

高レベル放射性廃棄物処分について

藤田和果奈^{*1}, 鈴木覚^{*1}

地層処分の対象とする放射性廃棄物は、原子力発電に伴って発生する使用済燃料の再処理等を行った後に生じる高レベル放射性廃棄物や、低レベル放射性廃棄物のうち半減期の長い放射性核種を一定量以上含む TRU 廃棄物である。これらの放射性廃棄物は、地下 300 m より深い安定な岩盤に地層処分を行うこととなっている。本稿では、2024 年 11 月 29 日に行った「バックエンド週末基礎講座」の内容を、地層処分の安全確保の考え方を中心に、事業の概要および地層処分を実現するための技術について概観する。さらに、講座の聴講者から寄せられた地層処分事業に関する質問に回答および解説する。

Keywords: 地層処分, 処分地選定, 高レベル放射性廃棄物, TRU 廃棄物

1 はじめに

原子力発電の利用に伴い、さまざまな形態の放射性廃棄物が発生する。このうち、地層処分の対象となる放射性廃棄物は、再処理過程において使用済燃料から分離される高レベル放射性廃液をガラス固化した高レベル放射性廃棄物（以下、ガラス固化体という）と、半減期の長い放射性核種を一定量以上含む一部の低レベル放射性廃棄物（以下、TRU 廃棄物という）である。放射能が極めて長い時間スケールで残存する放射性廃棄物の地層処分は、将来にわたり人間の生活環境に有意な影響を与えることなく、かつ人間の直接的な管理を必要としない、現時点での技術的および倫理的に最も有望な方策であることが国際的に共通の考え方になっている（例えば、OECD/NEA, 1995[1]）。原子力発電環境整備機構（Nuclear Waste Management Organization of Japan, 以下、NUMO と記載）では「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（2000 年に制定され、2007 年に改正。以下、最終処分法という）に基づき、これらの二種の放射性廃棄物を地下 300 m 以上深い地層中に埋設する事業を進めている。2024 年度バックエンド週末基礎講座では、地層処分事業の概要、地層処分における安全確保の基本的な考え方、主要な技術開発の現状（適切な地質環境の選定技術と日本の地質環境のモデル化、処分場の設計と工学技術の提示、処分場が安全に機能することの確認）、技術マネジメントの取組みについて紹介した。講演内容の詳細については、2023 年度バックエンド週末基礎講座の講演再録[2]を参照されたい。本講演再録では、週末基礎講座の参加者から寄せられた、本講座の内容に関する質問への回答を行う。

2 質問への回答

Q.1 ガラス固化体の管理として、盗難のリスクは想定されているのか

盗難などの妨害破壊行為に掛かるリスクを低くする観点から、防護の対策が必要とされている[3]。なお、ガラス固化体は、固形化されることにより、核物質等が容易に大量に環境へ拡散するおそれがない構造であること、また、放射線安全上の観点から取扱い施設は、十分な遮蔽力のあ

る厚いコンクリート壁で囲われており、施設自身の閉じ込め機能により、核物質等が容易に大量に環境へ拡散するおそれがないことから、破壊・拡散の困難性が確保されているため、「慣行による慎重な管理」にしたがって設計することが求められている。

Q.2 沿岸海底のボーリング調査はどのように実施するのか

陸域と比較して、沿岸海底でのボーリング調査を行う際には、機材の設置やアクセスの困難さが課題として考えられる。このため、陸から海底に向けて掘削ができるコントロールボーリングの開発実績がある[4, 5]（図 1）。

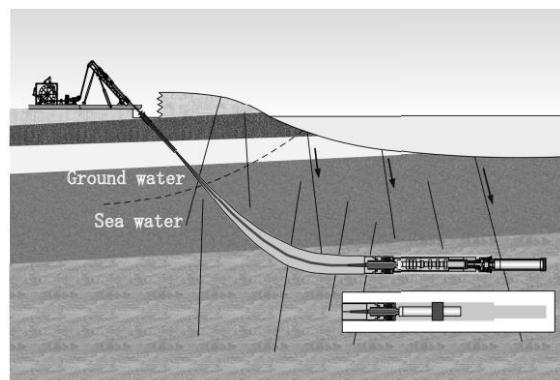


図 1 沿岸域におけるコントロールボーリング（木方ほか, 2009[5]）

Q.3 断層破碎帯はどのように発見するのか

断層は、空中写真等を用いた地形調査、ボーリング調査、反射法地震探査、トレーンチ調査といった手法により調査する。沿岸部海域においては、物理探査により陸域と同様に断層を把握することは困難であるものの、ボーリング調査などの組み合わせにより、規模の大きな断層の分布や性状を把握することは可能であると考えられている。

Q.4 セーフティケースは処分事業のどの段階で更新されるのか

包括的技術報告書[6]は、わが国における安全な地層処分の実現性を一般的に示すためのセーフティケース（ジェネリックなセーフティケース）であり、精密調査後にサイトが決定されば、サイトの環境条件に基づくサイトに固有のセーフティケース（サイトスペシフィックなセーフティケース）を構築する。事業許可の取得後も、必要なモニタリングを継続するとともに処分場

Fundamental aspects and technical issues of the disposal of high-level radioactive waste by Wakana FUJITA (fujita.wakana@numo.or.jp), Satoru SUZUKI

*1 原子力発電環境整備機構

Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)

〒108-0014 東京都港区芝4-1-23

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会 2024 年度バックエンド週末基礎講座における講演内容に加筆したものである。

の建設時に追加的に得られる地質環境情報などを用いてセーフティケースを更新する[6](図2).

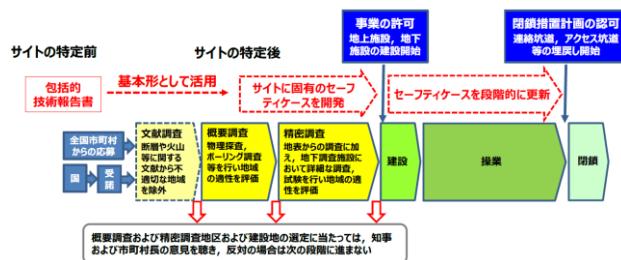


図2 事業の段階に応じたセーフティケース作成の概念(包括的技術報告書[6])

Q.5 ガラス固化体はいつ破損するのか

ガラス固化体は、破損するのではなく地下水との反応によって徐々に溶解していくと考えられる。ガラス固化体は、その主成分であるケイ酸(SiO_2)やホウ酸(B_2O_3)から構成されるガラスマトリクスとガラスマトリクス中に存在する放射性核種やその他元素からなる。ガラス固化体は地下水との接触によりガラスマトリクスである SiO_2 が水和反応を経て溶解する。第2次取りまとめ[7]では、ケイ酸塩濃度がほぼ飽和に達するような長期の浸出試験で取得されているガラス固化体の溶解速度をもとに処分場の温度を考慮して補正し、さらにガラス固化体製造時の割れによる表面積の増大を加味して、ガラス固化体の全量溶解に要する期間を約7万年と見積もっている。

Q.6 地下施設のレイアウトは事業のどの段階で決まるのか

最終処分地が決定されてから、対象地域の地質構造、環境などを考慮して、決定することになる。NUMOでは、地質構造などに応じて柔軟に地下施設のレイアウトを設計できるように、平面配置あるいは多段配置などの複数の設計オプションを開発している[8, 9]。

Q.8 オーバーパックの落下シミュレーションの実証は実施されたのか

これまでにオーバーパックの落下シミュレーションの実証は実施していないが、オーバーパックの設計や地上施設の詳細な設計を進める過程において、必要性を考慮して落下試験などにより実証的に健全性を確認する可能性がある。

Q.7 どのような条件でオーバーパックの落下シミュレーションを実施したのか

高レベル放射性廃棄物処分場において、堅置き・ブロック方式を対象にガラス固化体、あるいはガラス固化体を封入したオーバーパックの落下の可能性がある操業工程は以下のとおりである[6] (図3, 図4)。

- 輸送容器一時保管室において、輸送容器を吊り上げて移動する工程
- 輸送容器から取り出したガラス固化体を天井クレーンにより吊り上げてガラス固化体検査・仮置室に移動

する工程

- ガラス固化体をオーバーパックに封入した後、オーバーパック拠出室において、天井クレーンで搬送車両へオーバーパックを積み込む工程
- 地下施設のうち、坑底施設においてオーバーパックを搬送車両から、天井クレーンを使って、定置装置に積み替える工程
- 処分坑道において、処分孔にオーバーパックを吊り降ろして定置する工程

ガラス固化体の受入・検査・封入施設内におけるオーバーパックのつり上げ時の高さは9m以下に制限しており、坑底施設での搬送車両から定置装置へのオーバーパックの積み替え作業における天井クレーンの吊り上げ高さも9m以下に設計することが可能であると考えられている。

吊り上げ高さ9mからのオーバーパックの落下を想定した場合、衝突箇所近傍に高い破断ひずみが発生するものの、貫通亀裂は発生しないことが分かった(図5)。

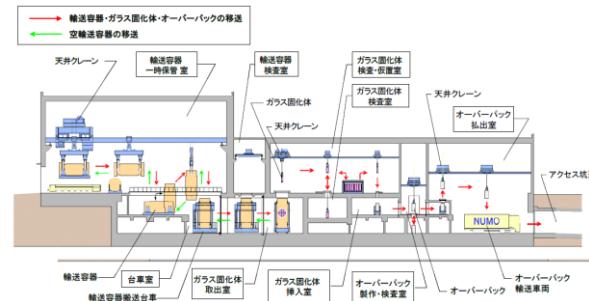


図3 ガラス固化体の受入・検査・封入施設の模式図(包括的技術報告書[6])



図4 緩衝材および廃棄体定置手順(堅置き・ブロック方式の場合)(包括的技術報告書[6])

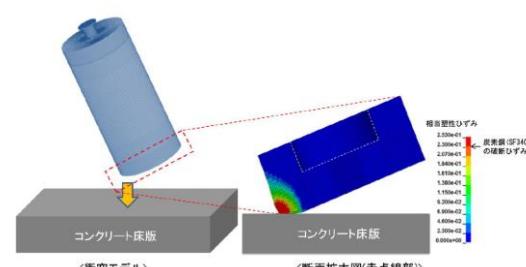


図5 ガラス固化体を封入したオーバーパックの落下衝撃時の構造解析(包括的技術報告書[6])

Q.8 高レベル放射性廃棄物の横置きはどの国で採用されているのか

NUMO が 2021 年に公表した包括的技術報告書[6]では、高レベル放射性廃棄物の処分方式として、地下施設内でブロック状に成型した緩衝材を現場施工する「豎置き・ブロック方式」と、地上施設において鋼製容器内で人工バリアを組み立てて一体化したモジュール(以下、PEM)を地下施設に搬送して定置する「横置き・PEM 方式」の 2 種類を設計オプションとして例示し、それぞれ安全な地層処分の実現が可能であることを示した。また、2024 年には、最新の技術開発成果や海外の技術動向を踏まえ、処分場に求められる安全機能を確保しながら、PEM 方式の人工バリアおよび地下施設の設計にさまざまな改良を施した「改良型 PEM 方式」の開発成果を取りまとめた[10]。

国外で高レベル放射性廃棄物の横置きを採用している国は、PEM 型のカナダ、ベルギーの他に、スイス、フランス、アメリカが挙げられる[11]。

Q.9 処分場閉鎖後に廃棄体の回収が求められるトリガーは何が想定されるのか

「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」では、「今後より良い処分方法が実用化された場合等に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにする」ために、「機構は、特定放射性廃棄物が最終処分施設に搬入された後においても、安全管理が合理的に継続される範囲内で、最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性(回収可能性)を確保するもの」とされている。処分場閉鎖後については、技術的に廃棄物の回収は可能と考えられるが、時間が経過するほどそのコストは増大し、また、廃棄物容器の劣化なども考慮すると、技術的にも難易度が高まっていくものと考えられている[12]。そのような状況も考慮して、将来世代が回収することの是非を検討していくものと考えられる。

Q.10 高レベル放射性廃棄物の放射性核種はどの程度の期間で生活圏に到達するのか

実際に放射性核種が生活圏へ達するまでに要する時間は、サイトの地質環境特性によるため一概には言えないが、人工バリアと天然バリアから構成される多重バリアシステムによって、放射性核種が生活圏へ到達するまでに時間を要し、その間に放射能が減衰することを期待している。

まず、ガラス固化体を封入したオーバーパックは、ガラス固化体の放射能と発熱を支配する短半減期核種の放射能の大半が減衰するまでの、埋設後少なくとも 1,000 年間は地下水との接触を防止する。次に、オーバーパックの周囲に設置される緩衝材は、放射性核種の吸着することによりその移行を抑制する。さらに、放射性核種の一部が人工バリア周辺の岩盤中に移行したとしても、地下深部では地下水の流れが極めて遅く、放射性核種の地下水への溶解は低く制限されているうえ、岩盤へ吸着する。このようにバリアシステムが機能することによって、放射性核種が地上に到達するまでに時間を要する。

なお、一部の放射性核種は、生活圏に到達する可能性があるが、そのような場合にも線量はピーク時の値でも諸外国の安全規制において適用されているリスク基準や線量基準を参考に設定した目安値である $10 \mu\text{Sv}/\text{y}$ を十分に下回ることが確認さ

れている。

参考文献

- [1] OECD/NEA: The environmental and ethical basis of geological disposal of long-lived radioactive wastes, A collective opinion of the Radioactive Waste Management Committee of the OECD Nuclear Energy Agency. REF000041.
- [2] 松原竜太: 地層処分の基礎知識と課題. 原子力バックエンド研究, Vol.31 No.1 (2023).
- [3] 原子力委員会 原子力防護専門部会: 高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)等の防護の在り方に関する基本的考え方について(案). 資料第 3 号, 原子力委員会 原子力防護専門部会 (2007).
- [4] 原子力発電環境整備機構: 沿岸部の特性を踏まえた地層処分の技術的対応可能性. 沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会第 2 回資料 4, 原子力発電環境整備機構 (2016).
- [5] 木方建造, 新孝一, 大津正士, 宮川公雄, 鈴木浩一, 岡田哲実, 須永崇之, 小早川博亮, 末永弘, 井ヶ田徳行, 山本真哉: コントロールボーリングによる掘削・調査技術の開発(フェーズ 2)－掘削・調査システムの高度化と断層への適用－. 総合報告 N03, 電力中央研究所 (2009).
- [6] 原子力発電環境整備機構: 包括的技術報告書: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—. NUMO-TR-20-03, 原子力発電環境整備機構 (2021).
- [7] JNC(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—総論レポート. JNC-TN1400 99-020.
- [8] Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO): Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments. NUMO-TR-04-03, Nuclear Waste Management Organization of Japan (2004).
- [9] Suzuki, S., Ichimura, T., Saegusa, H., Kitagawa, Y: Case Studies of the Repository Layout Design in the Virtual SDMs. International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Proceedings, 597–606 (2022).
- [10] 原子力発電環境整備機構: 高レベル放射性廃棄物処分における横置き・PEM 方式の高度化. NUMO-TR-24-04, 原子力発電環境整備機構 (2024).
- [11] 原子力環境整備促進・資金管理センター: 諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について (2024).
- [12] OECD/NEA: Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel, NEA/RWM/R(2011)4, Final Report of the NEA R&R Project (2011).