



図 36 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4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。

8. 地下施設の管理

令和 5 年度に着工を予定している掘削工事に向けて、掘削に必要なとなる掘削土（ズリ）の積込み機やコンクリートプラント設備の整備、および安全対策設備の改修などを行うとともに、地下施設の維持管理（設備運転や保守点検など）を実施します（図 37）。

研究所用地およびその周辺の地下には、メタンを主成分とする可燃性ガスが存在しているため、地下坑道内の換気を十分に行うとともに、防爆仕様の機器の使用やガス濃度の監視などの防爆対策を徹底します。

地下施設からの排水および掘削土（ズリ）置場の浸出水は、これまでと同様に、排水処理設備においてホウ素および窒素などを取り除いた後、排水管路によって天塩川に放流します。



(a) 巻上機の整備



(b) 制御盤の整備

図 37 工事および維持管理の様子

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 38）。



(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 38 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 39）。



(a) 清水川の水質調査



(b) 清水川の魚類調査

図 39 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 40）。



図 40 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^{*9}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連載している、研究内容を紹介する記事については、令和4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

天然有機物が核種移行に与える影響に関する研究

微生物を指標とした堆積岩中の水みち調査手法の開発

層状ケイ酸塩による微量元素の還元反応のメカニズム解明

○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

*9：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*10
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*11
地下施設建設時の坑道掘削影響領域の調査技術に関する研究
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)
- 株式会社安藤・間
ボアホールジャッキ試験による岩盤の初期応力測定手法の適用性に関する研究
- 株式会社大林組
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

*10：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。

*11：一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。

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(図 41)。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 41 大学からの実習生の受け入れ

11.2 国外機関との研究協力

○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^{*12} (スイス)

オパリナス粘土層の摩擦特性試験など

^{*12}：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。

○クレイクラブ (Clay Club) *13

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

上記のほか、OECD/NEA の協力のもと、幌延国際共同プロジェクト (Horonobe International Project : HIP*14) を令和 4 年度から新たに開始します。本プロジェクトでは、令和 2 年度以降の必須の課題に関わる試験や解析などを実施するとともに、国内外の技術者や研究者を育成することを目的としています。

また、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、OECD/NEA と経済産業省が主催する、地下研究施設の共同利用に関する国際ワークショップに協力するとともに、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。

*13 : 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。

*14 : HIP ホームページ ; <https://www.jaea.go.jp/english/04/horonobe/IJP/HIP/index.html>

12. 用語集

【英数字】

Da (ダルトン)

質量を表す単位であり、質量数 12 の炭素原子の質量の 1/12 と定義されていますが、限外ろ過に用いられるフィルターサイズの指標としても用いられます。10 kDa (キロダルトン) のろ過フィルターサイズとは、10 kDa (10,000 Da) より小さな質量の分子が通ることのできる孔径の指標を意味します。

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。

【あ行】

ウラニン

黄緑色の蛍光染料で、フルオレセインナトリウムともいいます。化学式は $C_{20}H_{10}Na_2O_5$ であらわされます。トレーサー試薬としての利用のほか、入浴剤の着色料などとしても利用されています。

【か行】

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。

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。

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。

限外ろ過

コロイド粒子などの、通常のろ過方法では分離できない微細な粒子をろ過する方法で、質量が約 1 kDa～1,000 kDa の分子を分離することができます。

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

通常の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。

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。

酸素同位体比

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、表層水で-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。

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学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。

せん断

岩盤などの内部の任意の面に対して平行方向に力が作用してずれが生じることをいいます。

【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。

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とが反応し、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。

透水性

岩盤の水の通し易さのことです。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。

フミン酸

植物などが微生物により分解される最終生成物のうち、酸性である無定形高分子物質のことで、腐植酸とも呼ばれます。

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。

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	R4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>④-1 人工バリア性能確認試験において、廃棄体の発熱がおさまった状態を模擬した条件下での試験を継続し、データを分析・評価</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さまたげ、低下や緩衝材内側試験に移の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>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>④-2 試験施工の解体調査結果を整理し、解体調査計画に反映するための手法などの取りまとめ</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、埋め戻し材、プラグ、試験孔、人工バリアを設け、注水開始</p> <p>試験施工の解体を行い、緩衝材の解体方法や模擬オーバーバックの取り出し手法を確認</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	R4 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などの人為的な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>⑤ 有機物、微生物、コロイドの影響を考慮した物質移行試験</p> <p>⑥ 割れ目を有する堆積岩を対象とした掘削損傷領域を含むブロックスケール (数 m~100m 規模) における遅延性能評価手法の整備</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着手</p> <p>⑥ 過年度に実施した稚内層深部のブロックスケールを対象としたトレーサー試験の解析評価および声問層のブロックスケールにおける遅延性能評価手法の整備に係るボーリング調査</p>	<p>④ 掘削損傷領域の物質移行の評価手法の確立</p> <p>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を拡充</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>室内試験データ (地下水中の有機物の掘削・装置を布等) を取得</p> <p>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</p> <p>原位置試験の準備作業としての物質移行経路の連続性に装置についてデータ取得</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>R7 R8 R9 R10</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 ○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</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 ○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</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 ○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</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~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。</p> <p>「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。</p>								

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	R4の実施内容	研究期間													
					前半					後半								
・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	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	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。	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 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 ③ 緩衝材の施工方法に応じた緩衝材の流出量を把握するための試験の継続	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				
					① 搬送定置・回収技術の実証					地下環境で乾燥および湿潤条件下でのコンクリートの中性化の程度を確認					令和6年度までに得られる成果 ○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			
② 閉鎖技術（埋め戻し方法：プラグ等）の実証					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					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								
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					自然湧水環境での緩衝材の流出状況を確認					令和6年度までに得られる成果 ○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 ○緩衝材の膨潤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								
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（(1)実際の地質環境における人工バリアの適用性確認のうち、人工バリア性能確認試験とあわせて実施）					流水量による影響に着目した緩衝材の流出試験を実施					令和6年度までに得られる成果 ○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	R4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孔支保技術の整備、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、R4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孔支保技術の整備、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	R4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>①-1 100℃を超えた状態における現象等の調査事例に基づく課題の抽出、データ取得や解析手法の高度化の計画の策定</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>海外での先行研究原位置試験事例の調査結果を(試験条踏まえた件、手法課題の抽出)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>①-2 100℃を超えた状態での人工バリアの基本特性やニアフィールドでの熱-水-応力-化学に係る連成現象に関する試験・解析およびシナリオ検討事例の調査、わが国の処分概念や設計オプションを想定したシナリオの整理</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>シナリオ先行研究の検討に事例の調査(水分査(緩衝材移動、物質の鉱物・性移動特性)能変化)</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>海外での原位置試験の情報(試験条件、手法等)を入手</p>										<p>海外での原位置試験の情報(試験開始時のデータ等)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>				

※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	R4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の断層を試験やシミュレーションの乱試験を結果に基実施し、デバッグモデルを改良</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>割れ目の水圧擾乱水理学的試験やシミュレーションの領域区分シミュレーションの遷移領域を追加</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>より大型断層の活動性評価対象として係る既往の水圧擾乱試験を実施し、データを取得</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	R4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 電磁探査により推定した化石海水領域の三次元分布の妥当性を確認するためのボーリング調査 R4 までの成果に基づき、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	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					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のボーリング調査を実施				
					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					物理探査とボーリング調査のデータの組み合わせにより化石海水分布を推定する方法の検討					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				
④-2 広域スケール（十数km×十数km）を対象とした水理・物質移動解析の結果に基づき、古水理地質学的変遷が化石海水領域に与える影響を評価するための広域スケールのモデル化・解析手法の整理					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					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				
広域スケールの地下水流動に深度・気候などが与える影響を整理					化石海水領域に影響する古水理地質学的変遷に関する因子を抽出する感度解析を実施					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	R4の実施内容	研究期間									
					前半					後半				
					前半の5年程度で実施									
・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	② DI を用いた EDZ の透水性を予測する既存モデルの再検証 ② 坑道埋め戻し後の EDZ の透水性を推定するモデルの構築	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
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 試料観察に基づき、試験やシミュレーションの状況を定量的に把握					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									
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 試料観察に基づき、戻し後の EDZ の割れ目や開口状の状況を定量的に把握					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) 日本原子力研究開発機構：平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書 廃棄物埋設における性能評価手法に関する調査, 2019.
- (2) Pusch, P. and Madsen, F. T.: Aspects on the illitization of the Kinnekulle bentonites, *Clays and Clay Minerals*, vol.43, 1995, pp.261-270.
- (3) Wersin, P., Johnson, L. H. and McKinley, I. G.: Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100°C, *Physics and Chemistry of the Earth*, vol.32, 2007, pp.780-788.
- (4) Zheng, L., Rutqvist, J., Birkholzer, J. T. and Liu, H. H.: On the impact of temperatures up to 200°C in clay repositories with bentonite engineer barrier systems: A study with coupled thermal, hydrological, chemical, and mechanical modeling, *Engineering Geology*, vol.197, 2015, pp.278-295.
- (5) Zheng, L., Rutqvist, J., Xu, H. and Birkholzer, J. T: Coupled THMC models for bentonite in an argillaceous repository for nuclear waste: Illitization and its effect on swelling stress under high temperature, *Engineering Geology*, vol.230, 2017, pp.118-129.
- (6) Huang, W. L., Longo, J. M. and Pevear, D. R.: An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer, *Clays and Clay Minerals*, vol.41, 1993, pp.162-177.
- (7) 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, 2015, pp.2220-2241.
- (8) Kuang, X. and Jiao, J.J.: An integrated permeability-depth model for Earth's crust, *Geophysical Research Letters*, vol.41, 2014, pp.7539-7545.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) Krietsch, H., Gischig, V.S., Doetsch, J., Evans, K.F., Villiger, L., Jalali, M., Valley, B., Löw, S. and Amann, F.: Hydromechanical processes and their influence on the stimulation effected volume: observations from a decameter-scale hydraulic stimulation project, *Solid Earth*, vol.11, 2020, pp.1699-1729.
- (12) 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.

- (13) Ohno, H. and Ishii, E.: Effect of fault activation on the hydraulic connectivity of faults in mudstone, *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2022, 100317. in press.
- (14) Asadollahi, P. and Tonon, F.: Constitutive model for rock fractures: Revisiting Barton's empirical model, *Engineering Geology*, vol.113, 2010, pp.11-32.
- (15) 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*, in press.