

# 原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT FUNDING AND RESEARCH CENTER TOPICS

2025.1.NO.152

## 目次

年頭のご挨拶 .....	①
センターの活動状況 .....	②
地層処分の開始が目前に迫るフィンランド .....	④
ベントナイト緩衝材中のガス移行現象の理解と移行解析手法の開発 ー現状と今後の展望ー .....	⑦

## 年頭のご挨拶

謹んで新春のお慶び申し上げます。

昨年も10月まで記録的な暑さが続き、秋があっという間に過ぎ去ってしまいました。温暖化の影響といわれる様々な事象が発生し、地球温暖化対策の重要性が改めて認識されたのではないのでしょうか。世界的には、その対策として原子力を活用した様々な取組が進められ、小型モジュール炉を含む新規原子炉の計画や、先進的原子炉実証プログラムが進められています。我が国でも、原子力発電所の再稼働や日本原燃株式会社の六ヶ所再処理工場の竣工を目指した取組が進められています。

放射性廃棄物に関連する進展としては、福島第一原子力発電所でのデブリの回収、使用済燃料の中間貯蔵施設であるリサイクル燃料備蓄センターの操業開始がありました。また、地層処分に関しては、北海道の神恵内村及び寿都町での文献調査報告書の審査が終了し、新たに佐賀県の玄海町での文献調査が進捗しているところです。これら3地点のサイト選定の今後の進展に期待しています。

このような状況のなかで、調査研究部門は、放射性廃棄物の処分の着実な実施に向けて、社会全般からの要請に応え、関係機関と連携し、より実践的な貢献を行いたいと考えています。また、研究の成果や国内外の情報については積極的な発信・提供を行うとともに、人材育成への取組を進めるため、講演会・セミナー開催等を行います。

高レベル放射性廃棄物等の最終処分の資金管理業務においては、原子力発電所の再稼働により、最終処分積立金の増加が予想される一方、今後、想定される金融環境の変化に対して的確な対応を行うように努め、確実な資金管理を実施してまいります。

様々な変化が予想される中で、引き続き、真摯に事業を進めたいと存じますので、ご指導とご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター  
理事長 武谷 典昭

## センターの活動状況

### 成果等普及活動の実施状況

#### 2024年度 第3回原環センター講演会の開催

2024年度第3回原環センター講演会を対面及びオンラインで開催し、104名（対面21名、オンライン83名）の方にご参加いただきました。

2017年に公表された科学的特性マップでは、好ましい特性が確認できる可能性が相対的に高い地域のうち、沿岸部が「輸送面でも好ましい」地域として示されました。本講演では、沿岸部での地層処分を想定して、原環センターがこれまでに実施してきた工学技術に関する技術開発について、特に近年の成果を中心に紹介しました。

開催日時：2024年11月8日（金）14：00～16：00

対面会場：原環センター 第1、2会議室

演 題：沿岸部における地層処分の工学技術に関する課題への取り組み

講 演 者：地層処分バリアシステム研究開発部 大和田 仁  
地層処分工学技術研究開発部 林 大介  
地層処分工学技術研究開発部 菊池 広人



#### 2024年度 第3回原環センターセミナーの開催

第3回原環センターセミナー「放射性廃棄物処分の安全評価の基礎Ⅲ」を以下のとおり開催しました。このセミナーでは、放射性廃棄物処分の安全評価の基礎的知識の上に、最新の実践的な安全評価の体系を講義と演習で理解することを目標とし、講師の指導の下、GoldSim Playerを使用した解析演習等を行い、安全評価の基礎の理解を深めていただきました。

開催日時：2024年11月19日（火）9：30～17：30

開催会場：京都大学東京オフィス 大会議室 A,B

講 師：東海大学 工学部 応用化学科  
教授 若杉 圭一郎 氏

プログラム：

講義1：安全評価の概要と評価事例

講義2：核種移行解析で考慮するプロセスと基本式

講義3：総合安全評価による処分システム性能の理解



## 2024年度 原環センター研究発表会の開催

2024年度原環センター研究発表会を対面及びオンラインで開催し、各界から186名（対面75名、オンライン111名）の方に参加いただきました。武谷 典昭理事長の開催挨拶に引き続き、原環センターからの研究発表と東京大学名誉教授 田中 知 氏による特別講演「放射性廃棄物埋設における安全確保の考え方～世界から学ぶ性能照査の重要性～」を行いました。

開催日時：2024年12月13日（金）13：30～16：30

開催形式：対面及びオンライン方式

開催場所：星陵会館ホール（星陵会館）

プログラム：

開会挨拶 理事長 武谷 典昭

研究発表 地層処分施設の設計・操業技術に関する最適化の考え方

地層処分工学技術研究開発部

川久保 政洋、小林 正人、阿部 孝行

特別講演 放射性廃棄物埋設における安全確保の考え方

～世界から学ぶ性能照査の重要性～

東京大学名誉教授 田中 知 氏



研究発表での質疑応答



武谷理事長の開会挨拶



研究発表（川久保）



研究発表（小林）



研究発表（阿部）



田中氏の特別講演

## 地層処分の開始が目前に迫るフィンランド

技術情報調査部  
吉田 崇宏

フィンランドというとムーミン、サンタクロース、オーロラなどが一般的に連想されるだろう。一方で、フィンランドは第二次世界大戦では冬戦争・継続戦争によりソ連に対して領土割譲や賠償金を課され、冷戦期にはソ連の影響を受けていた歴史もある。そのようなフィンランドでは、これまでに世界のどの国も実現していない高レベル放射性廃棄物の地層処分場の操業が秒読み段階に入っており、この点において世界的に注目を集めている。処分場を運営するポシヴァ社の社長イルッカ・ポイコライネン氏は、高レベル放射性廃棄物の最終処分が開始されれば、原子力発電のライフサイクルに欠けていた部分が全て揃うこととなり、ポシヴァ社、フィンランドのみならず世界的に歴史的な日となるだろうと述べている<sup>1)</sup>。

多くの国では、処分場サイトの選定で地元の理解を十分得られなかったなどの理由のため、サイト選定において挫折を経験し、選定のやり直しなどを行っている。本稿では、フィンランドでのこれまで

の地層処分計画の経緯を示したうえで、地層処分計画が比較的順調に進んでいる要因を考察し、我が国の地層処分事業への示唆となるものを提示したい。

### これまでの道のり

フィンランドでは1983年の政府原則決定により、使用済燃料の最終処分地を2000年末までに選定できるように、サイト調査を3段階で進めることが規定され、処分地の選定が開始された。当時の処分実施主体であり、オルキオト原子力発電所を運転するテオリス・デン・ヴォイマ社（TVO社）は、最初にフィンランド全土から、地質学的な絞り込みや人口密度・使用済燃料の輸送等の環境要因による絞り込みを行い、1985年に102カ所の調査地域（サイト）を選定した。そのうち、5カ所のサイトで地表からのボーリング等による概略サイト特性調査（1986～1992年）、最後に4カ所のサイトでより詳細なサイト特性調査（1993～2000年）が行われた。

TVO社の後継で処分実施主体となったポシヴァ社は、1999年にそれまでに残っていた4カ所のサイトから、エウラヨキ自治体のオルキオトを使用済燃料の処分地として選定し、処分場の建設計画について政府へ原則決定\*申請を行った。規制機関である放射線・原子力安全センター（STUK）はポシヴァ社の申請書に対して評価を行い、2000年に肯定的な見解書を政府に提出、また同年、エウラヨキ自治体議会が処分場の受け入れに関して投票を行い（賛成20、反対7）、受け入れを表明した。これらの結果を受けてフィンランド政府は2000年12月に原則決定を行い、翌2001年の国会による承認を受けて、オルキオトが使用済燃料の最終処分地として決定した。

その後、ポシヴァ社は地下特性調査施設（ONKALO<sup>TM</sup>）での調査研究を踏まえて、2012年に使用済燃料処分場の建設許可を申請、2015年にフィンランド政府が許可を発給し、ポシヴァ社は2016年に処分場の建設を開始して、2021年には処分場の操業許可を申請している。現在、ポシヴァ社は2020年代半ばの処分操業開始を目指して最終処



図1 フィンランドの原子力関連施設の所在地

分場の試運転（試験操業）を行っている<sup>1)</sup>。（※フィンランド特有の制度であり、事業者による事業計画がフィンランドの「社会全体の利益に合致する」ことを政府が判断する。）

### 地層処分事業への信頼の要因

フィンランドでは、環境に重大な影響が生じる可能性がある事業について、市民を含む利害関係者が情報を事前に入手し、計画策定や意思決定に参加する機会を増やすことを目的とした環境影響評価（EIA）手続法が制定されている。ポシヴァ社は、サイト選定の終盤（1997～1999年頃）に、環境影響評価を実施し、その一環として、地元の住民向けの公開対話集会、ワーキンググループ会合、小グループ会合などの対話活動や、各世帯へのニュースレターの配布、展示会の企画・開催などの情報発信活動を行った。

当時のエウラヨキ自治体議員であったアルツィ・ルカンドル氏によれば<sup>2)</sup>、EIA プロセスは、利害関係者が参加でき、批判、疑問をぶつけることや、さらなる説明を要求できる優れた対話の場を提供したと評価している。また、ルカンドル氏によれば、エウラヨキ自治体住民による処分場受け入れにおける主要な要因として、処分実施主体からの透明性のあるオープンな情報提供、オルキオト原子力発電所の良好な運転実績、発電所で働く住民からの情報の広がり、オルキオトに世界中から廃棄物が

持ち込まれる懸念が無くなったこと（1994年原子力法改正により放射性廃棄物の輸出入が禁止された）、規制機関への人々の信頼などを挙げている。

エウラヨキ自治体では1990年代後半頃、歴史的な邸宅を活用していた高齢者ホームの老朽化が問題となっていたが、自治体とポシヴァ社の話し合いにより、処分地選定後にポシヴァ社が新しい高齢者ホームの建設と歴史的邸宅の改修に関して支援することになったことも、処分場の受け入れにおいて重要な点であった。

また、フィンランドでは、フィンランドエネルギー産業協会が全土を対象とした世論調査として、地層処分場に対するアンケートを1983年以来毎年実施している。「原子力廃棄物はフィンランドの基盤岩にある最終処分場に安全に処分できるか？」という問いに対し、当初は否定的な回答の割合が多かったが、徐々に肯定的な回答が増加し、最近の2020年頃以降は肯定的な意見が否定的な意見を上回るようになっている（図2）。

STUKによれば、地層処分に対する信頼がゆっくりであるが着実に高まっているのは、処分実施主体と規制機関の両方が、公衆やその他の利害関係者とコミュニケーションを図るために、長期にわたって体系的に取り組んできた結果であるとの見解を示している<sup>3)</sup>。筆者はこの他に、世界的にONKALOの知名度が上がったこと、フィンランドが地層処分分野でトップランナーであることがイメージアップにつながり、好意的な意見の増加に影響していると考えている。

### 最後に

オルキオト原子力発電所では欧州加圧水型原子炉である3号機が2023年4月より商業運転を開始した。これによりフィンランドの電力供給に占める原子力の割合は2022年の29.7%から2023年に41%までに大きく増加し、その一方で電力の純輸入量（net imports）の割合は2022年の15.3%から2023年には2.2%までに減少している<sup>4)</sup>。2023年に発足したペッテリ・オルポ政権は、政府計画<sup>5)</sup>において、二酸化炭素排出量削減に向けてクリーンエネルギーへの移行を推進し、かつ、ロシアに対するエネルギー依存度を減らしエネルギー自給率を持続的に向上させることを目標として、その一環として小型モジュール炉（SMR）導入の促進などさらなる原子力推進の姿勢を示している。

日本においてもGX（グリーントラン

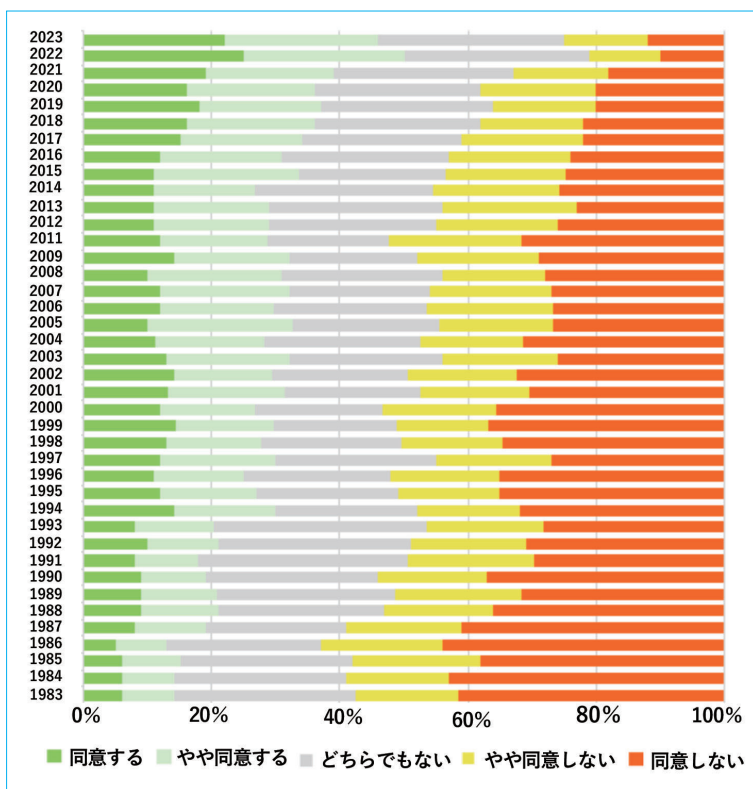


図2 世論調査の結果（参考資料<sup>3)</sup>等を基に作成）

---

スフォーメーション) 実現に向け、エネルギー安定供給とカーボンニュートラルの実現のため、原子力政策においては原子炉の再稼働を進めることや次世代革新炉の開発・建設に取り組むこと、また、最終処分の実現に向けた取組の強化が示されており<sup>6)</sup>、地層処分の実現がエネルギー政策等に寄与する部分大きい。そのためにはフィンランドのように規制機関も関与して、体系的な取組を継続することで地層処分に対する信頼を獲得することや、地域の将来ビジョンを一緒に考えることが重要となるだろう。

(本稿の内容は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業である「放射性廃棄物海外総合情報調査」の成果に基づいています。また、2024年11月時点の情報に基づいています。)

#### 参考文献

- 1) ポシヴァ社プレスリリース (2024年8月30日)
- 2) OECD/NEA, Stepwise decision making in Finland for the disposal of spent nuclear fuel, 2002.
- 3) STUK, 8th Finnish National Report as referred to in Article 32 of the Convention, STUK-B 329, 2024.
- 4) Finnish energy, Energy Year 2023 Electricity, 2024. 等
- 5) A strong and committed Finland: Programme of Prime Minister Petteri Orpo's Government 20 June 2023.
- 6) GX 実現に向けた基本方針～今後10年を見据えたロードマップ～ (2023)

# ベントナイト緩衝材中のガス移行現象の理解と 移行解析手法の開発 —現状と今後の展望—

地層処分バリアシステム研究開発部  
八木 翼

## 1. 背景

TRU 廃棄物の処分では、水の放射線分解や金属の嫌気性腐食に伴う水素ガスの発生が想定される。発生ガスによる処分場の安全性への影響としては様々な懸念点が存在するが、ここでは主に緩衝材中での地下水の移行への影響を取り扱う。廃棄体パッケージ開口後、TRU 廃棄物から核種が地下水に溶出し、緩衝材中を拡散によって移行する。その際に、発生したガスの体積の分だけ地下水が押し出されることや、ガスが緩衝材内部に蓄圧され、蓄圧したガスが緩衝材を押しつけるように移動し、やがて端部まで到達した際に、放射性核種が溶解した水がガスとともに一気に排出されること（緩衝材の破過現象）により核種移行が加速することや、破過に伴う損傷によりベントナイト緩衝材が有する自己修復性に影響することが懸念される。そのため、処分場での安全性を説明するに当たり、発生ガスの押し出しによる核種移行の加速やガスの蓄圧による緩衝材の破過現象の影響を評価することが必要である。

本研究の目的は、ベントナイト緩衝材中でのガス・水移行特性や緩衝材の破過現象、および緩衝材に期待される自己修復性の発揮について、試験の実施により確認し、それら現象の核種移行への影響を評価可能なガス移行解析手法を開発することである。

## 2. TRU 廃棄物処分場でのガス発生

図1は第2次 TRU レポート<sup>1)</sup>での TRU 廃棄物処分場でのガス発生速度の評価である。有機物の微生物分解由来の発生量は、放射線分解や金属腐食由来のガス発生量と比較すると少ないことがわかる。また、TRU 廃棄物の処分では、廃棄体からの放射線分解によるガス発生量が多く、高レベル放射性廃棄物の処分との大きな違いでもある。

表1は TRU 廃棄物の NUMO 包括的技術報告書<sup>2)</sup>での整理である。使用済燃料の再処理等により発生する TRU 廃棄物は、その性状に基づき、4つのグループに区分される。その

うち、グループ2やグループ4Hは発熱量が多く、また、グループ2は廃棄体の数も多いため、ガスの発生に関しては、このグループ2とグループ4Hの寄与が大きい。

ガス発生の主な機構としては水の放射線分解や金属の嫌気性腐食による水素ガスの発生が想定される。

各廃棄物の固型化材中の間隙水、グループ3のアスファルト、セメント系のパッケージ内充填材や廃棄体間充填材中の間隙水、緩衝材やセメント系の構造成造材料に存在する間隙水が放射線のターゲットとなり、放射線分解により水素ガスが発生する。

一方、廃棄物として持ち込まれる廃棄体パッケージや、廃棄体の金属容器、金属製の構造成造材料から、金属腐食に伴う水素ガスの発生が想定される。

廃棄物をモルタルやセメント等の固型化材によりドラム缶の中に固化し（圧縮充填するグループ2は除く）、それを廃棄体パッケージ内に挿入・封入し、それらを集積配置して処分を進めていくのが、TRU 廃棄物の処分形態である。表面線量の高いグループ4Hについては、廃棄物の周辺に存在する固型化材中の水分由来のガス発生量が大きく、TRU 廃棄物の中でも最もガス発生量が大きくなるが、第2次

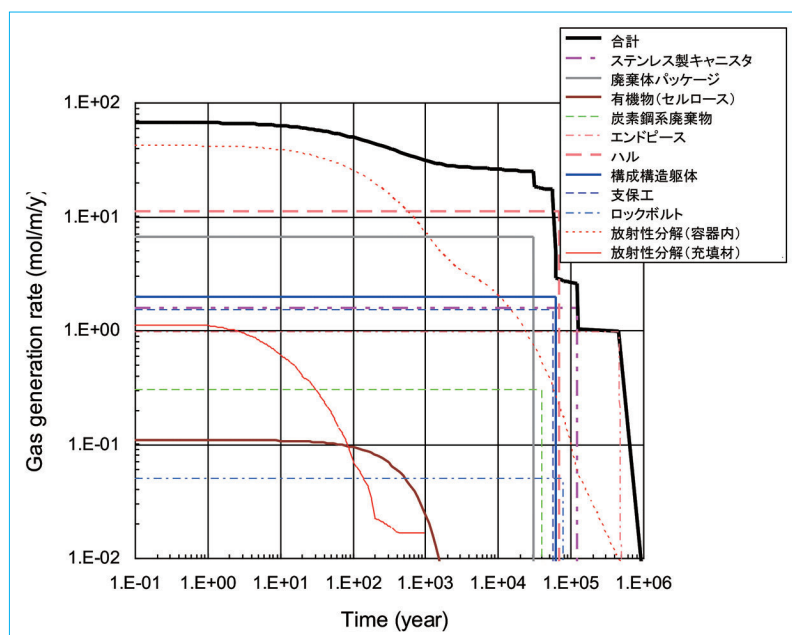
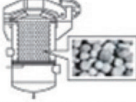






図1 第2次 TRU レポートでのガス発生速度評価（廃棄物 Gr.2）

表1 NUMO 包括的技術報告書<sup>2)</sup>における TRU 廃棄物の区分

TRU廃棄物				
廃棄物の種類	廃銀吸着材 	燃料の部品 エンドピース ハル 	低レベル濃縮廃液 	可燃、難燃、不燃廃棄物 可燃物(紙、布等) 難燃物(ゴム手袋、ビニール等) 不燃物(配管、工具、ガラス等) 
区分	グループ1	グループ2	グループ3	グループ4L (低発熱性) / グループ4H (発熱性)
含まれる核種	<sup>129</sup> I	AP: <sup>14</sup> C、 <sup>60</sup> Co、 <sup>125</sup> Sb U、Pu、FP、MA	U、Pu、FP、MA	U、Pu、FP、MA
固型化方法	(レファレンスは)セメント固化	【圧縮充填】	モルタル固化、セメント固化及びアスファルト固化	モルタル固化、セメント固化
廃棄体の形態	(レファレンスは)ドラム缶	キャニスタ	ドラム缶	ドラム缶、インナーバレル、ハル缶
処分容器	廃棄体パッケージ(閉じ込め性の機能を有する廃棄体パッケージB) 			

TRU レポート<sup>1)</sup>では明確にこれが区分されていないため評価されていなかった。このことはNUMO 包括的技術報告書<sup>2)</sup>でのガス発生量の評価結果との差異となっている。

図2はTRU 廃棄物のうちグループ2を対象とした処分坑道断面であり、廃棄体パッケージが中央に定置され、パッケージ間充填材を充填し、その周りを緩衝材で覆い、上部を埋戻し材で埋め戻す。

グループ2はセメント等による固化処理をしないため廃棄物からの放射線分解ガスは発生しないが、廃棄物として持ち込まれた金属や廃棄体の金属容器、金属製の構造材料の金属腐食により緩衝材の内部にガスが発生する。

一方、廃棄体パッケージ内の充填材や廃棄体間の充填材中の自由水や緩衝材中の間隙水の放射線分解による水素ガスの発生も見込まれる。

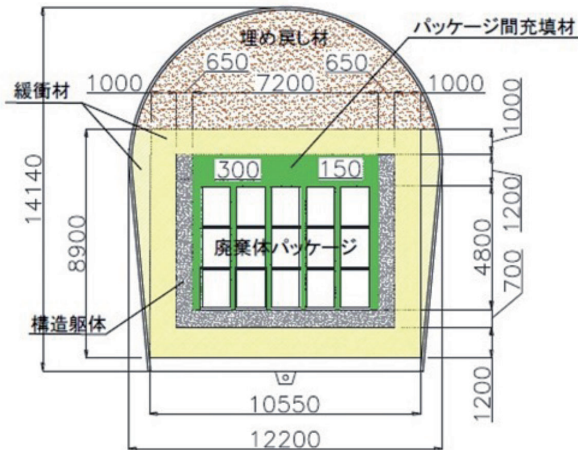


図2 TRU 廃棄物の処分場の処分坑道断面(深成岩、先新第三紀堆積岩類における廃棄物グループ2の例)

図3は当センターで評価した<sup>3) 4)</sup> 処分坑道当たりの経時的なガス発生量の評価結果である。発熱量や発生量を考慮し、多くのガス発生量が見込まれることから、グループ2のTRU 廃棄物を対象とした。評価に当たり、廃棄体や廃棄体パッケージの作製時期、処分場の閉鎖、廃棄体パッケージの開口のタイミング等、処分場で想定されるイベント、および核種インベントリの経時変化、各放射線の飛程の相違等を考慮した。

評価期間において、水の放射線分解由来のガス発生量が金属腐食由来のガス発生量を大きく上回る結果となった。ただし、金属腐食由来の水素ガスに関しては、発生量は少ないものの長期間の発生が見込まれ、人工バリア等への長期的な影響を考慮する必要がある。

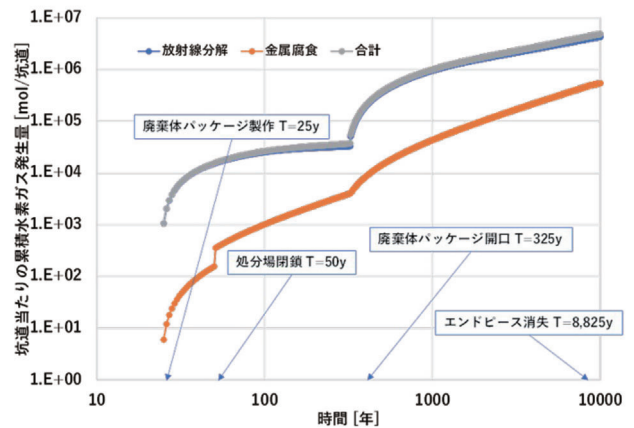


図3 グループ2を対象とした経時的なガス発生量評価結果



### 3. 発生ガスの人工バリアへの影響とその解析評価手法

TRU 廃棄物は、閉鎖後数百年程度は廃棄物パッケージ内での閉じ込めが担保されているが、パッケージ開口後は地下水が廃棄物に触れて核種が溶出する。その核種が溶出した水の緩衝材中での移行において、発生ガスによりその体積の分だけ押し出されると、通常の地下水シナリオでの拡散のみの移行よりも核種の移行は加速する。また、発生したガスが緩衝材内部に蓄圧された後に破過現象によってベントナイトが損傷してその膨潤特性による自己修復性が失われると、汚染水の短絡移行経路が形成される可能性がある。緩衝材の破過後は、発生ガスは人工バリアの外である天然バリアへ排出され、緩衝材中のガス圧は解消されていくと推定される。

そのため、放射性核種を含む間隙水の押し出しによる核種移行の加速や、ガスの蓄圧による緩衝材の破過、これらの影響を評価できるようにすることが、処分場での安全性を説明するに当たっての重要な課題となる。

本研究では、発生ガスによる押し出し排水や緩衝材の破過現象、および破過後の緩衝材の自己修復性について、室内試験によりそれらメカニズム等を明らかにするとともに、室内試験により得られた知見を解析モデルに反映し、核種移行への影響を評価可能なガス移行解析手法の開発を実施している。

図4は発生ガスによる核種移行への影響を評価するという課題へのアプローチを整理したものである。最初に経時的なガス発生量を評価し、ガス移行解析へのインプットとする。次に、ガス移行解析により押し出し排水量を評価し、放射性核種が溶出した間隙水の排水量を核種移行解析へ受け渡す。これら一連の解析によって、ガス影響を考慮した核種移行解析が可能である。この一連の評価手法の中核となるガス移行解析においては、室内試験等により、

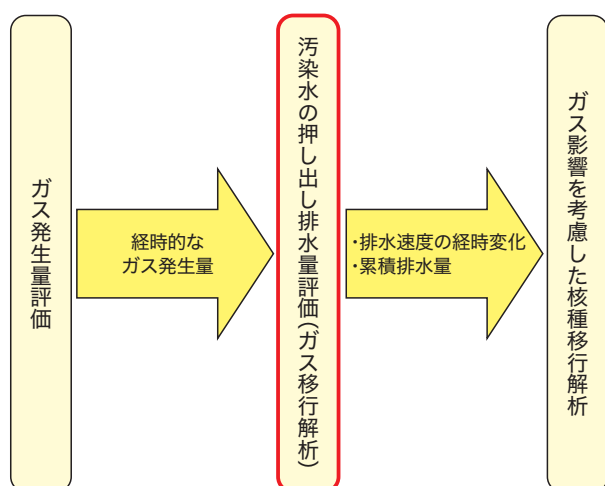


図4 発生ガス影響評価のアプローチ

解析モデルに適用するためのベントナイト中でのガス・水移行特性を表現する二相流パラメータの取得が必要となる。

当センターではガス移行解析への反映を目的として、ベントナイト緩衝材中でのガス・水移行の室内試験を実施し、再現解析による二相流パラメータの取得や評価モデルの高度化を実施してきた。これまでの取り組みを、近年実施したガス移行モックアップ試験を中心に紹介し、今後の展望について説明する。

### 4. ベントナイト系材料中におけるガス・水移行挙動に関する検討

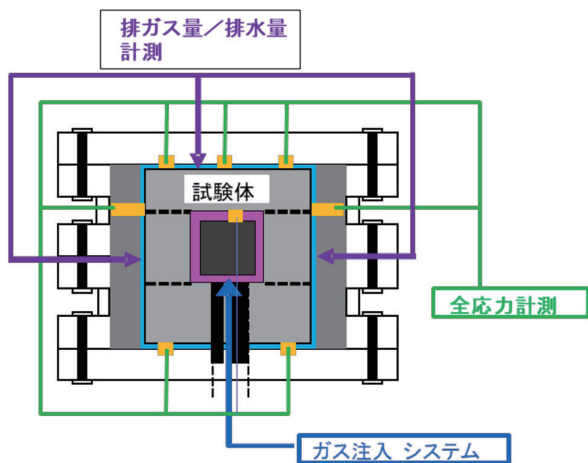
ベントナイト系材料中におけるガス・水移行挙動の研究に関して、当センターでの過去の検討の経緯・変遷について説明する。当センターでは、過去にグリムゼル原位置試験<sup>5)</sup>で、試験体の配合比が砂:ベントナイト 80:20でのガス移行試験を実施した。しかし、TRU 廃棄物の処分では第2次 TRU レポート<sup>1)</sup>や NUMO 包括的技術報告書<sup>2)</sup>に示されているように、より高配合のベントナイト系材料を緩衝材として使用することが想定されている。高配合のベントナイト系材料で試験を実施する場合、材料の飽和に時間を要することから、原位置試験よりもスケールダウンした一次元要素試験により、ベントナイト緩衝材中でのガス移行挙動や、破過挙動を観察して現象理解を深め、解析に必要なパラメータを取得した。その後、実際の処分場スケールへの適用性等を確認するため、3次元の移行挙動を再現できるガス移行モックアップ試験を実施している。

グリムゼル原位置試験は、第2次 TRU レポート<sup>1)</sup>が公開される前に開始しており、試験体の配合比は砂:ベントナイトが 80:20であり、現在の第2次 TRU レポート<sup>1)</sup>や NUMO 包括的技術報告書<sup>2)</sup>で想定されている配合比とは異なる。また、低配合ベントナイトを用いた要素試験で取得した基礎特性を用いて原位置試験結果の再現解析を実施し、概ね現象を再現できた<sup>6)</sup>。

このグリムゼル原位置試験からは、ガス移行は処分に用いられる材料間の界面の特性、施工状況や形状に影響を受けることが示唆された。さらに、第2次 TRU レポート<sup>1)</sup>で示された緩衝材仕様に対応するために、高配合のベントナイトでの基礎特性を確認する必要がある。これらを受け、高配合のベントナイト緩衝材におけるガス移行挙動および破過圧、また、界面における影響を把握するため、ガス移行一次元要素試験を実施した<sup>7)8)9)</sup>。平成29年までに、一次元要素試験により取得したデータに基づきガス移行モデルを構築し、処分場を想定したガス移行解析を実施した。

このガス移行モデルについては処分場スケールへの適用可能性についての確認が必要であると考え、その後、一次元要素試験よりもスケールアップした三次元のモックアップ試験を計画した。特に破過圧に関しては、一次元要素試験で観測した値は飽和ベントナイト緩衝材の膨潤圧よりも大きな値となっており、処分場においても同様の傾向であるならば、処分場でのガスの大きな蓄圧とそれによる破過時の損傷・自己修復性の喪失につながる可能性があることから、スケールや三次元の影響を確認する必要がある。

当センターで実施したモックアップ試験の概念設計と仕様を図5に示す。試験では処分場で想定される緩衝材の施工方法を模擬し、ベントナイトを転圧することによって試験体を製作し、注水により飽和させている。その後、試験体中央から段階的に昇圧しながらガスを注入して、ガス圧の载荷に伴う試験体の応力の変化や、試験体からの排水量や破過圧を計測して、ガスが試験体の端部に到達し、破過現象に至るまでを観測する。



試験装置 高さ：550mm 幅：600mm  
試験体 高さ：320mm 幅：300mm

図5 モックアップ試験装置の仕様

モックアップ試験装置は処分場を基にスケールダウンした形状で製作しており、緩衝材中央に配置される廃棄体からガスが発生する状況を模擬し、装置の中央からガスを放出する機構としている。また、処分場において緩衝材に背水圧が载荷されるという状況を模擬するため、試験体の周囲から背水圧を载荷する機構としていることが特徴である。ベントナイト緩衝材の仕様は、NUMO 包括的技術報告書<sup>2)</sup>に示された TRU 処分場で想定している緩衝材仕様に基づき、調整した。

モックアップ試験の実施工程を図6に示す。実施工程のうち、再冠水試験は、製作した試験体に注水

し飽和させる段階である。次に、飽和した試験体に対し段階的に昇圧しながらガスを载荷するガス注入試験を実施した。試験体の破過現象を確認した後は、緩衝材の自己修復性の発揮を確認するため、再度、試験体に水を注入し飽和させ、もう一度、破過現象が確認できるまでガスを注入する再破過試験を実施した。再破過試験において試験体の破過を確認した後は、試験体の解体調査を実施して、試験体の状態を調べた。

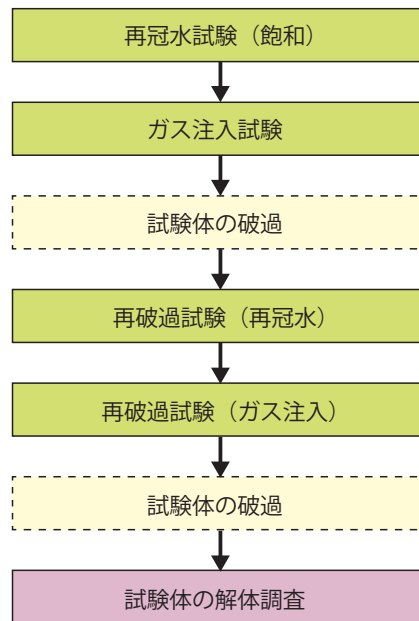


図6 モックアップ試験の実施工程

モックアップ試験結果のうち、ガス注入過程における結果を図7に示す。注入したガス圧から背水圧を引いた値を有効ガス圧と定義しており、その有効ガス圧と、各面から計測した有効応力の経時的な変化を整理した。また、有効ガス圧がゼロの段階での試験体の有効応力は、緩衝材の飽和時の膨潤圧にほぼ等しい。

载荷ガス圧は0.1MPaずつ昇圧した。これは処分場における現象として、発生したガスが緩衝材内に蓄圧していき次第に昇圧していく現象に対応する。その後、有効ガス圧が0.6MPaに到達した直後に有効ガス圧の急激な低下が観測された。これは緩衝材の端部にまでガスが到達しガス圧が一気に解消されたためであり、破過現象が発生したと推定される。

試験結果のうち一次元要素試験の破過圧との違いに着目した。ガス移行モックアップ試験では、有効ガス圧が初期の試験体の有効応力（およそ飽和時の膨潤圧相当）を超えたあたりで破過が発生した。一方で、一次元要素試験では、初期の有効応力を大きく超えるところまでガス圧を上昇しなければ、破過現象は確認できなかった。

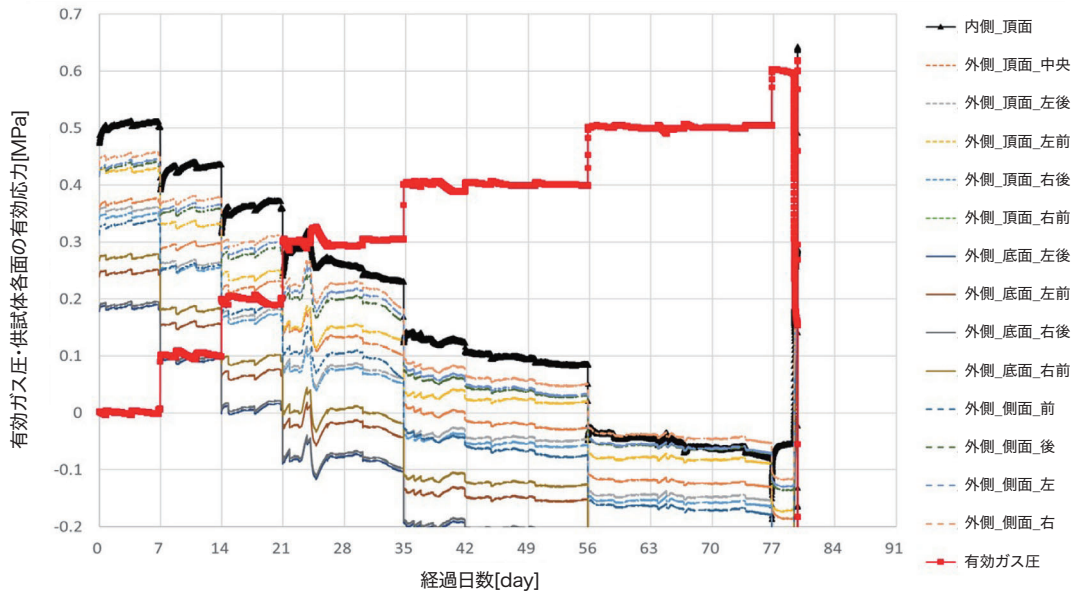


図7 モックアップ試験結果 有効ガス圧と各面の有効応力

このモックアップ試験と一次元要素試験との差異は、試験系の影響によるものとみられ、一次元要素試験では、載荷するガスが試験装置の側面（壁面と試験体の境界面）から抜けることなく、試験体の中を通るよう強く拘束する必要があり、その影響によるもの推定している。すなわち、多孔質媒体中のガスや水などの流体の移行において、本来流体は通りやすいところを通るものであるが、一次元要素試験では、壁面の拘束が強すぎたために、ガスの移行経路も制限されており、そのような状態にあるベントナイト中のガス移行挙動を見ていたということである。

図8のように、粘土中のガス・水移行挙動に関するスイスのNagraの先行研究<sup>10)</sup>では、可塑性の粘土中のガス移行形態は、4つの事象に分類されると提唱されている。ガス圧が低い状態では、発生したガスは地下水中に溶解することから、ガスの移行としては液相の拡散が支配的な移行形態となる。その後、ガス圧が上昇するにつれて移行形態が変化し、

ガスが緩衝材中に侵入することにより二相流での移行が始まり、さらなるガス圧の上昇に伴い変形による流路の拡幅が発生し、最終的には粘土が引張破壊し、それに伴う亀裂開口によって卓越経路を形成してガスが移行する。

Nagraで研究の対象とされていたオパリナスクレイは、ベントナイトとは剛性が異なる。ベントナイトのほうが軟らかい材料のため、ガス圧が高くなるに伴い変形がより生じやすくなると推定される。過去に実施したモックアップ試験での観測においても、有効ガス圧が緩衝材の飽和時の膨潤圧相当を超えた時点で、ガスが緩衝材の端部に到達して抜けていくのが観測された。このことから、処分場でのガス圧が上昇することにより形成される短絡経路は、3つ目の変形由来のところにとどまり、引張破壊に伴う亀裂開口による損傷は発生することなく、破過に至ると考えられる。

以上のガス移行モックアップ試験結果や先行研究から、発生ガスはベントナイト緩衝材の飽和時の膨

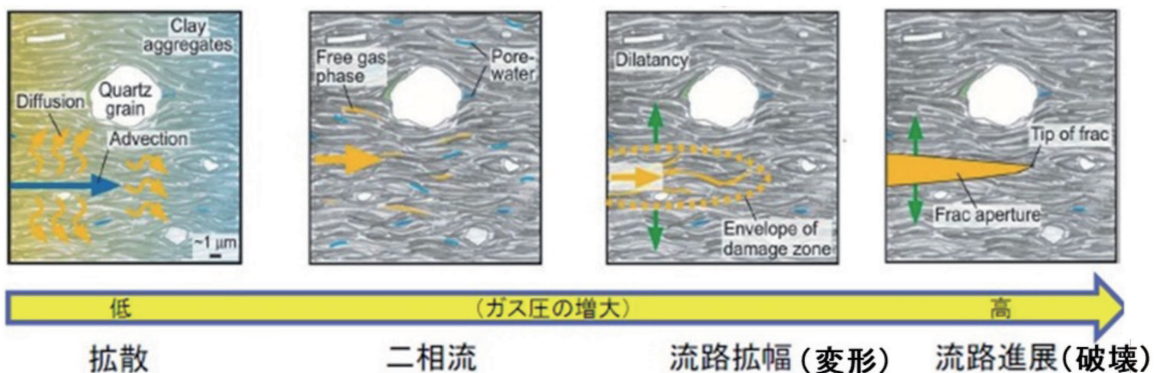


図8 可塑性粘土層中のガス移行形態の4つの分類

潤圧相当の有効ガス圧で短絡経路をつくりながら、やがて破過に至ると予想される。そして、膨潤圧相当での破過の発生では、引張破壊ではなく変形の範囲内で緩衝材にとって大きな損傷とはならないと考えられ、破過後は、次第にガス圧が解消され再冠水が進むことで、緩衝材に期待される膨潤変形による自己修復性が機能し、経路が閉塞することが想定される。

そのため、破過現象は緩衝材の飽和時の膨潤圧相当の有効ガス圧で発生すること、緩衝材に期待される自己修復性が機能する条件についてモックアップ試験を通して確認することが今後の課題である。

### 5. 緩衝材破過後の自己修復性に関する検討

緩衝材に期待される自己修復性の発揮について、破過の発生後、ガス移行モックアップ再破過試験により検討した。

ベントナイトの自己修復性が機能するメカニズムとしては、以下のようなプロセスが考えられる（図9参照）。処分場において、ガスの蓄圧による破過現象の発生後、緩衝材内部に蓄圧したガス圧は次第に解消されていき、やがて周囲の地下水の間隙水圧が内部からのガス圧を上回ることによって、緩衝材が再冠水する。緩衝材の乾燥密度が維持されていれば、再冠水に伴う膨潤変形によって自己修復性が機能し、短絡移行経路が閉塞し、核種移行の抑制機能が維持される。

再破過試験は、一度破過を経験した試験体を再冠水させた後、ガスをもう一度注入し、観測した破過圧等から試験体の自己修復性が発揮されたかどうかを確認する試験である。さらに、再破過後は解体調査により、大きな損傷等が存在していないか、ベントナイトの状態等を目視確認する。

具体的な試験の実施手順としては、1回目のガス注入過程で試験体の破過現象の観測後、試験装置の内部からのガスの載荷を止め、背水圧のみを載荷した状態で再冠水させ、その後、試験体の再飽和を確認した後に再びガスを載荷した。

その結果、1回目のガス注入試験時の破過圧である、有効ガス圧 0.6MPa と同じガス圧で再び破過現象が観測されたことから、ベントナイトの自己修復性が発揮されたことと判断した。また、試験体の解体調査時の目視確認においても、ガスの移行および破過による損傷等の影響は確認されなかった。

しかし、処分場で想定される現象を考慮すると、破過後完全に再飽和させた今回の再破過試験の試験条件はベントナイトの自己修復性にとって理想的な条件であることから、そのような条件下で自己修復性の発揮が確認できたに過ぎない、という専門家からの指摘があった。試験装置の内部からのガスを止め、再飽和まで確認するという試験手順は、実際の処分場で想定される、破過後にガス圧が解消されながら再冠水が進むという状況をうまく再現できていない可能性がある。

処分場での現象を考慮するならば、一度破過を経験した試験体に対し、内部からガスが載荷されている状態で再冠水させ、再度のガス注入で破過圧を確認するという試験方法も考えられる。より現実的な条件における自己修復性の発揮の確認、自己修復性が発揮される条件を把握することがこの課題解決のために必要となる。

### 6. ガス移行解析手法の開発

ガス移行解析手法開発の目的は、発生ガスによる押し出し排水量を評価するためであり、現象理解に基づいた、処分場におけるガス移行挙動を評価できるモデルの開発をしてきた。特に処分場での影響が大きい破過後の挙動や、自己修復性を考慮したモデルとすることが更なる目標である。

当センターでは、GETFLOWS と CODEBRIGHT の2つの解析コードによるガス移行解析を検討してきた。排水過程での相対浸透率曲線を表現する二相流パラメータには Van Genuchten モデルを採用している。

GETFLOWS は有限差分法による解析で、国内の不飽和浸透流解析で幅広く用いられている解析

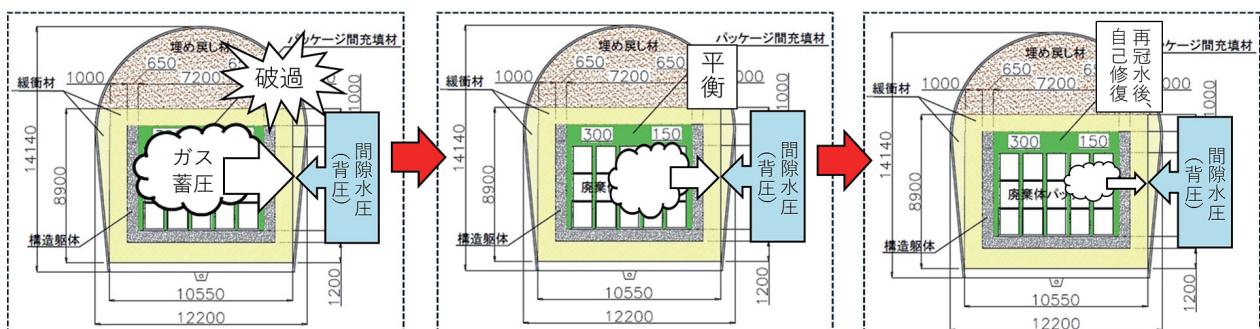


図9 ベントナイトの自己修復性発揮のメカニズム

コードである。CODEBRIGHTはEUにおける廃棄物処分関連の二相流評価でも実績があり、原位試験のシミュレーション等にも使用されている。CODEBRIGHTは有限要素法による解析で、応力連成機能を有するため、応力影響を考慮する解析に適している。GETFLOWSは応力連成機能がないため、応力影響を表現できないが、CODEBRIGHTと比較すると計算負荷が小さいことから、透過特性に関するパラメータ評価などに適する。

ベントナイト緩衝材中でのガス・水移行に関して、ガス圧などにより緩衝材に発生する応力により空隙特性が変化し、その結果、流動特性が変化すると推定される。CODEBRIGHTは応力による空隙特性の変化に加えて、緩衝材の引張応力やひずみ増減により微小な開口が生じることによる透過係数の変化を表現できる。一方、GETFLOWSはガス圧と間隙水圧、膨潤圧の関係から間隙比を変化させることにより透過性を増減させている。さらに、過去の検討では、Pathway dilationモデルを導入し、間隙水圧と膨潤圧の和をしきい値として、ガス圧に応じて適用する透過係数の関数を変え、透過係数をステップ状に変化させることで破過現象の表現を試みた。

処分場を想定した経時的な解析の実施例として、GETFLOWSによるガス圧の時間変化の結果を図10に示す。廃棄体から発生したガスによって、徐々に緩衝材部分の圧力が上昇していき、やがてガスの透気と共にガス圧が低下していく様子が表現されている。緩衝材の自己修復性を考慮しない場合、100年後の解析結果より、選択的な移行経路が形成されていることが確認される。一方、Pathway dilationモデルを導入し自己修復性を考慮した場合は、流路拡幅が発生しても圧力低下と共に閉塞することから、選択的な移行経路は形成されず、外側に向かって等方的にガス圧が解消されている。

図11はGETFLOWSとCODEBRIGHTにより、ガス移行モックアップ試験での経時的な累積排水量を再現解析した結果である。10日から30日にかけて、試験体からの排水量の勾配が上がっている。この現象は二相流による排水のみではなく、ガスが載荷されることにより試験体が圧縮変形したことに伴う排水も寄与しているためであると考えられる。CODEBRIGHTは、力学連成の二相流解析コードであることから、圧縮変形による排水挙動が再現可能であり、試験結果をより再現できている。

今後の展望として、モックアップ試験の実施により破過前後の排水挙動や自己修復性について明らかにし、試験で得られた知見を解析モデルに反映することで、より現実的な破過現象や自己修復性を表現可能な解析モデルに高度化できるものと考えている。

一方、モックアップ試験の試験結果に基づき、開発したモデルをより大きな系である処分場の評価に適用することの妥当性についても、適用可能であることの根拠を示す必要があると考えている。破過圧は緩衝材中のガス移行の自由度に依存しており、過去に実施した一次元要素試験では、試験体を強く拘束しているために、ガス圧に対して試験体が踏ん張るような形となり、材料そのものが持つ変形とガス移行の特性を正しく表していなかったと考えている。モックアップ試験で確認した緩衝材中でのガス・水移行挙動や破過に至るまでの現象は、Nagraの先行研究で示しているガス移行形態のモデルでの説明が可能であり、処分場における挙動とほぼ同様のものを示していると考えている。そのため、これを検証することによって、モックアップ試験で得られた知見が処分場へ適用可能であることを示すというアプローチを考案中である。

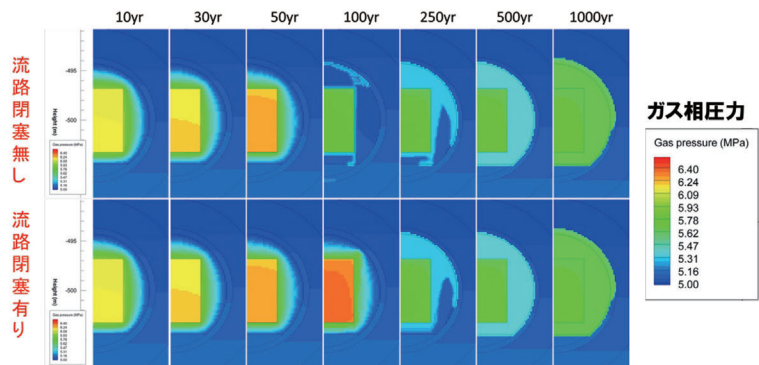


図10 GETFLOWSによる解析の実施例

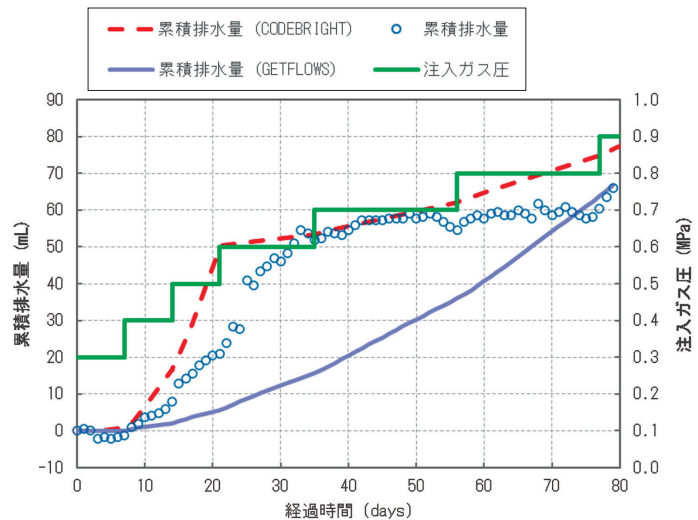


図11 モックアップ試験の再現解析結果

例えば、図12のように、一次元要素試験からモックアップ試験スケールまでの段階的なスケールの試験を実施することで、試験体の径の大きさや高さをパラメータとした試験データを収集し、試験系による影響を把握する。そして、モックアップ試験スケールにおいては、試験系における拘束状態の影響やガス移行の自由度の制限による影響はほぼ存在しない結果であることを示すというアプローチである。

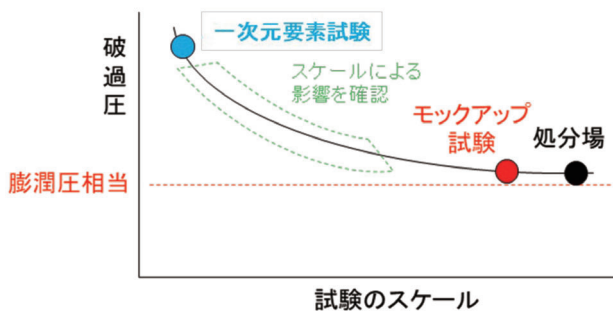


図12 破過圧と試験スケールの関係についての想定

## 7. まとめ

本稿では、TRU 処分場での発生ガスによる緩衝材中での地下水の移行への影響の評価を目的として当センターがこれまでに実施したガス移行解析手法の研究開発の概要とガス移行モックアップ試験の最近の成果について説明した。

ガス移行モックアップ試験により破過圧は膨潤圧相当となることが示唆され、モックアップ再破過試験の実施により、理想的な条件下においては、ベントナイト緩衝材の自己修復性を確認した。ガス移行モックアップ試験による知見を今後さらに積み上げ、現象理解を反映したガス移行解析モデルによって、処分場における長期的なガス影響を評価し、処分場での安全性の説明へ寄与することを目指す。

なお、本稿の内容は、経済産業省資源エネルギー庁から受託して実施した平成30年度～令和4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）TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発の成果の一部である。

（本稿は、2024年9月6日に開催した2024年度第2回原環センター講演会「ベントナイト緩衝材中のガス移行現象の理解と移行解析手法の開発 - 現状と今後の展望 -」に基づいて作成したものです。）

## 参考文献

- 1) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構, TRU 廃棄物処分技術検討書-第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ-, JNC-TY1400 2005-013, FEPC TRU TR2-2005-2, 2005.
- 2) 原子力発電環境整備機構, 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現-適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築-, NUMO-TR-20-03, 2021.
- 3) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 日本原子力研究開発機構, 令和4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 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発報告書, 2023.
- 4) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 日本原子力研究開発機構, 令和4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 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化5か年成果報告書, 2023.
- 5) 原環センタートピックス No.62 「スイス・グリムゼル試験場におけるガス移行挙動試験(その2) -人工バリアシステムの構築と飽和-」, 2002
- 6) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成13年度 地層処分経済性向上調査 人工バリア・天然バリアのガス移行挙動の評価報告書, 2001
- 7) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成18年度 地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査人工バリア・天然バリアガス移行挙動評価報告書, 2006
- 8) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成24年度 地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発報告書, 2012
- 9) 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成29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 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発, 2017
- 10) Nagra, Effects of Post-disposal gas generation in a repository for spent fuel, high-level waste and long-lived intermediate level waste sited in Opalinus clay, Technical report 04-06, 2004.



---

編集発行

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター  
〒104-0044 東京都中央区明石町6番4号（ニチレイ明石町ビル12階）  
TEL 03-6264-2111（代表） FAX 03-5550-9116  
ホームページ <https://www.rwmc.or.jp/>