

## 幌延国際共同プロジェクトの現状と今後の展開 (4) タスク C : 実規模の人工バリアシステムの解体試験

大野宏和\*1

高レベル放射性廃物の地層処分において、人工バリア定置後のニアフィールドにおいては、廃棄体の発熱、地下水の浸潤とそれに伴う緩衝材の膨潤応力の発生、間隙水の化学的的特性の変化、オーバーバックの腐食など複数の現象が相互に影響し合った複雑な系となることが予想される。地層処分の安全評価においては、このような熱-水-力-化学連成現象 (THMC 連成現象) を予測するための解析コードの整備が重要となる。幌延深地層研究センターの地下施設 (幌延 URL) の深度 350 m 調査坑道では、処分孔竖置き方式の実規模大の人工バリアを堆積岩に定置し、坑道の一部を埋め戻した人工バリア性能確認試験を実施し、ニアフィールドの過渡期状態変遷の評価に必要なデータを緩衝材や埋め戻し材中に設置したセンサーで取得している。幌延国際共同プロジェクトのタスク C は、それらのデータに加えて、人工バリア性能確認試験の解体試験で取得されるデータを用いて、連成現象の理解や解析コードの検証を国際共同プロジェクトとして実施するものである。

**Keywords:** 幌延国際共同プロジェクト, タスク C, 人工バリア性能確認試験, 解体試験, 連成解析

In the geological disposal of high-level radioactive waste, after emplacement of an EBS, the near-field environment is affected by processes such as heat release from the waste, groundwater infiltration into the EBS, swelling and deformation of the buffer material, and chemical reactions between groundwater and minerals. It is crucial to develop simulation codes to evaluate such coupled thermal-hydraulic-mechanical-chemical (THMC) processes for safety assessment of geological disposal. The full-scale vertical-emplacment EBS experiment (Horonobe EBS experiment) has been undertaken in the 350 m gallery of the Horonobe Underground Research Laboratory (URL) with the Horonobe geological environment. In the Horonobe EBS experiment, various sensors were installed in the buffer and backfill material to obtain the data required to evaluate coupled THMC processes in near-field. In Task C of the Horonobe International Project (HIP), the dismantling experiment of the Horonobe EBS experiment will be carried out and the data obtained from this experiment will be used to understand the coupled processes and to evaluate the simulation code.

**Keywords:** Horonobe International Project (HIP), Task C, Full-scale Engineering Barrier System performance experiment, Dismantling experiment, Coupled simulation

### 1 はじめに

高レベル放射性廃物の地層処分において、人工バリア定置後のニアフィールドにおいては、廃棄体の発熱、地下水の浸潤とそれに伴うベントナイト材料の膨潤応力の発生、間隙水の化学的的特性の変化、オーバーバックの腐食など複数の現象が相互に影響し合った複雑な系となることが予想される。このような熱-水-力-化学連成現象 (THMC 連成現象) は、人工バリアの挙動評価や核種移行挙動評価へ影響を与える可能性があるため、適切に現象を評価するための技術開発が重要である。そのような背景のもと、様々な要素試験や工学規模試験などが実施され、連成解析コードの開発が行われている[1-2]。解析コードの検証においては、個々の要素試験から開発された連成モデルが、実規模大の原位置試験で発生する THMC 連成現象を適切に表現することができるのかを確認することも重要である。

日本原子力研究開発機構 (JAEA) 幌延深地層研究センターの地下施設 (幌延 URL) では、緩衝材が不飽和から飽和に至るまでの過渡的な期間を対象とした人工バリア周辺の THMC 連成現象の理解や解析コードを検証するためのデータ取得を目的に、第 2 次取りまとめ[3]に示された軟岩系岩盤における処分孔竖置き方式の実規模大の人工バリアを地下に定置し、坑道の一部を埋め戻した人工バリア性能確

認試験を実施している[4]。Fig.1 に人工バリア性能確認試験のレイアウトを示す。この試験の主な特徴は、実規模大の原位置試験であること、処分孔竖置き方式であること、坑道の一部を原位置の掘削ズリを使用して埋め戻していること、新第三紀堆積岩・塩水系地下水環境での試験であることである。

人工バリア性能確認試験は、平成 27 年 1 月から廃棄体の発熱と岩盤からの地下水浸潤を模擬した加熱・注水を開始し、設置したセンサーにより内部の様子をモニタリングしている[5]。計測データは、連成現象の理解や解析コードを検証するためのデータとして使用されるとともに、国際共同研究 DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments) を通して、複数の海外機関の解析コードの検証データとしても使用されている[6]。DECOVALEX は、廃棄体やその周囲で起こる THMC 連成現象を表現する連成モデルの開発と確認を目的とした国際共同研究である。このように、原位置試験を対象とした再現解析に加えて、他の解析コードと比較することは、解析コードの妥当性評価や高度化を行う上で重要な取り組みであると考えられる。

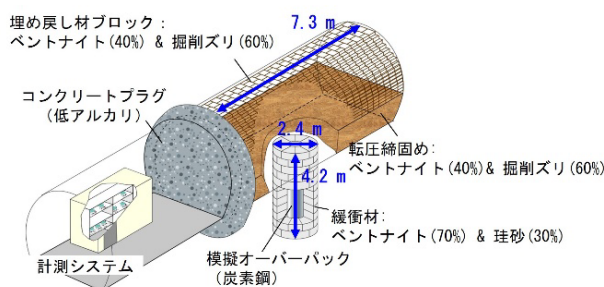


Fig.1 Layout and scale of the Horonobe EBS experiment.

Current Status and Future Prospects of the Horonobe International Project (HIP) (4) Task C: Full-scale Engineering Barrier System (EBS) Dismantling Experiment by Hirokazu, OHNO (ohno.hirokazu@jaea.go.jp)

\*1 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター

Japan Atomic Energy Agency, Horonobe Underground Research Center  
〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進 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る。

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							
	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12				
プロジェクト年次	1				2				3				4				5				6				7			
プロジェクトフェーズ	フェーズ1								フェーズ2																			
C-1 解体試験前のデータの取得	■				■				■				■				■				■							
C-2 解体試験計画の策定	■				■				■				■				■				■							
C-3 解析コードの準備	■				■				■				■				■				■							
C-4 予測解析	■				■				■				■				■				■							
C-5 原位置試験の解体	■				■				■				■				■				■							
C-6 解析コードの妥当性評価および更新	■				■				■				■				■				■							

Fig.2 Planned schedule of each subtask in Task C

センサーによるデータ計測では、温度、水分量、応力などの時間変化をモニタリングしているが、より詳細な水分量、乾燥密度、間隙水組成などの空間分布や材料界面の現象を把握するためには、直接内部の状態を確認するための解体試験が必須である[7-9]。これらの点を踏まえタスク C は、人工バリア性能確認試験の解体試験を通して人工バリア周辺の THMC 連成現象の理解や解析コードの検証を国際共同プロジェクトとして実施するものである。本稿では、タスク C の概要について紹介する。

2 目的および実施工程

タスク C の目的は、人工バリア性能確認試験の解体試験を実施することで、設置センサーのみでは把握できないより詳細な飽和度や乾燥密度などの分布や各材料界面(粘土, 金属, コンクリート, 岩盤)の状態変化などの THMC 連成現象に関わるデータを取得し、現象理解と数値解析技術の検証を行うことである。タスク C は Fig.2 に示すように 6 つのサブタスクに分かれており、既設センサーによるデータ計測の継続、解体試験計画の策定、解体試験の実施および解体試験のデータを使用した解析コードの検証を予定している。現在のフェーズ 1 では、計測されたデータを基に解体試験のサンプリング案などについて参加機関と議論している。以下にそれぞれのサブタスクの概要を示す。

3 実施内容

3.1 データ計測の継続 (C-1)

サブタスク C-1 のデータ計測の目的は、連成現象の理解や解析コードの検証のために必要なデータを取得することである。人工バリア性能確認試験では加熱温度と地下水注水量を段階的に変化させ、各材料における温度、飽和度、全圧などの変化を設置したセンサーによってモニタリングしている。加熱温度については、ガラス固化体の発熱量の経時変化による影響を把握するために Fig.3 に示すように初期は模擬オーバーパック(OP)表面を約 90 °C に設定し、その後、令和 2 年からは段階的に設定温度を低下させ、現在はヒーター停止した状態で試験を継続している。注水は、試験ピットの底部および埋め戻し材外周部に設置した注水管から原位置地下水を注水している。なお、幌延の地下水は塩水系地下水であるため、それらの影響を確認することも重要な課題の一つである。タスク会議では、計測データを共有し、加熱注水によって引き起こされた連成現象につ

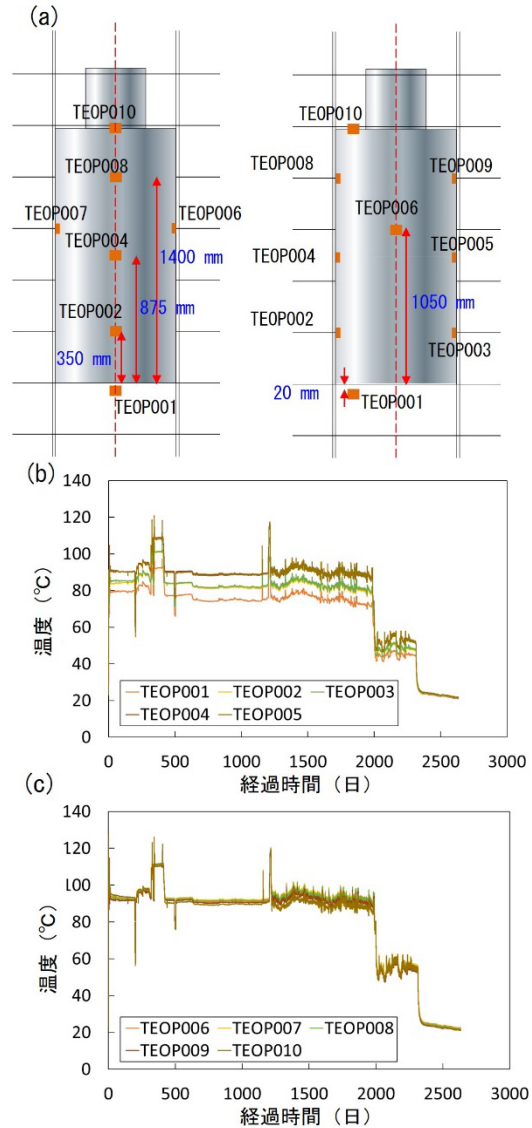


Fig.3 (a) Temperature sensor location and (b, c) measured simulated overpack surface temperatures at sensors

いて参加機関と議論している。

3.2 解体試験計画の策定および解体試験の実施 (C-2, 5)

解体試験計画の策定では、連成現象の理解や解析コードを検証するために取得すべきデータを特定するために、人工バリア性能確認試験の計測データや事前解析結果を基に参加機関で議論している。また、解体試験では、試験坑道 4 の隣に解体試験用の試験坑道 7 を掘削し、そこから埋め戻し部へつながるアクセス坑道を掘削することを予定して

いる。試験坑道 7 は、令和 5 年に掘削が完了しており、アクセス坑道については、試験エリアの擾乱を防ぐため、解体試験直前の令和 8 年に掘削する予定である (Fig.4)。

以下には、これまでに議論されたサンプリング計画の概要について示す (Fig.5)。

### 3.2.1 埋め戻し部のサンプリング

試験坑道 4 の埋め戻し部は、掘削ズリ 60 wt%、ベントナイト (クニゲル V1) 40 wt% を混合した埋め戻し材で埋め戻されており、地下水の浸潤に伴う埋め戻し材の水分量の増加や膨潤が見込まれる。そのため、解体試験では水分量、乾燥密度、間隙水組成、鉱物組成などの状態変化を調査するためのサンプルを取得する。また、試験坑道 4 は、低アルカリ性の吹付けコンクリート (坑道支保) で覆われているため、コンクリートと接している埋め戻し材や岩盤の界面でのセメント影響を調査するためのサンプルも取得する計画である。

### 3.2.2 試験孔部のサンプリング

試験坑道 4 の底盤から掘削した直径 2.4 m、深さ 4.2 m の試験孔部には、模擬 OP と緩衝材が設置されている。緩衝材は 70 wt% のベントナイト (クニゲル V1) と 30 wt% の珪砂を混合した材料を乾燥密度  $1.8 \text{ Mg/m}^3$  に圧縮成型したブロック、模擬 OP は直径 820 mm、高さ 1730 mm の炭素鋼 (SFVC1) で構成されている。緩衝材については、埋め戻し材と同様に水分量、乾燥密度、間隙水組成、鉱物組成などの状態変化を調査するためのサンプルを取得し、模擬 OP は、腐食状況を確認するために回収する。また、材料界面の現象調査として、緩衝材と模擬 OP 界面における腐食による影響や緩衝材と埋め戻し材界面における膨潤変形挙動などを確認する計画である。

### 3.2.3 設置センサーの回収

埋め戻し部や試験孔部には様々なセンサーを設置し、内部の状態をモニタリングしているが、埋め戻し後はセンサーの交換や校正ができないため、状態を確認するためには直接回収して分析する必要がある。そのため、解体試験では設置したすべてのセンサーを回収し、センサーの校正や分析を行い、モニタリングデータの妥当性の確認や故障原因の分析を行う予定である。

## 3.3 連成解析 (C-3, 4, 6)

サブタスク C-3, 4, 6 は連成解析に関するサブタスクである。これらのサブタスクでは、参加機関が保有するそれぞれの解析コードで連成解析を実施し、それらの解析結果を比較することで、解析モデルの評価を実施することを予定している。

サブタスク C-3 は、原位置試験の連成解析に向けた準備期間であり、主に参加機関が使用する解析コードの特徴を把握することやモデル独自のパラメータを室内試験結果から推定することが主な目的である。現在は、タスク会議を通して各機関が保有する解析コードの特徴を共有するとともに、室内試験結果を使用したベンチマークテストを開始している。ベンチマークテストの対象とした室内試験は、緩衝材を対象とした膨潤試験、等温条件下の浸潤試験、温度勾配条件下の浸潤試験であり、それらの結果を比較する

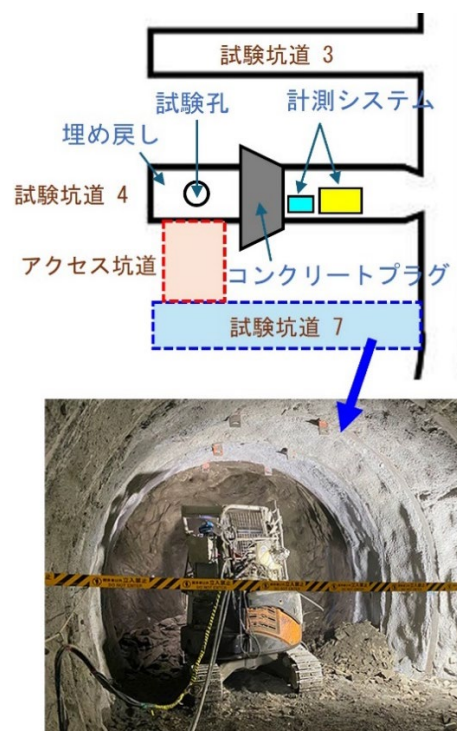


Fig. 4 Excavation of Niche No.7

ことで、各プロセスの再現性などを確認する予定である。

サブタスク C-4, C-6 では、室内試験よりも複雑な系である原位置試験を対象とした連成解析を予定しており、それぞれ解体試験前の予測解析、解体試験後のキャリブレーション解析を予定している。解析結果の比較に際しては、比較的単純な系での比較結果 (サブタスク C-3) も参考にして、原位置試験のモデリングに関する議論を進める予定である。

## 4 フェーズ 1 における成果見込み及びフェーズ 2 における展開

フェーズ 1 の活動内容は、解体試験計画の策定と連成解析コードの準備など主にフェーズ 2 に向けた準備である。解体試験計画の策定においては、人工バリア性能確認試験の状況を理解するために、試験の仕様、モニタリングデータ、事前のシミュレーション結果の一例などをタスク会議で共有することで参加機関の理解を深めており、フェーズ 2 における解体試験で取得すべき情報や参加機関のニーズなどについて議論している。フェーズ 1 では、それらの意見を集約し、解体方法、分析項目、サンプリング位置などの計画案を提示する予定である。また、フェーズ 2 での原位置試験を対象とした連成解析の実施に向けて、参加機関が保有する解析コードの特徴を共有するとともに個別の室内試験結果を使用したベンチマークテストを進めている。それらを通してフェーズ 1 では、原位置試験の解析結果を比較するうえで優位な情報となりうる各解析モデルの特徴などを整理する。これらを達成することで、フェーズ 2 における解体試験や連成解析の比較などを円滑に進めることができると考えられる。

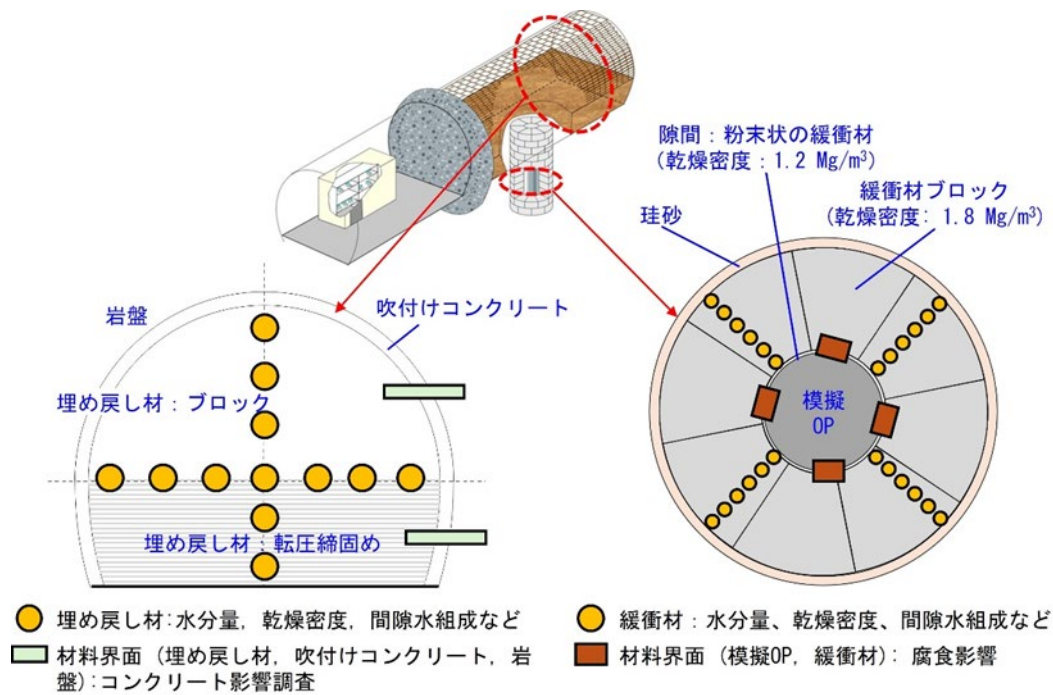


Fig. 5 Planned sampling locations and analytical items

## 5 まとめ

幌延国際共同プロジェクトのタスクCで対象とする人工バリア性能確認試験は、新第三紀堆積岩・塩水系地下水が分布する幌延 URL の地質環境を一例とした、実規模大の原位置試験であり、令和8年から開始する予定の解体試験で得られる情報は、塩水系地下水環境下におけるニアフィールドの連成現象を理解するうえで重要な情報となる。解体試験を含む原位置試験の解釈には様々な専門知識が必要とされるため、参加機関が保有する専門知識やそれぞれの解析コードを使用した評価結果を組み合わせることで、人工バリア周辺のニアフィールド領域における THMC 連成現象の理解と評価技術の高度化を目指す。

## 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] Ohnishi, Y., Shibata, H., Kobayashi, A: Development of finite element code for the analysis of coupled Thermo-Hydro-Mechanical behaviours of a saturated-unsaturated medium. In: Proc of Int Symp on Coupled Process Affecting the Performance of a Nuclear Waste Repository, pp. 263–268 (1985).
- [2] 伊藤彰, 川上進, 油井三和: 高レベル放射性廃棄物処分におけるニアフィールドの熱-水-応力-化学連

成モデル/解析コードの開発, JNC TN8400 2003-032, 核燃料サイクル機構 (2004).

- [3] 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 99-024, 核燃料サイクル機構 (1999).
- [4] 中山雅, 大野宏和: 幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験—350m 調査坑道 における人工バリアの設置および坑道の埋め戻し—. JAEA-Research 2019-007, 日本原子力研究開発機構 (2019).
- [5] 中山雅, 大野宏和, 中山真理子, 小林正人: 幌延深地層研究センターにおける人工バリア性能確認試験 計測データ集(平成29年度), JAEA-Data/Code 2019-003, 日本原子力研究開発機構 (2019).
- [6] Sugita, Y., Kwon, S., Lee, C., Massmann, J., Pan, P-Z., Rutqvist, J.: DECOVALEX-2015 project Task B2 final report (2016).
- [7] Mayor, J. C., and Velasco, M.: EB dismantling synthesis report. Technical report, Long-term Performance of Engineered Barrier Systems PEBS, deliverable D2.1-8 (2014).
- [8] García-Siñeriz, J-L., Abós, H., Martínez, V., De la Rosa., C., Mäder., U and Kober, F., FEBEX DP: Dismantling of heater 2 at FEBEX 'in situ' test; Description of operations. Nagra NAB 16-11, Nagra, Wetingen, Switzerland (2016).
- [9] Svemar, C., Johannesson, L-E., Grahm, P., Svensson, D., Kristensson, O., Lönnqvist, M., Nilsson, U., Pototype Repository. Opening and Retrieval of outer section of Prototype Repository at Äspö Hard Rock Laboratory, Summary Report, SKB TR-13-22, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Stockholm (2016).