

地層処分事業に係る技術開発の取組みの現状

林隆正*1

原子力発電環境整備機構（NUMO）は地層処分事業の実施主体として、2000年の設立以降、国・関係研究機関等とともに策定した全体計画に基づき、地層処分事業実現のための技術開発に取り組んできた。

本論では、2000年以降の地層処分研究開発成果を統合して NUMO が公表した包括的技術報告書について紹介するとともに、NUMO が5ヶ年ごとに定める中期の技術開発計画に基づき進めている技術開発の取組みの現状を紹介する。

Keywords: 高レベル放射性廃棄物, TRU 等廃棄物, 地層処分事業, 文献調査, 技術マネジメント

1 はじめに

原子力発電環境整備機構（NUMO）は、1999年に公表された「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（以下、第2次とりまとめ）」[1]を拠り所として2000年に制定された「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（最終処分法）」に基づき、経済産業大臣の認可を受けて発足した。NUMOは、特定放射性廃棄物（ガラス固化体とTRU等廃棄物）を地層処分する事業の実施主体として、処分地選定、処分施設の建設・操業・閉鎖を実施する役割を担っている。

2020年11月にはNUMO発足後初めて文献調査を開始した。文献調査を受け入れてくださった北海道寿都町（2020年10月に調査へ応募）および北海道神恵内村（2022年10月に国からの調査申し入れを受諾）の両自治体の皆さまには、深く感謝申し上げます。

NUMOは地層処分事業を推進するとともに、国・関係研究機関とともに策定した「地層処分研究開発に関する全体計画（以下、全体計画）」[2]に基づき、第2次取りまとめ以降の事業段階における技術開発に取り組んでいる。本講演では、全体計画に基づきNUMOが進める技術開発の現状を、2021年2月に公表した包括的技術報告書の意義を踏まえながら概説する。

2 NUMOにおける地層処分に関する取組みの歴史と現状

2.1 全体計画とNUMO中期技術開発計画

NUMOは2010年度に技術レポート[3]の中で安全確保のロードマップを示した。さらに2013年からは「地層処分の技術開発計画（以下、NUMO中期技術開発計画）」[4]を策定し、以後5ヶ年ごとに計画を更新し、技術開発に取り組んでいる。2018年度からはNUMO自身も参加する地層処分研究開発調整会議が策定する全体計画で定められたNUMOが取組むべき開発課題を中心にNUMO中期技術開発計画[5]を策定し、技術開発に取り組んでいる（Table 1）。

2.2 包括的技術報告書の公表

NUMOは第2次取りまとめ以降の国・関係研究機関によ

Table 1 Table of contents on Technological development plan for a geological disposal project (FY2018–FY2022), revised edition[5].

番号	標題
1.	はじめに
2.	本計画における技術開発の内容
2.1	地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化
2.1.1	現状と基本方針
2.1.2	自然現象の影響（全体計画 2.1.1）
2.1.3	地質環境の特性（全体計画 2.1.2）
2.2	処分場の設計と工学技術
2.2.1	現状と基本方針
2.2.2	人工バリア（全体計画 2.2.1）
2.2.3	地上・地下施設（全体計画 2.2.2）
2.2.4	回収可能性（全体計画 2.2.3）
2.2.5	閉鎖前の安全性の評価（全体計画 2.2.4）
2.3	閉鎖後長期の安全性の評価
2.3.1	現状と基本方針
2.3.2	シナリオ構築（全体計画 2.3.1）
2.3.3	核種移行解析モデル開発（全体計画 2.3.2）
2.3.4	核種移行解析に用いるパラメータ等に関するデータの整備（全体計画 2.3.3）
3.	中長期的に研究開発を進めるうえでの重要事項
3.1	技術マネジメント
3.1.1	中長期的に技術開発を進めるための技術マネジメント
3.1.2	技術マネジメントを支える体制に係る取組み（全体計画 3.1.3（1））
3.2	技術マネジメントを支える仕組みに係る取組み（全体計画 3.1.3（2））
3.3	国際連携・貢献（全体計画 3.1.4）
4.	おわりに

る研究開発成果と NUMO の技術開発成果を統合し、安全な地層処分の実現に向けた技術や、それを支える科学的知見を包括的に提示するため、2021年2月に「包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—（以下、包括的技術報告書）」を公表した[6-8]。セーフティケースとは、国際機関である経済協力開発機構／原子力機関（以下、OECD/NEA）の定義によると「ある特定の（放射性廃棄物）処分場の開発段階において、処分場の長期の安全を裏付ける論拠を収集したもの」とされており[9]、包括的技術報告書は OECD/NEA が提示するセーフティケースの一般的構造に対応する構成となっている（Fig.1）。

NUMOはこの報告書を、日本原子力学会による1年間

Current status of technological development on geological disposal project by Takamasa HAYASHI (thayashi@numo.or.jp)

*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丁目1番23号

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第38回バックエンド夏期セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

(2018年12月～2019年12月)に及ぶレビュー[10]を経て公表している。さらに、報告書の技術的信頼性について海外の専門家の確認を受けるため、包括的技術報告書は英語化され[11]、2021年11月より OECD/NEA によるレビューが行われている。

NUMO は包括的技術報告書を今後の処分地選定段階で策定する「セーフティケースの基本形」として活用可能なものと位置付けている。今後、包括的技術報告書に提示する技術的課題を中心に、全体計画および NUMO 中期技術開発計画に沿って継続的に技術開発に取組み、事業の各段階においてその時点の最新の科学的知見を反映し、包括的技術報告書を更新していく。更新した報告書の内容について様々な専門家のレビュー等を経ることで、その技術的信頼性を確認していく。

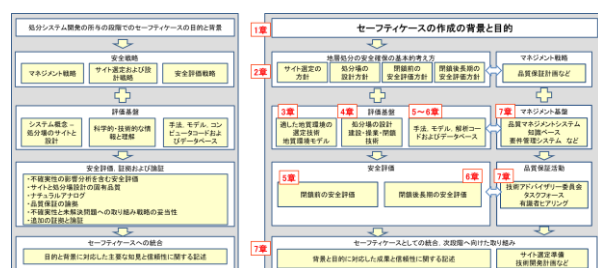


Fig.1 Safety case structure and contents[7].

3 NUMO の地層処分技術開発の取組み

3.1 取組み方（分野間の連携）

NUMO は事業の進展に合わせて、安全戦略に沿って整備した評価基盤に基づき安全評価を行う (Fig.1). 安全評価の結果は、その時点での出力値であると同時に「地質環境の調査・評価」および「処分場の設計」への入力値でもある。そのため、地層処分技術開発の実施にあたっては分野間の情報・データの受け渡し (Fig.2) を前提として、技術開発計画を策定し、Fig.3 に示すように個別の技術開発成果の反映先、分野間の連携方法、成果の統合時期を確認しつつ、以下に示す地層処分の評価基盤の整備および安全評価のための技術開発に取組んでいる。

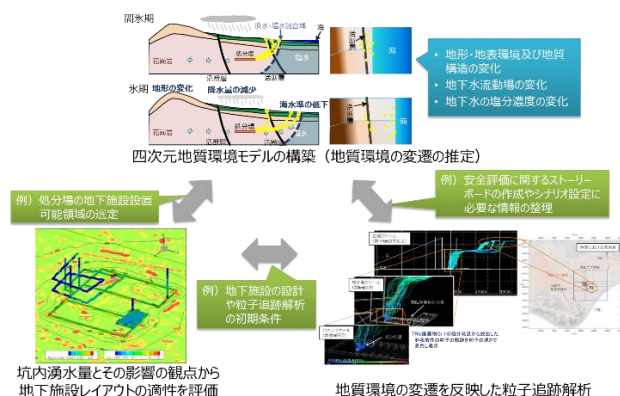


Fig.2 A image of technological development through communication between teams[12].

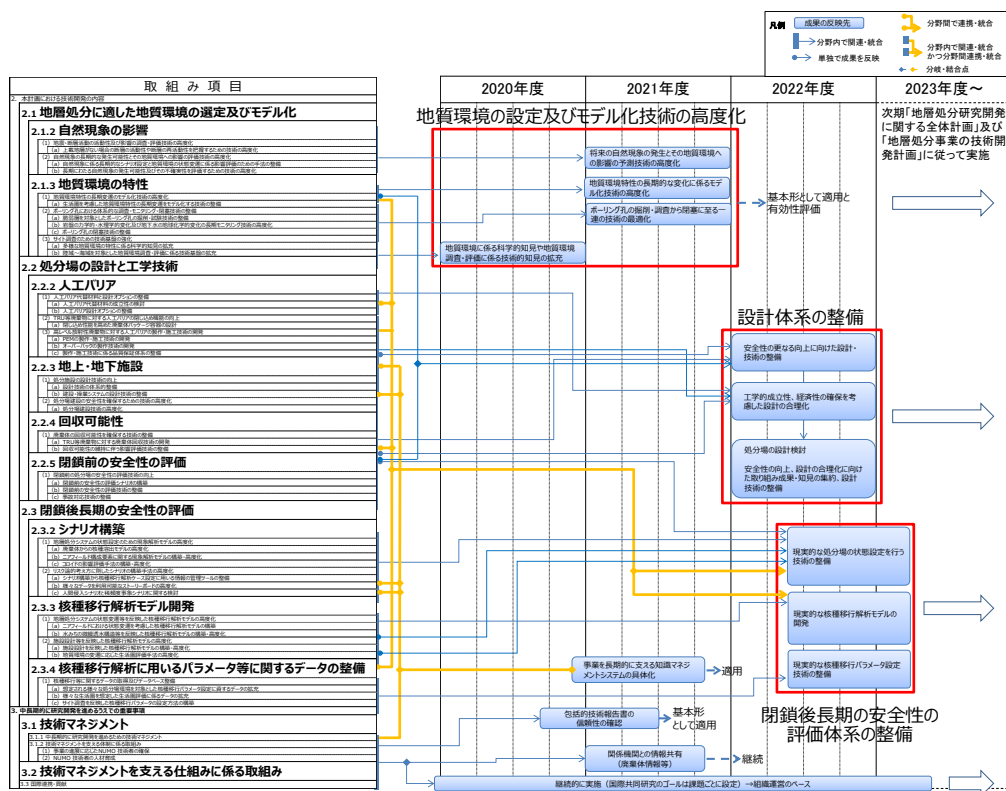


Fig.3 Interrelationship diagram of R&D topics in the technological development plan[5].

3.2 地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化

地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化のための技術開発として、自然現象の影響に係る将来予測の信頼性を向上させることと、わが国の多様な地質環境を対象とした調査・評価技術の信頼性の向上を目的とした技術開発に取り組んでいる[12].

自然現象の影響については、例えば、サンアンドレアス断層を用いた原位置試験より、断層の変位に伴う断層周辺の水理学的・力学的特性変化を表現できる解析コードの妥当性確認やコード改良に必要なデータの取得計画を策定してきた。さらにボーリング孔に設置する断層の変位や水圧等をモニタリングするための装置の改良のための設計および改良を実施してきた。また、自然現象の発生可能性についての評価手法の妥当性確認、および定量的な影響評価をこれまで行っていない、深部流体が処分場へ流入するシナリオを検討するために、深部流体が分布する有馬温泉周辺の地下温度構造などの情報を収集・整理した[13].

調査・評価技術の信頼性の向上については、例えば、より現実的な地質環境条件を考慮した処分場の設計や安全評価に資する、長期にわたる地形変化や気候・海水準変動に伴う地質環境特性の変化を考慮した地質環境のモデル化技術の整備、ボーリング孔掘削、孔内試験および関連する室内試験に関する方法論や手法を最適化するための大深度ボーリング実証試験の実施による掘削・試験技術の有効性に関する知見の蓄積、および先第三紀付加体堆積岩類を対象とした各地質環境特性（地質・熱・水理・力学・化学）が相互に関連付けられ、品質が保証されたデータを同一の地下環境から取得するなどの科学的知見の拡充を行った[14].

今後も最新の科学的知見や調査・評価事例に係る情報の収集・蓄積、調査・モニタリング技術の信頼性向上および合理化・最適化、モデル化・評価技術の妥当性・適用性確認、並びに処分場の設計や安全評価との連携に必要な技術の整備に取り組む。

3.3 処分場の設計と工学技術

処分場の設計のための技術開発として、人工バリア、地上・地下施設、回収可能性、処分場閉鎖前の安全性の評価のための技術開発に取り組んでいる[12].

人工バリアについては、例えば処分場の安全機能に係る設計の信頼性向上と、設計の柔軟性や材料調達の高多様性確保のために人工バリア代替材料の適用性確認と設計オプションを整備することを目指して、オーバーバック代替材料（鍛造品、鋳造品、電炉材（スクラップ材）および銅・炭素鋼複合材）の適用性確認と、6種類の国内産ベントナイトの緩衝材や埋戻し材への適用性[15]等を確認した。

地上・地下施設については、多様な地質環境や廃棄体特性に応じた処分場の設計検討を実施し、設計の柔軟性を確保した設計体系の整備や、処分場建設技術のさらなる安全性と効率性の向上に資する建設作業の遠隔操作化・自動化技術の適用を検討している。例えば、沿岸域などの地質環境に対する地下施設のレイアウト、アクセス坑道を複数設計し、安全対策や換気・排水設備の設計の実施や、鉱山や

建設工事に適用されている遠隔操作・自動化技術の利用や開発状況について情報収集したうえで、地層処分への適用課題を整理している。

回収可能性の観点では、回収可能性を確保する技術に係る信頼性を向上させるべく、TRU等廃棄物において廃棄体パッケージ間充填材にモルタルを使用する従来概念における回収時のモルタル除去技術の検討や、そもそもモルタルによる充填を必要としない代替概念として PEM（Prefabricated Engineered Barrier System Module）方式の適用性の検討などを行っている。

また、多様な地質環境を対象に、建設・操業・閉鎖時の地下施設の状態をモデル化し、湧水量や地下水位、化学環境の変化を定量的に評価できる解析技術を整備した（Fig.2 左下の図）。この解析技術により、廃棄体定置後に回収可能性の維持期間を延長することによる安全性への影響や影響を最小化するための対策を具体的に検討することができる。と期待する。

処分場閉鎖前の安全性の評価に係る技術開発は、閉鎖までの期間に発生する可能性がある異常事象を網羅的に考慮した評価シナリオの作成と、廃棄体への衝撃や火災等の事象について地下施設特有の条件を考慮した影響評価に関する技術を整備した。例えば、評価シナリオや事故事例などに係る海外の情報収集など、閉鎖前の安全性評価に関する知見の拡充を進めるとともに異常事象の発生に対する影響評価を実施したり、TRU等廃棄体パッケージ間充填材として使用するモルタルからの水素ガス発生量を定量化し、換気設備によって十分な安全対策が可能であることを確認するなどを行った。

今後も、設計オプションの継続的な整備、人工バリアの安全機能に関するデータの蓄積と拡充による安全確保に対する信頼性向上、人工バリアの製作・施工プロセスの改良と段階的な技術の確認による人工バリア構築技術の実用化と信頼性の向上、処分場の建設・操業・閉鎖に適用可能な遠隔操作化・自動化技術など、国内外における最新技術の情報収集と地層処分事業への適用性評価、回収可能性を維持することに伴う閉鎖前および閉鎖後の安全性への影響評価とその影響を最小化するための対策の検討、閉鎖前の安全性評価に必要となる評価手法の継続的整備と閉鎖までの期間における自然現象に対する安全対策、異常事象への対応策の具体化などに取り組む。

3.4 閉鎖後長期の安全性の評価

処分場閉鎖後長期の安全性の評価に係る技術開発は、シナリオ構築、核種移行解析モデル開発および核種移行解析に用いるパラメータ等に関するデータを整備することを目指して取り組んでいる[12].

閉鎖後長期安全評価のシナリオを構築するために必要な現象解析モデルの高度化とモデルの妥当性確認のために、スイスのグリムゼル試験場における国際プロジェクト（HotBENTプロジェクト）への参画を通じて取得したベントナイト緩衝材の最高温度が100℃を超える条件での、温度、水分量、応力状態等に関するデータを用いた熱・水連成解析モデルの作成や、ベントナイトコロイドの移行挙動

評価のためのデータ取得および人工バリア（オーバーパックとベントナイト）の間での相互作用モデルの改良のため、最長 10 年程度に渡る長期拡散試験データ取得などに取組んでいる。

核種移行解析モデルの開発は、処分場システムの状態変遷等を考慮した核種移行解析モデルの高度化、地質環境や施設設計の特徴等を反映した核種移行解析モデルの高度化を目指して、包括的技術報告書で適用したニアフィールドスケール（百 m 四方程度）の解析領域を、段階的に広域スケール（数十 km 四方以上）まで拡張し、さらに時間変遷も考慮可能とし、人工バリア、処分坑道、連結坑道や母岩の不均質性（割れ目ネットワーク）を現実的に即して表現したモデルでの三次元地下水流動・物質移行解析（粒子追跡解析）を実行可能とするなどの成果を得た。さらに、地質環境の長期変遷モデルと連携した粒子追跡解析を実行する手法の構築にも取組んでいる。

核種移行解析に用いるパラメータ等に関するデータの整備のために、処分場の状態の時間変遷や空間的な不均質性を反映した核種移行パラメータ設定に資する核種移行等に関するデータの取得およびデータベース整備に取組んでおり、日本原子力研究開発機構（JAEA）等との共同研究において、処分場のさまざまな状態を考慮した核種移行パラメータに関するデータ（例えば溶解度の温度依存性データ、Ca 型化したモンモリロナイトに対する収着分配係数および実効拡散係数のデータ、Na 型モンモリロナイトに対する収着分配係数の温度および pH 依存性のデータ等）を拡充した。

包括的技術報告書の検討において、重要な評価対象核種となり得ることが明らかになったウランについては、収着分配係数を推定するモデルの構築を大学との共同研究により取組み、高炭酸濃度かつ還元環境下における収着分配係数の取得手法を構築し、この手法を用いて取得したデータにより、ウランの収着分配係数の推定モデルを作成した。

今後もシナリオ構築、核種移行解析モデル開発および核種移行解析に用いるパラメータ等に関するデータの整備に継続的に取組む。とくに地層処分システムの状態や核種移行解析における、データや現象解析モデルに付随する不確実性を定量的に把握するための不確実性定量化手法の高度化を目指した技術開発を重視する。そのため不確実性定量化において想定される多数の解析ケースの計算に対応するための解析時間を短縮するための手法の開発、および核種移行パラメータ等に係る不確実性の把握に資する実測データの拡充を行っていく。

4. 技術マネジメント

地層処分事業は文献調査から建設、操業、閉鎖まで 100 年以上かけて行う事業であり、地層処分事業の進展および最新の知見を取り入れてセーフティケースを更新すること、地層処分事業に携わる人材を継続的に確保すること、これまで個々人が培った技術力、ノウハウを将来世代に保存・継承していくといった知識のマネジメントが重要となる。そのために分野間・関係組織間の連携、技術力の継承・

向上が世代を繋ぎながら実行されるための技術マネジメントが適切に行われることが必要となる[12]。

Fig.4 に示すとおり、技術マネジメントを支える体制は人材の確保、育成によって成立する。そのため NUMO は新卒・キャリア職員の積極的な採用をはじめ、地層処分に係る技術移転も含む関係研究機関との共同研究や、最新の科学的知見を取り入れるための大学との共同研究を推進している。さらに大深度ボーリング実証試験やスイスグリムゼル試験場やカナダ核燃料廃棄物管理機関（NWMO）との共同研究などを通じて若手技術者の育成にあたっている。

技術マネジメントを効率的・効果的に運用する仕組み作りとして、NUMO は包括的技術報告書で用いた地質環境特性データや線量評価解析入出力データを格納するデータベースの開発や、閉鎖後長期の安全評価に係るシナリオ構築からモデル・データ設定までの一連の情報について、相互の関連性を電子的に確保したうえで知識モデルとして整理し、安全評価に関する知識・情報を的確かつ効率的に管理できるツールのプロトタイプの開発に取組んでいる。

海外の地層処分実施主体（スイス放射性廃棄物管理協同組合（Nagra）、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）、NWMO 等）においても、技術マネジメントの体制・仕組みを継続していくことは、共通の課題となっている。そのため NUMO は OECD/NEA、国際原子力機関（IAEA）など国際機関が実施する委員会やプロジェクト等への参加を通じて国際動向の把握、国際貢献を継続している。

NUMO は今後も技術マネジメントの取組みにより、安定した人材の確保と知識マネジメントを強化するとともに、国際連携・国際貢献を推進する。

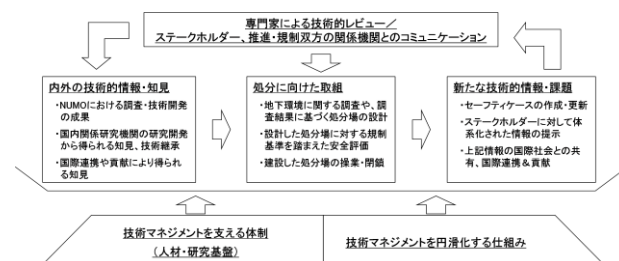


Fig.4 Overview of Technology management[2].

5. おわりに

NUMO は文献調査などサイト選定調査を適切かつ着実に進めるとともに、国の全体計画や NUMO 中期技術開発計画に基づく技術開発を今後も継続し、安全な地層処分の実現に向けた技術や、それを支える科学的知見、国・関係研究機関の研究成果をセーフティケースに統合していく。併せて、地層処分に対する技術的信頼性の更なる向上に資する分野内・分野間の連携推進や技術マネジメントの一層の強化に取組んでいく。

また、NUMO は地層処分に直接かかわる分野だけでなく、幅広い分野の方々に対して地層処分事業の安全確保に対する取組みを、技術者自らが説明していくことが、事業を進展させる上で重要な取組みと捉えている。そのため NUMO は日本原子力学会ウィークリーウェビナー「放射性廃棄物

の管理」(2021年11月～2022年3月)[16]やNUMO地層処分技術オンライン説明会「改訂した包括的技術報告書」[17]などを通じて包括的技術報告書を活用した積極的な情報発信に取り組んでいる。また、包括的技術報告書で提示する地層処分の安全性を説明するための考え方や、それが国際的に確立されてきた経緯、地層処分事業を進めていくなかでの包括的技術報告書の役割などについて解説した平易な読み物として取りまとめた「なぜ、地層処分なのか」[18]を公表している。

参考文献

- [1] 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 (1999).
- [2] 地層処分研究開発調整会議: 地層処分研究開発に関する全体計画(平成30年度～令和4年度; 令和2年3月改訂). (2020).
- [3] 原子力発電環境整備機構: 地層処分事業の安全確保(2010年度版)—確かな技術による安全な地層処分の実現のために—. NUMO-TR-11-01 (2011).
- [4] 原子力発電環境整備機構: 地層処分事業の技術開発計画—概要調査段階および精密調査段階に向けた技術開発—. NUMO-TR-13-02 (2013).
- [5] 原子力発電環境整備機構: 地層処分事業の技術開発計画(2018年度～2022年度)改訂版. NUMO-TR-20-05 (2020).
- [6] 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—適切なサイトの選定にむけたセーフティケースの構築—要約. NUMO-TR-20-01 (2021).
- [7] 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—適切なサイトの選定にむけたセーフティケースの構築—概要編. NUMO-TR-20-02 (2021).
- [8] 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—適切なサイトの選定にむけたセーフティケースの構築—本編・付属書. NUMO-TR-20-03 (2021).
- [9] 経済協力開発機構/原子力機関(OECD/NEA): Post-Closure Safety Case For Geological Repositories. NEA No. 3679 (2004).
- [10] 一般社団法人日本原子力学会「NUMO 包括的技術報告書レビュー」特別専門委員会: 「NUMO 包括的技術報告書」レビュー報告書. (2019).
- [11] 原子力発電環境整備機構: The NUMO Pre-siting SDM-based Safety Case. NUMO-TR-21-01 (2021).
- [12] 経済産業省: 第7回地層処分研究開発調整会議(online), 技術開発の現状について. 資料2-2, 2022年6月6日(2022).
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/chiso_shobun/pdf/007_02_02.pdf (accessed 2022-11-28).
- [13] 原子力発電環境整備機構: 火山性熱水・深部流体の分類に応じた影響評価手法の整備. NUMO-TR-19-02 (2020).
- [14] 原子力発電環境整備機構: 先新第三紀付加体堆積岩類における地質環境特性データの取得. NUMO-TR-22-01 (2022).
- [15] 原子力発電環境整備機構: 国内産ベントナイトおよびベントナイト混合土の基本特性データ(NUMO-電中研共同研究). NUMO-TR-21-02 (2022).
- [16] 一般社団法人日本原子力学会: ウィークリーウェビナー「放射性廃棄物の管理」2021(online).
<https://www.aesj.net/weeklywebinar2021> (accessed 2022-11-28).
- [17] 原子力発電環境整備機構: 「地層処分技術オンライン説明会(改訂した包括的技術報告書)」(online).
<https://www.numo.or.jp/technology/techpublicity/lecture/210513.html> (accessed 2022-11-28).
- [18] 原子力発電環境整備機構: なぜ、地層処分なのか. NUMO-TR-20-04 (2021).