

地層処分事業の進め方

吉田美美子*1

地層処分の対象とする放射性廃棄物は、原子力発電事業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核種を一定量以上含む廃棄物である。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、地層処分事業の進め方を中心に、事業の概要、事業の進展状況および一般社団法人日本原子力学会のレビュー結果に基づき改訂された包括的技術報告書について概観する。

Keywords: 地層処分, 多重バリアシステム, 文献調査, 包括的技術報告書

In Japan, geological disposal is the final disposal method of high-level radioactive waste and some types of TRU waste that contain a certain amount or more of nuclides with a long half-life, most of which are generated by reprocessing of spent nuclear fuel from commercial power reactors. These will be disposed of in a stable geological environment at greater than 300 meters below ground surface. This paper gives an overview of the project, the status of the project, and the revised technical report (the NUMO Pre-siting SDM-based Safety Case), focusing on how to proceed the geological disposal project.

Keywords: geological disposal, multibarrier system, literature survey, the NUMO Pre-siting SDM-based Safety Case

1 はじめに

原子力の利用に伴い発生する放射性廃棄物は「規制機関によって確立されたクリアランスレベルを超える濃度または放射能の放射性核種を含む、あるいは汚染されている廃棄物」と定義され[1]、数百年を超える長期間にわたり潜在的な危険性が継続するものが含まれる。このような放射性廃棄物の安全な処分法として、長い期間安定に存在する地下深部の地質環境に隔離・埋設して処分する地層処分が発想されてから半世紀以上が経過した。その間、国際的な枠組みや各国において地層処分を進めるものの合理性がさまざまな観点から繰り返し検証されるとともに、技術的および社会的側面からその実現に向けた取り組みがなされてきた。

本稿では、地層処分事業の進め方に重点を置き、以下の三つの項目に分けて講演を行った。一つ目に「地層処分事業の概要」として地層処分における安全確保の考え方と地層処分事業の段階的なプロセスについて、二つ目には「地層処分事業の進展」として 2020 年 11 月から開始された文献調査の状況、三つ目には 2021 年 2 月に一般社団法人日本原子力学会のレビュー結果に基づき改訂した包括的技術報告書（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—[2]）が公表されたことから、「包括的技術報告書の概要」として、その中身を概観した。以下ではその詳細について記載する。

2 地層処分事業の概要

2.1 地層処分対象の放射性廃棄物の種類とその量

地層処分の対象となる放射性廃棄物は、Fig.1 に示すように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、

How to proceed with the geological disposal management in Japan by Fumiko YOSHIDA (fyoshida@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 4-1-23 三田 NN ビル 2 階

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会 2021 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。

グループ	1	2	3	4	低放射性・角型セメント
概要	高放射性 吸着材 吸着材 放射性ヨウ素を 除去する吸着材	エンドボース・ハル 細胞・石墨	高放射性など 硝酸・硫酸 モルタルなど 乾燥・ペレット化	ゴム手袋 (接着・圧縮) 不燃性廃棄物 工具・金属配管	
主な廃棄物の 形態	200L ドラム缶 (直径 340 mm) 200L ドラム缶 (直径 340 mm)	200L ドラム缶 (直径 340 mm)	200L ドラム缶 (直径 340 mm)	200L ドラム缶 (直径 340 mm) その他(ハル面、インナーハル)	
特徴	放射性ヨウ素 (U-123を含む) セメント固化体	発熱量が比較的大 放射性ヨウ素 (C-14)を含む	硝酸・硫酸を含む モルタル、アスファルトに による固化体など	焼却灰、不燃物 セメント固化体など	
見込み発生量	319 [m ³]	5,792 [m ³]	5,228 [m ³]	5,438 [m ³] 1,309 [m ³]	
最大発熱量 (発生時点)	I [W/本]未満	90 [W/本]未満	I [W/本]	16 [W/本] 210 [W/本]	

Fig.1 Radioactive wastes for geological disposal (a vitrified waste and TRU waste).

ガラス固化体と記載）と、半減期の長い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 等廃棄物と記載）である。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、最終処分法と記載）に基づき、これら二種の放射性廃棄物を処分できる処分場を検討している。ガラス固化体は 100 万キロワットの原子力発電所を一年間運転した場合 20~30 本発生する。放射性廃棄物の量は原子力発電の利用に応じて増加するが NUMO は 40,000 本以上のガラス固化体に加えて 19,000 m³ 以上の TRU 等廃棄物を処分できる施設の計画を進めている。

2.2 地層処分における安全確保の考え方

施設の建設・操業時の期間は何重にも安全対策がなされる「深層防護」と ALARP の原則（リスクは合理的に実行可能な限りできるだけ低くしなければならない）に則り、通常の原子力施設における安全確保の戦略を適用する。一方、処分場閉鎖後長期の安全確保においては、人間の監視を離れても長期間にわたって地上の人々の放射線被ばく線量を十分に小さくすることを目標に、人工バリアと天然バリアから成る多重バリアシステム（Fig.2）を構築する。この多重バリアシステムは国際的に共通した安全確保の考え方

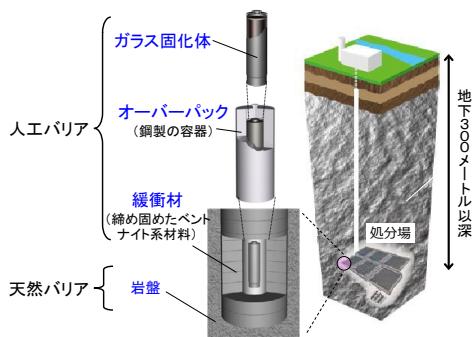


Fig.2 Multibarrier system consisted of the engineered barrier system (EBS) and geological barrier.

方である。また仮に異常事態が発生したとしても上記目標の達成が妨げられないよう、保守的な設計を行うことを基本方針としている。

高レベル放射性廃棄物の人工バリアは、ガラス固化体をオーバーパックに封入した後、地下深部の安定で好ましい条件を有する地質環境に設置され、その周囲に緩衝材を敷設することによって構築する。オーバーパックは、約 20 cm の厚さを持つ金属製の容器が考えられている。ガラス固化体を溶接封入したオーバーパックは、ガラス固化体の放射能や発熱量がある程度減衰するまでの（少なくとも 1,000 年間）、地下水とガラス固化体との接触を防止し、物理的に閉じ込めるものである。

緩衝材は、ベントナイトを主成分とする材料が考えられている。緩衝材は、オーバーパックを物理的に保護するとともに、オーバーパックの閉じ込め機能が失われた後も地下水の流れを抑制し、放射性物質を収着することで、放射性物質の移行を抑制することが期待されている。

これらに加えて、ガラス固化体中の放射性物質はガラスの網目構造の中に取り込まれているとともに、ガラス自体が溶けにくいという特性を有しており、地下水がガラス固化体と接触しても、放射性物質の地下水への浸出を抑制することが特徴である。なお、ガラス固化体が溶けきるまでの期間は約 7 万年以上と見積もられている[3]。

廃棄体や人工バリアを設置する地下深部（天然バリア）は、岩盤が稠密であるため透水性が小さいことや、地形の影響を受けにくいために動水勾配が小さいことから、地表付近に比べて地下水の流れは極めて緩慢である。また、地下水と岩石の反応や微生物の活動等により酸素を消費しているため酸素がほとんどない還元環境であることから、腐食や溶解といった物質の変化が起こりにくいう特徴を有している。数百年以上前の鉄斧が概ね完全な形を残して出土された事例は、地下が還元環境にあり、それが長期に継続してきた証拠である。さらに、地下深部は、人間の活動や、台風や洪水、地すべりといった自然災害等の地上で遭遇するさまざまな自然現象の影響を受けにくいう特徴を有する。

ここで示した安全確保の考え方を裏付ける論拠をまとめた資料として、NUMO では安全な地層処分の実現に向けた技術とそれを支える科学的知見を示した報告書（後述する包括的技術報告書が該当）を作成し、それを定期的に更新

していく、という方針を取っている。

2.3 地層処分事業のプロセス

地層処分事業における段階的な処分施設建設地の選定と、それに係る処分地選定調査の流れを Fig.3 に示す。このプロセスは最終処分法により規定されており、最初の段階である概要調査地区の選定（文献調査）、次の精密調査地区の選定（概要調査）、さらに最終処分施設建設地の選定（精密調査）という三段階の選定過程を経て、処分施設建設地が決定される。その際、それぞれの段階においては、最終処分法に定められた要件（法定要件）への適合性を確認する。

なお、各調査段階の結果は公表し、処分施設として適していない、あるいは地元自治体の同意を得られない場合は次の段階へ進むことはない。

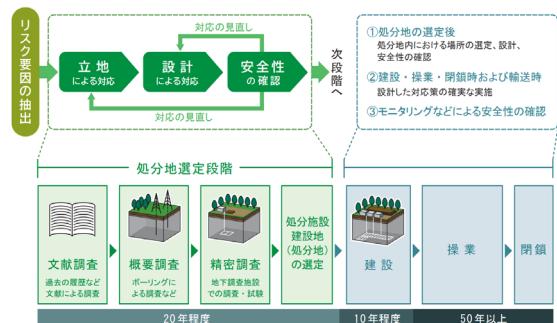


Fig.3 Site selection process in a stepwise manner.

3 地層処分事業の進展

3.1 諸外国における地層処分事業の進捗状況

1960 年代頃より放射性廃棄物の処分方法として地層処分が最も実現可能性の高い方法であると国際的に認識され始め、それ以降世界各国で地層処分に関する研究開発が行われてきた。2000 年ごろまでには地層処分は実現可能との結論が原子力を利用する主要各国で示され、その科学的論拠が報告書としてまとめられた。日本においては 1999 年に「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」[3]（以下、第 2 次取りまとめと記載）が公表され、日本の地質環境においても地層処分の安全性を確保できる見通しがあることが示された。こういった動きを受けて 2000 年ごろからは各国で地層処分の実施主体が設立されて地層処分事業が開始されている。

日本を含めた諸外国における地層処分事業の進捗状況（2022 年 5 月現在）を Fig.4 に示す。最も進んでいる国はフィンランド、次いでスウェーデンである。フィンランドは 2015 年には処分場建設が許可され、2020 年代には操業が開始される計画である。スウェーデンでは 2009 年にフ



Fig.4 Status of geological disposal projects in the world.

オルスマルクを処分場建設地として選定し、今年に入り（2022年1月27日）、処分場近傍に生じる影響を可能な限り低減するために計画されている慎重な防護措置が講じられることを条件として、スウェーデン政府は処分事業計画を承認した。一方、日本においては2000年にNUMOが設立されて以来長い期間にわたって調査段階前にあったが、2020年に文献調査へと段階が進んだ。

3.2 日本における文献調査開始までの動向

2020年10月9日、北海道の寿都町（すっつちょう）と神恵内村（かもえないむら）の両自治体において、議会や住民説明会での議論を経た上で、文献調査に応募および国の申し入れに受諾いただいた。これを受け NUMO は事業計画変更を国に申請、その後の認可により、同年11月17日、文献調査を開始した。寿都町、神恵内村における文献調査開始までの経緯を Fig.5 に示す。

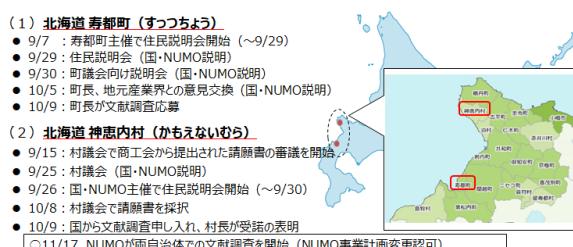


Fig.5 Status until the start of literature survey.

3.3 文献調査の進め方

文献調査は次に示す（1）～（4）の項目に従って進められる。

（1）文献調査の開始

文献調査の計画[4, 5]を公表するとともに、地域の方々に計画について説明を行う。

（2）文献・データの収集

全国規模で整備された文献・データに加えて、個別の地域の地質図や学術論文など、必要な文献・データを収集し情報を整理する。ここで挙げた個別地域の文献・データとは、地質などに関する学会や国の研究機関により地域別に整備されている文献・データや、特定の地域に関する学術論文などが挙げられる。

（3）文献・データに基づく評価

収集した文献・データを用いて、火山や活断層などによる著しい変動がないなどの文献調査で評価する要件（3.4参照）に従って評価を実施する。地層処分の仕組みや文献調査の進捗などについて、3.5で述べる「対話の場」などで地域の方々に説明を行う。

（4）報告書の作成／地域の方々への説明

文献調査で評価した結果や、概要調査地区の候補について、「対話の場」などで地域の方々へ説明を行う。地域における理解の状況や「対話の場」でのご意見を踏まえつつ報告書を作成する。そのうえで報告書について公告・縦覧するとともに、改めて地域の方々

に説明する機会を設け、ご意見を伺う。

文献調査は地質図や学術論文などの文献・データをもとにした机上調査であって、ボーリングなど現地での作業は伴わない。更なる調査（概要調査）の実施について、地域の方々にご検討いただくための材料を集め、事前調査的な位置付けにある。そのため、調査期間中、放射性廃棄物を持ち込むことはない。

3.4 文献調査で評価する要件

文献調査におけるデータ収集の目的は、文献調査対象地区に関連した文献・データからわかる範囲で地下の状況を把握することである。

最終処分法で定められた文献調査で評価する要件として、

- ① 地層の著しい変動（火山・火成活動、断層活動、隆起・侵食などによるもの）がないこと
- ② 地層処分を行おうとする地層に鉱物資源や岩盤としての強度が小さく地下施設建設が困難となる未固結堆積物がないこと

が求められており、NUMO はこれらの項目について文献・データを収集し、評価する。さらにその結果を用いて、概要調査地区の候補を検討する。

3.5 地域における「対話の場」の役割

文献調査の実施に際しては、地層処分事業に关心を示していた地域に、事業をさらに深く知りたいとともに、文献調査の進捗状況や地域の発展ビジョンなどさまざまな情報を提供・共有し、地域住民の方々のご意見が事業に反映される活動を継続するための「対話の場」などを設置し、地域住民の方々や多様な関係者に参画いただく機会を作ることが重要であると考えている。

NUMO は2021年3月、地元や周辺地域の方々からのさまざまなご質問やお問合せにきめ細かくお応えできるよう「寿都交流センター」ならびに「神恵内交流センター」を開設し、職員が現地に常駐する体制を整えた。2021年4月からは、それぞれの自治体での「対話の場」がスタートし、NUMO は自治体とともに事務局として運営にあたり、協力・支援を行っている。「対話の場」では、地域住民の方々に「地層処分について思うこと」等について意見交換していただくとともに、NUMO から文献調査の進捗状況等について報告している。

4 包括的技術報告書の概要

4.1 包括的技術報告書公表までの経緯

包括的技術報告書は、第2次取りまとめ以降の技術開発成果も踏まえた技術基盤を統合して、日本の地質環境に対して安全な地層処分を実現するための方法を説明し、技術的な取り組みの最新状況を示すことを目的としている。この目的のため NUMO は2013年から包括的技術報告書の作成に着手し、2018年11月にレビュー版を公表した。レビュー版とは外部レビューに供する報告書という位置付けに依る。その後2018年12月から一年をかけ日本原子力学会によるレビューを受け、2019年12月にレビュー報告書を

受領した。また、2019年5月には東京・大阪で外部専門家向けに報告書の説明会を実施した。

日本原子力学会レビューや外部専門家説明会のコメントなどを受けた修正を2020年1月から一年をかけ実施し、2021年2月に改訂した包括的技術報告書を公表するに至った。2021年11月からは国際機関（OECD/NEA）によるレビューが行われている。

4.2 セーフティケースの構造と報告書の構成

セーフティケースとは、処分場の安全性の裏付けとなる可能な限りの技術的な証拠、論拠や論述などを体系化し、さまざまな側面から安全性にかかる議論を積み上げた総合的な文書[6]として実施主体が作成するものである。包括的技術報告書はセーフティケースとしての役割を担うよう、セーフティケースの構造を基本に作成された。そのため、包括的技術報告書は国際的に受け入れられているセーフティケースの構造[7]に倣って章立てされている（Fig.6）。以降では各章の概要を記載する。

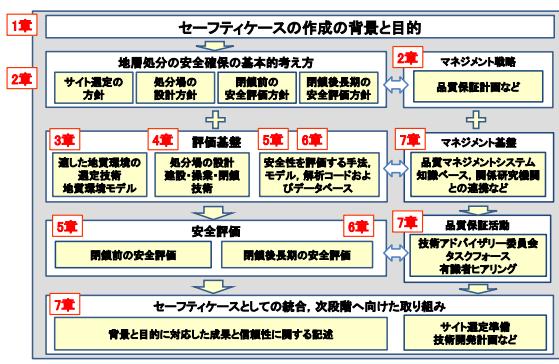


Fig.6 Relationship between the structure of the safety case and the contents of technical report.

4.2.1 安全確保の基本的考え方（第2章）

第2章では、処分場の安全を確保するためのNUMOの基本方針を述べている。安全確保のための基本的対策として、

- ◆ 段階的な調査により、処分場に重大な影響を与える可能性のある自然現象（活断層や火山活動など）が及ぶ範囲を避けて、好ましい地質環境を有するサイトを選定し、
- ◆ 選定されたサイトの将来の地質環境の変化も考慮して、十分な安全裕度を持たせて処分場を設計する。
- ◆ 処分場の安全性を評価するにあたっては、さまざまな不確実性を考慮した安全評価によって算出される影響が、許容できる範囲（規制機関が示す安全基準）に収まる場合は安全と判断、収まらない場合は処分場の設計の見直しやサイトの変更などを実施する、

といった対策をとる。

なお、三項目目に記載した安全性の「許容できる範囲」とは通常、規制機関が安全基準として示すものであるが、現時点では日本において地層処分の安全基準は定まってい

ない。そのため、包括的技術報告書では、国際機関（ICRPなど）が提唱する安全基準を参考に安全性の「めやす」を自主的に設定し、安全評価を行っている。

4.2.2 地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化（第3章）

第3章では、適切な地質環境を選定するための調査・評価技術を、最新技術を踏まえて示したうえで、日本の地質環境の特徴を反映した地質環境モデル（Site-descriptive model (SDM)）を作成し提示した。

適切な地質環境を選定するための調査・評価技術の提示については、地質環境を調査・評価するための方法や最新技術を整理し、幌延や瑞浪における深地層の研究施設設計画などにおいて適用された調査・評価技術に係る事例の蓄積結果などを記載している。日本の地質環境の特徴を反映した地質環境モデルの提示では、日本の地下深部に広く分布する代表的な三種類の岩種（深成岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類）について、その特徴を表現したモデル（地質環境モデル）を作成した（Fig.7）。ここでは、深地層の研究施設である幌延・瑞浪の研究成果などから取得された地下深部の状況（特に、断層・割れ目の特性など）に関する最新の知見が利用された。

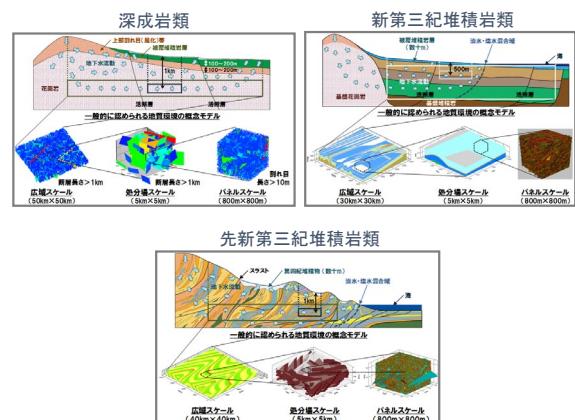


Fig.7 Conceptual SDMs and geological models taking into account the features of geological environments in Japan (Plutonic rocks, Neogene sedimentary rocks, and Pre-Neogene sedimentary rocks).

4.2.3 処分場の設計と工学技術（第4章）

第4章では、これまで蓄積してきた処分場の設計方法を適用して、処分場の設計結果を具体的に示している。ここでは人工バリアは幅広い地質環境特性に対して安全機能を確保できるよう設計され、第3章で提示された三種すべての岩種に適用可能な仕様を設定している。

実際の断層・割れ目の状態や地下水の流れ方などについて、地下深部の状況がより現実に即し表現された第3章の地質環境モデルに対して、湧水量が多い箇所は廃棄体を置かない設計の考え方を示すなど、地質環境に適応した具体的な設計対策を提示した。また、地上施設の安全対策や操業方法の具体化についても記載している。人工バリアの設計オプションの検討として、これまでの廃棄体を堅に置く方式（堅置き方式）に加えて、品質管理の容易さや操業性

に有利と考えられる横置きの人工バリアの定置方法（PEM）を新しく導入している（Fig.8）。

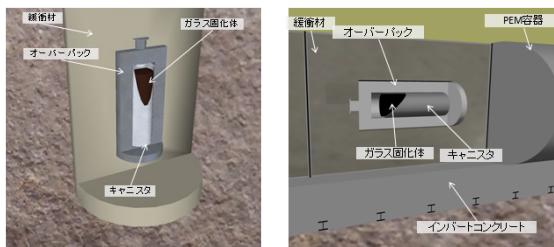


Fig.8 Vertical (left) and horizontal (right) emplacement of high-level radioactive waste.

4.2.4 閉鎖前の安全性の評価（第5章）

第5章においては操業中における万一の異常状態の発生を考慮し、処分施設の安全性を定量的に評価する手法を提示している。例を挙げると、地上施設におけるオーバーパックの吊り上げ作業（オーバーパックを吊り上げて地下に搬送する容器に積み込む作業）時に、十分な耐震設計や安全対策を施しているにもかかわらず、何らかの理由で吊り上げ中にオーバーパックが落下してしまう状況を想定し、落下した場合の放射性物質の周囲への飛散状況を解析した。その結果、オーバーパックの損傷は起こるもの、オーバーパック内のガラス固化体から放射性物質が周囲に放出するという状況は考えにくく、施設周辺に放射線の影響を及ぼすことはないことが確認された。

4.2.5 閉鎖後長期の安全性の評価（第6章）

第6章では、閉鎖後長期の将来の安全性を評価する技術についてまとめている。具体的には、将来起こり得る事象をその発生可能性を考慮して安全評価シナリオとして作成する（最も可能性の高いシナリオである基本シナリオは、Fig.9 に示すように廃棄体から少しづつ周囲の地下水に放射性物質が溶け、これが地表までゆっくりと移行し、それを将来の人類が摂取することにより被ばくする）方法を提示し、国内外の最新のデータベースに基づく放射性物質の移行パラメータを設定したうえで、将来の人間への放射線影響を解析する技術を示している。

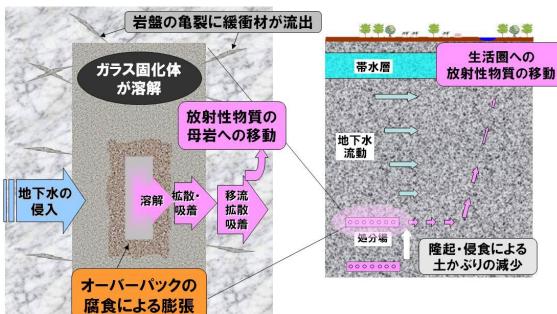


Fig.9 Reference scenario where nuclide melt from waste and reach the human environment.

解析技術については第3章で示された三岩種の地質環境モデルと第4章で提示された処分場の設計結果を反映した安全評価を実施している。異なる地質環境や設計オプショ

ンに対しその差を議論できるよう現実に即した解析を実施するため、人工バリアや地下施設の構造的な特徴、地下施設周辺における地質環境モデルの特徴などをできるだけ詳細に反映し、三次元的な放射性物質の移行現象を計算している。その結果、発生する可能性が極めて小さい安全評価シナリオを想定した解析を含めて、国際機関の勧告に基づいて設定しためやすの線量を下回る結果が得られた。これにより、日本の多様な地質環境に基づいた地層処分技術について、その信頼性の向上が計られたといえる。

4.2.6 セーフティケースへの統合とその信頼性（第7章）

包括的技術報告書は特定のサイトを対象としないセーフティケースとしての役割を果たすことを目的として作成された。この章では包括的技術報告書がセーフティケースとしての適切性を有しているかを検討し、その信頼性についての議論を多方面から展開している。

4.2.7 結論（第8章）

包括的技術報告書の第8章においては主要な結論として、「文献調査の段階以降に進むための技術的な準備が整えられており、今後、特定のサイトを対象としてセーフティケースを作成する場合に包括的技術報告書が基本形として活用できる」としている。

5 まとめ

本稿では地層処分事業の進め方として、地層処分の概要を記載したのち、地層処分事業の進展と改訂された包括的技術報告書について概観した。

文献調査では、最終処分法に定める文献調査で評価する要件を満足せず、明らかに適切でない場所を除外する作業を中心に、概要調査地区の候補を検討する。さらに、地域住民の方々との対話活動などを実施している。

包括的技術報告書は、第2次取りまとめ以降の技術開発成果を踏まえた技術基盤の統合文書としてセーフティケースの基本形となるよう作成された。1999年に公表された第2次取りまとめ後の技術的な取り組みの最新状況として2018年には包括的技術報告書のレビュー版、2021年には改訂した包括的技術報告書が公表され、日本の地質環境に對して安全な地層処分を実現するための方法が示された。

参考文献

- [1] IAEA: Predisposal Management of Radioactive Waste, Including Decommissioning. *IAEA Safety Standards Series*, No. WS-R-2 (2000).
- [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—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—. NUMO-TR-20-01 (2021).
- [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—. 総論レポート, JNC TN1400 99-021 (1999).
- [4] 原子力発電環境整備機構: 北海道寿都郡寿都町 文献

調査計画書. (2020).

- [5] 原子力発電環境整備機構: 北海道古宇郡神恵内村 文
獻調査計画書. (2020).
- [6] IAEA: The safety case and safety assessment for
radioactive waste. Specific Safety Guide, *IAEA Safety
Standards Series*, No. SSG-23 (2012).
- [7] OECD/NEA: The nature and purpose of the post-closure
safety cases for geological repositories. *NEA/RWM/R*,
(2013).