

幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開 (2) タスク A : 物質移行試験

尾崎裕介*1

幌延国際共同プロジェクトのタスク A では、幌延深地層研究センターの地下施設の深度 250m の声間層において物質移行に関する調査を実施している。タスク A では高レベル放射性廃棄物の地層処分安全評価に不可欠な物質移行評価に資するため、原位置トレーサー試験結果から岩盤内における物質移行時の現象をより適切に表現可能なモデルを構築するとともに、異なる地質環境で得られたデータやモデルの適用可能性について議論することを目的としている。タスク A のフェーズ 1 は、原位置試験の計画立案、室内試験、原位置試験の実施、解析評価の 4 つのサブタスクから構成される。これらのサブタスクは、参加機関が協力して取り組んでおり、本発表では、タスク A のサブタスクの現状と協力状況を紹介します。

Keywords: 幌延国際共同プロジェクト, タスク A, 物質移行試験

Task A of the Horonobe International Project (HIP) aims to investigate the characteristics of solute transport of the Koetoi Formation at 250 m stage of the Horonobe underground research laboratory (URL). The objective of this task is to develop a modeling approach of solute transport considering actual phenomena occurring in the rock based on in-situ tracer experiments along with the discussion on transferability of data and modeling approach from different geological environment. Phase 1 of task A is divided into four subtasks of planning of in situ experiments, laboratory experiments, field experiments, and modeling. These subtasks are tackled by participating organizations as collaborative research, and I present the current situation of each subtask and our cooperation.

Keywords: Horonobe international project (HIP), Task A, Tracer experiment

1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、坑道周辺や坑道を含む広い範囲における精確な物質移行挙動の評価はその安全評価において重要な課題の 1 つである。物質移行挙動を評価するためには、評価対象とするさまざまな空間的・時間的スケールに対して、適切なモデルを構築し解析を実施する必要がある。そしてそのモデル構築のためには、実際に岩盤内で発生している物質移行挙動に関する現象を把握しモデルに実装する必要がある。従って、原位置において取得可能な地下水流動特性やトレーサー試験により取得される破過曲線のデータ等から、岩盤内で実際に発生している現象を適切に反映したモデルを構築する手法が必要である。

幌延深地層研究センターでは、新第三紀堆積岩である声間層、稚内層を対象としたさまざまな調査・評価技術開発を行っているが、これまで物質移行に関する調査は主に深度 350 m 以深の稚内層を対象として実施してきた。亀裂を対象とした試験では深度 350m および深度 500 m 付近において原位置トレーサー試験を[1-3]、健岩部を対象とした試験では主にコアサンプルを用いた室内試験[4-6]や原位置試験を実施してきた。これらの既存の研究に対して、タスク A では深度 250 m 調査坑道の声間層において亀裂を含む領域には原位置トレーサー試験を、健岩部に対してはコアサンプルを使用した室内試験を各々実施し、物質移行に関する一連の調査を実施する (Fig.1)。

幌延深地層研究センター付近の地下では、深度に応じて岩盤内の亀裂の連結性が変化していることが確認されてい

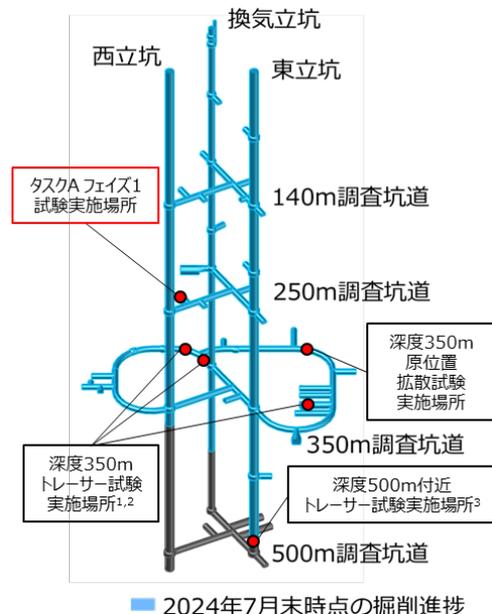


Fig. 1 Location of previous field experiment and test site for phase 1 of task A in the Horonobe URL.

(Fig.2(a)). また、健岩部に関してはタスク A で対象とする声間層とこれまで主に調査が行われてきた稚内層では例えば間隙率には乖離が認められる[7]ものの、その他の物質移行特性の相違点・類似点に関しては室内試験により把握することが可能である。従って、幌延深地層研究センター付近の地下においては、物質移行の特性に関して深度に応じた類似点・相違点の把握が可能である。このような条件下において、Fig.2(b)に示される異なる深度を対象として体系的に物質移行に関する調査を実施することにより、ある地層で取得されたデータおよび調査やモデリング手法が別の地層においてもどの程度適用可能かに関する議論も期待できる。

上記の点を踏まえタスク A では、原位置で実施するトレーサー試験から岩盤内で発生している現象を適切に考慮し

Current status and future prospects of the Horonobe international project (HIP) (2) Task A: Solute transport experiment with model testing by Yusuke OZAKI (ozaki.yusuke@jaea.go.jp)

*1 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター

Horonobe Underground Research Center, Japan Atomic Energy Agency
〒098-3224 北海道天塩郡幌延町字北進 432-2

本稿は、日本原子力学会 2024 年秋の大会企画セッション「幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開」における講演内容に加筆したものであ

た物質移行モデルの構築手法の開発および異なる地質環境における物質移行に関するデータやモデリング手法の適用可能性に関する検討の2点を研究の目的としている。これら目的を達成するための具体的な実施概要、実施状況および参加機関との連携に関して示す。

2 実施内容

タスク A では幌延国際共同プロジェクトに参加している全 11 機関のうち 10 機関が参加しており、幌延深地層研究センターの深度 250 m 調査坑道において物質移行に関する調査を実施している。幌延国際共同プロジェクトでは、フェーズ 1 とフェーズ 2 の 2 段階に分けてプロジェクトが実施されており、タスク A ではフェーズ 1 をモデル構築手法の開発に、フェーズ 2 を開発した手法の妥当性の検証に重点を置いて研究・開発を実施する計画となっている。こ

れら各々のフェーズにおいて異なる場所および異なる条件下における原位置試験の実施を予定しており、モデルの構築段階とモデルの検証段階で多様なデータを取得・活用し、モデリングアプローチの汎用性を高めようとしている点はタスク A の特色の 1 つである。

フェーズ 1 では、原位置試験の実施内容の検討および資機材の開発・準備、室内試験、原位置試験の実施、およびモデリングに関するサブタスクが設定されている。Fig.3 に各サブタスクの工程を示す。なお、実際のサブタスクの実施状況は、試験の進捗や現場の状況に応じて適宜修正しながら実施している。

3 実施協力状況

3.1 原位置試験案検討

試験計画の立案は、室内試験や原位置試験、モデリング

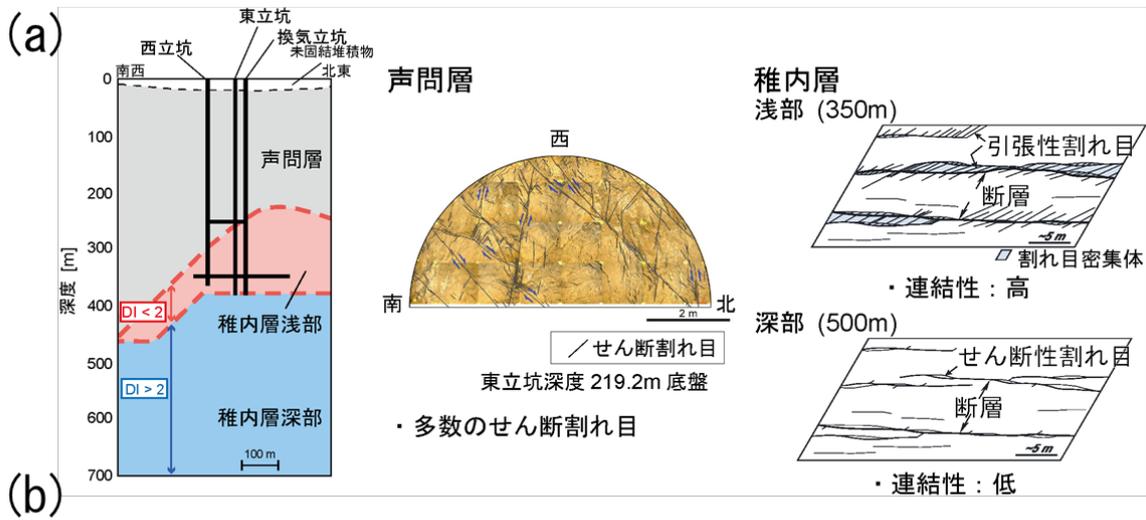


Fig. 2 (a) Distribution of geological environment and type of fracture connectivity around the Horonobe URL [8-10] and (b) previous in situ and laboratory experiments for solute transport at different depths.

| 年 | 令和5年 | | | | 令和6年 | | | | 令和7年 | | | | 令和8年 | | | | 令和9年 | | | | 令和10年 | | | | 11 | | | |
|----------------|-------|---|---|----|------|---|---|----|------|---|---|----|-------|---|---|----|------|---|---|----|-------|---|---|----|----|--|--|--|
| 四半期 | 3 | 6 | 9 | 12 | 3 | 6 | 9 | 12 | 3 | 6 | 9 | 12 | 3 | 6 | 9 | 12 | 3 | 6 | 9 | 12 | 3 | 6 | 9 | 12 | 3 | | | |
| プロジェクト年 | 1 | | | | 2 | | | | 3 | | | | 4 | | | | 5 | | | | 6 | | | | 7 | | | |
| フェーズ | フェーズ1 | | | | | | | | | | | | フェーズ2 | | | | | | | | | | | | | | | |
| A-1: 原位置試験案の検討 | ■ | | | | | | | | | | | | ■ | | | | | | | | | | | | | | | |
| A-2: 室内試験 | ■ | | | | | | | | | | | | ■ | | | | | | | | | | | | | | | |
| A-3: 原位置試験 | ■ | | | | | | | | | | | | ■ | | | | | | | | | | | | | | | |
| A-4: 数値解析 | ■ | | | | | | | | | | | | ■ | | | | | | | | | | | | | | | |
| A-5: 原位置試験 | ■ | | | | | | | | | | | | ■ | | | | | | | | | | | | | | | |
| A-6: 数値解析 | ■ | | | | | | | | | | | | ■ | | | | | | | | | | | | | | | |

Fig. 3 Planned schedule of each subtask in task A

のすべてのサブタスクに影響することから、すべての機関がこのサブタスクに参加している。具体的なサブタスクの進め方としては、原位置試験の状況や試験場所の地質環境に関する情報の共有を目的としてオンライン形式のタスク会合を定期的実施し、既存の試験結果やタスク A で実施している原位置試験の内容および結果に関する積極的な情報の共有を行っている。一方で、現状においては、幌延深地層研究センター周辺の地質環境や過去に行われた原位置試験に関する知見が各参加機関に十分に共有されていないことや、これまでに深度 250 m 調査坑道の声問層における物質移行試験の前例がないことから、各参加機関が具体的な原位置試験案を提示するのは困難な状況である。従ってフェーズ 1 では、原位置試験を実施する国内機関が具体的な試験計画を立案し、試験実施前にオンライン形式のタスク会議で試験案を議論することにより、現状において可能な範囲で各参加機関が所有する知見や意見を試験に取り入れるように試験計画を立案している。フェーズ 1 での原位置試験結果や解析結果の議論を通して、各参加機関の試験場所周辺の地質環境や試験方法に関する理解の促進が期待されることから、フェーズ 2 では各参加機関からの積極的かつ具体的な試験案の提案を期待している。

また、トレーサー試験の試験条件の検討を目的として、過去に深度 350 m 調査坑道で実施した原位置試験の再解析を実施した。この解析は、オーストラリア連邦科学産業研究機構（以下、CSIRO）から研究者を幌延に招き、幌延に滞在中に実施した(Fig.4)。この解析結果は、タスク A で実施する原位置試験の試験条件の検討に利用できるだけでなく、深度 250 m および深度 350 m における物質移行特性の比較にも活用可能である。なお、この解析結果は数値解析のサブタスクにおいて実施したベンチマークテストの参考データとしても活用している。

3.2 室内試験

深度 250 m 調査坑道周辺の声問層における健岩部の物質移行特性の把握を目的として、タスク A ではバッチ試験や透過拡散試験等の室内試験を実施し、拡散係数や収着分配係数等のパラメータを取得している。室内試験に関しては、コア試料を提供することで参加機関が独自に試験を実施できる。従って、トレーサー試験に使用するボーリング孔の掘削時に取得したコア試料を提供し、参加機関が分担して試験を実施している。現段階では、電力中央研究所（以下、CRIEPI）およびルーマニアの原子力テクノロジー国営会社（RATEN）に試料を提供しており、原子力機構（以下、JAEA）を含む計 3 機関が分担して室内試験を実施している。原位置試験計画に基づいて室内試験で使用するトレーサーを選定し、かつ各機関が異なる種類のトレーサーや異なる試験条件下で室内試験を実施することにより、原位置試験結果の解析に有用かつ幅広いデータを効率的に取得できるようにサブタスクを実施している。また、各機関が同一条件下で取得した試験結果を比較することにより、室内試験結果の妥当性やデータのバラつき等に関する検討も予定している。

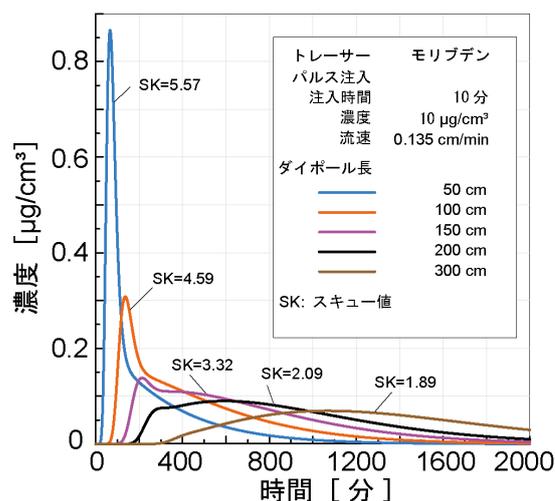


Fig. 4 Predictive analysis for in situ experiments of task A based on a previous in situ experiment at 350 m stage in the Horonobe URL by CSIRO.

3.3 原位置試験

原位置試験は、幌延深地層研究センターの地下坑道内で実施するため、国内からの参加機関である CRIEPI と JAEA がそれぞれ異なる試験手法に着目して試験を実施している。原位置試験の実施に先立ってオンライン形式のタスク会合を実施し、その際の議論の結果を反映した試験計画を実施することで、各参加機関の知見や意向を反映した試験の実施に努めている。

Fig.5 は、タスク A でトレーサー試験を実施するために掘削したボーリング孔のレイアウトである。これらのボーリング孔のうち、試験位置周辺の地質環境や地下水流動の把握を目的として、まず初めに 250-MIG1-1 から 250-MIG1-4 までの 4 本のボーリング孔を掘削した。その後、ボーリング掘削時や透水試験時の水圧応答から、250-MIG1-1 孔と 250-MIG1-2 孔間に水理的連結性が確認されたことから、これら 2 孔間にトレーサー試験に使用する 250-MIG1-5 孔を新たに掘削した。数値解析によりトレーサー試験の事前解析を実施したところ、試験期間が長期に及ぶことが予測されたことから、250-MIG1-2 孔に近接した位置に 250-MIG1-5 孔を掘削した。なお、現状のボーリング孔のレイアウトは、当初計画していたレイアウトとは大幅に異なるものである。タスク A では、実施している試験等の結果に応じて、参加機関からの同意を得た上で、柔軟に計画を変更しながらタスクを進めている。

JAEA は、250-MIG1-2 孔および 250-MIG1-5 孔の 2 孔を利用して孔間トレーサー試験を実施する予定である。現在はトレーサーの注入に向けて予備試験を実施しており、透水試験や注水による準備作業を継続している。トレーサー試験では、過去に他の深度で実施されたトレーサー試験と比較できるように収着性・非収着性のトレーサーを選定する予定である。なお、トレーサー試験後には岩石内の割れ目表面やマトリクス部のトレーサーの分布状況を詳細に把握するために、岩石試料をサンプリングし岩石試料を分析する予定である。岩石試料の分析においても参加機関が分

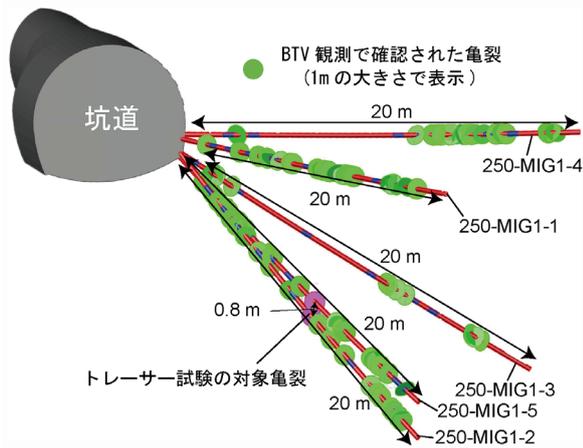


Fig. 5 Layout of boreholes for in situ experiments of task A.

担して実施することで、幅広いデータの取得を期待している。

CRIEPIは250-MIG1-4孔を用いて単孔トレーサー試験を令和5年度に実施しており、令和6年度も引き続き同じボーリング孔における試験を予定している。なお、CRIEPIおよびJAEAが原位置試験を実施する場所に関して、ボーリング孔掘削時や透水試験時の水圧応答から、250-MIG1-4孔は他のボーリング孔と水理的な連結性は認められないことから、JAEAが実施する孔間トレーサー試験とCRIEPIが実施する単孔トレーサー試験は干渉しない(Fig.5)。令和5年度に実施した試験結果の一部に関しては、令和5年度に実施したオンライン形式のタスク会合および令和6年度に実施した合同タスク会合で参加機関に共有されている。

このように原位置試験においても参加機関が異なる試験を分担して実施しており、これらの調査結果を比較することにより、より詳細な物質移行特性や各調査手法の特性に関する理解が期待される。

なお、原位置試験を含む共同研究の実施に際し、現場の状況や原位置試験の実施状況に関する情報を適切に共有することは、活発な議論のためには不可欠かつ重要な課題である。これらの課題に対して、オンライン形式のタスク会合を通して定期的に試験状況や試験結果の情報を共有しているものの、現場の状況を理解するための最も有効かつ効率的な方法は、実際に現場を視察し試験状況や試験に使用している資機材を直接確認することであると考えている。毎試験時に海外からの参加機関が現場を視察することは困難ではあるものの、試験実施時等にはその状況を視察する機会を提供するために、現場視察を目的とした対面形式の現地会合を実施しており各機関に参加を呼びかけている。国内の機関が参加した対面形式の現地会合の写真を Fig.6 に示す。

3.4 数値シミュレーション

原位置試験で取得したデータに基づいた物質移行モデルを構築することを目的として、数値シミュレーションのサブタスクを実施している。令和5年度は解析に使用するトレーサー試験の結果が取得されていないため、過去に深度

350 m で実施した原位置試験結果に基づいたベンチマークテストを実施した。ベンチマークテストでは、パラメータを与えて破過曲線を計算する通常のテストと与えられた破過曲線に対してその破過曲線を再現する逆解析型のテストを実施した。オーストラリアのCSIROがテスト問題を作成し、作成された問題を台湾の工業技術研究院(以下,ITRI)、韓国原子力研究所(以下,KAERI)、国内からは原子力発電環境整備機構(以下,NUMO)およびJAEAが解析した。各機関が使用するソフトウェアに関して、ITRIはThe Geochemist's Workbench®を、KAERIはCOMSOL Multiphysics®による有限要素解析を、JAEAは解析解に基づいた解析を、NUMOはParticle Tracking in Deep Geological Environment(以下,PARTRIDGE)を使用しており、各機関が異なるソフトウェアを使用している(Fig.7)。従って、本サブタスクでは異なるソフトウェアによる解析結果を比較することが可能である。異なるソフトウェアによる結果の比較は、モデルの信頼性の検証に加えて各々のソフトウェアおよび実装されているモデリング手法の特性の理解に有効であると期待している。

今後は、トレーサー試験の試験条件が定まった段階で、トレーサー試験の予測解析やその解析結果に基づいた試験条件の最適化を検討している。その後、原位置トレーサー試験により取得した結果との比較を通してモデルの修正等を行い、フェーズ2で新たに実施するトレーサー試験の立案に反映させる予定である。

4 フェーズ1における成果見込みおよびフェーズ2における展開

フェーズ1では、室内試験および原位置試験のサブタスクを通してモデリングや試験結果の解析に必要なパラメータが取得される見込みである。また、数値解析に関するサブタスクで実施するトレーサー試験の結果の解析により、深度250 m調査坑道周辺の声間層における物質移行特性の理解が促進されるとともに解析モデルが構築される見込みである。このフェーズ1で構築された解析モデルを用いることで、今後フェーズ2において新たに実施する原位置試験の予測解析が可能となる。



Fig. 6 Photo of the on-site meeting for inspection of the in situ tracer experiment.

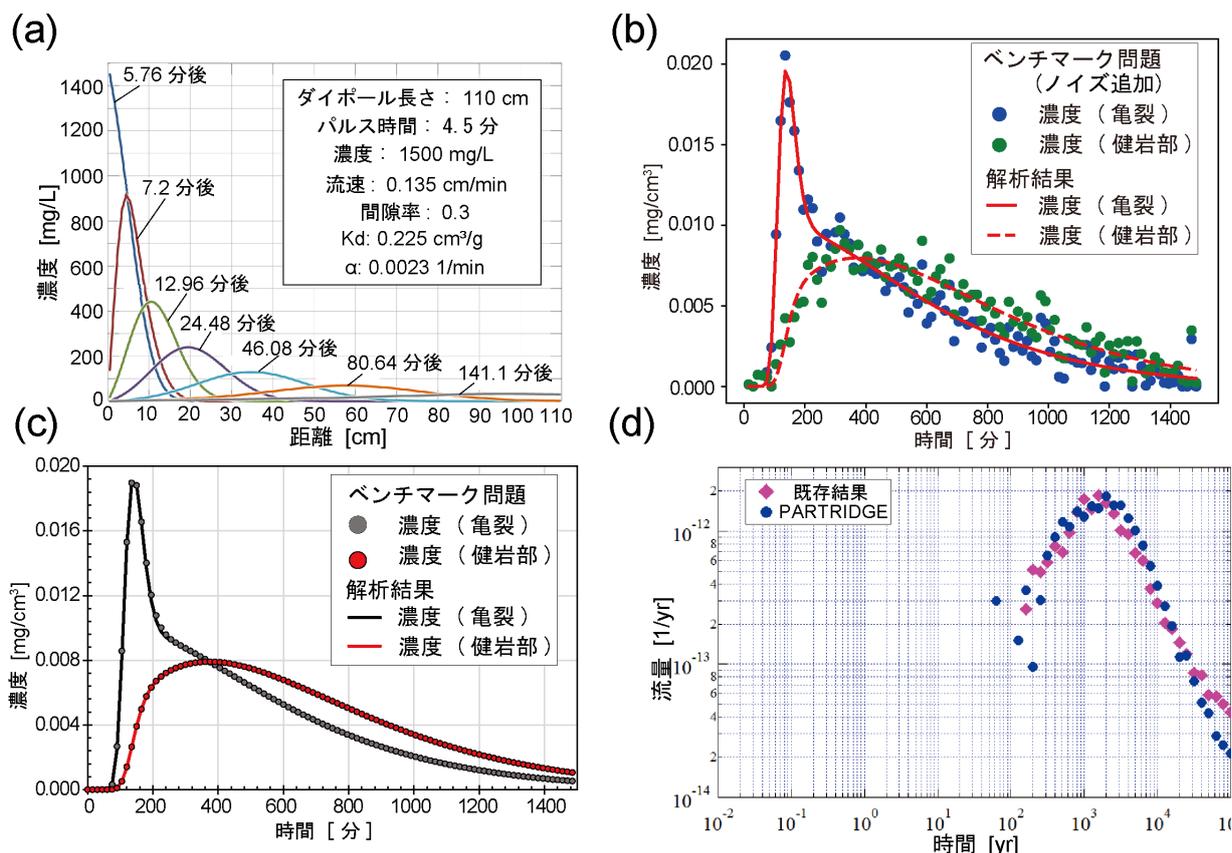


Fig. 7 Example of simulation results by each team for modeling subtask. (a) Result of forward type benchmark test by ITRI with The Geochemist's Workbench®, (b) result of inverse type benchmark test by KAERI with COMSOL Multiphysics®, (c) result of inverse type benchmark test containing artificial noise by JAEA with an analytical solution, and (d) simulation example by NUMO with PARTRIDGE.

タスク A では、原位置試験の計画の立案および試験の実施がタスクに含まれている。フェーズ 1 では、これら試験計画や試験結果に関する議論を、オンライン形式のタスク会合等でフィードバックさせながらタスクを進めてきた。この一連のプロセスにより、各参加機関の原位置試験に関する理解が深まるとともに、地下研究施設で原位置試験を実施するメリットや試験方法に関する知見が共有されることを期待している。また、原位置の地質環境や試験手順に関する理解は、物質移行特性に関する基礎的なデータ並びに解析モデルと併せて、原位置試験の高度化に不可欠である。これらをまとめると、フェーズ 2 で再実施する原位置試験や解析の高度化に向けた、深度 250 m の声間層における物質移行特性の把握と地質環境や試験手法の基礎的な理解・把握がフェーズ 1 における成果として期待される。

5 まとめ

幌延国際共同プロジェクトのタスク A では、岩盤内で発生している現象を適切に考慮した物質移行モデルの構築手法の開発と、地質環境が異なる場合における物質移行特性に関する評価手法およびデータの適用可能性に関する議論を目的として、幌延深地層研究センターの深度 250 m 調査坑道の声間層を対象として原位置トレーサー試験、室内試験および数値解析を実施している。参加機関が分担してこ

れらのサブタスクを実施することにより、各参加機関の意見や知見を取り入れながらタスクを遂行している。

現在進行しているフェーズ 1 では、時間的な制約やこれまで深度 250m の声間層における物質移行試験の実績が無かったことから、原位置試験において現場判断による試行錯誤や試験手順の変更が多く行われている。これらの現場の情報をタイムリーに参加機関と共有していくことがタスクを遂行する上での重要な課題であると考えている。また、堆積岩を対象としない国の機関からの参加もあることから、本研究による研究結果の汎用性を高め、全参加機関に有益な結果を提供するための努力も必要である。

謝辞

本発表は、幌延国際共同プロジェクト (HIP) の成果の一部である。参加機関の研究者には、本タスクの内容充実化のための解析や試験計画に関する助言など、積極的な関与をいただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- [1] 武田匡樹 他: ガスが溶存した地下水を含む泥岩中の割れ目を対象とした原位置トレーサー試験条件の設定に関する検討. 原子力バックエンド研究 25(1),

- pp.3-14 (2018).
- [2] 武田匡樹, 石井英一: 原位置トレーサー試験による堆積岩中の掘削損傷領域内の移流分散評価. 原子力バックエンド研究 **31**(1), pp.3-10 (2024).
 - [3] Ohno, H., Ishii, E., Takeda, M.: Modelling transport pathways of faults with low hydraulic connectivity in mudstones with low swelling capacity. *Geoenergy* **2**(1), geoenergy2023-047 (2004).
 - [4] Tachi, Y. et al.: Diffusion and sorption of Cs⁺, I⁻ and HTO in samples of the argillaceous Wakkanai Formation from the Horonobe URL, Japan: Clay-based modeling approach. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **75**(22), pp6742-6759 (2011).
 - [5] Takeda, M. et al.: An axisymmetric diffusion experiment for the determination of diffusion and sorption coefficients of rock samples. *Journal of Contaminant Hydrology* **123**(3-4), pp114-129 (2011).
 - [6] Hasegawa, T., Nakata, K., Gwynne R.: Measurement on diffusion coefficients and isotope fractionation factors by a through-diffusion experiment. *Minerals* **11**(2), 208 (2021).
 - [7] Okazaki, K. et al.: Permeability, porosity and pore geometry evolution during compaction of Neogene sedimentary rocks. *Journal of Structural Geology* **62**, pp.1-12 (2014).
 - [8] Ozaki, Y., Ishii, E., 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* **31**, 100311 (2022).
 - [9] Ishii, E.: Estimation of the highest potential transmissivity of discrete shear fractures using the ductility index. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **100**, pp.10-22 (2017).
 - [10] Ishii, E.: Far-field stress dependency of the failure mode of damage-zone fractures in fault zones: Results from laboratory tests and field observations of siliceous mudstone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **121**(1), pp.70-91 (2016).