地層処分研究開発調整会議
（第 10 回会合）
資料１-2

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）

（案）

令和　年　月

地層処分研究開発調整会議

目次

1.　はじめに…… 1
1.1　研究開発計画策定の経緯…… 3
1.2　全体計画（平成３０年度～令和４年度）に基づく研究開発の現状…… 6
（1）地層処分に適した地質環境の選定及びモデル化…… 6
（2）処分場の設計と工学技術…… 6
（3）閉鎖後長期の安全性の評価…… 8
（4）技術マネジメント…… 9
（5）代替処分オプション…… 10
1.3　全体計画の策定にあたって考慮すべき地層処分事業を取り巻く情勢の変化…… 10

2.　研究開発の基本的な考え方と進め方…… 12
2.1　セーフティケースを軸とした研究開発の管理…… 12
（1）地層処分システムの安全性と不確実性への対処…… 12
（2）研究開発の段階的管理…… 13
（3）研究開発分野の設定…… 14
（4）研究開発の推進による技術的信頼性の向上…… 15
2.2　各分野における研究開発の進め方…… 15
2.3　技術マネジメントの一層の強化…… 18
（1）要件のマネジメント…… 19
（2）知識のマネジメント…… 19
（3）品質のマネジメント…… 19
（4）人的資源のマネジメント…… 20
2.4　分野間・機関間連携の推進…… 20
（1）各機関の役割と連携…… 20
（2）分野間の連携…… 21
（3）産学官を通じた様々な分野の専門家との連携…… 22
（4）国際協力・国際連携…… 22

3.　研究開発項目と内容…… 23
3.1　地質環境の調査と評価に関する技術…… 23
3.1.1　自然現象の影響…… 23
（1）火山・火成活動の発生及び影響に関する調査・評価技術の高度化…… 23
（2）深部流体の移動・流入に係る現象理解及び影響に関する調査・評価技術の整備…… 24
（3）地震・断層活動の活動性及び影響に関する調査・評価技術の高度化…… 24
（4）隆起・侵食に関する調査・評価技術の高度化…… 25
（5）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…… 25

3.1.2　地質環境の特性 26
（1）沿岸海底下の地質環境特性に関する調査・評価技術の整備 26
（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 27
（3）地質環境に関する個別調査技術の最適化 28
（4）サイト調査のための技術基盤の強化 29

3.2　処分場の設計と工学技術 31
3.2.1　設計体系の整備 31
（1）設計の信頼性向上 31
（2）設計の最適化 33
3.2.2　工学技術の実証的研究 36
（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・対策技術の体系化 36
（2）人工バリアの製作・施工技術の高度化 37
（3）処分場の建設・操業技術の高度化 39
（4）処分場閉鎖技術の開発 40
（5）廃棄体回収技術の開発 42
3.2.3　閉鎖前の安全性の評価 43
（1）閉鎖前の安全性の評価シナリオの構築 43
（2）閉鎖前の安全性評価技術の高度化 44
（3）事故対応技術の開発及び具体化 44

3.3　閉鎖後長期の安全性の評価技術 46
3.3.1　シナリオ構築 46
（1）地層処分システムの状態設定のための現象解析モデルの高度化 46
（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 49
3.3.2　核種移行解析モデル開発 51
（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 51
（2）施設設計等を反映した核種移行解析モデルの高度化 52
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 53
（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 53

3.4　中長期的に研究開発を進める上でのツール・基盤の整備 55
（1）知識マネジメントに係るツールの整備 55
（2）モニタリングシステムを支える基盤の整備 56

3.5　代替処分オプションに関する研究開発 58
（1）使用済燃料直接処分 58
（2）その他の代替処分オプション 59

4.　おわりに 60

1. はじめに

わが国では、原子力の利用に伴い発生する放射性廃棄物のうち、使用済燃料の再処理で有用物質を分離した後に残存する物を固形化した高レベル放射性廃棄物と、使用済燃料の再処理等に伴う放射性廃棄物であって長期間にわたり環境に影響を及ぼすおそれがあるもの（以下、TRU廃棄物という）を、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（以下、最終処分法という）」（平成１２年制定、平成１９年改正）に則って、地下300m以上深い地層に埋設する方式で最終処分（以下、地層処分という）することとしている（図１）。安全な地層処分を実現するには、埋設した放射性廃棄物に含まれる放射性物質が数万年以上にわたって人間の生活環境に影響を及ぼさないように、天然バリアとして機能する安定な地質環境を有する処分地（サイト）を選定し、選定したサイトの中に多重の人工バリアを施した特定放射性廃棄物を埋設する処分場を設計・建設・操業していくことが必要である（図２）。こうした取組を社会に受け入れていただけるためには、その妥当性を確認することができる知識や技術を確保し、事業期間を通じてその信頼性を高めていくことが必要である。

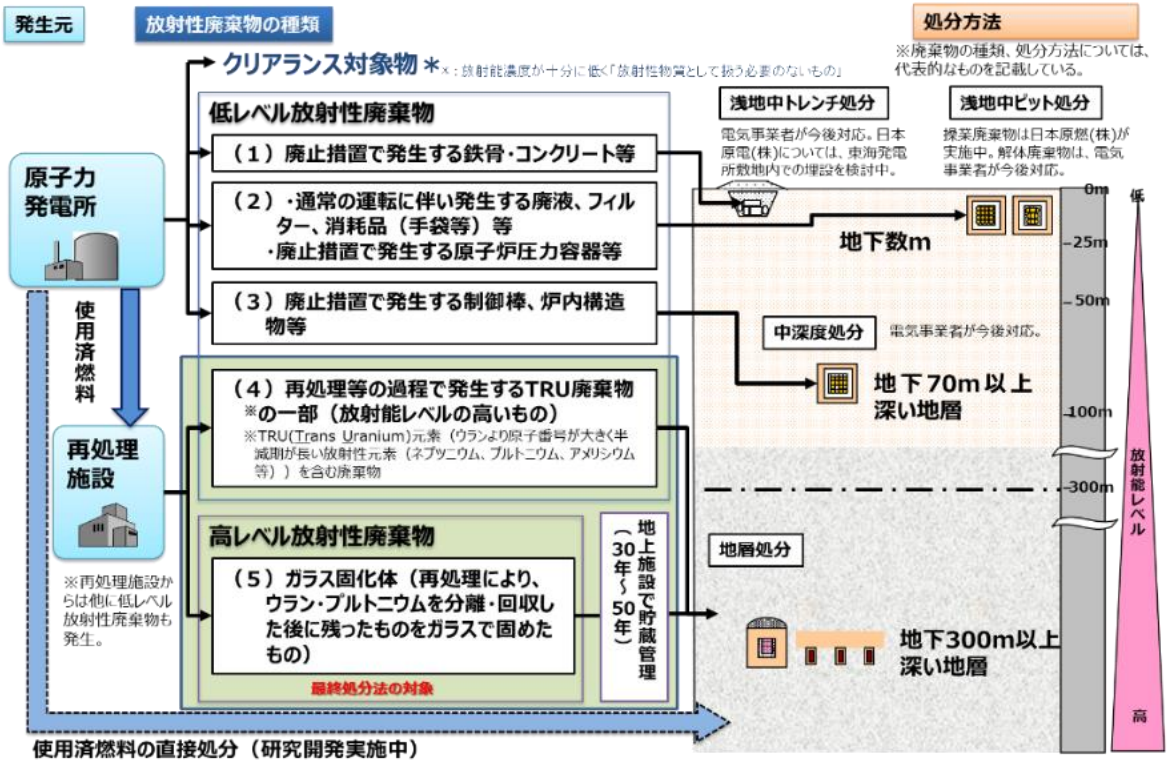


図１．放射性廃棄物の種類と処分方法

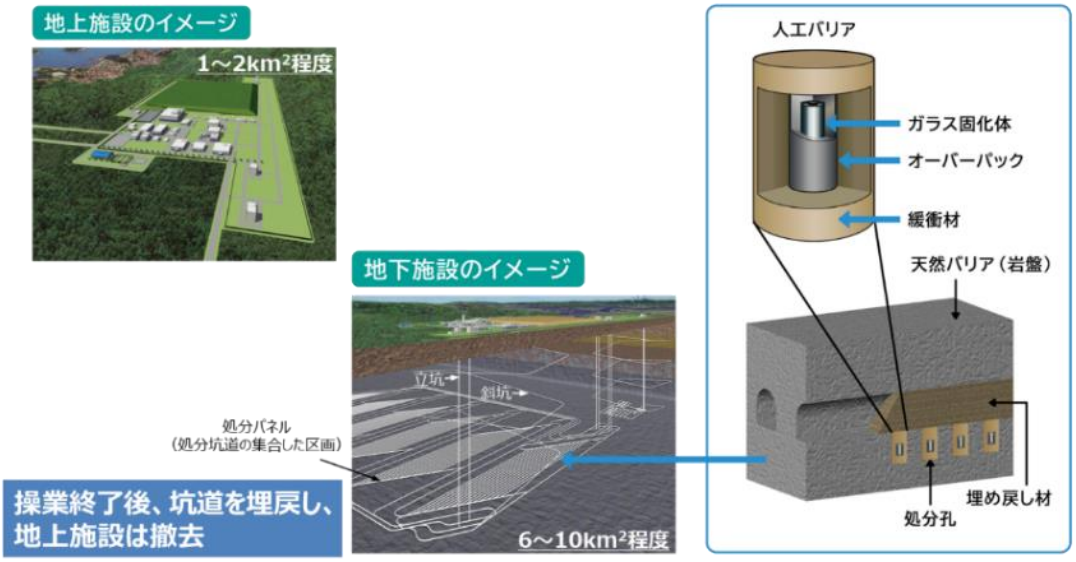


図２．地層処分の施設と多重バリアシステムのイメージ[1]

地層処分研究開発調整会議（以下、調整会議という。別添１参照）は、わが国における長期にわたる地層処分事業（図３）を支える研究開発を、国及び関係研究機関と実施主体が連携・協力し、適切な役割分担の下で全体を俯瞰しつつ総合的、計画的かつ効率的に推進するために、「地層処分研究開発に関する全体計画（以下、全体計画という）」を策定・改訂してきている。

全体計画（令和５年度～令和９年度）の策定にあたっては、最終処分法制定から現在までの研究開発計画の策定経緯（1.1節）及び開発の現状（1.2節）、地層処分事業を取り巻く近年の情勢変化（1.3節）を踏まえてその内容の検討を行い、今後５年間で取り組むべき研究開発に関する基本的な考え方と進め方を定めた（第２章）。第３章では、これに沿って、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、並びに中長期的に研究開発を進める上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及び代替処分オプション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取りまとめた。

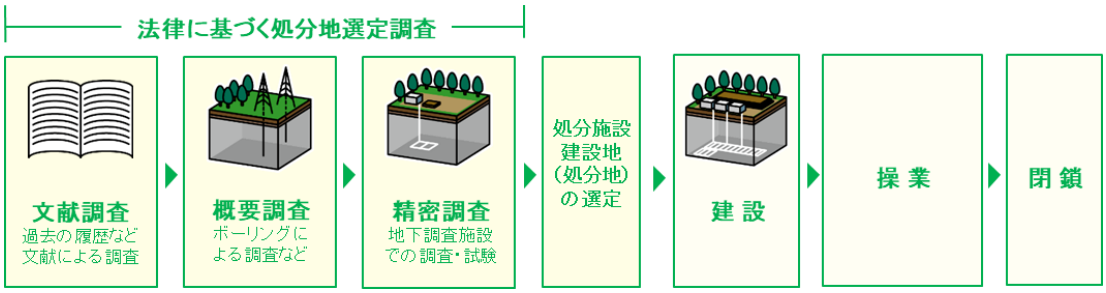


図３．わが国における長期にわたる地層処分事業[2]

[1] 「高レベル放射性廃棄物の最終処分に関する対話型全国説明会　説明資料（資源エネルギー庁　NUMO）」より。

[2] 「地層処分、安全確保の考え方（原子力発電環境整備機構）」を一部修正。

1.1 研究開発計画策定の経緯

＜地層処分基盤研究開発調整会議の開始＞

高レベル放射性廃棄物については、核燃料サイクル開発機構（現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）による「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第２次取りまとめ－」（以下、第２次取りまとめという）によってわが国の幅広い地質環境を考慮した地層処分の技術的信頼性が示され、これに対する国による技術的レビューの結果、日本において高レベル放射性廃棄物の地層処分は技術的に実現可能であるとされた。これを技術的基盤として最終処分法が制定され、日本の地層処分計画は研究開発の段階から事業の段階に移行した。地層処分研究開発も事業段階に適合したもの（事業実現性の確認とそれを支えるための研究開発）へと移行した。TRU廃棄物については、平成１７年にJAEA及び電気事業連合会が公表した「TRU廃棄物処分技術検討書－第２次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ－」によって、同様にわが国の幅広い地質環境を考慮した地層処分の技術的信頼性が示され、平成１９年に最終処分法の対象に加えられた。

平成１７年１０月に閣議決定された原子力政策大綱で、地層処分に係る研究開発について「国及び研究開発機関等は、全体を俯瞰して総合的、計画的かつ効率的に進められるよう連携・協力するべきである」とされたこと等を受け、同年、経済産業省の主宰により、JAEAをはじめとする関係研究機関が参画する「地層処分基盤研究開発調整会議」（以下、基盤調整会議という）が設置された。

その後、「原子力政策大綱に示している放射性廃棄物の処理・処分に関する取組の基本的考え方に関する評価について（平成２０年９月　原子力委員会）」において、原子力発電環境整備機構（以下、NUMOという）に関し、「処分事業の実施主体としてのNUMOは、研究開発機関等において行われる関係研究開発の実施内容に反映されるべき技術的要求事項を明確に示すなどして、研究開発機関等との連携・協力においてリーダーシップを発揮できるよう、技術開発の企画・推進・評価能力を一層充実して行くことが必要」との指摘がなされた。このため、当初オブザーバー参加であったNUMOは、同年より基盤調整会議のメンバーとなった。以降、NUMOが示したニーズを取り込みつつ基盤研究開発が進められた。NUMOでは、基盤調整会議の設置された平成１７年以降、基盤調整会議の議論を踏まえ、実施主体としての研究開発計画を策定してきている。

＜地層処分研究開発調整会議への改組と全体計画（平成３０年度～平成３４年度）の策定＞

「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　閣議決定。別添５参照）」（以下、基本方針という）に基づき平成２８年５月に放射性廃棄物専門部会が設置された。同部会は、原子力委員会の下に専門的かつ総合的観点から関係行政機関等の活動状況に係る評価等を行い、地層処分に関する研究開発への提言を表１のようにまとめている。

表1　地層処分の研究開発に関する原子力委員会の評価（平成２８年９月　最終処分関係行政機関等の活動状況に関する報告書　原子力委員会決定）

・研究開発等において、関係行政機関等の間の一層の連携強化が望まれる。 ・地層処分基盤研究開発調整会議の運営の透明性の確保が望まれる。 ・地層処分基盤研究開発に関する全体計画は、NUMOの実施する技術開発計画と一体化し、いわゆる「真の全体計画」となることが望まれる。またNUMOは、包括的技術報告書を有効に活用し、いわゆる「真の全体計画」の策定に向け、一層のリーダーシップを発揮することが望まれる。 ・過去の知識を整理・伝承し、今後活躍できる人材を継続的に確保・育成していくための方策の検討・充実に、産学官協働で取り組むことが望まれる。

この提言を踏まえ、平成３０年度以降の５年間（平成３０年度～平成３４年度）の全体計画の策定については、NUMOもメンバーに加え、新たに調整会議へと改組した上で行うこととなった。

平成３０年度～平成３４年度の全体計画の策定にあたり、調整会議では表１の評価を踏まえ、NUMOのリーダーシップのもと、各研究項目の相互関係を明確にしつつ研究開発を進めることとした。その際、地層処分システムの操業時及び閉鎖後長期の安全性の論拠を体系的に取りまとめたものであり、地層処分の安全性について社会とのコミュニケーションを図るための基盤となるセーフティケース[3]の作成や更新のための作業に研究開発の成果を反映するという基本的視点に立つとともに、調整会議参加機関以外の外部有識者からもご意見を伺った。また、NUMOがセーフティケースとして取りまとめつつあった包括的技術報告書（以下、NUMO-SCという）（レビュー版）（平成３０年１１月公表）の作成過程で明らかとなった課題を全体計画に網羅することとし、それぞれの研究開発の目的がセーフティケースの作成に有効なものとなるように目標を設定した。これに加え、これまでの研究開発過程で抽出された課題、国の審議会等[4]で抽出された課題、科学的特性マップの作成及び提示に際して寄せられた技術的信頼性に関する国民からの声等も含めて網羅的に課題を抽出した上で研究課題を整理し、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等を明らかにした。

さらに、平成２９年７月に開催された最終処分関係閣僚会議において、科学的特性マップ提示後の取組として「研究開発の推進と体制強化」、「各国共通課題の解決に向けた国際的な連携、貢献」を行うべきであるとされたことを踏まえ、事業実施に必要な技術マネジメント能力の向上や人材育成、国際連携・貢献に関する内容についても、中長期的に研究開発を進める上での重要事項として全体計画に含めることとした。また、使用済燃料の直接処分等代替処分オプションに関する調査・研究については、原子力委員会の見解（「今後の原子力研究開発の在り方について（見解）、平成２４年１２月」等を踏まえ示されたマイルストーン

[3] セーフティケース：国際原子力機関（IAEA）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（OECD/NEA; 2013）では「処分場が安全であるという主張を定量化し実証するための証拠、分析、論拠を体系的に取りまとめたもの」と定義され、事業主体が自主的に作成、更新する。詳細は第 2 章で述べる。

[4] 国の審議会等：「地層処分技術ワーキンググループ」、「沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会」、「可逆性・回収可能性の確保に向けた論点整理に係る検討会」

を見据え、直接処分に関する研究開発が平成２５年度に、その他代替処分オプションに関する研究開発が平成２７年度に着手されている。これら代替処分オプションに関する調査・研究については、基本方針（別添５）及び当時のエネルギー基本計画（平成２６年４月　閣議決定）においても、幅広い選択肢を確保する観点から推進することとされており、中長期的に研究開発を進める上での重要事項であることから、国の基盤研究開発として実施してきている（次々項＜代替処分オプションの研究開発＞参照）。

平成３０年３月に取りまとめた全体計画は、PDCAサイクルを回しながら研究開発を進めていくことが重要であるとの基盤調整会議設置以来の考えと、平成３０年度から平成３１年度にかけて国内外の機関によるNUMO-SC（レビュー版）の外部レビューを実施する計画であったことから、平成３２年度以降の計画については平成３１年度末を目途に見直すこととされていた。

＜全体計画（平成３０年度～令和４年度）の改訂＞

令和元年１２月に日本原子力学会により取りまとめられ公表された包括的技術報告書レビュー報告書[5]では、平成３０年３月に作成した全体計画の作成過程で抽出された今後取り組むべき課題を変更しなければならないような指摘はなかった。資源エネルギー庁とNUMOが共催して進めている対話型全国説明会やNUMOが実施したNUMO-SC（レビュー版）の説明会において示された処分技術や研究開発に関するご意見も、改訂前の全体計画に盛り込まれている研究開発課題で網羅されるものであった。

以上のような状況を踏まえつつ、上記の見直し作業が行われた。作業にあたっては、全体計画に沿って平成３０年度から令和２年度にわたって実施した関係研究機関及びNUMOの研究開発実績も考慮し、外部有識者を交えて全体計画の見直しに関する議論が調整会議で行われた。その結果、全体計画の基本構成については当初のままとし、課題間の関係性を明確にするためにそれを樹形図として示すことや、各課題の５年間の進め方を工程表として明示することとし、令和２年３月にそれらを反映した全体計画の改訂版を取りまとめた。

＜代替処分オプションの研究開発＞

使用済燃料の直接処分に関する研究開発は、「今後の原子力研究開発の在り方について（見解）」（平成２４年１２月　原子力委員会）等に基づいて、平成２５年度から実施されている。平成２７年度には、直接処分に関するわが国における当時の技術レベルと、直接処分に関する技術的検討をとおして抽出された今後の課題を提示した「わが国における使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評価－直接処分第１次取りまとめ－」（以下、直接処分第１次取りまとめという）が JAEA によって取りまとめられた。その後は、直接処分第１次取りまとめにおいて抽出された課題への対応を進めてきた。また、使用済燃料の直接処分以外の代替処分オプションについての調査研究は、基本方針（別添５）を受けて平成２７年度から開始された。その際、国内外で検討されてきている様々な代替処分方法を整理し、比

[5]一般社団法人日本原子力学会ホームページ：https://www.aesj net/sp_committee/com_numo

較検討を行った上で、諸外国で調査研究が進められており、人間の生活環境からの離隔距離を高めるといった利点を有する超深孔処分を、使用済燃料直接処分以外の代替処分オプションとして着目し、調査研究を進めることとした。平成３０年度～令和４年度は、直接処分に特有な課題である処分容器の長寿命化、臨界安全評価、使用済燃料からの核種溶出挙動評価等を中心に、研究開発を実施した。

1.2 全体計画（平成３０年度～令和４年度）に基づく研究開発の現状

関係研究機関及びNUMOは全体計画に基づき、それぞれの役割に応じて研究開発課題に取り組み、地層処分事業を適切に進めるために現段階で必要となる技術の整備を着実に進めている。これまでの研究開発の成果と今後取り組むべき課題は以下のとおりである。

(1) 地層処分に適した地質環境の選定及びモデル化

① 自然現象の影響

沿岸部海域と陸域との区別なく地質環境に期待される安全機能を損なう可能性のある火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食などの自然現象の著しい影響を回避するために、サイト調査において必要な調査・評価技術の整備に向けた事例を蓄積し、有用な技術を抽出した。さらに調査によって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、それでもなお将来において自然現象が発生する可能性とその地質環境への影響を評価するための手法の適用性などを提示した。

今後も抽出した技術の適用可能条件や適用限界の確認を継続し、合理的・体系的にサイト調査を実施するための方法論を整備し、自然現象の影響を評価する技術の信頼性の向上を図る。

② 地質環境の特性

沿岸域の陸域から海域を含む多様な地質環境条件を対象として、地層処分の観点から好ましい特性が長期にわたって安定的に維持される地質環境を選定するための調査・評価技術及びそれらを踏まえた体系的な調査・評価技術の蓄積を行う。また、並行してサイト調査の技術的な信頼性向上に資する地質環境、その調査・評価技術に関する最新の科学的知見の集約及び品質マネジメントシステムの整備を実施した。

今後もこれらの調査・評価技術の検討、知見の集約及び品質マネジメントシステムの整備を継続することでサイト調査に必要な技術のさらなる信頼性向上に取り組む。

(2) 処分場の設計と工学技術

① 人工バリア

人工バリア設計の信頼性向上を目的として、有望な候補としてきた人工バリア材料を対象に、様々な地質環境条件における安全機能に係る特性データを多数取得し、知見を拡充した。取得したデータを評価し、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[6]及び代替材料の適用性の見通しを得た。これらの成果は、サイト調査で得られる情報によって詳細化される地質環境特性に応じた設計の具体化・最適化に資するものである。また、人工バリア設計の工学的成立性の観点から、人工バリアの製作・施工技術の改良や効率化の検討及び要素技術の試験に着手した。

今後もこれらの取組を継続し、安全性を説明する論拠及び人工バリア設計の工学的成立性についてさらに信頼性の向上を図る。

② 地上・地下施設

地上・地下施設が所要の安全機能を確保するための設計の考え方、手順及び方法を整備し、設計の判断指標や基準を検討した。処分場の建設及び閉鎖に係る掘削損傷領域の評価技術、湧水対策技術並びに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。特にNUMO-SCで提示した坑道が水みちとなることを防止する技術については、埋め戻し材やプラグなど坑道シーリングによる閉じ込め性能を評価するための手法を提示し、室内試験から工学規模の試験を実施して様々なシーリング方法の性能の確認を進めた。

今後は、坑道スケールからピットスケールの原位置での実証試験などを通じて坑道や処分ピットの掘削前から閉鎖段階までの調査・設計・評価技術の検証と体系化を行う。

③ 回収可能性

高レベル放射性廃棄物の複数の定置概念に対して、地下施設での実証試験を通じて、回収技術の実現性の見通しを得た。TRU廃棄物については、NUMO-SCで提示した定置概念の課題整理と、PEM[7]方式を採用した場合の回収技術の概念検討、及び高レベル放射性廃棄物を対象として開発した回収のための要素技術の適用性を確認し、回収技術の実現性の見通しを得た。

回収可能性の維持を目的とした地下坑道の開放に伴う地下施設の管理や閉鎖後長期の安全性等への影響評価技術（坑道の力学的安定性、湧水量や坑道周辺の化学的条件変化の解析技術）について、様々なサイト環境条件や地下施設レイアウトを対象とした試行を行うとともに、国内外の地下研究施設の実測例との比較を繰り返すことで、評価技術の適用性を向上させることができた。

今後も、回収技術の実用性の向上を目的とした要素技術の改良と効率化を実施するとともに、システムとしての成立性の検討を進める。回収可能性の維持に伴う影響評価技術の信頼性向上を目的とした解析技術の検証と様々な地質環境条件への展開などの研究開発を継続する。

[6]処分場の設計において、設計対象に関し選択肢として準備される多様な案（option）のことをいう。処分場概念のレベルから、構造、材料、操業方法などのレベルのさまざまな選択肢を包含する。

[7]Prefabricated Engineered Barrier System Module の略称。

④　閉鎖前の安全性の評価

閉鎖前の安全性の評価シナリオ、評価技術及び事故対応技術について、国内外の原子力関連施設での評価事例及び諸外国の検討事例などを参考に整備した。

今後も最新動向の調査、設計の詳細化に伴う閉鎖前の安全性の評価を試行するなどを通じた評価シナリオ及び評価技術の開発と改良によるさらなる信頼性向上の取組を継続する。

(3) 閉鎖後長期の安全性の評価

①　シナリオ構築

シナリオ構築の前提となる処分場の状態設定に対する技術的信頼性のさらなる向上を図るため、ニアフィールドの構成要素において生起する現象や核種移行挙動に影響を与える可能性のある現象について、室内・原位置試験により理解を深めた。試験により取得したデータと現象をより忠実に表現するための数理モデル（現象解析モデル）を適用した解析結果との比較・分析を行うことで、現象解析モデルを簡略化する妥当性の根拠を拡充した。

今後もこれらの取組を継続し、現象理解を進めるとともにそれに基づく現象解析モデルの改良による精緻化と不確実性の定量化手法、及びこれらに基づく解析モデルの合理的簡略化手法について開発を行い、現象解析に基づく処分場の状態設定の信頼性を向上させる。これによって、安全評価において考慮すべきシナリオの記述と発生の可能性に関する根拠の充実を図る。

②　核種移行解析モデル開発

核種移行解析モデルに対する技術的信頼性をさらに向上させるために、ニアフィールドの地質環境や設計仕様をより忠実に反映した処分場スケールにおける核種移行解析モデルへの改良とともに、地下深部から地表までの広域スケールでの核種移行解析を全体的に取り扱うことが可能なモデル及びそれと組み合わせた生活圏評価モデル作成の方法論の整備を進めた。

上述したニアフィールド構成要素において生起する現象の結果想定される処分場の状態変遷をモデルへ適切に反映するとともに、変質した人工バリアや母岩中における核種移行挙動に関する室内試験や原位置試験を進め、取得したデータと核種移行モデルの解析結果との比較による簡略化した核種移行解析モデルの妥当性の評価等を通じて、核種移行解析モデルの改良を行った。

今後もこれらの取組を継続し、広域スケールの核種移行解析モデルと生活圏評価モデルを統合した、廃棄体から生活圏における核種移行までを統一的に取り扱うことが可能な解析モデル作成の方法論構築を推進する。また、作成した核種移行解析モデルや使用するパラメータ（次項③参照）に付随する不確実性の影響を定量的に把握するための不確実性定量化手法の開発を進める。

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

核種移行パラメータ設定プロセスの信頼性をさらに向上させるために、地質環境及び生活圏の時間変遷を含めて想定される様々な条件に対応した核種移行パラメータに関する試験データを拡充した。地質環境条件への依存性が高い核種移行現象（拡散・収着）に関して、条件に柔軟に対応して核種移行パラメータを設定することが可能となるよう、地質環境条件に応じたパラメータ値を推定するための数理モデルを作成した。

今後も、パラメータの線量評価結果への影響度や感度の分析等に基づく優先順位に沿ってデータ拡充を継続するとともに、作成した核種移行パラメータ値推定のための数理モデルのさらなる信頼性向上のために、先端分析技術や計算科学手法を用いた現象理解の深化を推進する。さらに、モデル解析における不確実性の定量化に必要となる、核種移行パラメータなどが取り得る幅の設定に資するための実測データを拡充する。

(4) 技術マネジメント

関係研究機関及びNUMOは、地層処分事業及びそれを支える研究開発に必要な人材を育成するために、実験技術等の移転を含む共同研究、現場実証試験を通じた各機関の若手技術者の技能向上を図るとともに、地層処分に係る技術・専門知識を学ぶ合同研修会を開催している。また、これらのことや、出前授業の実施等を通じて、地層処分分野の人材の裾野拡大に貢献した。

NUMOは、知識マネジメントの仕組みの構築にあたり、最新の科学的知見と各機関の研究開発成果が統合されたNUMO-SCを安全な地層処分を実現するための知識ベースとして考慮する。これを強化するために、NUMO-SCで用いた地質環境特性データや核種移行解析及び線量評価解析の入出力データを格納するデータベースの構築、セーフティケースにおける要件－主張－論拠－根拠情報の相互関連を体系的に表現・保存する討論モデルの検討、閉鎖後長期の安全評価に係るシナリオ構築からモデル・データ設定までの一連の情報について相互の関連性を電子的に確保した上で安全評価に関する知識・情報を的確かつ効率的に管理できるツールのプロトタイプ開発等を推進した。また、国際機関（経済協力開発機構／原子力機関（以下、OECD/NEAという）、国際原子力機関（以下、IAEAという）等）における知識マネジメントの検討グループに参加し、各国実施主体の取組や国際動向を知識マネジメントの検討に反映した。

関係研究機関は、人工バリア設計や安全評価における核種移行パラメータ設定に資するよう、緩衝材基本特性、熱力学データ、収着データ、拡散データ等のデータベースに係る情報の更新を進めた。NUMOは電力会社等と連携して、使用済燃料の燃焼履歴等を反映した廃棄体の放射能インベントリの分布を推定する方法論の検討を行った。

関係研究機関及びNUMOは、国際学会などにおける積極的な情報発信を行うとともに、国際機関が実施する委員会やプロジェクト等に多数参加し、国際動向の把握と国際貢献を実施している。さらに、NUMOは海外実施主体との共同研究（スイス放射性廃棄物管理共同組合（Nagra）、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）、カナダ核燃料廃棄物管理機関（NWMO）、英国放射性廃棄物管理会社（RWM）、米国エネルギー省（DOE）

及びローレンス・バークレー国立研究所（LBNL）、情報交換会議（ドイツ連邦放射性廃棄物機関（BGE）、韓国原子力環境公団（KORAD）及び台湾電力）、及び国際共同研究プロジェクト（グリムゼル試験場における各種国際共同研究プロジェクト、鉄－ベントナイト相互作用の理解に関するキルナ・ナチュラル・アナログ・プロジェクト及び生活圏評価に関するBIOPROTAプロジェクト）等に参画した。関係研究機関も一部これらの国際共同プロジェクトにNUMOと役割分担して参加するとともに、各機関においてその他の国際共同研究に参画している。

今後もこれらの取組を通じて、国、NUMO、関係研究機関は、安定した人材育成と確保、知識マネジメントの強化及び国際連携・貢献について、連携・協力して行う。

(5) 代替処分オプション

使用済燃料の溶解挙動など直接処分に特有な現象を理解・評価するための技術基盤の整備と、その他の代替処分オプションに関する最新の知見の拡充等を実施した。諸外国における直接処分の処分容器である銅に着目し、わが国の処分環境で想定し得る硫化物の濃度に応じた処分容器としての寿命評価の見通しを提示した。また、わが国の地下水における炭酸濃度に着目し、炭酸濃度とウラン酸化物の溶解速度の関係を定量化した。さらに各研究テーマで、試験データの拡充や評価モデルの構築、わが国における代替処分の実現に向けた課題の提示等一定の成果を上げた。

今後は代替処分システム全体を俯瞰した上で代替処分特有の課題を見直し、システムの成立性の確認を目指す。

1.3 全体計画の策定にあたって考慮すべき地層処分事業を取り巻く情勢の変化

令和５年度～令和９年度の５年間を対象とする次期全体計画の策定にあたっては、平成３０年度から令和４年度までの研究開発の進展（1.2節）に加え、以下のような地層処分事業をめぐる情勢の主な変化を考慮した。

- 令和２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（令和３年１０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について準備会合（令和４年３月開始）を経て、正式に協定発効した（令和５年２月）。
- 政府主催のGX[8]実行会議で取りまとめられた「GX実現に向けた基本方針」が閣議決定され、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（令和５年２月）。また、

[8] GX（グリーントランスフォーメーション）:「産業革命以来の化石エネルギー中心の産業構造・社会構造をクリーンエネルギー中心へ転換すること」（経済産業省「GX 実現に向けた基本方針」より）

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を強化する方針案が確認され、基本方針（別添５）の改訂案がパブリックコメントにかけられた（令和５年２月）。

- 原子力規制委員会より「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」が決定された（令和４年８月）。
- NUMO-SCについて、OECD/NEAの国際レビューチームより報告書[9]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（令和５年１月）。

以上の状況及び平成３０年度からの研究開発実績を踏まえ、令和４年６月に調整会議を再開し、外部有識者を交えて議論を行い、今後５年間の全体計画を策定した。計画の実施状況は適宜調整会議において確認し、新たな状況の変化への対応等も含め、必要に応じて全体計画を見直す。

[9] OECD/NEA（2023）， 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

2. 研究開発の基本的な考え方と進め方

全体計画（平成３０年度～令和４年度、令和２年改訂）の策定にあたっては、1.1 節で述べたように、わ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、NUMO-SC の作成過程で明らかになった課題を考慮して、取り組むべき研究開発を反映している。こうした考え方は、国、関係研究機関及び NUMO が連携して進めるわ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。

その後、日本原子力学会のレビューを経て修正を行い公表された NUMO-SC について、OECD/NEA の国際レビューも実施された（1.3 節）ことにより、わが国における最新のセーフティケースの一般的構造や内容が妥当なものとして示されたことから、これを最新のセーフティケースとして参照し、引き続きセーフティケースの作成という観点で、この全体計画の策定を行うこととした。国、関係研究機関及び NUMO は、第３章で述べる研究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研究開発に取り組む。

全体計画（令和５年度～令和９年度）の策定にあたっては、これまでと同様、調整会議における議論や有識者のご意見を反映し、セーフティケースの構造に沿って各研究項目の相互関係を明確にしつつ検討を進めた。

以下では、地層処分を取り巻く情勢の変化と研究開発の現状を踏まえ、長期にわたる地層処分事業を俯瞰した上で常に技術的信頼性の向上を目指すという、セーフティケースを軸とした研究開発の管理の考え方を示す（2.1 節）。これに基づいて各研究開発分野における研究開発の進め方（2.2 節）と、研究開発を進める上で重要な要件として、技術マネジメントの一層の強化（2.3 節）及び分野間・機関間連携の推進（2.4 節）を述べる。

2.1 セーフティケースを軸とした研究開発の管理

(1) 地層処分システムの安全性と不確実性への対処

地層処分システムを構成する、広域にわたる空間的に不均質な地質環境を把握することや長期間にわたる時間的な変化を予測することには限界があり、システム全体に求められる機能を直接的に実証することは困難である。地質環境の調査や評価によって得られる情報・データを統合して構築する地質環境モデルは不確実性[10]を伴っている。また、人工バリアも含め、将来にわたって地層処分システムに生ずる現象やその影響を理解することも、科学的知識の限界などにより、同様に不確実性を伴う。

したがって、地層処分の安全性について社会に受け入れていただくためには、システムに長期間にわたって生ずる個別の現象やそれを考慮した設計について可能な限り最新の科学技術を取り入れてシステムとしての安全性に関する論拠を提示し、社会とのコミュニケーションを積み重ねることによって地層処分全体の安全性を説明することが必要となる。この説明

[10]一般に、不確実性は、対象となるシステムや集団に関して観測される数値（観測値）に本来的に存在している差異や変動に起因する偶然的不確実性（Aleatory uncertainty）、及び対象となるシステム、集団、現象などに関する知識または情報の不足に起因する認識論的不確実性（Epistemic uncertainty）に分けられる。不確実性をゼロにすることは出来ない。地層処分における不確実性への基本的な対応方針として、不確実性の「特定」「回避」「低減」「評価」という４つが挙げられる。詳細は NUMO-SC 本編第 2 章を参照。

文書が「セーフティケース」である。

セーフティケースを構成する主要な要素（2.1（3）参照）である安全評価では、地層処分システムの将来のふるまいに関するシナリオを作成し、それに沿ったモデルとデータを用意して将来の人間やその環境への放射線学的影響を、線量あるいはリスク[11]として定量的に評価する。上述した不確実性は、こうしたシナリオやモデル・データの中で適切に取り扱う必要がある。一般に、確率分布などによって定量的に表現することが可能な事象に対しては、線量とそれが発生する確率の積に基づくリスクを算出する。確率分布で表現できず定量化することが難しい不確実性については、安全評価上、十分な保守性を持たせるようにシナリオ、モデル及びデータを設定して線量を算出したうえで、こうしたシナリオやモデル及びデータで表現されるシステムの状態が生ずる可能性について論じておく。このようなセーフティケースや安全評価の考え方は国際的に共通しており、その目的や性格、一般的構造などが国際レベルで論じられている[12]。NUMO-SC は、こうした考え方に加えてわが国の多様な地質環境からサイトを調査・評価する技術やわが国で得られている地下深部の地質環境の情報等に基づき作成されている。

研究開発によって、地層処分システムとその将来にわたる時間的変遷に関する空間的・時間的不確実性を把握し、継続的に低減していくことで技術的な信頼性を向上させていくことが重要である。併せて、安全性を説明する上で導入すべき合理的保守性を提示するための方法論についても、研究開発を進める中で検討しておくことが必要である。また、地層処分事業には長い期間を要し、その間にセーフティケースの前提となる社会環境条件は変化し、科学技術は自ずと進歩する。こうした事業遂行上の変化は、セーフティケースの作成や、そのための研究開発の進め方を検討する上での不確実性ととらえることができる。研究開発計画の策定にあたっては、こうした不確実性に対応できるような仕組みを整えておくことが重要である。「代替処分オプションの研究開発」は、こうした不確実性への対応として、引き続き全体計画の中に位置づけることとする。

(2) 研究開発の段階的管理

事業全体を俯瞰してセーフティケースを作成・更新していく考え方については、NUMO-SC の第 7 章に論じられており、その概念が図 4 のように示されている。NUMO-SC は、わが国における安全な地層処分の実現性を一般的に示すためのセーフティケース（ジェネリックなセーフティケース）であり、事業が進捗し、特定の地域に対するセーフティケースを開発する段階になれば、これを基本形としてサイトの環境条件に基づくサイトに固有のセーフティケース（サイトスペシフィックなセーフティケース）を構築する。このような長期的な事業展開を念頭に置きつつ、従来通り、適切な計画期間（5 か年）を設定して段階的に研究開発を進め、セーフティケースの信頼性を高めていく。その過程においては、これまでも実施していたように、セーフティケースを作成するための境界条件の確認（1.3 節参照）や研究

[11]リスクについては IAEA の定義にしたがい、人間への影響を表す指標として発生確率×影響の程度で表す。
[12]例えば、OECD/NEA（2004）：Post-closure safety case for geological repositories, NEA No. 3679.

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し、必要に応じて研究計画の改訂を行う。

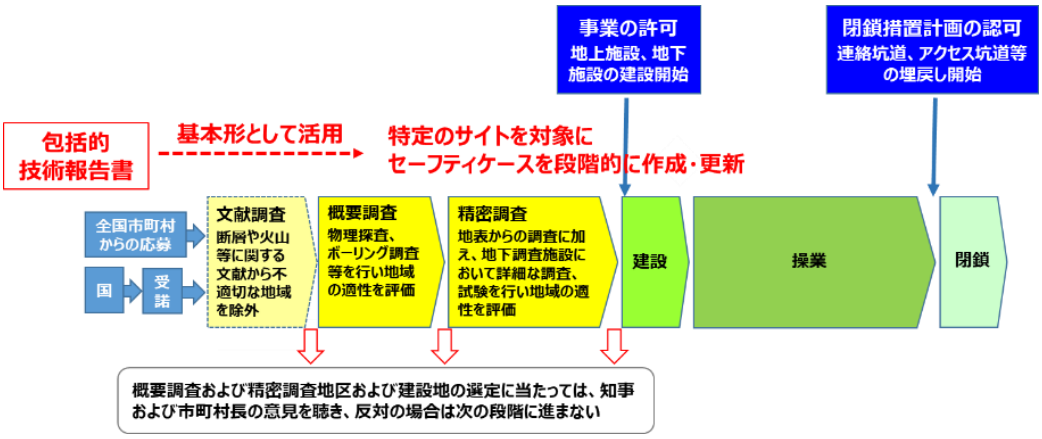


図４．事業の段階に応じたセーフティケース作成の概念

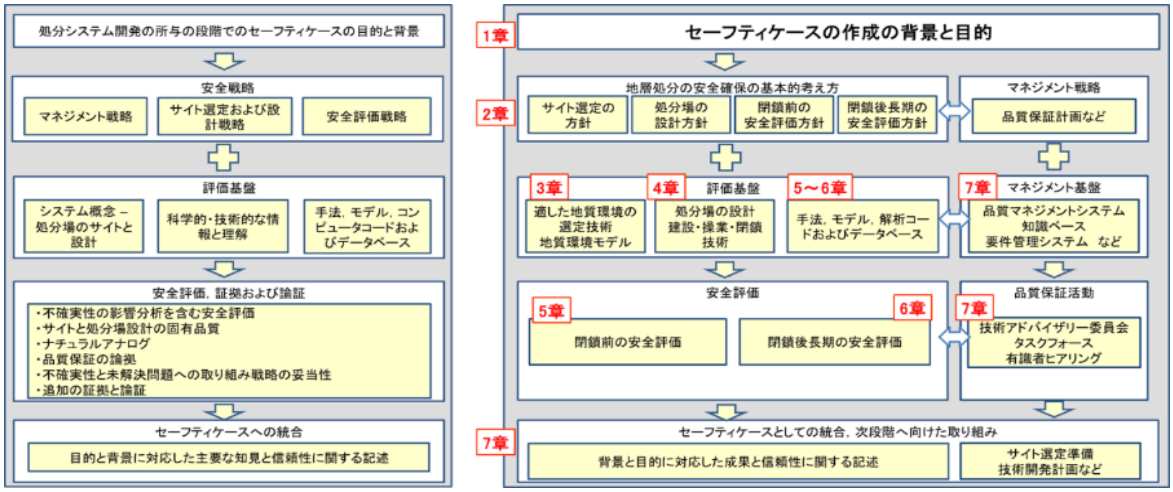
(3) 研究開発分野の設定

地層処分では、適切なサイトを選定し、そのサイトの条件を考慮した処分場を設計して多重のバリアを構成し、処分する放射性廃棄物を閉じ込め、人間の生活環境から隔離する。これによって、人間の監視がなくても極めて長期間にわたる安全性を確保するための受動的なシステム（地層処分システム）を構築する。このシステムが長期間にわたって安全機能を発揮することについては、シナリオとモデル解析を用いた予測に基づく安全評価によって行う。

構築される地層処分システムと安全評価のための方法論などは、図５の評価基盤を形成する。評価基盤はセーフティケースに対する技術的信頼性の基礎となるものであり、研究開発の主要な分野として、評価基盤に関連する「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」を従来と同様に設定する。

セーフティケースの信頼性、つまり地層処分による安全確保全体の信頼性を高める観点では、上記の科学的基盤に加え、多面的な論拠が用いられる。これらに関連して、ナチュラルアナログの利用やモニタリングシステムの開発、技術マネジメント（2.3 節参照）を支援するための管理ツールの開発等、技術的な信頼性を向上させるための研究開発を位置付けることとする。また、地層処分分野における DX[13]の推進を図るため、デジタルツイン等の活用、各研究開発分野や技術マネジメント（知識マネジメント、人材育成）における機械学習や AI、IoT 技術などを活用したデジタル化や自動化の方法論を検討し、逐次適用を進める。

[13]DX（デジタルトランスフォーメーション）：経済産業省のデジタルガバナンス・コード 2.0 では「企業がビジネス環境の激しい変化に対応し、データとデジタル技術を活用して、顧客や社会のニーズを基に、製品やサービス、ビジネスモデルを変革するとともに、業務そのものや、組織、プロセス、企業文化・風土を変革し、競争上の優位性を確立すること。」と定義される。



セーフティケースの一般的構造
OECD/NEA（2013）The nature and purpose of the post-closure safety cases for geological repositories, NEA/RWM/R(2013)1.より引用しNUMOが和訳

包括的技術報告書（NUMO-SC）の構成
NUMO（2021）包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－、NUMO-TR-20-03 より引用

図５．セーフティケースの一般的構造と NUMO-SC の構成

(4) 研究開発の推進による技術的信頼性の向上

2.1(1) から 2.1(3) に基づき、国、研究開発機関及び NUMO は、①技術的信頼性として専門家が納得できる科学技術的な視点での信頼性（technical reliability）を高め、②それを基盤として地層処分の安全性に関する国民の視点での納得感（confidence）をさらに向上させるため、今後５年間の研究開発に取り組む。

①について、NUMO-SC は現段階でのわが国における地層処分の長期の安全性を裏付ける論拠を体系的に整理したものであり、その中でさらに技術的信頼性の向上が図られるべきとされた課題に取り組むことで、時間やリソースを集中して研究開発を効率的かつ効果的に進めることが可能となる。②について、国民・地域住民等との対話活動やセーフティケースに対する国内外の専門家によるレビューを通じて抽出された課題は、社会からの技術的な信頼を得ながら地層処分事業を推進する上で考慮することが必要である。

2.2 各分野における研究開発の進め方

前節で設定したセーフティケースの科学的基盤に関連する研究開発分野における研究開発においては、様々な地質環境条件に対する調査・評価に柔軟に適応して処分場設計の最適化を可能にする利用可能な様々な技術オプションを用意し、それらがセーフティケースの中で技術的信頼性を向上させることを確認しつつ進めていくことが重要である。また、地層処分システムの対象となる時間の長さやシステムの中で生じる複雑な現象をできる限り忠実に把握するための室内試験や原位置試験を進めることが重要である。

上記を念頭に置き、概要調査以降の段階の円滑な事業推進のため、1.2 節で述べた現状と

今後の課題（セーフティケースの信頼性を向上させるという観点での課題）に対応するための各研究開発分野における研究開発の進め方について示す。

① 地質環境の調査と評価に関する技術に係る研究開発

サイト調査において、地質環境に期待される安全機能を損なう可能性のある自然現象の著しい影響を回避するとともに、地層処分の観点から好ましい特性が長期にわたって安定的に維持される地質環境を選定するためのサイト調査をより合理的・体系的に実施するための方法論を整備する。この際、沿岸域の陸域から海域を含む多様な地質環境条件を対象とすることに重点を置くとともに、処分場の設計及び安全評価における研究開発の進展を踏まえて開発を進める。地下研究施設を利用した原位置試験などを通じて技術の適用性を確認しながら、これらの技術を今後の事業の進展に合わせて適時整備することにより、地層処分に適した地質環境の選定と、処分場の設計及び安全評価の基盤となる地質環境モデルの構築に関する技術的信頼性の向上に資する。

併せて、地質環境モデル及びそれを構築するための地質環境特性データ等の関連情報について、データベースシステムを活用した一元的な管理方法などの検討を行い、DX を推進する。

② 処分場の設計と工学技術に係る研究開発

これまで取り組んできた人工バリアや地上・地下施設等の処分場を構成する個別要素を対象とした研究開発や技術オプションの整備で得られた研究開発成果を統合し、システムとして組み合わせた場合の成立性を様々な因子（NUMO-SC で示した設計因子等）を考慮して確認していく。さらに、様々な技術オプションの安全性や実現性に関する信頼性の向上に資する検討を継続的に進めることで、設計の詳細化及び最適化への準備を整える。このように信頼性を高めつつ技術オプションを継続的に更新し、今後のサイト調査で明らかとなる様々な地質環境条件に対して柔軟に対応できる処分場設計を可能にしていく。

また、段階的な技術の実証を通じて、処分場の建設・操業・閉鎖に係る技術、及び廃棄体の回収技術に関する工学的成立性を、工学規模試験や原位置での試験を活用しながら確認していく必要がある。廃棄体の回収可能性や様々な自然現象に対する処分場の閉鎖前安全性の評価については、ステークホルダーとの対話活動の中で取り上げられることも多く、継続的に技術的信頼性を高めていく。特に、精密調査の段階に構築する地下調査施設においては、地質環境等サイト固有の条件に対する各種技術の適合性や施工性・品質管理手法の妥当性の確認等を行う。したがって、今後５年間では、これらの実証試験において検証すべき課題とその確認方法について明確にすることに重点を置く。併せて、建設・操業システムの自動化などを対象として DX を推進する。

個別要素を対象とした研究開発から、システムとしての成立性により重点を置いた研究開発に移行することを明確にするため、処分場の設計と工学技術に係る目次構成を全体計画（平成３０年度～令和４年度）から変更する。

③ 閉鎖後長期の安全性の評価技術に係る研究開発

これまでと同様に、閉鎖後長期の安全性の評価技術に関する主要な構成要素であるシナリオ構築、シナリオに対応した核種の移行挙動を数値解析するためのモデル開発（核種移行解析モデル開発）、開発したモデルによる核種移行解析に用いるパラメータ等に関するデータの整備のための研究開発を進め、最新の科学的知識を適切に反映するとともに、不確実性に対して合理的な保守性を設定した評価手法に改良していくことによって、安全評価の信頼性の向上を図る。

シナリオの構築に関しては、室内試験や原位置試験を利用して地層処分システムで生起すると考えられる様々な現象について、それらの相互作用も含めた理解の深化を図り、これらの現象解析モデルの開発を継続する。これらの現象解析モデルを用いることによって、システムの状態変遷をより精緻に記述したシナリオの作成に資する。

シナリオに沿って地層処分システムの安全機能を評価するための核種移行解析モデルについては、地質環境モデルや処分場の設計の特徴を反映し、空間スケールに応じた詳細度で処分場から生活圏までの核種移行解析を一体的に実施することが可能なモデルの開発を行ってきている。このモデルを基盤として、上記現象解析モデルの開発により精緻化したシナリオに即したモデルへの改良を進める。併せて、現象の理解に伴う不確実性（現象解析モデルの不確実性）やシナリオに伴う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のためのモデル（システム評価モデル）の開発を行う。このように、現象解析モデルとシステム評価モデルの不確実性の取り扱いを明確にして、両者を明確に関係づけながら開発する。また、試験データとの比較や専門家のレビューなどを通じた体系的な検証（verification）と妥当性確認（validation）の方法論を構築し、開発したモデルの妥当性に関する検討を行い、信頼性の向上を図る。

様々な現象解析モデルや核種移行解析モデルの開発に合わせて、核種移行解析に用いるパラメータを設定するための方法論の信頼性向上と、それを適用したデータ整備を継続する。

これまでに開発を行ってきた安全評価に関する情報管理システムの改良・高度化を進めるとともに、安全評価における複雑で高度な解析を支援するための機械学習の適用など、安全評価における DX の推進を図る。

④ セーフティケースの信頼性に関する多面的な論拠に資する取組

セーフティケースの信頼性に関する多面的な論拠に資するため、長期のアナログを傍証として活用するナチュラルアナログに関する研究開発、設計通りに人工バリアや地下施設が構築されていることの確認や地層処分システムの長期的安全性の評価のための初期条件を把握するためのモニタリング技術の検討、放射能インベントリの変動が処分場の設計や安全性に及ぼす影響を評価するために必要な対象廃棄物の特性情報の拡充・特定、大深度地下構造物に対する耐震性評価手法の整備、及び技術マネジメント（2.3 節参照）を支援する技術に関する研究開発を進める。

⑤ 代替処分オプションに関する研究開発

代替処分オプションに関する研究開発については、使用済燃料（集合体）とガラス固化体との違いや、使用済燃料の多様性（炉型、燃料の種類、燃焼度等）を踏まえた上で、引き続き国の基盤研究として実施する。具体的には、使用済燃料の多様性を考慮した臨界安全評価手法や、使用済燃料（集合体）に特徴的な核種放出挙動評価手法等を開発する。さらに、ガラス固化体の地層処分と共通する手法が適用可能な部分の活用を図りつつ、直接処分等代替処分システムの成立性に関する基盤情報を整備拡充する。得られた成果は適時取りまとめる。

2.3 技術マネジメントの一層の強化

段階的な意思決定とともに進める地層処分事業においては、事業の各段階で求められる技術を適切に準備し、利用可能な状態を維持しなければならない。また、地層処分事業を進めることに対する社会の理解を得るためには、地質環境の調査・評価技術、工学設計技術、処分場閉鎖後の長期安全性を確認するための安全評価等、多岐にわたる分野の時間的に変容していく科学技術を適切にセーフティケースへ統合し、技術が信頼に足るものであることについて説明することが必要である。

これら必要な技術を計画的かつ着実に開発・整備していくためには、図６に示す地層処分に関する技術マネジメントが適切に行われることが必要である。そのためには、全体計画（平成３０年度～令和４年度）でも示した要件・知識、品質、人材育成、国際協力・国際連携といった様々な観点から、マネジメントの在り方の検討やそれを円滑に推進するための仕組み・体制の強化を進めるとともに、2.2 節「④セーフティケースの信頼性に関する多面的な論拠に資する取組」で述べたような支援技術の整備が引き続き必要である。

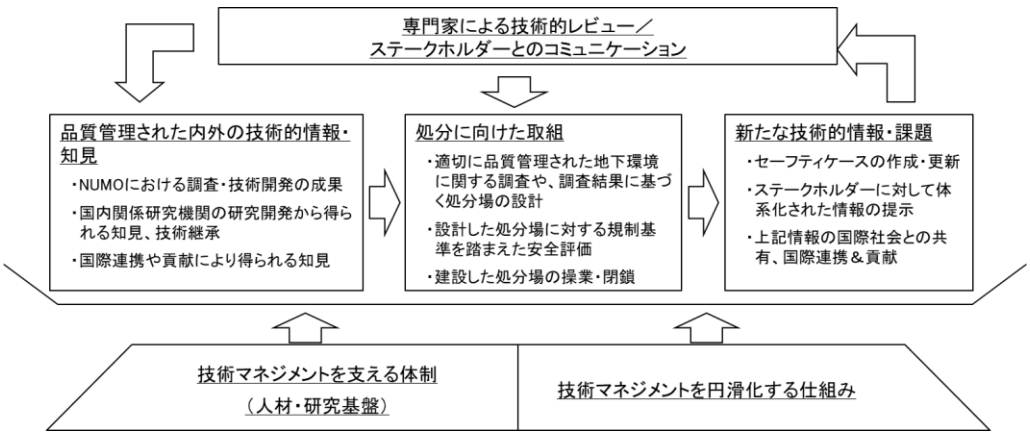


図６．技術マネジメントの全体像[14]

[14] 全体計画（平成３０年度～令和４年度）（令和 2 年 3 月改訂版）の図 3.1.2-1 を一部修正。

(1) 要件のマネジメント

地層処分事業は、事業に係る様々な要件（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なければならない。関係研究機関及びNUMOは、社会の変化や事業の進展に応じて変化する可能性のあるこれらの要件に関連付けながら、地質環境調査や処分場の設計、安全評価に関わる要件を具体化し、相互の整合性を確保しながら変更管理していくことを可能とする要件マネジメントシステムの開発を、DX の推進を図りながら継続する（図７）。

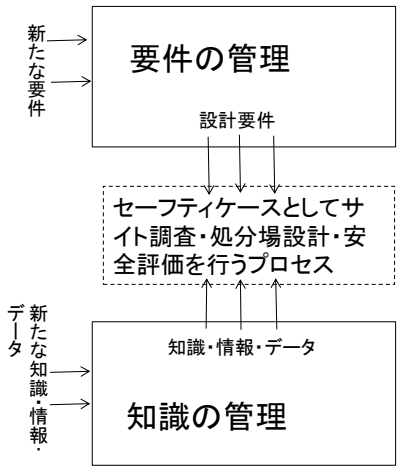


図７．技術マネジメントを円滑化する仕組み

(2) 知識のマネジメント

要件マネジメントシステムを事業期間にわたり維持することに加え、膨大かつ多分野にわたる科学技術的な知識・情報・データを一元的に管理し、セーフティケースへの統合や、組織内外及び世代間での共有と活用を効率的かつ効果的に実施するための知識マネジメントシステムとそれを支援するツールの開発を、DX の推進を図りながら強化する。特に、技術者の経験・ノウハウなどの暗黙知について、可能な限り文書やデータベース等の形式知に表出化する。さらに、この形式知を要件の変化に応じて更新するとともに、その変更を追跡しながら有効に利用できるようシステムを構築していく。構築するシステムは、国、関係研究機関及び NUMO 等によって開発された成果（例えば、解析コードやデータベース）並びに研究施設・設備等の資産・知的財産の相互利用のための仕組みに資する。

また、知識マネジメントを実務の中で展開するために有効なマネジメントシステムを開発することによって、幅広いステークホルダーへの情報提供とコミュニケーションの促進、長期にわたる事業を支えるための技術継承や人材育成にも資することが可能である。

このようなシステムの開発にあたっては透明性、追跡性、ユーザビリティ等を確保することが重要である。

国際標準とも整合する知識マネジメントシステムを整備するために、国際機関であるOECD/NEA、IAEA 等における知識マネジメント検討グループへの参加等により、諸外国における知識のマネジメントに関する取組事例の収集・整理を継続する。

(3) 品質のマネジメント

要件のマネジメントの対象として抽出・蓄積される要件や、それを考慮した知識のマネジメントによって管理される知識・情報・データは、地層処分事業への適用にあたって求められる品質レベルが確保されなければならない。そのためには、将来の許認可を念頭に置き、目的に応じた合理的な品質管理／品質保証に関する体系的な考え方や方法論を整備し、これらについて第三者の視点から国内外の幅広い分野の専門家による科学的・技術的内容の妥当

性に関するレビューを受けるとともに、その妥当性を試験的に実証することが重要である。求められるレベルの品質が確保されたデータ等の取得のため、必要に応じて計測技術や機器、手順、作業者の技量等を改善していくための研究開発を進める。

(4) 人的資源のマネジメント

地層処分事業の長い期間を通じてこれに携わる人材確保のために、大学や高等専門学校との幅広い共同研究の推進等を通じて、地層処分の認知度の向上を図る。あわせて、様々な学術分野の知見が関連するとともに、これまでに人類が経験したことのない長期間を対象としてシステムを構築するという地層処分技術の特徴や、そのシステム構築にチャレンジすることの魅力等の発信強化に取り組む。また、地層処分の事業や研究開発に携わる人材の育成にあたっては、専門分野における技術力の向上だけでなく、地層処分に関連する多岐にわたる分野全体を俯瞰できる知識・経験に基づいたプロジェクトマネジメント力の醸成が必要であり、それを継続的に行うための仕組みの構築が不可欠である。このため、要件マネジメントシステム（上記(1) 参照）や知識マネジメントシステム（上記 (2) 参照）の開発については、膨大かつ多分野にわたる科学技術的な知識・情報・データを効率的かつ効果的に管理する観点から DX を推進するとともに、2.4 節で述べる関係研究機関との連携や大学等との共同研究を通じた育成の仕組みの構築を進める。

2.4 分野間・機関間連携の推進

地層処分研究開発に関する科学技術分野は多岐にわたる。したがって、多くの機関が関与し、それぞれの専門的能力を活かし地層処分事業に必要な技術の開発という目的のもとに取り組んでいる。研究開発に関わる機関や専門家は、それぞれが担当する研究開発の目標や反映先を相互に理解し、各研究開発の進捗状況や共通的な課題への取組等に関する情報共有を進め、効率的かつ効果的に実施することが重要である。そのためには各機関の連携、研究開発分野間の連携、学会等を通じた幅広い学術分野における専門家との連携等、様々な形での連携が不可欠である。更に、積極的な情報発信が重要である。

以下に、研究開発の円滑な遂行のために必要となる主な連携とその方法について述べる。

(1) 各機関の役割と連携

全体計画に基づく研究開発に参加する機関は、これまでも地層処分研究開発に携わった豊富な実績を有しており、基本方針（別添５）に基づき今後もそれぞれの有する専門的能力に応じた役割を担っていく。

JAEA をはじめとする関係研究機関は、最先端の科学技術的知見を含む地層処分に有効な情報・データ・知識を集約、体系化するとともに、共同研究や、地下及び地上の研究施設・設備を利用した研究協力によって、それらを最大限に活かしつつ研究開発を実施する。あわせて、処分場の設計や安全性の評価に利用するため、より現象に即したモデル開発や、そのための知識化の観点からより純粋科学的な領域も含む技術基盤として研究成果を取りまとめることが重要である。研究開発の成果を地層処分事業に利用可能な状態とするために、

NUMO と関係研究機関は、それぞれが整備・保有するデータベースの開発・利用における連携等をさらに進め、共通的に利用可能な技術基盤としていく必要がある。

NUMO は、関係研究機関の成果も踏まえ、調査機器や調査手法の最適化、必要なデータが最小限の調査で取得可能となるような評価技術の高度化・合理化を目指した研究開発に取り組むとともに、セーフティケースのさらなる信頼性向上に必要な課題解決に向けて関係研究機関と連携を図る。例えば、放射能インベントリの不確実性とそれによる処分システムへの影響の把握（2.2 節④参照）を目的として、NUMO と廃棄物発生者（日本原燃株式会社（JNFL）及び JAEA）との連携を強化する。

(2) 分野間の連携

地層処分事業や研究開発の実施にあたっては、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等、多岐にわたる分野間で研究開発成果（知識・情報・データ）の受け渡しが行われる（図８）。ここで、知識・情報・データを生産する分野と利用する分野の専門家が、それぞれの目的、要件や受け渡しを行う知識・情報・データの内容や不確実性について相互に理解する必要がある。そのため、分野間で緊密に連携を図りつつ、研究開発成果の移転・継承や人材育成等にも配慮しながら研究開発に取り組むことが重要である。

同一分野内でおいても、例えば長期的に生ずる様々な自然現象に関するモデルの相互の関連付けなど、セーフティケースへの統合の仕方について確認しながら研究開発を進めることは、重要な連携の一つである。

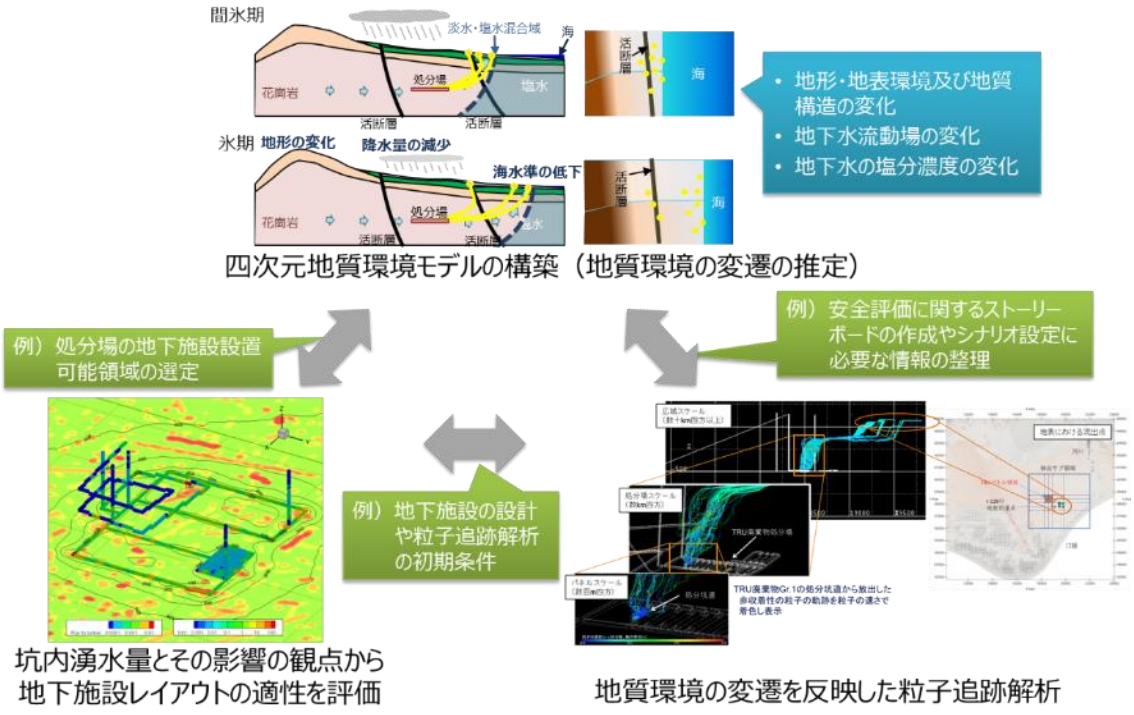


図８．分野間連携の例（知識・情報・データの授受のイメージ）

(3) 産学官を通じた様々な分野の専門家との連携

国内の研究・教育機関との共同研究等による連携は、それらが得意とする最先端の科学技術の導入により、地層処分に関する個別分野の課題解決に資するとともに、継続的な教育の機会を創出して将来を担う人材確保・育成の継続・発展に貢献することが期待できる。国内の学会・協会との連携・協力は、幅広い分野の専門家の地層処分への関与による研究・教育の活性化につながる。これらの連携・協力は、科学技術の最新知見の反映による地層処分の技術的信頼性の向上、地層処分の安全性等に対する社会の理解の促進、国民・地域住民等との対話活動の円滑な推進という観点でも重要となる。わが国の産業界が持続可能な研究開発の推進と事業への貢献を果たす環境を維持するために、デジタル技術を活用しつつ幅広い分野の技術情報へのアクセス性を高めるとともに情報交換を促進し、研究開発への関心をさらに喚起することも重要である。

生活圏における核種移行挙動の評価技術や低レベル放射性廃棄物の中深度処分等に関する技術は、地層処分技術との共通性や関連性が深く、それぞれの課題や研究開発成果に関する情報交換をさらに推進することは有効である。

(4) 国際協力・国際連携

地層処分に必要な研究開発に対する国際連携の重要性は、最終処分国際ラウンドテーブル[15]においても強調されたところであり、NUMO や関係研究機関は、学会の主催する国際会議に参加して、研究開発成果を積極的に発信するとともに、OECD/NEA や IAEA 等の国際機関が実施する技術検討委員会やワーキンググループ活動、プロジェクトに引き続き参加し、国際的な最新の技術動向を把握するとともに、わが国の研究開発成果の提供や人的支援等による国際貢献を行うことが肝要である。また、海外の地下研究所等を活用して最新の知見を取得するために、様々な共通的テーマに対して各国の実施主体や研究開発機関等との共同研究を継続する。NUMO が参加する国際機関が実施するプロジェクト、海外実施主体との共同研究や情報交換会はこれらに資する取組であり、今後も継続、発展させていく必要がある。

なお、JAEA は OECD/NEA の協力を得て、幌延深地層研究センターの地下研究施設を活用した国際共同プロジェクトの準備会合を令和４年３月に開始した。この準備会合には、海外の機関に加えて NUMO や国内の関係研究機関も参加した。同プロジェクトの協定は令和５年２月に発効した。

[15] 最終処分国際ラウンドテーブル（International Roundtable on the Final Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel）：原子力利用国の共通課題である最終処分に係る国際協力の強化を目的とし、令和元年６月の G20 軽井沢大臣会合で合意され立ち上げられた。令和元年１０月と令和２年２月に会合を開催し、最終処分に関する政府間の国際連携強化に向けた基本戦略や、各国の対話活動の知見・経験・ベストプラクティス、各国が有する研究施設等を活用した研究開発協力の方向性等を盛り込んだ最終報告書を取りまとめた。

3. 研究開発項目と内容

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、調査対象の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することが重要である。このため、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・解析技術についての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。

さらに、地質環境の調査と評価に関する技術の整備については、規制機関で検討されているサイト調査において考慮すべき事項を考慮すること、及び関係研究機関の研究開発成果を統合すること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) 火山・火成活動の発生及び影響に関する調査・評価技術の高度化

火山フロントの背弧側の第四紀火山が存在しない地域における火山・火成活動が新たに発生する可能性とその影響に関して、地殻及びマントルの内部構造並びにマグマの影響範囲を合理的・体系的に把握するための調査・評価に関する方法論を整備する。

これまでに、将来の火山・火成活動の発生に関与する地下深部のマグマの分布等を把握するための調査・評価技術の整備に向けた事例検討を実施した。その結果、地球物理学的手法や地球化学的手法を火山地域及び非火山地域に適用して、これらの手法を組み合わせた地殻～マントル最上部におけるマグマの分布等に関する推定事例を蓄積した。また、地震波トモグラフィに用いる地震データの拡充により、背弧側のマントルウェッジのマグマや深部流体の分布に関する推定精度が向上できることを示した。

今後は、地形・地質学的手法、地球物理学的手法、地球化学的手法を組み合わせた調査・評価事例の蓄積を継続するとともに、地殻及びマントルの内部構造及びマグマの影響範囲を把握するために、抽出した個々の調査・評価技術の適用可能条件や適用限界を確認する。さらに、これらの成果に基づき、複数の調査・評価技術の選択や組み合わせの考え方や、選択した技術の相互関係等を考慮した手順等を整理する。

表2 「火山・火成活動の発生及び影響に関する調査・評価技術の高度化」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
(1) 火山・火成活動の発生及び影響に関する調査・評価技術の高度化	調査・評価事例の蓄積 ←→				
	個々の調査・評価技術の適用可能条件や適用限界の確認 ←→				
			調査・評価に関する方法論の取りまとめ ←→		

（2）深部流体の移動・流入に係る現象理解及び影響に関する調査・評価技術の整備

非火山性の深部流体（深部上昇水や長期停滞水）について、地下深部における形成や移動に関する現象理解を深めるとともに、地下深部から地表付近への流入の可能性やその影響を合理的・体系的に把握するための調査・評価に関する方法論を整備する。

これまでに、深部流体の移動・流入に係る現象理解に向けた事例検討を実施し、深部流体の化学的・熱的特徴を把握するための手法として、同位体分析や熱年代解析等に基づく手法の有用性を示した。また、深部流体の移行経路の把握に対する地震学・地質学的解析の有用性を示した。

今後は、地球物理学、地球化学、地質学、年代学等の最新の科学的知見を取り入れ、深部流体が地質環境に与える影響の大きさや、影響範囲に関する調査・評価事例の蓄積を継続するとともに、個々の調査・評価技術の適用可能条件や適用限界を確認する。さらに、これらの成果に基づき、複数の調査・評価技術の選択や組み合わせの考え方や、選択した技術の相互関係等を考慮した手順等を整理する。

表3 「深部流体の移動・流入に係る現象理解及び影響に関する調査・評価技術の整備」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
（2）深部流体の移動・流入に係る現象理解及び影響に関する調査・評価技術の整備	調査・評価事例の拡充 ←→				
	個々の調査・評価技術の適用可能条件や適用限界の確認 ←→				
				調査・評価に関する方法論の取りまとめ ←→	

（3）地震・断層活動の活動性及び影響に関する調査・評価技術の高度化

地形的に不明瞭な活断層及び上載地層がない場合の断層の活動性や地震・断層活動が断層周辺の水理学的・力学的に及ぼす影響等を合理的・体系的に把握するための調査・評価に関する方法論を整備する。

これまでに、地震・断層活動の活動性及び影響の調査・評価技術の整備に向けた事例検討を実施した。その結果、地震・断層活動の活動性の調査・評価に関して、断層破砕帯内物質の化学組成を用いる手法の適用性を確認するとともに、地形･地質学的手法に測地学的手法、地球物理学的手法、地球化学的手法を組み合わせたアプローチの有用性を示した。

今後は、これらの技術を組み合わせた調査・評価に関する事例の蓄積を継続するとともに、個々の調査・評価技術の適用可能条件や適用限界を確認する。また、新しい年代測定法の適用も視野に入れた断層破砕帯内物質の年代測定や、断層破砕帯内物質の元素移動の評価といった最先端の調査・評価技術の適用性を確認する。さらに、これらの成果に基づき、複数の調査・評価技術の選択や組み合わせの考え方や、選択した技術の相互関係等を考慮した手順等を整理する。

表4「地震・断層活動の活動性及び影響に関する調査・評価技術の高度化」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) 地震・断層活動の活動性及び影響に関する調査・評価技術の高度化	調査・評価事例の拡充				
	個々の調査・評価技術の適用可能条件や適用限界の確認				
				調査・評価に関する方法論の取りまとめ	

（4）隆起・侵食に関する調査・評価技術の高度化

将来の隆起・侵食に係る予測に関して、気候・海水準変動も考慮した過去百万～数十万年前以前からの隆起・侵食量の調査・評価に適用可能な手法の拡充等を通じて、隆起・侵食量の合理的・体系的な調査・評価に関する方法論を整備する。

これまでに、幅広い地質環境に対する隆起速度・侵食速度に関する調査・評価技術の整備に向けた事例検討を実施した。その結果、熱年代や宇宙線生成核種といった新しい手法の導入により、沿岸部を含む幅広い地質環境に対する隆起・侵食速度の推定事例を示した。また、宇宙線生成核種等の最新の分析データと地形解析を組み合わせて日本列島の侵食速度マップを整備し、時空間的により高精度な評価が可能となる情報を取りまとめた。

今後は、これらの新規技術に関する適用実績を拡充するための事例の蓄積を継続するとともに、個々の調査・評価技術の適用可能条件や適用限界を確認する。さらに、これらの成果に基づき、複数の調査・評価技術の選択や組み合わせの考え方や、選択した技術の相互関係等を考慮した手順等を整理する。

表5 「隆起・侵食に関する調査・評価技術の高度化」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
(4) 隆起・侵食に関する調査・評価技術の高度化	調査・評価事例の拡充				
	個々の調査・評価技術の適用可能条件や適用限界の確認				
				調査・評価に関する方法論の取りまとめ	

（5）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

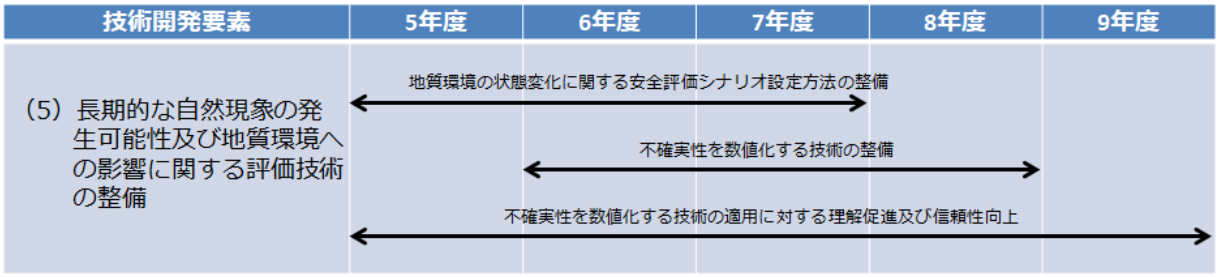
将来予測における不確実性がより大きくなると考えられる将来１０万年程度を超える期間を対象とした安全評価に向けて、自然現象の発生可能性とそれに伴う地質環境への影響に関する評価技術を整備する。

これまでに、自然現象の著しい影響を回避するように選定したサイトにおける将来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。

今後は、自然現象の変動傾向の一様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6 「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年間の研究開発工程



3.1.2 地質環境の特性

（1）沿岸海底下の地質環境特性に関する調査・評価技術の整備

化石海水や氷期の降水起源の淡水を含む塩水や淡水の境界の分布や、それらの境界部及びその周辺における水理場、化学場を把握するための体系的な調査・評価技術を整備するとともに、沿岸部における水理場及び化学場の長期的な変動幅を明らかにする。

(a) 沿岸海底下における水理・化学場の評価技術の実証と体系化

これまでに、沿岸部周辺には、現在及び氷期の降水起源の淡水や、現海水、化石海水等の流動性や起源が異なる地下水が存在することを明らかにした。また、これまでの瑞浪・幌延での事例研究を通じて、移流場や拡散場といった流動性が異なる地下水の賦存状態や流動特性を評価するための方法を整備してきた。

今後は、沿岸部におけるボーリング孔等を用いたデータ取得により、整備してきた流動性が異なる地下水の賦存状態や流動特性を評価する方法（水質や地下水年代等）について、適用性を確認する。また、地質環境特性に関する調査結果を統合した地下水流動モデルの構築を通じて、水理場及び化学場の解釈を行い、氷期の降水起源の淡水や化石海水等の賦存状態や形成機構について検討する。併せて、これらの不確実性が安全評価に与える影響の検討を行い、その結果を踏まえて不確実性の低減に寄与する不確実性要因を抽出する。さらに、これらの成果に基づき、沿岸海底下における水理・化学場の評価に関する体系的な技術として取りまとめる。

(b) 沿岸部陸域・海域を対象とした地質環境特性の長期的な変動幅の評価に関する評価技術の実証

地下水の流出域と考えられる沿岸部では、これまでの事例研究を通じて、陸域の淡水と海域の塩水により形成される多様で複雑な水理場や化学場の理解が進められてきた。また沿岸部の海域を対象に、陸域で有効性が示された調査・評価手法についての適用性評価や海底湧出地下水に関する新たな調査・評価手法の整備・検討が実施されてきた。

今後は、ボーリング孔の掘削及び孔内試験、海陸連続物理探査、海底湧出地下水調査等を通じて地下水を中心とした沿岸部における地質環境特性の長期的な変動幅を評価するとともに、それらの手法の有効性を確認し、体系的な調査・評価技術として取りまとめる。

表7 「沿岸海底下の地質環境特性に関する調査・評価技術の整備」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
(a) 沿岸海底下における水理・化学場の評価技術の実証と体系化	評価技術の実証に向けた情報整備と知見の拡充	水理・化学場の評価にむけた現地調査ならびに室内試験 モデル・解析結果の妥当性の検証と体系化 安全評価の最適化手法の整備			体系的な調査・評価技術の取りまとめ
(b) 沿岸部陸域・海域を対象とした地質環境特性の長期的な変動幅を評価に関する評価技術の実証	評価技術の実証に向けた情報整備と知見の拡充	沿岸部の地質環境特性の長期的な変動幅を評価のための現地調査と調査技術の実証			体系的な調査・評価技術の取りまとめ

(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

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、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。

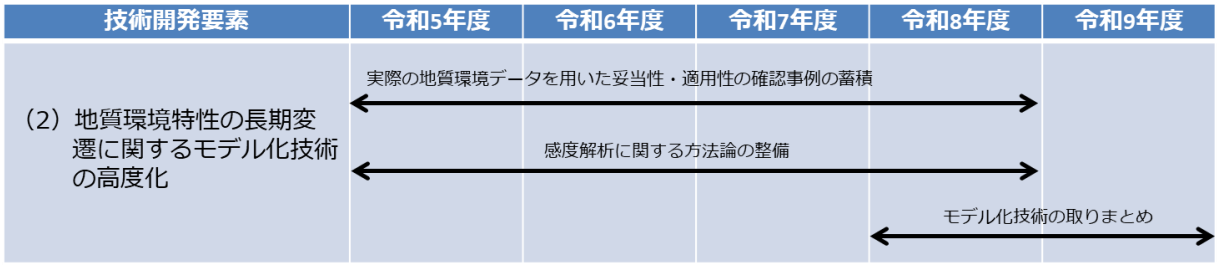
これまでに、長期にわたる地形の変化や気候・海水準変動等に伴う地表から地下深部までの水理場や化学場といった地質環境特性の時間的・空間的な変化を表現することができる現実的な地質環境のモデル（四次元地質環境モデル）を構築するための技術を整備した。

今後は、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。

また、地殻変動が岩盤の透水性の変化に与える影響の評価に関する事例の蓄積を継続し、岩盤の透水性と強度・応力状態との関係に関するモデルの適用範囲や条件を整理する。

これらの結果に基づき、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。

表8 「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年間の研究開発工程



（3） 地質環境に関する個別調査技術の最適化

わが国の多様な地質環境を対象とした概要調査以降の地上からの調査段階を念頭に置いて、物理探査やボーリング調査、地下水等のモニタリング、ボーリング孔の閉塞等に関する一連の調査・評価技術の合理化及び最適化を図る。

(a) 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、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。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、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。これらの取組を通じて、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、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。

(b) 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の適用性や耐久性の確認を継続し、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、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、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、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、断層及び断層周辺の地質環境の

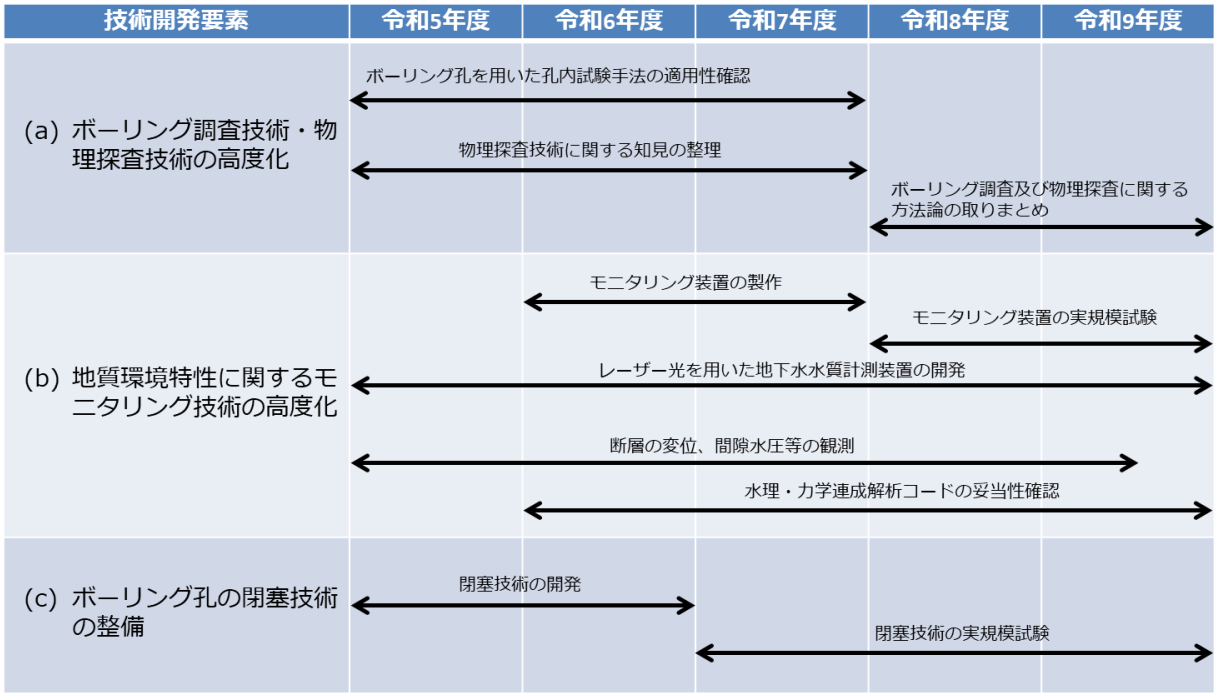
変化（水理 - 力学連成現象）に関する解析・評価のために整備した水理・力学連成解析コードの妥当性を確認する。

(c) 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9 「地質環境に関する個別調査技術の最適化」に関する５年間の研究開発工程



(4) サイト調査のための技術基盤の強化

わが国の多様な地質環境を対象として、地質環境及びその調査・評価に関するに関する最新の科学的知見を集約・拡充する。あわせて、地下深部の地質環境特性とその長期変遷に関する科学的知見の収集・整理が適宜進められ、その理解が深められてきた。

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、3.1.1 及び 3.1.2(1)～(3)の研究開発等を通じて、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、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。

表10 「サイト調査のための技術基盤の強化」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
(4) 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

1.2 節で述べた成果を基に、2.2 節で述べたように、今後は、設計の信頼性向上と地質環境条件に適合した設計の詳細化及び最適化の準備として、設計体系の整備を進めることや、実証試験などを通じて設計の工学的成立性や事業の効率性を高める取組を継続することなど、以下の観点で研究開発を進める。

- 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となる試験データの整備と知見を拡充し、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って、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を継続する。特に、長期健全性の評価に関し、金属腐食や緩衝材の変質現象等、長期間の試験等により現象理解やデータの蓄積など、技術的論拠の拡充に取り組む。こうした取組にあたっては、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。
- サイトに適合した最適な処分場の設計に向け、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、わ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を継続する。
- 処分場の建設・操業・閉鎖に係る技術、及び廃棄体の回収技術については、これまでの研究開発によって実現性の見通しを得た技術を中心に、個別要素技術の実証的研究を進め工学的成立性を高める。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・施工技術や坑道シーリング技術などについては、地下研究施設やモックアップ施設を活用して実証的な試験を実施することで、実際の地質環境条件や作業環境における技術の実現性や信頼性向上のための課題を明らかにする。また、これらの実証的試験を通じて、個別要素技術の開発成果を統合した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、精密調査におけ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。
- 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、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、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ともに、操業安全対策の効果を定量的に把握することを可能にする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、処分場が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ことを目的とする。

（a）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。金属製処分容器の長期腐食寿命評価については、過渡期腐食、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℃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、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、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、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。緩衝材の技術的な成立性については 100℃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。

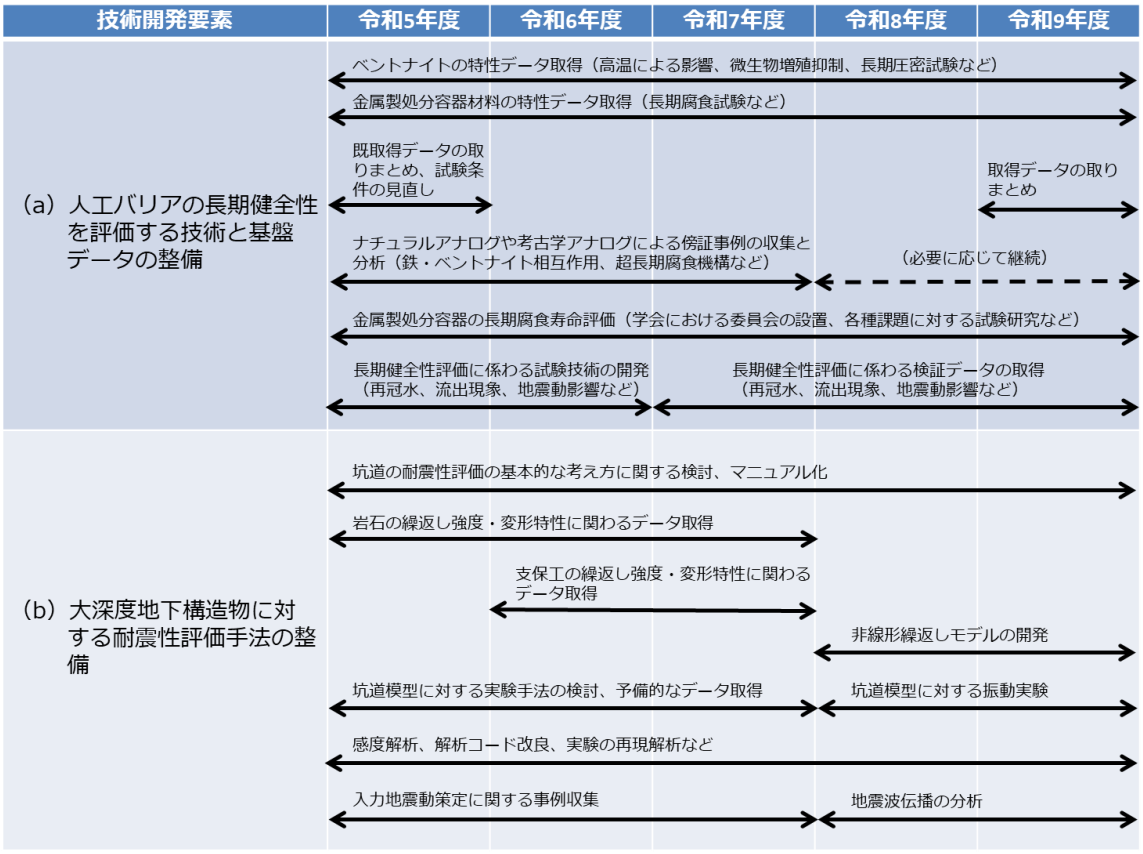
連成現象を伴う処分場ニアフィールドの再冠水過程の評価や、繰り返し作用することが想定される地震動に対する人工バリアシステムの長期健全性の評価については、評価モデルの妥当性確認のためのデータを整備するための試験技術の開発に取り組むとともに、妥当性確認のプロセスを通じてモデルの改良による高度化を進める。

（b）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、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、大規模な連接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、耐震設計が必要とされず、定まった耐震性評価手法も示されていない。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連接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組が必要である。このため、大深度に設置される坑道の特殊性や多様な岩種、岩級[16]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、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手法の適用性確認、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。

[16] 岩種、弾性波速度、岩石の一軸圧縮強度、不連続面の間隔等からランク付けした岩盤分類。

表11 「設計の信頼性向上」に関する５年間の研究開発工程



（2）設計の最適化

上記3.2.1(1)の取組による設計の信頼性向上とともに、わ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。

（a）処分場設計オプションの整備

上記 3.2.1(1)(a)で述べた人工バリアの長期健全性評価技術と基盤データの整備は、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、製作性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係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 に示した竪置き方式と横置き PEM 方式を対象として、設計要件に対する検討を進め、要素技術の試験などを通じて工学的成立性の見通しを得た。

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陰イオン核種の溶出低減を目的とした固化体作製技術、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容器の改良や人工バリアの構成要素の見直し等の検討を進めた。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の見通しを得た。

今後は、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、金属材料を対象として、3.2.1(1)(a)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)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℃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を継続して進める。ガラス固化体の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、今後の研究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、製作に係る技術（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、上記 100℃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℃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 廃棄物に対する人工バリアについては、放射性核種の閉じ込め性に対する安全性を向上させるという観点から、廃棄体及び廃棄体パッケージからの水素ガス発生量の抑制技術や、廃棄体パッケージの核種閉じ込め性能を評価する技術の整備について重点的に進める。

回収の容易性の観点からは、PEM 方式を適用した場合の設計オプションについて、これまでに実施し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。

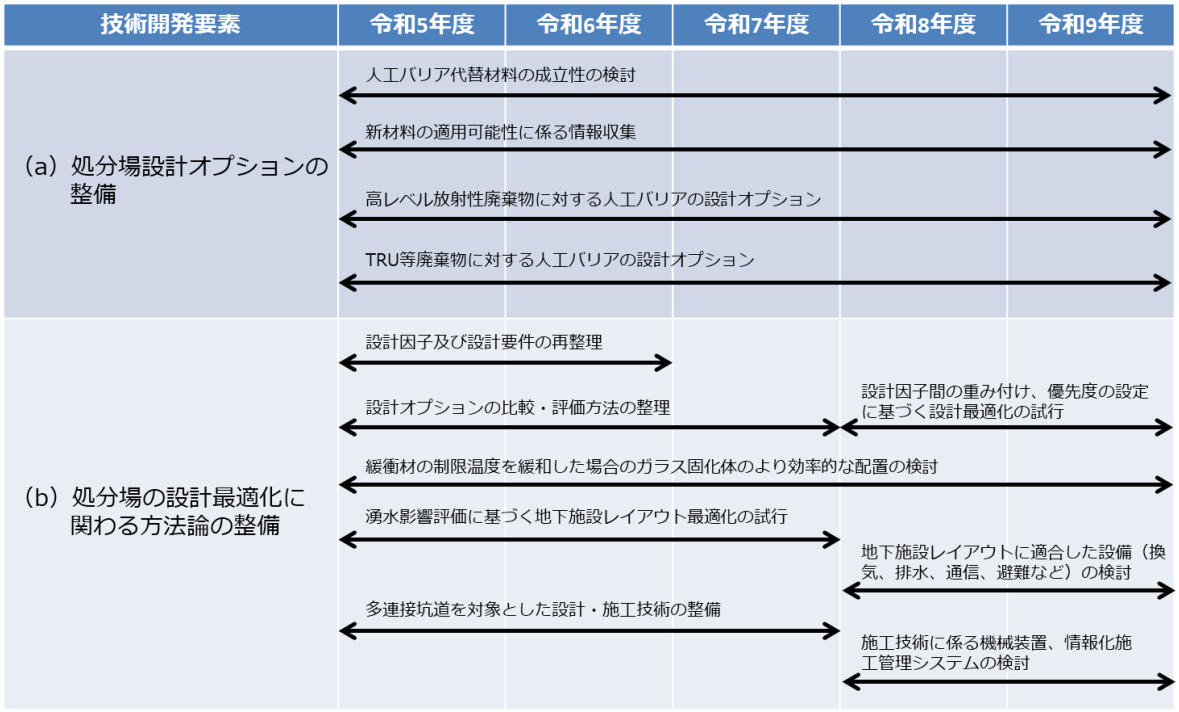
設計オプションの成立性を検討にあたっては、人工バリアの製作・施工技術については 3.2.2(2)、廃棄体回収に係る技術については 3.2.2(5)の成果を反映する。

(b) 処分場の設計最適化に関わる方法論の整備

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、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独立して検討を行い、オプションとしての成立性を確認してきている。

今後、設計オプションの絞り込みのための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。方法論の開発にあたっては、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処分場設計の最適化の試行的な取組を実施する。具体的には、処分場の地下施設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、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を緩和した場合のガラス固化体を集積する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)(b)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、3.2.2(4)処分場閉鎖技術の開発および3.2.2(5)廃棄体回収技術の開発で得られた知見等の成果を統合的に反映して、地下施設の建設から閉鎖まで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、及び事業の経済性への影響が大きい要素として地下施設への湧水量に着目した湧水量の評価などによる設計の詳細化を進めながら、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、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 12 「設計の最適化」に関する５年間の研究開発工程



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・対策技術の体系化

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、坑道を掘削する周辺の断層・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一連の工学技術について、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。

（a）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係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、新たな調査坑道や模擬処分孔の掘削と関連付けて、坑道レイアウトや人工バリア及び廃棄体定置の判断指標に関わる調査と設計及び評価技術を実際の地下環境において検証する。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同定する。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。

（b）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ついては、主に竪置き・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、坑道の埋め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上で、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 13 「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」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
（a）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	
（b）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	模擬処分孔・対策工施工、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ことを目的とする。

（a）PEM の製作・施工技術の開発

これまで、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上で、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

を試行することで、PEMの製作及び組立方法、搬送定置方法、定置後の処分坑道の坑壁とPEM容器間の隙間埋め戻し方法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上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）（b）において実施する設計オプションの整備とも関連付けつつ、上記の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、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り、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係る技術については、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方式に係る研究開発成果をTRU廃棄物に対するPEM方式への適用性を検討しつつ、効率的・効果的に研究開発を進める。

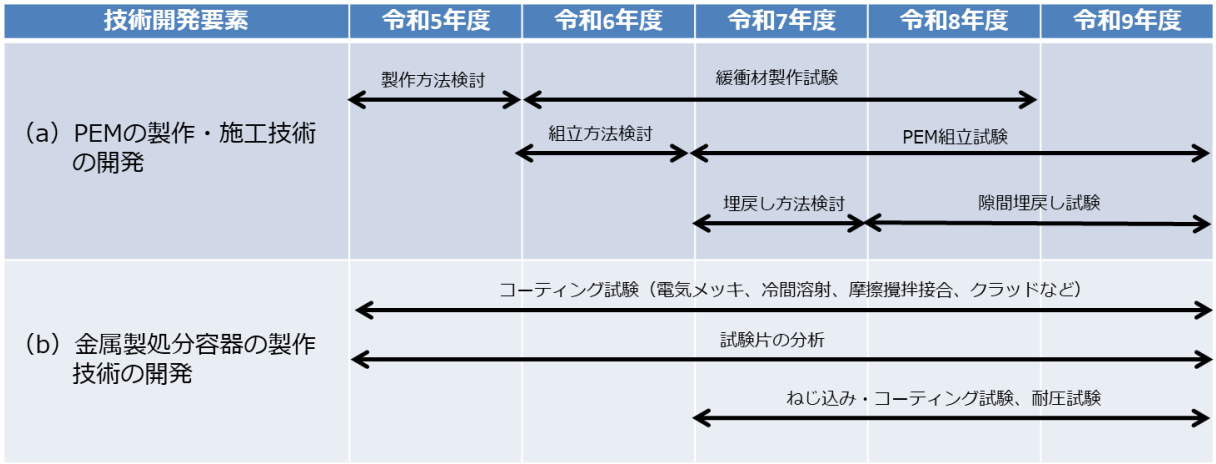
また、人工バリア製作・施工に関わる多くの作業で放射線防護に配慮する必要があり、そのための技術オプションとして遠隔操作化・自動化を積極的に取りこんだ要素技術の開発を進める。

（b）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、実スケールのオーバーパックの製作等を通じて、概ね製作技術の整備を完了している。

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、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）等の適用性を確認する。電気メッキ法等の技術については、今後は銅コーティングの高速化に向けた技術の高度化に取り組む。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、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14 「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



(3) 処分場の建設・操業技術の高度化

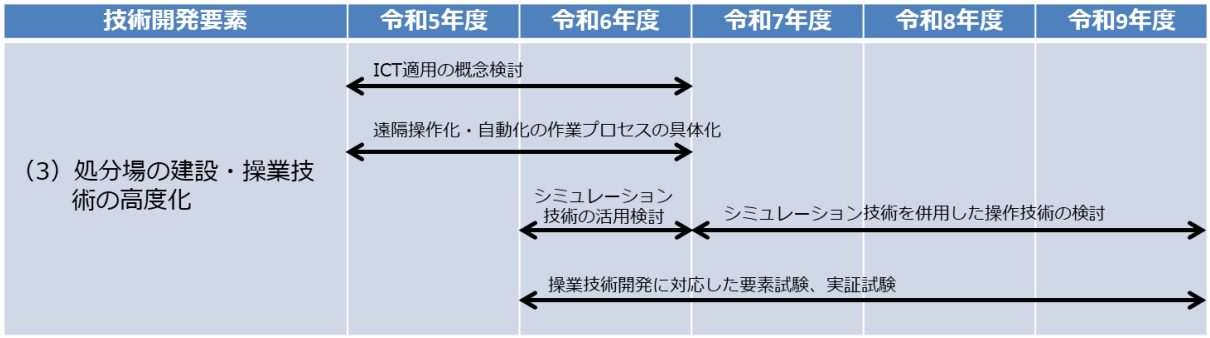
将来的な技術の進展を見据えて、建設・操業に係る全ての作業プロセスにおける情報伝達技術及びロボティクス技術の導入、作業の遠隔操作化・自動化による無人化施工の実現性について検討を進め、処分場の建設・操業に係る作業のさらなる安全性と効率性の向上を図る。

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、わが国の生産年齢人口は今後30年で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（Information and Communication Technology）や三次元データ等を活用した取組等、様々な産業分野で積極的な開発が行われている。

今後は、こうした取組を参考に、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、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)、(4)、(5) 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、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、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、適宜研究開発に反映していく。

表15 「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



(4) 処分場閉鎖技術の開発

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プラグや、埋め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。

(a) 止水プラグの設計・施工技術の開発

これまで、止水プラグの設計・評価技術については、原位置での人工バリア性能確認試験や要素技術試験等を通じて試行的な設計結果の適用性等に関する検討が進められている。施工方法については、これまでの検討により、今後の課題として、特に堆積岩系の軟岩において、坑道の力学的安定性を確保するために施工される支保及び覆工コンクリートに対する止水プラグ施工時の取り扱いや掘削損傷領域を拡大させないための切欠き部の拡幅方法、あるいはプラグ本体の構築方法等が明らかになっている。

このため、今後は、止水プラグに要求する性能を地質環境特性に応じて明確化するとともに、坑道周囲の亀裂分布や水理場を含む地質環境を把握して止水プラグの形状や材料仕様を具体化できるように、設計方法の詳細化を進める。また、施工方法については、要素技術の開発により止水プラグの施工可能性を高めたうえで、掘削損傷領域の調査等の原位置調査技術を含めた地下研究施設の原位置での実証的な施工試験を通じて工学的成立性を確認する。

これらの原位置での試験は堆積岩系の地下研究施設で実施できる貴重な機会と位置付け、3.2.2 (4) (b) の埋め戻し材の設計・施工技術の開発と連携して、坑道の埋め戻しから止水プラグの設置までの一連の施工手順を実スケール相当の施工試験で確認するとともに、施工した止水プラグの止水性能の評価及び評価に必要なモニタリング技術を整備する。

(b) 埋め戻し材の設計・施工技術の開発

埋め戻し材には、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。しかし、掘削土は処分場を設置する母岩固有のものであり、対象となるサイトが特定されていない段階では物性を設定できない。

これまで、埋め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、複数の岩種の砕石・砕砂を掘削土に見立てて、埋め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を開始している。この試験では砕石・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進めている。これらは、埋め戻し材の締固め特性に影響を与える重要なパラメータであるが、掘削土の利用においては、地上施設における長期保管中の化学的な変化（例えば、黄鉄鉱の酸化に伴う掘削土の酸性化）が、地層処分システムに与える影響について確認しておく必要がある。

埋め戻し材の施工技術については、候補サイトの地質環境に応じた設計仕様や施工環境に即した方法を柔軟に選択できるように、複数の方法（撒き出し・転圧工法、吹付け工法、スクリュー工法、ブロック工法）について施工性や施工品質に関わる基盤情報を整備することを目的として、小スケールでの要素技術試験や地上研究施設の模擬坑道等を活用した工学規模での施工試験を実施中である。これらの施工試験に基づくデータの蓄積により、それぞれの施工方法の実現性に関する見通しが得られつつある。あわせて、坑道内での施工という空間的な制約を受ける環境において、それぞれの施工方法における品質確保上の課題も明らかになってきている。

今後は、埋め戻し材の化学的な変化に対する掘削土の利用可能性に関するデータを取得し、材料特性データベースの整備を継続するとともに、掘削土の保管方法などの埋め戻し材の設計への反映について検討する。埋め戻し材の施工技術の課題への対応や施工効率の向上に対する取組として、上記それぞれの施工方法の埋め戻し材料仕様に対する適用範囲の明確化等、基盤情報の拡充に向けて、地上研究施設の模擬坑道等を活用した施工試験を継続する。また、これらの施工試験を通して施工プロセスの管理手法の具体化を進め、構築物が閉鎖後長期の安全性を担保することを示すための品質保証体系の基本となる考え方を、品質管理を補完するモニタリング技術と合わせて整備する。

表16 「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
(a) 止水プラグの設計・施工技術の開発	試験坑道の地質環境特性の調査・試験				
	設計の詳細化、施工方法の検討、要素技術試験				
	原位置シーリング試験（小規模）			解体調査	
				プラグ施工、坑道シーリング試験	
(b) 埋め戻し材の設計・施工技術の開発	埋め戻し材の材料特性データベースの整備				
	工学規模試験（撒き出し・斜め転圧、吹付け工法、スクリュー工法、ブロック工法）			模擬坑道における施工試験	
				坑道埋め戻し施工、坑道シーリング試験	
	品質保証、性能確認技術の検討、計測技術開発				

（5）廃棄体回収技術の開発

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。

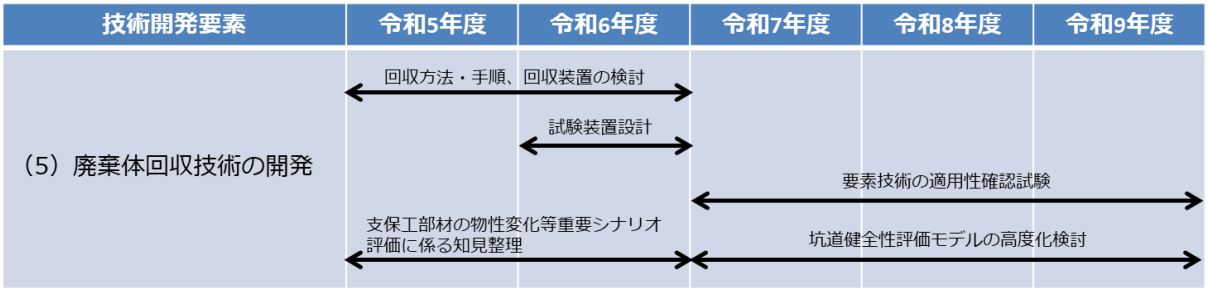
高レベル放射性廃棄物に対する廃棄体の回収技術については、これまで、竪置き方式では塩水噴射により緩衝材を除去する方法を、横置き方式ではPEM方式について処分坑道の坑壁とPEM容器間の隙間埋め戻し材を機械切削とウォータージェットにより除去する方法を対象として、それぞれ実規模に近い模擬処分孔、模擬処分坑道において実証試験を実施した。これらの試験及び回収時間の短縮に向けた技術の高度化を通じて、竪置き方式については、定置にかかる期間と同程度の現実的な期間内で回収することが可能であるとの見通しが得られている。横置き・PEM方式については、定置済みのPEMを回収することが技術的に可能であることを実証したものの、汎用機械の使用では機械的除去に時間を要すること、隙間埋め戻し材の仕様や状態変化に対する除去技術の適用範囲が明確でないこと、PEM容器の健全性が確保されていない場合の対応方法等の課題が明らかになった。

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、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。

今後は、高レベル放射性廃棄物のPEMの回収時間の短縮に向け、PEM容器周囲の隙間埋め戻し材を機械的に除去し、切削・捕集・排出・積込の一連の技術の効率化を図った設計を行い、要素技術の試験による効果の確認、並びに埋め戻し材の仕様や状態と関連付けた適用限界に関する基礎的なデータを取得する。また、PEM容器からガラス固化体を封入したオーバーパックを直接取り出して搬出できる方法を具体化し、必要な要素技術の開発を進める。

TRU廃棄物のPEM方式に対する回収方法は、多くの作業プロセスにおいて高レベル放射性廃棄物に対する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を先行実施して、その結果を反映しつつ、TRU廃棄物PEMに対する回収装置を検討する。回収可能性の維持期間における坑道開放の影響評価技術については、より長期的な物性変化のデータをモデルに反映させるなどの高度化に取り組む。

表17 「廃棄体回収技術の開発」に関する５年間の研究開発工程



3.2.3 閉鎖前の安全性の評価

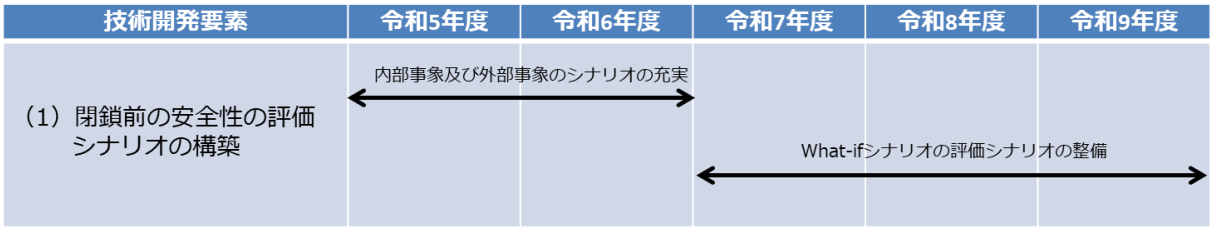
（1）閉鎖前の安全性の評価シナリオの構築

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、廃棄体の落下、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備と、外部事象に起因して処分場に発生する可能性がある内部事象の検討を進めてきた。

今後は、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、安全機能を有する機器が複数の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、放射性物質の漏えいに関する評価シナリオの整備に取り組む。

表 18 「閉鎖前の安全性の評価シナリオの構築」に関する５年間の研究開発工程



（2）閉鎖前の安全性評価技術の高度化

上記 3.2.3(1)で開発する閉鎖前の安全性の評価シナリオに基づき、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、オーバーパック及び廃棄体パッケージ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、可能な限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、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。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、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 19 「閉鎖前の安全性評価技術の高度化」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
（2）閉鎖前の安全性評価技術の高度化	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）における放射能漏れ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は、①落下や火災等の事故後の廃棄体、オーバーパック、あるいは廃棄体パッケージの遠隔操作による回収の技術、②上述の事故を経たオーバーパックあるいは廃棄体パッケージ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、令和 7 年度以降の技術開発計画に反映する。

表 20 「事故対応技術の開発及び具体化」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）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に関する技術開発を、2.2 節「③閉鎖後長期の安全性の評価技術に係る研究開発」に示した進め方に基づき、以下のとおり取り組む。

3.3.1　シナリオ構築

（1）地層処分システムの状態設定のための現象解析モデルの高度化

処分場閉鎖後における地層処分システムの状態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、システムの状態をより現実的かつ定量的に表現することを目的とした以下のような現象解析モデルの開発を継続する。これによって、サイト環境条件や設計オプションの特徴を明確に反映した安全評価を実施し、異なるサイトや設計オプションの相互比較によるサイト選定や設計の最適化に資する。あわせて、現象解析モデルを利用した地層処分システムの状態の評価におけるモデル自体が有する不確実性やデータに関する不確実性による解析結果への影響を定量的に把握するための手法の開発を進め、こうした不確実性に配慮したシナリオ設定を行うことによって安全評価の信頼性向上を図る。

（a）廃棄体からの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なか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の妥当性の確認を進めた。TRU廃棄物については、これまで、ハル等廃棄体についての溶出モデルの構築に必要なデータ取得のための試験を実施してきた。

今後は、これまでの取組に加えて、処分場に埋設されたガラス固化体がお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、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。また、TRU廃棄物については、実廃棄物等を用いたハル等廃棄体等のデータ取得を継続し、廃棄体からの核種溶出モデルのより現象に即したモデルの開発を進める。

（b）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）に関する室内または原位置試験により、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、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、室内試験や実規模の人工バリアの解

体を含めた原位置試験によるデータ及びナチュラルアナログ事例の拡充を継続する。また、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。開発する現象解析モデルは、3.3.1（1）（f）「現象解析モデルの統合化技術の構築」へ反映し、開発のために取得したデータは、3.3.3（1）（a）「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。

（c）廃棄体由来のガス発生に関する現象解析モデルの妥当性検討

これまで、廃棄体による水の放射線分解等に由来して発生するガスのニアフィールドにおける影響評価を目的として、現象解析モデルの開発と妥当性の確認を、TRU廃棄物処分場の緩衝材を対象とした室内における小規模モックアップ試験を通じて実施し、現象の理解を深めてきた。今後もこうした試験を継続するとともに、これに基づく現象解析モデルの改良と妥当性の確認を引き続き進める。加えて、開発した現象解析モデルを用いることにより、核種移行挙動へのガスの影響を評価するための方法論を検討する。

（d）コロイド・有機物・微生物の影響評価手法の構築・高度化

ここでは、コロイド、有機物および微生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。地下水中に存在する天然コロイド（無機／有機・微生物）については、試験を通じてコロイドへの元素の収着現象の理解を深化させつつ核種移行への影響を評価するための手法の構築を進めた。有機物による核種移行への影響については、これまで廃棄体由来のイソサッカリン酸（ISA）による元素の溶解度への影響評価や、天然有機物と核種の錯体形成モデルの構築に向けた取組を進めてきた。微生物の核種移行への影響については、これまで堆積岩地下環境のバイオフィルム形成領域における元素の濃集現象の理解を深化させ、核種移行挙動への影響評価手法の構築を進めた。また、未知の微生物を含む包括的な地下微生物代謝についての評価手法の構築を進めた。

今後は、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。地下水中に存在する天然コロイドについては、核種 - 天然コロイド - 岩石の三元系における試験を実施し、これに基づいてコロイドの影響を考慮した核種移行挙動の評価モデルの開発を進める。有機物による核種移行への影響については、ISA等の有機物と核種の錯生成及び収着に関するデータの拡充とそれに基づく核種移行挙動への影響を評価するためのモデルの構築を進めるとともに、試験を通じた天然有機物と核種との相互作用に関する現象の理解を深め、これを考慮した核種移行挙動評価モデルの開発を進める。微生物の核種移行への影響については、引き続

き核種移行挙動への影響評価手法の開発を進めるとともに、微生物代謝が周辺の地球化学環境や核種移行に及ぼす影響を評価するための手法の構築を進める。コロイド、天然有機物及び微生物による核種移行挙動への影響評価モデルについては、深部地下環境での原位置試験を実施し、取得したデータを用いてモデル化手法の妥当性の確認を行う。これらの現象による核種移行挙動への影響の評価においては、安定核種の寄与についても考慮する。

以上の研究開発によって得られた知見は、3.3.3（1）(a)「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。

（e）硝酸塩の現象解析モデルの妥当性検討

これまで、TRU廃棄物に含まれる硝酸塩による地層処分システムへの影響評価を目的として、地下深部における硝酸イオンの化学的変遷（硝酸イオン-金属等）挙動に関する実測データを取得し、現象解析モデルの信頼性の向上を実施してきた。また、現象解析モデルの高度化に資するため、硝酸イオンとその変遷物質であるアンモニウムイオンによるベントナイトの長期挙動への影響に関する調査を実施した。

今後も、地下深部の環境における硝酸イオンの化学的反応に関する現象理解を深め、硝酸イオンの化学的変遷モデルの妥当性を確認するとともにモデルにおける重要なパラメータに関するデータの拡充を実施する。また、硝酸塩によるニアフィールドにおける核種移行に及ぼす影響を評価するためのデータ整備を実施する。

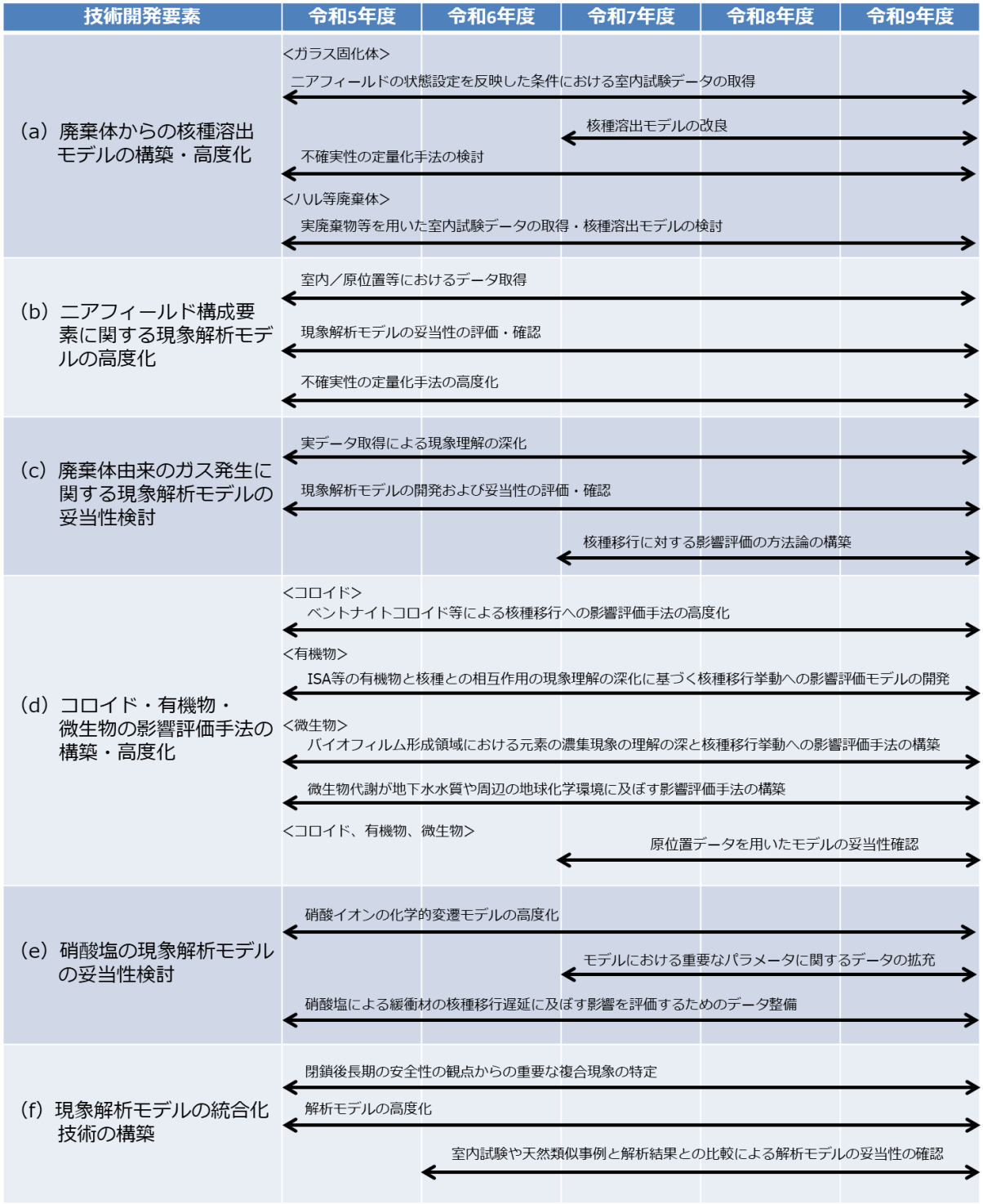
本研究によって得られた知見に関しては、3.3.3（1）(a)「想定される様々な処分場環境を対象とした核種移行パラメータ設定に資するデータの拡充」の研究開発にも反映する。

（f）現象解析モデルの統合化技術の構築

これまで、地層処分システムの時間的・空間的な変遷を理解するため、ニアフィールドに注目して様々な現象解析モデルを統合し連成解析を行うことを可能とするプラットフォームのプロトタイプを開発し、緩衝材の変質現象に関わる重要な複合現象の特定を実施した。

今後は、引き続き閉鎖後長期の安全性の観点から重要な現象の特定を進め、それらに対する現象解析モデルの高度化や、それを用いた解析結果と室内試験やナチュラルアナログ事例との比較によるモデルの妥当性の確認を実施する。

表21 「地層処分システムの状態設定のための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



(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

処分場閉鎖後の安全評価におけるさまざま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の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[17]。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。

（a）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、FEP[18]の発生可能性を考慮した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。

今後は、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に関する情報をツールに格納しつつ、その過程で利便性などの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。

（b）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（5）「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。

表22 「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
（a）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 ←			→
（b）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を通じたシナリオやその様式化方法の検討 ←				→

[17] NUMO-SC 本編（https://scct numo.or.jp/GeoCom2/link01 xhtml）第 6 章 6.1.5 参照。
[18] 地層処分システムの各要素の特性（Feature），特性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過程（Process）の略称。

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

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。併せて、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。

（a）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のための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係るデータを取得し、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。

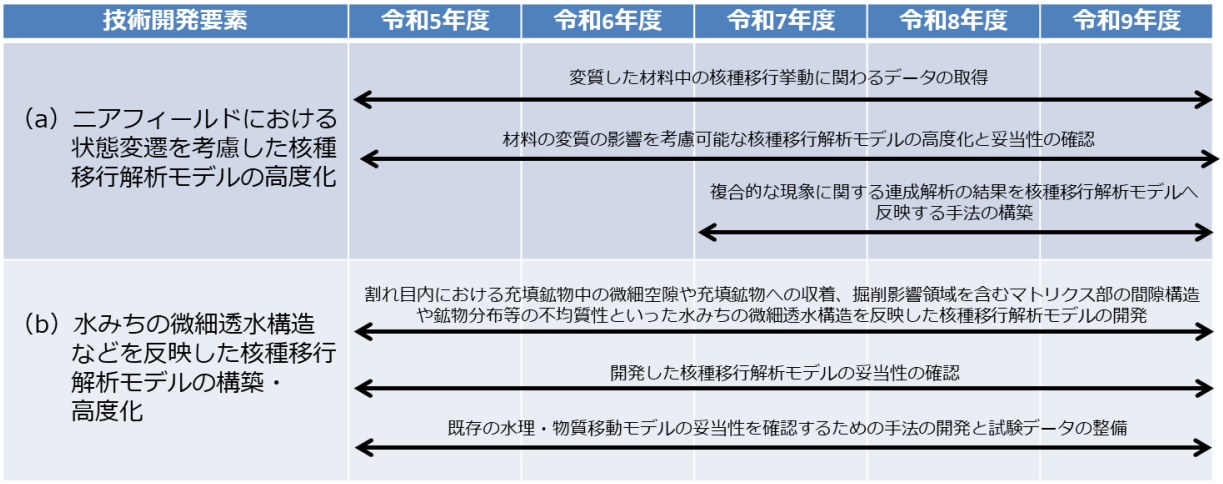
今後も、この取組を継続するとともに、開発した核種移行解析モデルの高度化や妥当性を確認するための研究開発を進める。また、時間変化を考慮した地質環境モデルやニアフィールドを対象とした複合的な現象に関する連成解析の結果を、核種移行解析モデルへ反映する手法を構築する。例えば、ニアフィールドの状態変遷に応じて核種移行パラメータの時間変化を考慮し、これに対応して核種移行解析が可能となるようなモデルの構築とそれを適用した解析の妥当性の確認等を進める。

（b）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リ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、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、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23 「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



(2) 施設設計等を反映した核種移行解析モデルの高度化

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な核種移行解析モデルの開発を進め、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。

(a) 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、3.3.2 (2) (b)「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、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。また、DXの一環とし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するよう、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あわせて開発を進める。

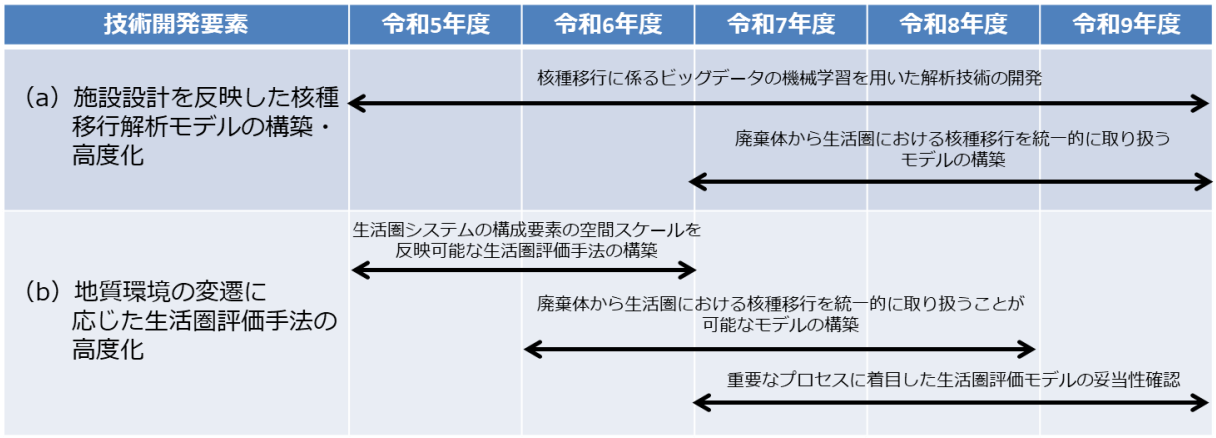
(b) 地質環境の変遷に応じた生活圏評価手法の高度化

これまで、四次元地質環境モデルを用いて、GBI（地質圏-生活圏インターフェイス（Geosphere-Biosphere Interface））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、これに加えてGBIの時間変化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) (a) 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24 「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年間の研究開発工程



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

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、「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。また、サイトで取得したボーリングコアや地下水水質等の調査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。

（a）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。これにあたっては、特に、幅広い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、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。また、収着・拡散データの信頼性の向上に資するため、先端的な分析技術や計算科学手法の適用により現象の理解を深化させ、それらに基づいた収着・拡散モデルの構築を進める。

（b）様々な生活圏に対応可能な評価に係るデータの拡充

これまで、日本全体を幅広く対象として、安全性の評価上重要な核種（以下、重要核種）の水田及び畑地に対する収着分配係数等のデータ取得や、特に線量を支配する核種であるヨウ素を対象に、地表における循環に関するメカニズム等に関する研究を実施し、生活圏評価に反映を行ってきた。

今後も引き続き、生活圏に存在する様々な土壌を対象とした重要核種の収着分配係数等のデータを拡充する。加えて、「3.3.2（2）（b）地質環境の変遷に応じた生活圏評価手法の高度化」の検討に応じ、必要となるデータの取得を進める。

（c）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

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係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、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25 「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
（a）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および収着・拡散データの拡充				
	先端分析や計算科学手法による現象理解の深化に基づく収着・拡散モデルの構築				
（b）様々な生活圏に対応可能な評価に係るデータの拡充	土壌の収着分配係数等のデータ拡充				
（c）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構築	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上でのツール・基盤の整備

（1）知識マネジメントに係るツールの整備

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（以下、知識という）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。これを支えるツールの整備を行う。

（a）セーフティケースの論証構造の可視化

セーフティケースは多岐にわたる専門分野の技術的な知識を統合した膨大な文書群からなるため、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関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ロジック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、安全な地層処分の実現に係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こと、また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て、NUMO-SC を構成する要件－主張－論拠－根拠情報の相互関係の可視化を進めている。

これまで 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が確認できた。

今後は NUMO-SC 全体を対象に討論モデルを用いて可視化するための取組を実施する。この際、3.3.1（2） (a)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設定に用いる情報管理ツールとの連携・統合を考慮する。

（b）セーフティケースコミュニケーションに係るツールの整備

NUMO-SC は地層処分についてある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、広く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ることに加えて、システムの安全機能を示すために実証的な試験を実施することができないことから、時間的・空間的な予測に関わる独特の方法論を用いる必要があるため、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、地層処分と他分野でそれぞれ用いられている用語であっても、意図する意味合いが異なっているものもある。このようなことから、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うことが困難な場面が散見される（例えば、「NUMO包括的技術報

告書レビュー」特別専門委員会においても、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はある程度の時間を要した)。

このことから、これまで地層処分と接点の少ない各学術分野の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（ノウハウ）を整備してきた。

また、上記（a）で整備する知識マネジメントに係るツールは、安全な地層処分の実現に係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中のNUMO-SCは、報告書を構成する文書類（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どうし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、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、コミュニケーションに資するツールの開発に取り組む。

表26 「知識マネジメントに係るツールの整備」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
(a) 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→				
(b) セーフティケースコミュニケーションに係るツールの整備		←セーフティケースコミュニケーションに係るツールの整備→			

(2) モニタリングシステムを支える基盤の整備

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 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、埋め戻し後の緩衝材の飽和現象）や周辺母岩の状態（例えば地下水位の変化）の観測等にかかわるモニタリング

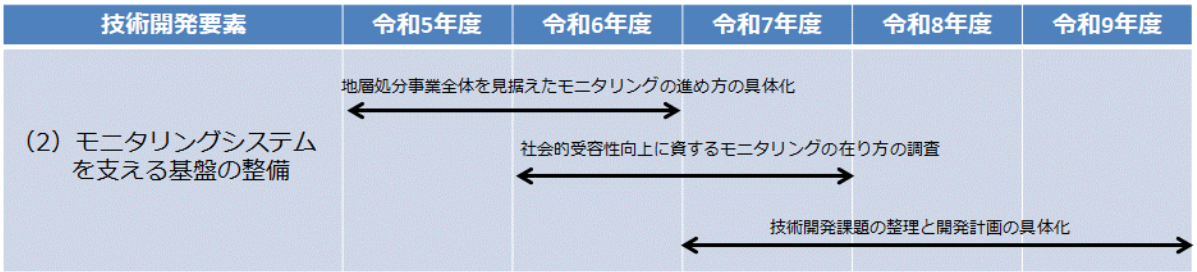
これらのモニタリングを実施するために必要なモニタリングシステムの開発に向けて、事業期間全体を見据えたモニタリングの考え方と進め方の具体化、及びモニタリング技術課題の抽出を行う。

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（3）参照）や、センサー類による人工バリアへの影響を排除した地中無線通信によるデータ伝送に関する要素技術の開発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、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、信頼性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。

3.1.2（3）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上で、地質環境調査や安全評価への活用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27 「モニタリングシステムを支える基盤の整備」に関する５年間の研究開発工程



3.5　代替処分オプションに関する研究開発

最終処分の方法として、地層処分が現時点において最も有望であるという国際認識の下、各国において地層処分の実現に向けた取組が進められており、わが国においても、科学的知見が蓄積され実現可能性が示されている地層処分を最終処分の方法としている。一方で、エネルギー基本計画や基本方針（別添５）に示されているように、幅広い選択肢を確保する観点から、使用済燃料の直接処分及びその他の代替処分オプションに関する調査研究を進めることが重要であるため、今後も代替処分オプションについての知見や情報の整備を継続する。また、使用済燃料の直接処分を中心とする代替処分オプションに関する研究開発の成果を適宜取りまとめ、技術基盤の着実な整備を進める。

(1)　使用済燃料直接処分

これまでは、処分容器や使用済燃料、緩衝材の挙動評価などの個別課題を中心に研究開発を実施してきた。国及び関係研究機関においては、今後も引き続き直接処分第 1 次取りまとめで抽出された使用済燃料の処分に特有の課題について、使用済燃料の多様性に配慮しつつ、以下の研究開発を進める。

(a) 臨界安全評価技術の高度化

処分後の臨界安全評価をより現実的なものとするために、容器内部において未臨界状態が維持される条件等を把握するための手法の高度化を図る。

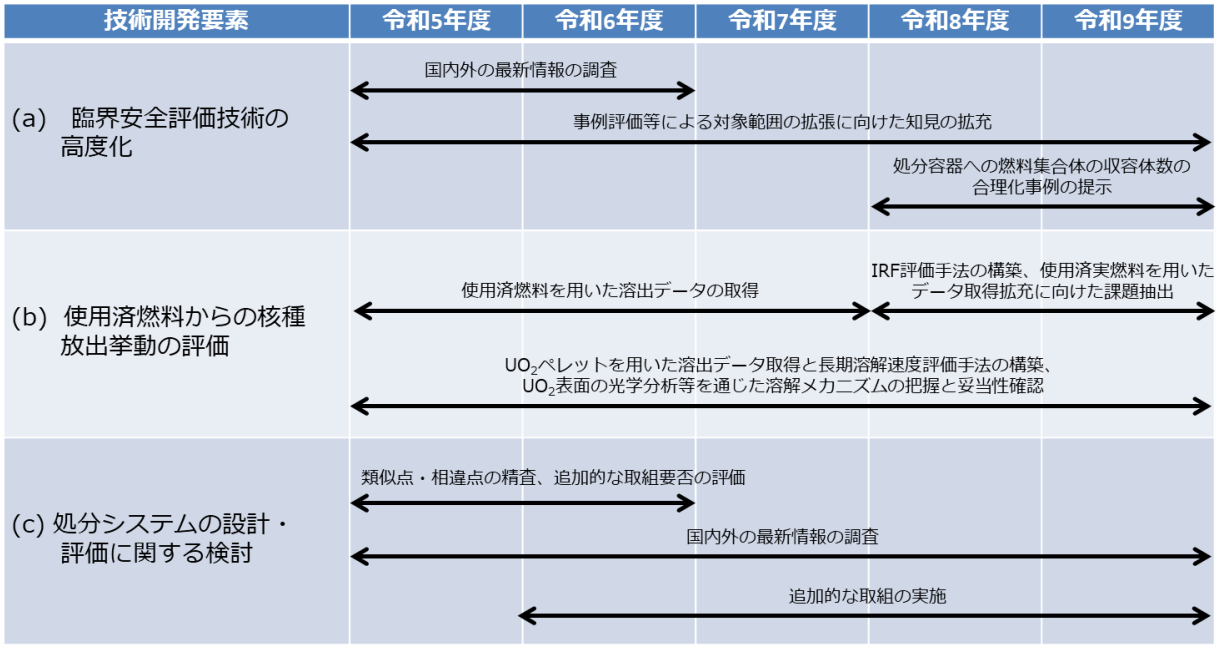
(b) 使用済燃料からの核種放出挙動の評価

核種移行の検討をより適切なものとするために、使用済燃料（集合体）からの放射性核種の特徴的な放出挙動についての理解を深めるための調査研究を実施する。

(c) 処分システムの設計・評価に関する検討

直接処分の成立性の検討をより確かなものとするために、NUMO-SC におけるガラス固化体の処分システムの設計・評価に関する検討も踏まえて、使用済燃料直接処分の特徴を考慮した設計・評価に関する検討を実施し、直接処分の成立性に関する基盤情報を整備拡充する。

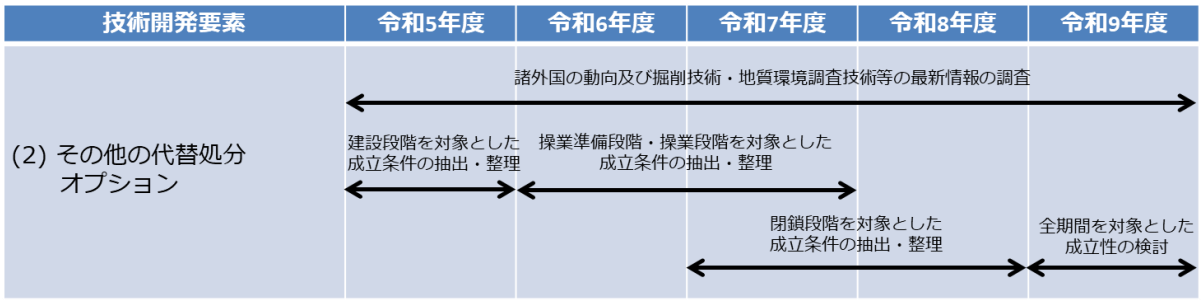
表28 「使用済燃料直接処分」に関する５年間の研究開発工程



(2) その他の代替処分オプション

その他の代替処分オプションの一つである超深孔処分に関しては、これまでに、事例調査を通じて諸外国での考え方、特徴、検討の背景、技術的課題等を整理するとともに、これらを参考に、わが国の諸条件を考慮した場合の適用性・成立性を検討するための留意点や検討方法を整備してきた。今後も、諸外国の情報を適宜収集しながら、必要に応じてわが国の諸条件を考慮した場合の超深孔処分の成立性に関する検討を継続する。

表29 「その他の代替処分オプション」に関する５年間の研究開発工程



４．おわりに

令和５年度～令和９年度における地層処分研究開発に関する全体計画を策定した。わが国における安全な地層処分の実現性を一般的に示すためのセーフティケース（包括的技術報告書）の構築を通して得られた課題をもとに、地質環境の特性、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といった研究開発分野を設定するとともに、地層処分の安全性を評価する上で課題となっている不確実性の低減を目指し、各分野で研究開発計画を策定した。あわせて、中長期的に研究開発を進める上でのツール・基盤の整備についても計画を策定するとともに、幅広い選択肢を確保する観点から進めてきている代替処分オプションに関する研究開発計画を策定した。

地層処分の実現に当たっては、国、関係研究機関及びNUMOが連携・協力を図りながら、地層処分技術の信頼性向上に向けた取組を進めることが重要である。また、処分事業及び研究開発の進捗状況等を考慮し、適宜見直しを図りながら、本全体計画に示された研究開発を着実に進めていくことが重要である。

研究開発成果については、国内外に情報発信するとともに、NUMOによる処分事業に着実に反映されるよう取り組む。また、ステークホルダーとの対話の促進や社会的合意形成に向けた取組において、こうした研究開発成果を常に念頭においておくことも重要である。

（別添１）

「地層処分研究開発調整会議」について

１．　背景・目的

○　地層処分に係る研究開発について、原子力政策大綱（平成１７年１０月　閣議決定）で「国及び研究開発機関等は、全体を俯瞰して総合的、計画的かつ効率的に進められるよう連携・協力するべきである」とされたこと等を受け、同年、資源エネルギー庁主催の下、日本原子力研究開発機構及び関連研究機関が参画する「地層処分基盤研究開発調整会議」（以下、基盤調整会議という。）を開始。

○　基盤調整会議では、ＰＤＣＡサイクルを回しながら関連研究機関が実施する基盤研究の全体計画を策定。平成２５年には「地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成２５年度～平成２９年度）」を策定・公表し、現在、全体計画に基づいた研究開発を実施中。

○　一方、最終処分法における基本方針（別添５）に基づき設置された原子力委員会放射性廃棄物専門部会が昨年秋に取りまとめた評価報告書において、研究開発等における関係行政機関等の間の一層の連携強化、基盤調整会議の運営の透明性確保、原子力発電環境整備機構は一層のリーダーシップを発揮し、実施主体・基盤研究開発機関一体で「真の全体計画」を策定すること、人材を継続的に確保・育成していくための方策の検討・充実が必要とされた。

○　こうした動きを受けて、基盤調整会議のスコープの拡充等の見直しを行い、「地層処分研究開発調整会議」（以下、調整会議という。）として改変する（基盤調整会議は廃止）。

２．　調整会議の役割・機能

上記の背景・目的を踏まえて、以下の項目に関する審議・調整を行う。研究開発の対象としては、高レベル放射性廃棄物の地層処分、ＴＲＵ廃棄物の地層処分等とする。

①研究開発全体計画の策定

実施主体を含むわが国における地層処分に関する研究開発計画を記述した「地層処分研究開発に関する全体計画」を策定する。当面の計画として、平成３０年度～平成３４年度までの５ヵ年に関する全体計画を策定する。

②研究開発の連携に関する調整

研究開発の効率的な実施、深地層の研究施設等の有効活用の観点から、研究開発に関する連携や役割分担の調整を行う。

③成果の体系化に向けた調整

次期全体計画の策定を目的として、成果の体系化に向けた調整を行う。

④研究開発の重複排除の調整

研究開発全体で重複や重要な抜け落ちが生じないように調整を行う。

３．　調整会議の組織・運営

１）　参加機関と役割

会議は所管官庁、実施主体、関連研究機関、廃棄物発生者により構成され、２．に関する審議・調整を行う。

（参加機関）

経済産業省
文部科学省
原子力発電環境整備機構
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
国立研究開発法人産業技術総合研究所
一般財団法人電力中央研究所
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター
電気事業連合会
日本原燃株式会社

２）　組織構成と役割

運営会議を設置することとする。また、必要に応じ、運営会議の下に分野毎の作業部会や外部有識者による委員会を設置することができることとする。

４．　会議の公開

○　会議は原則公開とし、傍聴については、会議の運営に支障を来さない範囲において、原則として認める。
○　配布資料、議事要旨、成果物はＨＰを通じて公開する。ただし、特段の事由により非公開とする場合は、理由を明示するものとする。

（別添２）

地層処分研究開発調整会議の外部有識者（第７回以降）

（５０音順）

出光　一哉	九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学部門教授
大西　有三	京都大学名誉教授／京都大学総長特別補佐（非常勤）
長田　昌彦	埼玉大学大学院理工学研究科環境科学･社会基盤部門教授 ／埼玉大学研究機構レジリエント社会研究センター教授
小林　大志	京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻准教授
小峯　秀雄	早稲田大学理工学術院創造理工学部社会環境工学科教授
新堀　雄一	東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻教授【主査】
廣野　哲朗	大阪公立大学理学部地球科学科教授
松島　潤	東京大学大学院新領域創成科学研究科環境システム学専攻 エネルギー資源システム学分野教授
安江　健一	富山大学学術研究部都市デザイン学系准教授

（別添３）

地層処分研究開発調整会議　会合経緯（第７回以降）

〇第７回（令和４年６月６日）

（議題）

１．地層処分研究開発に関する次期全体計画の策定について

２．研究開発の現状について

（配布資料）

資料１．地層処分研究開発に関する次期全体計画の策定について（経済産業省）

資料２－１．研究開発の現状について（経済産業省）

資料２－２．技術開発の現状について（原子力発電環境整備機構）

資料２－３．研究開発の現状について（日本原子力研究開発機構）

参考資料１．「地層処分研究開発調整会議」について

参考資料２．地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～令和 4 年度）（令和 2 年 3 月改訂版、地層処分研究開発調整会議）

〇第８回（令和４年８月１０日）

（議題）

１．研究開発状況の整理について

２．次期全体項目の項目立てについて

（配布資料）

資料１－１．地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～令和 4 年度）の達成状況と今後の取組み案（原子力発電環境整備機構、資源エネルギー庁）

資料１－２．現行の全体計画に沿った研究開発の達成状況と今後の取組み案（原子力発電環境整備機構、資源エネルギー庁）

資料２－１．地層処分研究開発に関する次期全体計画（令和 5 年度～）目次構成の考え方（案）（原子力発電環境整備機構）

資料２－２．次期全体計画（令和 5 年度～）の目次構成（案）詳細（原子力発電環境整備機構）（PDF 形式：329KB）PDF ファイル

参考資料１．地層処分研究開発調整会議（第 7 回）議事要旨

参考資料２．地層処分研究開発調整会議（第 7 回）で原子力発電環境整備機構が頂戴したご質問への回答（原子力発電環境整備機構）

○第９回（令和４年１１月１０日）

（議題）

１．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）（第１章及び第２章）について

（配布資料）

資料１－１．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）の目次構成（案）の見直しについて（原子力発電環境整備機構）

資料１－２．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）（第１章及び第２章）（案）（原子力発電環境整備機構、資源エネルギー庁）

参考資料１．地層処分研究開発調整会議（第８回）議事要旨

参考資料２．地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～令和 4 年度）（令和２年３月改訂版、地層処分研究開発調整会議）

○第１０回（令和５年２月２０日）

（議題）

１．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）について

（配布資料）

資料１－１．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）の目次構成（案）の見直しについて（原子力発電環境整備機構）

資料１－２．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）（案）（原子力発電環境整備機構、資源エネルギー庁）

参考資料１．地層処分研究開発調整会議（第９回）議事要旨

参考資料２．地層処分研究開発に関する全体計画（平成３０年度～令和４年度）（令和２年３月改訂版、地層処分研究開発調整会議）

（別添４）

関係資料

○エネルギー基本計画（令和３年１０月）

（ｱ）高レベル放射性廃棄物の最終処分に向けた取組の抜本強化

最終処分の実現に向けては、廃棄物を発生させた現世代の責任として将来世代に負担を先送りしないよう、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」（２０１５年５月閣議決定）に基づき、国が前面に立って取り組むこととした。取組に当たっては、最終処分事業の実現が社会全体の利益であるとの認識に基づき、その実現に貢献する地域に対し、敬意や感謝の念を持つとともに、社会として適切に利益を還元していく必要があるとの認識が、広く国民に共有されることが重要である。２０１７年７月、「科学的特性マップ」を公表し、これを契機に、原子力発電環境整備機構（ＮＵＭＯ）とともに全国で対話活動を展開している中、２０２０年１１月、北海道寿都町と神恵内村で文献調査を開始した。調査に当たっては、「対話の場」等のあらゆる機会を通じ、地域の声を踏まえつつ、周辺市町村等も含めた対話活動を推進する。その中で、地層処分事業の安全確保の考え方や地域の未来等について、議論を丁寧に重ね、検討を深めていただけるよう、最大限取り組む。この際、地域との共生が重要であることを踏まえ、将来のまちづくりに資する、必要な情報の収集・分析や、適切な支援制度の活用促進等に積極的に取り組む。引き続き、地域の理解と協力を得ながら、全国のできるだけ多くの地域において地層処分事業に関心を持っていただくとともに、調査を受入れていただけるよう、対話活動を積極的に行う。その中で、国は、地域の理解活動の状況を踏まえ、調査の実施等について関係自治体へ主体的に申し入れるものとする。

高レベル放射性廃棄物については、ⅰ）将来世代の負担を最大限軽減するため、長期にわたる制度的管理（人的管理）に依らない最終処分を可能な限り目指す、ⅱ）その方法としては現時点では地層処分が最も有望である、との国際認識の下、各国において地層処分に向けた取組が進められている。我が国でも、科学的知見の蓄積を踏まえた継続的な検討を経て、地層処分することとしている。ＮＵＭＯは、最新の技術開発動向を踏まえた処分事業の安全確保のための考え方やその手法を「包括的技術報告書」としてとりまとめた。他方、その技術的信頼性に関する専門的な評価が国民に十分には共有されていない状況を引き続き解消していくことが重要である。このため、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。この際、幌延の深地層研究施設等における研究成果を十分に活用していく。あわせて、地層処分を前提に取組を進めつつ、可逆性・回収可能性を担保し、今後より良い処分方法が実用化された場合に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにする。

このような考え方の下、地層処分の技術的信頼性について最新の科学的知見を定期的かつ継続的に評価・反映するとともに、将来に向けて幅広い選択肢を確保し、柔軟な対応を可能とする観点から、使用済燃料の直接処分など代替処分オプションに関する調査・研究を着実に推進する。あわせて、処分場を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等について調査・研究を進め、処分場閉鎖までの間の高レベル放射性廃棄物の管理の在り方を具体化する。処分事業の実現に必要な知見を拡充する観点から、研究成果の発展や人材の継承に取り組むほか、国内外の研究基盤

の相互活用を推進するなど、地域の理解を得ながら、国内外の関係機関との連携を進める。また、対話活動においても、共通の課題を抱える各国と知見や経験の共有を図り、国内の取組に活用していく。また、廃棄物の発生者としての基本的な責任を有する原子力事業者は、国やＮＵＭＯの取組を踏まえ、地域に根ざした理解活動を主体的かつ積極的に行うとともに、最終処分場の必要性について、広く国民に対し説明していくことが求められる。

（別添５）

〇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）

第５ 特定放射性廃棄物の最終処分に係る技術の開発に関する事項

特定放射性廃棄物の最終処分に係る技術の開発のうち、機構は、最終処分事業の安全な実施、経済性及び効率性の向上等を目的とする技術開発を担当するものとし、国及び関係研究機関は、最終処分の安全規制・安全評価のために必要な研究開発、深地層の科学的研究等の基盤的な研究開発及び最終処分技術の信頼性の向上に関する技術開発等を積極的に進めていくものとする。あわせて、最終処分施設を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等について調査研究を進め、最終処分施設の閉鎖までの間の特定放射性廃棄物の管理の在り方を具体化する。当該技術開発等の成果については、最終処分事業や国の安全規制において有効に活用されることが重要である。また、国、機構及び関係研究機関は、連携及び協力を行いつつ、最終処分の技術的信頼性等の定期的な評価を行うことを通じ、全体を俯瞰して総合的、計画的かつ効率的に当該技術開発等を進めるものとする。

さらに、最終処分に関する国民との相互理解を深め、最終処分事業を円滑に推進するための社会的側面に関する調査研究も進めていくことが重要であり、国及び機構は、そうした調査研究が継続的に行われるよう、適切に支援していくものとする。また、国は、最終処分に関する研究者や技術者を養成し、確保する方策について、関係研究機関、機構及び発電用原子炉設置者等と協力しつつ、検討していくものとする。

（別添６）

〇国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の中長期目標を達成するための計画（中長期計画）（令和４年４月１日～令和１１年３月３１日）

5. 高レベル放射性廃棄物の処理処分に関する技術開発の着実な実施

「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）や「エネルギー基本計画」を踏まえて、産業界、国及び関係機関との連携の下で、役割分担を明確にし、高レベル放射性廃棄物の処理処分に関する研究開発を着実に実施する。

また、「総合知」の発現を通じた社会的価値の創出につなげていくため、研究開発の実施に当たっては、研究成果の社会実装までを見据え、最新の科学的知見とともに社会科学的知見を踏まえることとし、実施主体、国内外の研究開発機関、大学等との技術協力や共同研究等を通じて、最先端の技術や知見を取得・提供し、我が国における高レベル放射性廃棄物の処理処分に関する技術力の強化・人材育成を図る。あわせて、関連する研究施設等の施設見学、ウェブサイトの活用による研究開発の実施状況や成果に関する情報の公開を通じ、我が国における高レベル放射性廃棄物の処理処分に関する国民との相互理解促進に努める。

(1) 高レベル放射性廃棄物の処理に関する研究開発

（略）

(2) 高レベル放射性廃棄物等の地層処分研究開発

高レベル放射性廃棄物及び地層処分相当低レベル廃棄物（以下「高レベル放射性廃棄物等」という。）の地層処分の実現に必要な基盤的な研究開発を着実に進めるとともに、実施主体が行う地質環境調査、処分システムの設計・安全評価、国による安全規制上の施策等のための技術基盤を最先端のデジタル技術も取り入れつつ整備し、提供する。さらに、これらを通じ、実施主体との人材交流等を進め、円滑な技術移転を進める等社会実装を図る。

加えて、使用済燃料の直接処分等代替処分オプションに関する調査・研究を着実に推進する。

これらの取組により、我が国の将来的な地層処分計画立案に資する研究成果を創出するとともに、地層処分計画に基づいた地層処分事業に貢献する。

1) 深地層の研究施設計画

幌延深地層研究計画（堆積岩：北海道幌延町）については、調査・研究を委託や共同研究等により重点化しつつ着実に進める。同計画では、「令和２年度以降の幌延深地層研究計画」に基づき、実際の地質環境における人工バリアの適用性確認、処分概念オプションの実証及び地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証を進める。研究の実施に当たっては、稚内層深部（深度 500m）に坑道を展開して研究に取り組むとともに、更なる国内外の連携を進め、研究開発成果の最大化を図る。これらの研究課題については、目標期間を目途に取り組み、そ

の上で、国内外の技術動向を踏まえて、地層処分の技術基盤の整備の完了が確認できれば、埋め戻しを行うことを具体的工程として示す。

超深地層研究所計画については、「令和２年度以降の超深地層研究所計画」に基づき、有効性を確認したモニタリングシステムを用いた地下水の調査と地上観測孔による地下水調査を環境モニタリング調査として、坑道の埋め戻し後５年程度継続して実施する。地下水の環境モニタリング調査終了後は速やかに、地上施設の基礎コンクリート等の撤去及び地上から掘削したボーリング孔の埋め戻し、閉塞を行う。その後、用地の整地を行い、全ての作業を完了する。また、坑道埋め戻し及び地上施設の撤去等の作業に伴う研究所周辺の環境への影響の有無を確認するため、研究開始当初より実施している河川水等の水質分析及び騒音・振動測定といった環境影響調査を継続して実施する。

2）地質環境の長期安定性に関する研究

自然現象に伴う地質環境の変化を予測・評価する技術を、地球年代学に係る最先端の施設・設備も活用しつつ整備する。これらの技術については、地層処分事業における各調査段階に必要となる編年技術の構築のみならず、原子力を取り巻く課題解決や社会のニーズへの対応も考慮して整備を行う。また、大学等研究機関との協働を進め、土岐地球年代学研究所に設置されている施設・設備の利用促進を図るとともに、最先端の地球科学分野の研究成果を創出する。

3）高レベル放射性廃棄物等の地層処分システムに関する研究開発

深地層の研究施設計画や地質環境の長期安定性に関する研究の成果も活用し、処分事業の進展に応じ、関係機関と一層の連携を図りながら、高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る処分システム構築・評価解析技術の先端化・体系化を更に進める。

4)代替処分オプションの研究開発

将来に向けて幅広い選択肢を確保し、柔軟な対応を可能とする観点から、海外の直接処分等に関する最新の技術動向を調査するとともに、高レベル放射性廃棄物等の地層処分研究開発の成果を活用しつつ、使用済燃料の直接処分等代替処分オプションに特徴的な現象に着目した研究を着実に進める。