把握することが重要</p>	<p>① 岩盤基質部 (=健岩部) を対象とした物質移行特性 (物質の移動速度や岩盤へのくつきやすさ等) の評価手法の検証</p> <p>② 割れ目を対象とした物質移行特性 (物質の移動速度や岩盤へのくつきやすさ等) の評価手法の検証</p> <p>③ 泥岩中の割れ目を対象としたトレーサー試験手法の検証</p> <p>④ 掘削損傷領域などの人為的な割れ目を対象とした物質移行特性 (物質の移動速度や岩盤へのくつきやすさ等) の評価手法の検証</p> <p>⑤ 有機物・微生物・コロイド等が、物質の移行に及ぼす影響を把握</p> <p>⑥ 割れ目を有する堆積岩での物質移行特性の総合的な評価手法の確立</p>	<p>④ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>⑤ 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行モデル化手法の高度化</p>	<p>確立した試験手法を用いて掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得を実施するとともに、有機物や微生物が放射性物質を取り込んで移動する影響が限定的であることを確認する。また、物質移行評価手法の高度化するため以下を実施</p> <p>④ 確立したトレーサー試験手法を用いた掘削損傷領域での物質移行に関するデータ取得</p>	<p>④ 過年度の掘削損傷領域を対象としたトレーサー試験の解析評価</p> <p>⑤ 有機物・微生物・コロイドが核種移行に及ぼす影響の現象理解の継続、原位置トレーサー試験の継続</p>	<p>前半の5年程度で実施</p>	<p>体系化して取り組む課題 ((2) 処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験) で実施</p>	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
	④ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施									
	掘削損傷領域の水領域の物理・物質移行特性を評価するためのデータの取得					掘削損傷領域の物質移行特性を評価するためのデータの取得					令和6年度までに得られる成果 ○原位置試験データ (非収着性/収着性トレーサー) の取得 ○EDZにおけるモデル化/解析評価手法の提示				
	⑤ 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行モデル化手法の高度化					⑤ 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行モデル化手法の高度化					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
	室内試験データ (地下水中の有機物の取付) の取得					室内試験データ (コロイドへの元素取付) の取得					令和6年度までに得られる成果 ○室内試験データの拡充 ○有機物・微生物・コロイドの影響を考慮した物質移行モデルの提示				
	⑥ ブロックスケール (数m~100m規模) における遅延性能評価手法の整備					⑥ ブロックスケール (数m~100m規模) における遅延性能評価手法の整備					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
原位置試験の準備作業として、掘削・装置設置について掘削取得					原位置試験の準備作業として、掘削・装置設置について掘削取得					令和6年度までに得られる成果 ○原位置試験データ (非収着性/収着性トレーサー) の取得 ○幌延を事例としたブロックスケールの評価手法の提示					

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題 (「2.1.2 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」) に統合して実施する。

「2.1.2 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」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

2.1 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

2.1.1 操業・回収技術等の技術オプションの実証、閉鎖技術の実証

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R5の実施内容	研究期間													
					前半					後半								
<p>・処分場の操業（廃棄体の搬送定置・回収、処分場の閉鎖を含む）に関わる人工バリアの搬送・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証を目的として、幌延の地下施設を事例に、原位置試験を実施し、人工バリアの搬送定置・回収技術及び閉鎖技術を実証する</p> <p>① 処分場の操業（廃棄体の搬送定置・回収、処分場の閉鎖を含む）に関わる人工バリアの搬送・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証</p> <p>② 個別の要素技術の実証試験</p> <p>③ 埋め戻し材、プラグに関する設計手法、製作・施工及び品質管理手法の確立</p>	<p>① 処分場の操業（廃棄体の搬送定置・回収、処分場の閉鎖を含む）に関わる人工バリアの搬送・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証</p> <p>② 個別の要素技術の実証試験</p> <p>③ 埋め戻し材、プラグに関する設計手法、製作・施工及び品質管理手法の確立</p>	<p>①②③ 操業・回収技術などの技術オプションの実証、閉鎖技術の実証</p>	<p>注入する地下水の圧力や量を増加させ、緩衝材に十分に水を浸潤させた状態を確保して施工方法（締め、ブロック方式等）の違いによる緩衝材の品質の違いを把握する。また、埋め戻し方法（プラグの有無等）・回収方法による埋め戻し材の品質の違いを把握する。</p> <p>① 搬送定置・回収技術の実証（緩衝材や埋め戻し材の状態に応じた除去技術の技術オプションの整理、回収容易性を考慮した概念オプション提示、回収維持の影響に関する品質評価手法の提示）</p> <p>② 閉鎖技術（埋め戻し方法：プラグ等）の実証</p>	<p>① 地下環境におけるコンクリートの劣化に関する試験、分析の継続、実際の地下施設に施工されているコンクリート支保工の劣化挙動等の評価</p> <p>② 閉鎖システム（埋め戻し材やプラグなど）に関する基礎情報の整備を目的とした解析検討、室内試験および原位置試験の継続</p> <p>③ 緩衝材の膨出挙動に関する調査、埋め戻し材の施工効率に関する要素試験への着手と施工品質を確保するための計測技術の高度化</p>	前半の5年程度で実施					体系化して取り組む課題（(2)処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施								
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施				
					<p>① 搬送定置・回収技術の実証</p> <p>地下環境で乾燥および湿潤条件下でのコンクリートの劣化に関する試験を開始</p> <p>乾燥および湿潤条件下でのコンクリート中の中性化の程度の違いを確認</p>										<p>令和6年度までに得られる成果</p> <ul style="list-style-type: none"> ○実際の地下環境における支保部材の経年変化に係るデータ取得 ○坑道掘削・閉鎖後の地質環境変化に関する事象の把握 			
					<p>② 閉鎖技術（埋め戻し方法：プラグ等）の実証</p> <p>閉鎖システムに関する基礎情報の整備を目的とした解析検討、室内試験、工学規模試験を実施</p>					<p>体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施</p> <p>令和6年度までに得られる成果</p> <ul style="list-style-type: none"> ○シーリングシステムの長期性能評価に関する考え方の整理 ○緩衝材の膨出挙動に影響を与える事象の整理 ○止水プラグの施工に関する重要技術の抽出 ○EDZ調査技術の評価・高度化 ○坑道内からのボーリング孔に対するシーリング技術の整備・実証 								
					<p>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係る品質保証体系の構築</p> <p>自然湧水環境での緩衝材の流出状況を確認</p> <p>流量による緩衝材の流出試験を実施</p> <p>隙間へのケイ砂充填による緩衝材流出抑制効果を確認</p>					<p>体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施</p> <p>令和6年度までに得られる成果</p> <ul style="list-style-type: none"> ○緩衝材の施工方法に関する技術オプションの実証 ○坑道閉鎖に関する技術オプションの実証 								

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

■ 個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「2.1.2 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」）に統合して実施する。

□ 「2.1.2 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」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

2.1 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

2.1.2 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

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R5の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
・処分場の操業（廃棄体の搬送定置・回収、処分場の閉鎖を含む）に関わる人工バリアの搬送・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証を目的として、幌延の地下施設を事例に、原位置試験を実施し、人工バリアの搬送定置・回収技術及び閉鎖技術を実証する ① 処分場の操業（廃棄体の搬送定置・回収、処分場の閉鎖を含む）に関わる人工バリアの搬送・定置方式などの工学技術の実現性、人工バリアの回収技術の実証 ② 個別の要素技術の実証試験 ③ 埋め戻し材、プラグに関する設計手法、製作・施工及び品質管理手法の確立	④ 廃棄体の設置方法等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	人工バリアの品質を踏まえて、これまで実証してきた要素技術を体系的に適用し、廃棄体の設置方法（間隔など）を確認するため以下を実施 ④-1 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 ④-2 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、地下施設及び人工バリアの設計評価技術の体系化 ④-3 多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術及び処分支保技術の整備、緩衝材流出・侵入現象評価手法及び抑制対策技術の整備 ④-4 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理	後半の5年程度で実施するため、R5は実施しない	他の研究課題を取り込んで体系化して取り組む課題として、後半の5年程度で実施										
				-					④-1 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					
				-					④-2 地下施設及び人工バリアの設計評価技術の体系化					
				-					④-3 多連接坑道を考慮した湧水抑制対策技術及び処分支保技術の整備、緩衝材流出・侵入現象評価手法及び抑制対策技術の整備					
-					④-4 廃棄体設置の判断や間隔の設定に必要な情報の整理									

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「2.1.2 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」）に統合して実施する。
 「2.1.2 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」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

2.2 高温(100℃超)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R5の実施内容	研究期間														
					前半					後半									
					前半の5年程度で実施														
<p>人工バリア設置環境の深度依存性を考慮し、種々の処分概念オプションの工学的実現性を実証し、多様な地質環境条件に対して柔軟な処分場設計を行うことを支援する技術オプションを提供する</p> <p>実際の処分事業では、オーバーバックが100℃以下になってから処分することが基本であるが、想定外の要因によって100℃を超えた状態になることを想定して、人工バリアシステムの安全裕度を検証する</p>	<p>① 100℃超の高温での限界環境が人工バリアに与える影響と上限温度設定の考え方の整備、解析的な検討</p>	<p>① 高温(100℃以上)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験による緩衝材が100℃超になった状態を想定した解析手法の開発</p>	<p>人工バリアシステムの安全裕度の検証に向けて、緩衝材が100℃超になった状態を想定した解析手法を開発するため以下を実施</p> <p>①-1 高温(100℃以上)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験</p>	<p>①-1 高温条件下での人工バリアの挙動に関する原位置試験に着手</p>	<p>①-1 限界的条件下での人工バリア性能確認試験の解析・検討</p>					<p>体系化して取り組む課題(②処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験)で実施</p>									
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	<p>体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施</p>					
					<p>海外での先行研究調査事例原位置試験の情報(試験条踏まえた出、原位置件、手法等)を入手</p>										<p>令和6年度までに得られる成果 ○高温(100℃以上)などの限界的条件下での人工バリア性能確認試験データの収集</p>				
			<p>①-2 100℃超になった際にニアフィールド(人工バリアとその周辺岩盤の領域)において発生する現象の整理</p>	<p>①-2 シナリオ整理の継続、ニアフィールド構成材料を対象とした試験、分析</p>	<p>①-2 100℃超になった際にニアフィールドにおいて発生する現象の整理</p>					<p>体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施</p>									
					<p>シナリオの検討に着手(水分移動、物質の移動特性)に関する先行研究事例の調査</p>										<p>令和6年度までに得られる成果 ○100℃超になった際にニアフィールドにおいて発生する現象の整理</p>				
					<p>①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示(国際プロジェクト情報を収集し、発生する現象を整理)</p>										<p>体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施</p>				
				<p>①-3 海外の原位置試験に関する情報取得の継続</p>	<p>①-3 ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方を提示</p>					<p>体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施</p>									
					<p>海外での原位置試験の情報(試験条、手法等)を入手</p>										<p>令和6年度までに得られる成果 ○ニアフィールドにおける上限温度設定の考え方の提示</p>				
					<p>海外での原位置試験の情報(試験条、手法等)を入手</p>														

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題(「2.1.2 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」)に統合して実施する。

「2.1.2 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」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

3.1.1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R5の実施内容	研究期間														
					前半					後半									
<p>岩盤中には大小様々な断層が存在するが、小規模なものいくつかは処分場に取り込まざるを得ない可能性がある。それらの断層が地震や隆起などの地殻変動の影響を受けた場合に、その透水性がどの程度まで上昇し得るかを検討しておく必要がある。</p> <p>断層の透水性は断層の変形様式に大きく依存する。脆性的な変形が起こると断層の透水性は有意に上昇しやすいが、延性的な変形の場合は透水性が上昇しにくい。生じる変形が脆性的か延性的かは、変形時の岩石強度、応力などに依存する。</p> <p>本研究では、地殻変動に対する緩衝能力が潜在的に高いことから堆積岩に重点を置き、断層の変形様式を支配する岩石の強度・応力状態を計測でき、かつマッピング（空間的な分布図を示すこと）が可能なパラメータで指標化することを試みる。そのようなパラメータと断層の透水性の潜在的な上限を関係付けることができれば処分場閉鎖後の断層の透水性について現実的な状態設定が可能となる。</p> <p>断層は動いたとしても、その透水性は、地層の力学的な緩衝能力が働くことにより、一定の値を超えない。この現象を定量的に示したい。</p>	<p>①地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力を表現するパラメータ（指標）の提案</p> <p>②水圧擾乱試験によるパラメータの有効性の検証</p>	<p>② 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握</p>	<p>断層の幅が数十 cm の断層における地震動や坑道掘削に伴う、割れ目における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）を実証するために、以下の検討や試験を実施する</p> <p>②-1 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）</p> <p>②-2 DI（ダクティリティインデックス・岩盤にかかる平均応力を引張強度で割った値）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</p> <p>②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備</p>	<p>②-1～3 既往の水圧擾乱試験の結果の解析</p> <p>②-1～3 DI と断層/割れ目の水理学的連結性の関係に関する解析</p>	<p>前半の5年程度で実施</p> <p>体系化して取り組む課題（(2)処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施</p>														
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	<p>②-1 地殻変動が地層の透水性に与える影響の把握</p> <p>体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施</p>					
					<p>より大型の水圧擾乱試験やシミュレーションの結果と改訂した水圧擾乱試験に基づきモデルを改良</p>										<p>令和6年度までに得られる成果 ○ボーリング孔を用いた水圧擾乱試験データの取得</p>				
					<p>②-2 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</p>										<p>体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施</p>				
					<p>割れ目の水理学的連結性の領域区分に遷移領域を追加</p>										<p>令和6年度までに得られる成果 ○DIを用いた透水性評価手法の高度化</p>				
					<p>②-3 水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備</p>										<p>体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施</p>				
					<p>より大型の断層の活動性評価に係る既存情報取得を実施し、データを整理</p>										<p>令和6年度までに得られる成果 ○水圧擾乱試験による断層の活動性評価手法の整備</p>				

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「2.1.2 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」）に統合して実施する。

「2.1.2 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」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

3.1 水圧擾乱試験などによる緩衝能力の検証・定量化

3.1.2 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

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R5の実施内容	研究期間														
					前半					後半									
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10						
・地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域に相当と仮定）の分布を把握することは、処分事業における処分場選定の際に有用な情報になり得る。このため、地上からの調査により、化石海水の三次元分布を評価する既存技術の高度化を図る	③ 地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）を調査・解析・評価する手法の確立 ④ 三次元分布を調査・解析・評価する手法の確立	③④ 地下水の流れが非常に遅い領域（化石海水領域）を調査・評価する技術の高度化	地下水が動いていない環境を調査してモデル化する技術を実証するため以下を実施 ③ 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	③、④-1 R4までの成果に基づく、物理探査およびボーリング調査によるデータ取得から地球統計学的手法による化石海水領域の三次元分布の推定に至る一連の手法の整理と、これまでに得られた成果の論文投稿や研究開発報告書類の整備 ④-1 化石海水の三次元分布に係る調査・評価手法の検証 ④-2 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、塩濃度分布評価のための水理・物質移動解析)	前半の5年程度で実施					体系化して取り組む課題（(2)処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施									
					③ 地下水の流れが非常に遅い領域の調査・評価技術の検証					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施									
					化石海水領域を把握するための物理探査を実施し、比抵抗分布を推定					R3に掘削したボーリング孔の延長による水質などのデータ追加とR2に推定した化石海水分布の妥当性確認					令和6年度までに得られる成果 ○化石海水領域の調査・評価技術の整備・高度化				
					④-1 化石海水の三次元分布に係る調査・評価手法の検証					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施									
化石海水分布の把握に必要なボーリングの位置・本数等を検討					地球統計学的解析による化石海水領域の三次元分布推定に係る一連の手法の検討					令和6年度までに得られる成果 ○化石海水の三次元分布に係る調査・評価技術の整備・高度化									
④-2 広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の検証					地球統計学的解析による化石海水領域の三次元分布推定に係る一連の手法の検討					令和6年度までに得られる成果 ○広域スケールを対象とした水理・物質移動評価手法の整備									

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

 個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「2.1.2 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」）に統合して実施する。
 「2.1.2 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」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

3.2 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

目的・背景・必要性・意義	課題	R2以降の課題	R2以降の実施内容	R5の実施内容	研究期間														
					前半					後半									
					R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10						
・地震・断層活動等の地殻変動に対する堆積岩の力学的・水理学的な緩衝能力（自己治癒能力）を定量的に検証し、堆積岩地域における立地選定や処分場の設計を、より科学的・合理的に行える技術と知見を整備する	① 人工バリアの緩衝材や坑道の埋め戻し材による掘削損傷領域（EDZ）のひび割れの自己治癒能力を評価する手法の確立 ② 人工バリアの自己治癒能力（ひび割れの修復）を実証	② 地殻変動による人工バリアの緩衝材や坑道埋め戻し材の掘削損傷領域（EDZ）への自己治癒能力の実証	人工バリアのひび割れに対する自己治癒能力を実証するため以下の机上検討を実施 ② 人工バリアの緩衝材や坑道埋め戻し材が掘削損傷領域（EDZ）の力学的・水理学的な緩衝能力（自己治癒能力）に与える影響を把握する解析手法の開発 ✓ DI を用いた EDZ の透水性を予測する既存モデルの再検証	R5 は実施しない	前半の5年程度で実施					体系化して取り組む課題（②処分概念オプションの実証のうち人工バリアの定置・品質確認などの方法論に関する実証試験）で実施									
					②-1 DI を用いた EDZ の透水性を予測する既存モデルの再検証					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施									
					試料観察に基づき、EDZ の割れ目開口状況を定量的に把握					水圧擾乱試験やシミュレーションの結果に基づきモデルを改良					EDZ の透水性と改良モデルの整合性を確認				
					令和4年度までに得られる成果 ○DI を用いた EDZ の透水性を予測する既存モデルの再検証														
			✓ 坑道埋め戻し後の EDZ の透水性を予測するモデルの構築	R5 は実施しない	②-2 坑道埋め戻し後の EDZ の透水性を予測するモデルの構築					体系化の中で、情報の不足等があった場合に追加で試験、解析を実施									
					試料観察に基づき、EDZ の割れ目開口状況を定量的に把握					坑道埋め戻し後の割れ目のずれが EDZ の透水性に与える影響の評価手法を構築									
					令和4年度までに得られる成果 ○坑道埋め戻し後の EDZ の透水性を予測するモデルの構築														

※1 本資料は現段階で想定するスケジュールであり、年度ごとに得られた研究成果を評価し見直ししていく。

※2 研究の進捗管理として、各年度の成果を各年度の欄に追記する。

個別の要素技術の課題については、期間の前半で実施し、後半は体系化して取り組む課題（「2.1.2 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」）に統合して実施する。
 「2.1.2 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」を実施する中で、情報の不足等があった場合に追加で試験や解析を実施する。

参考文献

- (1) Ishii, E.: The highest potential transmissivities of fractures in fault zones: Reference values based on laboratory and in situ hydro-mechanical experimental data, *Engineering Geology*, vol.294, 2021, 106369.
- (2) Ozaki, Y., Ishii, E. and Sugawara, K.: Variation in fault hydraulic connectivity with depth in mudstone: An analysis of poroelastic hydraulic response to excavation in the Horonobe URL, *Geomechanics for Energy and the Environment*, vol.31, 2022, 100311.
- (3) Ishii, E.: Assessment of hydraulic connectivity of fractures in mudstones by single-borehole investigations, *Water Resources Research*, vol.54, 2018, pp.3335-3356.
- (4) Ishii, E.: Constant-head step injection tests to quantify the stress dependence of fracture transmissivity in an excavation damaged zone: A case study from the Horonobe Underground Research Laboratory, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol.159, 2022, 105229.
- (5) Aoyagi, K. and Ishii, E.: A method for estimating the highest potential hydraulic conductivity in the excavation damaged zone in mudstone, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol.52, 2019, pp.385-401.
- (6) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, 1999, 529p.
- (7) 中山雅(編)：幌延深地層研究計画 令和2年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2021-053, 2022, 133p.
- (8) 中山雅(編)：幌延深地層研究計画 令和3年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2022-025, 2022, 164p.
- (9) 炭山守男：土壌埋設鋼材の長期腐食挙動に関する研究(XI), JNC TJ8400 99-042, 1999, 203p.
- (10) 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター：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 報告書, 2022.
- (11) 日本原子力研究開発機構：平成24年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発—6ヶ年研究成果の取りまとめ—, 2013.
- (12) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999, 703p.

- (13) Ishii, E.: A conventional straddle-sliding-packer system as a borehole extensometer: Monitoring shear displacement of a fault during an injection test, *Engineering Geology*, vol.275, 2020, 105748.
- (14) Ishii, E.: Predictions of the highest potential transmissivity of fractures in fault zones from rock rheology; Preliminary results, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol.120, No.4, 2015, pp.2220-2241.
- (15) Ozaki, Y. and Ishii, E.: Verification of the existing hydrogeological model using hydraulic pressure monitoring data during long-term drainage from the Horonobe URL and prediction of the hydraulic response to new excavation of up to a 500-m depth. *Proceedings of the 2023 30th International Conference on Nuclear Engineering ICONE30*, in press.
- (16) Mochizuki, A. and Ishii, E.: Assessment of the level of activity of advective transport through fractures and faults in marine deposits by comparison between stable isotope compositions of fracture and pore waters, *Hydrogeology Journal*, vol.30, 2022, pp.813-827.
- (17) 望月陽人, 石井英一: 地下深部の岩盤における地下水の流れの有無を水の安定同位体比から判別する, *Isotope News*, no.784, 2022, pp.23-27.
- (18) Ohno, H. and Ishii, E.: Effect of fault activation on the hydraulic connectivity of faults in mudstone, *Geomechanics for Energy and the Environment*, vol.31, 2022, 100317.
- (19) 日本原子力研究開発機構: 割れ目がずれると割れ目内の隙間(地下水の通り道)はつながるか? —隙間のつながり具合を現場で簡単に調べる試験手法を開発—, 令和4年10月26日プレス発表, 2022, <https://www.jaea.go.jp/02/press2022/p22102601/>
- (20) 日本原子力研究開発機構: 地下深部の割れ目の水の流れやすさに関わる法則性を発見—地層処分における地下調査の効率性の向上などに役立つ新知見—, 令和3年12月6日プレス発表, 2021, <https://www.jaea.go.jp/02/press2021/p21120601/>
- (21) Aoyagi, K., Ishii, E., Chen, Y. and Ishida, T.: Resin-injection testing and measurement of the shear displacement and aperture of excavation-damaged-zone fractures: A case study of mudstone at the Horonobe Underground Research Laboratory, Japan, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol.55, 2022, pp.1855-1869.