

# 原子力発電環境整備機構 (NUMO) による「地質環境モデルに基づくサイ ト選定の前段階におけるセーフティケ ース」

NUMOセーフティケースの国際ピアレビュー

原子力機関

放射性廃棄物管理・廃止措置課

**原子力発電環境整備機構（NUMO）による「地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケース」**

NUMO セーフティケースの国際ピアレビュー

JT03510957

### 経済協力開発機構

OECD は、38 の民主主義国の政府が協力して経済、社会、環境のグローバル化の課題に取り組む、他に類例のないフォーラムである。OECD はまた、コーポレート・ガバナンス、情報経済、高齢化社会の課題など、新たな動向や懸念事項を把握し、各国政府の対応を支援する上で最前線に立っている。OECD は、各国政府が政策の経験を比較し、共通の問題に対する解決策を模索し、グッドプラクティスを特定し、国内及び国際的な政策の調整に取り組むことができる場を提供している。

OECD 加盟国は、オーストラリア、オーストリア、ベルギー、カナダ、チリ、コロンビア、コスタリカ、チェコ共和国、デンマーク、エストニア、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、ハンガリー、アイスランド、アイルランド、イスラエル、イタリア、日本、韓国、ラトビア、リトアニア、ルクセンブルク、メキシコ、オランダ、ニュージーランド、ノルウェー、ポーランド、ポルトガル、スロバキア共和国、スロベニア、スペイン、スウェーデン、スイス、トルコ、英国、米国である。欧州委員会は、OECD の活動に参加している。

OECD 出版部門は、経済、社会、環境の課題に関する組織の統計収集と調査の結果、並びに加盟国が合意した条約、ガイドライン、基準を広く普及させている。

### 原子力機関

OECD 原子力機関（NEA）は 1958 年 2 月 1 日に設立された。現在の NEA 加盟国は 34 カ国で構成されており、それらはアルゼンチン、オーストラリア、オーストリア、ベルギー、ブルガリア、カナダ、チェコ、デンマーク、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、ハンガリー、アイスランド、アイルランド、イタリア、日本、韓国、ルクセンブルク、メキシコ、オランダ、ノルウェー、ポーランド、ポルトガル、ルーマニア、ロシア（メンバーシップ停止中）、スロバキア、スロベニア、スペイン、スウェーデン、スイス、トルコ、英国、米国である。欧州委員会と国際原子力機関もまた、この機関の活動に参加している。

NEA の使命は以下のとおりである。

- 加盟国が、国際協力を通じて、平和目的の原子力エネルギーの安全で環境に配慮した経済的な利用に必要な科学的、技術的及び法的基盤を維持し、更に発展させることを支援する。
- 原子力エネルギー政策に関する政府の決定や、エネルギーや低炭素経済の持続可能な開発などの分野でのより幅広い OECD の分析へのインプットとして、重要な課題についての権威ある評価を提供し、共通の理解を形成する。

NEA が強みとする特定分野には、原子力活動の安全と規制、放射性廃棄物管理とデコミッションング、放射線防護、核科学、核燃料サイクルの経済的及び技術的分析、原子力に関する法律と責任、及び情報公開が含まれる。NEA Data Bank は、参加国に核データとコンピュータプログラムのサービスを提供している。

本書及び本書に含まれるデータや地図は、いかなる領域の地位や主権、国際的な国境や境界の画定、いかなる領域、都市、地域の名称にも影響を与えるものではない。

OECD 出版物の正誤表は、[www.oecd.org/about/publishing/corrigenda.htm](http://www.oecd.org/about/publishing/corrigenda.htm) からオンラインで入手できる。

#### © OECD 2023

OECD のコンテンツは私的利用を目的としてコピー、ダウンロードまたは印刷することができ、情報源および著作権者として OECD を適切に認めた上で、利用者の文書、プレゼンテーション、ブログ、ウェブサイトおよび教材に OECD の出版物、データベースおよびマルチメディア製品からの抜粋を掲載することができる。公共または商業目的での使用および翻訳権に関するすべての要望は、[neapub@oecd-nea.org](mailto:neapub@oecd-nea.org) に提出する必要がある。この資料の一部を公共または商業目的で複製する許可を求める場合は、著作権情報センター（CCC、[info@copyright.com](mailto:info@copyright.com)）またはフランス著作権利用センター（CFC、[contact@cfcopies.com](mailto:contact@cfcopies.com)）まで直接連絡されたい。

本書は「The Nuclear Waste Management Organization of Japan's Pre-siting Safety Case Based on the Site Descriptive Model: An International Peer Review of the NUMO Safety Case」を原典として日本語訳したものである。原典は NEA のウェブサイト [www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_77138](http://www.oecd-nea.org/jcms/pl_77138) からオンラインで入手できる。

## 謝辞

OECD 原子力機関（NEA）は、このピアレビュー実施のために時間を費やし、尽力された国際レビューチーム（International Review Team：IRT）の専門家各位— 議長を務められたフィンランド放射線・原子力安全局（STUK）の Jussi Heinonen 氏、ならびにメンバーの、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）の Allan Hedin 氏、フランス放射性廃棄物管理庁（Andra）の Jean-Michel Hoorelbeke 氏、韓国原子力安全技術院（KINS）の JeHeon Bang 氏、ベルギー放射性廃棄物・濃縮核分裂性物質管理機関（ONDRAF/NIRAS）の Philippe Lalieux 氏、ドイツ連邦放射性廃棄物処分安全庁（BASE）の Jens Mibus 氏、カナダ核廃棄物管理機関（NWMO）の Mihaela Ion 氏に謝意を表す。本ピアレビューのテクニカルライターは Gérald Ouzounian 氏で、NEA 放射性廃棄物管理・廃止措置課（RWMD）課長の Rebecca Tadesse 氏と、NEA 放射性廃棄物管理・廃止措置課のジュニア・スペシャリスト、Morgan Packer 氏の協力を得た。また、本ピアレビューを実施するにあたり、ご支援いただいた日本の原子力発電環境整備機構（NUMO）のスタッフにも謝意を表す。

## 目次

謝辞.....	3
略語の説明.....	6
要旨 .....	9
<b>1. はじめに .....</b>	<b>14</b>
1.1. 目的と期待事項.....	14
1.2. 国際ピアレビューの組織 .....	14
1.3. 付託事項 .....	14
1.4. レビューの実施 .....	15
1.5. 日本における放射性廃棄物の地層処分にに関する一般的な背景情報 .....	15
1.6. レビュー報告書の構成 .....	18
<b>2. レビューの付託に基づく結果.....</b>	<b>19</b>
2.1. 安全戦略 .....	19
2.2. 地質環境の評価 .....	24
2.3. 処分場の設計アプローチ.....	29
2.4. 操業時の安全評価 .....	32
2.5. 閉鎖後の安全評価 .....	33
2.6. マネジメントシステム.....	37
2.7. 研究開発 .....	38
<b>3. 結論と提言 .....</b>	<b>41</b>
3.1. 一般事項 .....	41
3.2. 日本における地層処分の基本的な実現可能性 .....	43
3.3. セーフティケースの枠組みに関連する重要点 .....	45
3.4. NUMO への技術的な提言.....	47
<b>Annex A. 国際レビューチームのメンバー .....</b>	<b>50</b>
<b>Annex B. 付託事項 .....</b>	<b>55</b>
<b>Annex C. 地層処分にに関する「科学的特性」の全国マップ .....</b>	<b>60</b>
<b>Annex D. NUMO サイト選定の前段階におけるセーフティケースの各セクションにおける IRT のコメント、結果、推奨事項の要約.....</b>	<b>61</b>

## 図のリスト

図 1. NUMO のマネジメントシステム.....	38
----------------------------	----

## 表のリスト

表 1. 付託事項に基づく本報告書の構成.....	19
表 2. EBS のシェル構造 .....	30

## 略語の説明

AESJ	Atomic Energy Society of Japan (日本原子力学会)
ANDRA	French National Radioactive Waste Management Agency (フランス放射性廃棄物管理機関)
BASE	Federal Office for the Safety of Nuclear Waste Management (連邦放射性廃棄物処分安全庁【ドイツ】)
DGR	Deep geological repository (深地層最終処分場)
DI	Detailed investigations (精密調査)
EBS	Engineered Barrier System (人工バリアシステム)
EDZ	Excavation Damaged Zone (掘削損傷領域)
FEP	Features, events and processes (特徴、事象、プロセス)
FEPC	Federation of Electric Power Companies of Japan (電気事業連合会)
HLW	High-level radioactive waste (高レベル放射性廃棄物)
IAEA	International Atomic Energy Agency (国際原子力機関)
ICRP	International Commission on Radiological Protection (国際放射線防護委員会)
IGDTP	Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste (放射性廃棄物の地層処分の実施)
ILW	Intermediate level waste (中間レベル放射性廃棄物)
IRT	International Review Team (国際レビューチーム)
JAEA	Japan Atomic Energy Agency (日本原子力研究開発機構)
JNC	Japan Nuclear Cycle Development Institute (核燃料サイクル開発機構)
JNFL	Japan Nuclear Fuel Limited (日本原燃)
KINS	Korea Institute of Nuclear Safety (韓国原子力安全技術院)
KORAD	Korea Radioactive Waste Agency (韓国原子力環境公団)
LLW	Low-level radioactive waste (低レベル放射性廃棄物)

LS	Literature survey (文献調査)
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry in Japan (経済産業省【日本】)
MOX	Mixed oxide fuel (混合酸化物燃料)
NEA	Nuclear Energy Agency (原子力機関)
NRA	Japan Nuclear Regulation Authority (原子力規制委員会【日本】)
NUMO	Nuclear Waste Management Organization of Japan (原子力発電環境整備機構)
NWMO	Nuclear Waste Management Organization (Canada) (カナダ核廃棄物管理機関)
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development (経済協力開発機構)
ONDRAF /NIRAS	Belgian National Agency for Radioactive Waste and enriched Fissile Material (ベルギー-放射性廃棄物・濃縮核分裂性物質管理機関)
PEM	Prefabricated Engineered barrier system Module (一体型人工バリアモジュール)
PI	Preliminary investigations (概要調査)
PSI	Paul Scherrer Institute (パウルシエラー研究所)
RMS	Requirements Management System (要件管理システム)
RWMD	Division of Radioactive Waste Management and Decommissioning (NEA 放射性廃棄物管理・廃止措置課)
RWMO	Radioactive waste management organisation (放射性廃棄物管理組織)
SDM	Site Descriptive Model (地質環境モデル)
SKB	Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社)
STUK	Radiation and Nuclear Safety Authority (Finland) (放射線・原子力安全局【フィンランド】)
THMCR	Thermal, hydraulic, mechanical, chemical and radiological (熱-水-力学-化学-放射線学)
TRL	Technology readiness level (技術成熟度レベル)
TRU	Transuranic (waste) (超ウラン【廃棄物】)
TSO	Technical support organisation (テクニカルサポート組織)



UIF	Underground investigation facility (地下調査施設)
UOX	Uranium oxide fuel (ウラン酸化物燃料)
URL	Underground Research Laboratory (地下研究所)
VLLW	Very low-level radioactive waste (極低レベル放射性廃棄物)
WAC	Waste acceptance criteria (廃棄体受入基準)
WATEC	International Radioactive Waste Technical Committee (IAEA) (放射性廃棄物処理 処分技術委員会【IAEA】)

## 要旨

2021年、原子力発電環境整備機構（NUMO）は安全性を重視した段階的な手順に基づく地層処分場のサイト選定を進めるなかで、原子力機関（NEA）に対して、NUMOの『Pre-siting Site Descriptive Model-based Safety Case（地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケース）』（日本語版は『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－』）に関する独立した国際レビューを依頼した。NUMOは、日本における高レベル放射性廃棄物（HLW）および長半減期低発熱放射性廃棄物（超ウラン廃棄物またはTRU廃棄物）の長期管理に責任を負っておりこのレビューは、各ステークホルダーに、透明性、公平性のあるオープンな方法で情報を提供するとともに、サイト選定前段階におけるジェネリックなセーフティケースの成熟度と準備状況を評価し、日本における深地層処分の技術的な実現可能性を確認するために実施された。また、既存の国内法および国際法や他国のプログラムのベストプラクティスに基づいてサイト選定に適用できる枠組みを開発し、将来の主要課題を特定することも目的としている。

NEAが組織した国際レビューチーム（IRT）は、2022年6月20日から24日にかけて東京で開催したレビューワークショップをもって、NUMOが英語で提供した『Nuclear Waste Management Organization of Japan（NUMO）Pre-siting SDM-based Safety Case Report, NUMO-TR-21-01（2021）』の独立した国際レビューに関する作業を完了した。

レビューにあたり、NUMOとの協議の際には、必要に応じ追加の付属書（SR）や、場合によっては英語での要約もIRTに提出された。

NUMOの地質環境モデルに基づくセーフティケース報告書は、HLWおよびTRU廃棄物の地層処分プロジェクトに関するものである。このセーフティケースにおけるNUMOの第一の目的は、適切とみなされる可能性のあるサイトを明確にし、代表的な三次元の地質環境モデル（SDM）としてこれらを示すことである。NUMOのセーフティケースは、地質学的基準に加えて、処分場の設計、関連する技術的な実現可能性、および操業時と閉鎖後の安全要件を満たすことが可能であることを示すための評価を考慮している。

NUMOは、地層処分に利用可能な地域を特定するため、長期的に不安定となる可能性があるサイトや、廃棄物の閉じ込め要件を満たしていない可能性があるサイトをすべて除外するとともに、日本の地理的状况を分析している。また、NUMOは、『日本における高レベル放射性廃棄物の地層処分のための処分地選定プロセス』に対して2016年に実施されたNEA国際ピアレビューからの提言も考慮している。

NUMOは、日本で検討されている様々な母岩を、サイトを特定せずに記述するため、一連の代表的な地質環境モデルを使用している。日本において可能性のある幅広い母岩が、選ばれた地質環境モデルによって代表されていることが適切に説明されている。IRTは、地質環境モデルアプローチが、既存の地球科学的知識と地球力学的変化を様々なスケールで記述し統合するための適切で反復的な方法であることを指摘したい。このようなアプローチは、国際的なグッドプラクティスと整合する。

特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（以下、「最終処分法」）では、サイト特性調査に関し、3段階のプロセスが規定されている。NUMOは、まず文献調査を通して、応募サイトの調査を行う（「応募サイト」とは、文献調査に応募した、あるいは日本政府による文献調査の提案を受け入れた地域を指す）。この第一段階の結果に応じて、NUMOは概要調査に進み、さらに精密調査に進むことになる。IRTは、計画的かつ段階的なこのアプローチは、国際的なベストプラクティスに準拠しており合理的と考える。

設計面に関しては、NUMOは現段階で、日本の地質条件におそらく適応可能と思われる頑健な選択肢をいくつか有している。ただし、これらはより詳細に研究する必要がある。IRTは、特定のサイト特性、廃棄物の変更、および/または処分の要件などに対して柔軟に適応できるよう、実行可能な設計オプションの幅広いリストをオープンにしておくことを推奨する。

操業時と閉鎖後の期間中の処分システムの安全性は、国際的なベストプラクティスに沿った方法で評価されている。予備的な安全評価が、一般的な想定と初期段階の概念的な設計に基づいて実施されている。閉鎖後の段階に対しては、方法論の重要な要素として、長期的に処分システムに影響を与える現象の特定、安全機能の定義、閉鎖後の変化に関する代表的なシナリオの選択、これらの変化のモデル化とそれらに基づく放射線影響の定量化が含まれている。

地層処分プログラムの複雑性と長期を考慮した効果的なマネジメントシステムが整備されている。その基盤を成すのは、サイトの特性、設計検討、安全評価という相互に強く絡み合った3つの柱である。それらに加えて、IRTは、第4の柱として廃棄物インベントリとその変化に関する検討を推奨する。NUMOのマネジメントシステムは、本質的な反復過程を含んだ、グッドプラクティスに沿ったものとIRTは認識している。特に、安全を損なう可能性、柔軟性を維持することを目的としている点が注目される。

NUMOが地質環境モデルに基づくセーフティケースで取り扱った側面は、NUMOのチームが日本における地層処分の安全性を分析し、プロジェクトのこの段階に適合した完全なセーフティケース文書を提供できる能力を有することを示している。IRTは、実施された検討は一般的なものであり、（地質学的特性、現象の理解、処分場設計、安全評価の観点からの）入力データの不確実性に関連する限界があると認識している。IRTは、日本でHLWおよびTRU

廃棄物の地層処分の安全性と実現可能性を示すための前提条件が存在する点を考慮し、NUMO がこの地質環境モデルに基づくセーフティケースから得た教訓に基づいて、R&D 計画を改善し、優先順位を決定するよう推奨する。

地層処分プロジェクトの確立は複雑な作業であり、このための NUMO の戦略は、プロジェクト実現に必要なスキルを持ったキープレイヤーを集めることである。NUMO の主な役割は、処分というソリューションをさらに開発するためのニーズを特定し、必要なすべての情報を統合して、主要なプレイヤーが関連する分析を実行できるようにすることである。NUMO は、特に放射性廃棄物、地球科学、地下研究所での研究という点で、国内の経験から恩恵を受けており、地質学、物理学、化学分野を問わず、また、その評価能力を通して、その科学的発展を支援できる多くの機関にアクセス可能である。また、日本の地層処分プロジェクトの開発に効果的に貢献できる地下作業技術や原子力技術へのアクセスも有している。

NUMO の地質環境モデルに基づくセーフティケースのレビュー中、IRT は次の必要性を特定した。

1. サイト選定と次のセーフティケースの確立に向けて規制上何が期待されているかについて理解を深めること；
2. さらなる廃棄物の特性評価とインベントリの範囲の特定；
3. 深地層処分場（DGR）の開発を支える研究開発プログラムの継続的な開発。

明らかにこれらは NUMO だけの責任ではないが、NUMO がこれらにどう対処するかが、NUMO の今後の研究やセーフティケースの重要性、適切性、代表性、信頼性を大きく左右することになる。したがって IRT は、地質環境モデルに基づくセーフティケースを考慮して、NUMO が以下の主要なステークホルダーとの対話を深めることを強く推奨する。

- 日本の原子力規制委員会（NRA）：規制当局としての期待と、正式な認可プロセスまでの手続きを明確にする。
- 廃棄物発生者：処分する放射性廃棄物のインベントリとその後の変化に関し、より現実的な概要を作成する。インベントリをより正確に理解することは、サイトの特性と設計、および安全性評価の妥当性を評価する上で重要となる。
- 地層処分 R&D チーム：継続的な安全評価の結果に基づき、NUMO が表明するニーズに合わせてより効率的に研究と優先事項を絞り込めるようにする。

国際経験に基づくと、段階的な認可プロセスやさまざまな組織の役割の明確化を含む国内の枠組み作りが DGR 実現を成功させるための前提条件となる。これらの側面をさらに評価するために、DGR プログラム全体と規制枠組みに焦点を当てた国際的なピアレビュー（IAEA

の ARTEMIS など) が有益であり、それが DGR 開発の成功に寄与すると思われることを IRT は指摘しておきたい。

この段階では、長期的な安全評価は多くの保守的な想定条件に基づいている。その結果、調査されたさまざまなケースの結果はしばしば非常に似通ったものとなり、設計オプションおよび/または母岩候補の地質構造を識別するためのより詳細な情報を提供しない場合が多い。次段階への準備として、NUMO は、合理的に予想される母岩候補の特性を幅広く考慮し、母岩のサイト特性に応じた感度を検討するとよいだろう。追加的な感度調査により、さまざまなインベントリや要件レベル、または人工バリアの厚さなど、より広範な技術データをカバーできる。

NUMO 戦略の技術的側面に関して、IRT は以下を提言する：

- 地層処分場に求められる安全機能：
  - 将来の段階では、可能な限り、安全機能を定量的な性能指標と一致させ、可能な場合は、許容可能な性能基準と一致させること。
- 核種移行を適切に遅延させる地質媒体の能力：
  - サイト評価の際、より具体的に検討すること。複数の地域が応募する場合、この点が判別基準になる可能性がある。
- 設計オプション：
  - 新たな知識が得られたときに設計の柔軟性を維持できるよう、できるだけ長くオープンにしておくこと。
  - 設計オプションの柔軟性を維持するには変更の影響を追跡・評価する必要があるということ。これには構成管理システムを利用できる。
- 処分計画上の意思決定の可逆性：
  - 特に次世代のための選択肢を残しつつ、地層処分施設の寿命を決定できる意思決定プロセスを提案すること。
- モニタリング：
  - モニタリングの目的に回収可能性の側面を取り入れること。
- 追加的に考慮する現象：
  - 現段階で非支配的または非確定的とみなされている現象を再検討し、後続段階でそれらを考慮すべきか否かを評価すること。

- 処分坑道における廃棄物パッケージの取り扱いと定置：
  - 地下環境での試験を実施し、研究を行うこと。
- 設計開発：
  - 特に今後の段階で検討予定のサイト特性への適応を視野に入れて継続すること。
- 作業時の安全性：
  - 作業上のリスクを低減するための設計機能によって補完するとともに、設計によって想定される防護が失敗した場合を考慮し、そのような場合の作業員および公衆への被ばく線量を分析することにより、作業時の安全評価を補完すること。
- 後続段階で想定される地質構造の特性に応じて、地質構造間の差異を設計に反映することができる方法で、設計・施工手順を適応させること。
- 一般化したストーリーボードの開発：
  - 基礎となる情報と処理されるデータをより網羅して示す方法を模索すること。
- モデルと連成：
  - 評価に含まれるさまざまなモデル、それらの連成、および関連コードをマッピングすること。それによってモデル化の取り組みの概要や分析レベルに応じて採用されるさまざまなツールを説明できるようにするとともに、提案されているモデル表現の簡略化に関する理解を深める。
- モデルとコンピュータコードの検証（validation）：
  - 近い将来、モデルと計算ツールの検証に向けた取り組みを強化すること。

## 1. はじめに

### 1.1. 目的と期待事項

本報告書は、NUMO の『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—』の英語版（『The NUMO Pre-siting SDM-based Safety Case Report（地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケース）』）の独立した国際レビューの重要点をまとめたものである。このレビューの目的は、サイト選定の前段階で開発された、このジェネリックなセーフティケースの充足性と信頼性を評価すること、日本における深地層処分の技術的実現可能性の確認、および国内法・国際法と指針、および他国プログラムのベストプラクティスに基づいて、サイト選定に適用される枠組みを発展させることであった。特に、このセーフティケース報告書が、NEA 策定の国際レビューガイドライン（NEA, 2005）および『The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Guide（放射性廃棄物処分のセーフティケースと安全評価）』（IAEA, 2012）に記載されているセーフティケースの概念を中心に構築された最新の国際的な技術知識や研究開発成果を反映しているかを確認した。

### 1.2. 国際ピアレビューの組織

ピアレビューは、専任の科学技術事務官の協力を受けて NEA が組織した。地層処分の分野における最高の基準と知識レベルを活用するため、NEA は、深地層処分のための研究開発および開発プログラムの確立と実施、および結晶質岩層と堆積岩層の双方における深地層処分場のサイト選定と設計、さらには高レベル放射性廃棄物（HLW）と超ウラン（TRU）廃棄物の地層処分安全性評価の実施に関して、十分な経験を有するレビューワーカーの参加を要請した。

国際レビューチーム（IRT）を構成するレビューワーカーのリストと略歴を、本報告書の Annex A に示す。

### 1.3. 付託事項

日本は、HLW や TRU 廃棄物を処分するための地層処分場の開発に取り組んでいる。原子力発電環境整備機構（NUMO）は、国内外で 20 年以上にわたりスキルと経験を培い、現在ではサイト選定における新たな段階に移行している。サイト候補を調査するためには、サ

イト調査と、適切な処分施設の設計、地層処分場の安全性を示すための能力を示す必要がある。

日本の地質学的性質や放射性廃棄物処分に関する社会政治的背景を含む日本の境界条件を考慮して、日本の科学技術チームの能力とそのアプローチの妥当性をテストし、示すため、予備的でジェネリックなセーフティケースが開発された。このセーフティケースは、達成可能な性能を継続的に評価し、反復プロセスを通して R&D ニーズを明確にして設計を改善するため、さらに後の段階でアップデートが必要である。

国際レビューの目標は、この地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケースの成果を評価し、NUMO チームが次のステップに進む能力を確認することであった。このレビューは、国際的な観点からの NUMO チーム能力のベンチマークとなり、日本の廃棄物管理プログラムに対する国民の信頼醸成にも寄与すると考えられる。また、地層処分プロジェクトの開発に影響を与える可能性のある、その他のニーズや要件を特定することも目的としている。本レビューの付託事項のコピーを Annex B に示す。

#### 1.4. レビューの実施

2021 年 11 月 15 日に行った最初のビデオ会議で、IRT に対して最初のプレゼンテーションが行われた。そこでは、NUMO の専門家らが、日本における放射性廃棄物管理の詳細を説明し、地質環境モデルに基づくセーフティケースの概要を発表した。同時に、英語版の『The NUMO Pre-siting SDM-Based Safety Case (NUMO による地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケース)』(NUMO, 2021) が IRT に引き渡された。

この会議の後、レビューワーには、このセーフティケースを精査し、NUMO と書面による質疑応答を行う期間として 4 カ月が与えられた。2022 年 4 月 11 日には、不明点を明確にするためのオンライン会議が開催された。

2022 年 6 月 20～24 日には、六ヶ所村にある日本原燃株式会社 (JNFL) の施設訪問を含め、東京でレビューワークショップが開催された。その後、レビュー報告書を編集の上、NEA が公表する前に事実確認のため、NUMO に最終草案が提出された。

#### 1.5. 日本における放射性廃棄物の地層処分に関する一般的な背景情報

放射性廃棄物の管理と深地層最終処分場 (DGR) の開発は国の枠組みの中で実施されており、その枠組みの中でさまざまな組織がそれぞれの役割と責任を持っている。日本では、経済産業省 (METI) がプログラム全体の監督を行い、原子力規制委員会 (NRA) が、



適用される放射線および原子力安全要件の確立とその実施を監督する責任を持つ。NUMO は、HLW 及び TRU 廃棄物の地層処分を担当する組織である。放射性廃棄物の地層処分に関する研究は、JAEA（日本原子力研究開発機構）を含む複数の組織が行っている。

日本の放射性廃棄物は主に、原子力発電によって発生する。原子力発電所の使用済燃料は、欧州の施設や、東海村にある JAEA のパイロットプラントで再処理されている。海外での再処理はすでに完了しており、六ヶ所村（青森県）の再処理施設が稼働を開始した後は、そこで再処理が行われることになる。この再処理工程では高レベル放射性廃棄物（HLW）だけでなく、超ウラン元素を含む放射能レベルは低い半減期の長い廃棄物も生成される。こうした廃棄物を地質媒体への処分を通して適正に管理するため、2000 年 10 月に最終処分法（METI, 2000, 2015）に基づき、NUMO が設立された。

放射性廃棄物の地層処分に関する規制は、原子力規制委員会（NRA）がまだ起草中であるため、NUMO は確立された規制枠組みがない中で研究を行う必要がある。

地層処分対象の放射性廃棄物は、使用済核燃料の再処理によって発生する。日本の再処理能力を開発している国内機関（JNFL と JAEA）及び海外での再処理契約を結んでいる電力会社は、地層処分対象となる廃棄物のインベントリを特定する責任がある。

NUMO の DGR 開発プログラムにおける最初の目的は、地層処分施設の設置に適したサイトの候補地を特定することである。

このため、サイト選定プロセスに対する段階的アプローチの大枠が最終処分法（METI, 2000, 2015）に規定されている。このアプローチには、候補となる自治体の応募から始まり、徐々にサイトを絞り込む 3 段階の連続したステップが含まれる。

- (1) 応募した自治体に対する文献調査；
- (2) ステップ（1）で選定された地区の概要調査段階；
- (3) ステップ（2）で選定された地区の精密調査段階。

2015 年 5 月に日本政府は、HLW の地層処分に（1）適性が低いと考えられる地域、（2）適性があると考えられる地域、（3）より適性が高いと考えられる地域、を特定するために、地質学的基準を用いた全国的な科学的スクリーニングを実施する新たな導入段階を定めた。経済産業省は、NEA に対し、このような新たなステップを追加することの妥当性と、将来のサイト選定に向けたこれらのスクリーニング基準の適用可能性を確認するために、独立した技術的なピアレビューを実施するよう要請した。この『Japan's Siting Process for the Geological

---

1. TRU 廃棄物は、他のプログラムでは長半減期の中レベル廃棄物としてより広義に定義される。

Disposal of High-level Radioactive Waste（日本における高レベル放射性廃棄物の地層処分のための処分地選定プロセス）』（NEA, 2016）のNEAピアレビューは2016年に実施され、i) このような段階的なサイト選定プロセスは国際的慣行と整合し、ii) 閉じ込め機能及び隔離機能という安全機能に対して重要な影響を与える現象及びプロセスを適切に特定し整理することができていると結論付けた。

『地層処分に関する「科学的特性」の全国マップ』（METI, 2017）（Annex C）は、2017年に経済産業省によって公表された。このマップでは、全国的な地球科学・技術的データに基づいて、サイトとしての適性に関する一般的な要件と基準を適用することにより、日本を4つのタイプの地域に分けている。

- (1) 火山や活断層に近い地域など、長期的な安定性の観点からおそらく不適切と思われる地域；
- (2) 油田やガス田などの鉱物資源を有する地域で、将来の人間侵入の可能性の観点から、好ましくない地域；
- (3) 上記の望ましくない特性がないために、比較的適している可能性が高いと考えられる地域；
- (4) 比較的適している可能性の高い地域の中で、輸送上の利点という観点からも好ましい地域（沿岸地域など）。

2020年10月に北海道の寿都町が文献調査に応募するとともに、同じく北海道にある神恵内村が日本政府による文献調査の申入れを受け入れた。NUMOは、2020年11月に両自治体で文献調査（すなわち調査の第1段階）を開始した。

科学的特性マップで、適性が比較的高いとされているタイプの地域を対象として、NUMOの地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケースに記載されている作業が実施された。このセーフティケースでは、適切なサイト候補に関する重要な特性を把握した上で、母岩として考える5つの岩種から代表的な3岩種（深成岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類）について検討を行っている。

このNUMOによる地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケース（NUMO, 2021）の目的は以下の通りである。

- (1) 「日本の多様な地質環境の中から、特定放射性廃棄物を人間の生活環境に有意な影響を与えないよう隔離し、閉じ込めるために必要な条件を備えた適切な地質環境を選定するための調査・評価技術を示す。」

- (2) 「日本における地下深部の地質環境の研究から得られた重要な特性を反映した地質環境モデル（SDM）を提示し、これに適合し必要な安全機能を満たす処分場の設計と安全対策を示す。」
- (3) 「候補サイトと、処分場の閉鎖前および閉鎖後の安全性を示す。」
- (4) 「上記の情報を統合することにより、地質環境の特性把握、処分場の設計、及び安全評価に関して、さらなる改善に向けた技術課題と必要な R&D を特定する。」

なお、『地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケース』の利用について、IRT は、現段階で NUMO のセーフティケースが日本の深地層処分プログラムのさらなる開発にどう活用されるかはまだ定義されていないことに言及しておく。

## 1.6. レビュー報告書の構成

本章では、『NUMO 地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケース』のレビューを実施するにあたっての序言と付託事項、および日本の地層処分の背景について簡単に説明した。

第 2 章では、レビューの付託に沿って得られた結果を、地質環境モデルに基づくセーフティケースの各主要テーマに関する IRT の分析結果とともに述べる。

第 3 章では、日本におけるセーフティケース・アプローチの成熟度と NUMO がプログラムを進めるうえでの成熟度、および NUMO への全体的な技術的提言に関する IRT のコメントを示す。

Annex D は、分析に関する技術的な詳細についてより知りたい読者を対象とするものであり、この地質環境モデルに基づくセーフティケースのレビューで IRT が NUMO に示した最初の主要コメントの要約が含まれている。この Annex の主な目的は、地質環境モデルに基づくセーフティケースの文書構成に従って IRT のコメントを提供することにより、NUMO チームに直接的なフィードバックを提供することである。

## 2. レビューの付託に基づく結果

第 2 章は、本レビューの付託事項（Annex B に詳述）に従って構成されている。日本における地層処分の基本的な実現可能性については、セクション 3.2 の総括で報告する。付託事項と本報告書の構成との対応表を表 1 に示す。

表 1. 付託事項に基づく本報告書の構成

付託事項	サブセクション
このサイト選定前段階での安全戦略と、特定サイトでの作業を開始する準備として選択されたアプローチ	2.1
サイト選定プログラムにおいて代表的なものとみなされる地質環境と、地質環境モデルへの知識統合に焦点を当てた、サイト選定プロセス開始時点でサイト特性評価のために提案された方法論の評価	2.2
処分場の設計アプローチ、母岩候補に合わせたレイアウト、および処分場の建設、操業、閉鎖の実用性評価	2.3
記述されている母岩に合わせた、処分場の操業時と閉鎖後の安全評価	2.4 と 2.5
サイト選定、設計、および安全評価チームの統合を促し、技術的品質を保証するために必要な反復的フィードバックを提供する管理ツールの実装	2.6
安全評価の信頼性と地層処分プログラム実施における実用性の向上を目的とした研究開発計画の土台となる、セーフティケースの長所と短所に関する総合的検討	2.7
評価対象環境のタイプと類似した地質環境内での日本における地層処分の根本的な実現可能性	3.2

### 2.1. 安全戦略

『NUMO 地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケース』で使用されている安全戦略の概念は、廃棄物および処分施設内で放射性核種を隔離して閉じ込めることであり、これは一般的に、国際的なガイダンスならびに国際的なベストプラクティスと整合する。

NUMO の現行の地層処分戦略は、国際的な勧告と国内の評価に基づき、日本の総合資源エネルギー調査会の支持を得て策定されている。地層処分は、日本政府の 2015 年「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」（日本政府, 2015）で述べられている通

り、HLW 及び TRU 廃棄物の処分方法として推奨される解決策である。国際的に共有されているこのソリューションは、報告書『Management and Disposal of High-Level Radioactive Waste: Global Progress and Solutions（高レベル放射性廃棄物の管理と処分：世界の進捗状況とソリューション）』（NEA, 2020）でも再確認されている通り、科学的コンセンサスが得られたものである。地層処分プロジェクトが長期にわたる点と、何世代にもわたり管理しなければならない点を踏まえ、処分施設の設計では可逆性と回収可能性の概念が考慮されている。段階的なアプローチを通じた適切なサイトの特定を目指すサイト選定プロセスが実施されている。

NUMO のセーフティケース開発戦略では、安全確保の基本的なアプローチを説明し、事業実施プログラムで定義された各段階を通じて、安全な地層処分をどのように示すかを示している。

IRT は、全体として、NUMO は、安全性評価とセーフティケースの開発の実施方法に関し最新の科学技術に依拠しているものと認める。IRT は、NUMO が今後も最新の科学的知識と継続的なレビューに基づいて、地層処分の信頼性を確立し続けることを推奨する。

### **2.1.1. DGR 関連法規、安全要件、およびその他の前提条件**

一般的に、放射性廃棄物の処分戦略は、処分する放射性廃棄物の特性と、国の政策や規制で示される要件に依存する。

日本で DGR に特化した規制要件が確立されるまで、NUMO は、他国の当局が公表した規制要件や、地層処分プロジェクトの開発に関与する国際機関からのガイダンスに依拠している。

この段階では、廃棄物形態の特性が概括的に定義される。しかし、廃棄物インベントリは廃棄物管理プログラムに重要な要件を課している。日本の廃棄物発生者から、廃棄物の種類、それらの物理的、化学的、放射線学的特性、およびこれらのインベントリの変化の可能性について詳細が明らかになれば、NUMO の継続的な廃棄物管理に役立つと思われる。IRT は、仮定すべき範囲を定め、地層処分施設の安全境界と安全評価をより包括的に表現するために、感度分析を実施することを推奨する。このような感度分析は、特に将来の規制枠組みや廃棄物インベントリと、処分する廃棄物の特性の変更に関して、地層処分場設計のアプローチの柔軟性とセーフティケースの頑健性を示す上で役立つだろう。これは、ジェネリックなセーフティケースが提供できる資産である。明確な例としては、処分前の保管期間も含め、廃棄物の量だけでなく、その性質と変化（例えば、MOX 燃料を含める可能性、他の種類の使用済燃料または TRU 廃棄物を考慮する可能性など）の観点からみたインベントリデータなどがある。処分場のさまざまな構成要素の特性が、DGR で処分されるすべての廃棄物の固有の特性に合わせて調整されなければならないため、この点は重要である。

次のサイト選定段階では、廃棄する量を過小評価すると、考慮していたサイトの容量が最終的に不十分だったということになりかねないため、注意が必要である。HLWの熱出力についても同様の考慮が必要で、熱出力を過小評価すると処分場に必要地下フットプリントが過小評価される可能性がある。このような過小評価は、処分前の貯蔵期間や、特に再処理された使用済核燃料（MOX vs UOX）の種類によっては、アメリカウム 241 など発熱性の放射性核種の含有量に影響を与える不確実性から生じる可能性がある。逆に、廃棄する量や熱出力を過大評価すると、処分する廃棄物の特性に適した容量を持っていても、サイトが候補地から除外されかねない。構造物の設計とバリアの選択に関しては、安全確保に必要な性能を判断するために、各タイプの廃棄物に含まれる放射性物質を考慮しなくてはならない。

### 2.1.2. 安全機能

NUMO が採用している 2 つの主要な安全機能は、隔離と閉じ込めである。これには、作業時と閉鎖後の安全に関する要件が含まれる。長期間にわたって処分システムが適切に機能することを検証する、または確実なものとするため、これら主要な機能から、第 2 レベルまたはさらに下位レベルの機能も特定の上、考慮されている。

「隔離」とは、開発可能な資源のない安定した地質環境で、単純な方法では到達が困難な深度、すなわち工学的な活動によって通常アクセスできる深度よりもっと深い場所に廃棄物を処分しなくてはならないことを反映している。

「閉じ込め」とは、廃棄物パッケージおよびバリアシステム全体が放射性元素の放出を長期間にわたって防止し、その後、放出を抑制および遅延させる能力を意味する。NUMO では、IAEA の用語（IAEA, 2022）に従って、「閉じ込め（containment）」という用語を広義で用いており、一部の他組織では別の機能「保持（retention）」として区別しているものも含む。

IRT は NUMO に対し、地圏における放射性核種の移行を遅らせ、緩和することの重要性をさらに強調するよう提言する。関連するサイト特性の特定と評価が、サイト選定において決定的な要因となる可能性がある。

NUMO の地質環境モデルに基づくセーフティケースでは、安全機能は処分場のさまざまな構成要素に関連する。処分場設計に関する章で示されるように、それらを表現することが処分場設計の鍵を握ることになる。

地層処分用に開発したシステムの効率性を評価するため、IRT は、NUMO がプロジェクト開発の後続段階に向け安全機能指標、あるいは、場合によっては時間関数として受け入れ可能な最小性能目標を定義するよう提言する。

### 2.1.3. サイト選定戦略

サイト選定戦略では、必要な安全機能を満たすサイトを特定できるようにしなければならない。NUMO によって開発された段階的アプローチは一貫性があり、実際にこのアプローチを実施できる可能性が高い。活断層のある地域など、好ましくない地層やサイトの除外基準が定義され、実施されている。次に、特に長期にわたり好ましい特性を安定的に維持できるかどうかに注意して、重要な機能を満たすサイトの能力が評価される。

最終処分法では、文献調査、現場での概要調査、そして最後に精密調査という 3 段階のサイト選定アプローチが定義されている。これらの各段階には、地質モデルを通じた詳細な概要と検討、処分場の設計オプション、および関連する安全評価が含まれる。この段階的なアプローチを国土全体的な規模で行うことは論外で、このプロセスは候補地に対してのみ実行できる。

サイトの特性は、地質環境モデル（SDM）内での統合対象となる。特定のサイトに対する地質環境モデル作成に向けてさまざまな地質構造の特徴に基づく地質環境モデルが複数提案されており、それが NUMO の現在のセーフティケースの土台となっている。

NUMO が示すアプローチは、日本の地質状況を分析して、長期的な安定性に関するリスクや放射性廃棄物の閉じ込め要件を満たさないリスクがあるものを排除しつつ、地層処分候補地を特定するというものである。その際、NUMO は、NEA によって 2016 年に実施された『日本における高レベル放射性廃棄物の地層処分のための処分地選定プロセスに関する国際ピアレビュー』（NEA, 2016）の提言を考慮している。

IRT は、このサイト特性調査アプローチが合理的で国際的なベストプラクティスに準拠していると考える。これによって、補完的な方法と R&D のニーズの評価のみならず、スタッフの準備と、適用可能なツールをテストすることが可能になっている。これには複数の反復が必要なことは明らかである。また、得られた結果を評価し、次の段階に進むための意思決定に役立つ指標を提案することにもつながると考えられる。

さらに、IRT は、特に感度解析に基づいて応募サイトの比較を容易にするような次段階のセーフティケースを準備することを提言する（下記参照）。

### 2.1.4. 処分場の設計戦略

処分場は、放射性核種の閉じ込めと移行抑制を目的として各地質環境モデルの特性に合わせて設計される。現段階の設計アプローチは、地質データと概念自体に内在する不確実性を踏まえ、十分な余裕をもたせた頑健なソリューションを目指すものとなっている。

設計ソリューションの初期概要を示すことから始めて、処分施設の構造と構成要素を代表する案が提案される。サイトに関する知識が得られ、規制や要件が明確になるにつれて、技術的ソリューションの選択肢が絞り込まれる。IRT は、プロジェクトが変化する可能性に対し、適応能力を維持するために、設計オプションを可能な限りオープンにしておくことを提案する。知識管理を含む要件管理は、地層処分プロジェクトの将来の開発を支える鍵となる。IRT は、プロジェクト担当チームが利用可能な限り最善の技術を体系的に検索・使用している点を認め、それを強く推奨する。また、国内外の地下研究所で実施されている実験や試験にも依拠できる。最後に、そして何よりも、精密調査段階の終盤に、選定されたサイトでの具体的な技術テストプログラムが想定されている。

施設設計では廃棄物の回収可能性が考慮されている。意思決定の可逆性に関しては、どちらかといえば今後検討すべき管理上の問題であり、ステークホルダーや将来の意思決定者との間での密なやり取りが必要となる。モニタリングと監視という点もよく考慮されている。モニタリングと監視は何よりも、地層処分場が設計上求められている条件下で稼働していることの確認を目的としている。したがって、長期的な安全性に関連して追加の予防措置が必要となるような異常を可能な限り早期に検出することも意図されている。また、このプログラムは、NEA の定義（NEA, 2012a）による決定の可逆性の問題、並びに廃棄物パッケージの回収可能性とも明確に関連づけるべきである。モニタリングと監視のプログラムは、主要な現場作業を開始する前に、調査対象サイトのベースラインを作成するため、早い段階で開発・開始する必要がある。

### 2.1.5. 安全評価戦略

NUMO の安全評価戦略は、シナリオ開発、モデル作成、解析と評価の実施に関する IAEA ガイダンス（IAEA, 2012；IAEA, 2013）に準拠する。NUMO はまた、海外の地層処分プログラムにおけるセーフティケースの構築経験を考慮している。

操業時の安全性については、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（METI, 2000, 2015）の規制や、福島第一原子力発電所事故後に定められた HLW 管理施設に関する規制が一般的なものとして処分施設に適用されている。これらには、放射線リスクに加えて、通常のリスクの評価も含まれる。

閉鎖後の安全評価は複雑で、多くの場合、時間の経過とともに変化する不確実性に関連した大量の情報の統合を必要とする。閉鎖後の安全評価の管理に対する NUMO のアプローチは、他国組織とも整合し、処分システム全体が規制上の安全要件を満たしながら、計画通りに機能することを実証しようとするものである。このため、評価の基礎となるシナリオを定義する。シナリオの定義および評価のベースとして FEP（特徴、事象、プロセス）カタログ



が使用されている。推定された線量の数値は、期待される処分場の性能の指標として役立つが、将来の不確実性を踏まえ、注意して使用しなくてはならない。NUMO では、日本の規制が確定するまで、国際機関や他国の勧告を参考にしている。

## 2.2. 地質環境の評価

地質環境評価の目的は、深地層最終処分場に適した代表的な地質環境を選定し、モデル化することである。

日本国内の母岩候補について、サイトの適性評価に関する概念が体系的に開発されてきた。まず、今後 10 万年間に処分場の安全を損なう可能性のある、擾乱を与える自然現象（火山・火成活動、地震・断層活動、著しい隆起や侵食など）の著しい影響を受ける地質環境が除外され、次に、十分に長期間にわたって好ましい特性を維持できる地区に焦点が絞られる。これらの地球科学的基準は、関連するすべての重要な事象とプロセスを把握し、それらが「閉じ込め」および「隔離」という安全機能にどのように影響するかを明らかにするという点で日本の地質環境に適したものといえる。

日本で考えられる様々な母岩候補を、サイトを特定することなく説明するために、NUMO はそれぞれを代表する一連の「地質環境モデル（Site Descriptive Models：SDMs）」を使用した。母岩候補を代表する地質環境モデルに統合された最新の科学的および技術的知識は、一連の付属書に記述されている。概要調査および精密調査段階の目的の 1 つは、処分場のカスタマイズされた設計に基づき、操業時および閉鎖後の安全を確保するためにサイトの適性を確認することができるよう、関連する科学分野および技術の最新知識を反復的に改善することである。この点は注目に値する。これは、実施プロセスを通じて残余の不確実性を低減し、効率性と費用対効果を保証しようとするものである。現在の地球科学的知識を母岩とその地質環境のモデルに統合する NUMO のアプローチは、追跡可能で、十分に文書化され、説明されている。

NUMO は、日本で検討される幅広い母岩候補に対して選ばれた地質環境モデルの代表性を適切に正当化している。IRT は、地質環境モデルアプローチは、既存の地球科学的知識と地球力学的変化を様々なスケールで記述し統合するための適切で反復的な方法であると考える。このようなアプローチは、国際的なグッドプラクティスに対応する。

この段階では、提供された資料に基づき、地層処分の観点から長期的に好ましい特性を持った深地層環境が日本国内のさまざまな場所に存在すると結論付けることは合理的であると思われる。

### 2.2.1. 安全確保における地質環境の役割

地質環境モデルに基づくセーフティケース報告書は、日本の地層処分関連プロセスの現行知識をよく要約し、より詳細な情報が得られる付属書を適切に参照している。文献調査のためのサイト選定基準の土台となる、全国的な科学的スクリーニングで使用された地質学的基準は、2016年のNEA国際ピアレビューで評価されている（NEA, 2016）。

日本の様々な地質環境における母岩の潜在的な安定性を評価するために用いられるこれらの地球科学的基準と安全性の概念との関連について深い議論がなされ、関連知識が簡潔に提供されている。特に、擾乱を与える事象とプロセス（いわゆる影響要因）がどう安全機能に影響するかは、安全機能および/または処分場の設計との関連で議論されている。NUMOはまた、特定の実施段階で調査すべき事象・プロセス・特性を、地層処分プロジェクトの進展に応じた所与の段階で予想される関連性/重要性を踏まえて、適切に定義している。

母岩候補が十分に長期間（NUMOのセーフティケースでは10万年オーダー）にわたって安全機能を維持できるような安定性が十分でないと考えられる地域を除外することは、適切であるとともに、国際的な勧告とも一致する。他国でも、それぞれの放射性廃棄物管理組織によって、現地の地質環境に合わせた同様のアプローチが採用されている。

廃棄物の閉じ込め機能の改善を目的として、現場で連続した段階的な調査（プロセス全体を通じて徐々に詳細になる）を実施することで、地質学的基準に応じてサイトとなる地域の位置を絞り込むことは適切であり、各段階で母岩が実現可能性と安全性の要件を満たす能力を確認できるようにするものである。このセーフティケースでNUMOが提案する段階的手法は、2016年の国際ピアレビューで特定されたすべての勧告（例えば、第四紀火山の中心から15km以内という表記に対する例外の明記、実際の断層長さを推定することは困難なことなど）に段階的に取り組むことを可能にするものである点は言及に値しよう。

### 2.2.2. 適切な環境を特定するプロセス

NUMOは、安全機能は長期間（つまり10年以上）保証する必要があることを認識している。開発された段階的アプローチは、関連する地質学的事象とプロセスの理解に基づき、調査対象地域の想定される長期的な変遷を明らかにすることを可能とする。

サイト候補地の規模と関連する地質学的な事象およびプロセスは、順に詳細度を増す連続した3段階（文献調査[LS]、概要調査[PI]、精密調査[DI]）を経て絞り込まれる。各段階において、サイト選定プロセスは次の3つの連続した手続きを経て実行される。

- 1) 不適切な地域（第四紀火山、活断層、経済的価値の高い鉱物資源がある場所など）の除外。なお、残余の不確実性のために確固たる結論を導き出すことができ

ない地域については、現地調査の際に得られる証拠に基づいて後に決定するため、次の段階まで保留することができる。

- 2) 残りの適切な地域は、放射性核種の閉じ込めと移行抑制に関する特性が評価される（適切性に劣る地区はさらに除外される）。NUMOの目的は、10万年を超える十分なバリア性能を維持できるよう、好ましい特性が安定していることを確認することである。
- 3) 厳密には除外できない、可能性は低いが影響の大きい地質学的プロセスの検討。

なお、概要調査と精密調査の段階では、経済価値の高い鉱物資源の評価に加え、地熱資源、温泉、地下水資源の重要性の評価も行う点を特記しておく。

この段階的なアプローチは、実施プロセス全体を通して必要な知識を確実に取得し、処分場の設計とサイト選定の調整に十分な柔軟性を確保するうえで合理的である。さらに、NUMOのアプローチは、同様の反復的アプローチを適用してサイト選定プロセス中の残余の不確実性を減らすことに成功している他国（フィンランド、スウェーデン、スイス、フランスなど）のプログラムも参考にしている。

収集された情報はすべて地質環境モデルで解釈される。これは、その時点における関連知識ベース（関連する主要な不確実性を含む）の「地質環境情報の統合（geosynthesis）」に対応する。その後、地質環境モデル（知識ベースと残余の不確実性）は、処分場設計チームと安全評価チームに回付される。この反復的なアプローチ（LS、PI、DI および関連するフィールド調査）の過程を通して、サイト特性調査の進行とともに残余の不確実性の減少が図られる。しかし、連続した地質学的調査期間中に新たな事実や新たな不確実性が浮上する可能性がある。定性的・定量的な地質情報が、セーフティケースを通じて特定されたニーズと特定の要件を満たし、新しく取得した情報が操業時および閉鎖後の安全に影響を与えない限り、サイト特性調査を終了することができる。

NUMOは、段階的なサイト特性調査手順のための詳細なワークフローを開発した。操業時および閉鎖後の安全は、フィールド調査に基づいて評価され、サイト選定プロセスの各ステップでサイトの適切性が確認される（法令および規制への適合性を示す）。また、発生する確率が低い場合でも、影響の大きい事象を考慮している。

これらのワークフローは明確で、連続したサイト選定段階でさまざまな地質学的側面にどのように対処するかを体系的に示している。文献調査（LS）段階の最後に概要調査（PI）計画が示され、PIで実施する作業プログラムが実際のニーズに応じて詳細化され、優先順位が付けられることになる。PI段階では、サイトの適格性に関するLSの結果が確認される。PI計画は、地質情報の取得（すなわち、地表調査とその後のボーリング調査）の信頼性と有効

性を確保するために段階的に実施される。PI の最後に、処分場の設計、建設計画、モニタリング計画とともに、選定したサイトの精密調査（DI）計画が示される。DI 段階では、新たな情報に基づいてサイトの適格性に関する PI 結果も確認される。また、DI も、有効性と費用対効果を確保するために段階的に実施される（つまり、地表フィールド調査後に地下調査施設【UIF】を用いた調査の実施）。このプロセスの全体的な結果に基づいて、処分場建設地区が特定される。

このアプローチは不確実性を段階的に減らしつつ、特定時点における実際のニーズに応じて調査を行い、それに従って作業の優先順位を設定することを可能にする。必要とされる品質レベルで正確な情報を取得するには、実績のある高品質のサイト特性評価技術が必要である。NUMO（および関連研究機関）は、各サイト選定段階を開始する前に必要な技術の開発と確認を行う。なお、NUMO では、すでに海外での地層処分場のサイト選定プロジェクトで利用されているサイト特性調査技術の評価を行う一方で、JAEA の地下研究所で実行されている現地実証を通して、かかる技術の開発状況を既にモニタリングしている点に言及しておく。

### 2.2.3. 代表的な母岩の設定に向けた地質環境モデルの開発

地質環境モデルは、関連するすべての特性と残余の不確実性を提示することで、処分場の設計と安全評価の基礎となる。

NUMO の地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケースでは、母岩候補のタイプごとに概念的な地質環境モデルが開発されている。これには、以下が含まれる。

- (1) 地質構造モデル
- (2) 水理地質構造モデル
- (3) 地下水流動解析
- (4) 微細透水構造の概念モデル（数 mm～数十 mm）
- (5) 地下水の地球化学モデル
- (6) 岩盤の熱特性と力学的特性

地質環境モデルは、以下 3 つのスケールで構築されている。

- (1) 広域スケール（数十 km × 数十 km）
- (2) 処分場スケール（数 km × 数 km）
- (3) パネルスケール（数百 m × 数百 m）

地質環境モデルは、広域スケール、処分場スケール、パネルスケールで表したモデルが入れ子構造を形成するように開発されている。

このセーフティケースの作成時点ではサイト（または応募サイト）が特定されていなかったため、現在の日本の地質学的知識ベースに基づいて「代表的な母岩」を検討している。これらの地質構造は、サイト選定の対象となる可能性のある環境で認められるものである（つまり、安全機能が十分に長い期間にわたって持続することが期待される）。

当初は 7 種類の岩種が検討されていたが、そのうち 2 岩種（第四紀堆積岩類と火山岩類）は 300 m（最終処分法で求められる処分場の最低限の深さ）より深い場所で多くが未固結であり、またあまり分布していないことから除外された。地層処分の観点から検討対象となった 5 種類の岩種は次のとおり。

- (1) 新第三紀堆積岩類
- (2) 先新第三紀堆積岩類
- (3) 新第三紀・先新第三紀火山岩類
- (4) 新第三紀・先新第三紀深成岩類
- (5) 変成岩類

これら 5 岩種のうち、深成岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類は、5 岩種が持つ主要な特徴をすべてカバーしていると考えられるため、代表的な母岩候補として検討の対象とされている。

段階的なサイト選定プロセスから得られる地球科学的情報を統合するため地質環境モデルを開発するというアプローチは、よく説明されており、この中で可能性のある任意の選択肢について正当化が行われている（例えば、処分エリアやその他の地下施設のレイアウトの評価および関連する閉鎖後の安全評価を行うための広域スケールの領域内における処分場の位置など）。最先端の科学的知識を活用して適切な地質環境の候補を探すという NUMO のアプローチの有効性が地質環境モデルを通して実証され、応募する自治体における LS 段階ならびにその後のサイト選定段階に入るための確固とした基盤が築かれている。

サイト選定プロセスを通して、事象や関連プロセスによって今後 10 万年以内に安全機能が損なわれる恐れのある地域は除外されるが、発生の可能性は低くても影響の大きい事象はリスク評価アプローチを通じて引き続き検討されている。これらのプロセスの発生可能性は、それらによる影響に関する定量的な分析と合わせて使用される。このアプローチは、国際的な慣行と整合している。

NUMO は、日本で検討される幅広い母岩候補に対して選ばれた地質環境モデルの代表性を適切に正当化している。IRT は、地質環境モデルアプローチは、既存の地球科学的知識と地球力学的変化を様々なスケールで記述し統合するための適切で反復的な方法であると考える。このようなアプローチは、国際的なグッドプラクティスに対応している。

### 2.3. 処分場の設計アプローチ

セーフティケースの開発はまだ初期段階に過ぎない。セーフティケースはジェネリックな性質のため、この段階では処分技術の実現可能性を完全に評価することはできない。多くの側面で、さらなる作業とそれに続く詳細な評価が必要である。

処分場の設計はNUMOが定める段階的戦略に従い、現場で得た知識と安全評価を漸次的に統合して進められる。NUMOの地質環境モデルに基づくセーフティケースにおけるこの段階では、求めるべき要件と必要機能が満たされていることを確認した上で、報告書 H12 (JNC, 2000a ; JNC, 2000b ; AESJ, 2019) および TRU-2 (JAEA, 2007) で提示された先行研究の成果が設計ベースとなる。これらは、NUMOが開発した革新的なソリューションを含むオプションのカタログにまとめられている。設計ベースは、検討対象とした3種類の地質構造である深成岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類に適合させたものとなっている。

処分場の設計では設計因子が考慮される。これらは、安全性、工学的成立性、社会経済的問題、回収可能性に関連するすべての要件と制約を代表するものである。安全機能の長期的な性能は、影響要因を使用してテストされる。これらは、求められる機能を変化させる可能性がある THMCR (熱-水-力学-化学-放射線学) プロセスならびに、それらの組み合わせである。これらの現象に係る時間的スケールを考えると、影響要因は高品質の試験と効率的なモデルを使って分析されなければならない。

IRT は、NUMO が既に相当な作業を達成しているものと認識している。NUMO では、廃棄物インベントリや地層処分候補地に関して、より多くの情報が入手可能になった場合に考慮すべき次のステップについても概説している。実施された試験と研究、およびモデル化は、検討すべき現象の段階的な特性評価を可能とし、将来のタスクの円滑化につながっている。この段階では主要な現象が考慮されている。他の多くの現象も、構成要素の変化を適切にとらえることで処分場が機能することを確実にするため、調査と評価の対象としなくてはならない。

#### 2.3.1. 廃棄物インベントリに関する知識

処分場設計における主要な入力データは、すでに示している通り、廃棄物インベントリである。IRT は、既存の知識ベースを改善することと、データの信頼性を高める継続的な研究の重要

性を強調したい。処分前の廃棄物管理戦略（特に発熱性廃棄物の管理）もまた、明確化する必要がある決定的な情報といえる。

廃棄物の挙動に関する知識は、特に閉鎖後の段階で主要機能を満足させるために、処分場概念の開発の指針になることが期待される。すでに多くのデータが入手可能であり、基本的には安定性という面で、主要な特性が処分施設の設計に満足のいく方法で考慮されている。プロジェクトの後続段階を開発する際には、放射線分解、ガス発生、バリアシステム材料間の包括的なカップリングや相互作用といった現象をより詳細に研究することについて検討することを IRT は推奨する。

### 2.3.2. 処分場の構成要素

HLW および TRU 廃棄物の人工バリアシステム（EBS）は、表 2 にまとめる通り、シェル構造の 3 つの構成要素から成る。

表 2. EBS のシェル構造

	HLW	TRU 廃棄物
内側シェル	ガラスマトリクスとその成形用キャニスタ	廃棄体と主コンテナ
中間シェル	オーバーパック	廃棄体パッケージ容器と充填材
外側シェル	緩衝材	パッケージ間充填材（モルタル）および場合によってはベントナイト緩衝材

これらの 3 種類のシェルは、EBS に必要なすべての機能をカバーすることを意図している。HLW の場合、NUMO は、3 つのシェル構成要素を同時に直接定置するための一体型人工バリアモジュール（PEM）を提案しており、この革新的なソリューションをさらに検討する予定である。NUMO のセーフティケース報告書における PEM と基本的な機能の説明に基づき、IRT はこれを HLW の EBS にとって十分な安全性を備えた革新的な選択肢であると考え、NUMO の今後の研究計画を支持する。

地下施設へは、立坑と斜坑でアクセスする。IRT は、斜坑と立坑のどちらを選択するかは、サイトの母岩における実際の水理地質学的条件によって影響を受ける可能性がある点に注意を促したい（例えば、透水性のある含水層を交差する場合、斜坑の実装は困難になる可能性がある）。

廃棄物のカテゴリーごとに必要な機能が満たされていることを確認するため、この段階で想定されるさまざまな構成要素の長期特性が分析され、安全機能が評価されている。この段階では、これは十分なアプローチである。しかし、プロジェクトの後の段階では、材料間の異なる物理的カップリングと接面を統合した分析が必要となろう。

HLW のオーバーパックは、少なくとも 1000 年間その完全な閉じ込め性を保証するように設計されている。評価と試験によれば、それよりも 1 桁長く機能を維持することが可能であると考えられている。オーバーパックの原材料は炭素鋼で、試作品によって製造が実証されている。緩衝材はベントナイトと砂の混合物であり、長期間にわたって機能を維持する能力の評価を含め、多くのテストが行われている。現場での締固めに加え、圧縮ベントナイトブロック製造も実現可能性の実証対象とされている。

TRU 廃棄物についてはいくつかの技術的ソリューションが検討されているが、基本的な概念は、廃棄物パッケージを炭素鋼コンテナに入れた後にモルタルで充填することである。地層処分場に処分される TRU 廃棄物と同様の設計コンセプトを持つ LLW 中深度処分用として検討されている廃棄物容器の実物大試作品が作られ、その実現可能性が検証された。したがって、TRU 廃棄物ケースに必要な技術が利用可能と考えられる。一部のタイプの TRU 廃棄物については緩衝材の設置が検討されているが、この点は NUMO のチームがまだ評価中である。緩衝材がない場合は、空きスペースをコンクリートで充填する。いずれの場合も、処分坑道の上部は埋め戻される。

廃棄物の処分坑道への定置や EBS の建設は、地下環境での実現可能性評価を優先し、まだオフサイトでの評価段階にある。

### 2.3.3. 施設の設計

処分場の設計は多くの研究対象となっており、その目的は、構造的な選択肢、構造物の建設手順、廃棄物パッケージおよび人工バリアの搬送と定置、および施設の閉鎖について分析することである。処分場の建設・操業スケジュールは、処分場の段階的建設と廃棄物パッケージ定置の同時進行という原則を維持した設計で考慮すべき重要な側面である。この段階で採用されるもう 1 つの原則は、HLW と TRU 廃棄物を同じ処分施設内で別々のエリアに処分するというものである。言うまでもなく、これらの研究によって多くの質問が提起され、NUMO は体系的に適切な回答を提供している。同時に、NUMO は、地層処分プロジェクトの進行に伴ってさらに調査が必要な問題に注意を喚起している。

NUMO が対応している興味深い問題の 1 つは、検討対象となるサイトで考えられる特性と関連した処分構造の配置である。NUMO はまた、この分野での能力開発を進めており、地層処分プロジェクトの次の段階で行使することが可能となろう。



### 2.3.4. 可逆性と回収可能性

廃棄物の回収可能性を確保するための技術的準備は、設計検討段階で考慮されている。回収可能性は、決定事項の可逆性を実現するための現実的な方法であり、これは主要なステークホルダー、地域コミュニティ、NUMOを含む社会が持つべき責任の一つである。今後の意思決定にどのような情報が必要で、どのステークホルダーに意見を聞くべきかを検討することが重要である。しかし、情報や意思決定手段の必要性は時間とともに変化すると考えられる。この点は、地層処分プロジェクトで計画されている段階的な開発方法によって対応されることになる。

NUMO が提案した設計に関する技術的ソリューションは、回収可能性の目標を、決して変更してはならない安全要件と一致させることを可能にしている。回収可能性の条件を検証し、それらを最適化するための開発と技術的試験はまだ計画段階である。NUMO は、回収可能性に向けて実施する価値のある技術プログラムに着手した。

将来の意思決定に向けて情報を提供するため、処分施設の観察とモニタリングのプログラムでは、地層処分場の性能に関する情報生成に加え、可逆性の問題を明示的に考慮することを IRT は推奨する。最後に、可逆性について将来的に検討すべき問題を明確にするとともに提案して、社会的議論を行う必要がある。NUMO は、この分野の選択肢を積極的に提案すべきである。

## 2.4. 操業時の安全評価

操業時の安全性へのアプローチは初期段階にある。この段階での操業安全性評価の焦点は、放射線安全に対する評価の概念と方法論の開発、および概念設計の頑健性の評価である。操業安全性についてはこれに対する規制がないため、既存の国際ガイダンス（IAEA）や他業種（他の原子力施設や既存の鉱業活動など）からの自国の経験に基づいたフィードバックによって情報を得ている。今後、地層処分施設を対象として確立されるであろう規制や例えば鉱山労働に適用される規則等に準拠して、一定の操業時リスクを分析することになるものと期待される。

通常操業中は、現在の評価で考慮されているシナリオでは、機器と設備が設計仕様に従って作動していることを前提としている。このジェネリックなセーフティケースでは、状態が悪化した操業環境において、「異常状態」シナリオが最悪のケースとみなされている。遠隔操作については現実的かつ適切な防護措置を講じた頑健な設計を行うとの前提に基づき、この初期段階で考慮された異常シナリオでは放射性核種の閉じ込めが失われるような結果にはならなかったため、作業員への被ばくは計算されなかった。この段階では、NUMO は、放射性核種の

放出可能性はないものと考え、境界フェンスの外側における公衆の直接的な放射線被ばくの可能性のみが分析されている。NUMO では今後、サイト固有の情報が入手可能になった時点で、放射性核種の放出につながるシナリオや、処分場付近の公衆への影響をより包括的に検討し、さらに詳細に分析する予定である。

IRTは、プログラムの現在の段階では、評価は仮説的なままであり、サイト構成が具体化されることによって操業時安全評価の現実性は大幅に改善されるであろう点を指摘しておく。廃棄物インベントリについては、NUMO が操業段階での影響の可能性を判断するために放射性核種を特定することが重要となる。これによって、概念設計で想定されている対策によって、影響を十分に抑制、あるいは完全に排除できるかどうかを検証することが可能となるだろう。将来のセーフティケースについては、操業時のリスク（火災など）を軽減するための追加的な設計オプションを検討することもIRTは推奨する。

操業時の安全対策のパフォーマンスを評価するために、定量的分析を行うことが推奨される。IRTはまた、概念設計によって想定される防護が失敗した場合などのシナリオを追加すること、および作業員や公衆、環境に対する被ばく経路の可能性をすべて含めることによって、安全評価を補完することも推奨する。

## 2.5. 閉鎖後の安全評価

### 2.5.1. 安全評価手法

閉鎖後の安全評価の方法論については、十分に設計され、ベストプラクティスと国際的な勧告（NEA/IAEA）が反映されたものとなっている。

この方法論は、閉鎖後の安全に関連するFEPの詳細分析に基づいた、代表的なシナリオセットの選択が出发点となる。選択された各シナリオについて、処分場の存続期間中に発生する可能性のある現象が、対応して導出されたパラメータとモデルを使用して分析され、その結果としてのシステムのふるまいが、ストーリーボードを通じて説明されている。各シナリオに対して、人工バリアシステム、地圏、生活圏を介した放射性核種の移行をモデル化し、公衆への潜在的な線量が推定される。

不確実性は、評価のすべてのステップで考慮される。それらは、廃棄物、候補サイト、処分場の設計、システムの変遷、および実装モデルに関連するものである。NUMOの目的は、これらの側面に関する知識を増やし、評価を反復することによって不確実性を減らすことである。

用いられている方法論は、不確実性に対し十分性と統合的な取り扱いを追求するものである。一貫して、多くの仮定が保守性を失わないように使用されている。これにより、潜在的な長期安全性に関する結論は頑健なものとなるが、一方で、さまざまな設計と母岩の選択肢

を区別する能力は低下する。IRT は、候補サイト/母岩の数ならびに対応する処分場の設計が絞り込まれれば、将来のモデルとデータセットはより特化したものになると考えている。例えば、現在のセーフティケースでは堆積岩について幅広い透水性が考慮されているが、評価には他の岩種並みに高い数値が使用されているため、一部の堆積岩類で見られる相対的な利点がわからなくなる可能性がある。

線量に対する補完的な安全評価指標（多面的な論拠[multiple lines of evidence]）の概念を、セーフティケース開発の将来的な反復過程においてさらに進展させることは有用である。NUMO が実施した方法論の適用可能性に関する実証を超えて、明確な土台に基づいて前進できるようにするためには、特に線量および/またはリスク基準に関し、権限のある当局が適用規制を定義する必要があるだろう。

### 2.5.2. シナリオ分析

NUMO は、国際的な慣行に従い、一連の変遷シナリオを定義することによって、相当な空間的、時間的スケールで多くの現象を考慮しなければならない放射性廃棄物の地層処分場という複雑なシステムの分析を行っている。NUMO のシナリオ開発方法論を適用した結果として導出されたシナリオは、概して整合性があり、しっかりとしたものである。地層処分場の変遷を合理的に表現することを意図した基本シナリオから始めて、プロジェクトに内在する不確実性をカバーする、あるいは代替の変遷仮説に基づいた、変動シナリオが開発されている。稀頻度事象シナリオも、特に長期間を考慮し、残余の不確実性に関して定義されている。最後のシナリオ区分は、偶発的な人間侵入シナリオに関するものである。

シナリオは、以下 2 つの方法を組み合わせられて開発されている。

1. 処分システムの安全コンセプトに記載される安全機能からシナリオと解析ケース（特に基本ケースシナリオ）を開発する、トップダウンのアプローチ
2. 影響を与える特徴、事象とプロセス（FEP）のスクリーニングからシナリオ（特に変動シナリオ）を開発する、ボトムアップのアプローチ

これら 2 つの方法を適切に組み合わせ、シナリオが導き出される。ボトムアップ・アプローチでは、長期的な安全性の観点から FEP をスクリーニングすることになり、分析の出発点は、NEA 国際 FEP リスト（NEA, 2019 ; NEA, 2020）である。このリストは、日本のプログラムの特殊性に基づいて調整され、廃棄物とシステム特性に対する境界条件に応じて FEP の選択・削除・追加が行われている。各シナリオは包括的な「システムとしてのふるまいに関する記述」に基づいて作成され、その根拠が示されている。統合 FEP、状態変数、影響分析などのツールと概念は、FEP からのシナリオの導出に役立つことから、IRT はこれらの技術のさらなる開発を推奨する。

FEP リストは、今後のより詳細な調査の対象となるサイト固有の特性に応じて調整される。

トップダウンとボトムアップのアプローチを組み合わせる方法は、国際的なベストプラクティスと整合的であり、NEA と IAEA が提案するアプローチに従ったものである。

FEP のいずれかを除外する決定を行う場合には、その無関係性の論拠を体系的に示すことが必要である。裏付けとなる付属書でのより詳細な FEP の説明を参照し、セーフティケース本編の主な論点の要約がなされるべきである。これにより、次の段階に向けたスクリーニングプロセスの透明性と追跡可能性が向上する。

上述の通り、NUMO のプログラムのこの段階では、シナリオセットは概して包括的なものとなっている。追加の変動シナリオとして考えられるのは、長期的な化学的浸食によって緩衝材が失われるというものである。NUMO も認識している通り、これは緩衝材が低塩分の地下水にさらされた場合に発生する可能性がある。実際、NUMO が考慮する境界下限の塩分濃度では浸食発生の可能性がある。セーフティケースの構築を将来反復する際は、できれば、拡散的な状況よりも、移流的な状況が緩衝材内で発生する変動シナリオを含むことが望まれる。

シナリオの説明は、各シナリオの入力データの要約を含めることで、明確性と透明性を高めることができる。また、図に示されている方法論のいくつかの手順（安全機能の状態変数に対する FEP の影響分析など）も、外部の読者がもっとアクセスしやすいようにできたらう。

### 2.5.3. システムのふるまいとストーリーボード

システムのふるまいを定形化して解説するストーリーボードは多くの情報を提供し、有益である。

IRT は、いくつかの国際的な例（フランスや米国など）と同様に、閉鎖後のシステムのふるまいに関するシナリオをストーリーボードの形で提示するという決定を評価する。このアプローチは、すべてのシナリオに適用でき、外部の読者にとってもわかりやすい。空間別の説明は、関連する物理現象の解析を容易にし、包括的な評価の開発に役立つ。対象とする時間にわたって連続した過渡変化を適切に考慮するために工夫された同様の区分は、地層処分プロジェクトの進展とともにより明確にしていくことが可能である。将来のセーフティケースでは、評価において区別されたさまざまな期間を定量的に決定することが有益であると思われる。

ストーリーボードは、さまざまな空間スケールにおける処分場のふるまいに関する記述において、分野横断的なコミュニケーションツールとして価値がある。IRT は、NUMO が将来の評価において技術的かつ科学的な方法でシステムの理解向上にも貢献できるよう、今後ストーリーボード技術をさらに開発する計画であると理解しており、これを奨励するものである。

IRT は、異なる空間と時間スケールで主要現象とプロセスを適切に考慮していることは、地層処分プロジェクトにおける優れた分析能力を示すものと考えられる。開発の後の段階では、この段階で二次的と考えられる現象の重要性を、現段階の評価で考慮した主要なプロセスと現象と関連付けて体系的に評価する必要がある。二次的な現象の中でも、IRT は、異なる性質の材料間のすべての相互作用と、例えば気候変動に関連する流体力学的な系の変化など、大規模な相互作用について指摘しておきたい。分析の鍵は、処分場のライフサイクルの各段階で求められる機能が維持されているかどうかを評価することである。また、処分場構成要素が各機能を果たす能力の漸次的な劣化をより包括的に説明することで、分析対象のシナリオセットが強化されるだろう。

#### 2.5.4. 放射性核種の移行と線量評価

放射性核種移行のモデル化は、ニアフィールドスケールから始まり、パネルスケール、処分場スケール、広域スケールへと、生活圏に至るまでが、入れ子構造となっている。異なるスケールモデルを入れ子構造とすることで、処分場近傍、および処分場内における、より小規模の核種移行の特徴を考慮しつつ、広域での核種移行のシミュレーションが可能となる。IRT の見解では、報告書本編で、プロセスの概念モデルに対する数理モデルとその限界（仮定、単純化）を概括することが、セーフティケースの明確さを高めると思われる。実装したモデルのチャートもまた、分析した物理過程の複雑性と巨視的な表現に不可欠な単純化との間のリンクを説明するために有用であろう。双方とも、一般読者にとってセーフティケースをわかりやすくするとともに、詳細分析に携わる専門家にとっても背景情報を提供することになる。

さまざまな処分場の構成と条件に対して実行された一連の計算結果は、NUMO がさまざまな条件に対してシステムを適切に表現し、セーフティケースを裏付けるため必要な一連の影響を計算する能力を示すものといえる。この数値モデルは十分に成熟したもので、サイトスペシフィックなシステムをシミュレートでき、さまざまな処分場の構成と条件を考慮することができると考えられる。基本シナリオも、変動シナリオや偶発的な人間侵入シナリオも、適切に処理されている。したがって、NUMO は、今回のジェネリックなセーフティケース報告書において、次第に現実的になる状況や複雑な事象に適応する能力を実証している。評価のこの段階で高度に保守的であることは、今後それほど保守的でない想定に基づき、より現実主義に基づくものへと移行していくと予想される。地層処分場の性能を分析するため、NUMO は現在のジェネリックな段階にふさわしい単純化されたモデルの実装に依拠している。今後の地層処分プロジェクトの開発には、一般市民やステークホルダーとのコミュニケーションを図るため、さらに単純化されたモデルが必要となろう。時間の経過に伴う処分システムのふるまいを十分に理解し、単純化されたモデルを正当化するためには、詳細で効率的なモデルが引き続き必要である。

生活圏モデルは IAEA (BIOMASS) (IAEA, 2003) ならびに ICRP 勧告 (ICRP, 2013) に沿ったものである。代表的個人は、潜在的に最も高い放射線量にさらされるグループの構成員から保守的に想定され、日本では、これらには、農家、淡水魚及び海水魚の漁師などが含まれる。被ばく経路には、外部照射、吸入、水や食物（野菜や畜産物）の摂取が含まれる。

放射性核種の移行や、一般的な生活圏モデルについては、データならびに仮定の質や代表性の改善が、今後、主に求められるだろう。

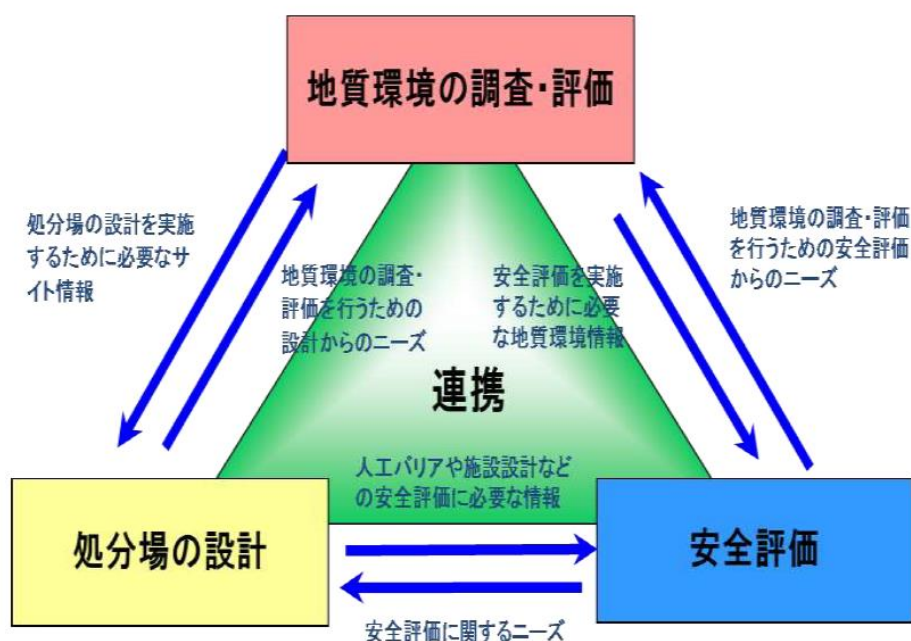
能力の実証に加えて、各シナリオの説明、関連する仮定と入力データ、および結果の議論を明確に要約することが重要となろう。

将来の評価に向け、IRT は廃棄物の化学的毒性の側面と非放射性元素に関連する化学的リスクを考慮することを推奨する。今後の日本の規制でこれらの側面が要求される場合は、当然ながらそれらを含めることが必須となる。また、例えば土壌間の界面や酸化還元フロントに沿って、化学形態の再濃縮の地球化学的メカニズムを考慮することにより、生活圏における移行分析を拡張することも適切であろう。また、分析を完全なものとするには、特に将来、影響の評価が法的に義務付けられた場合、人間以外の生物への潜在的な影響も分析すべきである。

## 2.6. マネジメントシステム

地層処分プロジェクトの開発には、確固とした全体的なマネジメントシステムが必要である。以下の図 1 は、サイトの特性評価と処分場の設計、安全評価との連携を示す、NUMO のマネジメントシステムを引用したものである。IRT は、NUMO のマネジメントシステムを、内在する反復過程も含め、グッドプラクティスに沿ったものとして認める。特に、適切な連携を確保し、柔軟性を維持することを目的としている点が注目される。柔軟性は、プロジェクトをサイトの特性、科学技術の発展、進化する規制や社会的要求に対応するための方法とみなされる。

図 1. NUMO のマネジメントシステム



このマネジメント戦略の主要な入力データのタイプの 1 つは、放射性廃棄物の特性とインベントリに関するものであり、その知識は時間とともに進化する。IRT は、プロジェクト全体の基礎となっている廃棄物インベントリの根本的な前提条件を規制当局や放射性廃棄物の発生者と適切に調整するためのシステムを検討し、実施することを推奨する。

上述したような反復プロセスの成果物という点では、サイト特性の知識、設計オプション、および安全評価に関する文書が挙げられる。もう 1 つの主要な成果物は、地層処分プロジェクトを改善し、残余の不確実性を許容可能なレベルに減らすために、特性評価におけるさらなるニーズを特定することである。特に、研究開発プログラムを開発し、その結果が地層処分プロジェクトの進捗に応じてタイムリーにこの反復ループに提供されるよう優先順位を付けることが考えられる。

地層処分プロジェクトの枠組みの中で検討されたケースが多いことを踏まえ、また、入力データと結果がそれぞれ異なるさまざまなバージョンの中から道筋を見つけるために、IRT は、要件管理システムに加えて、NUMO が構成管理システムを開発することを推奨する。

## 2.7. 研究開発

日本における地層処分の研究開発プログラムとその資金は、経済産業省の主導の下に確立されている。

IRT は、経済産業省、NUMO、JAEA および他の研究開発機関が参画する、地層処分研究開発調整会議に注目する。さらに IRT は、NUMO の主な役割は、研究開発のニーズを特定し、結果をセーフティケースに統合することであると理解している。R&D ニーズは、地質環境モデルに基づくセーフティケースの論理的な結果として表現されるべきである。提示された文書の中で NUMO は、さらなる研究開発に値する一連の科学のおよび技術的なトピックの一覧を示しているが、次の開発段階にとって重要な研究開発プログラムの優先順位については、他に比べてほとんど言及されていない。研究開発による技術開発計画は日本語（NUMO, 2020）で提供されており、IRT がその内容を評価できるように、NUMO が英語で要約を作成した。

現在、日本では地層処分場に適した場所を特定することが優先されていることから、NUMO は多大な労力を地質環境の挙動を把握するために費やしている。これには、処分場に影響を与える可能性のある自然現象評価のための科学的要素と、地質環境の長期的な変化に関連するモデリング要素が含まれている。また、処分場の母岩を構成する地質環境に関する知識を得る方法もまた、特にサイト選定段階において研究プログラムの対象となる。その点から、JAEA の地下研究所で行われた現場実証が重要である。

地質環境に処分場を設置するには、革新的な技術も必要となる。NUMO はこれまで、海外で検討されているものと類似した概念に注目してそれを適応させるだけでなく、PEM のような独自のソリューションも検討してきた。実際、母岩特性の一部は、設計/EBS 材料の変更または適応を必要とするものである（例えば、気密性の高い堆積岩では、処分場内で腐食によって発生するガスを抑制する必要がある可能性がある）。R&D プログラムでは、特に腐食によって発生するガス蓄積の低減やコスト上の理由から、人工バリアの代替材料の研究を行うことが求められているのは適切である。ここでも IRT は、NUMO の研究開発プログラムの焦点を絞る際、感度解析が役立つ可能性があるという意見である。IRT はまた、検討対象の地質媒体中で安全に処分するのにより適した代替材料を模索するための研究を行うことを提案する。プログラムにおいては、特にガス発生との関連における TRU 廃棄物のパッケージングが興味深い。この点も IRT がすでに提起しているが、長期的な安全性のため注意する必要がある。技術レベルでは、IRT は、PEM、そして何よりも、廃棄物パッケージの取り扱いと定置のための自動化手段の開発に対する要求に注目する。処分場設計アプローチもさらに開発を進める必要がある。

施設設計の観点から、IRT では、サイトの地質学的および水理地質学的特性を処分場の一般的な構造とそのさまざまなコンポーネントの設計に統合することを推奨する。回収可能性も考慮されている。これに関して、IRT は、回収可能性の観点から、処分場のモニタリングを



統合し、関連パラメータを追跡することを推奨する。そこからの情報を可逆性の観点から意思決定にフィードバックすることができるが、この点は今後検討されるべき残された課題である。

安全評価に関しても、IRT の意見に沿って、処分システムの現象論的変遷とそのモデリングの検討の改善が研究対象となる。また、特にストーリーボードを通じた放射性核種移行や FEP の情報管理ツールの改善も求めている。地質環境モデルに基づくセーフティケースに示された例は、この作業が進行中であることを示しており、IRT はその継続を強く推奨する。研究開発プログラムの重要な側面の 1 つは、地圏、さらには生活圏における放射性核種移行に係るものである。目的はさらに現実的な表現を達成することで、そのニーズは IRT も特定している。

IRT は、処分場の挙動と性能を評価するためのモデルとコードの検証 (validate) に継続的な努力を払うことを推奨する。この点は、通常の範囲を超える空間的・時間的スケールを踏まえると一層重要であり、したがって、すべてのステークホルダーからの信頼を高めるために不可欠である。

5 カ年の研究開発計画はまもなく終了する。このレビューからの提言が、今後予定されている新たな研究開発プログラムに取り入れられることが望ましい。ジェネリックなセーフティケースから、それぞれのサイトや廃棄物に特化したセーフティケースに移行するには、NUMO が研究開発の優先事項とその妥当性を率先して決定することが必要だろう。NUMO が、研究開発プログラムと関連予算について METI に助言するため、現行のセーフティケースに基づいて研究開発提案を作成するよう IRT は推奨する。そうした提案では、次の段階のサイト選定と次のセーフティケースに情報を提供するため、主要な研究開発の優先事項を明確に定義し、それを立証すべきである。NUMO と関係する研究機関との間で、研究ニーズと研究成果を直接的かつ組織的に交換することで、セーフティケースに研究開発結果をよりよく取り込むことが可能となり、不確実性と保守性を体系的に低減することができるだろう。

国際的な実績によれば、地層処分のための研究開発を定義し、運用する上で主要な責任を負うのは実施主体（この場合は NUMO）である。

### 3. 結論と提言

#### 主な見解と提言のまとめ

##### NUMO への提言

- 今後もシステムの理解を深め、分析できるように努めていくこと。
- 研究開発課題の特定および日本の専門研究機関の支援を受けて得られた研究開発成果の統合という組織としての役割を強化すること。地質環境モデルに基づくセーフティケースの教訓を活かし、研究開発ニーズを特定し、優先順位を付けて、それを調査研究を担う機関に提出すること。
- NEA、IAEA、EC などの国際機関、ならびに地層処分プロジェクトに取り組む海外機関の双方との国際活動への積極的参加を継続すること。

##### 一般的な見解

- NUMO の地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケースを NRA との対話の指針とすること。ライセンス前の対話の目的は、正式なライセンス段階までの期待事項と手続きを明確にすることである。
- 地層処分場に処分される放射性廃棄物の特性とインベントリに関するデータを精緻にするために、廃棄物発生者と NUMO の間のやりとりを進めること。理想的には、要求するデータに廃棄物のインベントリと特性の変化の可能性も含める。

#### 3.1. 一般事項

NUMO はこの地質環境モデルに基づくセーフティケース作成のため、多大な作業を行ってきた。これは、これまでのセーフティケースに基づく長年の経験、海外での慣行の十分な検討、広範な研究開発、URL の実験、NUMO の国際機関内での継続的な活動に基づいている。HLW および TRU 廃棄物（一部の国では長半減期 ILW と呼ばれる）の地層処分の実施は、国際的な運用経験が限られており（すなわち、米エネルギー省による軍事関連 TRU 廃棄物の岩塩層への隔離パイロットプラント【WIPP】に限定される）、複雑な分野である。しかし、多くの国では処分ソリューションが開発されており、NUMO は他機関から徐々に得られる知識を活用し、漸次的に地層処分の課題に対応する方法を開発してきた。

処分プロジェクトは、異分野の知識と統合を必要とする複雑なプロジェクトで、空間に加えて、何よりも時間を通常以上のスケールで物理的に表現しなくてはならない。また、地質学または鉱業の側面と放射線防護に関する側面の統合が必要な技術も使用される。安全性の実証という点では、システムの複雑さとそれらが提起する問題を取り込まなければならない新たなアプローチの開発が必要となる。

このような状況の中で、NUMO の役割は、地層処分プロジェクトに必要なスキルを結集し、体系づけることであり、主な役割は、さらなる開発の必要性を特定し、関連する分析を行うために必要なすべての科学・技術的情報を統合することである。NUMO は、特に放射性廃棄物と地下研究所での研究という点で、国内の経験から恩恵を受けており、地質学、物理学、化学、デジタルなど、科学技術の発展を支援できる多くの機関にもアクセスしている。さらに NUMO は、日本の地層処分プロジェクトの開発に効果的に貢献できる地下作業技術や原子力技術へのアクセスも有している。

IRT は、NUMO が現在のプログラム段階で十分に包括的なセーフティケースを作成したことを認める。廃棄物インベントリや規制要件に関する基本的なプログラムの不確実性など、NUMO の地質環境モデルに基づくセーフティケースの土台に関連する大きな不確実性を踏まえ、IRT は、NUMO のプログラム開発にとって感度解析を加えたセーフティケースへと拡張することも有益と考える。そのような研究では例えば、インベントリの幅やさまざまなレベルの要件、岩盤の透水性といったサイト特性データの範囲、人工バリアの厚さといった技術仕様などがカバーされる。許認可プロセス前における検討の枠組みにおいて他国で使用されているこのようなアプローチは、提案されている地層処分の概念とセーフティケースで使用される方法の柔軟性と頑健性を説明する、効果的な方法であろう。これは、科学的・技術的な観点（例えば、研究開発の運営方針）からだけでなく、関心のある地域社会とのコミュニケーションに対しても価値あるものとなるだろう。

IRT は、地質環境モデルに基づくセーフティケースが、さまざまな時間的・空間的スケールで既存の知識を記述し統合するための適切で反復的な方法であると認識している。IRT は、日本におけるこれまでの地層処分のセーフティケース（JNC, 2000a）（JAEA, 2007）に対して、地質環境モデルは「より現実的」であることを指摘しておく。NUMO は、具体的なサイトでの評価に使用される方法論とツールを含めて、国際的な慣行と整合するセーフティケースの開発能力と成熟度を実証している。IRT は NUMO に、将来の意思決定を行ううえで十分なレベルまで処分場の性能を分析できるよう、その努力を継続し、システムの理解をさらに深めるよう勧告する。そのためには、NUMO が国内の主要な能力にアクセスし、国際協力の潜在的能力を引き続き活用できるようにすることが必要である。IRT は、NEA や IAEA に代表される国際機関や地層処分プロジェクトに取り組んでいる海外機関の双方との国際活動への積極的参加を継続するよう、NUMO に勧告する。

DGR に関する可逆性のアプローチ（NEA, 2012a）と段階的な意思決定については具体的に報告されていない。決定を覆すことにつながるプロセスを包括的に説明することは有益だろう。主に処分決定の可逆性に関するこうした側面もまた、具体的な開発対象となるべきである。IRT は、NUMO は自身の役割から、可逆的な意思決定プロセスの提案を検討できる点

を指摘しておく。これは NUMO のプログラムに対する制約となるかもしれないが、DGR を受け入れる候補となりうる自治体、意思決定者、その他のステークホルダーとの対話に役立つだけでなく、将来の世代にとって処分に関する主要な決定点のガイダンスを提供することにもなる。

NUMO の活動や DGR の開発の成功にとって、多くのステークホルダー機関との交流も必要であり、その中には、地層処分場の設計と安全評価のための決定的な情報とガイダンスを提供するものもある。IAEA の『放射性廃棄物処分に関するセーフティケースと安全評価の安全基準』（IAEA, 2012）で以下のように推奨されている：

*「利害関係者の関与 4.91. 処分施設の安全に対する信頼を構築するプロセスの一環として、利害関係者の早期関与を確保する必要がある。利害関係者の関与のためのさまざまなモデルがさまざまな国で適用されており、国内および国際研究プログラムの両方で利害関係者を関与させる方法について広範な研究が行われている。重要な考慮事項は、利害関係者の関与は、手続きのルールを明確に定義した、オープンで透明性の高い協議の枠組みの中で行われるべきであるということである。利害関係者の関与のプロセスは、セーフティケースで定めるべきである。」*

重要な考慮事項として、ステークホルダー機関とのこうした対話ややり取りを、明確に定義された手続きに則って、オープンで透明な枠組みの中で行うことが挙げられている。IRT は、現行の地質環境モデルに基づくセーフティケースがそのような対話の適切な土台を構成するとみなす一方で、こうした対話は、サイト選定と安全評価における次のステップの参考情報とすべきだと考える。したがって、利害関係者を関与させるプロセスは、将来のセーフティケースとそれらに関連する意思決定のためのさまざまなニーズに合わせて調整される必要がある。

以下のサブセクションで IRT は、規制当局、原子力産業、R&D 組織とともに検討すべき重要なポイントを提案するとともに、NUMO の活動に特化した提言を行う。

### 3.2. 日本における地層処分の基本的な実現可能性

NUMO の地質環境モデルに基づくセーフティケースは、日本における地層処分の安全分析を実施し、プロジェクトの現段階に適したセーフティケース全体を提供できる NUMO チームの能力を示すものとなっている。IRT は、実行された検討は一般的な性質のものであり、プログラムの境界条件を取り巻く不確実性の両方に関連する限界があると認識している。

- 地質学的には、日本列島を形成する複雑な構造にもかかわらず、地層処分に必要な安定性を有すると想定される地域が特定された。地質環境モデル（SDM）では、地層処分に適すると見込まれる地質構造の 3 つのグループを、サイトを特定せずにより詳細に説明している。DGR 開発のこの段階では適切とはいえ、地質環境モデルが一般的な性質のものであることに変わりはなく、保守的な設定と任意性のある恣意

的な選択によって、特定の岩盤特性をわかりにくくする可能性がある。将来の課題としては、応募してきた自治体地域に位置するサイトが、主要な安全機能、すなわち、NUMO の用語によれば、「隔離」と「閉じ込め」を提供できることを検証することが含まれる。NUMO は、すでに入手可能な知識を活用して、より詳細なサイトの調査と評価を行うことができるチームを動員できる。また、特に個々のサイトの性能と安全評価を通じて、サイトに関する追加知識の必要性を特定することもできる。IRT は、この段階で、フィールドデータの取得とその処理のためのツールと技術が利用可能であると考えている。

- 処分場の設計は、やはり本質的に一般的なものであるが、成熟が進んだ段階にあるようにも見える。国際的な経験だけでなく、PEM の概念に示されているように、目的を明確にした開発も土台となっている。実施された研究やテストとモデルから、必要な技術が利用可能であること、そして何よりも、チームが地層処分プロジェクトの後続の段階で発生する可能性のある特定のニーズを満たすためにそれらを開発する能力があることが示されている。実際のサイトを対象に研究する際の大きな課題の 1 つは、非常に長い期間にわたって閉鎖後の安全を確保するために、処分概念を地質環境の実際の特性に適応させることであろう。
- NUMO は、安全性の検討を実施する能力を実証した。NUMO は、安全評価を実施し、特に NEA (NEA, 2005) や IAEA (IAEA, 2012) が提案する国際的な勧告や慣行、およびその他の国際慣行に沿った形でセーフティケースを作成している。安全を示すための多くの研究とその結果としてのモデルは、NUMO が地層処分を表現し、その想定し得る変遷について説明および分析する能力を示すものである。ここでも、こうした作業は、一般的な性質であることによって制約される。結果として不確実性は高まるが、調査の段階が継続的に進行するにつれ不確実性は徐々に減少する。この段階では不確定なものとみなされる現象も、地層処分プロジェクト開発の後の段階で分析することができる。また、サイトのデータとは無関係に、明確にすべき側面が存在する。これらは、特に規制要件と処分する必要がある廃棄物のインベントリデータに関連する。NUMO は実施主体として、また、その経験からも、これらのニーズを分析して特定し、要件を確立するとともに廃棄物インベントリを特定する義務を負う当局や廃棄物発生者に通知するという重要な役割を持つ。
- 前述の通り、地層処分の研究は複雑であり、複雑で進化が続く多くの科学分野、技術、方法論を必要とする。地層処分の開発は、要件の枠組みを考慮に入れ、特に、専門の規制の枠組みに準拠している必要がある。地層処分プロジェクトの開発の政治的および社会的文脈にも、考慮すべき独自の要件とダイナミクスがある。いつ

でも随時利用可能な情報をすべて適切にまとめ、研究とその結果を再現するためのマネジメントシステムが整備されている。NUMOは、プロジェクトを適切に管理できるように、これらのシステムを構築しており、今後も後続の段階で研究を続けることにより、適切な品質管理を確保することが可能となろう。

IRTは、放射性廃棄物の地層処分の実現に必要なさまざまな点をレビューし、日本の地質学的背景を考慮した上で、その実現可能性の要素が実証されたと考える。ただし、特に候補サイトの特性に応じて、次のステップに向け、多くの研究が必要であるという事実には変わりはない。NUMOはそのような使命を果たすための能力を実証した。Annex Dに記す見解は、今後日本における地層処分プロジェクトの開発に向けてNUMOを支援することを目的としている。

### 3.3. セーフティケースの枠組みに関連する重要点

ここで、経済産業省の監督的役割と、要件の設定とコンプライアンスの規制を担当する日本の原子力規制委員会（NRA）の独立した役割、そして地層処分プロジェクトの実施主体としてのNUMOの役割を再確認することは有益だろう。

DGRプロジェクトには、規制、産業、政治、社会など、多くの外部当事者との接点があり、これらのさまざまな側面に応じた境界の設定と支援が必要となる。これらの側面については、IRTの見解は、地質環境モデルに基づくセーフティケースに直接関連する技術的な側面のみ、すなわち、規制、処分対象放射性廃棄物を発生する産業、および研究開発に限定したものである。

地質環境モデルに基づくセーフティケースを通じてIRTは、サイト選定と次のセーフティケースの構築に対する規制上の期待事項、廃棄物の特性評価とインベントリの対象範囲、およびDGR開発を支援する研究開発プログラムという3つの重要点に着目した。これらがNUMOだけの責任ではないことは明らかだが、NUMOがこれらにどう対処するかが、NUMOの今後の研究やセーフティケースの重要性、適切性、代表性、信頼性を大きく左右することになる。

IRTは、NRAがDGRに特化した規制を策定中であることを理解しており、そのような規制の最初のセットを可能な限り早急に作成することの重要性を強調する。国際的な経験は、処分に関する知識の蓄積に伴って規制要件も変化する可能性があり、また、そうあるべきことを示している。このアプローチでは、最初の一連の規制要件は、DGRの安全性に関して詳細なレベルですべてを網羅する必要はない。

国際的な経験は、実施主体と原子力規制当局との間における（規制当局の独立性を損なわない）許認可プロセス前の対話によって、実施主体は規制上の期待事項を理解でき、それがDGR開発の重要な要素であることを示している。IRTは、NUMOが現行のセーフティ

ケースを土台として規制当局との許認可プロセス前の対話を確立するために必要な組織に積極的に働きかけるよう推奨する。後続のセーフティケースを開発する前にそのような交流を行うことで、NUMO の作業が将来、規制当局の期待から逸脱した方向に向かうリスクを減らすことができる。

廃棄物インベントリと特性評価に関しては、NUMO の作業は日本の最終処分法（METI, 2000, 2015）および最終処分計画の範囲内であることを IRT は認識している。IRT は、セーフティケースで使用されたインベントリデータは 2008 年に遡り、一般的な性質であることを指摘しておきたい。IRT は、現行の廃棄物インベントリの全範囲と、さまざまな発生源からの将来の廃棄物の可能性を考慮して、これを更新することを推奨する。IRT はまた、NUMO が設計、安全性、処分の可能性などの観点から、インベントリが変化した場合の結果について感度解析を実施することを推奨する。これにより、不確実性を最も低減する必要がある領域を特定し、セーフティケースの方法論、設計オプション、処分場の容量に関する頑健性と柔軟性をテストすることが可能になる。このような感度解析は、NUMO が処分する可能性のある廃棄物の種類の最適化と処分可能性について、廃棄物発生者（すなわち、NUMO の場合、JNFL、JAEA、電力会社）との対話を促進することになる。そうした探索的分析は、将来の地層処分研究のために保持されるインベントリの範囲を特定するのにも有用である。

ジェネリックなセーフティケースから、それぞれのサイトや廃棄物に特化したセーフティケースに移行するには、NUMO が研究開発の優先事項を率先して決定することが必要だろう。IRT は、NUMO が経済産業省に DGR に関する日本全体の研究開発プログラムについて助言できるよう、現行のセーフティケースに基づいて研究開発提案を作成することを推奨する。そうした提案では、次の段階のサイト選定と次のセーフティケースに情報を提供するために、主要な研究開発の優先事項を明確に定義し、それを立証すべきである。国際的な実績によれば、地層処分のための研究開発を定義し、運営する上で主要な責任を負うのは実施主体（この場合は NUMO）である。

国際的な経験に基づけば、DGR の実施を首尾よく進めるには、段階的な許認可プロセスやさまざまな組織の役割の明確化を含む国内の枠組み作りが前提条件となる。IRT は、NUMO のジェネリックなセーフティケースに焦点を絞ってピアレビューを行ったが、上述の通り、強化が必要となる可能性のある国家的枠組みの要素についても見解を示した。これらの側面をさらに評価するために、DGR プログラム全体と規制枠組みに焦点を当てた国際的なピアレビュー（IAEA の ARTEMIS など）が有益であり、DGR の開発に寄与すると思われることを IRT は指摘したい。

### 3.4. NUMO への技術的な提言

#### NUMO への具体的な提言のまとめ

- 地層処分場に求められる安全機能：将来の段階では、可能な限り、安全機能を定量的な性能指標と一致させ、可能な場合は、許容可能な性能基準と一致させる。
- 核種移行を適切に遅延させる地質媒体の能力：サイト評価の際、より具体的に考慮する。複数の地域が応募する場合、この点が判別基準になる可能性がある。
- 設計オプション：新たな知識が得られたときに設計の柔軟性を維持できるよう、できるだけ長くオープンしておく。
- 設計オプションの柔軟性を維持するには変更に関するモニタリングが必要だが、これは構成管理システムを使用することで管理できる。
- 処分計画上の意思決定の可逆性：特に次世代のための選択肢を残しつつ、地層処分の寿命を決定できるような意思決定プロセスを提案する。
- モニタリング：回収可能性をモニタリングの目的に取り入れる。
- 追加的に考慮する現象：現段階で非支配的または非確定的とみなされている現象を再検討し、後続段階でそれらを考慮すべきか否かを評価する。
- 処分坑道における廃棄物パッケージの取り扱いと定置：地下環境での試験を実施し、研究を行う。
- 設計開発：今後の調査で検討予定のサイト特性への適応を視野に入れて継続する。
- 操業時の安全：作業上のリスクを低減するための設計機能によって補完するとともに、設計によって想定される防護が失敗した場合を考慮し、そのような場合の作業員および公衆への被ばく線量を分析することにより、操業時の安全評価を補完する。
- 後続段階で想定される地質構造の特性に応じて、地質構造間の差異を設計に反映することができる方法で、設計・施工手順を適応させる。
- 基礎となる情報と処理されるデータをより網羅して示す方法を模索することで、一般化したストーリーボードを開発する。

NUMO は、地層処分場に求められる安全機能の詳細な分析を行ってきた。将来の段階では、可能な限り、安全機能を定量的な性能指標ならびに許容可能な性能基準と一致させることを IRT は推奨する。

IRT は NUMO に対し、地質環境モデルを用いるアプローチを継続して、サイト選定プロセスのさまざまな段階で地球科学知識を取得するたびに反復的にそれを統合することを推奨する。そのようなアプローチは、さまざまな応募サイトを通じて一貫性のある学際的な説明を可能にすると思われる。



NUMO の全体的な戦略は、地層処分は、その個々の構成要素が必要とされるさまざまな機能を果たすシステムとしてのみ評価し得るという確固とした洞察に基づいている。この観点から、特に研究やサイト評価の段階では、地圏の役割が重要になる。核種移行を適切に遅延させる地質媒体の能力は、サイト固有の評価の際に、より詳細に考慮されなければならない、それが判別基準となる可能性がある。

処分場設計の面では、システムに固有の不確実性を踏まえ、新たな知識が得られたときに設計変更の柔軟性を維持するため、さまざまなオプションを可能な限りオープンに保つという NUMO の計画が奨励される。このような柔軟性を確保するためには、廃棄物と地質環境の知識、処分施設の設計、関連する現象などにおけるさまざまな相互依存性も含め、構成管理システムを使用して確実に変更をモニタリングする必要がある。また、安全性の検討を通してこれらの側面を統合することも必要である。

NUMO は、廃棄物の回収可能性に十分に対応しており、処分場の設計アプローチでその点を考慮に入れている。IRT は、処分場に関するモニタリングの側面を可逆性および回収可能性の目的に統合することを推奨する。

活動の効率的な実施を支援するために、統合管理システムが導入されている。それぞれ独自のデータセットと仮説を持つ多数のケーススタディと計算を適切に追跡するために、前述のように、全体的なマネジメントシステムの一部として構成管理を行うことを IRT は推奨する。構成管理は要件管理と組み合わせて、検討されたさまざまな技術的オプションと、それぞれに関連付けられた一連の計算を記録できるようにする必要がある。構成管理の範囲は、DGR の性質と実施段階を考慮して適切に調整する必要がある。

処分場の設計は、この初期段階では、多くの不確実性を伴う。NUMO は、処分場のふるまいと、ひいてはその安全性に影響を与える可能性のある主要な現象を考慮してきた。今後の段階では、システムのふるまいにとって重要性が二次的であることを理由に現段階で考慮されていない現象についても評価の必要があると IRT は考える。

廃棄物パッケージ化の研究は、特に地下環境での取り扱いおよび定置試験とともに継続する必要がある。NUMO が今後の調査で検討予定のサイト特性への適応を視野に入れ、設計開発を継続することを IRT は推奨する。

操業時の安全へのアプローチも初期段階にある。IRT は、NUMO によるプログラムの現段階における予備的な評価は、一般的な想定条件と初期の概念設計に基づくものであることを認識している。将来のセーフティケースについては、操業時のリスク（火災など）を軽減するための追加設計オプションを検討することを IRT は推奨する。IRT はまた、設計によって期待される防護が失敗するといった場合などに関する想定シナリオの追加、および作業員や公衆、

環境の被ばくの経路の可能性をすべて含めることによって、安全評価を補完することも推奨する。

長期的な安全評価は、現時点では非常に保守的と考えられる多くの想定条件に基づいている。その結果、検討されたさまざまなケースの結果が非常に似通ったものとなり、設計オプションおよび/または潜在的な母岩の地質構造を識別するためのより詳細な情報を提供しない場合が多い。設計と施工の手段は、後続の段階で想定される地質構造固有の特性に適合させていくとしていることは合理的であり、したがって、さまざまな地質構造間の差異が設計に反映されるべきである。

NUMO の安全評価手法は充分性を求め、不確実性を一貫した方法で取り扱おうとするものである。一貫して、保守性につながる多くの仮定が使用されている。これにより、長期安全性の可能性に関する結論は頑健なものとなるが、一方で、さまざまな設計と母岩の選択肢を区別する能力は低下する。

次段階への準備として、NUMO は、合理的に予想されるさまざまな母岩の種類に対し、別のサイト特性を考慮した感度解析ケースを作成することを検討するとよいだろう。これは、設計の最適化の観点から、母岩の特性をより活用するための方法論の開発に役立つ可能性がある。ストーリーボードを使用したケースのプレゼンテーションは重要である。これにより、処分場が設置されるそれぞれの場所で考慮すべきさまざまな現象の理解が深まるだけでなく、それらの経時変化の理解も深まる。基礎となる情報と処理されるデータをより網羅して表現する方法を模索することで、一般化したものとして開発できるだろう。

最後に、評価に含まれるさまざまなモデル、それらの連成、および関連コードをマッピングすることは有益と思われる。それによってモデル化の取り組みの概要を示し、分析レベルに応じて適用されるさまざまなツールを説明できるようにするとともに、提示されているモデル表現の簡略化に関する理解を深めることができる。この枠組みの中で、根拠となる報告書に基づいて議論し、さまざまなレベルのモデリングで考慮すべきスクリーニングプロセスに関する決定を行うことを、IRT は推奨する。モデリングの結果に対する信頼性をさらに高めるため、セーフティケースで使用されているモデルとコンピュータコードをさらに検証 (validate) する必要もある。IRT は、NUMO が近い将来、こうした努力を一層強化することを推奨する。

## Annex A. 国際レビューチームのメンバー

### JeHeon Bang

JeHeon Bang は韓国の技術支援組織（TSO）、原子力安全技術院（KINS）の研究者である。放射性廃棄物処分の分野で 10 年以上の専門的な経験を持つ原子力エンジニアおよび物理学者で、2009 年に慶北大学校（韓国）から物理学の学士号を、2013 年には浦項工科大学校（韓国）から原子力工学の修士号を取得。

2012 年から 2014 年まで、韓国の放射性廃棄物管理機関である韓国原子力環境公団（KORAD）のスタッフメンバーとして、空洞処分施設の操業時事故分析と浅地中処分施設の閉鎖後安全評価を担当した。

2015 年に KINS の上級研究員に就任して現在に至る。放射性廃棄物処分規制局の一員として、放射性廃棄物処分のライセンス申請の審査、立ち入り検査、およびルール作りを担当。特に、2021-2029 年に計画されている国家規制研究プロジェクトを通じて、HLW 処分に関する規制要件とガイドラインの策定に貢献している。

### Allan Hedin

Allan Hedin はスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）の上席カンパニースペシャリストで、使用済み核燃料深地層処分の安全評価プロジェクト管理を担当している。

1983 年にウプサラ大学で工学物理学の修士号を、1987 年には同大学でイオン物理学の博士号を取得。彼の論文は質量分析技術への応用を伴う高速重イオンと固体との相互作用に関する理論的および実験的研究に関するものであった。レーザー刺激脱離および走査型トンネル顕微鏡の分野で 4 年間の学術研究を行った後、1991 年にスウェーデンの化学品監督局に採用され、化学物質および製品のリスク評価に従事した。

SKB 入社は 1994 年。当初は放射性核種輸送の確率計算を担当していたが、徐々に安全評価方法論の問題全般を管理するようになった。安全評価の分野で、より複雑な表現の本質的な特性を捉える、単純化された数学モデルの開発に特に関心があり、スウェーデンのフォルスマルクにある使用済み燃料貯蔵施設の SKB ライセンス申請に向けた安全評価作業を率いた。

NEA 傘下のセーフティケース統合グループ（IGSC）のメンバーであり、IGSC 内で組織された複数の国際プロジェクトに積極的に参加している。ANDRA の Dossier 2001 および Dossier

2005 報告書の NEA 国際ピアレビューにおいて安全評価方法のレビューを担当。SKB の国際コンサルティングサービスを通じて複数の国内プログラムのアドバイザーグループに関与。また、オルキオト（フィンランド）の使用済燃料貯蔵施設の操業ライセンス申請に向けてフィンランドの安全評価のための国際諮問グループのメンバーでもある。

### **Jussi Heinonen – IRT委員長**

Jussi Heinonen は 2020 年 12 月以降、リスク情報に基づく規制と監督、顧客オリエンテーション、デジタルトランスフォーメーションを中心に、フィンランドの放射線・原子力安全局（STUK）で戦略的規制監督開発を指揮している。ヘルシンキ工科大学で腐食と電気化学を専門とする材料科学の修士号を取得。

現在の役職に就く前は、核廃棄物規制および保障措置担当ディレクターとして勤務しており、使用済燃料および放射性廃棄物管理の規制分野における経歴は 20 年近い。フィンランドにおける核廃棄物施設の設計、建設、運用の規制監督を担当する核廃棄物施設規制のセクションヘッドとして勤務。使用済燃料の処分に関する規制監督に携わり、処分キャニスタの長期的な性能、人工バリアの開発、地下処分施設の設計と建設に従事してきた。また、Posiva の使用済燃料カプセル化および処分施設に関し、使用済燃料中間貯蔵施設の設計と建設、使用済燃料カプセル化プラントの設計、および認可プロセスの準備も担当。

Jussi Heinonen は、NEA、IAEA、および規制機関を支援する北欧諸国のいくつかの国際委員会およびグループのメンバーである。IAEA の Artemis ピアレビューミッションにチームリーダーおよびレビューチームメンバーとして参加している。Cigéo における処分の安全に関する文書をレビューするフランスでの IAEA のピアレビューと、ロシアの液体放射性廃棄物の深井戸注入に関するレビューにも参加している。

### **Jean-Michel Hoorelbeke**

現在、フランスの放射性廃棄物管理機関 Andra の戦略・展望部門でシニアアドバイザーを務める Jean-Michel Hoorelbeke は、放射性廃棄物管理施設の設計と安全に関し、フランス国内外で 39 年の経験を有する。その専門知識には、貯蔵、処分（地層、浅部）、VLLW から HLW までの廃棄物管理のための包括的かつ段階的なアプローチが含まれる。1982 年から 1993 年までフランス原子力委員会の科学者および部門長を連続して務め、1993 年から 2007 年まで現 Cigéo 地層処分プロジェクトの Andra プロジェクトマネージャー、2007 年から 2015 年までは Andra のプロジェクトおよびプログラムの副ディレクター、2015 年から 2020 年までは Andra の安全・環境・廃棄物管理戦略副部長を務める。

国際的なガイダンスを開発するために、数多くの顧問を務め、IAEA および NEA との技術会議の議長を務めた。また、様々な国（特にハンガリー、ウクライナ、英国）で放射性廃棄物管理プログラムを開発するため専門家として支援を提供した。

1982 年、フランスの PSL 研究大学パリ国立高等鉱業学校から科学とエグゼクティブ工学の修士号を取得。2008 年、ムーズ・オート=マルヌ地下研究所でフランス国立工学グランプリを受賞。フランスから国家功労勲章シュヴァリエを受章。

### **Mihaela Ion**

Mihaela Ion は、カナダ核廃棄物管理機関（NWMO）の安全評価マネージャーで、カナダの燃料廃棄物インベントリ、操業安全、およびカナダにおける使用済燃料の深地層処分場をサポートする長期的な安全評価に関連する活動を監督している。放射性廃棄物処分の分野での 13 年以上の経験を含み、原子力安全および原子力施設の認可に関して 25 年以上の経験を持つ。安全分析の開発、技術レビュー、管理を担当するとともに、カナダ、ルーマニア、英国、米国における原子力安全および環境保護に関する規制要件への適合確認を担当。

2018 年には廃棄物管理専門家ワーキンググループの一員として、カナダの小型モジュール式原子炉のための廃棄物処分および貯蔵に関する検討事項の開発に貢献した。

2018 年には IAEA の使用済燃料管理の安全性及び放射性廃棄物管理の安全性レビューに関する第 6 回合同会議に IAEA 合同会議オフィサーとして参加し、2015 年の第 5 回 IAEA 合同会議レビューミーティングにはカナダのチームの一員として参加した。

NEA では NWMO を代表し、NEA の「記録、知識、記憶の保存イニシアチブ」の最終段階に貢献。現在は NWMO の代表として、NEA のセーフティケース統合グループと NEA の操業安全に関する専門家グループの一員として活動している。

### **Philippe Lalieux**

Philippe Lalieux は、ベルギー放射性廃棄物・濃縮核分裂性物質管理機関、ONDRAF/NIRAS の長期廃棄物管理担当ディレクターで、廃棄物および使用済燃料の長期管理のための戦略と方針の定義から、地層処分に関する RD&D プログラム、廃棄体受入基準の確立、廃棄物製造および測定機器の認定、廃棄物の処分可能性の確認まで、幅広い責任を持つ。同機関の国際関係と責務（特に 2011/70/Euratom 指令関連）も担当している。

2016 年からは、ベルギーの地下研究所を監督する EIG Euridice の理事会のメンバーも務めている。

放射性廃棄物および使用済燃料管理の分野で、国内および国際レベルで 30 年以上の専門的な経験を有する。

1995 年から 2000 年までは、パリの原子力庁放射線防護・廃棄物管理部門に勤務していた。

現在は IAEA の国際放射性廃棄物技術委員会 (WATEC) の議長と、放射性廃棄物管理の安全性に関するすべての側面についてフランス原子力安全当局に助言を提供する「廃棄物諮問委員会 (Groupe Permanent Déchets)」の副議長を務めている。また、放射性廃棄物管理に関する欧州共同プログラム (EURAD) の外部諮問委員会のメンバーでもある。地層処分のための研究開発を積極的に行っている幅広い組織をコーディネートする、放射性廃棄物の地層処分の実施 (IGDTP) に向けた技術プラットフォームの元議長。

さまざまな国際的なピアレビュー (例: セーフティケース、認可申請など) に専門家として積極的に参加している。

放射線防護の学位とともに、地質学の修士号、地球物理学の修士号を取得。

## Jens Mibus

Jens Mibus は、ドイツの原子力監督機関である連邦放射性廃棄物処分安全庁 (BASE) の部門を統括する地球化学者であり、特に地層処分を専門とした放射性廃棄物管理の分野で 25 年以上の経験を持つ。

フライベルク鉱業技術大学 (ドイツ) で地球化学の博士号と鉱物学/地球化学の学位を取得。ウラン採掘のレガシーサイトに関する環境コンサルティングエンジニア (1996-2000 年) を経て、ドレスデン・ロッセンドルフ研究センターで研究助手 (2001 -2006 年) を務め、多孔質媒体中の溶質輸送と同定を研究した。その後、マリ・キュリー・フェローシップを受けてパウル・シェラー研究所 (PSI、スイス) の廃棄物管理研究所で圧縮粘土岩 (オパリナス・クレイ) の多孔構造を研究した (2006-2008 年)。

2008 年には、放射性廃棄物管理共同組合 (NAGRA、スイス) の安全分析プロジェクトマネージャーに就任、安全分析の実施、評価シナリオの作成、FEP の管理、核種移行の概念化、国内外の研究プロジェクトの管理などを担当した。

2018 年以降は BASE の「サイト選定に係る包括的・国際的な質問 (Overarching and International Questions of Site Selection)」部門を統括、セーフティケースの規制レビュー、マネジメントシステムと安全文化、IAEA や NEA などの国際機関や委員会での代表などを主

な任務とする。セーフティケース統合グループ（IGSC）のメンバーであり、NEA（EGSSC）、IAEA（WASSC）、WENRA-WGWDのワーキンググループに貢献している。

## Annex B. 付託事項

### 『NUMO地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケース』の 国際ピアレビュー

安全性を重視した段階的な手順に基づく地層処分場のサイト選定を進めるなかで、NUMO がステークホルダーとの透明性、公平性のあるオープンなコミュニケーション活動を強化することは重要である。また、NUMO は、国内外の専門家との協力のもと、関連する研究開発活動の推進を通して、関連分野の知識とスキルを最新の状態に維持しなくてはならない。

2020年11月、NUMO は応募のあった北海道2カ所の自治体において、サイト特性調査の第1段階である文献調査（LS）を開始した。LSは、地質図や天然資源マップなどの公開文献に含まれる、サイト固有の情報やデータに基づいた机上検討によって実施された。日本政府とNUMO は、地層処分に関する国民の理解を深め、より多くの自治体にこのような文献調査を受け入れてもらえるよう、日本全国で対話を進める努力を続けている。

このプログラムを実施する能力を幅広いステークホルダーに示すことが重要である。主な境界条件は以下の通りである：

- NUMO は、使用済燃料の再処理および混合酸化物燃料加工製造から発生する HLW（高レベル放射性廃棄物）および ILW（中間レベル放射性廃棄物）（日本では「TRU 廃棄物」と呼ばれる）の大量のインベントリを処分する責任を負う。
- 日本は活発な地殻変動と地質学的複雑性を特徴とする列島である。
- サイト選定は、公募に応じるか、または経済産業省が作成した全国マップ [www.enecho.meti.go.jp/en/category/electricity\\_and\\_gas/nuclear/rwm/pdf/map\\_en.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/en/category/electricity_and_gas/nuclear/rwm/pdf/map_en.pdf)（METI, 2017）に基づき、科学的に好ましい地域に対する政府の勧誘に対応する形で応募してきたコミュニティに基づいて進められることになる。
- より多くの自治体が LS を受け入れることが期待されている。
- 現在の2カ所の応募サイトについては、LS が完了した後に次の調査段階に進むかどうか決定され、その決定は、LS の結果と、各自治体の首長ならびに北海道知事の合意に基づいて行われる。
- 関連する規制枠組みはまだ十分に確立されていない。



- 福島第一原子力発電所の事故を踏まえ、国民から社会的・政治的に受け入れられるためには、操業面での強靭さ（レジリエンス）の向上が一層求められるようになってきている。

したがって、NUMO では、サイト特性評価の第 1 段階を開始できる可能性の高い地質環境を断定的に絞ることができない。しかし、NUMO は、サイトを評価し、段階的なサイト選定プロセスに係る決定の根拠となる長所・短所を特定するために必要な経験と技術を持っていることを、一般的な形で開発し、示す義務を負う。その出発点として、NUMO は、H12（JNC, 2000a）および TRU-2（JAEA および FEPC, 2007）（JAEA, 2007）の研究によって提供され、日本における HLW および TRU 廃棄物処分の基本的な実現可能性を示すために開発された知識ベースを土台とする。これらの研究は、NUMO が地層処分の責任を負う前に、研究開発機関がそのような廃棄物の管理を支援するために行った作業を取りまとめたものである。

当初の研究から大きく前進した点は、日本の地質環境の典型的な特徴を代表する、地質環境モデルの定義によってサイト・スペシフィックな評価に向けて進展していることである。地質環境モデルを使って、処分場の設計、特に地下施設のレイアウトを調査対象サイトの条件に適合する方法が説明されている。次にこれらの設計が、操業中と閉鎖後双方の安全という観点から評価され、閉鎖後に関しては、特定サイト/設計オプションの長所と短所が明らかになるよう、可能な限り現実的に性能を評価する必要性が考慮されている。しかし、NUMO のセーフティケース報告書では何度も指摘しているが、不確実性の重要性を評価するためにできることは限られていた。その代わりに、通常は、説明を簡略化し、保守的な想定を行い、様式化を導入することで、不確実性に対応している。特定のサイトからのデータがまだなく、詳細な設計の開発はこれからであるため、こうしたアプローチをとることは正当化される。だが、これはまた、この段階では、環境の種類の違いや廃棄物パッケージまたは処分場レイアウトを最適化する方法など、重要な問題については限定的な結論しか導き出せないことも意味する。

さらに、日本における安全な処分の基本的な実現可能性を確認するため、本作業は将来の主要な課題と研究開発上の優先事項を特定することを目的としている。しかし、現在のプログラムの段階では時期尚早であるため、これを厳格なセーフティケースとみなさないことが重要である。むしろ、セーフティケース・アプローチの利用は、NUMO の将来的な作業段階に向けた準備状況をチェックし、特定のサイト向けにより完全に厳密な将来のセーフティケースのテンプレートを開発できるようにするためのものである。将来のプログラムに焦点を当てたこの重要な役割を踏まえ、国内外の専門家による詳細なレビューを通してセーフティケースが目的に適合していることを確認する必要がある。

日本原子力学会（AESJ）が設置した日本の専門家で構成されるレビュー委員会が、NUMOによるセーフティケース報告書の日本語版をレビューし、2019年12月にレビュー結果を発表した（AESJ, 2019）。AESJレビュー委員会からの意見・提案を踏まえ、セーフティケース報告書が改訂され、2021年2月に『包括的技術報告：我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』（日本語版）として公表された。その英語版が今般、国際的な読者向けに作成された。

## 目的

ピアレビューの目的は、『NUMO Pre-siting, SDM-based Safety Case Report (NUMO 地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケース)』（英語版）の独立レビューを提供することである。本レビューでは、日本における深地層処分の技術的実現可能性を確認するとともに、サイト選定に適用可能なフレーム構造を開発するためにサイト選定の前段階で開発されたこのジェネリックなセーフティケースについて、成熟度と準備状況を評価する。特に、NEA と IAEA が策定したセーフティケースの概念に基づいて構築された最新の国際的な技術知識と研究開発の成果が同報告書に反映されていることを確認する。

NUMO は、NUMO のセーフティケース報告書の境界条件に関連し、日本のプログラムにおけるサイト選定プロセスについて経済産業省の要請を受けてNEA が国際レビュー（NEA, 2016）を行ったことを考慮し、NEA にもこの報告書のレビューを依頼した。本レビューでは、報告書の次の要素の充足性と信頼性を判断する必要がある：

- このサイト選定の前段階での安全戦略と、サイト固有の作業を開始する準備として選択されたアプローチ。
- サイト選定プログラムにおいて代表的なものとみなされる地質環境と、地質環境モデルへの知識統合に焦点を当てた、サイト選定プロセス開始時点のサイト特性評価のために提案された方法論の評価。
- 処分場の設計アプローチ、母岩候補に合わせたレイアウト、および処分場の建設、操業、閉鎖の実用性評価。
- 記述されている母岩に合わせた、処分場の操業中および閉鎖後の安全評価。
- サイト選定、設計、および安全評価チームの統合を促し、技術的品質を保証するために必要な反復的フィードバックを提供する管理ツールの導入。
- 評価対象環境のタイプと類似した地質環境内での日本における地層処分の基本的な実現可能性。
- 安全評価の信頼性と地層処分プログラム実施における実用性の向上を目的とした研究開発計画の土台となる、セーフティケースの長所と短所に関する総合的検討。

## レビューの基礎

本レビューは、2021 年 11 月のキックオフミーティングで公開された以下の資料に焦点を当てる。

- 『NUMO Pre-siting, SDM-based Safety Case (地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケース)』の「本編」(約 600 ページ)

本編がセーフティケースの基礎となっている。日本語の報告書は、本編にハイパーリンクとして参照され、技術的な詳細を提供する「付属書」（171 の文書、約 4,000 ページ）によって補完される。これら付属書は、本編の英訳でも参照されているが、適切な高品質の英語に翻訳されておらず、したがってハイパーリンクは付与されていない。英語版の本編報告書で NEA のレビューに十分な詳細情報が示されているものと想定されているが、必要な場合は特定の付属書の英訳した概要も提供されることになっている。

これらの資料は電子メールで配信される。

## 国際レビューチーム

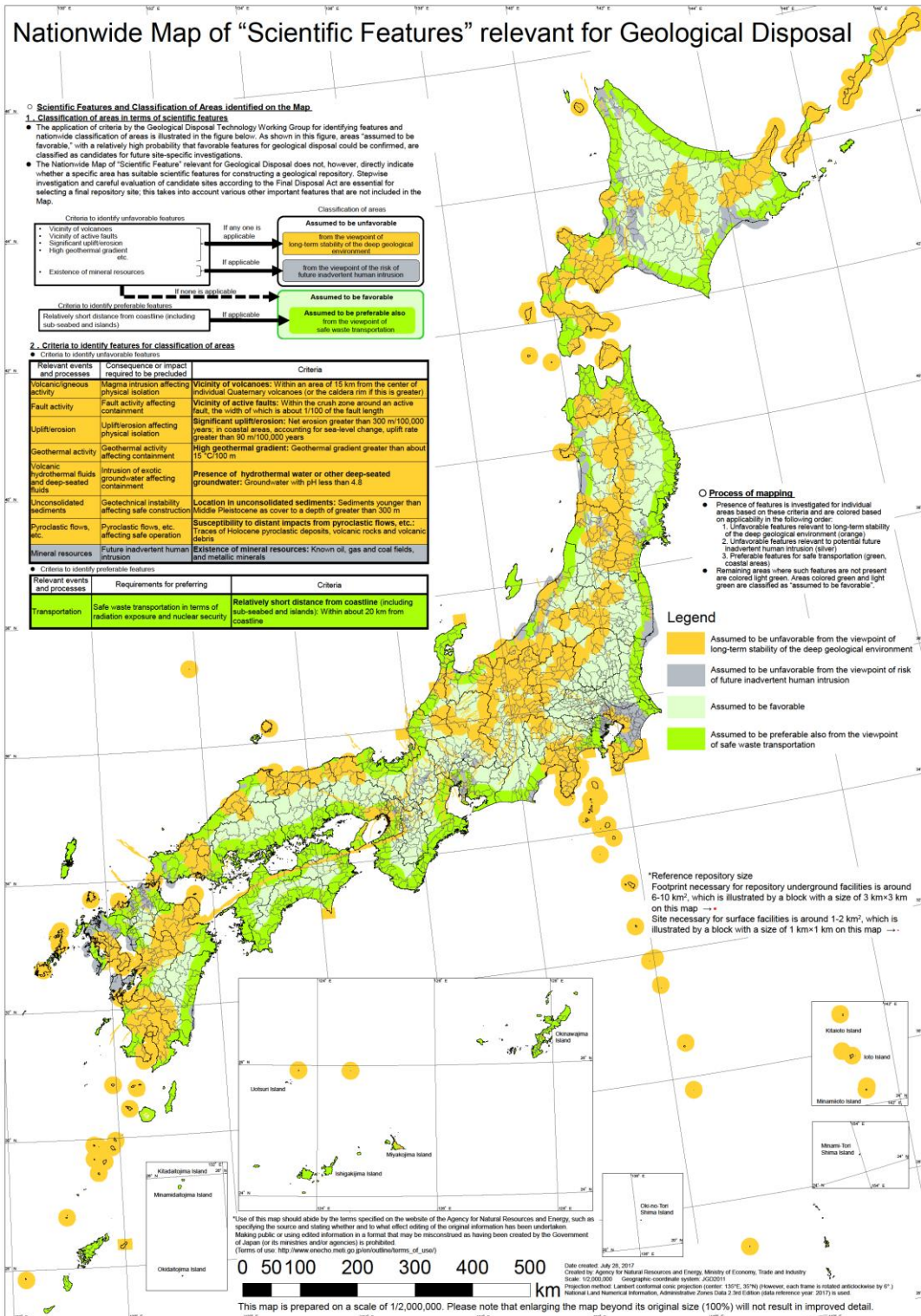
国際的な経験を幅広く有する国際レビューチーム（IRT）は、NEA によって独立して編成されなければならない。チームは、次の分野のコンピテンスを有する外部専門家 7 名、採用されたテクニカルライター 1 名、NEA スタッフ 2 名から構成されると想定されている：

- 結晶質岩および堆積岩における深地層最終処分場（DGR）のサイト選定および設計に関する専門的知識。
- HLW および TRU 廃棄物の地層処分場に関し、安全評価を実施するための専門知識。

## 公平性に関する要件

高水準の清廉性を確保し、利益相反を回避するために、レビューチームの専門家は、過去 5 年間に日本政府またはその子会社/関連機関を含む日本の放射性廃棄物管理プログラムに関与していないことが必須条件である。レビュー報告書には公平性の表明が含まれる。

## Annex C. 地層処分に関する「科学的特性」の全国マップ



## Annex D. NUMO サイト選定の前段階におけるセーフティケースの各セクションにおける IRT のコメント、結果、推奨事項の要約

NUMO 作成者にとって便利なように、この Annex では、『地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケース』のレビュー中に NUMO に提出された IRT からの主要コメントの要約を示す。報告書の概要の後にコメントを示す。それぞれのコメントは、報告書の各セクションに適用されるトピックに関するものである。

D1. 日本における地層処分の背景と基本概念	62
D2. 安全確保の基本的考え方	60
D3. 地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化	71
D4. 処分場の設計と工学技術	75
D5. 操業時の安全性の評価	79
D6. 閉鎖後長期の安全評価	81
D7. セーフティケースへの統合	87

## D1. 日本における地層処分の背景と基本概念

### D1.1. 地層処分の基本概念

地層処分については、処分された廃棄物の放射能が時間の経過とともに減衰するという事実を踏まえて議論されている。これは、ウラン鉱石の放射能と比較した、高レベル放射性ガラス固化体の放射能の減衰を示す図で示されている。しかし、通常使用されるこのような説明は、放射能のみを比較しており、ウラン鉱石と廃棄物のそれぞれの構成を比較するものではないという意味で不完全である。廃棄物の構成は、半減期が非常に長いだけでなく、他の多くの核分裂生成物やアクチノイドよりも移行しやすい放射性元素（ $^{129}\text{I}$ 、 $^{36}\text{Cl}$ 、 $^{79}\text{Se}$ ）を含み、もっと複雑である。

さらに、目的の 1 つとして自然災害や人間の活動から保護された深部への廃棄物の定置を示し、さらなる正当化がなされている。これら基本に疑念を差し挟むことなく、放射性元素が生活圈や地表に移行しにくい環境で求められている隔離という基本原則を思い出すことは有用であろう。提供されている図は、専門家ではない読者にとってはやや理解しにくい可能性がある。

### D1.2. 日本における地層処分事業の経緯

過去の経緯を簡単に振り返ることで、高レベル放射性廃棄物と TRU 廃棄物の地層処分に関し、特に福島第一原子力発電所事故後に見直され、日本で検討されている選択肢が適切に説明されている。また、地層処分の研究において日本チームがこれまで蓄積してきた経験も示されている。

### D1.3. 地層処分のための見直された戦略

日本では、どちらかと言えば制約的な地質条件であることを踏まえたうえで、高レベル放射性廃棄物や TRU 廃棄物の地層処分の重要性が確認されている。再構築されたアプローチは、その進歩性と柔軟性を特徴とする。これは特に可逆性のメカニズムが確立されたことに反映されている。

地層処分プロジェクトの実施にはさまざまな当局が関与することが政府によって示されている。プロジェクト継続の鍵として、協議と対話の重要性が認識されている。

地層処分プロジェクトは複雑なため、数多くの組織が関与している。十分理解するには、それぞれの役割と責任を提示する必要がある（表 1.4-2 など）。

#### D1.4. NUMO セーフティケースの概要

『NUMO 地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケース』の目的は明確に提示されている。その目的は、サイトの特性評価に使われる技術の説明、処分場設計オプションと安全性を確保するために考え得る工学的な対策の提示、想定される手段によりこれが達成可能であることの提示、そして最後に追加すべき R&D ニーズの特定である。



## D2. 安全確保の基本的考え方

第 2 章では、安全確保に関する考え方と、安全を示すための戦略について説明している。IRT は、プロジェクトの各段階を通して、ただしそれだけでなく、さまざまな選択肢を検討する際にも、反復的なアプローチが必要であるという見解を共有する。だが、この段階では反復性に関する点が特定されていない。NUMO が追加の指標を特定し、予見できる反復ポイントを指定できるようにすると有用であろう。

### D2.1. 廃棄物のインベントリ

処分場に処分する HLW および TRU 廃棄物の量は、最終処分法に基づき国が定めた最終処分計画の指針に基づいている。インベントリは重要な入力データである。この段階では、現行データに基づいて一般的な安全評価を実施できるが、もっと的を絞った評価が必要になった場合には速やかに更新する必要がある。したがって、廃棄物の種類とそれぞれの量に関する詳細な知識を持つことが重要となる。また、明らかに、廃棄体受入基準（WAC）をできるだけ早く定義する必要もある。NUMO は既に、一般的な受入基準を開発するための重要なベースを出発点として持っている（NEA, 2012b）。このような定義は、段階的に進め、安全評価の反復にリンク付ける必要がある。地層処分場で処分されるあらゆる種類の放射性廃棄物と HLW および TRU 廃棄物について、この分野で継続的な取り組みが考慮されるべきであろう。

また、アップストリームの段階である、特に非常に放射能が高い廃棄物の製造と貯蔵について十分に理解する必要があるだろう。実際、マネジメント戦略、したがって処分の基本概念は、ガラス固化体の冷却期間に影響を受ける可能性がある。以前から示されている 30～50 年の冷却期間という指標以外に、NUMO が候補サイトの特性に基づいて独自の分析を開発することも有用であろう。

MOX 燃料の再処理の問題は、将来の政治的決定事項であるため、本セーフティケース報告書では扱われていない。しかし、その処分の可能性や条件の予備分析を行うことは、来るべき政治的決定に有用となる可能性がある。

## D2.2. 必要な安全機能

地層処分の長期的な安全性を確保するための基本的な概念は、隔離と閉じ込めという2つの重要な機能によって表現されている。「閉じ込め」には、閉じ込めと遅延の概念が含まれ、その点は本セーフティケース報告書に明示されている。しかし、混乱するリスクを避けるために、また、物理現象とその過程を明確に区別し、それらを個別に分析できるようにするために、閉じ込めと遅延を明確に区別する用語を採用することが推奨される。

「完全な閉じ込め」という用語にも注意が必要である。この種の機能は、フィンランドやスウェーデンなど特定の状況下では要件に対応しているかもしれないが、他の場合ではその関連性について根拠を示す必要がある。

操業中について特定されている主な機能は、閉じ込めと放射線遮蔽である。また、臨界リスクと放射線分解によって発生するガスに関するリスクを明確に分析することも提案する。

50年という操業期間が想定に基づくことはやむを得ないが、この期間を、特に現在利用可能な他のプロジェクトの経験に基づいてより詳細に説明することが可能なはずである。

閉鎖後の主な安全機能は、隔離と閉じ込めとして定義されているが、「閉じ込め」の用語については、先に、留保を表明した。「完全な閉じ込め」の期間には、特定された物理的プロセスとその詳細な分析に基づいた根拠とともに、閉鎖後のすべての遷移段階を含めなくてはならない。

## D2.3. 法規制の要件

地層処分の法的枠組みは安全要件によって補完でき、NUMO は明確な基盤の上でプロジェクトを開発することができる。最終処分法では、サイト選定に対する段階的なアプローチが記述され、各段階の要件が明確に特定されている。提示された要求事項のほとんどは定性的なものだが、NUMO は、このレビューの対象となっていない別の報告書で、サイト選定上の考慮事項の使用に関する独自のビジョンを開発している。将来の課題の1つは、サイトの特性と処分場の設計に対するそれぞれの要件を適切に照合し、それによって構築されるシステムに対して安全評価を行うことである。

可逆性と回収可能性のアプローチは、対応するNEAの出版物に基づき、技術面、安全面、そして何よりも意思決定プロセスや社会的制約を統合したものとなっている。この観点から、廃棄物インベントリを徐々に現実的なものとする必要があるだろう。NUMO チームがさらに前進し、規制当局にとって十分とはいえない方法で NUMO がサイト調査を実施するリスクを軽減するため、規制当局の期待事項が知らされ、できるかぎり早く安全規制が策定される必

要がある。新しい環境影響評価のニーズも、チームが適切に対応できるよう、できるだけ早く特定される必要がある。

#### D2.4. 地質環境とサイト選定戦略

安全機能の特定と分類、ならびに特定された安全機能に基づき設定される各構成要素の性能要件と性能を期待する期間についての完全性を確保するため、要件管理システムをさらに開発し、ダッシュボードとして使用する必要がある。

前述したように、適切な場合には定量的な形式で、サイトの選定基準を明示する必要がある。最初の基準の1つは、文献調査段階における情報の利用可能性と品質であろう。

閉鎖後の安全性を確保するための、閉じ込め機能に対する性能の改善に向けた反復的アプローチは、IRTによってグッドプラクティスとして認められている。段階的な地質環境の特性評価、処分場設計、および安全評価は高く評価できる。これにより、定期的な評価とレビューのループを活用することができ、プロジェクトがすべての要件と海外の経験に合致したものであることを確認できるであろう。

考慮される天然資源は、特に水と熱に関して明らかにする必要がある。

#### D2.5. 基本的な概念と設計

設計戦略も定期的な評価に基づいて段階的に開発されるべきである。ただし、すべての境界条件は変わる可能性があることにも注意しなくてはならない。したがって、要件管理と構成管理は、数十年にわたって継続する地層処分の研究にとって不可欠である。

日本国内の研究所や海外での活動から得ることで培われた日本チームの経験が、日本の地層処分プロジェクトに活用すべき知識の資本となっている。しかし、こうした経験はいくつかの組織に分散しているため、体系化され、連携された知識の伝達アプローチを確立することがNUMOにとって有益であろう。

可逆性と回収可能性という点についてはよく考慮されている。ただし、この工程をモニタリングの実施において考慮する必要がある。モニタリングの規模についても、おそらく処分場の寿命よりもはるかに短い期間として現実的に設定する必要がある。

#### D2.6. 安全評価戦略

セーフティケース戦略は、関連する規制基準とステークホルダーの要件に照らし、選定されたサイトとそこでの処分場設計に関する情報、ならびに利用可能な科学的および技術的知識に

基づいて、操業時および閉鎖後の安全性を評価することで構成される。NUMOの地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケースでは、近い将来、実際のサイトでそのようなセーフティケースを開発する能力を示すためのジェネリックなケースが考慮されている。

### **D2.6.1. 操業時の安全**

操業時の安全については、原子力施設に通常適用される規則、鉱業、さらには他のタイプのプロジェクトに適用される特定の規則も補足的に参照し、それらに従って検討されている。すべての側面で許容可能なアプローチを提案するためには、時に矛盾する規則を調整する必要がある。特に、将来、遠隔制御または可能な場合は自動化されたシステムを施設で使用する場合は、サイバーセキュリティを含むセキュリティ対策も考慮しなくてはならない。

### **D2.6.2. 閉鎖後の安全**

安全評価戦略は、シナリオの開発、モデルの設定とその根拠の説明、分析と評価の実行に関して、IAEAやNEAが発行したのもも含めた国際的なガイダンスに従っている。シナリオは、FEPカタログに基づいて定義および評価されている。

計算された線量の数値は、処分場に期待される性能指標として使用できるが、特に将来の生活圏と人間の生活様式に関する不確実性により、慎重に使用しなくてはならない。安全評価期間の決定においては、国の規制がないため、この段階では他国の規制を参考に行っている。閉鎖後の安全評価に使用される主要指標として、人間に対する放射線量が使われている。人間以外の生物に対する線量や非放射性有害物質の影響は含まれていない。今後の開発においては、食物連鎖との関連で人間以外の生物に対する線量や化学的危険性がある非放射性有害物質を考慮することが推奨される。

また、例えば、サイト選定を慎重に行うことで隆起や侵食の影響は無視できるとするといった一部の主張に対しては、根拠を示すか、適切に文書化することが推奨される。こうしたタイプの主張については、その基準が報告されていないため、評価することが困難となっている。

## **D2.7. プロジェクトの完備性とその全体的な実現可能性に関するコメント**

### **D2.7.1. マネジメントシステムに関するコメント**

提案されているマネジメントシステムは、特に調査とサイト特性評価のアプローチ、工学的対策と安全評価との間で適切な連携を確保するためのものである。マネジメントシステムはまた、サイト特性や、科学・技術の発達、規制や社会的な要求の変化にプロジェクトを適応させる手段として、柔軟性を維持することも意図されている。柔軟なアプローチには、廃棄物インベント

りの変化も考慮する必要がある。段階の進展に応じてプロジェクト開発の反復的な性質を導入することで、アプローチ間の相互作用をさらに改善することができる。

この地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケースに基づき、国内外の様々な科学者が今後行う研究開発活動を NUMO が示す方法も、少なくとも他のマネジメントシステム同様に開発する価値がある。それがマネジメントシステムの一部となれば理想的だろう。これは本セーフティケース報告書で述べられている野心的な目標の一つであるため、一層重要である。マネジメントシステムには、研究開発の優先順位の明確化、実施する研究開発の関連性の保証、安全評価の次の反復に対する結果の統合、そして当然ながらその管理方法を含めることができる。

### **D2.7.2. 不確実性への対処**

処分場システムの複雑さ（熱・水理・力学・化学・放射線学[THMCR]のさまざまなプロセスとそのカップリング、複数の空間スケール、特徴的な時間スケール）を考えると、不確実性管理における追跡性と十分性を確保するための体系的な方法で不確実性を特定する必要がある。NUMOは、不確実性のタイプごとに管理と対処の概念を提示しているが、不確実性を特定する方法の記述については拡充する価値がある。その重要性を考慮すると、上位レベルの不確実性への対処法のみを取り扱う章を別途作成することも有用かもしれない。第3、4、5および6章では、サイト選定、処分場設計、操業時および閉鎖後の安全評価について、それぞれ不確実性の管理方法を説明するサブセクションを含めることが有用と思われる。

「許容可能な」保守性がどの程度なのかを、より詳細に議論することは有用かもしれない。例えば、モデルに過剰な保守性を含めるべきではないだろう。わかりやすい例として、サイト選定における過剰な保守性は評価のバイアスにつながる可能性がある。読者、特に結果をどう理解し解釈するかについて説明を受ける可能性がある一般読者に、保守性をどのように説明するかという点も重要である。

このアプローチを明確にするため、同じ方法で処理される場合でも、変動性を原因とするものと不確実性を原因とするものを別々に識別することも推奨される。

### **D2.7.3. 品質マネジメント**

IRTは、ISO 9001に基づく品質マネジメントシステムは適切であると認識している。このシステムはプロセスの品質を保証するものである。生産と情報の品質を確保するには、提示に値する適切な指標の定義を必要とする。（例えば、地質情報管理支援システムの情報の完全性を確保するにはどうすればよいか、など。）

#### **D2.7.4. 要件マネジメント**

要件管理システム（RMS）は、その複雑性と長期性を考慮すると、地層処分プロジェクトにとって重要な部分の1つを構成する。IRTは、特に要件変化のフォローアップだけでなく、それらの対処方法について、達成された作業と未解決の問題に着目する。これを構成管理と組み合わせ、RMS、設計、および安全機能間のリンクを指定することが望ましいと思われる。要件の組み合わせと、矛盾する要求または不一致があった場合の処理も、ここで対処できるはずである。最後に、十分性の程度の問題を明確にする必要がある。

#### **D2.7.5. 知識マネジメント**

知識マネジメントの面では、日本チームは既に相当量の作業を行っている。IRTは、単一の知識ベース内にさまざまなコンポーネントを統合し、あらゆるプロジェクト・パートナーに開放するという考えに賛同する。

#### **D2.7.6. データとモデルのマネジメント**

データとモデルのマネジメントは、マネジメントシステムの中で明示的にリストに挙げられていない。ここでもやはり地層処分プロジェクトの規模と期間を考えれば、この点で特別な取り扱いが必要であろう。

#### **D2.7.7. 科学・技術開発（RD&D）のマネジメント**

IRTは、NUMOが利用可能な最良の技術に基づいて研究を行うことをコミットしていることを認識している。しかし、地層処分プロジェクトの進化状況と成熟度を評価するために、多くの大規模プロジェクトで採用されている技術成熟度レベル（TRL）スケールのスキームの採択も検討することが、NUMOにとって賢明なことのように思われる。

#### **D2.7.8. 人的資源に関するマネジメント**

地層処分のような長期のプロジェクトにおける人的資源に関するマネジメントは、地層処分の特定ニーズに応じた人材の確保を目的としている。世代間の知識と経験の継承は十分に考慮されており、時間の経過とともに継続的に注意すべき点であろう。

#### **D2.7.9. ステークホルダーとのコミュニケーション**

様々なステークホルダーや住民が原子力問題、この場合は放射性廃棄物の処分問題に敏感であることは、情報、コミュニケーション、対話の提案と提示が重要であることを意味する。NEA後援で出版された多くの出版物に示されているように、社会的アプローチもまたセーフティケースの一部であり、Global 2015会議でもNUMOチームが取り上げている。IRTは、NUMO

がこの問題をできるだけ早く検討し、セーフティケースの次の段階で必要な開発を専門的に行うことを推奨する。

### D3. 地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化

NUMO が開発した地質環境モデル（SDM）に基づくアプローチは適切と考えられる。モデルは、フィールドデータではなく、完全に統合された包括的なデータを使用することで設計と安全評価を可能とする。モデルは、サイトの選定や現地調査の進捗に伴って改良されるであろう。地質環境モデルに基づくセーフティケースにおいて開発されたジェネリックなセーフティケースは、日本で遭遇する可能性のあるさまざまな種類の地質構造を代表する 3 つの典型的なモデルに基づいている。第 3 章は、これらのモデルの根拠を詳細に説明するものである。このアプローチは現段階で妥当である。

新第三紀・先新第三紀火山岩と変成岩については、3 つの代表的な地質環境モデルがこれらの岩種の特性をカバーすると考えられるため、この段階では特定の地質環境モデルを詳しく説明しない方針が取られている。ただし、フィールドデータが入手可能になった際には、これら代表的な地層の特性を火山岩や火成岩の地層と区別することが推奨される。

第 3 章を通じて、主に「自然現象による擾乱」、すなわち内的および外的な地球力学と、隔離という安全機能に関連する天然資源の存在に基づいて、サイト選定が行われることが想定されている。母岩の形状、透水性、強度、熱伝導率など、閉じ込めにある程度関連するパラメータは、よく特徴付けられ、地質環境モデルに含まれている。ただし、透水構造の分布と水理特性を除き、候補サイトの除外や、サイトの比較、または候補領域における処分場の設置場所の最適化に関しては、これら閉じ込めに関連するパラメータは考慮されていない。閉じ込めに関連するパラメータに関しては、地層処分の主な機能を代表する定量的または定性的な基準がサイト選定にあたって適したものとなる可能性がある。競合サイトが複数ある場合、これらのタイプの基準は、それぞれの性能に基づいてサイトをさらに比較するのにも適したものとなりうる。

#### D3.1. 地質環境が処分場の安全確保に果たす役割

放射性廃棄物処分場の地質環境の主な機能は、放射能が人間にとってのリスクとなり得る間、それを隔離して閉じ込めることである。その派生的機能として、地質環境は安定していなければならない、人工バリアとパッケージを確実に保護しなければならない。隆起や侵食など、外部起源の現象による不可避的な影響の抑制を検討することは合理的ではなく、これらの現象は、利用可能な知識に基づいて把握できなければならない。一方、これらの現象に関連する影響を制限しようとするのは合理的である。



気候変動の影響も言及されており、特にこれは、水理地質構造および地下水の地球化学の状況に関連して、将来の安全評価において具体的に開発していく価値がある。地層処分のための地質環境の適合性基準は依然として、特に、より定量的な基準で開発される必要がある。課題の 1 つは、適切な設計と建設時の対策によって特定の弱点を補うことで、適切なサイトとすることができるかどうかを評価することである。これは、サイト自体ではなく、サイトと処分される廃棄体パッケージ、およびすべての人工システム（人工バリアと全体的な構造物）を含む「処分システム」の一部として考慮することを意味する。

地質媒体の物理的特性の中では、地質パラメータの観点からだけでなく、処分システムの枠組みの中で考慮すべきものもいくつかある。すべてが連成プロセスの結果であるため、こうした考え方が不可欠である。例えば、熱の問題は、地質環境、パッケージの力学強度（TRU 廃棄物を含む）、換気または埋め戻し材に関連する地球化学的な影響にも関係する可能性がある。

### D3.2. 地層処分に適した地質環境の選定プロセス

地層処分に適した地質環境を特定するための漸進的なアプローチとして、まず自然現象によって大きな影響を受ける地域を除外し、次に閉じ込めに最も適した特性を持つ地域を特定する。文献のレビューから得られる情報は、概要調査において確認することができる場合と、そうでない場合がありうる。それによっては、他の適切なサイトをあらためて探すことに焦点が当てられることになる。

関連するすべてのプロセスとカップリングが考慮される。後続段階では、微生物活動の役割もさらに詳しく調査されるかもしれない。

処分場構成要素の設計と処分深度の決定は、安全機能、主に隔離と閉じ込めに関する安全機能に適合するように行われる。特に HLW にとって重要なパラメータは、保管中の冷却期間である。処分時の最大許容温度も環境条件に依存し、サイトの特性に応じて最適な温度条件を求めなくてはならないだろう。貯蔵年数を 30 年または 50 年とする仮定は、この段階ではただ演算を行った値の範囲を示していると考えべきである。

HLW に関しては、境界条件として以下 2 点を強調するとよいだろう。第一に、ガラスマトリクスの溶解度が非常に低いことであり、これは安全機能と考えられるが、何よりもシステムの物理データであるという点である。そして第二に、この文書の後半に示されているように、オーバーパックの放射線による腐食を考慮に入れる必要がある。

ベントナイトは、他のほとんどの地層処分プロジェクトですでに選択されていることを主たる理由として、緩衝材の標準的なオプションとして選択されている。しかし、日本の場合、特に地

質環境や処分場の全体的な設計を考慮した具体的な分析が必要であろう。セメントとベントナイトの相互作用など、ベントナイトの機能を変える可能性もあるため、材料間の相互作用についてもさらに探究する必要がある。

地質環境モデルに基づくセーフティケースに記載されている全体的な処分場の構造は、まだ一般的なものである。深成岩類の場合、処分坑道の向きは動水勾配に基づいている。立坑、斜坑、処分パネルなど、設置される他の構成要素も同様に検討されなければならない。さらに、立坑か斜坑かという選択肢も、特に表層の帯水層との関連で分析する必要がある。

廃棄物のサイトへの輸送と地下への搬送には、例えば、処分場の場所、沿岸地域に近いこと、また、さらには一体型人工バリアモジュール（PEM）による地下に運搬する量などに関して、依然として検討が必要である。

この段階では、廃棄物が定置された後、坑道を埋め戻し、プラグを構築する計画である。しかし、可逆性の要件を考慮すると、安全性能を変えることなく、これらの作業を時間の経過とともにどのように調整するかを評価するためのさらなる検討が必要である。異なる処分場の構成要素に関して、地層処分プロジェクトを将来開発していく中で、それぞれの安全指標（可能であれば定量的なもの）の使用が必要となるかもしれない。構成要素と安全機能の関係は時間の経過とともに変化する可能性があるため、段階的なアプローチも必要となろう。例えば、腐食生成物とベントナイトの相互作用では、人工バリアの機能の一部が影響を受ける可能性がある。主な安全機能として定義されている「隔離」と「閉じ込め」に焦点が当てられているが、擾乱を与える自然現象の重大な影響からの保護も同様に重要である。

NUMO がすでに計画しているように、放射線防護区域と掘削区域を適切に分離し、廃棄物の定置と掘削の並行作業を可能とするため、地下施設の区画配置が検討されるであろう。

掘削環境における主なリスクの 1 つは火災であり、火災探知と消火設備の設置が想定されている。特に防火仕切りシステムや防火扉など、防火努力によって火災リスクを軽減することができるが、防火を配慮した輸送技術や材料の選択などもすでに想定されている。

新第三紀堆積岩類は、非常に低い強度、比較的高い熱伝導率、および高い透水性といった特徴を有する。これらは処分場の大きさに深くかわるパラメータであり、サイト毎に大きく異なる場合がある。したがって、おそらく他の岩種タイプよりも、こうした変化に対する設計は、実際の場合に合わせて適応させる必要があるだろう。

### D3.3. 検討対象母岩のモデル化

代表的な母岩の地質環境モデル構築においては、いくつかの特性をまとめたうえで、可能な限り代表的なケースを提供するように選択されている。概念モデルが提案されているが、それら

の構築に関する方法論をもっと詳細に記述することで根拠をよりよく示すことができるだろう。特に、フィールドデータをどのように使って概念モデルに到達するのかを説明する必要があるだろう。

新第三紀・先新第三紀火山岩と変成岩に関しては、特定の地質環境モデルが詳しく説明されているわけではないが、これら岩種の特徴をカバーする代表的な 3 種類の地質環境モデルが検討され、セーフティケースのための設計と安全評価に使用されている。具体的なサイトについては、文献調査と特性評価に基づいてそれぞれの地質環境モデルが構築される。サイト固有の地質環境モデルに応じ、特に最適化のために避けられない反復的な検討においては、設計と安全評価のアプローチを適切に連携させる必要があるだろう。透水性は、さまざまな地質構造にとって重要なパラメータであり、閉鎖後の閉じ込め機能の点で大きな判別要因となる可能性がある。したがって、すべてにほぼ同じ値を使うのではなく、最も可能性の高い代表値を使用することが推奨される。この問題は、特に花崗岩のような割れ目系岩盤の場合は、スケール効果を考慮する必要があるかもしれない。

## D4. 処分場の設計と工学技術

### D4.1. 処分場の設計の考え方

設計の出発点は、H12 報告書（JNC, 2000a）と TRU-2 報告書（JAEA, 2007）である。これらの報告書で提示された概念は、地質構造やサイトの特性に適合したものとされ、地下施設による調査プロジェクトも含め、地層処分プログラムの進行に応じて徐々に洗練されるものである。海外プログラムの経験では、開発チームやステークホルダーは最初の研究に慣れていないため、概念を進化させることが困難な可能性があることが示されている。しかし、本レビュー報告書全体を通して、代替案もオープンにしておくことを支持する多くのコメントがあり、この段階では的確な指摘といえる。

「設計因子」を定義・使用する方法は、さらなる開発に値しよう。また、特に設計上の決定の優先順位付けや方向性の観点から、その使用状況を評価できることも興味深い。設計因子の中で、回収可能性は安全マージンを減らす要因になる可能性がある。これは実際には要求事項であり、したがって可逆性と安全性のそれぞれの要求事項を調和させることができるソリューションを見つけることを意味する。他のタイプのトレードオフもまた、特に経済面で、設計プロセスの一部となっている。

設計因子は要求事項に関連しており、要件の導出過程を提示することで、アプローチの質をさらに高められる可能性がある。それには要求事項に関する文書、要求事項のツリー、および高位の要求事項と派生的な要求事項間のリンクを含めることも考えられる。最後に、各要求事項は、処分システムのさまざまな構成要素にもっと細かく関連させることができる。

### D4.2. 処分場の設計手順と境界条件

処分場の構成要素の設計と処分深度の決定は、安全機能、主に隔離と閉じ込めに関する安全機能に適合するように行われる。

特に HLW にとって重要なパラメータは、保管中の冷却期間である。処分時の最大許容温度も環境条件に依存し、サイトの特性に応じて最適な温度条件を求めなくてはならないだろう。貯蔵年数を 30 年または 50 年とする仮定は、この段階ではただ演算を行った値の範囲を示していると考えべきである。

HLW に関しては、境界条件として以下 2 点を強調するとよいだろう。第一に、ガラスマトリックスの溶解度が非常に低いことであり、これは安全機能と考えられるが、何よりもシステムの

物理データであるという点である。そして第二に、この文書の後半に示されているように、オーバーバックの放射線による腐食を考慮に入れる必要がある。

ベントナイトは、他のほとんどの地層処分プロジェクトですでに選択されていることを主たる理由として、緩衝材の標準的なオプションとして選択されている。しかし、日本の場合、特に地質環境や処分場の全体的な設計を考慮した具体的な分析が必要であろう。セメントとベントナイトの相互作用など、ベントナイトの機能を変える可能性もあるため、材料間の相互作用についてもさらに探究する必要がある。

地質環境モデルに基づくセーフティケースに記載されている全体的な処分場の構造は、まだ一般的なものである。深成岩類の場合、処分坑道の向きは動水勾配に基づいている。立坑、斜坑、処分パネルなど、設置される他の構成要素も同様に検討されなければならない。さらに、立坑か斜坑かという選択肢も、特に表層の帯水層との関連で分析する必要がある。廃棄物のサイトへの輸送と地下への搬送には、例えば、処分場の場所、沿岸地域に近いこと、さらには一体型人工バリアモジュール（PEM）による地下に運搬する量などに関して、依然として検討が必要である。この段階では、廃棄物が定置された後、坑道を埋め戻し、プラグを構築する計画である。しかし、可逆性の要件を考慮すると、安全性能を変えることなくこれらの作業を時間の経過とともにどのように調整するかを評価するためのさらなる検討が必要である。異なる処分場の構成要素に関して、地層処分プロジェクトを将来開発していく中で、それぞれの安全指標（可能であれば定量的なもの）の使用が必要となるかもしれない。構成要素と安全機能の関係は時間の経過とともに変化する可能性があるため、段階的なアプローチも必要となろう。例えば、腐食生成物とベントナイトの相互作用では、人工バリアの機能の一部が影響を受ける可能性がある。主な安全機能として定義されている「隔離」と「閉じ込め」に焦点が当てられているが、擾乱を与える自然現象の重大な影響からの保護も同様に重要である。NUMO がすでに計画しているように、放射線防護区域と掘削区域を適切に分離し、廃棄物の定置と掘削の並行作業を可能とするため、地下施設の区画配置が検討されるであろう。

掘削環境における主なリスクの 1 つは火災であり、火災探知と消火設備の設置が想定されている。特に防火仕切りシステムや防火扉など、防火努力によって火災リスクを軽減することができるが、防火を配慮した輸送技術や材料の選択などもすでに想定されている。

新第三紀堆積岩類は、非常に低い強度、比較的高い熱伝導率、および高い透水性といった特徴を有する。これらは処分場の大きさに深くかわるパラメータであり、サイト毎に大きく異なる場合がある。したがって、おそらく他の岩種タイプよりも、こうした変化に対する設計は、実際の場合に合わせて適応させる必要があるだろう。

### D4.3. 地下施設設置深度の設定

地下施設設置深度は、特定の制約条件や機能に対応した説明が必要なアプローチの結果として設定される。したがって、深度の設定は、地層の地質学的性質だけでなく、何よりも検討対象サイトによって異なる。IRT は、この点に関し、候補地が明らかになった時点で、他のすべての基準（建設の実現性、コスト、熱的観点、人間侵入のリスク）と関連づけ、具体的な分析を行うという展望を有していることを共有したい。

### D4.4. 人工バリアの設計

EBS の構成要素は具体的な開発・評価の対象となるが、そのふるまいやそれに影響する可能性のある現象は、それぞれの機能及びシステム全体の機能の維持という観点から、より広く分析されている。

いくつかの問題、特に、構成要素間、したがって材料間の境界面に関する問題はまた今後の検討で対応する必要がある。HLW のオーバーパックは、熱的・水理学的状態の変遷期間における放射性核種の閉じ込めを確保するため十分な厚さの炭素鋼でできている。この材料は、地層処分の体系的アプローチの枠組みの中で参照仕様とみなされている。想定される厚さにより、処分場の操業時における力学強度を確保することも可能である。オーバーパックの要件に関しては、ベントナイトの機能が変わらないようにする能力を考慮することも有用であろう。

ほとんどの相互作用は地下水を介して起こるため、後者の特性は不可欠である。したがって、考慮した組成を説明するため、地下水化学の把握と律している規則に関するモデルを提示するとよいだろう。

材料を最終選択する前に、ガルバニック腐食に関連する腐食形態や、応力作用下の腐食形態、さらには微生物由来のものも忘れることなく、さまざまな腐食形態を評価する必要がある。

上述のように、緩衝材としてのベントナイトの選択は、短期的にも長期的にも、求められる機能を最も満たすことができる材料の特定を意図したアプローチの結果でなくてはならない。そのような材料の選択は、維持される地質構造の特性に応じて、閉じ込めの性能だけでなく、熱的な状態変化と再冠水が生ずる期間にその機能を維持する能力も考慮して再考されることになる。

PEM のアイデアは興味深い。PEM はまだ一般的な検討段階にあり、基本的な特性とその実現の両面で多くの研究が必要である。熱的な状態変化および再冠水が生ずる期間におけるその挙動を説明しなくてはならない。機能上設けた離隔、あるいは残存する隙間には、適切に対応する必要がある。緩衝材の長期的な安定性、特に安全機能の長期的安定性

が鍵となる。オーバーパック周辺の緩衝材における応力の破壊接近度の分布を調査したことはよい例であり、実施した方法を提示することは価値がある。

TRU 廃棄物処分の基本概念には、容器内におけるパッケージをグループ化してモルタルで充填することが含まれるが、これについては化学的作用に関する詳細な説明が必要である。緩衝材と埋め戻し材の品質に関する課題は依然として残されているが、どう対応するかは明らかに、検討対象となるサイトの特性に左右されることになる。TRU 廃棄物の処分坑道の断面は、定置される廃棄物パッケージの容積と比較して非常に大きい。特に堆積岩に関しては、最適化の可能性は依然として広く存在している。

#### D4.5. 地下施設の設計

IRT は、設計アプローチが優れていることを認める。処分場の設計フローは明確であり、設計の部分的な反復的性質を示せば完全なものにできる。熱の影響は考慮されている。例えば、TRU 廃棄物処分坑道には水理・力学（HM）、HLW 処分坑道には熱・水理・力学（THM）の連成など、その組み合わせも考慮する必要がある。

埋め戻し材とプラグの設計はまだ初期段階にある。時間の経過に伴うそれぞれの機能を明らかにすることが依然として必要であるため、材料、形状、場所の選択には、サイトの環境に合わせた検討が必要となる。さまざまな種類の坑道に関する方向と勾配は詳細に検討すべき対象であり、水理学的理由から、また EDZ（掘削損傷領域）を介した放射性核種の長期的な移行を避けるため、これもサイトの条件に適合させる必要がある。意図する機能が変わってしまうことを回避する目的で、プラグの配置と埋め戻しに関する、それぞれの条件についても考慮されている。地層やサイト条件への適応は、処分場の全体的な構造に対して、より一般的に当てはまる。母岩となる地層の特性を維持するためにも、地下水の流況と流線に応じた最適化は特に考慮すべき点である。また、これは TRU 廃棄物処分に必要なフットプリントにとっても不可欠であり、これは地質構造の性質によって大きく異なる。

PEM は、その利点に照らして興味深い選択肢である。具体的な研究対象として支持に値する。

処分場の操業に影響する可能性のある現象の徹底的なレビューを行うことも考えられる。放射線分解や、これに由来するガスの発生、さらには還元環境での腐食といった現象を、設計で考慮に入れることが可能なはずである。それらを考慮できない場合は、説明が必要である。これらの現象の評価は、回収可能性の問題において特に重要である。この点は考慮されているが、可逆性の側面は二次的な扱いとなっている。設計における上述した現象に対するその他の対応は、処分場の実施、建設、操業、閉鎖、および関連するモニタリングにおける段階的アプローチ（NEA, 2012a）同様、意思決定の可逆性に寄与する可能性がある。

## D5. 作業時の安全性の評価

作業時の安全評価に使用されるアプローチは、この一般的な段階を適切に反映している。この段階で NUMO は設計の頑健性の評価に焦点を当てている。作業員への放射線の影響は、施設の名目上の設計に対して検討されているため、平常状態では具体的な取り扱い対象ではない。

### D5.1. 作業時の安全性の評価戦略

シナリオ作成手順が示されている。しかし、特に事故発生時など、異常状態シナリオの検討については、特に将来策定される規制を見越して、まだ明確にされるべき点が残っている。一方で、今後の規制の策定に向け、NUMO 側の期待に基づいた分析も検討できるであろう。

保守主義は対処が難しいのが常であり、どの程度保守的なのかを評価できるような説明があることがふさわしい。そのためには、考慮対象となる異常状態の数を減らすためのアプローチを設定したうえで、特定された異常状態の網羅的なリストを作成することが有用であろう。

### D5.2. 評価の前提条件

考慮されている唯一のリスクは、廃棄体に関するものである。特に、放射性核種の漏えいを回避できるとされるオーバーパックの頑健性に注目している。ただし、この頑健性に基づいた信頼性があるとしても、その後の作業条件を最適化することで落下リスクを低減することができるであろう。

設計上、放射性核種の漏えいは想定されていないが、特に偶発的な状況をさらに分析するためにも、何が放射線の影響の最大要因になりうるかを特定することは、有用であろう。

### D5.3. 平常状態シナリオの評価

プロジェクトの非常に一般的なこの段階では、作業条件の分析は予備的なものである。詳細分析は、施設とその作業条件の詳細が明らかになるのを待たねばならない。ただし、たとえ放射性核種の漏えいがなくても、施設の境界フェンスにおける放射線被ばくを評価するための原理とツールの詳細を提示する必要がある。

遮蔽の保守性に関する仮定、ひいては考慮する安全マージンにおける保守性の仮定を明確にすべきである。方法論と評価ツールの提示により、とりわけ、境界フェンスでの線量の許容限度に対する適合性に関する理解を深めることになる。



#### D5.4. 異常状態シナリオの評価

上述の通り、頑健な設計によって放射性核種の漏えいがないと想定されているとしても、放射線への被ばくの可能性を排除するものではない。対応する分析アプローチは、公衆への影響可能性についての分析結果とともに、さらに開発を進めることができる。

イベントまたは故障のリスト（例えば換気システム、遮蔽に関するものなど）は、共通故障モードを考慮しつつ、今後の開発において補完することができる。

地下での主要リスクの1つは火災であり、Gr.3のTRU廃棄物の火災が最もクリティカルなケースである。このリスクは、専用の処分坑道と具体的な作業条件によっておそらく軽減できるであろう。廃棄物の定置作業を掘削と分離することで、爆発リスクは制限されている。しかし、この点に関しては、地層から発生する可能性のあるガス（ $\text{CH}_4$ ）や廃棄物から発生する可能性のあるガス（ $\text{H}_2$ ）に関連するリスクを分析することで補完できる。

この段階では、火災シナリオは地下作業でのみ考慮されている。車両に関するシナリオは、将来に向けて大きく注目していく価値がある。また、上述のように、可燃性の機器や材料の使用を避けるなど、大きな効果を持つ予防的な対策に結び付けることもできると考えられる。地表での火災経験を活かすことによって、すでに十分コントロールされた技術的枠組みの中で解決策と研究を想定することが可能になるであろう。

#### D5.5. まとめと今後の取り組み

この章は、作業時の安全性のみ取り扱っているため、すべての潜在的な被ばく経路について、平常状態と異常状態双方における放射線影響に関する定量的な結果を提示する必要がある。

## D6. 閉鎖後長期の安全評価

数値モデルは複数のスケールレベルを考慮しており、サイト固有のシステムをシミュレートするのに十分に習得され、成熟しているように見受けられる。この一般的な段階では、NUMO はプログラムの現在の段階に適した、簡略化された数値モデルに依存している。これらの簡略化されたモデルは、さまざまな研究分野の高度なツールによって支えられている。検討されたすべてのシナリオ（計算ケース）を要約し、追加説明とデータを記載したサブセクションを参照する要約表があれば有益だろう。安全評価の計算に加えて、地質環境モデルに基づく本セーフティケース報告書の導入部分で示されているように、処分場の安全性を示すための国際的な推奨事項では、ナチュラアナログやその他サイトや処分場の設計に関する定性的知識も含め、追加の証拠と論証（多面的な議論など）の役割を強調している。本セーフティケース報告書では、そうした側面は第 7 章で説明されているが、セーフティケースを将来反復する際は、別のセクションを設けてもっと詳細に、かつより際立つように説明することができるだろう。

最後に、特に閉鎖後の安全の品質保証、および使用されたデータとモデルの適格性について、第 2 章に説明されている管理手順を適用することを、ここ（閉鎖後長期の安全評価）において再掲することも有効と考えられる。

### D6.1. 安全評価の基本的枠組み

NUMO の安全評価は明確である。分析は、異なる空間スケールごとに適切に分割して行われている。この分析は、より体系的に時間を分割することでさらに改善できるだろう。

このレベルでの処分場の説明は依然として簡略的なものである。しかしながら、先に提起した Gr.3 廃棄物の問題に加えて、特に廃棄体パッケージ容器 A と B の区別に対応して、TRU 廃棄物の処配置がどのように行われるのかについて言及されるべきと考える。

HLW について考慮する放射性核種の選択は、体系的なアプローチの結果とすべきである。特に、廃棄物の放射性および化学的特性の分析結果に基づき、すでに製造されている廃棄物パッケージを代表するものとすべきである。厳格な方法論を提示することで、易動性の放射性核種である  $^{14}\text{C}$ 、 $^{36}\text{Cl}$ 、 $^{129}\text{I}$  の検討を正当化することも可能になるだろう。長半減期核種と短半減期核種をどのように区別したのかについてもさらに論拠を示すべきである。HLW に対する典型的なインベントリは、質量または体積の標準単位で表し、ガラス固化体について計算するのが最善と思われる。

同様に、検討上の標準とする TRU 廃棄物インベントリに対して選択する放射性核種は、すべてのカテゴリとサブカテゴリについて、既存の TRU 廃棄物特性を代表するものでなくてはならない。ここでも、考慮する放射性核種を選択するためのアプローチと方法論について説明する必要がある。

モデルにおける様々な空間スケールの取り扱いには相互に関連性がある。異なるスケールモデルを入れ子構造とすることで、処分場に近い（および処分場内における）、より小規模の核種移行の特徴を考慮しつつ、広域における核種移行のシミュレーションが可能となる。それぞれの岩種について、ニアフィールドスケール、パネルスケール、処分場スケール、広域スケールの想定条件を提示する必要がある。ニアフィールドスケールに関して援用されている Partridge 解析コードについては、ニアフィールドモデルの結果の信頼性を裏付けるための検証と確認（verification and validation）に関する情報も含め、簡単な説明があればよいだろう。

シナリオに関して、異なる岩種におけるそれぞれの要約があれば読者にとって有用であろう。また、岩種ごとに不確実性と変動性に何が関連するかを区別し、取り扱いの違いを明らかにすることも有用と思われる。線量拘束値は、さまざまなシナリオクラスに対して表示されている。将来のセーフティケースでは、近年開発された補完的な安全評価基準（例えば、NEA, 2012:セーフティケースの指標）を使用できるであろう。線量の目標値が提案されているが、これらの値は、日本の法律でそのような基準が確立されるまで、いかなる規制要件にもリンクされていない。ここでは、これらの目標値は、研究開発ニーズを特定するためのみならず、安全マージンや設計最適化オプションを特定するために定義された目安であることを念頭に置く必要がある。

## D6.2. 安全評価の方法論

NUMO は、システムの変遷を支配する一連の FEP（特徴、事象、プロセス）を特定している（NUMO FEP リスト）。シナリオは、NEA と IAEA が支援する 2 つの手法を組み合わせで開発されている。トップダウン・アプローチでは、シナリオと解析ケース（特に基本シナリオと基本ケース）は、処分場の安全概念に記述される安全機能から作成される。ボトムアップ・アプローチでは、シナリオ（特に変動シナリオ）は、影響を与える特徴、事象とプロセス（FEP）をスクリーニングして作成される。NUMO は、これら 2 つの方法を適切に組み合わせ、対象とするシナリオを導き出している。ボトムアップ・アプローチでは、長期的な安全性の観点から FEP をスクリーニングしている。分析は、NEA 国際 FEP リスト（NEA, 2019；NEA, 2020）を出発点としている。このリストは、日本のプログラム固有の要因に基づいて調整されており、境界条件と廃棄物ならびにシステムの特性に照らして、一部 FEP の追加・削除を行った上

で、FEP が選択されている。包括的な「システムとしてのふるまいに関する記述」に基づいてシナリオが作成され、根拠が示されている。

統合 FEP の役割は、FEP をブロック毎にグループ分けして体系的に影響分析を行うことである。これらは「水化学」など、本質的に一般的なものであるため、影響分析ではそのように使用されていないように思われる。影響分析における統合 FEP と個別 FEP の役割を明確にする必要がある。1 つの統合 FEP にグループ化された FEP リストの例を挙げることで、このアプローチを説明するのに役立つであろう。

最後に、各 FEP は、評価で適切に取り扱われるよう、それぞれ詳細に説明し、文書化する必要があるだろう。

不確実性は通常、国際慣行にならって、概念、モデル、パラメトリックという 3 つに大きく分類される。不確実性に関する議論は、例えば地質環境モデルに基づくセーフティケースでこれらの不確実性のタイプがどのように取り扱われているかをより詳細に議論するなど、もっと明確に区別することができる。例えば、システムの初期状態における不確実性（サイトと技術的不確実性の両方を含む）が線量計算値に与える影響の説明/議論を 1 つの特定グループの不確実性、外部要因（例えば気候変動）に起因する不確実性は別のグループの不確実性としてみなすことができるだろう。

### D6.3. シナリオの作成と解析ケースの設定

ストーリーボードは、主に処分施設が閉鎖された後のシステムのふるまいを説明するために使用されている。これは、連続した期間における処分場の変遷を示す適切な方法である。処分場の寿命を時間的に区別することに加え、前述のように、さらに空間の区別によって補完することもできる。これは、典型的な時定数が処分場の場所やスケールによって異なるためである。また、処分場のふるまいを示すために、各期間中に同時に起こるプロセスを記述することもできる。ストーリーボードは、地質環境や廃棄物の種類によっても異なる。さまざまな状況を説明し、ケース毎に各時間枠において典型的な値を使用したストーリーボードのフルセットを作成することは有用であろう。提供されている例は、通常のふるまいを想定したものである。特に、考えられる微生物活動とその影響も含め、すべての THMC と放射線学的プロセスをさらに分析するため、これを出発点として他のシナリオを作成することも可能である。

ストーリーボードの潜在的な利点の 1 つは、また、時間または空間の各セグメントで発生する可能性のある主要なプロセスを特定するとともに、これによって処分場全体に対するものほど複雑でないモデル化が可能となることである。したがって、状況に応じて特性または安全機能をより区別できるだろう。実施された様々なモデルとそれらの組み合わせについてチャートを作成することで、検討された物理的現象の解析に関する情報を補完することができるだろう。さら

に、使われた手法の理解を深めるため、数理モデルとその限界（想定条件、簡略化）とともに、概念的プロセス・モデルに対し、それらの確証に関する簡潔な要約が必要である。

このようなストーリーボードは、不確実性の影響を分析するための良い基盤にもなるであろう。IRT は、日本の地層処分プロジェクトの次の段階に向けてストーリーボードから既に適切に進められている作業をさらに発展させていくことを強く推奨する。これらは、検討すべき基本的なプロセスと想定条件のすべてを理解するためにストーリーボードが役立つことを明確にすることによって、ステークホルダーや公衆とコミュニケーションをとるための良い方法にもなり得る。

各期間別の詳細説明は高く評価される。これは、地質環境モデルに基づくセーフティケースの報告書の内容に限定せず、はるかに長い期間にわたって開発を続ける価値がある。しかし、一部の情報は定量化、または少なくとも桁レベルの推定（腐食速度や H<sub>2</sub> の生成率など）が必要である。その他考えられる改善余地としては、閉鎖後の分析のために操業段階をより詳細に考慮する方法の説明や、HLW オーバーパックの推定寿命の正当化、気候変動とその結果として生じる水理地質学的あるいは地球化学的状態への影響についての考慮が挙げられる。そのような課題はサイトが特定されないと意味がないことは確かだが、それらを適切な枠組みで考慮できるよう、境界条件を提案することは可能だろう。

地質環境モデルに基づくセーフティケース報告書で使用されている NUMO の FEP リストは有益であり、NEA の最新の出版物に基づいて、次回更新される可能性がある。NUMO は、安全機能、状態変数、要因分析図、影響分析を用いた、構造化されたアプローチを適用してシナリオを作成しており、IRT はこれらのツールのさらなる開発を奨励する。将来的には、シナリオの頑健性を評価するための what-if アプローチの開発が計画されている。また、セーフティケースの本編に、ケースや想定条件に関する評価や決定がどのように記録され、文書化されているかを示すことも、日本語では付属書にまとめられているが、有用である。

また、安全評価で考慮される時間枠についても再検討に値する。さらに、人工バリアの機能の長期的な安定性の評価のためには、化学・物理双方の面で考えられる変化を考慮する必要がある。

#### D6.4. 核種移行解析と線量評価

放射性核種の溶出と移行に関しては、セメントとベントナイト間の相互作用、あるいはアスファルトや硝酸塩の存在に関連する相互作用など、考慮すべき相互作用を特定する必要がある。処分場の設計に関連して、核種移行は処分場全体の平均移行率でモデル化するか、個別の処分パネルを考慮することでモデル化することができる。データとモデルの処理は、地質構造の種類、それらの割れ目のレベル、および選択的流動経路の特性に部分的に依存し、このため、モデル化アプローチは異なるものとなる。この安全性評価の予備段階では、NUMO

は処分場のふるまいを広い意味で理解し記述することに焦点を当てており、そのため、確率論的アプローチよりも、決定論的アプローチに重点が置かれている。この点は 将来の研究で検討されるものと思われる。

また、HLW 処分場と TRU 廃棄物処分場との間の相互作用がないとしている点についても明確にすることが必要である。言い換えれば、気候変動の事象も含めて、長期的にそれを検証できるかどうか、ということである。

システムの複雑さを考慮して放射性核種移行と線量評価の分析を提示するためには、取り扱う各ケースに関して基本的な想定条件を要約すると有益であろう。これらの現象には地下水の地球化学的特性が大きな役割を果たしているため、考えられる配位子を検討することも必要となる。モデル化の基礎となる仮説も、特に非平衡過程に関して説明が必要となる可能性がある。

放射性核種の移行は、地圏を介した移行の結果と整合的でなくてはならない。生活圏における移行評価のためのモデルやデータ、想定条件は、IAEA BIOMASS プロジェクトとは整合的ではあるが、追加情報も有用であろう。

さまざまなケースについて提示された最大線量は、許容限度として用いたためやす値を下回っているが、大きく下回っているわけではない。これは、高い保守主義と、異なる岩種の間で基本的な想定条件に大きな区別を行っていないことを反映していると思われる。しかし、将来的には、これら想定条件の一部を修正し、より現実的な想定条件に置き換えて悲観主義の程度を低下させる必要があることも示唆される。基本シナリオに対するさまざまなケースの結果をよりよく理解するためには、セーフティケースの本編に、最大線量だけでなく、時間の関数として線量を提示することが有用であろう。

## D6.5. 偶発的な人間侵入シナリオに対する評価

偶発的な人間侵入の評価では、多数の計算を回避するために、考えるべきシナリオを包絡したシナリオ群を特定する必要がある。いずれの場合も、想定条件と関連する定量化について根拠を示すべきである。

## D6.6. まとめと今後の取り組み

今回のセーフティケースの経験に基づき、将来の開発ニーズを、重要性に関する認知により、また、日本の地層処分の全体的なアジェンダに沿って、ランク付けすることができる。影響に対する感度が最も高い現象とプロセスがランキングにおける最初の手がかりとなるが、他の基準

も定義することが可能である。いずれにせよ、開発プログラムは主要なマイルストーンを達成するように構築される。

NUMO によって特定された開発ニーズに加えて、IRT は微生物プロセスの理解を深める必要性を強調する。微生物プロセスがオーバーパック（特に腐食）、緩衝材と埋め戻し材の性能、および地圏での放射性核種移行に与える影響を評価する必要がある。また、地下深部にイオン強度の高い地下水が予想される場合には、溶解度、収着、放射性核種移行など安全性に関わる様々な側面に及ぼす影響を定量化する手法の開発が重要となるだろう。

最後に、NUMO の報告書では、地圏と生活圏の間に移行が速いゾーンがモデル化されているが、IRT では、第一にサイトの選定によってそのような領域を避けることが先決であり、次に設計の検討を行うべきであると考えられる。

## D7. セーフティケースへの統合

### D7.1. セーフティケースにおける議論の統合

第 7 章は、地質環境モデルに基づくセーフティケースの独立した部分とすることが理想的である。したがって、地表/地下レイアウトと人工バリアの設計を示す図表を追加することが有用であろう。独立レポートという観点から、人工バリアがどのようにして十分な安全マージンを提供し、さまざまな地層の要件を満たすのかを説明する必要があるだろう。

NUMO は、一般的な労働安全、セキュリティ対策、セキュリティ管理の実践は、類似産業の同等の取組みを土台とすることを計画しており、いくつか例を挙げることで、この計画への信頼が高まるだろう。現在の平常状態における作業時の安全評価は、外部被ばくによる公衆の被ばく線量の評価に限定されている。今後は、評価対象を、施設周辺に想定される公衆の内部被ばくの可能性や、平常作業時における地下施設での放射線の影響、作業員の被ばく線量に関する、より包括的かつ厳密な評価まで拡大する必要があるだろう。閉鎖後の安全性に関しては、サイト近傍で被ばくする個人への放射線量は、線量目標値（基本シナリオでは  $10\mu\text{Sv/y}$ 、変動シナリオでは  $300\mu\text{Sv/y}$ ）を大幅に下回ると計算されている。このセクションには、結論を裏付けるために、主要なデータと前提条件、および変動シナリオの概要をまとめた表も含めて説明するべきである。

異なる岩種タイプ、2 種類の地下水タイプ、異なる処分場深度を想定したさまざまなケースの線量計算結果はほとんど変わらない。これは、プロジェクトが要件を満たすように設計されているためであると理解できる。しかし、一般にはさまざまなケースで異なる結果が予想されるというのが通例である。

NUMO は、線量の代替指標として、生活圏への放射性核種の移行を河川への流入として様式化し、希釈によって濃度が非常にわずかなレベルまで低下することを示している。IRT は、NUMO に対し、こうしたケースをさらに開発するよう推奨する。例えば、放射性核種が生活圏の特定の区画に蓄積する可能性などである。

長期的な安全評価の重要なポイントの 1 つは、ガラス固化体の安定性である。多くの条件下でその安定性は十分に実証されているが、ステンレス鋼や他のコンポーネントの存在下など、他の条件下での変更も考えられる。複数のタイプの材料間の相互作用を解析せねばならず、それらを回避するための設計措置が必要になる場合もあるだろう。ナチュラルアナログを使って特定の結果を支持する場合、アナログの制約条件や限界は明記しておくべきである。



組織的な側面では、多数のケース、要件や知識の変化、それに伴う設計や安全評価の変化を考慮すると、厳密な構成管理を行う必要があるだろう。今後の発展に向けて、この管理を確実にすることが、NUMO の課題の 1 つである。

### D7.2. セーフティケースが目的に適合していることの保証（信頼性構築）

地層処分の研究には多岐にわたるモデルが必要である。すでに述べたように、適用されたモデルをマッピングすることは、モデル間の関連性を示すのに役立つ。もちろん、それぞれのモデルに対して、詳細な説明、検証と確認（verification and validation）の実施状況があれば有益である。

セーフティケースの将来のバージョンでは、操業時の安全評価のため、作業員の被ばく線量を考慮する必要がある。長期的な安全性のために、将来の法的要件にもよるが、化学物質の影響も評価するとよいだろう。

NUMO では、シナリオ開発における安全機能を評価するツールとして、状態変数と要因分析図の概念を導入しており、IRT では前述の通り、これらのツールのさらなる開発を奨励する。

地層処分プロジェクトの進展に伴い、構成管理システムに加えて、別のマネジメントシステムの更新または改善が必要になると考えられる。

### D7.3. セーフティケースに関する今後の展望

NUMO は安全評価に必要なすべての要素を収集し、テストしている。だがそれでも、自然環境が関与するこの問題は本質的に複雑であり、NUMO が対処しなければならない多くの課題が提起されている。とりわけ、NUMO は、全体的に適切な特性を持つものの、相対的に異なる利点を持つサイト候補を取捨選択し、判別化することに備える必要がある。

## 参考文献

- 日本政府 (2015), 閣議決定：「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」（日本語）
- 日本政府(1957), 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年 6 月 10 日法律第 166 号）改正法（原子炉等規制法）
- AESJ (2019), “Report of the Special Review Committee on the NUMO safety case”, Special Review Committee on the NUMO Safety Case, [www.numo.or.jp/en/what/pdf/The\\_review\\_of\\_the\\_NUMO\\_safety\\_case.pdf](http://www.numo.or.jp/en/what/pdf/The_review_of_the_NUMO_safety_case.pdf), AESJ, Tokyo.
- IAEA (2022), <https://kos.iaea.org/iaea-safety-glossary.html>, IAEA, Vienna.
- IAEA (2013), “The Safety Case and Safety Assessment for Predisposal Management of Radioactive Waste”, Safety Standards Series No. GSG-3, IAEA, Vienna.
- IAEA (2003), The IAEA Biomass programme: reference biospheres for solid radioactive waste disposal, IAEA, Vienna.
- IAEA (2012), The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Guide N° SSG-23, IAEA, Vienna.
- ICRP (2013), Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publication 122.
- JAEA and FEPC (2007), Second progress report on research and development for TRU waste disposal in Japan, JAEA-Review 2007-010, FEPC TRU-TR2-2007-01, Tokyo.
- JNC (2000a), H12: Project to establish the scientific and technical basis for HLW disposal in Japan; Project overview report, JNC, Tokyo.
- JNC (2000b), H12: Project to establish the scientific and technical basis for HLW disposal in Japan, Supporting report 2: Repository design and engineering technology, JNC, Tokyo.
- METI (2017), Nationwide Map [www.enecho.meti.go.jp/en/category/electricity\\_and\\_gas/nuclear/rwm/pdf/map\\_en.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/en/category/electricity_and_gas/nuclear/rwm/pdf/map_en.pdf), METI, Tokyo.
- METI (2000) (2015), 「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」, [www.meti.go.jp](http://www.meti.go.jp), METI, Tokyo.
- NEA (2020), *Management and Disposal of High-Level Radioactive Waste: Global Progress and Solutions*, NEA No. 7532, OECD Publishing, Paris.
- NEA (2019), “International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, Version 3.0”, NEA/RWM/R(2019)1, OECD Publishing, Paris.
- NEA (2016), *Japan’s Siting Process for the Geological Disposal of High-level Radioactive Waste: An International Peer Review*, NEA No. 7331, OECD Publishing, Paris.
- NEA (2012a), *Reversibility and Retrievability in Planning for Geological Disposal of Radioactive Waste, Proceedings of the “R&R” International Conference and Dialogue*, 14-17 December 2010, Reims, France, NEA No. 6993, OECD Publishing, Paris.
- NEA (2012b), “Indicators in the Safety Case: A report of the Integration Group on the Safety Case (IGSC)”, NEA/RWM/R(2019)7, OECD Publishing, Paris.
- NEA (2005), *International Peer Reviews for Radioactive Waste Management General Information and Guidelines*, NEA No. 6082, OECD Publishing, Paris.

NEA (2000), *Features, Events and Processes (FEPs) for the Geological Disposal of Radioactive Waste*, OECD Publishing, Paris.

NUMO 付属書 2-5 (2021), 付属書 2-5 廃棄体の受入基準設定にかかわる情報（日本語）, Tokyo.

NUMO (2020), 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（日本語）, Tokyo.

NUMO (2021), Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO) Pre-siting SDM-based Safety Case Report, NUMO-TR-21-01, Tokyo.

US DOE (n.d.), [www.wipp.energy.gov/](http://www.wipp.energy.gov/), US DOE, last accessed on 8 December 2022.