

地層処分研究開発に関する全体計画

(平成30年度～平成34年度)

(案)

平成30年3月

令和2年3月改訂

地層処分研究開発調整会議

目次

1.はじめに	1
2.研究開発項目と内容	3
2.1 地層処分に適した地質環境の選定及びモデル化	5
2.1.1 自然現象の影響	5
(1) 火山・火成活動の発生及び影響の調査・評価技術の高度化	5
(2) 深部流体の移動・流入に係る現象理解及び影響の評価技術の整備	6
(3) 地震・断層活動の活動性及び影響の調査・評価技術の高度化	8
(4) 地形・地質学的情報に基づく隆起・侵食の調査・評価技術の高度化	10
(5) 長期的な自然現象の発生可能性とその地質環境への影響の評価技術の高度化	11
2.1.2 地質環境の特性	13
(1) 水みちの水理・物質移動特性の評価技術の整備	13
(2) 沿岸海底下の地質環境特性の調査・評価技術の整備	15
(3) 地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化	17
(4) ボーリング孔における体系的な調査・モニタリング・閉塞技術の整備	18
(5) サイト調査のための技術基盤の強化	20
2.2 処分場の設計と工学技術	22
2.2.1 人工バリア	22
(1) 人工バリア代替材料と設計オプションの整備	22
(2) TRU等廃棄物に対する人工バリアの閉じ込め機能の向上	23
(3) 高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発	25
2.2.2 地上・地下施設	27
(1) 処分施設の設計技術の向上	27
(2) 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備	28
(3) 処分場建設の安全性を確保する技術の高度化	30
2.2.3 回収可能性	32
(1) 廃棄体の回収可能性を確保する技術の整備	32
2.2.4 閉鎖前の安全性の評価	34
(1) 閉鎖前の処分場の安全性評価技術の向上	34
2.3 閉鎖後長期の安全性の評価	36
2.3.1 シナリオ構築	36
(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	36
(2) リスク論的考え方に基づいたシナリオの構築手法の高度化	42
2.3.2 核種移行解析モデル開発	43
(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	43

(2) 施設設計等を反映した核種移行解析モデルの高度化	46
2.3.3 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	48
(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	48
3. 中長期的に研究開発を進めるまでの重要事項	51
3.1 技術マネジメント	51
3.1.1 地層処分技術の特徴と研究開発に求められるもの	51
3.1.2 地層処分における技術マネジメントの全体像	51
3.1.3 技術マネジメントを支える体制と仕組み	52
(1) 技術マネジメントを支える体制	52
(2) 技術マネジメントを円滑化する仕組み	54
3.1.4 国際連携・貢献	56
3.1.5 技術マネジメントを強化するにあたって留意すべき点	56
3.2 代替処分オプション	57
3.2.1 使用済燃料直接処分	57
(1) 処分容器の挙動評価	57
(2) 使用済燃料、緩衝材の挙動評価	57
(3) 直接処分システムの成立性の多角的な確認	57
3.2.2 その他の代替処分オプション	58
4. おわりに	59

1. はじめに

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、以下の4点を目的として、日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という。）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。）が開始された。

- ・研究開発全体計画の策定
- ・研究開発の連携に関する調整
- ・成果の体系化に向けた調整
- ・研究開発の重複排除の調整

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8月 原子力委員会 政策評価部会）」にて、原子力発電環境整備機構（以下、「NUMO」という。）に関して、「NUMOとしても、処分事業に必要となる技術に係る研究開発が計画的、効率的に実施されるよう、関係研究機関の技術開発の実施内容に反映されるべき技術的要件等をより一層明確に提示するべき」との指摘を受けて、同年、当初オブザーバー参加であったNUMOもメンバーとなり、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。また、NUMOは基盤研究開発の成果も踏まえ、平成25年に中期的な技術開発計画「地層処分事業の技術開発計画」を策定し、これに基づいた技術開発を実施している。

平成30年3月時点において、NUMOは第2次取りまとめ¹以降の上記研究開発成果等を含む最新の科学的・技術的知見を踏まえ、サイトを特定せず、わが国における安全な地層処分の実現性について総合的に検討しセーフティケースとして取りまとめた包括的技術報告書²を作成中であった。

一方、「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）」（以下、「基本方針」という。）に基づき、原子力委員会の下に関係行政機関等の活動状況に係る評価等を専門的かつ総合的観点から行う放射性廃棄物専門部会が設置され、地層処分に関する研究開発への提言として表1のような評価がなされた。

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）

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">・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、 |
|---|

1 第2次取りまとめ：旧核燃料サイクル開発機構（現JAEA）が1999年11月に公開した報告書「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－」。

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、わが国における安全な地層処分の実現性について総合的に検討した報告書。

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發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。

平成30年3月に、それまでの全体計画が終期を迎えたことから、平成30年度以降の5ヶ年（平成30年度～平成34年度）の全体計画の策定については、上記の背景を踏まえ、新たに「地層処分研究開発調整会議」（以下、「調整会議」という。）へと改組した上で、研究開発計画を検討した。

検討にあたっては、NUMOのリーダーシップのもと、包括的技術報告書を作成する過程で明らかとなった課題を全体計画として網羅的に設定することとした。

また、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³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り組みとして「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」をすべきであると示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は、中長期的に研究開発を進める上での重要事項⁴として、全体計画に含めた。

全体計画の策定にあたっては、研究開発の成果をセーフティケース⁵の作成・更新に資するという基本的視点に立って、各研究項目の相互関係を明確にしつつ検討を進めるとともに、調整会議参加機関以外に外部有識者からも専門家の観点からご意見を伺った。

全体計画の課題抽出には、原子力委員会から「包括的技術報告書を有効に活用」とされたことを受け、上述したように包括的技術報告書を作成する過程で抽出された課題を参考としたが、この包括的技術報告書については、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外部レビューを実施する計画となっていたことから、外部レビューの進捗を踏まえ、研究課題の再整理が必要となる可能性があるとしていた。また、基盤調整会議の設置以来、全体計画の進捗状況の確認等を適宜実施してきており、作成した全体計画についてもPDCA

3 國の審議会等：「地層処分技術 WG」、「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」。

4 中長期的に研究開発を進める上での重要事項：使用済燃料の直接処分等の代替処分の研究開発については、エネルギー基本計画（平成26年4月閣議決定）や基本方針に基づき、幅広い選択肢を確保する観点から調査・研究を推進することとされている。これらの代替処分オプションについても、中長期的に研究開発を進めるうえでの重要事項として整理することとした。

5 セーフティケース：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」、OECD/NEA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。

サイクルを回しながら進めていくことが重要である。

これらを踏まえ、作成した全体計画は包括的技術報告書の外部レビューの進捗や、処分事業及び研究開発の進捗状況等の反映を考慮し、平成32年度以降の計画について平成31年度末を目途に見直すこととしていた。

NUMOは、外部レビューを受けるための「レビュー版」として、平成30年11月に包括的技術報告書を公表し、同12月から日本原子力学会のNUMO包括的技術報告書レビュー特別専門委員会によるレビューが開始された。1年間に及ぶ技術レビューの結果は、平成31年12月に取りまとめられて公表された。レビュー報告書によれば、「今後実施すべき研究開発が概ね整理されている」と評価されており、包括的技術報告書の作成過程で抽出された課題を大きく変更するような必要はないと考えられた。

また、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包括的技術報告書の専門家説明会で示された処分技術や研究開発に関するご意見は、現在の全体計画に盛り込まれている研究開発課題に包含されていると考えられるものである。

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2年1月及び3月に調整会議を再開し、外部有識者を交えて議論を行った。その結果、全体計画の基本的構成や取り組むべき課題については大きく変更を要する点はないものの、課題間の関係や研究開発工程について明確化するべきとの指摘があった。そこで、役割分担等を示すための樹形図や研究工程等を追加することとした。また、国内外の動向等を加味し、研究開発課題がより明確に示されるように記載を見直した。

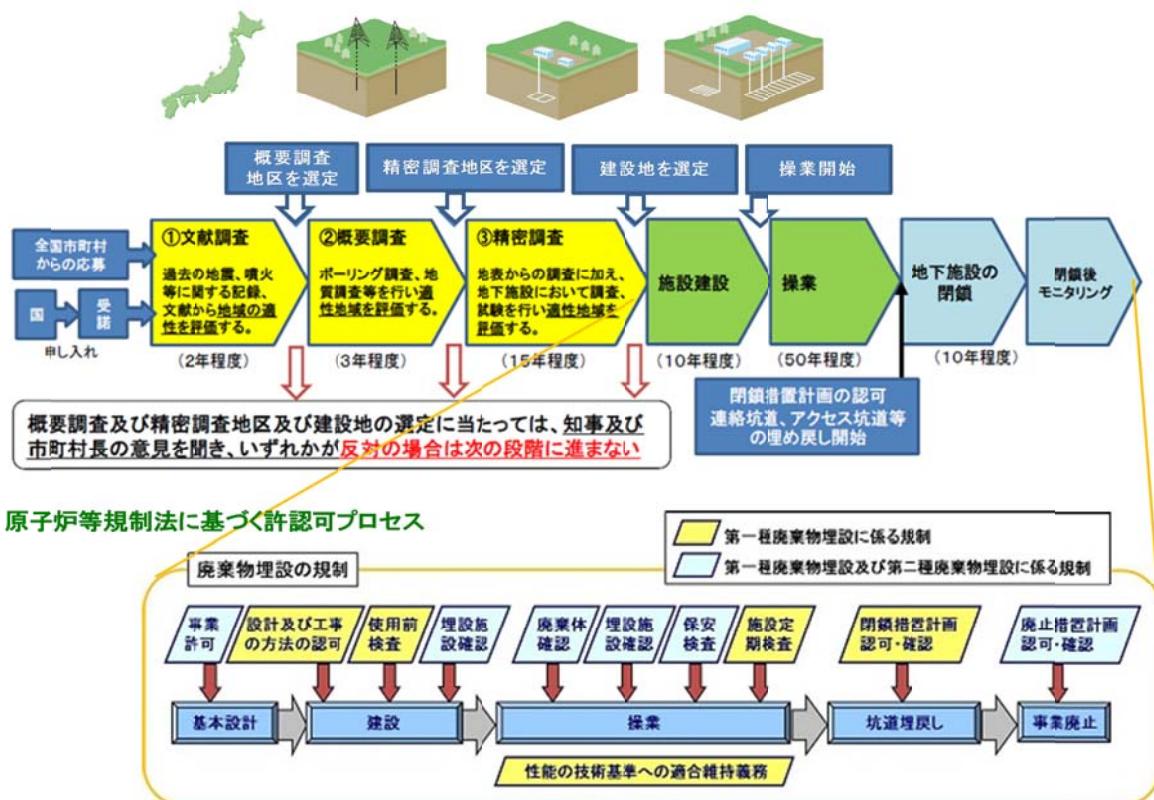
2. 研究開発項目と内容

地層処分事業は、事業期間が長期にわたることに加え、図2-1に示す段階的なプロセスに従った実施にあたっては、地質環境調査・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技術などの多岐にわたる技術分野における個々の技術を全体として統合することが必要である。これらの特徴を考慮し、地層処分の研究開発を進めるにあたっては、国、NUMO及び関係研究機関が実施する研究について、図2-2に示すように地質環境の調査・評価、処分場の設計及び安全評価の3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、計画的に進めることが必要と考え、全体計画を策定した。

研究開発課題は、国及び関係研究機関とNUMOとが取り組む内容が全体としてどのような方向性であるかを示すために一体的な記載としているが、国及び関係研究機関とNUMOとの役割分担については「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）」において、NUMO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」とされ、一方、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」が示されている。このため、基本方針に示された役割分担に沿って、国及び関係研究機関が行う基盤的な研究開発とNUMOが行う実用的な技術開発とに仕分けして取り組む。

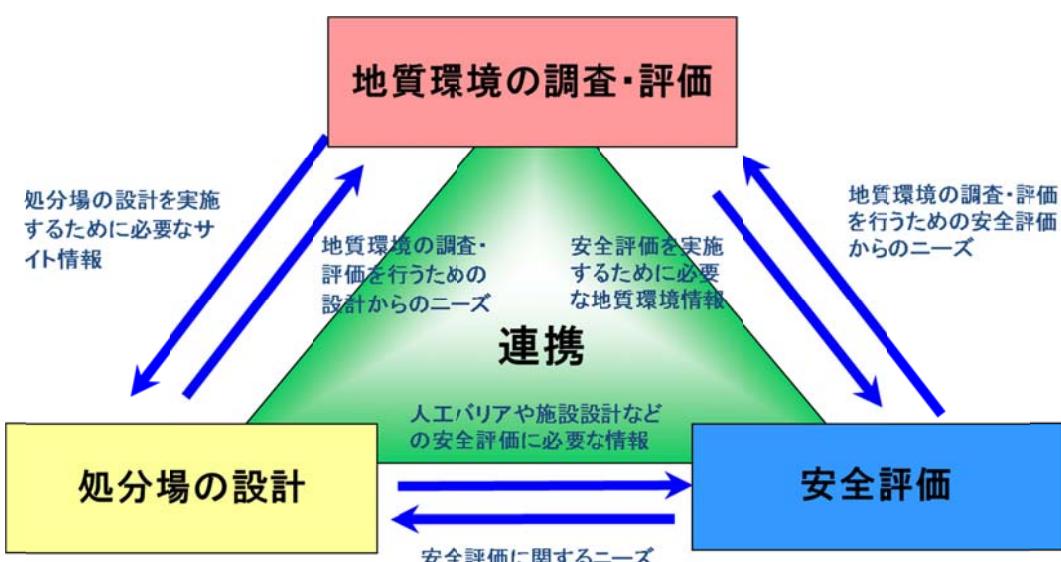
なお、全体計画の枠組みや研究課題の相互関係及び役割分担を、樹形図（別添1）に示す。

「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」(平成12年施行)に基づく立地選定プロセス



出典：NUMO包括的技術報告書（レビュー版） 本編 第2章 2-11ページ

図2-1 わが国の地層処分事業に係る段階的なプロセス



出典：NUMO包括的技術報告書（レビュー版） 本編 第2章 2-27ページ

図2-2 地質環境の調査・評価、処分場の設計及び安全評価の連携

2.1 地層処分に適した地質環境の選定及びモデル化

2.1.1 自然現象の影響

(1) 火山・火成活動の発生及び影響の調査・評価技術の高度化

(i) 目的

地殻～マントル内の地下構造の調査などを通じて新たな火山・火成活動の発生に係る予測の信頼性向上を図るとともに、火山の活動様式に応じたマグマの影響範囲の把握に係る調査・評価技術について調査・評価事例の蓄積を通じて整備する。また、沿岸部海域を対象に、陸域で有効性が確認されたマグマの有無を把握するための調査・評価技術を整備する。

(ii) 実施概要

(a) 将来の火山・火成活動の発生に係る評価技術の高度化

火山フロントの背弧側で第四紀火山が存在しない地域において火山・火成活動が新たに生じる可能性の評価について、これまでに地殻～マントル最上部を対象とした地下構造の調査技術（マグマなどの流体の有無や分布を確認するための地球物理学的手法など）に係る研究開発が進められ、非火山地域における地殻深部の部分溶融域の存在などに係る事例が示された。今後は遠地地震などを用いた地震波データの拡充などにより、特に背弧側地域における解析の分解能の向上を図り、将来の火山・火成活動に関与する地殻及びマントル内の流体の分布や移動の把握精度を地下数十km以深の領域まで向上させる。

表 2.1.1(1)-1 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
a. 将来の火山・火成活動の発生に係る評価技術の高度化		マントル・ウェッジにおける流体の分布に係る知見の蓄積・分析		将来の火山・火成活動に係る評価技術の高度化	

(b) マグマの影響範囲を把握するための技術の高度化

マグマの影響範囲を把握するための技術として、これまでに第四紀火山の活動特性や形成発達史などを把握するための地質学的手法に加え、火山体の地下構造を把握するための地球物理学的・地球化学的手法の整備が進められてきた。また、マグマの影響範囲については、火山の活動様式に応じて異なることなどが明らかにされてきたものの、その調査・評価の事例は限定的である。今後は特にマグマの影響範囲が第四紀火山の中心から半径15km以上に及ぶ場合の調査事例の蓄積などを通じて調査・評価技術を整備する。

表 2.1.1(1)-2 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. マグマの影響範囲を把握するための技術の高度化	←	マグマの影響範囲に係る知見の蓄積・分析 及び調査・評価技術の高度化	→		

(c) 沿岸部海域におけるマグマの有無を確認するための技術の高度化

これまでに内陸部の地殻～マントル最上部を対象として、マグマ・深部流体の有無や分布を確認するための地下構造の調査技術（地震波トモグラフィ、電磁探査（地磁気・地電流法）などの地球物理学的手法、ヘリウム同位体比を指標とした地球化学的手法など）に係る研究開発が進められ、その事例が蓄積されてきた。今後は沿岸部海域においても地殻及びマントルを対象として内陸部と同程度の精度や空間分解能で調査・評価が可能となるように、特に内陸部とは調査・観測環境が大きく異なることが想定される地震学的手法について、上記(a)に成果を反映・統合し調査・評価技術を整備する。

表 2.1.1(1)-3 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
c. 沿岸部海域におけるマグマの有無を確認するための技術の高度化	地球物理学的手法の高度化	上記a.に成果を反映・統合			

(2) 深部流体の移動・流入に係る現象理解及び影響の評価技術の整備

(i) 目的

地下深部からの流入の可能性が想定される非火山性の深部流体について、調査・評価事例の蓄積を通じてその形成や移動に係る現象理解を深め、流入の可能性や影響の評価に必要な技術基盤の整備を図る。また、沿岸部海域を対象に、陸域で有効性が確認された深部流体の有無などを把握するための調査・評価技術を整備する。

(ii) 実施概要

(a) 深部流体の形成・移動に係る調査・評価技術の整備

深部流体については、これまでに海洋プレートの沈み込みに伴う脱水流体を起源とする深部上昇水、古い海水などを起源とする長期停滞水などの存在が明らかにされてきた。深部流

体の流入やその影響を適切に評価するためには、マントルあるいは地殻の内部に分布する流体の形成メカニズムや分布特性、移動・流入に関する地殻内の条件や地質環境の特性のほか、起源の異なる流体（深部上昇水や長期停滞水など）の性状に係る理解を深める必要がある。このため、特にその賦存域が地下深部に形成され得る地域の条件（発生・形成メカニズムを踏まえた分布の規則性など）や、地表付近への流入に関する地殻内や地質環境の特性（流体の移動に関する断層・クラックの性状など）の抽出に着目して、これらに関連する地質学的・地球物理学的・地球化学的特徴などの知見を調査の事例を通じて蓄積する。また、これらの知見に基づき深部流体の流入の可能性や熱・水理・地化学的な影響の評価に係る技術基盤の整備を図る。

表 2.1.1(2)-1 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
a. 深部流体の形成・移動に係る調査・評価技術の整備		← 深部流体の移動・流入に係る調査・解析事例の蓄積・分析 →		← 深部流体の流入可能性を評価する技術の構築 →	

(b) 沿岸部海域における深部流体の有無などを確認するための技術の整備

これまでに内陸部の地殻～マントル最上部を対象として、マグマ・深部流体の有無や分布を確認するための地下構造の調査技術（地震波トモグラフィ、電磁探査（地磁気・地電流法）などの地球物理学的手法、ヘリウム同位体比を指標とした地球化学的手法など）に係る研究開発が進められ、その事例が蓄積されてきた。今後は沿岸部海域においても地殻及びマントルを対象として内陸部と同程度の精度や空間分解能で調査・評価が可能となるように、特に内陸部とは調査・観測環境が大きく異なることが想定される地震学的手法について、上記(a)に成果を反映・統合し調査・評価技術を整備する。

表 2.1.1(2)-2 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. 沿岸部海域における深部流体の有無などを確認するための技術の整備	地球物理学的手法の高度化	上記a.に成果を反映・統合			

(3) 地震・断層活動の活動性及び影響の調査・評価技術の高度化

(i) 目的

地形的に不明瞭な活断層の分布・活動性、上載地層がない場合の断層の活動性、地震・断層活動の水理学的・力学的影響の調査・評価技術について、従来の地形・地質学的手法に加え、測地学的・地球物理学的・地球化学的・水理学的手法も組み合わせた調査・評価技術の体系的整備の観点から事例の蓄積を通じて整備する。また、海陸接合部付近における活断層の分布・活動性の調査・評価技術について、陸・海域で適用性が確認された個別技術の組み合わせに係る適用事例の蓄積を通じて整備する。

(ii) 実施概要

(a) 地表において特定が困難な活断層を検出し活動性を把握するための技術の高度化

地表から活断層を検出する技術について、これまでに変動地形学的手法や地球物理学的手法といった従来手法を補完する新たな調査技術として、断層沿いに放出されるガスの特徴を指標とした地球化学的手法などを用いた調査技術の開発が行われてきた。今後は地形的に不明瞭な活断層を検出する精度の向上に向けて、測地学的手法に加えて、地形・地質学的手法や地球物理学的手法などの組み合わせにより地下に伏在する断層の活動性を評価する技術を整備する。

表 2.1.1(3)-1 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
	←	測地・地形・地質学的データなどの収集・解析	→		
a. 地表地形から特定が困難な活断層を検出し活動性を把握するための技術の高度化				← 活断層地形が不明瞭な地域における調査・評価技術の高度化 →	

(b) 上載地層がない場合の断層の活動性や地質断層の再活動性を把握するための技術の高度化

断層変位の有無の判定に係る年代既知の被覆層がない場合の断層の活動性や地質学的に古い時期に形成された断層の再活動性の評価について、地質構造発達史を背景とした断層の発達履歴などの検討に加えて、これまでに断層破碎帶内物質について定性的な特徴（鉱物粒子の形状など）に基づく検討が主に行われてきた。今後は鉱物・化学組成、同位体組成などの定量的な指標を取り入れた調査・評価技術を整備するとともに、破碎帶内物質の放射年代測定に適用する手法の拡充を図り、断層の活動性評価技術の高度化を図る。また、これらの調査・評価技術の整備と並行し、調査対象地域の周辺で生じる地震や応力場などの変化に伴う断層の変位量に加え、その変位が断層近傍の岩盤へ及ぼす水理学的・力学的影響の範囲と程度を評価するためのシミュレーション技術を整備する。以上の技術は、主にボーリングや坑

道調査の段階に遭遇した断層に対する調査・評価技術として整備するとともに、断層の活動性のみならず断層活動に伴う周辺岩盤の破碎などの影響の評価にも反映する。

表 2.1.1(3)-2 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. 上載地層がない場合の断層の活動性や地質断層の再活動性を把握するための技術の高度化		破碎帯内物質の鉱物・化学分析による評価技術の整備			

(c) 地震及び断層活動による水理学的・力学的影響を把握するための技術の高度化

これまでに断層運動に伴う破碎帶の分布と発達過程などに係る調査事例の蓄積により、地震及び断層活動による水理学的・力学的影響を把握するための技術が構築されてきた。また、水理学的影響については地震に伴う地下水圧の変化の要因を明らかにするための検討が行われてきた。今後は地震・断層活動による水理学的影響などの評価に反映するため、地震の発生に伴う長期間湧水や地下水圧・水質の変化に係る調査・解析事例を蓄積し分析することにより技術を整備する。

表 2.1.1(3)-3 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
c. 地震及び断層活動による水理学的・力学的影響を把握するための技術の高度化		地震の発生に伴う湧水や地下水圧・水質の変化に係る調査・解析事例の蓄積・分析及び調査・解析技術の高度化			

(d) 陸域から海域にかけて活断層の分布を連続的に確認するための技術の高度化

これまでに陸域から海域にかけて連続的に分布する活断層を対象とした調査技術及び調査事例に係る技術情報が網羅的に収集・整理された。2018年度は海陸接合部付近における活断層の検出・評価の観点から技術情報の取りまとめを行い技術基盤として整備し、し、2.1.2 (2) (ii) (a) に成果を反映した。

表 2.1.1(3)-4 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
d. 陸域から海域にかけて活断層の分布を連続的に確認するための技術の高度化	取りまとめ	2.1.2(2)(a) に成果を反映			

(4) 地形・地質学的情報に基づく隆起・侵食の調査・評価技術の高度化

(i) 目的

将来の隆起・侵食の予測の信頼性向上に向け、地形学的手法や堆積物などの年代測定に基づく隆起・侵食の調査・評価技術に加え、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を拡充するとともに、海成段丘などの有効な指標に乏しい沿岸部陸域及び海域における隆起・侵食の調査・評価技術を整備し、それらの適用事例の蓄積を通じて、気候・海水準変動も考慮した隆起・侵食の調査・評価技術を整備する。

(ii) 実施概要

(a) 地形学的手法や年代測定などを用いた過去百万～数十万年前以前からの隆起・侵食を把握するための技術の拡充

これまでに隆起量・侵食量の推定の指標となる海成及び河成段丘などを用いた地形学的手法と堆積物の年代測定（広域火山灰による編年、放射性炭素年代測定など）に基づく検討を通じて、隆起・侵食を把握するための技術の整備が進められてきた。今後は過去百万～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を用いたデータ取得密度の拡充に資するため、鉱物の年代測定法における閉鎖温度の違いを用いた熱年代学的手法や、分布が局所的な堆積物を対象とした化学分析・年代測定などの適用を検討し、各手法の精度・適用限界について整理したうえで幅広い地質環境に対する隆起速度・侵食速度の評価が可能となる技術を整備する。また、これらの技術の適用事例の蓄積を通じ、わが国の様々な時間スケールの隆起・侵食速度が把握できる見取り図を整備する。

表 2.1.1(4)-1 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
a. 地形学的手法や年代測定などを用いた過去百万～数十万年前以前からの隆起・侵食を把握するための技術の拡充					

(b) 沿岸部の隆起・侵食を把握するための技術の高度化

沿岸部のうち海成段丘などの有効な指標に乏しい地域における隆起・侵食を把握するため、これまでに岩石侵食段丘における露出年代測定（宇宙線生成核種の蓄積量などに基づく）の適用性に加え、礫層や土壌に係る経験的な風化指標を重視した総合的な段丘対比・編年手法の検討が進められてきた。また、沿岸部で海水準変動により海底が陸化した際の下刻を考慮した長期的な隆起・侵食を精度よく把握するため、高精度の地形デジタルデータなどを用いた陸域～海域の地形解析に加え、地形地質断面図を用いた陸域での隆起・侵食様式の海域への外挿に基づく沿岸部の隆起量・侵食量の評価手法の検討が進められている。今後は個別の要素技術・評価手法の適用性について取りまとめを行うとともに、各手法を適切に組み合わせた最適なアプローチによる沿岸部での適用事例を蓄積し適用方法を整備する。

表 2.1.1(4)-2 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. 沿岸部の隆起・侵食を把握するための技術の高度化	岩石侵食段丘における評価技術の整備 礫層や土壌の分析に基づく評価技術の整備 沿岸域の地形解析による評価手法の整備 陸域での傾向の海域への外挿に基づく評価手法の整備	← 個別要素技術の適用事例の蓄積を通じた沿岸部の隆起量・侵食量評価技術の高度化 →			

(5) 長期的な自然現象の発生可能性とその地質環境への影響の評価技術の高度化

(i) 目的

将来10万年程度を超える長期における自然現象の発生可能性に係る予測の信頼性向上に向け、過去から現在までの自然現象の変動傾向の地域的特徴や一様継続性を踏まえ、自然現象に係る長期的なシナリオ設定と地質環境の状態変遷に係る評価技術を整備し、併せて自然現象の発生可能性とその不確実性を評価するための技術を整備する。

(ii) 実施概要

(a) 自然現象に係る長期的なシナリオ設定と地質環境の状態変遷に係る影響評価のための手法の整備

わが国における自然現象（火山・火成活動、深部流体の移動・流入、地震・断層活動、隆

起・侵食、気候・海水準変動) の発生可能性や変動特性に係る予測の信頼性向上に向け、プレート運動や地殻応力状態に支配された自然現象の変動傾向について科学的知見の蓄積に基づく現象理解を踏まえて必要な情報を整理し、その一様継続性や発生様式の観点から地域的な特徴を類型化する。自然現象の著しい影響を回避したサイトにおける不確実性に起因して、将来10万年程度を超える期間において新規に発生する可能性のある事象が地質環境へ及ぼす影響については、これまでにサイトを特定しないジェネリックな条件における検討が進められてきた。今後は自然現象の地域的な変動傾向を踏まえた科学的知見(「2.1.1 自然現象の影響(1)～(4)」で取得)に基づき、将来10万年程度を超える期間において考慮すべき自然現象が地質環境へ及ぼす影響の程度・範囲とその時間変化に係るシナリオを体系的に整理し、地域性を考慮した自然現象による地質環境の状態変化に係る影響評価のための手法を整備する。

表 2.1.1(5)-1 5年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
a. 自然現象に係る長期的なシナリオ設定と地質環境の状態変遷に係る影響評価のための手法の整備	地域ごとに着目すべき現象や不確実性要因などの整理	自然現象の発生が地質環境に及ぼす影響要因に係るシナリオの整備		長期性及び地域性を考慮した地質環境の状態変遷に係る影響評価手法の整備	

(b) 長期にわたる自然現象の発生可能性及びその不確実性を評価するための技術の高度化

将来10万年程度を超える期間において想定される自然現象が地質環境に及ぼす影響に係るシナリオの設定の科学的な説明性を向上させるためには、プレート運動の継続性の変化や気候・海水準変動も考慮した自然現象の発生可能性や変動特性とそれらの不確実性を定量化するための技術の整備が重要である。これまでに将来10万年程度を対象とした自然現象の発生可能性や変動特性に係る外挿法による将来予測の考え方が示され、確率論的な評価手法の開発とその適用性の検討が行われてきた。今後は将来予測における不確実性がより大きくなる将来10万年程度を超える期間を対象に、(a) で検討する自然現象の変動傾向に係る地域的な特徴に基づき、特に地震・断層活動や隆起・侵食への適用事例の蓄積を図るとともに、過去から現在までの地質学的な履歴に係る科学的知見を利用して、同手法の妥当性の評価を行う。

表 2.1.1(5)-2 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. 長期にわたる自然現象の発生可能性及びその不確実性を評価するための技術の高度化	評価技術の高度化検討のための情報の整備	自然現象の発生可能性及び不確実性の定量化に係る評価技術の高度化に向けた課題抽出と計画策定		自然現象の発生可能性及び不確実性の定量化に係る評価技術の高度化／手法の整備	

2.1.2 地質環境の特性

(1) 水みち⁶の水理・物質移動特性の評価技術の整備

(i) 目的

概要調査において重要な涵養域から流出域までの広域的な地下水流动（移流場）や地下水が長期にわたり滞留する領域（拡散場）の三次元分布に係る調査・評価の信頼性向上に向け、これまでに整備された水理・物質移動場の特性に係る調査・評価技術の妥当性の確認を通じて、それぞれの水理・物質移動場のスケールや特徴に応じた方法論として整備する。

(ii) 実施概要

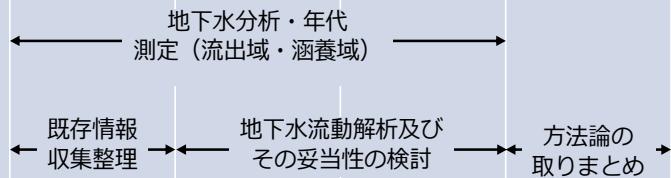
(a) 内陸部の広域的な地下水流动を評価するための技術の高度化

これまでに事例研究を通じて広域地下水流动解析手法や地下水の水質・年代に係る調査技術の整備が進められてきた。今後はボーリング孔を利用して取得される地質環境データを用いた広域地下水流动解析の結果と長期にわたる地下水流动に伴う地下水の水質・年代の三次元分布との対比を行い、水理地質構造モデル及び解析条件の設定方法の妥当性を確認するとともに、「実施項目 (c)」の結果を踏まえて解析結果に大きな影響を及ぼす条件や重要な地質環境データの種類・取得密度などを評価する。この取り組みを通じて、広域的な地下水の流动及び水質・年代の三次元分布を整合的に解釈することができるようモデル化・解析技術を整備する。取得した科学技術的知見やノウハウは「2.1.2 (5) サイト調査のための技術基盤の強化」に反映する。

6 水みち：岩盤中において、有意に高い透水性を有する領域 (water-conducting features) をいう (Mazurek, 2000)。例えば、深成岩類や先新第三紀堆積岩類では、透水性の高い断層や割れ目などがそれに該当し、新第三紀堆積岩類などでは、透水性の高い地層などがそれにあたる。

表 2.1.2(1)-1 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
a. 内陸部の広域的な地下水流动を評価するための技術の高度化		地下水分析・年代 測定（流出域・涵養域）			

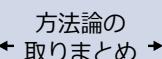


(b) 内陸部の地下深部に存在する長期的に安定な水理場・化学環境を評価するための技術の高度化

これまでに事例研究を通じて岩盤中の水みちの透水性を把握するための調査技術や水理学的な不均質性をモデル化・解析する技術の整備が進められてきた。今後は地下深部に水理学的に閉鎖的な環境が形成・維持されてきていると推定される化石海水が滞留している領域を対象に、ナチュラルアナログや古水理地質学に係る情報を取得するとともに、水理場・化学環境の長期的な変遷とその要因を評価する。また、ボーリング調査や物理探査などを組み合わせた調査・評価の方法論を整備し、長期的に安定な水理場や化学環境の三次元分布を地表から把握する調査・評価技術の体系化を図る。取得した科学技術的知見やノウハウは「2.1.2 (5) サイト調査のための技術基盤の強化」に反映する。

表 2.1.2(1)-2 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. 内陸部の地下深部に存在する長期的に安定な水理場・化学環境を評価するための技術の高度化		水理場・化学環境に係る情報 整備及び場を把握する ための方法論の構築		水理場・化学環境に係る情報拡充及び 場を把握するための方法論の検証	



(c) 水みちの水理・物質移動特性を調査・評価するための技術の高度化

これまでに事例研究として岩盤中の水みちを検出するための各種の検層や単一の水みちを対象としたトレーサー試験などが実施され、岩盤中の水理・物質移動特性に係る調査・評価技術の整備が進められてきている。今後はわが国に特徴的な高割れ目密度の岩盤を対象に、水みちの分布に起因する水理・物質移動場の不均質性を把握するための方法論を整備し、この結果を踏まえた「実施項目 (a)・(b)」の解析条件の設定に係る手法の最適化を図る。この取り組みで取得した様々な科学技術的知見やノウハウは「2.1.2 (5) サイト調査のための技術基盤の強化」にそれぞれ反映する。

表 2.1.2(1)-3 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
c. 水みちの水理・物質移動特性を調査・評価するための技術の高度化	水みちの水理・物質移動特性の技術的知見の拡充 水みちの水理・物質移動特性のモデル化・解析技術の高度化			方法論の取りまとめ	

(2) 沿岸海底下の地質環境特性の調査・評価技術の整備

(i) 目的

沿岸部陸域から沿岸海底下までの広範囲を対象とした概要調査の的確な実施に向け、実証的な取り組みを通じて、サイト調査の観点からこれまでに整備された地質環境調査・評価技術の適用性を確認するとともに改良を図り、長期にわたり安定に存在する水理場・化学環境を把握するための調査・評価技術を体系的に整備する。

(ii) 実施概要

(a) 沿岸部陸域・海域を対象としたサイト調査の観点からの既存の調査技術の適用性確認及び高度化

これまでに資源探査や学術調査を通じて海域を対象とした物理探査やボーリング孔の掘削及び孔内試験に係る個別技術が整備されてきた。今後は沿岸部の陸域から海域にかけて連続した三次元物理探査、海水の影響を考慮したボーリング孔の掘削及び孔内試験や地下水モニタリングなどの技術について実証的な取り組みを行うとともに、沿岸部海域の微地形及び海底湧水の調査技術の体系化を図る。この取り組みを通じて、地質構造や広域地下水流动などの調査技術について、地層処分におけるサイト調査の観点から適用性を評価し、陸域と同様に処分場の設計や安全評価に必要となる地質環境情報を求められる精度で取得することができるよう整備する。この取り組みで取得した様々な科学技術的知見やノウハウは「2.1.2(5) サイト調査のための技術基盤の強化」に反映する。

表 2.1.2(2)-1 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
a. 沿岸部陸域・海域を対象としたサイト調査の観点からの既存の調査技術の適用性確認及び高度化	地質環境に係る調査・評価技術の取りまとめ		← 陸域・海域連続物理探査 (弾性波・電磁・電気) → 海底調査 (海底湧出地下水、海底微地形調査) ← → 沿岸部ボーリング調査 (ボーリング孔掘削、孔内試験、モニタリング) ← →		調査技術の体系化・取りまとめ

(b) 沿岸海底下に存在する長期的に安定な水理場・化学環境を把握するための技術の整備

これまでに事例研究が実施された地域において、沿岸海底下に1~10万年程度にわたる淡水の張り出しの形成やその下位に10~100万年オーダーの長期間にわたって安定な地下水の存在が確認されている。今後はこのような地質環境が想定される地域を対象に事例研究を実施し、サイト調査の観点から適用性が確認された調査技術を組み合わせて地下水の水質や年代の三次元分布などを把握するとともに、わが国の多様な地質環境を考慮に入れつつ水理場・化学環境に係る地質環境情報を幅広く取得し、これらの結果を統合することによりわが国の沿岸部の水理場・化学環境モデルを構築する。これと併せて、ナチュラルアナログや古水理地質学に係る情報を取得し、それに基づき沿岸部の水理場・化学環境の長期的な変遷とその要因を評価する。この取り組みを通じて、沿岸部陸域から沿岸海底下までを対象とした広域地下水流动の連続性や長期にわたり安定な水理場や化学環境の存在、断層の地下水流动への影響などが把握できるように調査・評価技術を体系的に整備する。わが国の沿岸部の水理場・化学環境モデルは「2.1.2 (3) 地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化」に、この取り組みで取得した様々な科学技術的知見やノウハウは「2.1.2 (5) サイト調査のための技術基盤の強化」にそれぞれ反映する。

表 2.1.2(2)-2 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. 沿岸海底下に存在する長期的に安定な水理場・化学環境を把握するための技術の整備	地下水の長期安定性に係る既存研究や評価手法の取りまとめ	水理場・化学環境の現地調査、既存資料の整理 水理モデル・地化学モデルの構築		超長期解析技術の信頼性・評価技術の向上 断層影響評価・海水準変動の影響評価	評価技術の取りまとめ・体系化

(3) 地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化

(i) 目的

3段階のサイト調査において対象とする地質環境の長期的な安定性を示すうえで必要であるだけでなく、安全評価の基盤となる地質環境特性の長期変遷モデルを構築するための技術について、地質環境の状態変遷に係る評価技術の高度化や安全評価との連携を考慮したモデルの構築を通じて信頼性向上を図る。

(ii) 実施概要

(a) 水理場・化学環境の長期変遷をモデル化する技術の高度化

これまでに実施された事例研究を通じて、不均質性を有する地下深部を対象に水理場・化学環境の過去から現在までの長期変遷をモデル化する技術が整備されてきた。今後は断層活動に伴う水理場などの地質環境の変化に係る調査・解析などを通じて評価技術の妥当性を確認することにより、水理場・化学環境の長期変遷をモデル化する技術の信頼性向上を図る。また、このモデル化技術を活用し、水理場や化学環境の時間的・空間的变化を将来予測するための方法論を整備する。この取り組みで取得した様々な科学技術的知見やノウハウは「2.1.2 (5) サイト調査のための技術基盤の強化」に反映する。

表 2.1.2(3)-1 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
a. 水理場・化学環境の長期変遷をモデル化する技術の高度化	← 地殻変動に伴う岩盤の透水性の変化に 係るデータの取得			→ 取りまとめ・方法論の構築 →	

(b) 生活圏を考慮した地質環境特性の長期変遷をモデル化する技術の整備

これまでに実施された事例研究を通じて、地下深部の水理場・化学環境の長期変遷をモデル化する技術が整備されてきたものの、それらと関連づけて生活圏を考慮したモデル化については十分な取り組みがなされていない。今後は「2.3.2 (2) 施設設計等を反映した核種移行解析モデルの高度化」との連携（地質環境特性の長期変遷モデルの反映）を念頭に置き、包括的技術報告書において提示する3岩種（深成岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類）の現実的な三次元地質環境モデルに、「2.1.2 (1) 水みちの水理・物質移動特性の評価技術の整備」で構築する水みちの微細透水構造モデル、「2.1.2 (2) 沿岸海底下の地質環境特性の調査・評価技術の整備」で構築するわが国の沿岸部の水理場・化学環境モデルを統合し、長期にわたる地形変化や気候・海水準変動に伴う地表から地下深部までの地質環境特性の時間的・空間的变化に係る現実的なモデルを構築する。このため、既存の浅層ボーリング孔における岩石・鉱物学的・地球化学的・水理学的調査などの結果を全国規模で集約し、地下浅部の酸化帯や希釀などに係る最新の科学的知見をモデル化に反映する。この取り組みを通じて地質環境特性の長期変遷に係るモデル化技術を整備する。この取り組みで取得した様々な科学技術的知見やノウハウは「2.1.2 (5) サイト調査のための技術基盤の強化」に反映する。

表 2.1.2(3)-2 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. 生活圏を考慮した地質環境特性の長期変遷をモデル化する技術の整備			3岩種を対象とした長期的な地形変化や気候・海水準変動を考慮したモデルの構築	地表水系の変遷を伴う広域的な地形変化を考慮したモデル化技術の整備	

酸化帯に係る科学的知見の蓄積／地表水系の発展プロセスに係る検討

地表水系の変遷を伴う広域的な知見変化のモデル化に係る検討

取りまとめ

(4) ボーリング孔における体系的な調査・モニタリング・閉塞技術の整備

(i) 目的

わが国の多様な地質環境を対象としたサイト調査を的確に実施するために、実証的な取り組みなどを通じて技術課題の解決を図ることによって、サイトにおける適用性などを考慮しボーリング孔の掘削・試験から長期モニタリング及び閉塞に至るまでの一連の技術を体系的に整備する。

(ii) 実施概要

(a) 脆弱層を対象としたボーリング孔の掘削・試験技術の整備

これまでに異なる地質環境を対象とした事例研究を通じて、地層処分におけるサイト調査の観点から陸域の地質環境を対象としたボーリング調査技術の整備が進められてきた。今後

は膨潤性・崩壊性を有し脆弱な地層を挟在する岩盤を対象に、ボーリング孔壁の崩壊や押し出しの回避、高いコア回収率の確保、掘削泥水がボーリング孔周囲の地層に及ぼす水理学的・化学的な影響の低減などに向け、新たに開発した掘削泥水や掘削機器の適用性の確認及び掘削手法の最適化を図る。また、サイト調査の観点から求められる地質環境情報の品質を念頭に置き、掘削泥水の影響を考慮した各種の検層や試験及びコア試料を用いた試験の合理化を図る。この取り組みを通じてボーリング孔の掘削・試験技術の体系的な整備を図るとともに、この取り組みで取得した様々な科学技術的知見やノウハウは「2.1.2 (5) サイト調査のための技術基盤の強化」に反映する。

表 2.1.2(4)-1 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
a. 脆弱層を対象としたボーリング孔の掘削・試験技術の整備	大深度ボーリング孔掘削・試験の計画立案	大深度ボーリング孔掘削・試験の実施			

← 試験データの品質管理・評価技術の高度化 →

← 取りまとめ・体系化 →

(b) 岩盤の力学的・水理学的变化及び地下水の地球化学的变化の長期モニタリング技術の高度化

これまでに異なる地質環境を対象とした事例研究を通じて、ボーリング孔を利用した岩盤の変形及び地下水の水圧・水質に係る個別のモニタリング技術が整備されてきた。今後は当該技術に必要な改良を加え、サイトにおける数十年という時間スケールを視野に入れつつ最先端の光ファイバセンシング技術を用いて岩盤の力学的な変形を高精度で測定できるようにするとともに、水圧計や採水装置の小型化を図り、ガスの影響を排除した水圧観測及び採水を同一のボーリング孔内で同時に実施できるように整備する。さらに、上記のボーリング孔への適用を通じて当該技術の適用性を確認する。この取り組みで取得した様々な科学技術的知見やノウハウは「2.1.2 (5) サイト調査のための技術基盤の強化」に反映する。

表 2.1.2(4)-2 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. 岩盤の力学的・水理学的变化及び地下水の地球化学的变化の長期モニタリング技術の高度化	光ファイバセンサを用いたモニタリング技術の概念検討	光ファイバセンサによる圧力・温度計測技術の検討	パッカー・採水口の設計・試作／性能試験	試作機の制作	実際の異質環境を対象とした実証試験

(c) ボーリング孔の閉塞技術の整備

処分場の閉鎖後に地表から掘削したボーリング孔が水みちとならないように確実に閉塞することが国際的にも課題となっているものの、これまでに当該技術の整備は実証的な観点では十分に進められていない状況にある。今後は大深度ボーリング孔内に残置した試験装置やケーシングパイプなどの回収技術、対象とする地質環境に応じたボーリング孔閉塞材の選定・設置に係る技術について、国際的な枠組みにおける各国の実施主体との技術的な情報交換などを利用しつつ、既存のボーリング孔を対象とした適用試験などを通じて整備する。この取り組みで取得した様々な科学技術的知見やノウハウは「2.1.2 (5) サイト調査のための技術基盤の強化」に反映する。

表 2.1.2(4)-3 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
c. ボーリング孔の閉塞技術の整備	閉塞材の 基本物性の 取得／選定	閉塞材の基本物性の取得／ 施工性の確認試験			

図解説：この表は、5年間の技術開発工程を示す。各年度の開発要素と、それらが相互に連携する関係を示す。2018年度では「閉塞材の基本物性の取得／選定」が実施される。2019年度では、この結果をもとに「閉塞材の基本物性の取得／施工性の確認試験」が実施され、同時に「ボーリング孔内の残置物の回収技術の検討」が行われる。2020年度では、2019年度の検討結果をもとに「既存ボーリング孔における閉塞技術の適用性確認」が実施される。また、2018年度から2022年度まで、国際共同研究などによる技術移転が継続的に行われる。

(5) サイト調査のための技術基盤の強化

(i) 目的

わが国の多様な地質環境を対象としたサイト選定の技術的な信頼性向上に向け、「2.1.1 自然現象の影響」及び「2.1.2 地質環境の特性 (1) ~ (4)」の研究開発を通じて取得される地質環境特性に係る最新の科学的知見及び地質環境調査・評価に係る技術的知見の集約や品質マネジメントシステムなどの整備を継続し、サイト調査のための技術基盤の強化を図る。

(ii) 実施概要

(a) 多様な地質環境の特性に係る科学的知見の拡充

これまでに地下深部の地質環境特性とその長期変遷に係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、「2.1.1 自然現象の影響」及び「2.1.2 地質環境の特性 (1) ~ (4)」の研究開発などを通じて、自然現象が及ぼす影響なども考慮しつつ地下深部の地質環境特性とその長期変遷に加え、ナチュラルアナログや古水理地質学に係る最新の科学的知見を集約する。特にサイト選定において現実的に想定される地質環境のうち、情報量が少ない付加体堆積岩類などに係る科学的知見を優先的に拡充する。

表 2.1.2(5)-1 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
a. 多様な地質環境の特性に係る科学的知見の拡充		←———— 最新の科学的知見の収集・整理 —————→			

付加体堆積岩類などの
地質環境特性データの取得

(b) 陸域～海域を対象とした地質環境調査・評価に係る技術基盤の拡充

これまでにわが国の多様な地質環境を対象としたサイト選定の実施に向け、調査・評価技術に係る技術的知見の蓄積・拡充や調査・評価に係る知識マネジメントシステムなどの整備が進められてきた。今後も「2.1.1 自然現象の影響」及び「2.1.2 地質環境の特性 (1)～(4)」の研究開発に加え、二酸化炭素の地下貯留や海域を対象とした地下探査などに適用されている技術に係る最新の技術的知見を集約するとともに、特にその手法・適用方法、有効性や技術的課題などを分析・整理する。また、これまでに整備したサイト調査に適用する品質マネジメントシステムやデータマネジメントの考え方などについて、「2.1.2 (4) ボーリング孔における体系的な調査・モニタリング・閉塞技術の整備」などの実証的な取り組みへの適用を通じて実効性の向上を図る。

表 2.1.2(5)-2 5 年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. 陸域～海域を対象とした地質環境調査・評価に係る技術基盤の拡充		←———— 最新の技術的知見の集約及び分析・整理 —————→			

データベースの構築・
地質環境データの品質確認

データベースへの地質環境データの拡充

品質・データマネジメントシステムの高度化

2.2 処分場の設計と工学技術

2.2.1 人工バリア

(1) 人工バリア代替材料と設計オプションの整備

(i) 目的

人工バリア材料の合理的な選定や仕様設定を進めるために、様々な代替材料の特性データを多様な環境条件を考慮して取得し、代替材料の技術的な成立性を確認する。また、安全性に加え回収の容易性なども考慮した設計オプションの選定を行い、人工バリア仕様の最適化を進めるために、上記の代替材料に関する研究を踏まえて、人工バリア設計オプションの検討を進める。

(ii) 実施概要

(a) 人工バリア代替材料の成立性の検討

これまでオーバーパックに用いる材料は炭素鋼鍛鋼品をレファレンスの仕様として検討を行ってきているが、炭素鋼であれば鋳鋼品も経済合理性の観点から候補材料として考えられる。さらに、より耐食性の高い材料として、銅複合オーバーパックやチタン複合オーバーパックについても、海外実施主体などで研究開発が進められている。また、緩衝材に用いるベントナイトについては、Na型ベントナイトのクニゲルV1を候補材料として、さまざまな材料特性の取得が実施されてきたが、経済合理性や調達の多様性を確保する観点からは、上記のベントナイト以外についてもその適用性を確認していく必要がある。今後は、安全性の確保を前提に合理的な人工バリア材料の選定や仕様設定を進めるために、これまで優先的に研究開発してきた材料に加えて様々な代替材料（例えば、炭素鋼鋳鋼品や銅コーティングによるオーバーパック、Ca型ベントナイトによる緩衝材など）の特性データを多様な環境条件を考慮して取得し、代替材料の技術的な成立性を確認する。なお、技術的な成立性を確認した代替材料の特性データは、「2.2.1 (1) (ii) (b) 人工バリア設計オプションの整備」、「2.2.2 (1) (ii) (a) 設計技術の体系的整備」、「2.3.3 (1) (ii) (a) 想定される様々な処分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」へ反映する。

表2.2.1(1)-1 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
a. 人工バリア代替材料の成立性の検討	← ベントナイト材料の特性試験（透水・膨潤、長期圧密試験など） → ← オーバーパック材料の特性試験（長期腐食試験など） → ← 技術的成立性の検討 →				

(b) 人工バリア設計オプションの整備

これまで安全性に加えて、操業の効率性や回収の容易性などにも考慮した設計オプション

を整備してきた。今後、サイトの地質環境特性に対し柔軟に対応して、より合理的な人工バリア仕様を設計できるようにするために、安全性に係る性能や回収の容易性などをさらに高めた設計オプションや上記の代替材料に対する技術的な成立性を踏まえた設計オプションを検討する。この検討においては、緩衝材の設計条件に対する安全裕度の検討も含む。高レベル放射性廃棄物については、耐食性を高めた銅複合オーバーパックや蓋部をドーム型構造にして耐圧性を向上させたオーバーパックを採用した場合の人工バリアなどが、TRU等廃棄物についてはPEM (Prefabricated Engineered Barrier System Module) 方式を採用した場合の人工バリアなどが新たな設計オプションとして考えられ、これらの設計オプションの工学的な実現性を試行的な設計検討により評価する。このほか、オーバーパックの腐食挙動に対する微生物の影響等の評価及び金属材料の長期寿命評価手法の高度化にも取り組む。有望な設計オプションについては、人工バリア仕様の最適化に取り組む。なお、最適化を進めた人工バリア設計オプションの仕様は、「2.2.1 (3) 高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発 (ii) (a)、(ii) (b)」、「2.2.2 (1) (ii) (a) 設計技術の体系的整備」、「2.2.3 (1) 廃棄体の回収可能性を確保する技術の整備 (ii) (a)、(ii) (b)」へ反映する。

表 2.2.1(1)－2 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. 人工バリア設計オプションの整備	性能を高めた設計オプションの比較検討			有力な設計オプションに対する人工バリア仕様の最適化	

(2) TRU 等廃棄物に対する人工バリアの閉じ込め機能の向上

(i) 目的

これまでの設計概念に基づくTRU等廃棄物の廃棄体パッケージについて、閉鎖後長期の放射性核種の閉じ込め性に加えて、操業中の安全性や定置性などの性能の向上を図るために、製作性及び構造健全性に関する実証的な試験等を実施して廃棄体パッケージの改良を進める。また、閉じ込め機能の一層の向上を図るために、可溶性で収着性が低いと考えられる陰イオン核種に対する固定化技術の開発を継続するとともに、新たに吸着材の開発を進める。

(ii) 実施概要

(a) 廃棄体パッケージの閉じ込め性能に係る試験と評価

操業期間中の安全性の向上を目的としたTRU等廃棄物の廃棄体パッケージについて検討し、これまでに操業中に加えて閉鎖後数百年程度の放射性物質の閉じ込め性能が期待できる廃棄体パッケージの設計仕様を示している。今後こうした設計オプションについて、さらに安全性や定置性などの性能の向上を図るために、製作性及び構造健全性に関する実証的な試験等

を実施して性能を評価し、廃棄体パッケージの設計オプションの改良を進める。廃棄体パッケージの製作技術については、パッケージ内の充填材に残存する水分の放射線分解による水素ガスの発生を抑制する技術や、廃棄体への熱影響を低減可能な遠隔蓋接合技術の開発に取り組み安全性の向上を図る。また、廃棄体パッケージの長期間の閉じ込め性能を評価するために、応力腐食割れや内部ガス圧の増加などを考慮した構造健全性の評価に必要なデータを、様々な処分環境を考慮して取得する。さらに、操業期間中の落下事象等の異常事象を対象として、廃棄体パッケージの堅牢性の評価に必要なデータを解析等により取得する。なお、改良を進めた廃棄体パッケージの設計仕様は、「2.2.2 (1) (ii) (a) 設計技術の体系的整備」、「2.2.3 (1) (ii) (b) TRU等廃棄物に対する廃棄体回収技術の開発」、「2.2.4 (1) 閉鎖前の処分場の安全性評価技術の向上 (ii) (a)、(ii) (b)」へ反映する。

表 2.2.1(2)-1 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
a. 廃棄体パッケージの閉じ込め性能に係る試験と評価	←閉じ込め性能を高めた容器の設計と評価 ←内部充填、蓋接合に関する製作技術の開発 ←溶接部、充填材などの材料試験			→廃棄体パッケージの試作	→落下解析等

(b) 陰イオン核種に対する閉じ込め技術の開発

これまでヨウ素除去フィルタ廃棄物はセメント固化することとし、長期の閉じ込め機能については安全評価上期待していなかった。しかし、廃棄体の製造方法によっては、廃棄体からの浸出率を低減できる可能性が示されている。例えば、アルミナを基材とするヨウ素廃銀吸着材を高温高圧下で焼結し固定化する技術、ヨウ素を別の吸着材に固定化しガラス固化する技術などが開発されている。これら陰イオン核種に対する固定化技術は、化学的な特性の違いにより適用可能な処分環境が異なるため、今後は実現性が高いと判断する固定化技術を対象として、最適な処分方法を評価できるように、様々な処分環境を考慮した固化体の長期浸出試験と評価モデルの開発を実施する。また、廃棄体パッケージ内の充填材などとして、陰イオン吸着材を施工することで、さらに陰イオン核種の浸出率を抑制することが可能になると考えられる。これまでに、ハイドロタルサイトなどの複数の材料が陰イオンに対して高い吸着性能を有することを確認しているが、モルタル製充填材を使用すると化学環境が高アルカリ性になるため、適用性が低いと考えられてきた。今後、地層処分で想定される環境条件で陰イオン吸着材として適用可能性があると考えられる候補材料についての調査を実施し、その性能が発揮可能であるような人工バリア概念について検討するとともに、候補材料の適用可能性を評価する。なお、陰イオン核種の吸着材などを適用した人工バリア概念は「2.2.2 (1) (ii) (a) 設計技術の体系的整備」へ、吸着試験などのデータは「2.3.3 (1) (ii) (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」へ反映する。

表 2.2.1(2)-2 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. 陰イオン核種に対する閉じ込め技術の開発			溶出試験用固化体作成 固化体の長期溶出試験		

(3) 高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発

(i) 目的

地上施設でガラス固化体と人工バリアを一体化するPEM方式などの人工バリアの製作・施工、搬送定置といった人工バリアの構築技術の実用化と信頼性向上に向けて、段階的に技術の実証と遠隔操作化・自動化を含む装置の改良を進める。また、構築された人工バリア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を整備するために、施工プロセスの品質管理の具体化に加えてそれを補完するモニタリング技術の開発を進める。

(ii) 実施概要

(a) 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製作・施工技術については、これまで堅置き方式を中心に研究開発が進められてきた。今後は有力な設計オプションと考えられるPEM方式を対象として、適用性・実用性という観点で段階的に技術の実証に取り組む。そのためには、これまでの検討によるPEMの重量は約37トンと重いことから、地下での搬送定置作業を効率的に実施するために、安全性の確保を前提にPEMの設計仕様を合理化する。また、PEM容器は閉鎖後も残置されるため、容器の水密性や緩衝材の再冠水挙動に関する検討を実施して、緩衝材の安全機能に支障を生じないように設計仕様を決定していく。合理化したPEMの設計仕様に対しては、組み立て試験を実施して、製作性や品質を確認する。さらに、PEM方式では搬送定置装置が走行するためのPEM容器と処分坑道の坑壁との隙間の埋め戻しが技術課題と考えられるので、処分坑道内に湧水がある場合にも適用可能な隙間埋め戻し材の開発と作業の遠隔・自動化を前提とした施工技術を開発する。搬送定置技術については、従来装置の把持方法などの機構や遠隔操作化・自動化技術に改良を加えて安全性と効率性を高めた搬送定置装置の設計検討を進める。その上で、搬送定置装置の試作に向けた把持機構や遠隔操作化・自動化に必要な要素技術の開発を進めて、操業技術の実証試験の準備を整える。な

お、合理化したPEMの設計仕様と設計に基づく搬送定置方法についてはその結果を、「2.2.2 (1) (ii) (a) 設計技術の体系的整備」へ反映する。

表 2.2.1(3)－1 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
a. PEMの製作・施工技術の開発	改良型 PEM設計	PEM製作 方法の検討		PEM及び緩衝材の 製作性・品質に係る試験	

← 搬送定置・隙間埋め戻し装置の検討 → ← 搬送定置・隙間埋め戻しに係る要素技術開発 →

(b) オーバーパックの製作技術の開発

オーバーパックの製作技術については、これまでに主に炭素鋼鍛鋼品を対象とした開発が進められている。今後は「2.2.1 (1) 人工バリア代替材料と設計オプションの整備」で述べた炭素鋼鍛鋼品や銅との複合品などの代替材料に対する製作技術の構築を目的として開発に取り組む。また、蓋接合技術については、炭素鋼鍛鋼品及びそれぞれの代替材料に対しても適用できるように、溶接後の後熱処理や検査技術を含む遠隔操作化・自動化技術を前提とした開発を進める。

表 2.2.1(3)－2 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. オーバーパックの製作技術の開発	鋳鋼製オーバーパック製作技術				

← 代替材料の適用性評価 → ← 銅コーティング技術の開発 → ← 遠隔操作化・自動化技術の調査 → ← 設計オプションに対応した蓋接合技術及び検査技術などの開発 →

(c) 製作・施工技術に係る品質保証体系の整備

人工バリアの品質保証体系については、施工プロセスの品質管理に加えて、原位置試験の実施やモニタリングに関してこれまでに国際共同研究として検討されてきた情報を踏まえた上で、人工バリアが設計で想定した状態に対して性能が発揮されていることを確認し評価するための考え方と具体的な方法について検討を進める。また、人工バリアの状態把握に関連するモニタリング技術については、これまでに人工バリア性能への影響を考慮した無線伝送技術や従来の計測技術に関する実証的な研究開発を進めている。今後は無線伝送技術等の長期運用性の向上などの他に、光ファイバーなどを用いた新たなセンサーに関する要素技術の開発にも着手し、モニタリング技術の整備を進める。

表 2.2.1(3)－3 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
c. 製作・施工技術に係る品質保証体系の整備		品質保証に係る基盤情報整備			

原位置試験による品質保証体系の具体化（モニタリング等を含む）

適用性試験等による関連ハード技術の高度化

2.2.2 地上・地下施設

(1) 処分施設の設計技術の向上

(i) 目的

多様な地質環境に柔軟に対応して安全で合理的な処分施設の設計が可能であることを示すことを目的として、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、手順及び方法を体系的に整備する。また、設計技術の向上を図るために、処分施設の安全機能を確保するための判断指標や設計基準について、今後拡充される知見を取り込みつつ継続的に整備・更新を進める。

(ii) 実施概要

(a) 設計技術の体系的整備

これまでにサイト選定で想定される三種類の候補母岩を対象として処分場の設計を試行して、所要の設計要件を満足する処分場の仕様を提示している。この中で、現実的な地質環境に対応した地下施設の設計手法として、断層の分布を考慮したレイアウトの判断指標、割れ目からの湧水を考慮した廃棄体定置の判断指標など安全機能を確保するための判断指標を導入し、既存の知見に基づいた設計基準値の目安を設定している。これらの判断指標及び基準の目安に関しては、沿岸に処分場を設置する場合も含めて、適切に整備・更新を図っていく。また、人工バリア設計オプションの整備等を踏まえつつ、事業期間中の安全対策など、実用性と合理性を高めてより最適化された処分場の設計検討の結果を示し、今後の事業実施に備える。設計した処分場の仕様は閉鎖後長期の安全性の評価の初期条件として、「2.3.2 (2) (ii) (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」へ反映する。

表 2.2.2(1)－1 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
a. 設計技術の体系的整備		地下施設の設計要件に係る基準値の整備・更新			

合理性を高めた処分場の設計検討

(必要に応じて更に合理性を高めた処分場の検討)

(b) 建設・操業システムの設計技術の整備

地層処分の地下施設の坑道は複雑で長大であり地下深くに展開されること、また、坑道掘削（建設）と廃棄物の埋設（操業）とを同時並行で実施するなどの特殊な条件により、換気・排水システムの設計は技術的に難度の高いことが、これまでの検討で示されている。建設・操業期間中の安全で良好な作業環境の維持を確実なものとするために、換気・排水システムについて、今後坑道内の火災などさらにシステムの異常状態までも考慮できるように信頼性の高い評価技術を整備し、多重防護の考え方に基づく安全対策を用意する。

表 2.2.2(1)－2 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. 建設・操業システムの設計技術の整備	排水システムの設計・評価技術の整備	→	← 換気システムの設計・評価技術の整備 →		

異常事象に対する安全対策の具体化（坑道内火災など）

(2) 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備

(i) 目的

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などの坑道シーリング技術については、これまでの設計概念の詳細化や施工技術の成立性を確認するために、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の評価や、湧水をともなう割れ目帯などの様々な地質環境の特性を考慮した試験を行う。

(ii) 実施概要

(a) 坑道シーリングの設計・評価技術の整備

プラグや埋め戻し材による坑道シーリングの設計・評価技術については、これまでに原位置での人工バリア性能確認試験等を通じて試行的な設計とその適用性などに関する検討が進められおり、現在、再冠水過程のモニタリングデータを分析して、設計で期待したシーリン

グ材の性能の評価を実施中である。今後は、坑道シーリングにより処分場全体の閉じ込め性能を評価すること、これまでの設計概念をさらに詳細化することを目的とした検討を進める。そのために、わが国の多様な地質環境条件を想定した地下水流动解析等により、埋め戻し後の坑道や掘削損傷領域が処分場の安全機能に与える影響を把握し、止水プラグや埋め戻し材に期待する役割を明確化する。また、操業から閉鎖後長期にわたって処分場の安全機能に影響を及ぼす可能性のある事象を特定して、これら坑道シーリングを構成する要素の設計要件を整理するとともに、構成要素を組み合わせた場合のシステムとして設計が可能となるよう、設計・評価技術を整備する。坑道シーリングの設計は「2.2.2 (1) (ii) (a) 設計技術の体系的整備」へ、坑道シーリングの評価技術は「2.3.2 (2) (ii) (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」へ反映する。

表 2.2.2(2)-1 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
a. 坑道シーリングの設計・評価技術の整備		← 地下水流動解析等による影響評価 →			

（a）坑道シーリングの設計・評価技術の整備

（b）評価シナリオの整理

（c）性能評価手法の整備

(b) 坑道シーリング技術の性能確認

坑道シーリング技術の性能については、これまでにペントナイトを中心とした基本特性データを用いた解析的な検討や要素試験などにより評価を行ってきた。今後は坑道シーリングの長期性能に影響を与えることが想定される事象や地質環境条件などを考慮して、止水プラグや埋め戻し材のそれぞれの構成要素、さらにはそれらを組み合わせたシーリングシステムの性能を検証する（例えば、原位置試験やコンクリート支保の劣化を考慮した埋め戻し材のセルフシーリング機能に関する室内試験など）。

表 2.2.2(2)-2 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. 坑道シーリング技術の性能確認		←———— シーリング材料の基本特性データの拡充 —————→			

（a）シーリング材料の基本特性データの拡充

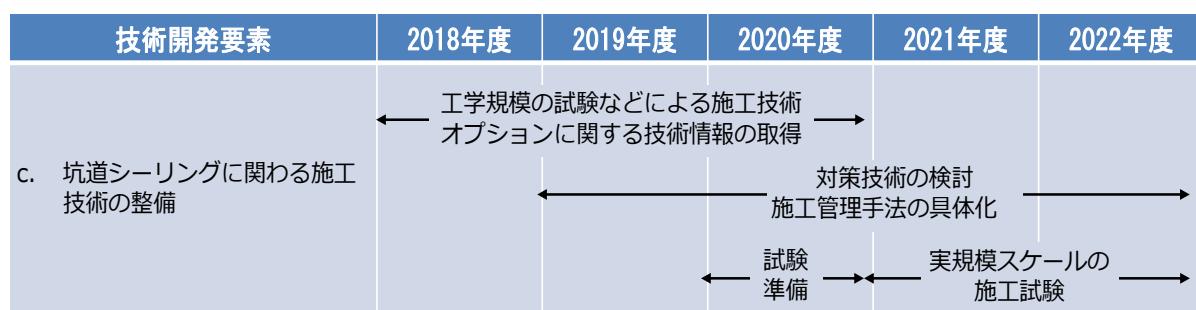
（b）個別要素の性能試験
(要素レベルの室内試験など)

（c）坑道シーリング性能の検証試験
(工学規模の模型試験など)

(c) 坑道シーリングに関する施工技術の整備

埋め戻し材の施工技術については、これまでに原位置での人工バリア性能確認試験においてブロック積みや転圧による坑道の埋め戻し施工を実施し、施工時の品質管理手法の適用事例が示されている。今後はこれまでに検討されたプラグや埋め戻し材の設計概念や諸外国の先行研究成果を踏まえ、多様な地質環境や設計オプションへの柔軟な対応を可能とするために、複数の施工技術を整備する。施工技術については、湧水等の施工品質に影響を与えることが想定される事象に対する対策技術と関連させて開発を行い、影響事象に対する管理基準を明確にするように品質管理手法を整備する。

表 2.2.2(2)-3 5年間の技術開発工程表



(3) 処分場建設の安全性を確保する技術の高度化

(i) 目的

掘削に伴う損傷領域の評価技術の信頼性の向上を図るため、坑道の掘削損傷領域における長期的な水理特性の変化や坑道交差部の力学特性の変化についてデータの拡充を図る。また、処分場建設技術のさらなる安全性と効率性の向上を図るため、施工の遠隔操作化・自動化について検討を進める。さらに、湧水に対する安全性を向上することに加えて排水及びその処理にかかる費用を低減するために、多連接坑道への適用を目標に評価技術を整備する。

(ii) 実施概要

(a) 坑道の掘削損傷領域の評価技術の整備

水平坑道や立坑における掘削損傷領域の大きさや水理特性の変化については、これまでに原位置試験や数値解析により定量的な評価が実施され、掘削方法の違いによる亀裂発達状況の違いなどの知見が得られている。これまでに得られた情報は、単設坑道における局所的なものが主であったが、処分場の閉鎖前及び閉鎖後の安全性確保の観点からは、三次元かつ広範囲にわたる掘削損傷領域の水理・力学特性の評価手法の構築が求められる。今後は坑道周辺の応力方向や大きさ、岩盤の力学特性や亀裂特性、透水性が増大した領域、坑道形状の影響などについて、数値解析や計測データ等に基づき、坑道が連接するような場合も含めて広範囲な領域における掘削損傷領域の拡がりや経時変化を把握できるように、評価技術を整備する。なお、掘削損傷領域の大きさや特性については、「2.2.2(2)(ii)(a) 坑道シーリングの設計・評価技術の整備」、「2.3.2(2)(ii)(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」の設定値に反映する。

表 2.2.2(3)－1 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
a. 坑道の掘削損傷領域の評価技術の整備	掘削影響領域の水理・力学特性データの拡充			掘削影響領域評価手法の整備	

(b) **掘削技術の高度化**

坑道掘削技術については、基本的に一般のトンネル工事技術が利用可能である。今後は処分場建設における作業の安全性や効率性の向上を目的として、掘削技術の遠隔操作化・自動化について海外の技術動向等も含めて検討する。この際、閉鎖後長期の安全性も見据えて、掘削損傷領域の低減にも十分に配慮する。

表 2.2.2(3)－2 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. 掘削技術の高度化	建設分野における動向調査		国内外の遠隔操作化・自動化技術の調査・検討		

(c) **湧水対策技術の整備**

処分場の操業期間を対象として湧水対策を実施する場合は数十年、閉鎖以降も考慮する場合は数万年といった長期間を対象としてグラウトの周辺岩盤や人工バリアシステムに与える影響を評価することが重要である。その影響低減策として、これまで地下坑道を対象として、低アルカリセメントを用いたグラウト施工の実証的な検討が進められている。今後は沿岸部など多様な環境条件に対するグラウト施工の適用性の向上を図ることを目的として、周辺環境への化学的影響がより小さいと考えられる活性シリカを用いた溶液型グラウトの海水系条件における適用性を評価する。また、原位置におけるグラウト施工実績により得られた湧水抑制対策に関する成果は、これまで单一坑道を対象に適切な止水効果が得られることが確認されている。しかしながら、処分場において想定される多連接坑道では、グラウト施工箇所からの地下水の回り込みにより他の坑道に地下水が流入することなどの影響が生じる場合も想定される。このため、今後は湧水に対する安全性の向上と排水及びその処理にかかる費用

を低減することを目的として、多連接坑道を対象としたグラウト施工の影響と対策効果について、解析などによる湧水量評価を実施して検討するとともに、多連接坑道において適切な止水効果を得るためのグラウト施工手法について知見を取りまとめる。湧水対策技術の考え方は、「2.2.2 (1) 処分施設の設計技術の向上 (ii) (a)、(ii) (b)」へ反映する。

表 2.2.2(3)－3 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
c. 漩水対策技術の整備	溶液型グラウトの材料試験				

グラウト浸透領域に対する評価手法の整備

多連接坑道を対象とした影響・湧水量評価手法の検討

2.2.3 回収可能性

(1) 廃棄体の回収可能性を確保する技術の整備

(i) 目的

回収可能性に関わる技術的実現性を示すため、設計オプションとして整備する処分概念に対応した廃棄体回収技術の開発と段階的な技術実証を進める。また、処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の管理の在り方を具体化するため、回収可能性を維持した場合の影響等に対する評価技術や対策技術を整備する。

(ii) 実施概要

(a) 高レベル放射性廃棄物に対する廃棄体回収技術の開発

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、これまでに堅置き方式を対象として緩衝材の除去技術など、回収方法の要素技術の開発とその適用性の確認が進められてきた。今後は横置きPEM方式を含めて、これまでの開発成果を踏まえ、回収技術の高度化を図る。また、回収装置については遠隔操作化・自動化に関わる研究開発を進める。

表 2.2.3(1)－1 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
a. 高レベル放射性廃棄物に対する廃棄体回収技術の開発	横置きPEM方式を対象とした技術実証			回収技術の高度化に資する技術の整備（効率性の向上など）	

(b) TRU等廃棄物に対する廃棄体回収技術の開発

TRU等廃棄物に対する人工バリア設計オプションの整備（「2.2.1 (1) 人工バリア代替材料と設計オプションの整備」、「2.2.1 (2) TRU等廃棄物に対する人工バリアの閉じ込め機能の向上」）を踏まえて、各設計オプションに適用可能な回収技術の概念検討を実施する。その上で、設計オプションに対応した有望な回収技術概念について段階的な研究開発と技術実証への取り組みを進め、信頼性と実現性の高い回収技術を確立する。

表 2.2.3(1)-2 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. TRU廃棄物に対する廃棄体回収技術の開発				設計オプションに対応した回収技術の概念検討	

(c) 回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備

様々な処分概念や坑道埋め戻し状態に対する回収の容易性を設計に反映するため、回収可能性を維持した場合の地質環境や人工バリアへの影響について、これまで、包括的に影響要因等を抽出している。この結果を踏まえ、今後は、定置作業後に回収可能性の維持期間を設けることに伴い坑道の開放期間が延長されることによる安全性への影響について、操業期間中の安全性（開放坑道の健全性、埋め戻した坑道及び定置済み廃棄体容器の回収時期での健全性など）及び閉鎖後長期の安全性（維持期間中の地下環境の擾乱継続に伴う人工バリアに期待する機能の変化、母岩への擾乱影響など）の双方の観点から、個々の影響に関する解析的な評価技術を整備する。また、回収可能性の維持に伴う安全性への影響を最小化するための対策技術の開発に取り組む。回収可能性を維持した時のニアフィールドの状態については閉鎖後長期の安全性の評価の初期条件として、「2.3.2 (2) (ii) (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」へ反映する。

表 2.2.3(1)-3 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
c. 回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備	建設・操業期間中の湧水量の評価技術の整備	湧水に伴う化学影響評価技術の整備		影響評価技術の検証	

2.2.4 閉鎖前の安全性の評価

(1) 閉鎖前の処分場の安全性評価技術の向上

(i) 目的

閉鎖前の安全性の評価の信頼性向上を図るため、処分場の建設・操業において発生する可能性がある異常事象を網羅的に把握した安全性の評価シナリオを作成、及び廃棄体への衝撃や火災などの地下施設特有の事象に対する影響評価技術のさらなる整備を進める。

(ii) 実施概要

(a) 閉鎖前の安全性の評価シナリオの構築

建設から閉鎖までの処分場の地上・地下施設で発生する可能性のある異常事象として、これまでに廃棄体の落下、火災、爆発、水没、外部電源喪失を特定し、それらが最終的にどのような事故に発展する可能性があるかについてイベントツリー分析を実施して評価シナリオを作成した。今後さらにシナリオの網羅性を高めていくために、地震や津波などの外部起因事象を契機として発生する複合的な事象の発生についても評価シナリオを検討する。また、国内外の原子力施設などのシナリオ分析事例についても情報を収集し、検討に反映する。

表 2.2.4(1)-1 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
a. 閉鎖前の安全評価シナリオの構築		海外の分析事例の情報収集		複合的な事象を含むシナリオの構築	

(b) 閉鎖前の安全性評価技術の整備

これまでに廃棄体の落下、火災、爆発、水没、外部電源喪失を異常事象として抽出し、閉鎖前の処分場の安全性確保の見通しについて評価を行ってきた。今後は、地震、津波などの外部起因事象を契機として発生する複合的な事象の発生など、さらに過酷な状況を想定した評価シナリオの発生可能性を検討するとともに、それらに対する影響評価結果の妥当性、信頼性の向上のために、必要に応じて異常事象を模擬した試験を実施する等して評価技術の整備を進める。廃棄体周辺の放射性分解による水素ガスの発生量など安全性の評価上重要なパラメータについては、今後の人工バリア仕様の検討結果を踏まえた条件等に対して試験を実施して取得する。また、アスファルト固化体の火災の延焼に伴う硝酸塩と有機物の化学反応の促進の可能性について評価するために、特性評価試験を実施し、反応評価モデルの開発と検証を実施する。異常事象に対する評価結果は「2.2.2 (1) (ii) (a) 設計技術の体系的整備」へ、ガス発生量やアスファルト固化体に対する評価結果は「2.2.1 (2) (ii) (a) 廃棄体パッケージの閉じ込め性能に係る試験と評価」へ反映する。

表 2.2.4(1)－2 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. 閉鎖前の安全性評価技術の整備	充填材からの水素ガス発生量データ取得試験	評価結果を踏まえた安全対策の検討		複合的な事象に対する評価	

アスファルト固化体熱物性データ取得・評価モデル開発

(c) 事故対応技術の整備

評価シナリオに基づく異常事象への対応策として、これまでにアクセス坑道で搬送車両が逸走した場合や定置作業中の異常出水等に伴い水没した状態を想定して、その対応策及び復旧作業の進め方の検討を行っている。今後閉鎖前の処分場のさらなる安全性の確保を目的として、関連する施設の具体的な事故事例を参考に実践的な検討を実施し、事故対策及び影響緩和策を「2.2.2 (1) 処分施設の設計技術の向上 (ii) (a)、(ii) (b)」の施設設計に反映する。

表 2.2.4(1)－3 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
c. 事故対応技術の整備		← 事故事例の分析 →	← 事故等に対する対応策と復旧策の検討 →		→

2.3 閉鎖後長期の安全性の評価

2.3.1 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

(i) 目的

これまで、シナリオ構築に必要な処分場閉鎖後の地層処分システムの状態理解のため、ニアフィールドを対象として、熱、水理、力学、化学（THMC）の観点から重要と考えられる個々の現象に重点を置き、主に保守的な解析モデルの開発を行ってきた。今後は、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するため、廃棄体定置直後の過渡的な時期から閉鎖後長期に至るまでの期間を対象に地層処分システムの構成要素間及び諸現象間の相互作用による場の変化を評価することができるよう、現象解析モデルの高度化や統合化を可能とする技術の開発を行う。

(ii) 実施項目

(a) 廃棄体からの核種溶出モデルの高度化

ガラス固化体については、これまで、ガラス固化体周辺で生じる現象の中からガラス溶解速度を支配するプロセスの特定を行った。今後は、特定した現象の中で重要と考えられるオーバーパック由来の鉄の影響と変質層の保護的効果に関する長期の浸漬試験等を実施し、既存の核種溶出モデルの妥当性を確認する。また、試験等により取得した知見に基づき、必要に応じて核種溶出モデルの改良を図る。ハル等圧縮体については、これまで、ハルを中心とした溶出モデルの構築に必要なデータ取得を実施してきた。今後は、エンドピースを含めた実廃棄体からの核種溶出試験等を実施するとともにハル等圧縮体中の核種分布について分析し、ハル・エンドピースからのより詳細な核種溶出モデルを構築する。

表 2.3.1(1)－1 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
	＜ガラス溶解＞ オーバーパック由来の鉄の影響及び変質層の保護的効果に関するガラスの長期・短期浸出試験等の実施				
	ガラス表面積、緩衝材相互作用、放射線影響、有機物等の影響に関する既往知見の整理				モデルの妥当性確認・改良
a. 廃棄体からの核種溶出モデルの高度化	＜ハリ等溶解＞ 材料加工（材料の調査選定、分析手法の検討含む）				
	破壊分析による核種濃度測定（ ¹⁴ C, ¹²⁵ Sb, ⁶⁰ Co等）		イメージングプレート法による核種分布測定		
	実廃棄体の溶出試験（ハリ及びエンドピース）				

(b) ニアフィールド構成要素の現象解析モデルの構築・高度化

複数の異なる構成材料からなるニアフィールドの状態変遷の評価を目的として、これまでには、オーバーパックやセメント系材料による緩衝材の変質に関する試験データを取得し、これらを表現できる解析モデルの構築を実施してきている。今後は、沿岸部を含む幅広い地下水環境に留意し、オーバーパックやセメント系材料による緩衝材変質等について100°Cを超える条件も含めたTHMCの観点から原位置等においてデータを取得し、現象解析モデルの妥当性確認を行うとともに、重要な反応系が明らかになった場合には現象解析モデルへ取り込む。また、先進的なセメント系材料であるHFSC（Highly Fly-ash contained Silica-fume Cement）については、変質に関して重要な二次鉱物の生成現象について現象解析モデルへ反映する。加えて、原位置でのグラウト施工事例を対象に試験・分析等を実施し、母岩中のアルカリブルームの反応輸送解析モデルの構築に資する。一方、処分場の閉鎖前から閉鎖後に至る過渡期に想定される緩衝材流出現象については、原位置での試験等によるデータの取得と現象解析モデルの開発を行う。さらに、開発した現象解析モデルを用い、緩衝材流出対策の妥当性評価を実施する。なお堆積岩においては、緩衝材の膨潤に伴い掘削影響領域の閉塞が期待されるため、地殻変動の影響も含め、このような現象を明らかにし、堆積岩におけるニアフィールドの状態変化を評価する手法を構築する。構築した現象解析モデルは「2.3.1(1)(ii)(f)現象解析モデルの統合化技術の構築」へ反映し、取得したデータは、「2.3.3(1)(ii)(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」へ反映する。

表 2.3.1(1)-2 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
	＜過渡期のニアフィールド環境変遷＞				
	人工バリア性能確認試験 加熱・注水時のデータ取得 連成評価手法の整備			浸潤時・減熱時のデータ取得 連成モデルの適用性確認	
	原位置でのオーバーパック腐食試験		100℃を超える条件下での熱-水-応力-化学連成現象に関する原位置試験データの取得		
		掘削影響領域の力学的・水理学的状態変化を把握する手法の開発			
	過渡期におけるオーバーパックの腐食、緩衝材の変質・力学挙動に関する室内試験データの取得		過渡期におけるオーバーパックの腐食、緩衝材の変質・力学挙動に関するモデルの改良およびモデルの検証のためのデータ取得		
b. ニアフィールド構成要素の現象解析モデルの構築・高度化	原位置/室内試験による緩衝材流出の挙動把握		流出対策効果の検証ひ緩衝材流出量の定量評価に向けた原位置/室内試験		
	許容される流出量を考慮した緩衝材の再冠水に至るまでの状態変遷に関する現象モデルの開発				
	遠心模型試験技術に関する既往研究の整理 (適用範囲の精査、ばらつき評価手法の検討等)		遠心模型試験技術の高度化【沿岸部】 (要素試験、適用試験、模型試験の挙動解釈)		
	室内試験によるNF構成材料の変遷挙動等の知見拡充【海水系地下水】		室内試験によるNF構成材料の変遷挙動等の知見拡充【沿岸部地下水環境】		
	＜オーバーパック-緩衝材＞		緩衝材変質に関する室内データの取得及び評価モデルの改良		

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
	〈セメント系材料-緩衝材〉 普通ポルトランドセメント (OPC) /ベントナイト相互作用に関する長期試験データの取得				
	先进的セメント系材料 (低アルカリ性セメントHFSC等) /ベントナイト相互作用と物性変化に関する調査・実験				
	先进的セメント系材料の水和変質に関するデータ取得及び個別モデル構築				
b. ニアフィールド構成要素の現象解析モデルの構築・高度化	地球化学計算のための熱力学/速度データ最新知見の調査・整備		データセット作成と適用性確認		
	セメントベントナイト相互作用のナチュラルアナログによる緩衝材の変質プロセス及び化学成分の影響評価				
	〈セメント系材料-岩石〉				
	原位置でのグラウト施工事例等を対象とした試験・分析 (室内試験含む)				
	セメント/岩石相互作用によるニアフィールド岩盤変質評価のためのシナリオ構築/化学・輸送モデルの開発				

(c) 廃棄体由来の発生ガスに関する現象解析モデルの妥当性検討

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影響評価を目的として、これまで緩衝材及びセメント系材料のガス移行試験を実施し、ガス移行特性に係るデータを取得するとともに、ガス移行に加え力学の連成解析が可能な現象解析モデルの構築を進めてきた。そこで、今後は処分坑道を模擬した小規模試験体によるガス移行実験などにより既往の現象解析モデルの妥当性を確認する。加えて、この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影響を検討する。

表 2.3.1(1)-3 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
c. 廃棄体由来の発生ガスに関する現象解析モデルの妥当性検討	<p>処分坑道を模擬した小規模試験体系及び試験条件の設定、試験の準備</p> <p>ガス移行場の設定のための化学-力学連成解析（解析）</p> <p>ガス発生量評価</p>	<p>処分坑道を模擬した小規模試験体によるガス移行実験 注水試験 ガス注入試験 解体調査</p>		<p>二相流特性のアップスケール適用性評価</p> <p>長期的な場の変遷を考慮したガス移行評価</p>	<p>核種移行へのガス移行影響の評価</p>

(d) コロイド・有機物・微生物の影響評価手法の構築・高度化

これまで、緩衝材に起因するベントナイトコロイドの移行に伴う核種移行への影響評価モデルの構築を進めてきた。今後はベントナイトコロイドの生成挙動をこの影響評価モデルへ反映した後、試験等を通じてモデルの妥当性確認を実施する。一方、地下水中に存在する天然コロイドについては、これまでに比較的大きいコロイド ($>0.2\text{ }\mu\text{m}$) を対象として、核種移行に対する影響評価モデルを構築してきており、今後も原位置での試験を実施しながら、粒径の小さいコロイドに固有の特性を考慮したモデルへの拡張を図る。有機物による核種移行への影響については、廃棄体由来のイソサッカリン酸 (ISA) によるアクチノイド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を実施してきた。今後は、前者については、遷移元素の溶解度や収着への影響に関するデータを、後者については原位置等において天然有機物-核種-岩石の三元系における核種収着データを取得することなどにより、影響評価モデルの構築をさらに進める。また、微生物の核種移行への影響については、

一部の種類の微生物を対象に核種の取り込み等に関するデータを取得してきた。今後は、他の主要な微生物についても同様に原位置等においてデータの取得を行う。以上の研究開発によって得られた知見は、「2.3.3 (1) (ii) (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」へ反映する。

表 2.3.1(1)-4 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
d. コロイド・有機物・微生物の影響評価モデルの構築・高度化	<p>＜ベントナイトコロイド＞</p> <p>室内試験によるベントナイトコロイド生成挙動データ等の取得</p> <p>コロイド生成挙動評価モデルの作成と原位置試験結果に基づく妥当性確認</p> <p>速度依存性等を考慮したコロイドに対する核種の吸脱着データの取得</p> <p>原位置試験による影響評価モデルの改良と妥当性確認</p> <p>＜天然コロイド＞</p> <p>地下水中天然コロイドの安定性等の特性評価、核種吸脱着データの取得</p> <p>天然コロイドの影響評価モデル構築・パラメータ整備</p>				
d. コロイド・有機物・微生物の影響評価手法の構築・高度化	<p>＜天然有機物＞</p> <p>室内試験等によるIV価核種錯生成データの取得</p> <p>室内試験による核種/岩石及び有機物/岩石二元系データの取得</p> <p>核種/有機物/岩石三元系データ取得</p> <p>核種移行影響評価のためのデータ整備、有機物影響評価モデルの開発</p> <p>＜人工有機物＞</p> <p>有機物(ISA等)共存下での核種の溶解度や吸着等データ取得と影響評価モデルの構築</p> <p>＜微生物＞</p> <p>地下微生物の多様性と代謝機能との関係データ取得</p> <p>室内・原位置試験等による地下微生物と核種との相互作用データ(吸着、取り込み、酸化還元影響等)の取得</p> <p>核種移行影響評価のためのデータ整備、影響評価モデルの構築</p> <p>有機物、微生物、コロイドの影響等を考慮した原位置での物質移行試験</p>				

(e) 硝酸塩の現象解析モデルの妥当性検討

TRU等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モデル(硝酸イオン-金属等)の開発を行ってきた。今

後は、長期浸漬試験により取得したデータや地下水の硝酸塩汚染事例等を用い、モデルの妥当性の確認や必要に応じた改良を進める。また、硝酸イオンに加え、反応生成物であるアンモニアなどが核種移行に及ぼす影響に関する知見の拡充を行う。本研究によって得られた知見に関しては「2.3.3 (1) (ii) (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」へ反映する。

表 2.3.1(1)－5 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
e. 硝酸塩の現象解析モデルの妥当性検討		長期試験体分析による硝酸イオンの変遷データ取得、熱量測定による硝酸イオン-黄鉄鉱の反応に関するデータの取得 硝酸イオン変遷評価モデルの改良・妥当性確認 アンモニウム型ベントナイトの非膨潤性鉱物への変質に関する知見の整理、処分環境における安定性検討 硝酸塩が核種移行パラメータに及ぼす影響に関する調査			

(f) 現象解析モデルの統合化技術の構築

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、様々な現象解析モデルを統合して連成解析を行うことを可能とするプラットフォームの構築技術の開発を行ってきた。今後は、「2.3.1 (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」において開発する、それぞれの現象解析モデルを取り込み、より高度な連成解析を可能とするようプラットフォームの拡張を行う。さらに、試行的な連成解析により、安全上の重要な課題を抽出する。

表 2.3.1(1)－6 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
f. 現象解析モデルの統合化技術の構築		個別現象モデルの連成システムへの統合と連成プラットフォームの改良、システム変遷モデルの共通データベースの整理 過渡期から長期まで一貫した連成解析システムの構築/高度化、本システムを用いたニアフィールド全体のシステム変遷の評価とこの結果に基づく重要なシナリオ及び核種移行場の情報の抽出			

(2) リスク論的考え方に基づいたシナリオの構築手法の高度化

(i) 目的

これまでに、国際機関によって提唱されている地層処分の安全規制の考え方などを参考とし、リスク論的考え方に基づく発生可能性を考慮した体系的なシナリオ構築手法を開発した。また、この手法を適用するため、シナリオに係る個々の現象の発生可能性に関する判断やその論拠の分析ツールを構築した。今後は、安全性の評価の実施に係る信頼性向上を目的として、構築したシナリオに対応する核種移行解析ケースの設定作業に関する情報の管理ツールを整備するとともに、シナリオの発生可能性の議論をより効果的かつ効率的に進めるため、関連する様々な情報を提示する機能を備えたストーリーボードの整備を行う。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、国内外における最新の考え方等について今後も引き続き情報収集を図り、評価手法への反映を図っていく。

(ii) 実施項目

(a) 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の管理ツールの整備

安全機能を視軸として、FEPの発生可能性に基づきシナリオを構築する手法を開発し、シナリオ構築の追跡性等を確保するため、様々な管理ツールを整備してきた。今後は、構築したシナリオから核種移行解析ケース設定までのプロセスについても同様に、判断の経緯や結果、及びその論拠をもって管理するための体系的なツールの整備を図る。また、シナリオ構築手法において必要となるFEPリストについては、これまでにOECD/NEAのFEP Database Projectへの参画や包括的技術報告書の策定を通じて、更新を行ってきた。今後も、基盤研究や諸外国における検討の情報を収集し、適宜FEPリストの更新を図る。

表 2.3.1(2)-1 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
a. 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の管理ツールの整備					

(b) 様々なデータを利用可能なストーリーボードの高度化

シナリオの十分性に資するため、最新の科学的知見を様々な分野の専門家が共有し、処分システムの状態の設定について議論することを目的としたストーリーボードを開発してきた。今後は、閉鎖前も含めた処分システムの状態に関する一貫した理解に資するために、「2.1.2 (3) 地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化」で整備する地質環境の長期変遷モデルや「2.3.1 (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」において整備する緩衝材の変質の進展挙動に関する現象解析モデルなどを用いたシミュレーションの結

果をアニメーションとして描画する機能を取り入れる。また、ストーリーボードに示した処分システムの状態に関する論拠を閲覧できるようデータベースとのリンク機能を取り入れる。加えて、リスク論的考え方方に則したシナリオの作成に資するため、考えられる複数の状態についても視覚的に表現できるよう開発を進める。

表 2.3.1(2)－2 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. 様々なデータを利用可能なストーリーボードの高度化	ストーリーボードの電子化の計画策定			電子化ストーリーボードの高度化	

(c) 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などを参考に、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など）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当たっては、「2.1.1 (5) (ii) (b) 長期にわたる自然現象の発生可能性及びその不確実性を評価するための技術の高度化」の成果を反映する。

表 2.3.1(2)－3 5年間の技術開発工程

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
c. 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			

2.3.2 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

(i) 目的

核種移行解析の場として設定するニアフィールドの状態の時間変遷については、それに伴う不確実性を考慮し、例えば解析の初期から緩衝材がすべて変質したと仮定してパラメータを適用するなど、安全評価上の保守性を確保することを基本的なアプローチとしてきた。また、母岩の割れ目中の核種移行解析モデルでは、水みちの微細透水構造や充填物への収着等

を詳細に考慮していなかった。今後は、地層処分システムが本来有する安全性を示すため、保守的に取扱ってきた諸現象をより現実的に反映することが可能な核種移行解析モデルの開発を行う。

(ii) 実施項目

(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構築

セメント系材料と緩衝材との反応など、様々な現象が複合的に進行するニアフィールドを対象として、これまで、緩衝材等が変質した場合の基礎データ等の取得を行ってきた。これによって、例えば、セメント系材料によりCa型化した緩衝材やオーバーパックの腐食によりFe型化した緩衝材における核種の収着・拡散に係るデータなどを蓄積している。今後は、「2.1.2 (3) 地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化」において取得した地下水化学の変遷に関する情報や「2.3.1(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の変遷をより現実的に設定し、その変遷に応じて変質セメント系材料や変質緩衝材中の核種の移行挙動に係るデータを取得し、核種移行解析モデルの構築とその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実施などを進める。

表 2.3.2(1)-1 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
	室内試験用変質セメント試料の作成	室内試験による収着・拡散データの取得	原位置試料を用いた室内での収着・拡散データ取得		
		原位置試験のモニタリングデータの取得			
		核種移行解析モデルの構築	原位置データを用いた核種移行解析モデルの妥当性検討		
	セメント共存系での堆積岩中の核種移行データ取得とモデル化				
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構築			検証実験とモデル検証		
	セメント共存系での堆積岩中の核種移行データ取得とモデル化		検証実験とモデル検証		
	鉄やセメント共存系での緩衝材・岩石中の間隙水化学、収着・拡散に係る現象理解とモデル高度化	鉄やセメントの影響を考慮した緩衝材・岩石中の間隙水化学、収着・拡散モデルの確証			
	鉄やセメントの影響を考慮した緩衝材・岩石中の間隙水化学、収着・拡散モデルの確証				
	システム変遷の場に追随させた核種移行解析手法の開発				
	システム変遷の場の情報を反映させた核種移行評価のフレームワーク構築				
	システム変遷の場の情報を反映させた核種移行評価のフレームワーク構築				
	ニアフィールド変遷評価(2.3.1(1)(f)で抽出されたシナリオと場の変遷の情報に基づく核種移行モデルの構築、これを用いた核種移行評価				

(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

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）のマトリクス中の核種の拡散・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開発するとともに、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100 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を進める（「2.1.2 (1) (ii) (c) 水みちの水理・物質移動特性を調査・評価するための技術の高度化」と連携）。

表 2.3.2(1)－2 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
	<結晶質岩（花崗岩）中のマトリクス・割れ目の特性を考慮した核種移行モデルの開発>				
	割れ目表面の不均質性を対象とした 室内試験とモデル開発		割れ目の連続性やアップスケーリングに着目した 室内試験とモデル開発		
	マトリクス中の原位置拡散試験データ に基づくモデルの妥当性確認		割れ目を対象とした原位置トレーサー試験結果 に基づくモデルの妥当性確認		
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	<堆積岩（泥岩）中の割れ目等の特性を考慮した核種移行モデルの開発>				
	原位置トレーサー試験				
	マトリクス・割れ目を対象とした物質移行試験		掘削影響領域等を対象とした物質移行試験		
	割れ目等の不均質性に着目した室内試験とモデル開発		堆積岩中の核種移行モデルの検証と 性能評価モデルへの反映		
	<実サイトデータを用いた物質移行・核種移行解析モデルの妥当性確認>				
	原位置で取得されたデータを活用した地下水流动・物質移動モデルの構築				
	地下水流动・物質移行モデルの妥当性確認方法の検討				
			地下水流动・物質移行モデルの妥当性確認のための 調査・モデル化・解析の方法論の高度化		

(2) 施設設計等を反映した核種移行解析モデルの高度化

(i) 目的

閉鎖後長期の安全性の評価の信頼性の向上を目的として、これまで、ニアフィールド領域を対象に地質環境条件や施設設計ができるだけ現実的に反映した核種移行解析モデルの開発を進めてきた。今後は、こうした技術をさらに発展させ、処分場パネルやアクセス坑道などの配置等を含めたより規模が大きい領域を対象とした核種移行解析モデルの構築を図る。加えて、地質環境特性の長期変遷等の成果を反映し、地質圏-生活圏インターフェイス（GBI）の時間的変化をより現実に取り扱うことが可能となる生活圏評価手法を構築する。

(ii) 実施項目

(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、ニアフィールド領域を対象に、人工バリアの構成要素を含んだ母岩の割れ目ネットワークモデルによる三次元の粒子追跡解析に基づき、人工バリアの機能や母岩中の割れ目の連結性や岩盤基盤部における拡散を反映した一次元マルチチャンネルモデルへの簡略化のための手法を開発した。さらに、この一次元マルチチャンネルモデルによって、ニアフィールド領域と、パネル配置等を考慮した処分場領域とを簡易に結合して核種移行解析を行うための手法を開発している。今後は、三次元の粒子追跡解析手法の計算能力の向上とともに、「2.1.2 (3) 地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化」で整備する地質環境の長期変遷モデルや「2.2 処分場の設計と工学技術」等で検討される設計仕様を考慮して、

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る。これにより、核種移行解析において、気候・海水準変動などによる地下水流动方向や地下水組成の変化、坑道や人工バリア、埋戻し材といった処分施設の構成要素の配置や形状、物理化学的特性をより明示的に取り込んでいく。こうした解析計算をより効率的に行うため、並列計算などにより高速処理する手法についても併せて開発を進める。

表 2.3.2(2)-1 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
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		空間スケールに応じた三次元の粒子追跡解析を反映した核種移行解析モデルの構築 パネルスケール ←→ 処分場スケール ←→ 広域スケール			

実施計画の検討 ←→ 大規模領域を取り扱う計算手法の検討 ←→ 時間変遷のモデルへの反映方法の検討

(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、気候や地形の観点から、日本全体を類型化し、それぞれに対してコンパートメントモデルに基づく簡易な生活圏モデルを整備し、農作業従事者などの決定グループを対象にサイトを特定しない一般的な生活圏評価を実施してきた。今後は、コンパートメントモデルの改良によって生活圏モデルの詳細化を図るとともに、「2.1.2 (3) 地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化」で整備する地質環境の長期変遷モデルを用いて、時間変化するGBIの空間分布を反映した手法への高度化を図る。また、本検討において、生活圏評価に係る重要かつ整備に時間を要するデータや課題について分析し、適宜、評価に必要なパラメータ設定のためのデータ取得計画（「2.3.3 (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」）へ反映する。

表 2.3.2(2)-2 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. 地質環境の変遷に応じた生活圏評価手法の高度化		サイト調査における生活圏評価の考え方の検討 ←→			

三次元粒子追跡解析を用いたGBIの評価方法の検討 ←→

2.3.3 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

(i) 目的

「2.3.2 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可能な核種移行解析や生活圏評価のためのモデルに対応して、解析に必要となるパラメータの設定に資するため、熱力学、収着・拡散、生活圏における核種移行率といったデータベースについて、不十分なデータを拡充するとともに信頼性の向上を図る。また、従来こうしたデータベースは、幅広い地質環境などに対応できるように汎用性を重視して一般的な条件で取得されてきており、今後、概要調査段階の準備を目的として、サイトで取得した地下水水質などの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る。

(ii) 実施項目

(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

最新の文献などの調査に加え、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。今後は、データが十分に整備されていない沿岸海底下や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き、岩石、緩衝材及び主要鉱物等への収着・拡散データ、溶解度設定に係る熱力学データを取得する。さらに、ニアフィールドにおける人工バリア間、人工バリアと周辺母岩との相互作用等による長期的な状態変遷を考慮した核種移行パラメータの設定のため、「2.3.1 (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」や「2.3.2 (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」で重要性が明らかにされるデータ（例えば、高濃度硝酸塩環境下における鉱物への核種の収着データやCa型ベントナイトへの核種の収着データ等）について取得を行う。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。

表 2.3.3(1)－1 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
	<高炭酸濃度等の多様な地下水環境に関する核種移行データ調査・取得>				
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	比較的炭酸濃度が高く還元性環境における収着データ取得方法の開発 室内試験による様々な核種の緩衝材・鉱物・岩石への収着データの取得 溶解度への炭酸濃度及び温度影響評価の課題抽出 バリア共存等の核種移行影響評価と課題抽出	溶解度の温度及び炭酸濃度依存性評価のための熱力学データの調査・選定 FeやCa等共存系における重要核種の溶解度・共沈データの調査・取得 バリア複合等の長期環境変遷を考慮した緩衝材への主要な核種の収着データ取得	収着モデルの構築と適用性の評価 バリア複合等の長期環境変遷を考慮した緩衝材中の多様な核種の収着・拡散データ拡充とモデルパラメータ整備		
	地球化学TDB反映	NEA-TDBほか最新情報調査・データ取得・レビュー・選定、TDB更新			
		収着・拡散データベース(SDB/DDB)のデータ拡充と信頼度評価、SDB/DDB更新			

(b) 様々な生活圏を想定した生活圏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の地表土壤への収着分配係数等のデータ取得や、地表における炭素の循環メカニズムなどに関する研究を実施し、生活圏評価に反映を行ってきた。今後は、こうした生活圏評価に必要となるデータが十分に整備されていない沿岸海底下を含む領域を対象として、また、比較的炭酸物質濃度が高い表層地下水水質に対するアクチニドやその子孫核種に重点を置いてデータの拡充を図る。また、線量を支配する核種として重要であるヨウ素を対象に、地表における循環に関するデータについて拡充を図る。さらに、「2.3.2 (2) (ii) (b) 地質環境の変遷に応じた生活圏評価手法の高度化」の検討に応じて、必要となるデータについて適宜データ取得を進める。

表 2.3.3(1)－2 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. 様々な生活圏を想定した生活圏評価に係るデータの拡充	<p>＜生活圏評価に係るパラメータ設定のためのデータ取得＞</p> <p>データ取得計画の策定</p> <p>重要核種（U等）の土壤への収着分配係数等のデータの取得</p> <p>ヨウ素の揮散率設定に係る文献調査</p>				

(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

これまででは、一般的に想定される地質環境を対象に、主要な因子に着目して設定された試験条件に基づき実験室で取得されたデータを用いて、溶解度や収着分配係数、拡散係数のパラメータを設定する手法を構築した。今後は、概要調査への準備として、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などに対して、核種移行パラメータ（溶解度、収着分配係数、拡散係数等）を設定する手法を構築する。

表 2.3.3(1)－3 5年間の技術開発工程表

技術開発要素	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
c. サイト調査を反映した核種移行パラメータ値の設定方法の整備	<p>実際の地質環境条件を想定した核種移行パラメータ設定の試行</p>				

3. 中長期的に研究開発を進める上での重要事項

3.1 技術マネジメント

研究開発の成果を処分事業に反映していくためには、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。本章では、地層処分事業の特徴を考慮した研究開発を進めるうえで、技術マネジメントのあり方やそれを円滑に推進するための仕組みの構築について述べる。

3.1.1 地層処分技術の特徴と研究開発に求められるもの

(i) 地層処分技術の特徴

地層処分は、サイト選定から建設・操業・閉鎖に至るまで100年以上の長期にわたる事業であり、事業の各段階において求められる技術を適切に準備していくことが必要である。また、人工バリアと天然の地層を適切に組み合わせたシステムによって、閉鎖後数万年以上といった極めて長期間の安全性を確保しようとするものである。そのため、事業の進展に伴って質的・量的に変化するサイトの地質環境情報やそれらを基に行う処分場の設計・安全評価の結果等を論拠として、事業の段階に応じて繰り返し地層処分の安全性を確認するセーフティケースを作成し、技術が信頼に足ることについて説明を行うことが有効である。

このため、地層処分事業の実施にあたっては、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など、多岐にわたる分野の変容していく科学的知識や技術を適切に統合することが必要である。

(ii) 研究開発に求められるもの

地層処分技術の特徴を踏まえると、研究開発を進めるにあたっては、長期にわたる事業期間における科学技術の進歩や社会的要件（政策・法律、安全規制、様々なステークホルダーの要求等）の変化への適確な対応が求められるとともに、特に個々の現象が有する長期の不確実性を明らかにするための調査・評価技術については、研究開発の目的と目標を明確にした上で、事業の段階に応じて戦略的に研究開発に取り組むことが求められる。

また、長期にわたる安全性を示すため、セーフティケースの論拠として用いるデータや情報の信頼性を確保する仕組みやプロセスが必要となる。

これに加え、処分事業全体を見通し、必要な最新技術・知見を見極めて廃棄物処分に関連する様々な機関からも幅広く吸収するとともに、多岐にわたる技術分野の研究を連携・統合させて、事業を推進するプロジェクトマネジメント力が必要である。

3.1.2 地層処分における技術マネジメントの全体像

段階的に進める地層処分事業に沿って研究開発を適切に推進し、必要な技術を信頼性を持って整備していくための技術マネジメントの全体像を図 3.1.2-1 に示す。NUMO は自身が行う調査・技術開発の成果や、関係研究機関における研究開発成果や技術継承等により得られる知見等をインプット情報として活用し、地下環境の調査・評価、その結果に基づく処分場の設計、設計した処分場に対する規制基準を踏まえた安全評価等の一貫した取り組みを通じて、

これらの研究開発成果や知見等を統合し、セーフティケースの作成・更新を行うことによって、ステークホルダーに対して体系化された技術的情報を提供するとともに、次段階に向けた技術課題を抽出する。これらのアウトプットは、専門家による技術的レビューを受けるとともに、様々なステークホルダーや、推進・規制双方の関係機関とのコミュニケーションのための基盤となる。このような技術的レビューやコミュニケーションを通じた議論は、国及びNUMOが行う研究開発や、NUMOが行う地質環境の調査・評価、工学設計、安全評価などのプロセスへフィードバックする。

こうした一連の活動を長期にわたる事業期間において繰り返し行うことによって、多岐にわたる技術分野の連携・統合や、抽出された課題に基づく研究開発目標の明確化を図ることは、地層処分の技術的信頼性と安全性を継続的に高めるとともに、戦略的に研究開発を進める上で重要である。

技術マネジメントに係る活動を支えるためには、人材と研究基盤からなる体制の確立と、作業を円滑に進めるための仕組みが不可欠である。

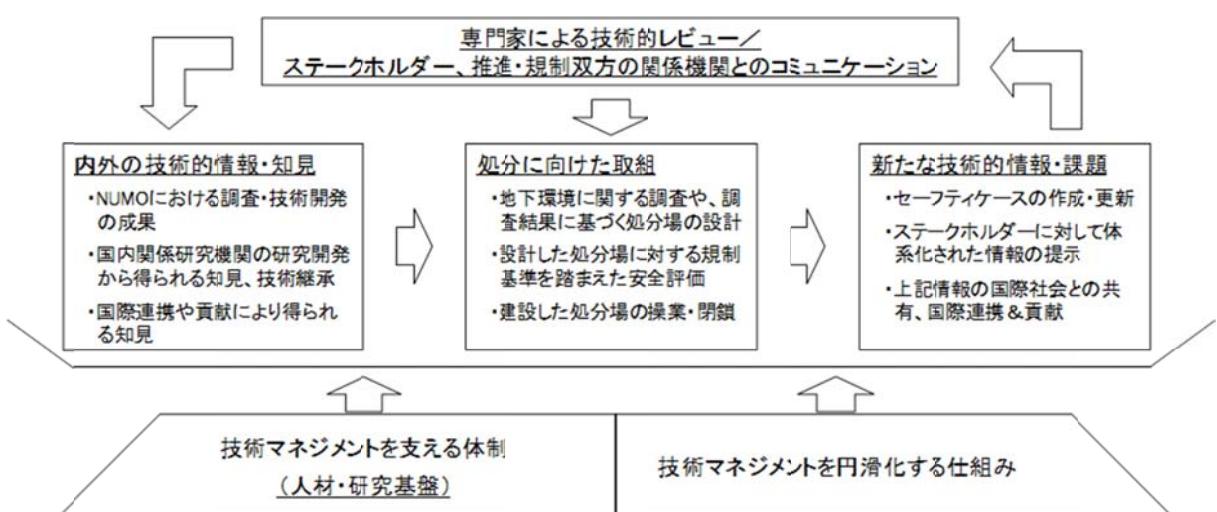


図 3.1.2-1 技術マネジメントの全体像

3.1.3 技術マネジメントを支える体制と仕組み

(1) 技術マネジメントを支える体制

(i) 技術マネジメントを支える体制の現状

地層処分事業を円滑に進めるためには、NUMOのみならず、調査・設計・解析などを行う企業の技術者など、幅広い分野の人材を、長期にわたる事業期間を見通して確保・育成する必要がある。

地層処分分野に携わる人材の動向として、日本原子力学会バックエンド部会（以下、「バックエンド部会」という。）の会員数は、NUMOが設立された平成12年頃から増加し平成23年頃から1割程度減少しているが、それ以降は概ね維持されている。また、日本原子力学会や土木学会における放射性廃棄物の処分に係るセッションの発表件数は、平成20年前後と比

べて減少してきている。これらのことから、今後、地層処分分野における技術開発の活性度の低下が懸念される。

一方、地層処分の実施主体である NUMO のプロパー技術者の年齢構成は、現状、30 才前後を中心とした新卒採用の若手技術者と 50 歳前後を中心とした、土木工事等の現場経験など多くの経験を有するベテラン技術者に二極化している。10 年後には、これらベテラン技術者が減少するうえに、独自の研究基盤となる施設・設備を所有していないことから、若手技術者は現場実践経験の機会を得ることが容易でない状況であり、現場作業に関するノウハウの維持が困難となる懸念がある。

また、NUMO 及び JAEA の地層処分関係の分野別技術者・研究者の割合は、地質環境の調査・評価分野が約 5 割、工学設計技術分野が約 2 割、安全評価分野が約 3 割となっている。サイト選定段階、安全審査段階、処分場の建設・操業段階など、今後の事業の各段階において中心となる技術分野は変化し、これに伴って確保すべき人材は量的・質的に異なることから、将来の事業進展を考慮したうえで、各技術分野で必要となる人材を計画的に確保していくことが重要である。

近年、地層処分分野における研究開発・技術開発費は低減する傾向にあり、このことから直ちに示唆されることではないものの、地層処分分野における研究者、技術者の技術開発活動が低下し、長期を見据えた計画的な人材の確保・育成が困難となることが懸念される。

(ii) 体制に係る課題と今後の取り組み

技術マネジメントを支える体制の現状を踏まえ、体制に係る課題と今後の取り組みについて以下に述べる。

(a) 事業の進展に応じた NUMO 技術者の確保

地層処分事業では、事業の進展に応じて各段階で必要となる技術者の専門性や要員数が変化する。今後、NUMO は、事業を通じた各段階において必要とする人材の特徴と必要な要員数について、長期的視点に立ち、特に初期の段階である文献調査や概要調査に焦点を当て、できるだけ具体的に検討を進めていくことが重要である。また、事業の進展によって NUMO が人材確保に急を要するような場合には、関係機関の人的支援等の連携・協力を柔軟に得られるようにしておくことが重要である。

(b) 地層処分分野の若手技術者の確保

前述したように地層処分の実施に当たっては、事業の長期性を考慮し、地層処分に携わる若手技術者を継続的に確保していくための施策が必要である。こうした施策においては、若手技術者が将来にわたり活躍できるイメージを持てるような材料を提供すること等により、地層処分分野の魅力と認知度を高めていく必要がある。

これまで、NUMO 及び関係研究機関は、地層処分に係る研究開発について大学との共同研究を通じた認知度向上、大学への講師派遣や、学会でのセミナー等を実施してきた。また、研究基盤を有する JAEA は、夏季実習等で学生を短期的に受け入れる等の活動を実施している。

NUMOにおいても、産業界と大学との共同研究を幅広い分野で積極的に実施するとともにインターンシップを開始しており、これによって認知度を高めるとともに、関係研究機関は研究現場における学生インターン等の短期受け入れをさらに拡充していくことが重要である。

以上の取組みに加え、調整会議のメンバーである NUMO 及び関係研究機関は、平成 30 年度から、合同で若手の専門家育成のための研修を開始している。今後、大学や産業界との連携を強化し、より実効的な研修の場として拡充していく。

(c) 関係研究機関から NUMO への技術継承

技術マネジメントを支える体制の整備にあたっては、人材の確保とともに育成も重要な課題である。これまでの長年にわたる研究開発によって関係研究機関のベテラン層に蓄積されている知見・経験を、各機関（特に NUMO）の若手技術者に継承していくことが必要である。

技術継承については、これまで NUMO と国内外の関係機関との技術連携・交流を通じ、NUMO からの協力要請に対して、相手先から研究開発成果の提供を受ける形式によるものが主であった。

今後は、成果の提供のみならず、NUMO と関係研究機関の間で共同研究や人材派遣等の人事交流を積極化し、協働を通じた、暗黙知も含めた知見・経験の継承を図っていくことが重要である。

(d) 若手技術者の現場経験を積む機会の創設

多岐にわたる技術を統合する能力の向上を図るため、若手技術者（特に NUMO）が、様々な技術が活用される現場で経験を積むことができる環境を確保することが必要である。

このため、NUMO は国内外の関係機関との共同研究等において、若手技術者を長期的に現場へ派遣するとともに、IAEA 等の国際機関が主催する研究現場でのトレーニングコースへ参加してきている。

今後は、国内外の関係機関等の連携により、現場経験をもとに技術力の継承・発展を図る場を創設するなど、若手技術者が現場経験を積むことができる仕組みをさらに整備していくことが重要である。また、こうした現場経験を積める研究基盤を長期にわたり確保し、国内の関係研究機関の活用はもとより、国内外での共同研究・共同プロジェクト、国際機関主催の研修への参加の拡大等により、若手技術者を継続的に育成していくことが重要である。

(2) 技術マネジメントを円滑化する仕組み

(i) 技術マネジメントを円滑化する仕組みの現状

地層処分事業では、「3.1.2 地層処分における技術マネジメントの全体像」で示した一連の過程を長期にわたる事業期間において繰り返し行う。すでに述べたように、NUMO では、第 2 次取りまとめ以降に国内外に蓄積された技術的情報・知見に基づいて、現段階での日本における地層処分の安全性と技術的信頼性を検討するとともに、処分サイトが明らかになった場合のセーフティケースの雛型となることを目的としたジェネリックなセーフティケースとして、包括的技術報告書の作成を行っている。

セーフティケースの作成においては、蓄積された膨大な知識・情報・データを様々な設計要件と組み合わせ、サイトの調査・評価、処分場の設計や安全評価等を行う。このため、図 3.1.3-1 に示すように技術マネジメントを円滑化する仕組みとして、法律や規制といった上位の要求事項からサイトの調査・評価、処分場の設計・安全評価に関する具体的な技術要件までの様々な要件間の連関を明らかにし、設計要件を管理する仕組みや膨大な知識・情報・データについて、経験やノウハウといった暗黙知の表出化も含め、階層化と分類により分かり易く整理して知識を管理する仕組みの構築・整備と、利用する個々の情報・データの品質の確保や、それらを統合するプロセスが重要となる。

NUMO では、包括的技術報告書の中で、設計要件を明確化し整理してきているが、今後のセーフティケースの更新に向け、科学技術の進歩や規制基準の検討等により、要件は継続的に追加・変更されていくと考えられる。

また、NUMO においてこれまでに収集した国内外の最新の知識・情報・データは地質環境調査、工学技術、安全評価の技術分野ごとに独自のデータベースを用いて蓄積しており、その管理方法を一元的なものとし、分野間の情報の受け渡しや相互活用を効果的に行うこと可能とするため、総合的なデータベースの開発、原子力委員会の連携プラットフォームへの参加などを進めてきた。さらに、NUMO 及び関係研究機関においては、それぞれが地層処分に係る膨大な知識・情報・データを蓄積してきているが、公開データを除けば外部からのアクセスは限定的であることから、組織間の効果的な情報共有を円滑に行なうことが容易なものとなるように引き続き共通的なデータベース等の開発・整備を進めていくことが必要である。

概要調査に適用すると想定される技術を用いた調査・評価については、NUMO において品質管理の手引書などを整備し、用いるデータ等の品質レベルを定めており、NUMO 及び関係研究機関が進めている個別の研究開発などにおいて、調査・試験の実施やデータなどの品質管理／品質保証に関する標準化あるいは一貫性を確保するための仕組みをさらに充実させていくことが重要である。

(ii) 仕組みに係る課題と今後の取り組み

上述した現状を踏まえ、今後、要件の管理、知識の管理、データ等品質の確保といった技術マネジメントを円滑化する仕組みについて、積極的に取り組む必要がある。

要件の管理については、法令、国際的原則・指針、廃棄体要件、ステークホルダーからの様々な要求事項等を基に、サイト調査、処分場の設計、安全評価等に係る要件を階層的に整理し、上位の要求事項から具体的な設計へと展開するための仕組みとこれを支援するツールの開発・整備を行う。廃棄体要件に関しては、処分場の設計や安全評価において今後製造される廃棄体の特性情報に基づき入力値を設定しその根拠を追跡できるよう、これらの情報を

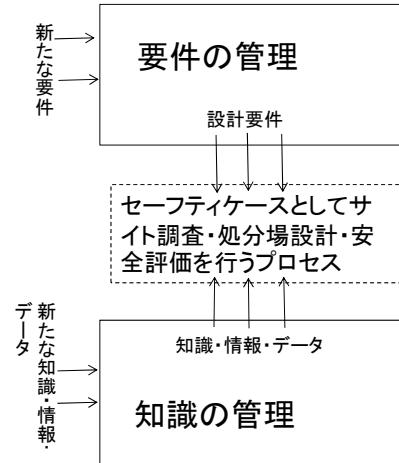


図 3.1.3-1 技術マネジメントを円滑化する仕組み

管理可能なデータベースの整備を行う。

知識の管理については、NUMOにおいて関係研究機関等から移転された技術、包括的技術報告書で取りまとめた地質環境の調査・評価結果、処分場の設計・安全評価の内容、その作成に伴って整備した国内外の最新の知識・情報等を階層的に分類して、体系的に整理するとともに、透明性・追跡性・取出しの容易性を確保した知識・情報・データを一元管理するための仕組みの構築を図っていくことが重要である。このため、NUMOは包括的技術報告書に集約したセーフティケースとしての知識を管理するための方法論と知識ベースの開発を進めるために、国際プロジェクトへの参加や二国間協力の枠組みを利用した取り組みを開始している。

知識・情報・データの品質の確保については、品質管理／品質保証に関する体系的な考え方を整備するとともに、データ等に必要となる品質レベルを確保するため、取得のための要素技術、プロセス、作業者の技量などを継続的に改善していく必要がある。

これら技術マネジメントを円滑化する仕組みと支援ツールの構築にあたっては、先端的なITを活用するとともに、NUMOや関係研究機関間のデータベースの連携などをさらに進める。

3.1.4 国際連携・貢献

人材の確保と育成、セーフティケースの質的向上、それを用いた様々なステークホルダーとのコミュニケーションを効果的に進めるためには、国内のみならず国外の関係機関とも緊密に連携することが必要である。その際、「3.1.3 技術マネジメントを支える体制と仕組み」の個別施策における国際連携の他、技術的成果や経験を相互に共有することや「2. 研究開発項目と内容」に示した個別研究開発項目を進めるにあたっての国際連携の検討等を通じ、世界的なレベルでの廃棄物処分技術の安全性と信頼性向上、様々なステークホルダーの理解促進に継続的に貢献していく。

3.1.5 技術マネジメントを強化するにあたって留意すべき点

今後の研究開発課題は、地層処分に関する諸外国や国際機関等での議論の進展に応じて将来的に変化する可能性がある。これらの議論の進展や予見される規制制度、さらには将来技術に対する国民の関心となる様々な技術分野の進展等の事業環境の変化に応じて、研究開発を柔軟に取り組んでいくことが重要である。

令和元年度までの取り組みにおいては、NUMOと関係研究機関が連携を取りながら進めてきている。

今後は各研究機関と連携を取るだけでなく、例えば、若手技術者を含めて技術分野ごとに関係研究機関とNUMOが一堂に会して意見交換を行うことで横断的に研究開発の進捗や方向性を議論するような場を創設することなどを検討する。これは、連携強化の持続や人材育成にも資するものと考えられる。

3.2 代替処分オプション

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に向けた取り組みが進められており、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においては、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その他の処分方法に関する調査研究を推進することとされており、代替処分オプションについての知見や情報を整備しておくことも重要である。

3.2.1 使用済燃料直接処分

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、直接処分に関する現状の技術レベルと、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。

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、人工バリアの成立性の評価の高度化への対応、地質環境条件や使用済燃料の多様性への対応等に重点をおいて、以下の研究開発を進める。

(1) 処分容器の挙動評価

環境条件によっては極めて長い寿命を期待できる純銅について、わが国における適用条件や長寿命達成の可能性を提示するとともに、銅に長寿命が期待できない条件等への柔軟な対応を図るため、他の候補材について長寿命化の見通し、条件等を提示する。また、処分後、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臨界安全評価技術の高度化を図る。

(2) 使用済燃料、緩衝材の挙動評価

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浸出挙動や長寿命容器の候補材料である銅等と緩衝材との相互作用等についての理解を深めるための調査研究を実施する。

(3) 直接処分システムの成立性の多角的な確認

人工バリアの成立性の検討をより確かなものとするために、直接処分システムの性能評価の全体像（枠組み）の検討を進めるとともに、人工バリアの成立性に関する多角的な検討に資する最新の知見を把握し適宜検討に反映できるように整備する。

3.2.2 その他の代替処分オプション

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、比較検討を行った。その上で、諸外国で調査研究が進められており、人間環境からの更なる離隔などの利点を有する超深孔処分を代替処分オプションとして選定し、調査研究を進めることとした。

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した。今後は、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・成立性を検討していくための留意点や検討方法を整備する。

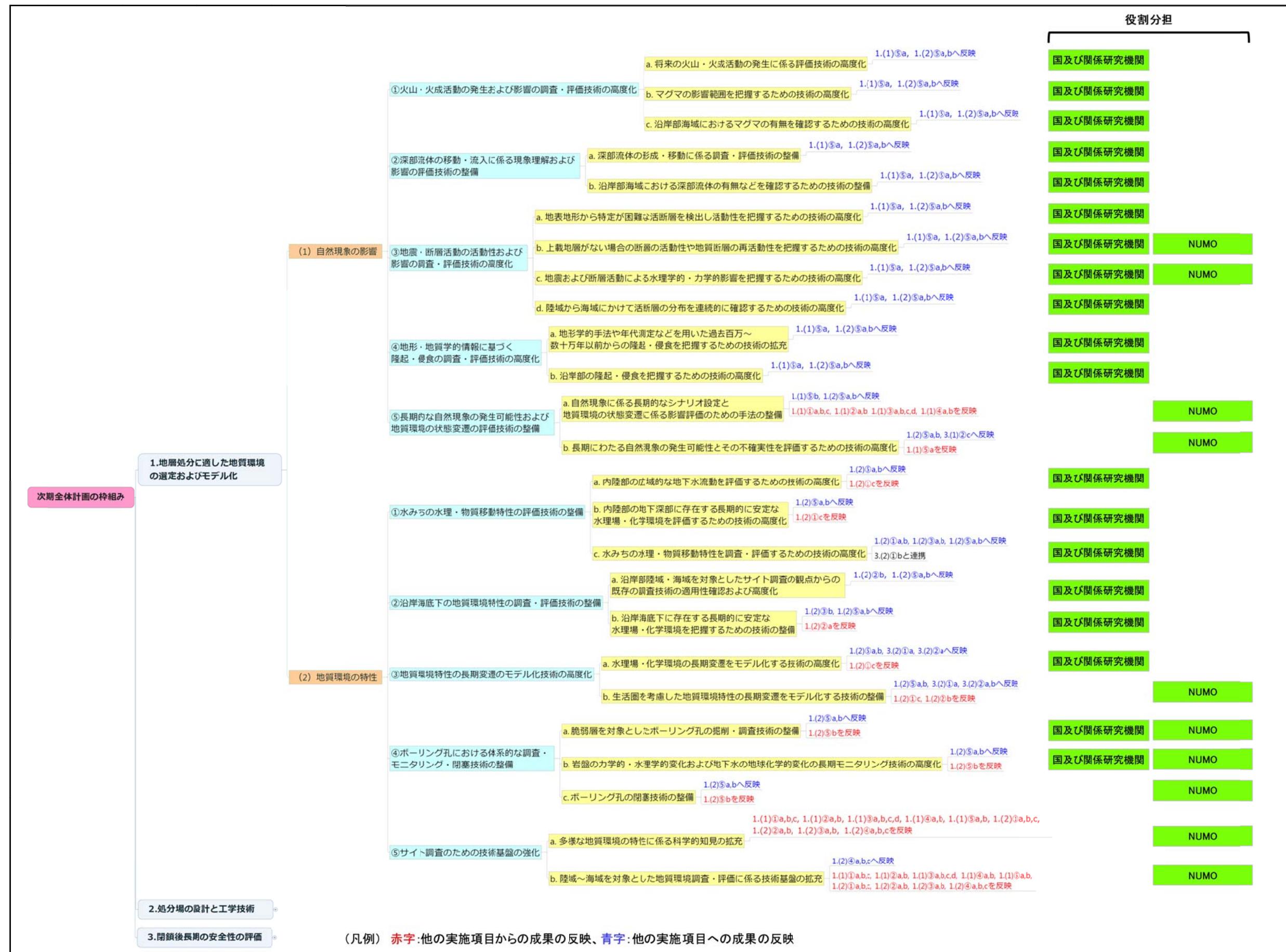
なお、使用済燃料の直接処分に関する研究開発については、「地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成25年度～平成29年度）」において、平成29年度までを目処に直接処分第2次取りまとめ（最終版）を提示することとしていた。しかしながら、直接処分第1次取りまとめを通じて、使用済燃料の特徴や地質環境の多様性、評価の現実性の向上等に関する多くの課題が抽出されたため、それらの課題への対応を進めているところである。また、直接処分に関する研究開発の取りまとめに当たっては、NUMOが作成を進めているガラス固化体等の地層処分を対象とした包括的技術報告書の成果も踏まえることが重要である。このような技術的な背景を踏まえ、また、基本方針において、「国及び関係研究機関は、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その他の処分方法に関する調査研究を推進するものとする。」との位置づけが明確化されたことを勘案して、今後の研究開発においては、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一体的に取りまとめることを検討する。

4. おわりに

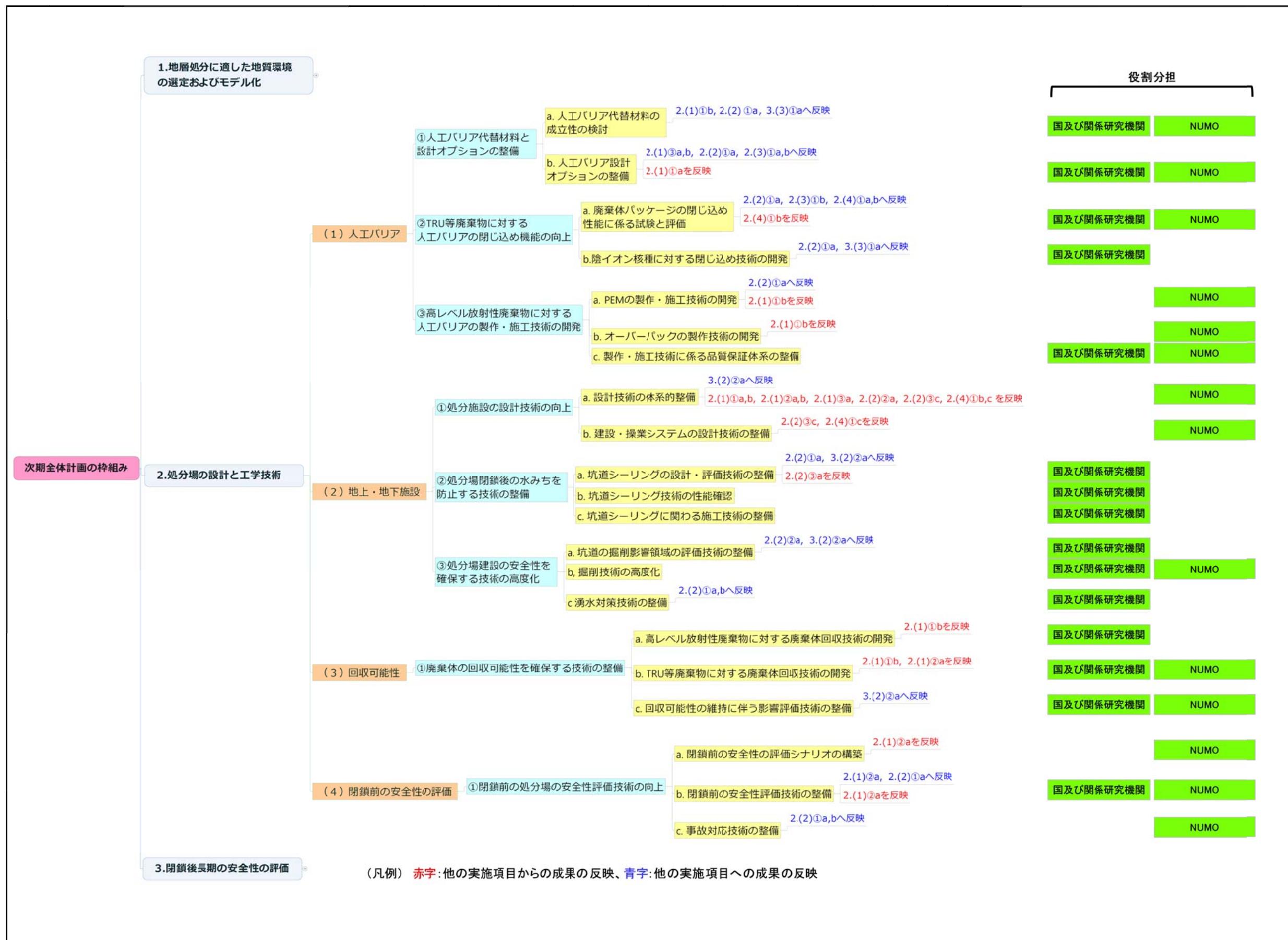
地層処分の実現に当たっては、国、NUMO及び関係機関で連携・協力を図りながら、地層処分技術の信頼性向上に向けた取り組みを進めることが重要である。また、処分事業及び研究開発の進捗状況等を考慮し、適宜見直しを図りながら、本全体計画に示された研究開発を着実に進めていくことが重要である。

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り組みにおいて、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。

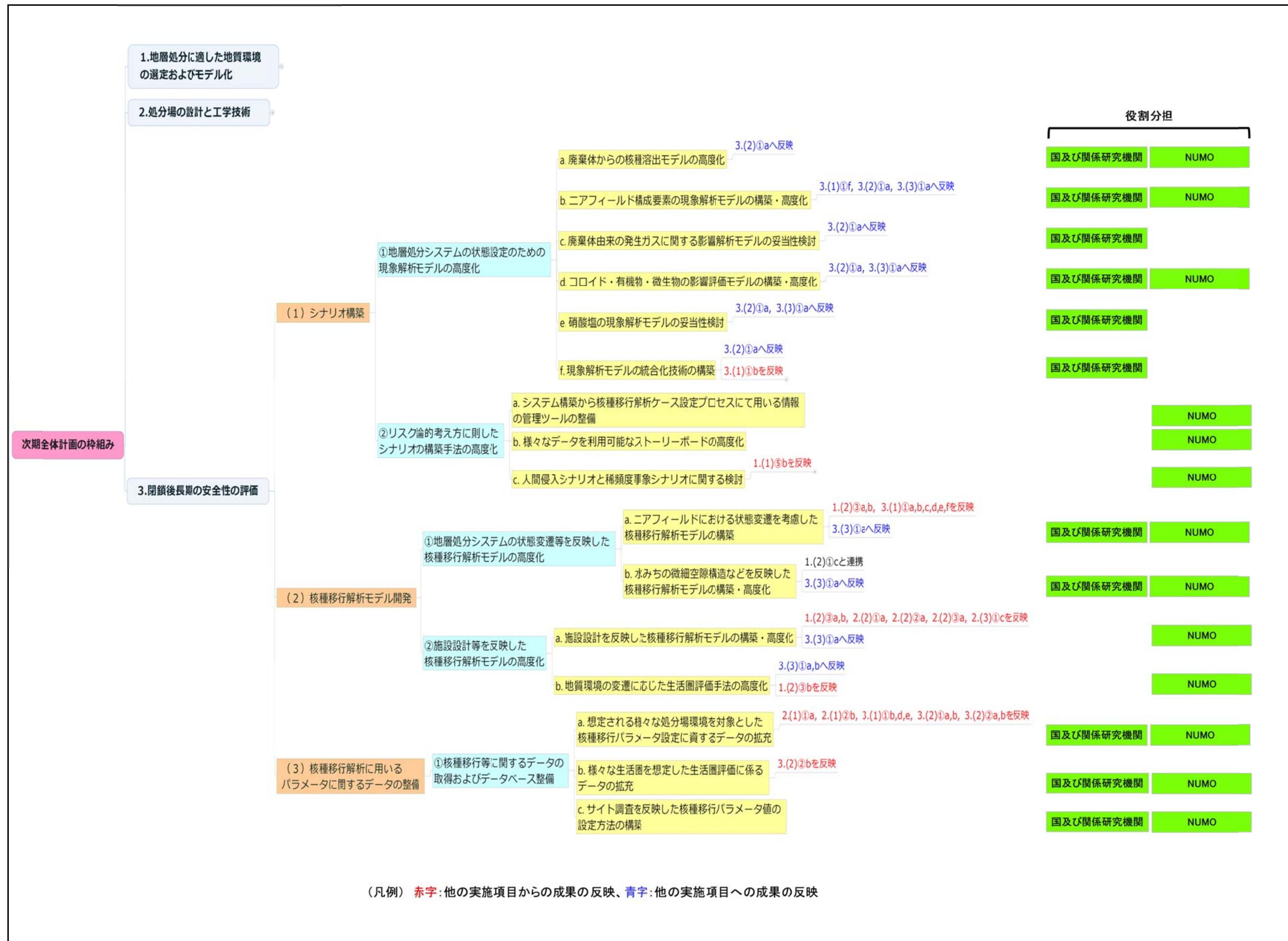
全体計画の枠組みと役割分担（地層処分に適した地質環境の選定及びモデル化）



全体計画の枠組みと役割分担（処分場の設計と工学技術）



全体計画の枠組みと役割分担（閉鎖後長期の安全性の評価）



「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、P D C A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發揮し、実施主体・基盤研究開発機関一体で「眞の全体計画」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、T R U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カ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としている。

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3)

地層処分研究開発調整会議の外部有識者

(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

田中 和広* 山口大学理事・副学長／山口大学名誉教授

朽山 修 原子力安全研究協会技術顧問 【主査】

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

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

山崎 晴雄 首都大学東京名誉教授

※第1回から第4回まで参加。

地層処分研究開発調整会議 会合経緯

○第1回（平成29年5月31日）

（議題）

1. 地層処分研究開発調整会議について
2. 今後の研究開発について

（配布資料）

資料1. 「地層処分研究開発調整会議」について（経済産業省）

資料2-1. 経済産業省における地層処分に関する研究開発の現状について（経済産業省）

資料2-2. 日本原子力研究開発機構（JAEA）における地層処分技術に関する研究開発の現状について（日本原子力研究開発機構）

資料2-3. 原子力発電環境整備機構（NUMO）における技術開発の現状について（原子力発電環境整備機構）

資料3-1. 今後の研究開発課題について（経済産業省）

資料3-2. 今後の研究開発課題について（日本原子力研究開発機構）

資料3-3. 包括的技術報告書の作成と今後の技術開発課題（原子力発電環境整備機構）

資料3-4. 沿岸海底下地下水の超長期安定性評価技術の開発（産業技術総合研究所）

資料3-5. 断層の地下水流动と物質移行評価および物理探査による地質環境特性調査の課題について（電力中央研究所）

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. 最終処分関係行政機関等の活動状況に関する評価報告書（原子力委員会放射性廃棄物専門部会）

参考資料3. 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）（地層処分基盤研究開発調整会議）

参考資料4. 地層処分基盤研究開発に関する全体計画【研究開発マップ】（平成25年度～平成29年度）（地層処分基盤研究開発調整会議）

参考資料5. 地層処分事業の技術開発計画－概要調査段階および精密調査段階に向けた技術開発－（原子力発電環境整備機構）

○第2回（平成29年9月8日）

（議題）

1. 第6回最終処分関係閣僚会議の結果について
2. 次期全体計画の項目立てと研究開発課題の整理について
3. 今後の進め方について

（配布資料）

資料1. 第6回最終処分関係閣僚会議の結果について（経済産業省）

資料2. 前回（第1回）会合の結果について（原子力発電環境整備機構）

資料3. 次期全体計画の研究開発項目（案）（原子力発電環境整備機構）

資料4. 外部有識者によるレビューについて（案）（経済産業省）

○第3回（平成29年12月1日）

（議題）

1. 次期研究開発の進め方について

（配布資料）

資料1. 本日の会合について（経済産業省）

資料2. 次期全体計画の枠組み（案）（原子力発電環境整備機構）

資料3. 研究開発の進め方について（案）（原子力発電環境整備機構）

資料4. 研究開発の進め方について（案）概要版（原子力発電環境整備機構）

○第4回（平成29年3月15日）

（議題）

1. 中長期的に研究開発を進める上での重要事項等について

2. 地層処分研究開発に関する全体計画（平成30年度～平成34年度）について

（配布資料）

資料1. 地層処分の技術マネジメントについて（案）（原子力発電環境整備機構）

資料2. 地層処分研究開発に関する全体計画（平成30年度～平成34年度）（案）（地層処分研究開発調整会議）

○第5回（令和2年1月27日）

（議題）

1. 地層処分技術に関して頂戴したご意見について

2. 研究開発の進捗状況について

（配布資料）

資料1. 地層処分研究開発に関する全体計画の見直しについて（経済産業省）

資料2. 地層処分技術に関して頂戴したご意見（原子力発電環境整備機構）

資料3-1. 研究開発の現状について（経済産業省）

資料3-2. 研究開発の現状について（原子力発電環境整備機構）

資料3-3. 研究開発の現状について（日本原子力研究開発機構）

資料3-4. 研究開発の現状について（産業技術総合研究所）

資料3-5. 研究開発の現状について（電力中央研究所）

資料3-6. 研究開発の現状について（原子力環境整備促進・資金管理センター）

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～平成34年度）（平成30年3月、地層処分研究開発調整会議）

○第6回（令和2年3月9日～13日）（書面審議）

（議題）

1. 地層処分研究開発に関する全体計画（平成30年度～平成34年度）（改訂案）について
(配布資料)

資料1. 地層処分研究開発に関する全体計画（平成30年度～平成34年度）改訂の考え方
(原子力発電環境整備機構)

資料2. 全体計画の枠組みと役割分担（原子力発電環境整備機構）

資料3. 地層処分研究開発に関する全体計画（平成30年度～平成34年度）改訂版（案）
(地層処分研究開発調整会議)

資料4. 地層処分研究開発に関する全体計画（平成30年度～平成34年度）改訂版（案）

新旧対応表

参考資料1. 地層処分研究開発調整会議（第5回） 議事要旨

参考資料2. 研究開発における国際協力強化に向けた取組みの状況（最終処分国際ラウンド
テーブル（第2回）での議論）（資源エネルギー庁）

関係資料

○エネルギー基本計画（平成26年4月）

①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

我が国においては、現在、約17、000トンの使用済燃料を保管中である。これは、既に再処理された分も合わせるとガラス固化体で約25、000本相当の高レベル放射性廃棄物となる。しかしながら、放射性廃棄物の最終処分制度を創設して以降、10年以上を経た現在も処分地選定調査に着手できていない。

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、高レベル放射性廃棄物の問題の解決に向け、国が前面に立って取り組む必要がある。

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。我が国においても、現時点で科学的知見が蓄積されている処分方法は地層処分である。他方、その安全性に対し十分な信頼が得られていないのも事実である。したがって、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、幅広い選択肢を確保する観点から、直接処分など代替処分オプションに関する調査・研究を推進する。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。

その上で、最終処分場の立地選定にあたっては、処分の安全性が十分に確保できる地点を選定する必要があることから、国は、科学的により適性が高いと考えられる地域（科学的有望地）を示す等を通じ、地域の地質環境特性を科学的見地から説明し、立地への理解を求める。また、立地地点は地域による主体的な検討と判断の上で選定されることが重要であり、多様な立場の住民が参加する地域の合意形成の仕組みを構築する。さらに、国民共通の課題解決という社会全体の利益を地域に還元するための方策として、施設受入地域の持続的発展に資する支援策を国が自治体と協力して検討、実施する。

このような取組について、総合資源エネルギー調査会の審議を踏まえ、「最終処分関係閣僚会議」において具体化を図り、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（2008年3月閣議決定）」の改定を早急に行う。

また、廃棄物の発生者としての基本的な責任を有する事業者は、こうした国の取組を踏まえつつ、立地への理解活動を主体的に行うとともに、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。

○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。合わせて、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、こ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。