

地層処分事業の技術開発計画

(2023 年度～2027 年度)

– 中期技術開発計画 –

2024 年 2 月

原子力発電環境整備機構

2024年2月 初版発行

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記へ
お問い合わせください。

〒108-0014 東京都港区芝4丁目1番地23号 三田NNビル2階
原子力発電環境整備機構 技術部
電話 03-6371-4004（技術部） FAX 03-6371-4102

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Science and Technology Department
Nuclear Waste Management Organization of Japan
Mita NN Bldg. 1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan

©原子力発電環境整備機構

(Nuclear Waste Management Organization of Japan) 2024

地層処分事業の技術開発計画 (2023 年度～2027 年度)

－ 中期技術開発計画 －

2024 年 2 月

原子力発電環境整備機構

目 次

1. はじめに	1
2. 技術開発の基本的な考え方と進め方.....	5
2.1. 計画の策定に関する基本的考え方.....	5
2.2. 事業の進展に応じた技術開発の進め方.....	6
3. 技術開発項目と内容.....	10
3.1. 地質環境の調査と評価に関する技術.....	10
3.1.1. 自然現象の影響.....	10
(1) 長期的な自然現象の発生可能性及び地質環境への影響に関する評価技術の整備	10
3.1.2. 地質環境の特性.....	11
(1) 地質環境特性の長期変遷に関するモデル化技術の高度化.....	11
(2) 地質環境に応じた個別調査技術の最適化.....	12
(3) サイト調査のための技術基盤の強化.....	13
3.2. 処分場の設計と工学技術.....	14
3.2.1. 設計体系の整備.....	15
(1) 設計の信頼性向上.....	15
(2) 設計の最適化.....	17
3.2.2. 工学技術の実証的研究.....	20
(1) 人工バリアの定置及び坑道レイアウトに関わる調査・設計・工学的対策技術の 体系化.....	20
(2) 人工バリアの製作・施工技術の高度化.....	21
(3) 処分場の建設・操業技術の高度化.....	23
(4) 処分場閉鎖技術の開発.....	24
(5) TRU 廃棄体回収技術の開発.....	24
3.2.3. 閉鎖前の安全性の評価技術	25
(1) 閉鎖前の安全性に対する評価シナリオの構築.....	25
(2) 閉鎖前の安全性に関する評価技術の高度化.....	26
(3) 事故対応技術の開発及び具体化.....	27
3.3. 閉鎖後長期の安全性の評価技術.....	27
3.3.1. シナリオ構築.....	28
(1) 地層処分システムの状態設定に資する現象解析モデルの高度化.....	28
(2) リスク論的考え方に則したシナリオの構築手法の高度化.....	30
3.3.2. 核種移行解析モデル開発	31
(1) 地層処分システムの状態変遷等を反映した核種移行解析モデルの高度化.....	31
(2) 施設設計等を反映した核種移行解析モデルの高度化.....	32
3.3.3. 核種移行解析に用いるパラメータ等に関するデータの整備	33
(1) 核種移行等に関するデータの取得及びデータベース整備.....	33
3.4. 中長期的に研究開発を進めるうえでのツール・基盤の整備.....	34

3.4.1. 知識マネジメントに関するツールの整備	35
(1) セーフティケースの論証構造の可視化.....	35
(2) セーフティケースコミュニケーションに関するツールの整備	36
(3) 廃棄物に関する包括的なインベントリ等の情報ベースの整備	37
(4) 地層処分場のデジタルツイン技術の開発.....	37
3.4.2. モニタリングシステムを支える基盤の整備	38
3.5. 技術情報の発信	40
4. おわりに	41
参考文献.....	42

1. はじめに

我が国では 1976 年以来、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、JAEA という。）を中心に関係研究機関において地層処分の研究開発が進められ、その成果を技術的基盤として 2000 年に特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律が成立した。この法律によって設立され地層処分事業を開始した原子力発電環境整備機構（以下、NUMO という。）は、国や関係研究機関等との適切な役割分担のもとに地層処分技術の信頼性の向上を目的とした技術開発を進めてきた。2013 年以降 NUMO は、5 年間を対象とした中期的な技術開発計画として「地層処分事業の技術開発計画」（中期技術開発計画）を策定し技術開発に取り組むとともに、2021 年、それまでに蓄積されてきた科学的知見や技術を統合し、サイトを特定しないセーフティケース¹として包括的技術報告書²（以下、NUMO-SC という。）を作成し公表した。

地層処分に関する我が国全体の研究開発については、地層処分の技術的信頼性を恒常的に高めるといった目的に対し、地層処分の実施主体である NUMO と、国及び関係研究機関等が、重要な課題を明らかにするとともに、相互に連携・協力を図りながらそれぞれの役割に応じた取組みを進めている。このような取組みを踏まえ、地層処分研究開発調整会議³（以下、調整会議という。）において、「地層処分研究開発に関する全体計画」を策定・改訂してきている（その経緯は、2023 年 3 月に改訂された同計画（令和 5 年度～令和 9 年度）⁴（以下、全体計画という。）の第 1 章 1.1 節参照）。NUMO は、各機関における研究開発の現状や成果、NUMO-SC の作成と国際レビュー、処分事業の進展、安全規制に関する議論の動向、外部有識者のご意見等を考慮するとともに、NUMO の評議員会の評価・提言や技術アドバイザー委員会等の助言等を踏まえ、国や関係機関と協力して「地層処分研究開発に関する全体計画」の取りまとめに主体的に取り組んでいる。

2022 年 6 月から、調整会議において外部有識者も交えた議論、意見交換等が行われた後、2023 年度～2027 年度を対象とする計画が取りまとめられ、2023 年 3 月 24 日に経済産業省のホームページに公表された。全体計画の主要な特徴は以下のとおり。

- ・ 事業の段階に応じて作成するセーフティケース（図 1）を軸とした研究開発戦略に沿って、従来の枠組みを継承した研究開発分野（「地質環境の調査と評価に関する技術」、「処分場の設計と工学技術」、「閉鎖後長期の安全性の評価技術」、「中長期的に研究開発を進めるうえでのツール・基盤の整備」、「代替処分オプションに関する研究開発」）を設定
- ・ 各研究開発分野の課題について、セーフティケースの信頼性向上という観点から優先順位を明確にして計画に反映
- ・ 研究開発を進めるうえで、必要な技術マネジメント（要件・知識・品質・人的資源のマネジメント）の一層の強化のための基盤整備

¹ セーフティケース：国際原子力機関（以下、IAEA という。）では「ある施設または活動の安全を裏付ける論拠及び証拠を収集したもの」、経済協力開発機構／原子力機関（以下、OECD/NEA という。）では「ある特定の（放射性廃棄物）処分場の開発段階において、処分場の長期の安全を裏付ける論拠を収集したもの」と定義され、事業主体が自主的に作成、更新する。

² 包括的技術報告書：最新の科学的知見やこれまでの技術開発成果に基づき、サイトを特定せず、我が国における安全な地層処分の実現性について包括的に検討し、セーフティケースとして NUMO が取りまとめた報告書。https://www.numo.or.jp/technology/technical_report/tr180203.html

³ 資源エネルギー庁 https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/chiso_shobun/index.html

⁴ 資源エネルギー庁 https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/chiso_shobun/20230324_report.html

- 個々の研究開発の取組みを、地層処分システム、さらにはセーフティケースとして統合することをさらに推進するための研究分野間及び関係機関間の連携の強化

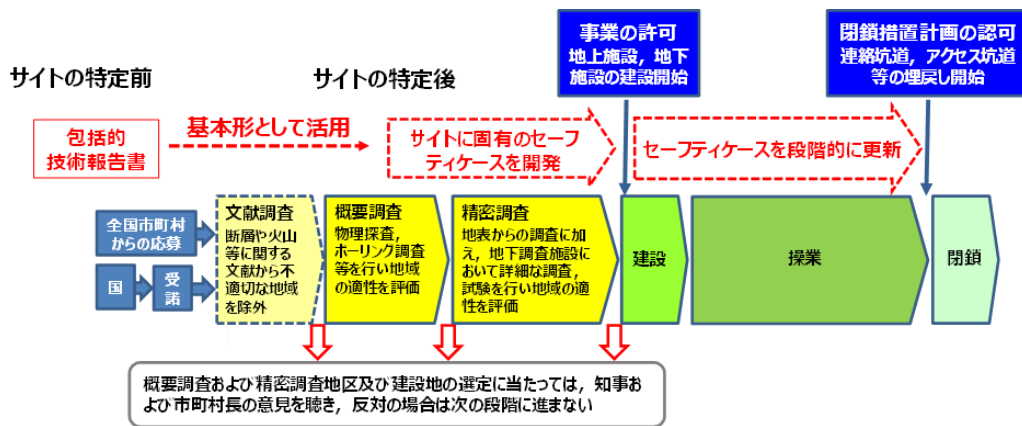


図 1. 事業の段階に応じたセーフティケース作成の概念 (NUMO-SC 本編 図 7.4-1)

NUMO は、国及び関係研究機関との役割分担を示した「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」（平成 27 年 5 月 22 日 閣議決定）に従い、長期にわたる地層処分事業の安全な実施、経済性及び効率性の向上等の観点から技術開発に取り組んでいる。上記の「地層処分研究開発に関する全体計画」に基づき、同期間に対応した NUMO の「地層処分事業の技術開発計画（2023 年度～2027 年度）」（以下、本計画という。）を策定した。

本計画の策定にあたっては、研究開発の現状（全体計画第 1 章 1.2 節）、地層処分事業を取り巻く近年の情勢変化（全体計画第 1 章 1.3 節）を踏まえるとともに、研究開発に関する基本的な考え方と進め方（全体計画第 2 章）を基本とし、全体計画公表後における国の審議会の議論等を考慮して、地層処分の事業主体として優先的に進めるべき課題への取組みを明示している。

本計画第 1 章（本章）では、本計画の策定経緯と策定にあたって考慮した技術開発を取り巻く環境の変化について概観している。第 2 章では、これを受けた NUMO の技術開発の基本的な考え方と進め方について、第 3 章では、この考え方と進め方に沿って、「地質環境の調査と評価に関する技術」、「処分場の設計と工学技術」、及び「閉鎖後長期の安全性の評価技術」という主要な分野における研究開発項目とその内容を示すとともに研究開発を進めるうえで必要となるマネジメント等を支援するためのツールの開発を含む、中長期的に整備すべき研究開発基盤に関する事項を NUMO の役割分担に焦点を当てて取りまとめた。

本計画の策定においては、全体計画において考慮された 2018 年度からの地層処分事業をめぐる情勢の主な変化とともに、同全体計画の公表後の技術開発に関わりのある様々な動向を視野に入れている。これらは以下に示すとおりである。

- 2020 年 11 月に北海道の 2 地点で公募開始後初めて文献調査を受け入れていただき、調査が進められている。引き続きできるだけ多くの自治体に文献調査を受け入れていただくよう全国レベルでの対話が継続されている。

- ・ 第6次エネルギー基本計画⁵（令和3年10月22日閣議決定）において「国、NUMO、JAEA等の関係機関が、全体を俯瞰して、総合的、計画的かつ効率的に技術開発を着実に進める」とされた（2021年10月）。
- ・ 原子力規制委員会において「特定放射性廃棄物の最終処分における概要調査地区等の選定時に安全確保上少なくとも考慮されるべき事項」⁶（以下、考慮事項という。）が決定された（2022年8月）。
- ・ 日本原子力学会のレビュー（2018年12月～2019年12月、レビュー報告書を2019年12月に公表）を経て修正を行い公表されたNUMO-SC（2021年2月）について、OECD/NEAの国際レビューチームより国際レビュー報告書⁷が公表され、「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したセーフティケースを開発するための能力と成熟度を有している」、「日本の地質環境を考慮して地層処分の実現可能性を示す要素が実証されている」といった評価が示されるとともに、今後セーフティケースを段階的に発展させていくことに向けての推奨事項などが示された（2023年1月）。NUMOはOECD/NEAのレビューで示された提言について、これをどのように活かしていくかについて取りまとめ⁸、NUMOホームページ上に公表した（2023年6月）。
- ・ 政府主催のGX実行会議で取りまとめられた「GX実現に向けた基本方針」⁹が閣議決定（2023年2月10日）され、核燃料サイクルを推進するとともに、最終処分の実現に向け、国を挙げての支援体制の構築やNUMOの体制強化などを進める方針が示された（2023年2月）。また、最終処分関係閣僚会議において、最終処分の実現に向けて政府を挙げて取組みを強化する方針案が確認され、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」¹⁰の改訂案が閣議決定された（2023年4月）。
- ・ 幌延深地層研究センター地下研究施設を活用した国際共同プロジェクトの協定が発効¹¹し、NUMOも参加を表明した（2023年4月）。
- ・ 原子力委員会において「原子力利用に関する基本的考え方」¹²が改定され（2023年2月20日）、地層処分については、国が前面に立って国民理解の醸成のための取組や安全性・信頼性の向上に向けた研究開発等を推進すること等が示された。
- ・ 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術ワーキンググループ¹³（以下、技術WGという。）において、NUMOが作成した「文献調査段階の評価の考え方（案）」が議論され、国によって、「文献調査段階の評価の考え方」が意見公募の後、公表された（2023年11月）¹⁴。

⁵ 資源エネルギー庁 <https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005.html>

⁶ 原子力規制委員会 <https://www.nra.go.jp/data/000402076.pdf>

⁷ OECD/NEA https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_77138/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

⁸ NUMO https://www.numo.or.jp/technology/technical_report/pdf/20230606_houkatsu_neareviewhoukoku.pdf

⁹ GX実行会議 <https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002.html>

¹⁰ 資源エネルギー庁 <https://www.meti.go.jp/press/2023/04/20230428007/20230428007.html>

¹¹ JAEA <https://www.jaea.go.jp/02/press2022/p23021703/>

¹² 今後の原子力政策について政府としての長期的な方向性を示唆する羅針盤となるものとして、2017年7月に決定されたもの。5年を目途に適宜見直し改定することとされている。

¹³ 資源エネルギー庁 https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/chiso_shobun/index.html

¹⁴ 資源エネルギー庁 https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/radioactive_waste/pdf/20231102.pdf

- ・ NUMO の評議員会から「2022 事業年度業務実施結果に対する評価・提言」¹⁵が示され、中期的な技術開発に対する提言等が示された。

上述したように、全体計画の公表後も、「文献調査段階における評価の考え方」の中で概要調査に進んだ場合に留意すべき点についても示されていること等、今後の調査段階への準備として、NUMO の技術開発において考慮すべき事項が明らかになっている。

こうした動きについても反映し、国の全体計画に沿って、今後の調査段階で必要となる技術を計画的かつ着実に開発し、特定のサイトでの調査や段階的に更新していくセーフティケースに反映できるよう、本計画を策定している。

¹⁵ NUMO https://www.numo.or.jp/about_numo/soshiki/archives.html

2. 技術開発の基本的な考え方と進め方

2.1. 計画の策定に関する基本的考え方

調整会議による全体計画の策定にあたっては、第1章で述べたように、我が国の地層処分事業において重要な役割を果たすセーフティケースを視軸とし、外部レビューの結果も含めた NUMO-SC の作成過程で明らかになった最新の科学技術的知見に基づいて明らかにされた課題を考慮して、取り組むべき研究開発を反映している。セーフティケースを視軸とする技術開発の考え方は、全体計画（平成30年度～令和4年度、令和2年改訂）から導入され、国、関係研究機関及び NUMO が連携して進める我が国全体の研究開発の目的や目標、相互関係を明確にするという観点で有益であった。

NUMO は、全体計画第2章「2. 研究開発の基本的考え方と進め方」に基づき、第3章で述べる具体的な技術開発項目に網羅的かつ効率的に取り組むために、技術マネジメントの一層の強化と分野間・機関間連携の推進に留意して技術開発に取り組む。

地層処分の実施機関である NUMO の今後の技術開発については、国の全体計画で示されている従来からの目的である継続的な技術的信頼性の向上を含め、事業の現状と今後の進展に適切に対応するため、以下を念頭に置いておく必要がある。

① 文献調査の着実な実施

寿都町及び神恵内村における文献調査の完了を目指すとともに、3地点目以降の文献調査に対し、これまでの文献調査での知見・経験を最大限に活用し対応する。併せて、本計画に沿った NUMO の技術開発や、全体計画に基づく国及び関係研究機関による研究開発の成果を適宜反映していく。

② 概要調査の準備

概要調査の準備においては、一般論として地質環境の調査・評価、処分場の設計、安全評価、自然環境調査の内容について引き続き具体化を進め、調査計画の策定、必要な資機材調達、人材の確保を進める。こうした準備に基づき、概要調査に移行した場合には対象地域の諸条件に応じて必要な技術開発を進める。

③ 継続的な信頼性向上を目的とする技術開発

精密調査以降も含めたより長期の時間スケールも視野に入れ、地質環境の調査・評価、処分場の設計、安全評価について、日本の地質環境等に適した最新の技術を適用できるよう、国際機関・海外実施主体や国内外の関係研究機関との連携・協力を中心に、国の全体計画と NUMO の本計画に沿って現時点から継続的に取り組むべき実施内容を明確にする。

- ・ NUMO-SC のレビューなどで抽出された長期的な課題への対応
- ・ 概要調査で活用する調査技術や設計・評価技術を、精密調査以降に適用する技術として拡充していくための検討

以上のような取組みを円滑に行うため、NUMO においては調査業務と技術開発業務を密接な連携のもとに実施するための仕組みを確保することが重要である。サイト選定を中心とする現段階の事業を円滑に進める観点から、技術開発においては、上記①及び②に関連し、早期に補完が必要な技術的課題に最優先で対応することが重要である。

また、今後北海道の2町村に加え、他の地点での文献調査や将来の現地調査を視野に入れ

た準備として、最新の科学技術的知識に基づいて継続的に調査・評価技術の整備や高度化を進める必要がある。このためには、NUMOが実施する技術開発や、国及び関係研究機関で取り組まれているサイトを特定しないジェネリックな研究成果を、NUMOが特定のサイトの課題に反映していくことが必要であり、関係研究機関との連携をより強化し、叡智を結集しながら地層処分事業を進めることが重要である。

2.2. 事業の進展に応じた技術開発の進め方

前節に述べた基本的な考え方に従い、全体計画で示された研究開発項目の中で、NUMOは、現地における地質環境の調査技術の最適化、地質環境に適合した設計体系の整備、サイトや設計の特徴を反映した閉鎖前及び閉鎖後の安全性評価技術の高度化を進める。併せて、調査業務と技術開発業務の連携をさらに推進することを目的とした統合的マネジメントのための基盤強化として、デジタルツイン等の活用、DX（Digital Transformation）の推進、並びに知識マネジメント等に関わる技術開発等に取り組む。

NUMOと国及び関係研究機関との連携に関しては、全体計画の策定にあたって検討されたNUMOと国及び関係研究機関との役割分担を明確にし、それぞれの成果が全体として地層処分事業の推進に貢献するようにすることが重要である。図2は、全体計画の研究開発項目を、NUMOが主体的に実施する項目、NUMOと国及び関係研究機関の双方が実施する項目、国及び関係研究機関が実施する項目に分類して示したものである。このうち、NUMOが実施する項目について第3章で具体的に述べる。

第1章で述べたように、NUMOがこれらの項目に取り組むにあたっては、全体計画と同様、OECD/NEAの国際レビューやNUMOの評議員会からの提言、技術アドバイザリー委員会による助言等を反映する。これらの提言に示された重要な視点とこれらに対応した技術開発の進め方については以下のように要約することができる。

<段階的管理を適用した着実な推進>

- ・ 全体計画の進め方では、適切な計画期間（5年程度）を設定して段階的に技術開発を進めることや、技術開発計画で設定した目標に向け着実に成果が得られているかどうかを中間的に確認すること等が示されている。NUMOの技術開発においても、このような段階的管理を適用し着実な推進を図る。これに関連して、
 - 概要調査に進んだ際には、サイトスペシフィックなセーフティケースを開発することが必要である。NUMOの技術開発や全体計画に沿った国及び関係研究機関による研究開発の成果を統合していくにあたっては、こうした成果を一般論として適宜取り込み、ジェネリックなNUMO-SCの内容を継続的に更新する。これをテンプレートとし、概要調査の進展に伴って取得されるデータ・情報を勘案しつつサイトスペシフィックなセーフティケースを検討するというアプローチをとる（図1参照）；
 - OECD/NEAの国際レビューでは具体的にTRL¹⁶（技術成熟度：Technology Readiness Level）スケールの導入が提言されている。最新の科学技術的知識や地層処分に関するこれまでの技術開発成果を統合し、地質環境の調査・評価、処分場設計、安全評価を事業の進展

¹⁶ TRL（Technology Readiness Level）：技術成熟度。特定の技術の成熟度の評価を行い、異なったタイプの技術の成熟度の比較をすることができるシステムティックな定量尺度。

に応じて段階的に進めていくにあたり、各技術の成熟度を TRL スケールを用いて客観的に評価することは、技術検討業務の効率化とセーフティケースの説明性向上に寄与する可能性があると考えられる。将来のコミュニケーションのツールとしても有効と考えられ、TRL スケールの導入について検討を進めていく。

< 主要な 3 つの技術分野において信頼性を向上するために特に重要な課題 >

- ・ 本計画における技術開発分野は、全体計画における研究開発分野の構造に対応している。各分野における技術開発は、地層処分技術の信頼性を向上するうえで特に重要となる課題に注力して取り組む。これらには、例えば以下のようなものが含まれる。
 - 将来 10 万年程度を超える時間スケールに対し、ある程度合理的な評価が可能な時間域と、不確実性が大きくなる時間域において、評価方法にどのような違いを持たせるのかを整理
 - 地層処分システムの時間変化について、将来の長期変化を引き起こす主要な因子を、最新の科学的知識に基づく解釈やモデルを用いた感度解析等によって特定。調査・評価の対象や試験研究の重点の絞り込みを実施
 - 地質環境と、処分場の構成要素の設計や材料などの技術オプション開発との関連性を示したうえで、幅広い地質環境条件に対応した最適な処分場の設計のための方法論を構築
 - 安全評価のための現象解析モデルの開発にあたっては、計算が複雑化しすぎることのないように現象を支配する主要因を十分把握したうえで実施。併せて、現象解析モデルについて不確実性を考慮しシステム評価モデルとして簡略化する場合には、設定が適切に合理化されているかを明示的に確認

< 包括的なインベントリの情報ベース構築 >

- ・ セーフティケースの信頼性向上に資するより包括的なインベントリの情報ベースを構築する。例えば、対象廃棄物に含まれる化学物質に関する特性情報の整備をさらに進め、諸外国のセーフティケースにおける取扱い等を考慮して化学的リスクの評価方法等について検討を進める。

なお、OECD/NEA の国際レビューで提言されたような、使用済 MOX 燃料¹⁷の再処理に伴う廃棄物特性の変化などが処分場概念や安全評価などに及ぼす影響の検討については、今後の核燃料サイクルに関する研究開発の動向を注視しながら将来的に考える必要の課題として念頭に置いておく。

< 要件管理と構成管理システムの検討 >

- ・ 知識マネジメントと連携して進める要件のマネジメントについては、地層処分事業に関する様々な要件（法令類、規制要件、社会経済的な制約条件、技術的な要件、ステークホルダーからの要請等）を満たしながら的確に進める。より具体的には、OECD/NEA の国際レビューの提言に基づき、以下に留意する。
 - 廃棄物インベントリ情報の具体化、サイト調査の進捗を反映した地質環境モデルの更新。

¹⁷ MOX 燃料：混合酸化物燃料のこと。MOX とは（Mixed OXide 「混合された酸化物」の意）の頭文字を採ったものである。

これらに応じた処分場設計, 安全評価の実施など様々な条件のもとで多岐にわたる検討を行い, セーフティケース全体にわたって総合的に実施

- 検討に用いる一連の入力データと検討結果のバージョン管理等の複雑化に対応し, ライフサイクル全体を通じて一体的に管理するため, 要件管理と合わせて構成管理システムの適用を検討
- これによって, 例えば地質環境モデルの変更に適合するよう, 整備した設計オプションを用いた設計の変更やこれに応じた安全評価などの作業を確実に実施可能となるような仕組みを整備

<技術情報の発信>

- ・ 技術情報の発信については, 事業の進展に伴い様々な局面においてますます重要となる。このため迅速な, 分かりやすさにも留意した情報発信が不可欠である。例えば, NUMO の技術レポート等を人工知能 (AI) を活用して英文化し, 海外への情報発信をさらに加速させることや, 視覚的に分かりやすい, 例えば, 動画や漫画などを利用した方法の検討など, 様々な分野の専門家だけでなく幅広いステークホルダーを対象とした情報発信に取り組む。

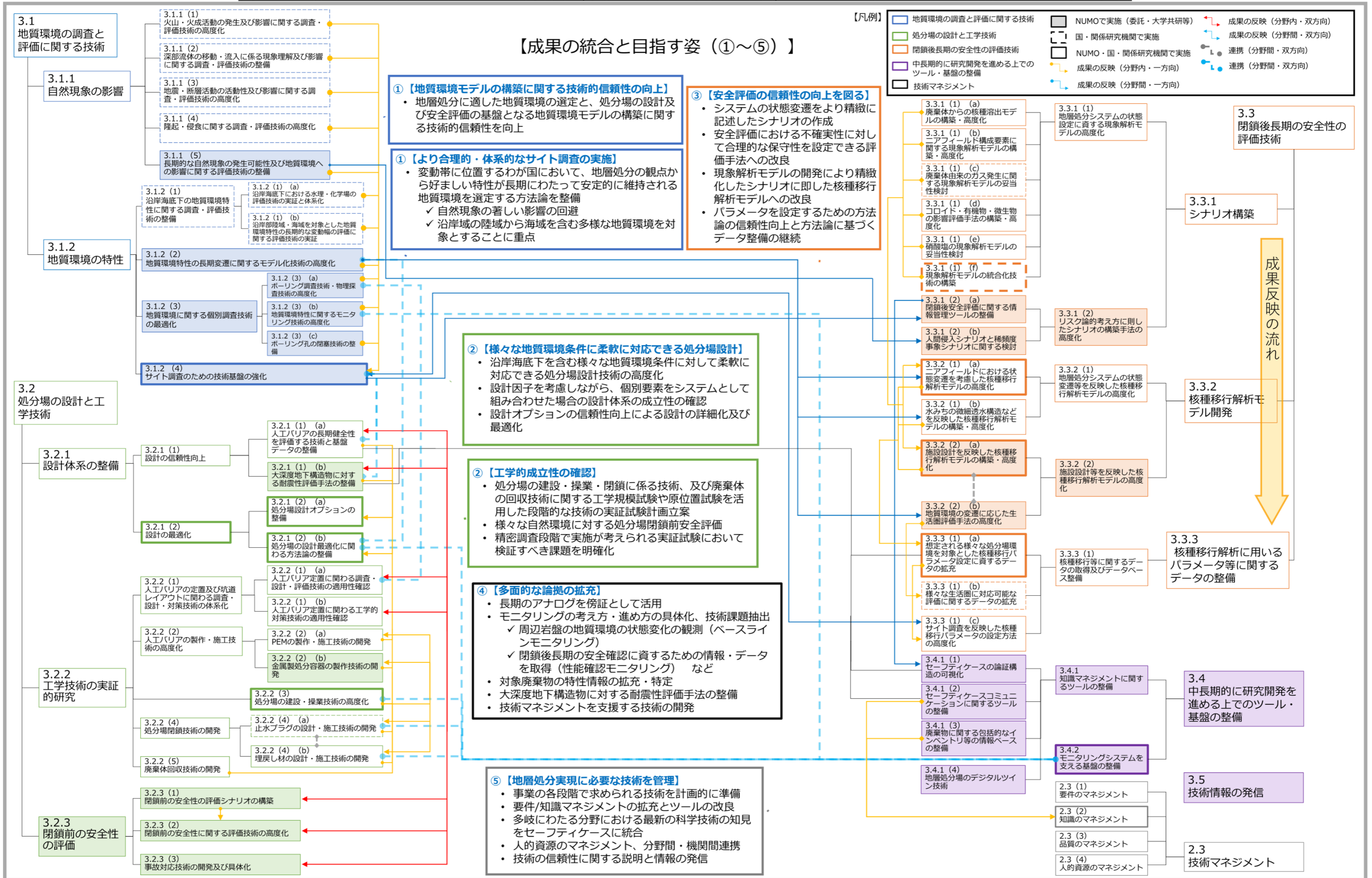
<技術協力の推進>

- ・ 国内外機関との共同研究や, 国際プロジェクトなどへの参加を引き続き推進し, 我が国の地層処分技術の信頼性に関する国際レベルでの確認, 最新の知識や情報を反映した効率的な技術開発の実施などに役立てるとともに, こうした場を利用した人材育成を図る。

以上に述べた事業の進展に応じた技術開発の進め方に留意し, 各技術開発分野における具体的な技術開発への取組みについて第3章で論ずる。

なお, サイト選定の進捗等, 今後の事業の進展に応じて本計画も適宜見直しを検討する予定である。

図2 地層処分研究開発に関する全体計画（令和5年度～令和9年度）における研究開発項目の体系※と成果の統合



※全体計画 3.5 代替処分オプションに関する研究開発は割愛。 NUMO中期技術開発計画において、3.4.1 (4) 地層処分場のデジタルツイン技術及び3.5 技術情報の発信を追記修正

3. 技術開発項目と内容

3.1. 地質環境の調査と評価に関する技術

サイト調査では、我が国のように変動帯に位置することに起因する、地質環境の長期的安定性に影響を及ぼす可能性のある自然現象を理解するとともに、サイト特有の特徴や条件等を考慮し、適用可能な最善の調査・評価技術を適切に利用できることが重要となる。このため、自然現象の発生可能性とその地質環境への影響評価や、我が国の多様な地質環境条件を対象とした長期間にわたる地質環境の変遷についての評価等に関するこれまでの研究開発成果を踏まえ、最新の科学的知見に基づく最先端の調査・評価技術及びモデル化・解析技術について、さらに情報収集を継続するとともに、実際のサイト調査への適用性や妥当性を実証試験等により確認する。

地質環境の調査と評価に関する技術の整備にあたっては、原子力規制委員会が示した考慮事項や、関係研究機関における研究開発成果の統合に留意して取り組むこととする。

3.1.1. 自然現象の影響

(1) 長期的な自然現象の発生可能性及び地質環境への影響に関する評価技術の整備

サイト調査においては、自然現象の著しい影響を回避するようにサイトを選定するが、それでもなお、将来予測における不確実性がより大きくなると考えられる将来 10 万年程度を超える期間を対象とした安全評価に向けて、自然現象の発生可能性とそれに伴う地質環境への影響に関する評価技術を整備する。

これまでに、将来 10 万年程度を超える期間を対象とした安全評価に資するため、自然現象が発生する可能性とそれに伴う地質環境への影響を評価するための考え方や評価事例を提示した。例えば NUMO では、米国のユッカマウンテン計画で用いられた手法などを参考に、我が国における長期の自然現象の発生可能性とその影響を定量的に評価する手法として、ITM-TOPAZ 手法を開発してきた。

今後は、NUMO において、概要調査段階のセーフティケースへの適用に向けて、特定の検討地域を対象としたケーススタディを行うなど、自然現象の変動傾向の一樣継続性や発生様式の観点から整理した地域的な特徴を考慮に入れて、将来 10 万年程度を超える期間に新規に発生する可能性のある自然現象とそれに伴う地質環境への影響の程度・範囲や時間変化（地質環境の状態変化）に関する安全評価シナリオを設定するための方法論を整備する。また、このシナリオの科学的な説明性を向上させるため、自然現象の新規発生可能性や傾向変化の可能性及びそれらの不確実性を数値化するための技術を整備する。これらの技術の開発にあたっては、その適用に対する理解促進及び科学技術的合意形成を図るために、自然現象に関する国内外専門家の協力を得つつ整備を進める。

表1 「長期的な自然現象の発生可能性及び地質環境への影響に関する評価技術の整備」に関する5年間の技術開発工程

技術開発要素	令和5年度	令和6年度	令和7年度	令和8年度	令和9年度
(1) 長期的な自然現象の発生可能性及び地質環境への影響に関する評価技術の整備	地質環境の状態変化に関する安全評価シナリオ構築の方法論の整備				
	自然現象の発生可能性等に関する確率論的評価技術の整備				
	確率論的評価手法の適用に対する理解促進及び信頼性向上				

3.1.2. 地質環境の特性

(1) 地質環境特性の長期変遷に関するモデル化技術の高度化

処分場の設計及び安全評価の基盤となる自然現象の著しい影響を回避したサイトの地質環境特性の長期変遷について、我が国の多様な地質環境を対象として、最新の科学的知見を反映したモデル化・評価技術を整備する。

これまでに、NUMO-SCで検討対象母岩とした深成岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類について、長期にわたる地形の変化や気候・海水準変動等に伴う地表から地下深部までの水理場や化学場といった地質環境特性の時間的・空間的な変化を表現することができる現実的な地質環境のモデル（四次元地質環境モデル）を構築するための一般的技術を整備した。

今後は、NUMOにおいて、最新の科学的知見を反映するとともに、実際の地質環境データを用いた妥当性・適用性の確認事例を蓄積する。加えて、四次元地質環境モデルの時間・空間スケールに応じた不確実性を評価するための方法論を整備する。

この結果に基づき、サイトの条件に応じた四次元地質環境モデルを構築する際に必要なデータや調査項目、モデル構築の際に着目すべき点や留意事項を含む作業手順等を体系的に整理する。また、NUMOの評議員会での提言を受けて、将来の長期変化を引き起こす主要な因子をモデルの感度解析等から洗い出し、調査・評価の重点を絞り込みながら時間変化に対する理解・解釈を行う。

表2 「地質環境特性の長期変遷に関するモデル化技術の高度化」に関する5年間の技術開発工程

技術開発要素	令和5年度	令和6年度	令和7年度	令和8年度	令和9年度
(1) 地質環境特性の長期変遷に関するモデル化技術の高度化	実際の地質環境データを用いた妥当性・適用性の確認事例の蓄積				
	不確実性を評価するための感度解析に関する方法論の整備				
	モデル化技術の取りまとめ				

(2) 地質環境に応じた個別調査技術の最適化

概要調査以降の、地上からの調査を念頭に置いて、我が国の多様な地質環境のそれぞれに対し、物理探査やボーリング調査、地下水等のモニタリング及びボーリング孔の閉塞等に関する、様々な調査・評価手法や、機器の適用に関する合理化及び最適化を図る。

(i) ボーリング調査技術・物理探査技術の高度化

これまでに、脆弱層を対象としたボーリング孔の掘削、孔内試験及び関連する室内試験に関する実証試験を実施し、適用した掘削・試験技術の有効性を確認するとともに、試験データの品質向上等に向けた課題を明らかにすることができた。

今後も、関係機関と連携を取りながら、抽出した課題解決に向け、ボーリング孔を用いた孔内試験手法の適用性確認を継続するとともに、その結果を踏まえた試験手法の最適化を図る。併せて地層処分に特有で、高度化が必要な試験装置等の開発を進める。また、最新の科学的知見を反映した物理探査手法について、関係機関と連携を取りながら、その適用可能条件や適用限界、品質管理の考え方に関する確認を継続する。これらの取組みを通じて、NUMOにおいて、現場作業の品質・安全等に関するマネジメント能力の向上を図る。加えて、NUMOにおいて、ボーリング調査及び物理探査に関する技術の整備を通じて、合理的・体系的にサイト調査を展開するための方法論を取りまとめ、ボーリング調査と物理探査の組み合わせの考え方を整理する。

(ii) 地質環境特性に関するモニタリング技術の高度化

これまでに、数十年規模の耐久性を有する地下水の水圧・温度計測と、地下水の採水が可能な光ファイバーセンシング技術を用いたモニタリング装置を設計・試作し、実現性の見通しを得た。また、ボーリング孔や坑道の掘削において遭遇すると想定される断層に関し、その活動性を考慮した工学的対策の検討や、再活動に伴う透水性の変化を考慮した核種移行解析といった安全評価の信頼性向上に資するため、地震に伴う断層の変位や、地質環境特性の変化を把握するためのモニタリング装置に関する適用性の確認を継続し、この装置で取得するデータを用いた解析的推定技術の整備を進めてきた。

今後は、NUMOにおいて、地下水の水圧・温度計測、及び地下水の採水が可能なモニタリング装置を試作し、実規模実証試験により、その適用性及び耐久性を確認する。また、NUMOにおいて、採水を伴わないレーザー光を用いた地下水水質モニタリング手法の開発を実施する。さらに、関係機関と連携を取りながら、断層の変位、間隙水圧等を観測するためのモニタリング装置による観測を継続し、モニタリング装置の耐久性の確認やデータの蓄積等を図る。また、この観測結果に基づき、関係機関と連携を取りながら、断層及び断層周辺の地質環境の変化（水理-力学連成現象）に関する解析・評価のために整備した水理・力学連成解析コードの妥当性を確認する。

(iii) ボーリング孔の閉塞技術の整備

これまでに、調査等に用いたボーリング孔が水みちとなり、閉鎖後の処分場の安全機能に影響を与えないように確実に閉塞する技術については、国際的にも課題となっており、国際

的な協力体制等も活用しつつ、ボーリング孔の閉塞材料の特性把握や、ボーリング孔内への閉塞材運搬・設置に関する検討等を実施し、技術の体系的な整備の見通しを得た。

今後は、引き続き国際的な協力体制等を活用しつつ、閉塞材の原位置での性能確認や、深部のボーリング孔内へのプラグの設置方法、ボーリング孔内への閉塞材の運搬・設置方法等の検討を継続するとともに、地上からのボーリング孔を対象とした実規模実証試験を実施し、ボーリング孔の閉塞技術を整備する。

表3 「地質環境に応じた個別調査技術の最適化」に関する5年間の研究開発工程

技術開発要素	令和5年度	令和6年度	令和7年度	令和8年度	令和9年度
(i)ボーリング調査技術・物理探査技術の高度化	ボーリング孔を用いた孔内試験手法の適用性確認 物理探査技術の適用可能条件や適用限界、品質管理の考え方の確認				ボーリング調査及び物理探査に関する方法論の取りまとめ
(ii)地質環境特性に関するモニタリング技術の高度化	レーザー光を用いた地下水水質計測装置の開発 断層の変位、間隙水圧等の観測	モニタリング装置の製作			モニタリング装置の実規模試験
(iii)ボーリング孔の閉塞技術の整備	閉塞材の性能試験、プラグの設置 閉塞材の運搬設置方法の検討			閉塞技術の実規模試験	

※工程表の中で、橙色線は、国内外の関係機関などとの共同研究や、国・関係研究機関と役割分担しながら NUMO が実施している事業の工程を表している。黒色線は、NUMO が委託業務を活用して実施もしくは国内の大学との共同研究で実施している事業の工程を表している。

(3) サイト調査のための技術基盤の強化

我が国の多様な地質環境を対象として、地下深部の地質環境特性とその長期変遷や、それらの調査・評価に関する最新の科学的知見を継続的に集約・拡充する。

これまでに、情報の乏しかった先新第三紀付加体堆積岩類を対象とした地質環境特性に関する科学的知見等を拡充した。

今後もサイト調査やセーフティケースの構築・更新への反映を念頭に置き、全体計画 3.1. 「地質環境の調査と評価に関する技術」の研究開発等を通じて、NUMO において、自然現象が及ぼす影響や地下深部の地質環境特性、その長期変遷等の地質環境情報の収集・蓄積を継続する。また、最新の科学的知見を反映した最先端の調査・評価技術及びモデル化・解析技術についての情報収集を継続する。

こうして収集した情報が実際のサイト調査や評価に適用可能かどうかを確認するため、NUMO において、サイト調査に適用するという目的に適した品質マネジメントやデータマネジメントの考え方を、将来の許認可を見据えながら開発・更新していく。併せて概要調査で取得する多種多様なデータを管理するために必要なデータベースシステムの開発を進める。

表4 「サイト評価のための技術基盤の強化」に関する5年間の技術開発工程

技術開発要素	令和5年度	令和6年度	令和7年度	令和8年度	令和9年度
(3)サイト調査のための技術基盤の強化	地質環境情報の収集・蓄積				
	最先端の調査・評価技術及びモデル化・解析技術についての情報収集				
	サイト調査に適用する品質マネジメントやデータマネジメントに関する考え方の実効性向上				

3.2. 処分場の設計と工学技術

地層処分システムとしての成立性により重点を置いた技術開発に移行するとともに、様々な技術オプションについて、サイトの地質環境の特性に留意しつつ、安全性及び実現性を継続的に検討することで、設計の詳細化及び最適化への準備を整える。具体的には、これまで蓄積されてきた、また今後得られる人工バリアに関する材料特性データ、地上・地下施設の施工に必要な要素技術の実証データ並びに回収に関わる要素技術の適用性確認結果等の設計体系への統合と、段階的な技術の実証によってこれを進める。整備していく設計体系に応じて詳細化及び最適化した設計については、閉鎖前の安全性の評価技術や3.3.で述べる閉鎖後長期の安全性の評価に関する研究開発に適宜反映する。そのため、「設計体系の整備」、「工学技術の実証的研究」、「閉鎖前の安全性の評価」及び「閉鎖後長期の安全性」の観点で技術開発に取り組む。

3.2.1. 「設計体系の整備」では、これまで蓄積されてきた人工バリアや地上・地下施設の設計に必要な試験データの整理と技術的論拠を拡充し、処分場を構成する要素の性能に関わる諸現象に関する理解の深化と不確実性の低減を図ることにより、処分場に要求される機能の確保に関する信頼性を向上させる取組みを継続する。特に、長期健全性の評価については、金属腐食や緩衝材の変質現象等に関する長期間の試験等により現象理解やデータの蓄積などを進めて技術的論拠の拡充に取り組む。こうした取組みにあたっては、様々な分野の専門家による評価や助言を得ながら進める。あわせて、サイトに適合した最適な処分場の設計に向けて、NUMO-SCに示した設計の方法論に基づく設計体系を継続して整備する。対象となるサイトが特定されていない段階やサイト選定の初期の段階では、沿岸海底下を含む我が国の多様な地質環境と地質環境情報に対応できるように、設計の柔軟性、材料調達の多様性を確保すべく、人工バリア代替材料を含む設計オプションを整備する取組みを継続する。

3.2.2. 「工学技術の実証的研究」では、処分場の建設・操業・閉鎖に関する技術について、これまでの関係研究機関による研究開発によって実現性を見通しを得た技術を中心に、個別要素技術の実証的研究や試験が進められることで、システム全体の設計体系において考慮する工学的な成立性を高める。これらの実証的研究や試験を通じた個別要素技術の開発成果を統合し、システムとしての成立性に関する検討や品質管理手法の構築を進めつつ、精密調査において考えられている地下調査施設での実証試験計画の立案に向けた準備を段階的に進める。

3.2.3. 「閉鎖前の安全性の評価技術」のための技術開発は、これまでに検討した処分場の設計及び安全対策の検討成果を出発点として、処分場閉鎖前の安全性に対する信頼性の向上の観点から、地震や津波といった外部事象に関する安全評価シナリオの網羅性を高めるとも

に、操業安全対策の効果を定量的に把握することが可能となるように、評価技術の高度化を進める。また、仮に事故が生じた場合の対応に関する検討と、具体的に適用可能な技術の開発に引き続き取り組む。

3.2.1. 設計体系の整備

(1) 設計の信頼性向上

処分場の設計において、処分場に期待する安全機能を確保できるように、設計に用いる解析モデルやパラメータに含まれる不確実性を考慮し、人工バリアや地上・地下施設の性能に余裕を持たせた仕様を設定する。こうした設計を可能にして処分場設計の信頼性向上を図る。

(i) 人工バリアの長期健全性を評価する技術と基盤データの整備

これまでに、人工バリアの材料特性に関わるデータを多様な環境条件や影響要因を考慮して取得してきた。

オーバーパック及び TRU 廃棄物¹⁸の廃棄体パッケージ容器(以下、金属製処分容器という。)の長期腐食寿命評価については、廃棄体の地下坑道定置後の再冠水過程におけるニアフィールドの環境条件が大きく変化する期間の腐食、微生物腐食、溶接部の応力腐食割れ等に対する評価技術及びこれらを統合した評価モデルの構築、地層処分における環境条件を考慮した試験技術の標準化に向けた取組みを進めている。

緩衝材に用いるベントナイトについては、透水性や膨潤性等の主要な性能に関するデータの蓄積と、100°Cを超えるような高温状態、微生物の増殖、流出現象等による性能への影響に関する試験研究を関係研究機関等と共同で実施し、技術的な成立性に関する知見の拡充を進めている。

今後も、極端な保守性を排除した、より現実的な環境条件に着目して、室内試験及び国内外の地下研究施設を活用した原位置試験等を継続して技術的論拠を拡充させる。金属製処分容器の腐食、緩衝材の変質現象や変形等の長期的な変化に対しては、関係機関と連携を取りながら、長期間の試験を継続することによって現象の理解を進め、より信頼性の高い評価モデルの構築に引き続き取り組む。あわせて、関係機関と連携を取りながら、鉄・ベントナイトの相互作用や鉄の超長期腐食挙動等の人工バリア材料に関するナチュラルアナログや考古学的な傍証に基づくアナログ事例を収集し、サンプルの分析などを通じて現象の理解を深めるための知見の拡充を継続する。金属製処分容器の長期腐食寿命評価については、NUMOにおいて、上記の課題に対する論拠などの整備を継続するとともに腐食寿命の評価に AI を活用した評価手法等の先端的な技術の導入を試みる。関係機関と連携を取りながら、緩衝材の技術的な成立性については 100°Cを超えるような高温状態、微生物の増殖、流出現象等による性能への影響の確認を継続する。

連成現象を伴う処分場ニアフィールドの再冠水過程の評価や、繰り返し作用することが想定される地震動に対する人工バリアシステムの長期健全性の評価については、関係機関と連

¹⁸ 我が国においては、使用済燃料の再処理やこれによって回収されたプルトニウムを用いて製造する MOX 燃料 (Mixed OXide fuel) の製造過程で発生する長寿命の TRU (TRans Uranium) 核種およびヨウ素 I-129 などの核分裂生成物を多く含む「長寿命低発熱性放射性廃棄物」のことを「TRU 廃棄物」と称している。

携を取りながら、評価モデルの妥当性確認のためのデータを整備するための試験技術の開発に取り組むとともに、妥当性確認のプロセスを通じてモデルの改良による高度化を進める。

(ii) 大深度地下構造物に対する耐震性評価手法の整備

地層処分のための地下施設は、他の原子力関連施設に比べて地下深部に建設する構造物であること、大規模な接続坑道を有する広い面積の構造物であること等の特殊性を有しており、山岳トンネルなど、地下岩盤中の坑道と同様に耐震性に優れているといった理由から、定まった耐震性評価手法は整備されていない。

これまでは、一般的な構造物の評価方法を参考とした大規模な接続坑道の耐震性評価を実施しているものの、その信頼性を高めていくための取り組みが必要である。

このため、今後は、関係機関と連携を取りながら、大深度に設置される坑道の特殊性や多様な岩種、岩級への対応を考慮して、地震時の坑道の安定性を評価する指標や基準の明確化、掘削時の岩盤の緩みや吹付けコンクリート支保工の硬化過程が地震時の坑道安定性に及ぼす影響の評価、これらの影響を考慮した岩盤と支保工の繰返し強度・変形特性に立脚したモデル化及び解析の適用性確認、大深度地下の入力地震動の設定手法に係る信頼性の向上等に段階的に取り組む。

表5 「設計の信頼性向上」に関する5年間の研究開発工程

技術開発要素	令和5年度	令和6年度	令和7年度	令和8年度	令和9年度
(i) 人工バリアの長期健全性を評価する技術と基盤データの整備	ベントナイトの特性データ取得（高温による影響、微生物増殖抑制、長期圧密試験棟）				
	金属製処分容器材料の特性データ取得（長期腐食試験等）				
	既取得データの取りまとめ 試験条件の見直し				取得データの 取りまとめ
	ナチュラルアナログや考古学的な傍証に基づくアナログ事例の収集と分析（鉄・ベントナイト相互作用、超長期腐食機構等）			（必要に応じて継続）	
	金属製処分容器の長期腐食寿命評価（学会における委員会の設置、各種課題に対する試験研究等）				
	長期健全性評価に関する試験技術の開発 （再冠水、流出現象、地震動影響調査）		長期健全性評価に関する検証データの取得 （再冠水、流出現象、地震動影響等）		
(ii) 大深度地下構造物に対する耐震性評価手法の整備	坑道の耐震性評価の基本的な考え方に関する検討、マニュアル化				
	岩石の繰返し強度・変形特性に関するデータ取得				
	支保工の繰返し強度・変形特性に関するデータ取得				
	坑道模型に対する実験手法の検討、予備的なデータ取得			非線形繰返しモデルの開発	
				坑道模型に対する振動実験	
	感度解析、解析コード改良、実験の再現解析等				
	入力地震動策定に関する事例収集			地震波伝播の分析	

(2) 設計の最適化

我が国の多様な地質環境条件に柔軟に対応し、処分場の設計の詳細化・最適化が可能となるよう、処分場設計のための方法論を開発する。

OECD/NEA 国際レビューにおける提言を踏まえ、段階的なサイト選定に応じた設計オプションの絞り込みや開発目標に関する戦略を検討する。

上記 3.2.1. (1) 「設計の信頼性向上」の取組みによる設計の信頼性向上とともに、我が国の多様な地質環境条件に柔軟に対応して処分場の設計が可能となるように、設計オプションの安全性と実現性の向上、さらには実用化に向けた効率性の改善を目的とした開発を継続し、これらの取組みを通じて得られる最新の科学技術的知見を反映した設計体系に基づいて、設計の詳細化及び最適化を実施するための論拠と方法論を整備する。また、設計最適化の試行により、地質環境調査で取得するデータや安全評価モデルの詳細度との整合性に関する検討を行い、開発した方法論の適用性について検討を行うとともに、地質環境データ取得のための調査計画の改善や安全評価モデルの高度化に資する指針を提供する。また、OECD/NEA の国際レビューにおける提言を受けて、様々な状況変化に柔軟に対応できるよう、NUMO は可能なかぎり設計オプションを保持するとともに、将来的に規制要件として設計オプションの比較による最適な設計の選択の提示が求められる可能性も視野に入れながら、段階的なサイト選定に応じた設計オプションの絞り込みや開発目標に関する戦略の検討を進める。

(i) 処分場設計オプションの整備

上記 3.2.1. (1) (i) 「人工バリアの長期健全性を評価する技術と基盤データの整備」では、高レベル放射性廃棄物の人工バリアの有望な候補としてきた材料を対象に実施しており、オプションとしての成立性を確認しつつ進めてきている。緩衝材のベントナイト材料については国内産の複数の材料を対象に、透水性や膨潤性等の基本特性データを取得し、ガラス固化体のオーバーパック材料については、炭素鋼を中心に、製작성や効率性を考慮した様々な製造方法（鍛鋼、鋳鋼、板巻鋼管）及び材質（高炉品、電炉品）を対象に、耐食性や構造健全性に関するデータの蓄積を進めてきた。また、長期的耐食性を高めるためのオプションとして銅コーティングによる被覆技術の検討を進め、適用の見通しを得ている。

定置方式に関する設計オプションとして、高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアについては NUMO-SC に示した縦置き方式と横置き PEM¹⁹（Prefabricated Engineered Barrier System Module の略：地上施設で廃棄体を人工バリアと一体化したモジュールを地下施設に搬送し、定置する技術）方式を対象として、設計要件に関する検討を進め、要素技術の試験などを通じて工学的成立性を見通しを得た。

TRU 廃棄物に対する人工バリアについては、廃棄物の多様な特性と容器の閉じ込め機能を考慮した製作条件や定置方式や回収の容易性等に着目した廃棄体パッケージの改良や人工バリアの構成要素の見直し等について検討を進めた。これらの検討においては、取得したデータや知見に基づき、安全機能が確保される条件などを明確にすることで、設計の柔軟性と材料調達の多様性を確保できる設計オプションとしての適用性を見通しを得た。

¹⁹ PEM：Prefabricated Engineered Barrier System Module の略。地上施設で廃棄体を人工バリアと一体化したモジュールを地下施設に搬送し、定置する技術。

今後は、NUMOにおいて、緩衝材やオーバーパック等の主要な人工バリア材料となるベントナイトや金属材料を対象として、3.2.1. (1) (i)「人工バリアの長期健全性を評価する技術と基盤データの整備」において実施する人工バリアの基盤データ拡充の成果、3.2.2. (2)「人工バリアの製作・施工技術の高度化」において実施する人工バリアの製作・施工技術の開発成果を反映して設計オプションとしての代替材料の適用性検討を継続する。緩衝材については、複数種類のベントナイトを対象として、100°Cを超えるような高温環境におけるベントナイトの性状変化を考慮した特性データを拡充することによって、廃棄体の熱特性や、岩盤の熱特性の不確実性や不均一性、廃棄体定置から閉鎖後直後の過渡期の現象理解における不確実性に対する設計の柔軟性を高める取組みを継続して進める。オーバーパック材料については、引き続きオプションとして考慮している銅-炭素鋼複合材（銅コーティング）を対象に、日本の地質環境条件を考慮した適用性の検討を進める。それぞれで取得された成果を統合し、オプションとしての代替材料の成立性を評価するとともに、今後の技術開発課題を明らかにして、設計及び実証的研究に反映する。また、これまで検討対象としていない様々な材料（例えば、海外産ベントナイト、セラミックス）や、製作に関する技術（例えば、クラッド鋼等の金属複合材製造技術）の適用に関して情報収集を継続する。

定置方式に着目した設計オプションとして、高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアについては、NUMOにおいて、上記の100°Cを超えるような高温環境における緩衝材の特性データに基づき、100°Cとしていた人工バリア設計上の制限温度を緩和した場合の、ガラス固化体や人工バリアの配置や定置技術に関する設計オプションの概念化の検討を安全性と実現性の向上に資する技術上の課題を抽出しながら進める。

TRU廃棄物については、回収の容易性の観点から、PEM方式を適用した場合の設計オプションについて、関係機関と連携を取りながら、これまでに実施された閉じ込め性能を高めた廃棄体パッケージや陰イオン核種の影響低減技術に関する検討成果を反映して、オプションとして資する処分概念の詳細化を進める。

設計オプションの成立性を検討するにあたって、人工バリアの製作・施工技術については3.2.2. (2)「人工バリアの製作・施工技術の高度化」、廃棄体回収に関する技術については3.2.2. (5)「廃棄体回収技術の開発」の成果を反映する。

(ii) 処分場の設計最適化に関する方法論の整備

設計の最適化に向け、これまで人工バリア代替材料を含む設計オプションの整備にあたっては、NUMOにおいて、設計因子に基づく設計要件への適合性の確認を各因子に対して個別に検討を行い、オプションとしての成立性を確認してきている。

今後、関係機関と連携を取りながら、設計オプションの絞り込みに資する、オプション間の比較評価や設計仕様の決定等、サイト調査によって得られる地質環境情報を勘案しつつ、設計の最適化を包括的に行うための方法論の整備を進める。方法論の整備にあたっては、NUMO-SCに示した設計因子に環境保全やモニタリングを新たに加えるとともに、経済的合理性の設計因子には、社会的な要素（持続可能な社会の観点でのカーボン・アカウンティング等）を取り入れる等、処分場設計における要件を再設定し、設計因子を更新したうえで、これを進める。整備した方法論に基づき、設計オプションの選択を含むシステムとしての成立性を考慮した処分場設計の最適化の取組みを試行する。具体的には、処分場の地下施設レ

レイアウト設計の最適化に取り組む。最適化においては、例えば、地下施設を構成する坑道の支保工の施工によるセメントの閉鎖後長期の安全性への影響といった、閉鎖前安全性と閉鎖後の安全性という二つの設計因子のバランスをとることなど、設計因子間の相互関係も考慮して検討を進める。

また、NUMOにおいて、高レベル放射性廃棄物に対する処分場の設計上の制限温度が緩和される場合における、ガラス固化体の集積定置などの効率的な配置といった処分概念オプションを検討するとともに、3.2.1. (1) (ii)「大深度地下構造物に対する耐震性評価手法の整備」、3.2.2. (3)「処分場の建設・操業技術の高度化」の取組み、3.2.2. (5)「廃棄体回収技術の開発」及び全体計画 3.2.2 (4)「処分場閉鎖技術の開発」で得られる知見等の成果を統合的に反映して、閉鎖前及び閉鎖後の安全性のみならず、地下施設の建設から閉鎖までに適用する技術や装置の適用性と合理的な作業工程、その間の作業従事者の安全確保、回収可能性の維持に伴う坑道の開放による影響と対策の検討、並びに事業の経済性への影響が大きい要素である地下施設への湧水量の評価などによる設計の詳細化を進めながら、NUMOにおいて、地下施設レイアウトの最適化を試行する。NUMO-SC 等に示した地下施設のレイアウト設計では坑道の力学的安定性と緩衝材への熱影響の観点から適切な離隔距離を確保した複数の処分坑道を並列に配置しているが、このような多連接坑道を大深度地下に施工した事例は少ないため、NUMOにおいて、国内外での鉱山技術などを参考に施工技術の開発を進め、あわせて設計の詳細化に反映する。

表 6 「設計の最適化」に関する 5 年間の研究開発工程

技術開発要素	令和 5 年度	令和 6 年度	令和 7 年度	令和 8 年度	令和 9 年度
(i) 処分場設計オプションの整備	人工バリア代替材料の成立性の検討				
	新材料の適用可能性に関する情報収集				
	高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの設計オプション				
	TRU 廃棄物に対する人工バリアの設計オプション				
(ii) 処分場の設計最適化に関わる方法論の整備	設計因子及び設計要件の再整理				
	設計オプションの比較・評価方法の整理				
	緩衝材の制限温度を緩和した場合のガラス固化体のより効率的な配置の検討				
	湧水影響評価に基づく地下施設レイアウト最適化の試行				
	多連接坑道を対象とした設計・施工技術の整備				
	設計因子間の重み付け、優先度の設定に基づくシステムとしての成立性を考慮した設計最適化の試行				
地下施設レイアウトに適した設備（換気、排水、通信、避難等）の検討					
施工技術に関する機械装置、情報化施工管理システムの検討					

3.2.2. 工学技術の実証的研究

(1) 人工バリアの定置及び坑道レイアウトに関わる調査・設計・工学的対策技術の体系化

調査・設計・工学的対策に関わる技術の考え方、手順及び方法について一貫性をもって体系化し、実証試験等を通じて適用性を確認する。

地下施設が所要の安全機能を確保するための地下坑道を利用した調査・設計・工学的対策技術の考え方、手順及び方法を体系的に整備する。特に、坑道周辺の断層・割れ目等の地質環境特性の調査及び評価から地下施設の設計、人工バリアの定置、湧水量低減等の工学的対策の立案に至るシステムとしての成立性について、地下研究施設を活用することにより実際の地質環境条件において試行し、それぞれの技術の適用性や課題を明らかにする。

(i) 人工バリア定置に関わる調査・設計・評価技術の適用性確認

これまで、処分場の建設及び閉鎖に関する掘削損傷領域の評価技術、湧水対策技術、坑道を埋め戻す施工技術について、実証的な検討を通じた要素技術の実現可能性を確認した。

今後は、関係機関と連携を取りながら、地下研究施設における新たな調査坑道や模擬処分孔の掘削と関連付けて、坑道レイアウト、人工バリア及び廃棄体定置の判断指標に関わる調査、設計及び評価技術を、実際の地下環境において検証する。具体的には、最初に坑道の力学的安定性や湧水量を、地質環境に関する既存情報から事前の予測解析を行って評価し、この結果と NUMO-SC で導入した廃棄体定置の判断指標や基準値等と照らして、処分坑道・処分孔のレイアウト設計を行うとともに、原位置で取得すべきデータを特定する。次に、それらのデータをパイロットボーリングや各種トモグラフィ調査等を伴う坑道の掘削影響試験により取得し、これらの情報に基づく事後解析と事前の予測解析との対比から調査・評価技術の適用性を確認する。

(ii) 人工バリア定置に関わる工学的対策技術の適用性確認

これまで、高レベル放射性廃棄物処分については、主に堅置き・ブロック方式に関わる技術の実証試験を進めてきており、今後も関係機関と連携を取りながら、これを継続する。具体的には処分孔を模擬した試験孔を実際に掘削し緩衝材を設置して、坑道の埋戻しまでの期間における湧水や緩衝材の膨出・流出を抑制する工学的対策の有効性を確認する。

試験孔の掘削や緩衝材の定置に関しては、1日当たりの人工バリアの定置数量を想定して適切な施工方法を計画し、必要に応じて関連する要素技術の開発を行ったうえで、適用する施工方法の実現性を検証する。

緩衝材の膨出・流出を抑制する工学的対策については、これまでの国内外での知見を整理し、有効性が高いと考えられる複数の方法を抽出した。今後は抽出した方法を対象として、事前の予測解析や小規模なモデル実験により、適用する技術の絞り込みを行うこと等によって実証試験の計画に反映する。また、試験孔において許容湧水量に関わるデータを取得して、処分孔利用の可否を判断するため、NUMO-SC で設定された基準値の適切性を確認するための基盤情報を整備する。

表7 「人工バリアの定置及び坑道レイアウトに関わる調査・設計・対策技術の体系化」に関する5年間の研究開発工程

技術開発要素	令和5年度	令和6年度	令和7年度	令和8年度	令和9年度
(i) 人工バリア定置に関わる調査・設計・評価技術の適用性確認	事前解析、人工バリア定置条件等の検討		原位置の調査・試験	事後解析、評価技術の適用性評価	
(ii) 人工バリア定置に関わる工学的対策技術の適用性確認	施工計画、工学的対策技術の検討		関連する要素技術試験	模擬処分坑・対策孔施工、緩衝材定置、計測	

(2) 人工バリアの製作・施工技術の高度化

設計オプションとして検討した人工バリアの製作・施工技術の実現性に関わる課題に取り組み、技術の実証と遠隔操作化・自動化を含む装置の改良を段階的に進め、品質が確保された実用的な人工バリア構築技術として整備する。

(i) PEMの製作・施工技術の開発

高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアのオプションとして PEM 方式を適用した処分場概念の設計仕様例では PEM の重量は約 37 トンと重い。搬送定置作業を安全かつ効率的に実施するうえで、閉鎖後の長期的な安全性も含めた安全性の確保を前提に PEM の設計仕様を合理化することが課題である。この課題に対し、既存の知見に基づいた閉鎖後の安全性については定性的な検討にとどまっているものの、合理化の可能性を探るために PEM の設計改良を試行することで、PEM の製作及び組立、搬送定置、定置後の処分坑道の坑壁と PEM 容器間の隙間の埋戻しといった一連の操業工程の作業方法を、必要な装置類と合わせて具体化した。また、PEM の製作及び組立の実現性を確保するうえで鍵となる技術と考えられた、PEM 容器と一体で緩衝材を製作する方法や PEM 容器の蓋接合方法については、想定し得る設備・機器類（大型のプレス機やロボットアーム）を使用して小規模の試験スケールにおける要素技術の開発を先行的に開始した。

今後は、閉鎖後の安全性を定量的に確認しつつ、3.2.1. (2) (ii) 「処分場の設計最適化に関わる方法論の整備」において実施する設計オプションの整備とも関連付け、操業工程を含む PEM 方式について、順次、関係機関と連携を取りながら、上記に示す一連の操業工程の実現性を確認し、製作・施工技術の安全性と効率性を高めるために、引き続き試験を通じて鍵となる要素技術の開発を重点的に実施する。試験の過程で明らかとなる課題に対して、技術の改良を繰り返しながら、段階的に試験のスケールアップを図る。こうした要素技術の開発・改良を踏まえて、PEM の製作及び組立技術を含むシステムとしての成立性を検討し、次段階の実証試験の準備を整える。

TRU 廃棄物については、これまで回収可能性に対する作業の容易性を高める方法として

PEM方式を採用した場合の人工バリアを新たな設計オプションとして検討し、試行的な設計を行ってその仕様例を示した。PEM方式の仕様例に対する一連の操業工程に関する技術については、高レベル放射性廃棄物に対する場合と共通する点も多いことから、今後は、高レベル放射性廃棄物に対するPEM方式に関する研究開発成果を、TRU廃棄物に対するPEM方式へ適用することを検討しつつ、効率的・効果的に技術開発を進める。

また、人工バリア製作・施工に関わる多くの作業で放射線防護に配慮する必要があり、そのための技術オプションとして遠隔操作化・自動化を積極的に取り込んだ要素技術の開発を進める。

(ii) 金属製処分容器の製作技術の開発

オーバーパックについては、これまでに炭素鋼鍛鋼品、炭素鋼鋳造品を対象として、実スケールのオーバーパックの製作等を通じて、概ね製作技術の開発を完了している。

今後は耐食性の向上を目的とした銅との複合品に関わる製作技術の開発に注力する。オーバーパック母材の表面を銅でコーティングする技術については、関係機関と連携を取りながら、これまでに取り組んできた電気メッキ(母材の大部分)、冷間溶射(銅メッキの継ぎ目部)、摩擦攪拌接合(胴部と蓋部の接合方法)する方法に加えて、クラッド技術(母材)等の適用範囲を確認する。電気メッキ法等の技術については、今後は関係機関と連携を取りながら、銅コーティングの高速化に向けた技術の改良に取り組む。

これらのコーティング技術を適用して製作した試作品に対しては、NUMOにおいて、ねじ込み接合した場合の耐圧試験、金属組成の分析、腐食試験等を行って性能を評価するとともに、製造後の検査方法を具体化するための検討を進める。

このように、これまでに開発した溶接技術や検査技術も含め、複数の技術オプションの開発を進めるとともに、個別技術を組み合わせたシステムとしての成立性について判断ができるようにする。ここで開発を進める技術は、TRU廃棄物に対する廃棄体パッケージ容器にも共通して適用可能である。

表8 「人工バリアの製作・施工技術の高度化」に関する5年間の研究開発工程

技術開発要素	令和5年度	令和6年度	令和7年度	令和8年度	令和9年度
(i) PEMの製作・施工技術の開発	製作方法検討	緩衝材製作試験			
		組立方法検討	PEM組立試験		
			埋戻し方法検討	事後解析、評価技術の適用性評価	
(ii) 金属製処分容器の製作技術の開発	コーティング試験(電気メッキ、冷間溶射、摩擦攪拌接合、クラッド等)				
	試験片の分析				
			ねじ込み・コーティング試験、耐圧試験		

(3) 処分場の建設・操業技術の高度化

処分場の建設及び操業時の労働安全や放射性安全の向上、将来の人的資源の不足などを考慮した、無人化施工等の実現性に関する検討を行う。

将来的な技術の進展を見据えて、建設・操業に係る全ての作業プロセスにおける情報伝達技術及びロボティクス技術の導入、作業の遠隔操作化・自動化による無人化施工の実現性について検討を進め、処分場の建設・操業に係る作業のさらなる安全性と効率性の向上を図る。処分場の建設・操業期間においては、地下施設では放射線管理の要否に応じて処分区画の独立性を確保しつつ、異なる処分区画で建設と操業が同時進行で実施される。また、廃棄体の搬送定置に関わる作業については放射線防護の観点から遠隔操作化・自動化の検討を進める。さらに、地下施設の建設中は坑道掘削に伴う切羽崩落、山はね、異常出水、可燃性ガスの発生等の事象に対する安全対策が必要である。このように、処分場の建設や操業の実施には、作業従事者の労働安全と放射線安全を確保する必要がある。これらに加え、我が国の生産年齢人口は今後30年で約30%減少すると言われており、建設産業における将来的な労働力不足への対応も考慮しておく必要がある。

これまで、これらの問題に対する施策についての情報を整理し、有効な施策として情報伝達技術やロボティクス技術の全面的な活用による無人化施工が挙げられている。近年これらの技術の進歩は目覚ましく、例えば、建設産業においては現場のすべての生産プロセス（測量、設計・施工計画、施工、検査）でICTや三次元データを活用した取組み等、様々な産業分野で積極的な開発が行われている。

今後は、関係機関と連携を取りながら、こうした取組みを参考に、地層処分に特徴的な放射線管理等も考慮し、処分場での事業工程全体を俯瞰したIoTやICT活用に関する概念検討を行う。また、遠隔操作化・自動化が必要と考えられる作業プロセスについて、関係機関と連携を取りながら、自動化のレベル、方法の具体化と技術的に検証すべき事項を整理する。これらを通じて、3.2.2. (2)「人工バリアの製作・施工技術の高度化」、3.2.2. (5)「廃棄体回収技術の開発」及び全体計画3.2.2. (4)「処分場閉鎖技術の開発」等の技術開発項目に対する遠隔操作化・自動化を考慮した操業概念やプロセスに対し、関係機関と連携を取りながら、シミュレーション技術を活用しつつ実規模での実証試験に向けて必要となる個別要素技術を整備する。

また、NUMOにおいて、山岳トンネルを対象とした無人化施工等に関する最新の技術情報の収集を今後も継続し、適宜技術開発に反映していく。

表9 「処分場の建設・操業技術の高度化」に関する5年間の研究開発工程

技術開発要素	令和5年度	令和6年度	令和7年度	令和8年度	令和9年度
(3) 処分場の建設・操業技術の高度化	IoT、ICT適用の概念検討				
	遠隔操作化・自動化の作業プロセスの具体化				
		シミュレーション技術の活用検討	シミュレーション技術を活用した操作技術の検討		
		操業技術開発に対応した要素試験、実証試験			

(4) 処分場閉鎖技術の開発

埋戻し材の設計・施工技術に関するベントナイト系材料の特性データベースを整備する。

処分場の閉鎖後に、坑道が水みちとなることを防止することを目的として設置する埋戻し材等の坑道シーリング技術について、地下研究施設やモックアップ施設を活用しながら、実際の地質環境条件及び作業環境を考慮した技術の実証を進めることにより、これまでの設計概念を詳細化して、坑道シーリングが処分場全体の閉じ込め性能に与える影響を評価するとともに、坑道シーリングの施工技術の成立性を確認する。

坑道シーリングに関する施工技術の技術開発にあたっては、関係機関で取り込まれる止水プラグと埋戻し等の要素技術がシステムとして機能しているかを、関係機関と連携を取りながら確認することが重要である。

埋戻し材には、処分場の建設過程で大量に発生する掘削土を利用して、これに元の岩盤と同程度の低透水性を確保するように、ベントナイトを混合して調整した材料を使用するのが合理的である。これまで、埋戻し材の設計においては、主にケイ砂を用いた試験から得られた物性値や材料特性を用いていた。このため、複数の岩種の碎石・砕砂を掘削土に見立てて、埋戻し材の材料特性データベースの整備を目的とした取組みを開始している。この試験では碎石・砕砂の種類と最大粒径、ベントナイトの混合率等をパラメータとして、データ取得を関係機関において進めている。

埋戻し材に使用するベントナイトについては、これまで国内産の複数のベントナイトを対象に基本特性データの取得を通じて、適用性の検討を進めており、今後は、関係機関で取り込まれる掘削土の化学的な変化を考慮した掘削土の利用可能性の検討成果と合わせて、ベントナイトと掘削土の混合率などの設計の最適化に向けて、材料特性データベースの整備を進める。

表 10 「処分場閉鎖技術の開発」に関する 5 年間の研究開発工程

技術開発要素	令和 5 年度	令和 6 年度	令和 7 年度	令和 8 年度	令和 9 年度
(4) 処分場閉鎖技術の開発	埋戻し材の材料特性データベースの整備				

(5) TRU 廃棄体回収技術の開発

廃棄体回収の作業プロセスに対する要素技術を統合し、容易性の向上を目的として TRU 廃棄物 PEM に対する回収装置を検討する。

NUMO においては TRU 廃棄物を対象とし、設計オプションとして整備する処分場概念に対応して、廃棄体回収のための一連の作業プロセスに対する要素技術を統合することによって、回収可能性をより確かなものとするための技術の実証を段階的に進める。あわせて、回収可能性を維持するための長期的な坑道の開放に伴う影響を評価するための技術を整備することにより、可逆性を確保した地層処分事業の進め方への信頼感を高めていく。TRU 廃棄物

を対象として、これまで回収可能性に対する作業の容易性を高める方法として、PEM方式を採用した人工バリアを設計オプションとして検討した。さらに、回収可能性の維持期間における坑道の開放による影響については、これまで、関係機関と連携を取りながら、支保工部材の物性変化に関する試験、坑道周辺の地質環境の変化に関するモデル化や、これを用いた解析を試行することによって、これを評価するための方法を例示した。

今後、TRU 廃棄物の PEM 方式に対する回収方法については、多くの作業プロセスにおいて、関係機関で取り込まれる高レベル放射性廃棄物の PEM 方式に適用する回収技術と共通することから、高レベル放射性廃棄物の PEM 方式に対する装置設計及び要素技術の開発の結果を反映しつつ、関係機関と連携を取りながら、TRU 廃棄物 PEM に対する回収装置を検討する。

表 11 「TRU 廃棄物回収技術の開発」に関する 5 年間の研究開発工程

技術開発要素	令和 5 年度	令和 6 年度	令和 7 年度	令和 8 年度	令和 9 年度
(5) TRU 廃棄物回収技術の開発	回収方法・手順、回収装置の検討				
		試験装置設計			
	支保工部材の物性変化等重要シナリオ評価に関する知見整理		要素技術の適用性確認試験		
			坑道健全性評価モデルの高度化検討		

3.2.3. 閉鎖前の安全性の評価技術

(1) 閉鎖前の安全性に対する評価シナリオの構築

内部事象及び外部事象を網羅的に考慮した共通要因故障モードのシナリオの開発や、What-if シナリオとして、放射性物質の漏洩に関する評価シナリオの整備を行う。

地震、津波等の外部事象及び処分場内で発生が想定される内部事象について、閉鎖前の処分場の安全設計及び安全評価の基盤となる、評価シナリオの網羅性向上を図る。

これまでに、処分場の操業中に発生する可能性のある事象として、廃棄物の落下、火災、爆発、水没、及び外部電源喪失等の内部事象を主な対象として、イベントツリーの形式で評価シナリオを作成した。また、地震や津波等の外部事象については、原子力施設の規制ガイドラインを参考に、安全確保の考え方を示すとともに、既往の原子力施設の学会標準を参考に、検討すべき外部事象の選定方法の整理と、外部事象に起因して処分場に発生する可能性のある内部事象の検討を進めてきた。

今後は、NUMO において引き続き、外部事象及び内部事象のシナリオ整備に継続的に取り組むとともに、安全機能を有する複数の機器が同時に機能を失うような、共通要因故障モードのシナリオの開発や、What-if シナリオとして、放射性物質の漏洩に関する評価シナリオの整備に取り組む。

表 12 「閉鎖前の安全性に対する評価シナリオの構築」に関する 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	令和 5 年度	令和 6 年度	令和 7 年度	令和 8 年度	令和 9 年度
(1) 閉鎖前の安全性に対する評価シナリオの構築	← 内部事象及び外部事象のシナリオの充実 →		← What-if シナリオの評価シナリオの整備 →		

(2) 閉鎖前の安全性に関する評価技術の高度化

設計オプションに対する安全対策の具体化，安全性の評価を行う。

上記 3.2.3. (1)「閉鎖前の安全性に対する評価シナリオの構築」で開発するシナリオに基づき，処分場の操業安全対策の性能に関する定量的な評価技術，及び仮に放射性物質が放出することを想定したシナリオに対する，定量的な影響の評価技術の整備を通じて，安全対策の信頼性の向上を図る。

これまでに廃棄体の落下及び爆発等による廃棄体，金属製処分容器に対する衝撃力の影響評価，火災時における廃棄物に対する熱影響の評価の試行を通じて，これらの評価に必要な解析技術の適用性の確認を行ってきた。

これらの解析技術を適用した NUMO-SC の評価においては，全ての安全対策が喪失した場合を想定していたが，放射性物質の放出に至るようなシナリオは見出されていなかった。こうした解析評価をより現実的なものとするためには，個別の安全対策の性能を考慮できるように，安全対策をより具体化していくことが必要である。また，処分場の設計においては，放射性物質が放出した場合を想定して，周辺の公衆及び作業従事者の想定被ばく経路についても検討し，可能なかぎりリスクを低減するための放射線防護上の対策を考慮しておくことが必要である。

今後は，NUMO において，整備を進めている廃棄体の受け入れ・検査・封入，アクセス坑内搬送，処分坑道内への埋設といった，処分場操業時の一連の工程に対する設備・装置等に関する設計オプションのうち，放射性物質の放出によるリスクが相対的に高いオプションを対象に，安全対策の設計の具体化を進める。NUMO において，それら対策に関する性能を定量的に評価するための方法を開発するとともに，これを用いた評価解析を通じて，安全対策の信頼性のさらなる向上を図る。また，放射性物質の放出を想定した場合の対策に関しても，NUMO において，これまでに NUMO-SC で示した地上施設及び地下施設の設計例等を用いて試行的に検討し，被ばく経路等の分析に基づいて，必要となる安全対策に関する設計要件を明らかにし，処分場の設計体系の整備や廃棄体受入要件の検討に反映する。

表 13 「閉鎖前の安全性に関する評価技術の高度化」に関する 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	令和 5 年度	令和 6 年度	令和 7 年度	令和 8 年度	令和 9 年度
(2) 閉鎖前の安全性に関する評価技術の高度化	← 設計オプションの安全対策の検討 →		← 設計オプションの安全性の評価 →		

(3) 事故対応技術の開発及び具体化

処分場の操業期間における事故後の復旧策の調査・検討を進める。

処分場の操業期間中における放射性物質の放出に対して、周辺への影響を緩和する対策及び事故からの復旧に必要な対策の整備を通じて、処分場の操業期間における安全性に対する信頼性の向上を図る。

これまで、米国の廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）における放射性物質の漏洩事象と、その後の復旧までの過程を参考に、操業中に想定される事故への対応技術として、①落下や火災等の事故後の廃棄体、金属製処分容器の遠隔操作による回収の技術、②上述の事故を経た金属製処分容器からの廃棄体の取り出し及び検査に関する技術、及び③地上施設及び地下施設において、事故後の復旧のためにあらかじめ準備が必要な施設及び設備類を抽出した。

今後は、NUMOにおいて、上述の①～③に示した技術について要求事項を明確にし、設計で考慮すべき対応策に関しては、処分場の設計体系に反映する。また、①～③に関する技術で、既に原子力関連施設や一般産業分野で実用化されている技術を調査し、地層処分への適用性を評価するとともに、新たな技術の開発が必要な場合には、2025年度以降の技術開発工程に反映する。

表 14 「事故対応技術の開発及び具体化」に関する 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	令和 5 年度	令和 6 年度	令和 7 年度	令和 8 年度	令和 9 年度
(3) 事故対応技術の開発及び具体化	← 事故後の復旧策の調査 →		← 事故後の復旧方法の検討 →		
	← 原子力関連施設や一般産業分野で実用化されている技術の調査 →				

3.3. 閉鎖後長期の安全性の評価技術

閉鎖後長期の安全性の評価は、地層処分システムの長期的なふるまいをシナリオとして記述したうえで、シナリオに沿って処分場に埋設された放射性廃棄物に含まれている核種が、人間の生活圏へどのように移行するかについてモデルを用いて解析し、その結果として生ずる放射線学的影響について把握するための技術である。その信頼性を高めるため、「地質環境の調査と評価に関する技術」や「処分場の設計と工学技術」に関する研究開発成果を適宜考慮しつつ、シナリオをより地層処分システムのふるまいに即して構築するために必要な、現象理解の深化を目的とした現象解析モデルの高度化、シナリオに沿ったシステム全体を対象とした核種移行解析モデルの高度化及び核種移行解析に用いるパラメータ等の拡充といったこれまでの取組みについて、安全評価に関する膨大な情報を管理するためのツールや機械学習を適用して計算を高速処理する手法の整備など DX の推進を図りながら今後も継続する。

こうした取組みにあたっては、シナリオやその設定の根拠として利用する現象解析モデル、核種移行解析モデル及びパラメータの設定に伴う不確実性に対し、合理的な保守性を設定することができるように進める。これによって、サイト環境条件や、それに応じた処分場の設

計オプションの特徴をより忠実に安全評価に反映するとともに、安全評価上の保守性を確保した信頼性の高い技術として高度化を図り、安全評価結果をサイト選定や設計の最適化へフィードバックする際の有効性をより高めていく。

3.3.1. シナリオ構築

(1) 地層処分システムの状態設定に資する現象解析モデルの高度化

ニアフィールドの複合現象による場の状態変遷を考慮した廃棄体に対する核種溶出モデルの精緻化等を行う。

処分場閉鎖後における地層処分システムの長期的なふるまいに関する理解を深め、これを適切に安全評価シナリオの構築に反映するため、システムの状態変化を、より現実的かつ定量的に表現することを目的とした、現象解析モデルの高度化を継続する。あわせて、高度化した現象解析モデルによって表現される地層処分システムの状態変化に伴う不確実性を、定量的に把握するための手法の開発を進め、シナリオ設定にあたってはこうした不確実性を考慮することによって安全評価の信頼性向上を図る。

以上のような現象解析モデルの高度化においては、特により複雑な現象を取り扱うこととなるニアフィールドに注力し、廃棄体に対する核種溶出モデルの精緻化、ニアフィールド構成要素間の連成現象、コロイド・有機物の影響及び硝酸塩の影響に着目する。

開発したモデルやパラメータの妥当性については、室内実験や原位置試験を組み合わせ確認していく。

(i) 廃棄体に対する核種溶出モデルの構築・高度化

ガラス固化体については、これまで、処分されたガラス固化体周辺で生じるプロセスの中で、ガラス溶解速度を支配するものの一つとして重要と考えられるオーバーパック由来の鉄イオンの影響と、溶解に伴うガラス表面の変質層の保護的効果に関し、長期のガラス浸漬試験等を実施して、既存の核種溶出モデルについて妥当性の確認を進めた。

今後は、関係機関と連携を取りながら、これまでの取組みに加えて、処分場に埋設されたガラス固化体が置かれる状態をより忠実に反映した条件で、ガラス固化体の溶解挙動に関するデータを取得するための実験を実施する。これらによって、ガラス溶解モデルによるガラス寿命評価の合理性を確認するとともに、必要に応じて核種溶出モデルの改良を図る。さらに、関係機関と連携を取りながら、モデルやパラメータに存在する不確実性に起因する寿命評価への影響を定量的に示す手法の開発を段階的に進める。

(ii) ニアフィールド構成要素に関する現象解析モデルの高度化

複数の異なる構成材料から構成されるニアフィールドの状態変遷の評価を目的として、これまで、処分場閉鎖から再冠水に至るまでの期間及び再冠水後の長期の期間を対象とした、地層処分場のニアフィールド構成要素（ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、セメント系材料）に関する室内試験や原位置試験により、複合的に生じる現象に関するデータを取得し、現象の理解を深化した。また、これに基づいて現象解析モデルの開発と、それをを用いた解析結果と試験データとの比較を通じたモデルの妥当性の確認を実施した。

今後、関係機関と連携を取りながら、ニアフィールドにおける状態変遷に関する現象解析モデルについて、100℃を超える温度範囲への適用も考慮して改良し、その妥当性を確認していくため、原位置試験によるデータの拡充を継続する。また、関係機関と連携を取りながら、現象解析モデルを適用した解析結果に対する、モデルやパラメータに存在する不確実性に起因する解析結果への影響を定量的に把握するための手法の高度化を進める。現象解析モデルの開発のために取得したデータは、3.3.3. (1) (i)「想定される様々な処分場環境を対象とした核種移行パラメータ設定に資するデータの拡充」に関する研究開発にも反映する。

(iii) コロイド・有機物の影響評価手法の構築・高度化

ここでは、コロイド及び有機物によるニアフィールドにおける核種移行挙動への影響評価手法の構築・高度化を行う。

これまで、緩衝材に起因するベントナイトコロイドについて、地下水のイオン強度と地下水流速を指標として生成条件の把握のための検討を、室内試験や原位置試験を通じて進めてきた。

今後は、関係機関と連携を取りながら、緩衝材に起因するベントナイトコロイドについて引き続き試験を実施して、ベントナイトコロイドの生成条件の把握を進めるとともに、ベントナイトコロイドによる核種移行挙動への影響を評価するための手法の構築を進める。セメントに起因するコロイドについても、同様に試験に基づく核種移行挙動への影響評価手法の構築を進める。有機物による核種移行への影響については、収着に関するデータの拡充を進める。

以上の知見は、後述 3.3.3. (1) (i)「想定される様々な処分場環境を対象とした核種移行パラメータ設定に資するデータの拡充」の研究開発へ反映する。

表 15 「地層処分システムの状態設定に資する現象解析モデルの高度化」に関する5年間の研究開発工程

技術開発要素	令和5年度	令和6年度	令和7年度	令和8年度	令和9年度
(i) 廃棄体に対する核種溶出モデルの構築・高度化	＜ガラス固化体＞				
	ニアフィールドの状態変化を反映した条件における室内試験データの取得				
	核種溶出モデルの改良				
(ii) ニアフィールド構成要素に関する現象解析モデルの高度化	室内／原位置等におけるデータ取得				
	現象解析モデルの妥当性の評価・確認				
	不確実性の定量化手法の高度化				
(iii) コロイド・有機物・微生物の影響評価手法の構築・高度化	＜コロイド＞				
	ベントナイトコロイド等による核種移行への影響評価手法の高度化				

(2) リスク論的考え方に則したシナリオの構築手法の高度化

シナリオの十分性や発生可能性，シナリオに基づく解析ケースやモデル・パラメータ設定などに関する妥当性を効果的かつ効率的に検討するための方法論を整備する。
閉鎖後長期の安全評価支援のための情報管理ツールを整備する。

処分場閉鎖後の安全評価における様々な不確実性への対処として，シナリオの想定にあたり，考え得る将来の処分場の状態を過不足なく抽出したうえで，それぞれのシナリオ発生の可能性を勘案し，そのシナリオが仮に発生した場合の影響の程度を捉えるという「リスク論的考え方」をとることが合理的である。引き続きこの考え方に基づいて，シナリオ構築手法の高度化を進める。これにより，シナリオの十分性や発生可能性の議論，及びシナリオに基づく解析ケースやモデル・パラメータ設定の妥当性の議論を，より効果的かつ効率的に進められるようにする。また，極めて発生可能性が小さいシナリオとして分類される，人間侵入シナリオと稀頻度事象シナリオについては，作成のための方法論等に関する国内外における最新の考え方等を反映して改良を図る。

(i) 閉鎖後安全評価に関する情報管理ツールの整備

これまでに，安全機能を視軸として，FEP²⁰の発生可能性を考慮した THMC 状態²¹の変遷に基づくシナリオの構築から，核種移行解析のケース設定までのプロセスについて，判断の経緯や結果及びその論拠を，ストーリーボード上で電子的に関連付けて管理するための機能を有するツールのプロトタイプを作成した。さらに，シナリオ構築から核種移行解析，線量評価計算に至る一連の解析評価に用いたモデルの体系とモデル間のデータの受け渡しを可視化した評価モデル及びコードに関するフローチャート（Assessment Model Flowchart（以下，AMF という。））の整備を開始した。

今後は，NUMO において，プロトタイプを用いて NUMO-SC における閉鎖後長期の安全性の評価技術に関する情報をツールに格納しつつ，その過程で利便性等，ツールの実践的機能の向上に対する要求事項を明らかにして，それらに対応する改良を進めていく。また，AMF については，技術開発の進捗を踏まえて恒常的に更新するとともに，これを一元的に管理できるようにツールの改良を行う。

(ii) 人間侵入シナリオと稀頻度事象シナリオに関する検討

国際機関や諸外国の実施主体，規制機関，国内における類似事業で示された評価の考え方やシナリオ等を参考に，人間侵入シナリオや稀頻度事象シナリオで取り扱う事象の選定や様式化に関する方法を検討してきた。今後も，NUMO において，国際プロジェクトや国際会議等を通じて情報（例えば，人間侵入に対する記録の保存の有効性等）を収集し，最新の知見を反映した評価手法の検討を実施する。稀頻度事象の発生可能性の検討にあたっては，3.1.1.

(1) 「長期的な自然現象の発生可能性及び地質環境の状態変遷に関する評価技術の整備」の成果を反映する。

²⁰ FEP：地層処分システムの各構成要素の特徴(Feature)，特徴に影響を与える事象.(Event)，地層処分システムの時間的変遷のプロセス(Process)の略称。

²¹ THMC 状態：熱的(Thermal)，水理学的(Hydrological)，力学的(Mechanical)，化学的(Chemical)な状態のこと。

表 16 「リスク論的考え方に則したシナリオの構築手法の高度化」に関する
5年間の技術開発工程

技術開発要素	令和 5 年度	令和 6 年度	令和 7 年度	令和 8 年度	令和 9 年度
(i) 閉鎖後安全評価に関する 情報管理ツールの整備	情報管理ツールのプロトタイプの使用を通じた改良点の特定		情報管理ツールの改良		
(ii) 人間侵入シナリオと稀頻 度事象シナリオに関する検討	諸外国の関係機関との情報交換や国際会議等を通じた情報収集と、シナリオやその様式化方法の検討				

3.3.2. 核種移行解析モデル開発

(1) 地層処分システムの状態変遷等を反映した核種移行解析モデルの高度化

処分場の状態の時間変遷を現実的に反映することによって、地質環境条件や設計オプションによる長期安全性への影響を比較検討可能な核種移行解析モデルを開発する。

核種移行解析の場として、設定する処分場の状態の時間変遷を反映することが可能な核種移行解析モデルの開発を継続し、より現実的に地層処分場の閉鎖後長期の安全性を検討することにより、地質環境条件間、設計オプション間の性能の比較を可能とする。あわせて、シナリオにおける不確実性やデータに関する不確実性を考慮し、合理的な保守性を確保して簡略化した核種移行解析モデル（システム評価モデル）の開発を行う。

(i) ニアフィールドにおける状態変遷を考慮した核種移行解析モデルの高度化

これまで、3.3.1. (1) 「地層処分システムの状態設定に資する現象解析モデルの高度化」において得られる情報に基づき、ニアフィールドの状態変遷をより現実的に設定したうえで、その変遷に応じて変質したセメント系材料や変質した緩衝材中の核種の移行挙動に関するデータを取得し、核種移行挙動への影響を考慮した解析モデルの開発に取り組んできた。

今後も、関係機関と連携を取りながら、この取り組みを継続するとともに、開発した核種移行解析モデルの高度化や妥当性を確認するための技術開発を進める。また、関係機関と連携を取りながら、時間変化を考慮した地質環境モデルやニアフィールドを対象とした複合的な現象に関する連成解析の結果を、核種移行解析モデルへ反映する手法を構築する。例えば、ニアフィールドの状態変遷に応じて核種移行パラメータの時間変化を考慮し、これに対応して核種移行解析が可能となるようなモデルの構築とそれを適用した解析の妥当性の確認等を進める。

(ii) 水みちの微細透水構造などを反映した核種移行解析モデルの構築・高度化

岩盤中の割れ目を水みちとした核種移行に関しては、これまで、割れ目を平行平板と仮定し、割れ目内のチャンネルングの効果をパラメータによる簡易な近似によって取り扱うとともに、結晶質岩（花崗岩）及び堆積岩（泥岩）の母岩マトリクス中における核種の拡散・収着を考慮した解析モデルの構築と適用を行ってきた。

今後は、関係機関と連携を取りながら、割れ目内における充填鉱物中の微細空隙や充填鉱物への収着、掘削影響領域を含むマトリクス部の間隙構造や鉱物分布等の不均質性といった水みちの微細透水構造を反映したより現実的な場を対象とした核種移行解析モデルを構築するとともに、異なる岩種や地下水条件を対象とした試験等を通じて、構築した核種移行解析モデルの妥当性を確認する。また、関係機関と連携を取りながら、複数の割れ目が存在するよりスケールの大きな場（数十 m から百 m 程度の空間領域）を対象として、既存の水理・物質移動モデル（割れ目ネットワークモデル）の妥当性を確認するための手法の開発を継続して進める。

表 17 「地層処分システムの状態変遷等を反映した核種移行解析モデルの高度化」に関する 5 年間の研究開発工程

技術開発要素	令和 5 年度	令和 6 年度	令和 7 年度	令和 8 年度	令和 9 年度
(i) ニアフィールドにおける状態変遷を考慮した核種移行解析モデルの高度化	変質した材料中の核種移行挙動に関するデータの取得				
	材料の変質の影響を考慮可能な核種移行解析モデルの高度化と妥当性の確認				
	複合的な現象に関する連成解析の結果を核種移行解析モデルへ反映する手法の構築				
(ii) 水みちの微細透水構造などを反映した核種移行解析モデルの構築・高度化	開発した核種移行解析モデルの妥当性の確認				
	既存の水理・物質移動モデルの妥当性を確認するための手法の開発と試験データの整備				

(2) 施設設計等を反映した核種移行解析モデルの高度化

地下深部から生活圏に至る広域スケールに対する、地質環境の時間的変化を考慮したモデルを開発し、処分場の設計による長期安全性への影響をより現実的に評価する。

廃棄体から地表の生活圏を含む広域スケール（涵養域から流出域を包含する数十 km × 数十 km の領域）を対象とし、地質環境の時間変遷を考慮可能となるよう核種移行解析モデルの高度化を進め、より現実的に地層処分場の閉鎖後長期の安全性について検討し、地質環境条件間や設計オプション間の性能の比較が可能となるような環境を整備する。

(i) 施設設計を反映した核種移行解析モデルの構築・高度化

これまでに、三次元のランダムウォーク粒子追跡解析に基づき、地質環境の長期変遷モデルや、地下施設の構成要素の配置や形状及び物理化学的特性を明示的に取り込んで、広域から、処分場領域、パネル領域、ニアフィールド領域までの各スケールに応じ、スケール間の整合性を確保して核種移行解析を実施することが可能な手法とモデルの開発を進めてきた。

今後は、後述 3.3.2. (2) (ii) 「地質環境の変遷に応じた生活圏評価手法の高度化」と連携して、NUMO において、廃棄体から生活圏における核種移行を一体的に取り扱うことが可能なモデルの構築を進める。あわせて、開発した解析モデルを用いた感度解析や、モデルやデータの不確実性による解析結果への影響の定量化のために、多数の解析ケースを現実的な計算時間で実施可能となるよう、NUMO において、DX の推進を図りながら、機械学習を適用し

て計算を高速処理する手法についても開発を進める。

(ii) 地質環境の変遷に応じた生活圏評価手法の高度化

これまで、四次元地質環境モデルを用いて、地質圏－生活圏インターフェイス（以下、GBIという。）の空間分布を反映可能な生活圏評価の方法論の構築を実施してきた。

今後は、NUMOにおいて、これに加えて GBI の時間変化や地表環境の変遷（例えば、地形変化に伴う地表近傍の水理場の変遷や、表層土壌の種類や酸化還元フロントの変遷などによる表層近傍の化学場の変遷など）を反映可能な生活圏評価の方法論へ高度化し、これに沿った評価モデルの構築を図るとともに、3.3.2. (2) (i) 「施設設計を反映した核種移行解析モデルの構築・高度化」と連携して、廃棄体から生活圏における核種移行を一体的に取り扱うことが可能なモデルの構築を、生活圏に至るまでの核種移行の解析結果が生活圏における核種移行解析結果に及ぼす影響を把握しつつ実施する。

表 18 「施設設計等を反映した核種移行解析モデルの高度化」に関する
5年間の技術開発工程

技術開発要素	令和 5 年度	令和 6 年度	令和 7 年度	令和 8 年度	令和 9 年度
(i) 施設設計を反映した核種移行解析モデルの構築・高度化	核種移行に関するビッグデータの機械学習を用いた解析技術の開発				
	←			→	
(ii) 地質環境の変遷に応じた生活圏評価手法の高度化	生活圏システムの構成要素の空間スケールを反映可能な生活圏評価手法の構築				
	←			→	
	← GBI や地形の時間変化を反映可能な生活圏評価手法の構築 →				

3.3.3. 核種移行解析に用いるパラメータ等に関するデータの整備

(1) 核種移行等に関するデータの取得及びデータベース整備

先新第三紀堆積岩類や沿岸域をはじめとして、多様な地質・地下水条件や処分場の状態変遷を反映した核種移行パラメータ設定に資するためのデータを拡充する。
原位置で取得するボーリングコアや地下水水質等の原位置試験によって得られるサイト固有の条件を反映して、パラメータを設定する手法を構築する。

熱力学、収着・拡散、土壌の分配係数といった核種移行解析に必要なデータベースについて、データの拡充による信頼性の向上を図り、第 3 章 3.3.2. 「核種移行解析モデル開発」で整備される地層処分システムの状態変遷や設計の特徴をより現実的に反映した核種移行解析や生活圏評価のためのモデルに対応して必要となるパラメータの設定に資する。こうしたデータの拡充にあたっては、3.3.1. 「シナリオ構築」で開発する、現象解析モデルの高度化によって得られる情報を考慮して適切に設計した、実験室や原位置における試験を実施し、これらのデータに基づいて上述したパラメータの設定に関する妥当性が説明できるようにしていく。また、こうしたデータを管理するためのデータベースについては、関係機関で利便性をもつ

て利用できるようシステムを高度化する。

さらに、原位置で取得するボーリングコアや、地下水水質等の原位置試験によって得られる固有の条件を反映して、パラメータを設定する手法の構築を進め、サイト条件により整合した安全評価への適用を図る。

(i) 想定される様々な処分場環境を対象とした核種移行パラメータ設定に資するデータの拡充

これまで、最新の文献等の調査に加え、室内試験を通じて熱力学データベース (TDB)、収着データベース (SDB)、拡散データベース (DDB) の拡充を図ってきた。特に、多様な地質環境等に対応できるように汎用性を重視して、一般的な条件でデータを取得するとともに、これまでデータが十分に整備されていなかった、比較的炭酸濃度が高い地下水が存在する場等に重点を置いて、岩石、緩衝材及び主要鉱物等への収着・拡散データを取得してきた。

今後は、関係機関と連携を取りながら、先新第三紀堆積岩類や沿岸域を念頭に、多様な地質・地下水条件や処分場の状態変遷を反映した核種移行パラメータ設定に資するよう、熱力学データ及び収着・拡散データの拡充を行う。これらのデータはデータベース (TDB, SDB, DDB) へ反映し、一元的な管理に資する。

(ii) サイト調査を反映した核種移行パラメータの設定手法の高度化

これまで、実際のボーリング調査により取得された現実的な地質環境情報や核種移行に関するデータ等に対して、核種移行パラメータ (溶解度、収着分配係数、拡散係数等) を設定する方法論の構築を進めてきた。

今後、関係機関と連携を取りながら、原位置で取得された様々なデータを総合的に勘案して、構築した核種移行パラメータ設定の方法論の適用性を確認する。

表 19 「核種移行等に関するデータの取得及びデータベース整備」に関する 5 年間の研究開発工程

技術開発要素	令和 5 年度	令和 6 年度	令和 7 年度	令和 8 年度	令和 9 年度
(i) 想定される様々な処分場環境を対象とした核種移行パラメータ設定に資するデータの拡充	多様な地質・地下水条件や処分場の状態変遷を反映した核種移行パラメータ設定に資する熱力学データ及び収着・拡散データの拡充				
(ii) サイト調査を反映した核種移行パラメータの設定方法の高度化	原位置で取得されたデータを用いた核種移行パラメータ設定の方法論の適用性確認				
		核種移行パラメータ設定方法論の改良			

3.4. 中長期的に研究開発を進めるうえでのツール・基盤の整備

セーフティケースを構成する科学・技術基盤に関する、3.1.「地質環境の調査と評価に関する技術」、3.2.「処分場の設計と工学技術」、3.3.「閉鎖後長期の安全性の評価技術」に関する技術開発を、相互に関連付けながら効果的に進め、その成果をセーフティケースとして統合す

る作業を適切に管理するために、技術マネジメントを支援する管理ツールを開発することが重要である。

そのために、各研究開発分野においてこれまでに得られた、また、今後得られる成果として蓄積される膨大な知識・情報・データを、事業期間を通じて管理するための知識マネジメントシステムの開発、地層処分の安全性やセーフティケースの内容について様々なステークホルダーとのコミュニケーションに資するツールの開発、セーフティケースの技術的信頼性を確認していくためのモニタリングシステムを支える基盤の整備等を引き続き進める。これらの成果を反映するとともに、OECD/NEAの国際プロジェクトIDKM（Information, Data and Knowledge Management）への参加等を通じて、地層処分場のデジタルツイン技術の検討を行う。

こうしたシステムやツールを開発することによってDXを推進し技術マネジメントの能力を高めて、セーフティケースの信頼性を向上させるという観点から優先的に取り組むべき課題の明確化や、より効果的な研究開発の考え方や進め方の策定に資する。

3.4.1. 知識マネジメントに関するツールの整備

セーフティケースに統合される多岐にわたる学術分野の膨大な知識・情報・データについて、事業の各段階において求められる要件を満たすために必要な知識を生産し、適切に統合してステークホルダーの意思決定に資するように透明性・追跡性をもって提示するとともに、意思決定の根拠とした知識を事業の完了まで維持・継承するといった一連の活動を効率的かつ効果的に実施できるよう、知識マネジメントを行うことが必要である。引き続き、これを支えるためのツールの整備を行う。

(1) セーフティケースの論証構造の可視化

NUMO-SCを対象に、討論モデルによる可視化と関連する知識ベースを一体的に管理するとともに閉鎖後安全評価の情報管理ツールと連携・統合する。

セーフティケースは多岐にわたる膨大な量の専門的な知識・情報・データを統合し文書化したものであり、特に地層処分分野以外の専門家や技術者、あるいは新たに地層処分に携わる技術者等にとって、安全な地層処分の実現性をどのような論理をもって説明しているのか、その論証構造の全体像を把握することは必ずしも容易ではない。このようなセーフティケースの論証構造の理解と、そこに含まれる暗黙知の表出化の一助とすること、並びに安全な地層処分の実現のために示すべき命題と判断（主張）、その論拠についてステークホルダーと効果的にコミュニケーションをとること、及びセーフティケースに統合した知識ベースについて全体の整合性を確保しながら次世代が効率的・効果的に更新すること、を支援するツールとして、討論モデル（argumentation model）という立論・反論の連鎖によって論証構造を樹形図として相互関係を可視化する表現方法を用い、NUMO-SCを構成する要件－主張－論拠－根拠情報の相互関係と根拠の十分性について視覚化を進めている。

これまでのNUMO-SCの一部を対象とした試行によって、討論モデルの適用性と有効性が確認できた。

今後は、NUMOにおいて、NUMO-SC全体を対象に引き続き討論モデルを用いて可視化す

るための取組みを実施するとともに、DXの推進を図りながら、討論モデルと関連する知識ベースを一体的に管理するシステムを開発する。この際、3.3.1. (2) (i)「閉鎖後安全評価に関する情報管理ツールの整備」で開発する閉鎖後長期の安全評価シナリオ構築から核種移行解析ケースの設定までを対象とした情報管理ツールとの連携・統合を考慮する。

(2) セーフティケースコミュニケーションに関するツールの整備

地層処分の安全性やセーフティケースに関する様々なステークホルダーとのコミュニケーションに資するツールを開発する。

NUMO-SCは地層処分に一定程度の知識を有する専門家が読むことを想定しているが、今後はNUMO-SCの技術的信頼性について、幅広い分野の専門家や、社会の理解と納得を得ることが重要である。特に、文献調査の受け入れを表明していただいた地域の様々なステークホルダーや規制者との対話においては、セーフティケースの内容が適切に伝わることが不可欠である。

しかしながら、地層処分は、非常に多岐にわたる技術分野の知識・情報・データを統合して構築するシステムであり、かつシステム全体の安全機能について考慮すべき全空間・時間領域に対して実証的な試験を実施することができないため、時間的・空間的な予測に関わる特別な方法論を用いる必要あり、その説明や理解は容易ではない。特に、地層処分の専門家が使用している専門用語には、他分野において用いられているものであっても、意図する意味合いが異なっている場合がある。こうした背景から、議論のすれ違いや誤解が生じ、統一的な視点に立った議論を行い、意思疎通を図ることが困難な場面が散見される（例えば、原子力学会「NUMO包括的技術報告書レビュー」特別専門委員会の議論においても、専門分野の異なる委員の間で、こうした議論のすれ違いや誤解により、統一的な視点を共有するまでに時間を要した）。

このことから、これまで地層処分と接点の少ない専門家や、地層処分に関心の高い方々等を対象として、地層処分の安全性について認識を共有するため、地層処分とそれ以外の分野の専門家間で、議論のすれ違いや誤解が生じている論点について、その原因を探るとともに、特に重要な用語や概念、考え方等を取りまとめ、地層処分の専門家と地層処分の専門家ではない、様々なステークホルダーとのコミュニケーションのための知識ベースを整備してきた。

また、3.4.1. (1)「セーフティケースの論証構造の可視化」で整備する知識マネジメントに関するツールは、安全な地層処分の実現に関する主張とその論拠についてステークホルダーとの効果的なコミュニケーションを支援するツールとしての役割が期待される。例えば、NUMOのホームページに掲載しているNUMO-SCは、報告書を構成する文書（PDF形式）が相互リンクを付与されて体系的に整理された状態で閲覧可能であるものの、大量の文書群に格納された相互に関連する情報を読者が辿りやすくするといった、ユーザーフレンドリーなツールとして改善する余地がある。

今後は、NUMOにおいて、以上のような点を考慮し、地層処分の安全性やセーフティケースの内容がステークホルダーに容易に伝えられるよう、コミュニケーションに資するツールの開発に取り組む。

(3) 廃棄物に関する包括的なインベントリ等の情報ベースの整備

廃棄物に関する特性情報を収集し、設計・安全評価といった用途を踏まえ知識ベース化を行う。

処分場の設計や閉鎖前の安全性の評価、閉鎖後の安全性の評価においては、放射性核種や非放射性の化学物質などのインベントリや、発熱率等といった廃棄物に関する特性情報が必要である。これまでは、関係機関と連携を取りながら放射性核種や人工バリアへ影響を与える化学物質などに着目して情報を収集し、設計・評価へ活用してきた。今後は、廃棄体に含まれる環境影響物質などの情報も加えた、より包括的な情報収集を実施するとともに、収集した情報を設計・評価での使用用途を踏まえて知識ベースとして整備する。また、使用済 MOX 燃料の再処理に伴う廃棄物特性の変化に関する情報についても、今後の核燃料サイクルに関する研究開発の動向を注視しながら収集する。

(4) 地層処分場のデジタルツイン技術の開発

OECD/NEA の国際プロジェクト IDKM (Information, Data and Knowledge Management) への参加等を通じて、地層処分場のデジタルツイン技術の活用を検討する。

特定のサイトに対するセーフティケースの作成にあたっては、包括的技術報告書を出発点として、最新の科学技術的知見を反映しながら、調査によって段階的に詳細化される環境条件に対し、規制要件や社会的な要件も踏まえ、設計因子に照らした設計オプションの比較を反復的に実施する。これにより、立地選定と処分場の設計の最適化を行う。この作業過程においては、膨大な情報、データ、知識を取り扱うことから、設計サイクルを短縮するとともに少ないマンパワーで進められるように効率化することが重要な課題である（最適化の方法論の開発は 3.2.1. (2) 「設計の最適化」において行う）。

このため、OECD/NEA の国際プロジェクト IDKM への参加等を通じて国際動向を把握し、デジタルツイン技術を活用して、コンピュータ内の仮想空間に地層処分場を可視化するためのソフトウェアプラットフォームの検討に取り組む。これにより、特定のサイトに対して、テーラーメイドで立地選定と処分場の設計を効率よく最適化することを支援する。

具体的には、サイトの条件に応じて構築する地質環境モデルに基づき、調査計画のオプションと設計オプションとの多数の組合せについて、様々なシミュレーションを通じた比較検討を実施できるようにする。ここで、調査のオプションとしてはボーリング調査の位置や物理探査の範囲などがあり、設計のオプションとしては、処分概念（縦置き、横置き、PEM 方式など）、パネルの配置、処分坑道の掘削・閉鎖方法、人工バリアの仕様（セメント系材料、オーバーパック、緩衝材の材料や形状・厚さなど）、回収可能技術などが考えられる。調査のオプションには環境影響や費用、土地利用制限など、設計オプションには処分場構成要素の調達方法や費用などを属性情報としてそれぞれ与えることで、設計因子（閉鎖前及び閉鎖後の安全性、工学的実現性、回収可能性、環境保全、モニタリング、経済的合理性）の観点からオプションを相互に比較することを支援する。また、段階的に拡充する地質環境条件のデータや各種モニタリングデータなどをタイムリーに反映するとともに、包括的技術報告書などに記載されたこれまでの膨大な情報、データ、知識や、今後の科学技術の進展や研究開発成

果と関連付けることにより，リアルタイムで集約された情報を把握し，異なる技術分野の専門家間だけでなく，非専門家とのコミュニケーションを促進する環境を整備する。

今後，概念構築，既存技術の調査，要件定義などを行った後，上述のソフトウェアプラットフォームの検討を行う。

表 20 「知識マネジメントに関するツールの整備」に関する 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	令和 5 年度	令和 6 年度	令和 7 年度	令和 8 年度	令和 9 年度
(1) セーフティケースの論証構造の可視化	← セーフティケースの論証構造の可視化 →				
(2) セーフティケースコミュニケーションに関するツールの整備	← セーフティケースコミュニケーションに関するツールの整備 →				
(3) 廃棄物に関する包括的なインベントリ等の情報ベースの整備	← 廃棄物に関する包括的なインベントリ等の情報ベースの整備 →				
(4) 地層処分場のデジタルツイン技術の開発	← 概念構築、既存技術の調査、要件定義 →		← ソフトウェアプラットフォームの検討 →		

3.4.2. モニタリングシステムを支える基盤の整備

事業期間全体を見据えたモニタリングの考え方と進め方の具体化，モニタリングに関する技術課題の抽出，知識マネジメントシステムの中で一元的にモニタリングデータを管理する仕組みの構築に取り組む。

モニタリングは事業が適切に行われていることを確認する重要な手段である。モニタリングは，その目的に基づき以下の四つに分類する。

- ① 処分場の操業・閉鎖における放射線安全に関するモニタリング
- ② 一般労働安全として施設内の良好な作業環境の確保に向けたモニタリング
- ③ 施設周辺の環境保全に関するモニタリング
- ④ 周辺母岩の地質環境の状態変化（例えば，処分場の建設・操業期間における地下水位の変化など）の観測（ベースラインモニタリング）や閉鎖後長期の安全確認（安全評価）に資するための情報やデータの取得を目的とした人工バリア（例えば，埋戻し後の緩衝材の飽和現象など）に関わるモニタリング（性能確認モニタリング）

これらのモニタリングを実施するために必要な機器やモニタリングシステムの開発に向けて，事業期間全体を見据えたモニタリングの考え方と進め方の具体化，及びモニタリングに関する技術課題の抽出を行う。あわせて，モニタリングで得られたデータを知識マネジメントシステムの中で，長期にわたり一元的に管理する仕組みを構築する。

これまで，概要調査の段階から実施するボーリング孔を利用した地下水ベースラインモニ

タリングに資する長期耐久性を有するモニタリング装置（3.1.2.（2）「地質環境に応じた個別調査技術の最適化」参照）などを進めてきている。しかしながら、事業に必要なモニタリング項目全体を視野に入れた網羅的な技術課題の整理は十分に行われておらず、喫緊の課題として取り組む必要がある。

今後は、NUMOにおいて、サイトの調査、建設、操業、閉鎖、閉鎖後の管理期間といった長期にわたる事業の各フェーズにおいて、「いつ、何のために、どこを対象として、何をモニタリングするのか」というモニタリングの考え方と進め方を具体化する。そのうえで、既存技術で対応できない、あるいは信頼性の向上が必要なモニタリング項目の抽出を行い、今後に向けた技術課題を具体化するとともに必要に応じた技術開発に取り組む。

3.1.2.（2）「地質環境に応じた個別調査技術の最適化」に記載している地質環境特性に関するモニタリング技術については、事業全体を見据えたモニタリングの考え方と進め方を明確にしたうえで、地質環境調査や処分場の設計、安全評価への情報提供という観点で将来的な技術開発課題を抽出する。地層処分事業に対する社会的受容性の向上という観点から、少量の廃棄物をパイロット施設に処分してモニタリングを行うといった海外の検討事例や、処分場閉鎖後の一定期間を対象としたモニタリングの在り方等について、検討を進める。

表 21 「モニタリングシステムを支える基盤の整備」に関する 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	令和 5 年度	令和 6 年度	令和 7 年度	令和 8 年度	令和 9 年度
モニタリングシステムを支える基盤の整備	<p>地層処分事業全体を見据えたモニタリングの進め方の具体化</p> <p>←</p>	<p>社会的受容性向上に資するモニタリングの在り方の調査</p> <p>←</p>	<p>←</p> <p>技術開発課題の整理と開発計画の具体化</p> <p>←</p>		

3.5. 技術情報の発信

地層処分事業に関する技術の信頼性についてステークホルダーにご理解いただくうえで、既往の技術開発成果を含む技術情報を広くタイムリーに発信し続ける。

地層処分技術の信頼性について国民や地域住民の方々などにご理解いただくうえで、既往の技術開発成果を含む技術情報を広く発信し続けることが重要である。これまで NUMO では技術開発成果を取りまとめた技術報告書（NUMO-TR シリーズ）の作成，国内外の様々な学会等における発表や論文投稿，講演会，ウェビナーなどの形で情報発信を行ってきた。特に，2022 年度からは，毎年の技術開発成果を鳥瞰できるように「技術開発成果概要 2021 NUMO-TR-22-02」（例えば，2021 年度は 32 テーマ）として紹介している。さらに，技術に関するステークホルダーとの対話の促進や，社会的共通理解形成に向けた取組みの一つとして，広報部門と協力し，NUMO のホームページに「技術開発トピックス」を新規に設置した。この中で論文投稿，学会発表及び NUMO 技術報告書の公表といった技術開発の成果を，簡潔な解説付きでタイムリーに掲載する取組みを進めている。

今後もこれらの取組みをさらに拡充し，3.4.1.(2)や 3.4.1.(4)における技術開発成果を利用するとともに，例えば NUMO の技術報告書等を人工知能（AI）を活用して英文化し，海外への情報発信をさらに加速させることや，視覚的に分かりやすい，例えば，動画や漫画などを利用した方法の検討など，様々な技術分野の専門家だけでなく幅広いステークホルダーを対象とした情報発信に取り組む。これらの取組みにより，NUMO の技術開発に対して外部の評価を受けながら，技術者集団として信頼いただける組織を目指す。

4. おわりに

2023年3月に改訂された全体計画に基づき、同全体計画公表後の技術開発に関わりのある様々な動向も反映して、今後の調査段階で必要となる技術を計画的かつ着実に開発し、特定のサイトでの調査や段階的に更新していくセーフティケースに反映できるよう、地層処分の事業主体として優先的に進めるべき課題を明示して本計画を策定した。全体計画第2章でも述べられているように、地層処分の安全性を評価するうえで課題となっている、不確実性の把握と定量化の方法及びその低減のための対策に留意しつつ、地質環境の調査と評価、処分場の設計と工学、閉鎖後長期の安全評価という主要な三つの技術開発分野で開発計画を策定した。あわせて、中長期的に技術開発を進めるうえで重要な、技術マネジメントを支援するツール・基盤の整備について計画を策定した。

技術開発の実施にあたり、国及び関係研究機関と連携をより強化し、国などが取り組むジェネリックな研究成果を特定のサイトの課題に反映しながら、これを進めていく。効率的かつ効果的に技術開発を進めるため、引き続き評議員会の評価・提言や技術アドバイザー委員会の助言をいただくとともに、特にAIなど最新の科学技術を反映してDXを推進する。また、国内外における共同研究などを通じて国際協力を一層進め、世界の英知を結集することで、地層処分技術の信頼性向上を図る。あわせて、地層処分事業においては、技術開発のみならずボーリング技術といった基盤となる技術の維持や更新、関連する人材の確保が必要不可欠であることに留意し、国及び関係研究機関だけでなく、大学や産業界との連携をさらに強化していく。

技術開発の成果については適宜積極的に国内外に広く発信し、それに対する客観的な評価を受けることで技術的な信頼性のレベルを確認しながらセーフティケースの作成に反映するとともに、計画の達成度を明確にして技術開発に取り組む。また、こうした技術情報の発信により、地層処分に関するステークホルダーとの対話の促進や社会的な理解の形成において共通の知識基盤となるように取り組んでいく。

本計画は、技術開発成果の達成度やサイト選定の進捗等、今後の事業の進展に応じて適宜見直しを検討する予定である。

参考文献

- [1] NUMO（原子力発電環境整備機構）：OECD/NEA による包括的技術報告書の国際レビューコメントを受けた原子力発電環境整備機構の対応について，報告書，令和5年6月5日.
- [2] NUMO（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－ 要約，NUMO-TR-20-01.
- [3] NUMO（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－ 概要書，NUMO-TR-20-02.
- [4] NUMO（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－ 本編・付属書，NUMO-TR-20-03.
- [5] OECD/NEA：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，報告書，令和5年3月.
- [6] 経済産業省：GX 実現に向けた基本方針～今後10年を見据えたロードマップ～，方針，令和5年2月.
- [7] 経済産業省：エネルギー基本計画，計画書，令和3年10月.
- [8] 経済産業省：特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針，方針，令和5年4月.
- [9] 原子力委員会：原子力利用に関する基本的考え方，方針，令和5年2月.
- [10] 原子力規制委員会：特定放射性廃棄物の最終処分における概要調査地区等の選定時に安全確保上少なくとも考慮されるべき事項，考慮事項，令和4年8月24日.
- [11] 資源エネルギー庁：文献調査段階の評価の考え方，方針，令和5年11月.
- [12] 地層処分研究開発調整会議：地層処分研究開発に関する全体計画（令和5年度～令和9年度），計画書，令和5年3月.

原子力発電環境整備機構
(略称：原環機構)

Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)