

地層処分事業の技術開発計画

(2018 年度～2022 年度) 改訂版



2020 年 8 月

原子力発電環境整備機構

地層処分事業の技術開発計画

(2018 年度～2022 年度) 改訂版

2020 年 8 月

原子力発電環境整備機構

©原子力発電環境整備機構: Nuclear Waste Management Organization of Japan, 2020

本資料の全成果は著作権により保護されています。全部または一部を無断で複写・複製・転載することを禁じます。複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒108-0014 東京都港区芝4丁目1番地23号 三田NNビル2階

原子力発電環境整備機構 技術部

All parts of this work are protected by copyright. No parts of this publication may be reproduced, stored in the retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, without the prior permission of NUMO. Inquiries about copying and reproduction should be addressed to:

Science and Technology Department

Nuclear Waste Management Organization of Japan

Mita NN Bldg.1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan

目次

1. はじめに	1
2. 本計画における技術開発の内容	3
2.1 地層処分に適した地質環境の選定及びモデル化	4
2.1.1 現状と基本方針	4
2.1.2 自然現象の影響	6
(1) 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	6
(2) 自然現象の長期的な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	7
2.1.3 地質環境の特性	8
(1) 地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化	8
(2) 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	9
(3) サイト調査のための技術基盤の強化	12
2.2 処分場の設計と工学技術	14
2.2.1 現状と基本方針	14
2.2.2 人工バリア	17
(1) 人工バリア代替材料と設計オプションの整備	17
(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	18
(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	19
2.2.3 地上・地下施設	21
(1) 処分施設の設計技術の向上	21
(2) 処分場建設の安全性を確保するための技術の高度化	22
2.2.4 回収可能性	23
(1) 廃棄体の回収可能性を確保する技術の整備	23
2.2.5 閉鎖前の安全性の評価	24
(1) 閉鎖前の処分場の安全性評価技術の向上	24
2.3 閉鎖後長期の安全性の評価	26
2.3.1 現状と基本方針	26
2.3.2 シナリオ構築	28
(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	28
(2) リスク論的思考方に則したシナリオの構築手法の高度化	29
2.3.3 核種移行解析モデル開発	31
(1) 地層処分システムの状態変遷等を反映した核種移行解析モデルの高度化	31
(2) 施設設計等を反映した核種移行解析モデルの高度化	33
2.3.4 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	34

(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	34
3. 中長期的に研究開発を進めるうえでの重要事項	38
3.1 技術マネジメント	38
3.1.1 中長期的に研究開発を進めるための技術マネジメント	38
3.1.2 技術マネジメントを支える体制に係る取組み	38
(1) 事業の進展に応じた NUMO 技術者の確保	38
(2) NUMO 技術者の人材育成	39
3.2 技術マネジメントを支える仕組みに係る取組み	39
3.3 国際連携・貢献	40
4. おわりに	41
添付 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）」で示された枠組み（樹形図）における NUMO の技術開発項目	
添付 2 「地層処分事業の技術開発計画（2018 年度～2022 年度）」における各取組みの相互関係図	

1. はじめに

これまで、特定放射性廃棄物の最終処分に係る技術の開発のうち、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については国及び関係研究機関が「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） 2013年3月 地層処分基盤研究開発調整会議」に基づき実施してきている。また、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については原子力発電環境整備機構（以下、「NUMO」という。）が「地層処分事業の技術開発計画 一概要調査段階および精密調査段階に向けた技術開発－2013年6月 原子力発電環境整備機構」に基づき進めてきている。

2015年5月に閣議決定された「特定放射性廃棄物の最終処分に係る基本方針」（以下、「基本方針」という。）では、「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」との指摘がなされた。

また、2016年10月に原子力委員会決定された「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」では、国、関係研究機関による基盤研究開発に関する全体計画をNUMOが実施する技術開発計画と一体化し、包括的技術報告書¹を有効に活用し、NUMOによる一層のリーダーシップのもと、「真の全体計画」を策定することが指摘された。

こうした背景のもと、国及び関係機関並びにNUMOは、2017年5月から新たに「地層処分研究開発調整会議」（以下、「調整会議」という。）を開催し、国及び関係研究機関が実施する研究開発並びにNUMOが実施する技術開発に係る計画を一体化して整理した「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」（以下、「全体計画」という。）を策定した。

全体計画の策定にあたっては、NUMOは「原子力発電環境整備機構 中期事業目標（2016年9月）」を踏まえ、実施主体として処分技術に係る技術開発全体を俯瞰して検討を牽引した。具体的には、研究開発の成果をセーフティケース²の作成・更新に資するという基本的視点のもと、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の他、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うえで、各研究項目の相互関係を明確にしつつ検討を進めた。また、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・貢献に関する事項も含め検討した。

全体計画に基づき、NUMOの「地層処分事業の技術開発計画」（以下、「本計画」という。）

1 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包括的に検討し、セーフティケースとしてNUMOが取りまとめた報告書。

2 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。

3 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」。

を新たに策定した。本計画では、全体計画のうち、事業の安全な実施、経済性及び効率性の向上等の観点からNUMOが実施する技術開発について、2018年度～2022年度の5ヶ年における技術開発項目と技術開発工程等を示すとともに、技術マネジメント、国際連携・貢献に関するNUMOの取組みを示した。

その後、NUMOは2018年11月に包括的技術報告書（レビュー版）を公表し、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約1年間のレビューにおいて、「今後取り組むべき課題については概ね整理されている」とのコメントや、技術的な知見や検討成果の適切な理解を促すための説明の充実化等についてコメントをいただいた。レビューと並行して、2019年4月、5月には包括的技術報告書（レビュー版）の一般向け及び専門家向け説明会を開催し、セーフティケースを多様なステークホルダーにどのように伝えていくかといったコミュニケーションに関するご意見や、解析手法の妥当性確認方法やモニタリング技術に対する提案、回収可能性の維持による影響等への疑問、経済社会的研究の必要性等についてご意見をいただいた。また、資源エネルギー庁との共催で進めている対話型全国説明会においても、断層活動や地下水に係るリスク、長期の閉じ込め機能等への懸念といった技術的な信頼性に係るご質問をいただいている。

以上で述べた地層処分に係る技術的なご意見やご質問を考慮し、また、2018年度からの研究開発実績を踏まえ、2020年1月及び3月に調整会議が再開され、国、関係機関、NUMO及び外部有識者を交えて全体計画の見直しに関する議論が行われた。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べきとの指摘があった。そのため全体計画には役割分担等を示すため樹形図や研究工程等を追加することとされた。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全体計画の記載は見直され、2020年3月に改訂された。

全体計画の改訂を踏まえ、本計画の改訂においても、基本的構成や取り組むべき課題について大きな変更は行わず、課題間の関係と技術開発工程を明確化した。全体計画の樹形図にNUMOの技術開発項目を示した添付1を修正するとともに、全体計画で示された研究工程を踏まえ、技術開発工程の具体化を図った。さらに、2019年度NUMO第63回評議員会における「2019事業年度業務実施結果に対する評価・提言」の内容を考慮して本計画の見直しを行った。

2. 本計画における技術開発の内容

地層処分事業は、事業期間が長期にわたる。その実施にあたっては、地質環境調査・評価技術、処分場の設計技術、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等、技術分野が多岐にわたるため、個々の技術を全体として統合することが必要である。

このため、基本方針に基づき、国及び関係研究機関が実施する研究開発とNUMOが実施する技術開発について、適切な役割分担のもと、緊密に連携を図りつつ計画的に進める必要がある。その際は、地質環境の調査・評価、処分場の設計及び安全評価の3分野間の連携や研究開発成果の移転・継承、人材育成等にも配慮する。

本章では、全体計画に基づき、事業の安全な実施、経済性及び効率性の向上等の観点からNUMOが2018年度～2022年度の5ヶ年で実施する技術開発項目について、その目的、実施概要、技術開発工程等を示すとともに、全体計画における研究項目との相互関係を添付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）」で示された枠組み（樹形図）におけるNUMOの技術開発項目」に示した。

また、今後数年間における技術開発のあるべき姿と、様々な技術の整備に向けたNUMOの取組み項目の成果の統合・反映先を、添付2『「地層処分事業の技術開発計画（2018年度～2022年度）」における各取組みの相互関係図」に示した。さらに、添付2で示す「成果の反映先」は、技術開発の成果が統合された結果を示すものであるが、これらは全体計画の樹形図で示された上位の研究課題とも整合するものである。

なお、技術開発項目の中には、基盤的研究と応用的研究の両方の要素を含むものもあり、これらについては関係研究機関との共同研究として実施、あるいは国及び関係研究機関と役割を調整したうえで連携して取り組む。

2.1 地層処分に適した地質環境の選定及びモデル化

地層処分の実施に係る技術開発のうち、ここでは、地層処分に適した地質環境を選定するための地質環境の調査・評価技術及びモデル化技術について示す。

2.1.1 現状と基本方針

第2次取りまとめ⁴以降、国及び関係研究機関による研究開発を通じて地層処分事業の基盤技術が整備され、NUMOではサイト調査に向けた技術の体系化や実証等の観点から技術開発を進めてきた。これまでに整備された地質環境調査・評価技術は以下のとおり総括できる。

- 日本全国を対象に自然現象の発生、その傾向や影響等に係る科学的知見が網羅的に蓄積された（これらの成果の一部は科学的特性マップ⁵に反映されている）。
- 陸域を対象に、自然現象の影響及び地質環境特性を把握するための調査・評価技術がひと通り整備され、これらの技術の組合せにより概要調査の実施は可能である。
- 沿岸部海域を対象に、実証的な取組みはないものの、陸域の調査・評価技術や資源探査等で整備された技術の組合せにより概要調査の実施は可能であると考えられる。

ただし、地層処分技術WG中間とりまとめ（最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価―地質環境特性および地質環境の長期安定性について―平成26年5月）（以下、「中間とりまとめ」という。）で示されたように、地層処分の技術的信頼性の向上に向けた技術開発は引き続き必要であり、そこで示された技術課題や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踏まえると、2018年度～2022年度の5ヶ年では、国、NUMO及び関係研究機関が連携し、特に概要調査の的確な実施に向けた以下の取組みを進めていく必要がある。

- ①自然現象の発生とその影響に係る将来予測の技術的信頼性の向上に向け、年代測定や地下探査に係る精度の向上、複数の手法の組合せによる適用範囲の拡大等の観点から調査・評価技術の高度化を図るとともに、特に深部流体に係る現象理解を深める。
- ②調査・評価技術の信頼性の向上の観点から特に重要な、ボーリング孔の掘削・調査技術の合理化・最適化を図るとともに、処分場の設計や安全評価と連携しつつ、地質環境特性の長期変遷モデル化技術及び広域的な水理・物質移動場に応じた方法論の整備を図る。
- ③沿岸部海域を対象とした調査・評価技術については、必要な情報が陸域と同程度の精度で取得できるように実証的な取組みを通じて高度化を図る。
- ④多様な地質環境に対応できるようにするため、科学的知見や調査・評価事例に係る情報の蓄積、品質マネジメントシステムの拡充等を通じて技術基盤の強化を図る。

⁴ 第2次取りまとめ：旧核燃料サイクル開発機構（現日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という。））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―」。

⁵ 科学的特性マップ：地層処分を行う場所を選ぶ際にどのような科学的特性を考慮する必要があるのか、それらは日本全国にどのように分布しているか等を、全国レベルの情報・データに基づいて大まかに俯瞰できるよう、マップの形で示したものの。

NUMO は、このうちの①及び②の一部について、最新技術の導入や既存技術の改良による技術の合理化・最適化の視点から、「2.1.2 (1) 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」及び「2.1.3 (2) 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」、関係研究機関の成果を統合した技術の実用化の視点から、「2.1.2 (2) 自然現象の長期的な発生可能性及び地質環境の状態変遷の評価技術の整備」、処分場の設計や安全評価との連携に必要な技術の整備の視点から、「2.1.3 (1) 地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化」のそれぞれの技術開発を実施する。また、④についても「2.1.3 (3) サイト調査のための技術基盤の強化」として継続的に取り組む。

「2. 本計画における技術開発の内容」で述べたように、添付2『『地層処分事業の技術開発計画（2018年度～2022年度）』における各取組みの相互関係図』に示すとおり、本章での成果を、将来の自然現象の発生とその地質環境への影響の予測技術の高度化（取組み①と関連）、地質環境特性の長期的な変化に係るモデル化技術の高度化（取組み②、③と関連）、ボーリング孔の掘削・調査から閉塞に至る一連の技術の最適化（取組み②、③と関連）及び地質環境に係る科学的見地や地質環境調査・評価に係る技術的見地の拡充（取組み④と関連）へ統合する。

2.1.2 自然現象の影響

(1) 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

ボーリング調査や地下坑道を利用した調査の段階で上載地層が確認できない（あるいは確認が困難な）断層や地質断層に遭遇した場合に、将来の断層の変位及びそれに伴う水理的・力学的影響をシミュレーションにより評価する技術を整備する。

(ii) 実施概要

(a) 上載地層がない場合の断層の活動性や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等の検討に加えて、これまでに断層破碎帯内物質について定性的な特徴（鉱物粒子の形状等）に基づく検討が主に行われてきた。今後は、関係研究機関を主体として実施される断層の活動性に係る調査・評価技術の整備と並行し、特に調査対象地域の周辺で生じる地震・断層活動あるいは応力場や水理場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について、実際の断層を対象とした現場試験等を通じて整備する。以上の技術は、概要調査及び精密調査の段階の主にボーリングや坑道調査において遭遇した断層に対する調査・評価技術として整備する。本実施項目の技術開発工程を表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度
a. 上載地層がない場合の断層の活動性や断層の再活動性を把握するための技術の高度化	水理・力学連成解析技術の有効性確認／予備的モデル化・解析				
	←→				
	複数サイトを対象としたモデル化・解析		←→	←→	←→
			←→	←→	←→
	室内試験／新規試験孔における試験装置の性能確認				
←→					
	現場試験を通じた試験装置の作動確認			現場試験を通じた試験装置の有効性確認・高度化	
←→				←→	

(2) 自然現象の長期的な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を目的として、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を目的として、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関し、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たうえで、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いて、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地質環境条件⁶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するとともに、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。本実施項目の技術開発工程を表2.1-2に示す。

表 2.1-2 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	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	情報（事象の地域性・不確実性要因）の整理	起回事象発生から地質環境への影響発生に至るシナリオの作成		起回事象発生から地質環境への影響発生に至るシナリオの影響解析	
	シナリオ設定・影響評価手法に係る情報整理			取りまとめ／評価技術の体系化	

⁶ ジェネリックな地質環境条件：地域を特定しない、幅広い地質環境条件。

(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。本実施項目の技術開発工程を表2.1-3に示す。

表 2.1-3 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	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	情報（プレート運動の変動と関連する現象の変遷）の整理	a. の成果を反映したケーススタディの準備（対象事象・研究対象地域選定、実施方法・体制検討）		起因事象の発生可能性及び地質環境への影響評価に係るケーススタディ	
				ITM-TOPAZ 手法の高度化／手順書の整備	

2.1.3 地質環境の特性

(1) 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

長期にわたる地形変化や気候・海水準変動に伴う地質環境特性の時間的・空間的变化について、地下浅部の状態変遷等も考慮に入れ、処分場の設計や安全評価との連携を図りながらモデル化する技術を整備する。

(ii) 実施概要

(a) 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が、それらとより直接的に関連づけて生活圏を考慮したモデル化について取り組んでいく必要がある。今後は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した三岩種（深成岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類）の三次元地質環境モデルに、水みち⁷の微細透水構造モデル、わが国の沿岸

⁷ 水みち：岩盤中において、有意に高い透水性を有する領域をいう（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等がそれに該当し、新第三紀堆積岩類等では、透水性の高い地層等がそれに当たる。

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（四次元地質環境モデル）構築を進める。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・水理学的調査等の結果を全国規模で集約し、地下浅部の酸化帯や希釈や、地表水系の変遷等に係る最新の科学的知見を反映したモデル化を行う。この取組みを通じて地下深部から地表の生活圏までの地質環境特性の長期変遷を一体的に取り扱うモデル化技術を整備する。本実施項目の技術開発工程を表2.1-4に示す。

表 2.1-4 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度	
a. 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	三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					
	河川の種類・パターン化/地表水系の発達プロセスに係る検討		地表水系の変遷を伴う広域的な地形変化のモデル化に係る検討		地質環境特性の長期変遷をモデル化する技術の妥当性確認及びモデル構築に係る方法論の取りまとめ	

(2) 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、実証的な取り組み等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等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、関係研究機関と連携し、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的・化学的な影響の低減等に向け、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て試験方法の合理化を図る。この取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。本実施項目の技術開発工程を表2.1-5に示す。

表 2.1-5 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	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の掘削・試験の計画立案	大深度ボーリング孔の掘削・試験／現場・安全管理			
	泥水の性状・選定等に係る情報共有及び泥水掘削時の水理試験・採水の品質評価手法の整備			地質環境モデルの構築及び設計・安全評価パラメータ設定手法の整備／試験技術の体系化	
	泥水／水理試験・採水に係る情報の整理		掘削泥水が地質環境に及ぼす影響の評価手法の整備／試験技術の体系化		

(b) 岩盤の力学的・水理学的変化及び地下水の地球化学的変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等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、こうした技術を実際のボーリング孔への適用を通じて、その適用性を確認する。本実施項目の技術開発工程を表2.1-6に示す。

表 2.1-6 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度
b. 岩盤の力学的・水理学的変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	光ファイバを用いたモニタリング技術の概念検討				
	光ファイバによる応力モニタリング技術の有効性確認		データの取得・歪量の解析等を通じた技術の有効性評価／取りまとめ		
	光ファイバ温度・圧力計及びパッカーシステムの開発				
	地下水モニタリング装置の設計・製作及び有効性の確認・体系化を通じた技術の有効性評価／取りまとめ				

(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等の回収技術、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等を利用しつつ、既存のボーリング孔を対象とした適用試験等を通じて整備する。本実施項目の技術開発工程を表2.1-7に示す。

表 2.1-7 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	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			石油探査におけるボーリング孔内の設置物の回収技術等に係る情報収集		
	ベントナイト・セメント系材料の物性取得／配合選定		既存ボーリング孔を利用したベントナイト系材料の性能試験		
		金属系プラグの材料選定／設置方法の開発			
		閉塞材の運搬・設置方法の開発			
				上記の成果に基づくボーリング孔の閉塞技術の有効性の確認・体系化	既存ボーリング孔における閉塞技術の適用性確認

(3) 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を目的として、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等の整備を継続し、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、自然現象が及ぼす影響等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等に係る科学的知見を優先的に拡充する。本実施項目の技術開発工程を表2.1-8に示す。

表 2.1-8 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	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		最新の文献や関係研究機関の研究開発成果等に基づく地質環境の特性に係る科学的知見の拡充			
		付加体堆積岩類等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等の整備が進められてきた。今後もこれらの研究開発を継続するとともに、二酸化炭素の地下貯留や海域を対象とした地下探査等に適用されている技術に係る最新の知見を集約し、地質環境データベースとして構築する。さらに、地層処分への有効性や技術的課題等を分析・整理する。また、これまでに整備したサイト調査に係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等について、実証的な取組みへの適用を通じて実効性の向上を図る。本実施項目の技術開発工程を表2.1-9に示す。

表 2.1-9 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	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	地質環境特性データの拡充／品質管理				
	地質環境データベースの構築		地質環境特性データの拡充／地質環境データベースの運用・更新		
	現場調査・試験のリアルタイム管理システムの整備		現場適用を通じた品質マネジメントシステムの更新		
	関係研究機関の研究開発成果や資源探査・海洋調査等に適用されている最新の調査技術に係る情報収集／調査技術シートの更新				
	概要調査計画策定の机上演習／計画策定の手引書・参考文書の整備				

2.2 処分場の設計と工学技術

地層処分の実施に係る技術開発のうち、ここでは、処分場及び人工バリアを設計し、安全な処分場の建設・操業を実現する技術について示す。

2.2.1 現状と基本方針

第2次取りまとめ及び第2次 TRU レポート⁸以降、NUMO 及び関係研究機関による技術開発においては、これらのレポートで示された処分概念や人工バリアの仕様を出発点として、安全性と工学的実現性の確保に向けて体系的な設計手法の整備、人工バリア施工や地下施設建設のための湧水対策技術の実証的検討等の技術開発を進めてきた。また、2011年3月の福島原子力発電所事故以降は、操業安全に関する検討を進め、操業安全評価のための異常状態シナリオの構築と評価を行ってきた。さらに、基本方針に基づき、廃棄体の回収技術に関する実証的検討を進めてきた。これまでに整備された処分場の設計と工学技術は以下のとおり総括できる。

- レファレンスとしてきた人工バリア材料の安全機能に関わる特性データが多く取得され、安全機能の成立条件が明確になった。また、人工バリアの製作・施工技術については、オーバーパックの溶接技術・検査技術に関する実証的な検討が進められ、実現性の見通しを得ている。緩衝材についても様々な施工方法による性能確認が行われ、堅置きと横置きの両方の処分概念について、好ましい施工方法の組合せが明確になってきた。特に、高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアを地上施設で一体化する PEM (Prefabricated Engineered Barrier System Module) 方式については、製作・搬送技術の実証的な検討がなされ、実現性を見通しを得ている。
- 人工バリア及び地下施設の設計を行うための手順、要件、要件への適合性を判断する指標や基準等が整備され、概要調査に基づく処分場の概念設計が実施可能なレベルにある。また、深地層の研究施設における建設や調査研究を通じて、掘削損傷領域に関する力学・水理データの取得や、透水性に応じた湧水対策技術が整備された。
- 高レベル放射性廃棄物については、廃棄体を回収するための技術が概ね整備された。
- 操業安全性の確保に関しては、異常状態（火災、落下等）に対する廃棄体の堅牢性の評価手法が概ね整備された。

こうした現状に対し、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等を踏まえ、2018年度～2022年度の5ヶ年では、国、NUMO 及び関係研究機関が連携し、地層処分の技術的信頼性の向上に向けた技術開発を引き続き継続するとともに、特に、安全性、実現性、経済性の確保を考慮した有望な設計オプションの選定とその実証に向けた以下の取組みを進めていく必要がある。

⁸ 第2次 TRU レポート：電気事業連合会・旧核燃料サイクル開発機構（現 JAEA）が2005年9月に公開した報告書「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－」。

- ①安全確保を第一に経済合理性や調達が多様性を考慮して、人工バリア材料の選定を進めるために、様々な代替材料の適用に関する技術的な成立性を確認する。
- ②地層処分相当低レベル放射性廃棄物⁹（以下、「TRU 等廃棄物」という。）に対する閉じ込め性能の一層の向上を図るため、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設計オプションの改良を進める。
- ③高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの有力な設計オプションの一つと考えられる PEM 方式を対象として、地下での搬送定置作業を効率的に実施するための仕様の合理化を進め、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。
- ④これまでに整備してきた体系的な設計手法に従い、安全確保を第一に、実現性と経済性を考慮した処分場の仕様の最適化を進める。
- ⑤坑道シーリングによる処分場全体の閉じ込め性能を評価するために、これまでの設計概念の詳細化、室内試験や工学規模の試験による性能確認並びに施工技術の高度化等を進める。
- ⑥安全性、効率性、品質向上を指向した建設・施工技術の遠隔操作化・自動化の見通しを得る。
- ⑦処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の管理の在り方の具体化に向けて、回収可能性を維持することに伴う安全性への影響等に関する評価、影響を最小化するための対策技術の開発に取り組む。
- ⑧閉鎖前の安全性の評価シナリオの網羅性を確保するため、事象の重畳等の複合的な事象の発生等にも留意して評価シナリオの検討を進めるとともに、異常事象への対応策として、異常発生防止策、異常拡大防止策、影響緩和策の具体化を進めていく。

このうち NUMO では、①、②、③、④について TRU 等廃棄物処分の安全性向上、工学的実現性及び経済的合理性向上のための設計オプションの整備の観点から、「2.2.2 (1) 人工バリア代替材料と設計オプションの整備」、「2.2.2 (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」、「2.2.2 (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」、「2.2.3 (1) 処分施設の設計技術の向上」の技術開発を実施する。また、⑥、⑦、⑧について処分場の建設・操業から閉鎖までの安全性向上のための具体策の整備の観点から「2.2.3 (2) 処分場建設の安全性を確保するための技術の高度化」、「2.2.4 (1) 廃棄体の回収可能性を確保する技術の整備」、「2.2.5 (1) 閉鎖前の処分場の安全性の評価技術の向上」の技術開発を実施する。

「2. 本計画における技術開発の内容」で述べたように、添付 2 『地層処分事業の技術開発計画（2018 年度～2022 年度）』における各取組みの相互関係図に示すとおり、本章での成果は、安全性の更なる向上に向けた設計・技術の整備（取組み②、⑥、⑦、⑧に関連）及び工学的成立性、経済性の確保を考慮した設計の合理化（取組み①、③に関連）を実現させた処分場の設計検討（取組み④に関連）に反映する。また、「2.2.4 (1) 廃棄体の回収可能性を

⁹ 地層処分相当低レベル放射性廃棄物：「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」でいう第二種特定放射性廃棄物。再処理工場や MOX 燃料工場の操業及び解体に伴って発生する放射性廃棄物のうちの一部。

確保する技術の整備」(取組み⑦に関連)は「2.3 閉鎖後長期の安全性の評価」における、現実的な処分場の状態設定を行う技術の整備へと統合する。

2.2.2 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等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たが、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、海外実施主体等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、経済合理性や調達が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、関係研究機関と連携し、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等）の特性データを多様な環境条件を考慮して取得し、これまで優先的に研究開発されてきた材料での特性データとの比較検討等により代替材料の技術的な成立性を確認する。特に、設計要件に係る人工バリアの長期的な挙動については、10年を超えるような人工バリア材料の長期試験や微生物影響に関する試験等にも取り組むことにより不確実性の低減を図る。本実施項目の技術開発工程を表2.2-1に示す。

表2.2-1 今後5年間の技術開発工程

実施項目	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、長期圧密試験等）				
	オーバーパック材料の特性試験（長期腐食試験等）				
	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等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、安全性に係る性能や回収の容易性等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合理的な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等が、TRU等廃棄物についてはPEM方式を採用した場合の人工バリア等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。有力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。本実施項目の技術開発工程を表2.2-2に示す。

表 2.2-2 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	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評価		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、内部ガス圧に対する構造健全性等の課題に対する対策を具体化し、閉鎖後長期の放射性核種の閉じ込め性能の一層の向上を図った廃棄体パッケージ仕様の開発を進める。

(ii) 実施概要

(a) 閉じ込め性能を高めた廃棄体パッケージ容器の設計

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の設計オプションについて検討し、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。一方で、こうした設計オプションの閉じ込め性能を確実なものとし一層の性能の向上を図るためには、放射線分解により廃棄体パッケージ内に発生することが見込まれる水素ガスによる内圧の増加や蓋溶接後の熱処理に起因するアスファルト固化体の熱反応暴走等への対策が課題として挙げられた。そこで、これらの課題に対する対応策を示すとともに、それぞれの事象に対する影響評価を実施して、廃棄体パッケージの最適な構造を設計する。本実施項目の技術開発工程を表2.2-3に示す。

表 2.2-3 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度
a. 閉じ込め性能を高めた 廃棄体パッケージ容器の 設計	閉じ込め性能を高めた 容器の設計と評価 				

(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方式等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を目的として、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の閉鎖後長期の安全性を担保するための品質保証体系を整備するために、施工プロセスにおける品質管理方法を具体化する。

(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、これまで縦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の一つと考えられる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、これまでの検討によって示された仕様では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ことを目的として、安全性の確保を前提にPEMの設計仕様を合理化する。この際、PEM容器は処分場閉鎖後も残置されることに留意して、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に必要な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操作化・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等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。本実施項目の技術開発工程を表2.2-4に示す。

表 2.2-4 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	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きた。今後は炭素鋼鋳鋼品や銅との複合品等の代替材料に対する製作技術の整備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、炭素鋼鍛鋼品だけでなく代替材料に対しても適用できるように、溶接後の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。本実施項目の技術開発工程を表2.2-5に示す。

表 2.2-5 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	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等の開発		

(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、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等を踏まえたうえで、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、関係研究機関と連携して検討を進める。本実施項目の技術開発工程を表2.2-6に示す。

表 2.2-6 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	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			品質保証体系の具体化 (モニタリング等を含む)		

2.2.3 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に係る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、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等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等、実用性と合理性を高め、段階的な事業の進展に伴ってより最適化された処分場の設計検討の結果を示すとともに、それに影響を与える変動要因等の整理を行い、以降の事業実施に備える。本実施項目の技術開発工程を表2.2-7に示す。

表 2.2-7 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	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

地層処分場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等の条件により、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、特に換気・排水システムについて、今後坑道内の火災等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。本実施項目の技術開発工程を表2.2-8に示す。

表 2.2-8 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	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（坑道内火災等）				

(2) 処分場建設の安全性を確保するための技術の高度化

(i) 目的

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観点から、建設作業の遠隔操作化・自動化について検討を進める。

(ii) 実施概要

(a) 処分場建設技術の高度化

処分場建設技術において、例えば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と考えられるが、将来予測される技能者不足に対する備えや安全性と効率性の向上を指向して、建設技術の遠隔操作化・自動化の検討を進めることも今後は必要であると考えられる。そこで、坑道の掘削と埋め戻し作業を対象として、遠隔操作化・自動化による効果や将来的な技術の進展を見据えた技術的な実現性について海外の技術動向等も含めて検討を実施する。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。本実施項目の技術開発工程を表2.2-10に示す。

表 2.2-10 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度
a. 処分場建設技術の高度化	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			

2.2.4 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、回収可能性の維持による処分場の安全性に与える影響等に対する評価技術を整備する。

(ii) 実施概要

(a) TRU 等廃棄物に対する廃棄体回収技術の開発

TRU等廃棄物に対する回収技術の開発では、廃棄体グループに応じた処分方法を対象とした取組みを進め、信頼性と実現性の高い回収技術を確立する必要がある。ここで、適用する回収技術は廃棄体回収時の人工バリアの状態によって異なるため、TRU等廃棄物に対する人工バリア設計オプションの整備を踏まえて、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。本実施項目の技術開発工程を表2.2-11に示す。

表 2.2-11 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度
a. TRU 等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		

(b) 回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備

回収可能性を維持することに伴い、閉鎖後長期の安全性に有意な影響を与えないように埋め戻しの方法や排水対策等を検討する等して、処分場の操業を実施する必要がある。これまでに、回収可能性を維持する状態を坑道の維持管理や人工バリアに対する影響等について定性的に論じることで比較評価したが、今後は解析や試験等を通じてより定量的に評価していく必要がある。このため、回収可能性を維持した場合の岩盤からの湧水量や坑道周辺の水理

場の変化、及び湧水に伴う地下の酸化還元環境の変化等に関する解析技術等の開発に、関係研究機関と連携して取り組む。これらの成果に基づいて、地下環境の回復過程に関連する事例研究等を活用した解析技術の検証、及び閉鎖後長期安全性への影響低減の観点からより適した回収可能性の維持方策を整備する。本実施項目の技術開発工程を表2.2-12に示す。

表 2.2-12 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度
b. 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・回収可能性の維持方策の検討		

2.2.5 閉鎖前の安全性の評価

(1) 閉鎖前の処分場の安全性の評価技術の向上

(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・操業から閉鎖までの期間において発生する可能性がある異常事象を網羅的に考慮した安全性の評価シナリオを作成するとともに、廃棄体への衝撃や火災等の事象について地下施設特有の条件を考慮した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・操業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、外部電源喪失等を特定し、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、地震や津波等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。このため、引き続き国内外の原子力施設等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。本実施項目の技術開発工程を表2.2-13に示す。

表 2.2-13 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度
a. 閉鎖前の安全性の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		
				ハザードデータベースの更新	

(b) 閉鎖前の安全性の評価技術の整備

これまでに異常事象として抽出した廃棄体の落下、火災、爆発、水没、外部電源喪失等を考慮した評価シナリオについて、閉鎖前の処分場の安全性確保の見通しに関する評価を行ってきた。今後は、地震や津波等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等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技術の整備を進める。廃棄体周辺の放射線分解による水素ガスの発生量等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。本実施項目の技術開発工程を表2.2-14に示す。

表 2.2-14 今後5年間の技術開発工程

実施項目	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
b. 閉鎖前の安全性の評価技術の整備	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		

(c) 事故対応技術の整備

評価シナリオとして取りあげた異常事象について、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施設設計に反映する。本実施項目の技術開発工程を表2.2-15に示す。

表 2.2-15 今後5年間の技術開発工程

実施項目	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		事故事例の調査・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

地層処分の実施に係る技術開発のうち、ここでは、閉鎖後長期の安全性を評価する技術について示す。

2.3.1 現状と基本方針

第2次取りまとめ及び第2次 TRU レポート以降、国及び関係研究機関により、主にジェネリックな地質環境条件を念頭に研究開発が進められてきた。NUMO は、これらの成果を反映して検討した包括的技術報告書において、三つの岩種を対象とする地質環境条件を想定し、そこに構築した地層処分システムの安全性の評価を行った。閉鎖後長期の安全性の評価技術を構成する主要な三つの分野である、シナリオ構築、核種移行解析モデル開発及び核種移行解析に用いるデータの整備に関し、主要な技術開発の成果はそれぞれ以下のようにまとめることができる。

- シナリオについては、実験事実、ニアフィールドを対象とした熱、水理、力学、化学（以下、「THMC」という。）の観点から重要と考えられる個々の現象に対する解析モデル（以下、「現象解析モデル」という。）による数値シミュレーションやナチュラルアナログから得られる最新の科学的知見を用いて地層処分システムの状態の変遷を設定し、それに基づき発生可能性を考慮に入れて構築する技術が開発されている。
- 核種移行解析モデル開発については、ニアフィールドを対象とした空間スケールが 100m×100m×100m 程度の三次元のモデルを用いて、地層処分場の設計上の特徴や母岩の割れ目ネットワーク構造を反映して核種移行解析を実施することが可能な技術を整備している。
- 核種移行解析に用いるデータの整備に関しては、第2次取りまとめ以降、地質環境条件をジェネリックにとらえて核種移行パラメータを設定するためのデータを整備しており、これらを用いて、幅広い地質環境条件における核種移行パラメータを設定するための基盤が整備されてきている。

上記のような背景のもと、中間とりまとめや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踏まえると、2018 年度～2022 年度の 5 ヶ年では、国、NUMO 及び関係研究機関が連携し、以下の取組みを進めていく必要がある。

- ①これまでに、地層処分システムの状態の変遷を想定したうえで安全性の評価を行うという枠組みが整備され、保守性を考慮した簡略化を基本的なアプローチとして、システムの状態からシナリオを作成し、核種移行解析のためのモデルやパラメータを設定するという方法論が構築されている。今後、この過程で考慮されている保守性をより合理的なものとするため、上記の一連のプロセスにおいて、処分場の構成要素や仕様、地質環境特性等をより現実に即して考慮した評価を行うための技術を開発する。
- ②上記技術開発に関し、実際のサイトが明らかになった後、その地質環境条件に応じて設計した地層処分システムが本来有するバリア性能をより忠実に示し、サイト間の比較や設計

の最適化に資することが可能となるよう、その適用性について検討を行う。

- ③安全評価シナリオの網羅性を確認するうえで重要となるシナリオの構築過程の追跡性を向上させることを目的として、その過程で用いられる様々な根拠情報を体系的に管理するツールの整備を行う。
- ④様々な地質環境条件や人工バリアの状態変遷等に対して、核種移行パラメータの設定に必要なデータの拡充を継続的に進める。

これらに対応して、NUMO では以下の技術開発を実施する。

- ①包括的技術報告書で示した安全性の評価に係る一連の作業における保守性を考慮した簡略化の妥当性を、室内実験や原位置試験のデータを用いて確認する（2.3.2（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）。
- ②①に併せて、安全性の評価における様々な簡略化において、より合理的に保守性を設定するための方法論を検討することにより、簡略化のプロセスの厳密性の向上とその妥当性の確認を行う（2.3.2（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、2.3.3（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、2.3.3（2）施設設計等を反映した核種移行解析モデルの高度化、2.3.4（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）。
- ③シナリオを作成するための根拠情報を体系的に管理可能なツールを開発し、シナリオ構築過程の追跡性の向上を図り、安全評価で取り扱うべきシナリオの網羅性の確保に資する。併せて、シナリオの発生可能性に関するより定量的な検討を行う（2.3.2（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）。
- ④様々な地質環境条件が想定される文献調査の段階に向けて、核種移行等に関する不十分なデータを拡充する（2.3.4（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）。

「2. 本計画における技術開発の内容」で述べたように、添付2『「地層処分事業の技術開発計画（2018年度～2022年度）」における各取組みの相互関係図』に示すとおり、本章での成果を、事業を長期的に支える知識マネジメントシステムの具体化（取組み③に関連）、現実的な処分場の状態設定を行う技術の整備（取組み①、②、③に関連）、現実的な核種移行解析モデルの開発（取組み②に関連）及び現実的な核種移行パラメータ設定技術の整備（取組み④に関連）へと統合する。

2.3.2 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、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、現象解析モデルの開発を行ってきた。今後は、室内における長期試験データや原位置試験データを取得し、構築してきた現象解析モデルの合理的簡略化に関する妥当性の確認と改良を行う。

(ii) 実施項目

(a) 廃棄体からの核種溶出モデルの高度化

これまで、主に関係研究機関により、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が行われてきた。今後は、既存の核種溶出モデルの妥当性確認と改良を目的として、関係研究機関と連携し、ガラス溶解へ影響を及ぼす現象の中で重要なものと特定された、オーバーパック由来の鉄の影響とガラス表面の変質層の保護的効果を評価するための長期の浸漬試験等を実施する。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。本実施項目の技術開発工程を表2.3-1に示す。

表 2.3-1 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度
a. 廃棄体からの核種溶出モデルの高度化	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・短期浸漬試験等の実施				
	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				

(b) ニアフィールド構成要素に関する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、主に関係研究機関により、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の取得とそれを表現するための現象解析モデルの構築が行われてきた。今後は、現象解析モデルの妥当性確認と改良を目的として、関係研究機関と連携し、幅広い地下水環境に留意して、オーバーパックやセメント系材料による緩衝材変質について長期試験データを取得する。また、100°Cを超える条件における緩衝材のTHMCの変遷に関するデータを原位置試験において取得する。こうした知見に基づき、重要な反応系を現象解析モデルへ反映してモデルの改良を行う。本実施項目の技術開発工程を表2.3-2に示す。

表 2.3-2 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度
b. ニアフィールド構成要素に関する現象解析モデルの構築・高度化	← 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 →				
	← 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 →				
	← 100°C を超える条件下での熱-水理-応力-化学連成現象に関する原位置試験データの取得 →				

(c) コロイドの影響評価手法の構築・高度化

これまで、主に関係研究機関により、緩衝材に起因するベントナイトコロイドの核種移行への影響を評価するための解析モデルの構築が進められてきた。今後は、関係研究機関と連携し、原位置での試験を実施しながら、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と改良を実施する。本実施項目の技術開発工程を表2.3-3に示す。

表 2.3-3 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度
c. コロイド影響評価手法の構築・高度化	← 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 →				
	← 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 →				
	← 速度依存性等を考慮したコロイドに対する核種の収脱着データの取得 →				
	← 原位置試験による影響評価モデルの妥当性確認と改良 →				

(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

(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安全規制の考え方等を参考とし、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

これまで、安全機能を視軸として、関連するFEP (Features, Events and Processes) 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、この方法に基づくシナリオ作成過程の追跡性等を確保するため、様々な管理ツールの整備を行ってきた。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、及びその論拠を管理するためのツールを開発し、全体として体系的なツールとなるように整備を図る。また、シナリオ構築手法において必要となるFEPリスト (NUMO-FEPリスト) については、これまでにOECD/NEAのNEA International 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、関係研究機関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。本実施項目の技術開発工程を表2.3-4に示す。

表 2.3-4 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	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	シナリオから核種移行解析ケース設定に至る手順での分析ツールの高度化検討				
	国際会議等における情報収集を通じた NUMO-FEP リストの更新				

(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

これまで、作成したシナリオの安全評価上における十分性の確保に資するため、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による方法論の開発を行ってきた。今後は、ストーリーボードの電子化を進め、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、地質環境の長期変遷モデルや緩衝材の変質の進展挙動に関する現象解析モデル等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、こうしたシミュレーション結果も含め、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関連するデータベースとのリンク機能を取り入れる。加えて、リスク論的考え方に則したシナリオの作成に資するため、処分システムに生起すると考えられる複

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。また、これらの機能を活用してシナリオの発生可能性のより定量的な検討を行う。本実施項目の技術開発工程を表2.3-5に示す。

表 2.3-5 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2020 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

これまで、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具体的な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。今後も諸外国の関係機関との情報交換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。本実施項目の技術開発工程を表2.3-6に示す。

表 2.3-6 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2020 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	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				

2.3.3 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

核種移行解析モデルについては、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ことや、母岩割れ目中の水みちの微細透水構造や充填物への収着等を考慮しない等、安全評価上の保守性を十分に確保することを基本的なアプローチとしてきた。今後は、地層処分システムが本来有する安全性をより忠実に示すため、原位置試験等で取得したデータを用いて、モデルが有する保守性の合理化と妥当性確認を行うとともに、より現象に即したものとなるよう改良を図る。

(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

これまで、主に関係研究機関により、セメント系材料と緩衝材との反応等、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、緩衝材等が変質した場合の基礎データ等の取得が行われてきた。今後は、関係研究機関と連携し、ニアフィールドの間隙水化学の変遷に関する情報等に基づき、ニアフィールドの状態の変遷を現象に即してより忠実に設定し、その変遷に応じた変質状態にあるセメント系材料の核種の移行挙動に係るデータを原位置試験や室内試験により取得する。こうしたデータに基づき、保守性を合理的に設定した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取組みを進める。本実施項目の技術開発工程を表2.3-7に示す。

表 2.3-7 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度
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	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		
				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	
	核種移行解析モデルの構築				

(b) 水みちの微細透水構造等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ル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）に対して、岩盤マトリクス部の核種の拡散・収着を考慮した核種移行解析モデルを適用してきた。今後は、関係研究機関と連携し、グリムゼル地下試験施設における原位置試験等により、そのモデルの妥当性を確認するとともに割れ目中の微細透水構造等を反映して改良を行う。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 程度のスケールの空間領域）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に必要なデータ等の準備とそれらを用いたモデル化や、モデルによる計算値と実測値の比較等を通じたモデルの妥当性確認手法の整備を進める。本実施項目の技術開発工程を表2.3-8に示す。

表 2.3-8 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度
b. 水みちの微細透水構造等を反映した核種移行解析モデルの構築・高度化	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		
	原位置で取得されたデータを活用した地下水流動・物質移動モデルの構築				
		地下水流動・物質移行モデルの妥当性確認方法の検討			
			地下水流動・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に関する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仕様を可能な限り忠実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等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のモデル化技術の高度化等の成果を反映し、地質圏－生活圏インターフェイス（GBI：Geosphere-Biosphere Interface）の時間的変化をより忠実に取り扱うことが可能な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た。今後は、地質環境の長期変遷モデルや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・海水準変動等による地下水流動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。また、こうした解析計算をより効率的に行うため、並列計算等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。本実施項目の技術開発工程を表2.3-9に示す。

表 2.3-9 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	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	
				異なるスケールを結合させる手法の高度化	
				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

これまでは、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、農作業従事者等の決定グループを対象として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、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へ反映する。本実施項目の技術開発工程を表2.3-10に示す。

表 2.3-10 今後 5 年間の技術開発工程

実施項目	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			

2.3.4 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

地層処分システムの状態変遷や処分場設計の特徴をより忠実に反映可能な核種移行解析モデル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に係る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等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

これまでは、関係研究機関と連携し、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: Thermodynamic Data Base)、収着データベース(SDB: Sorption Data Base)、拡散データベース(DDB: Diffusion Data Base)に資する情報の拡充を図ってきた。今後も引き続き、データが十分に整備されていない比較的炭酸物質濃度が高い地下水が存在する場の条件等に重点を置き、緩衝材及び主要鉱物等への核種の収着分配係数や拡散係数の設定に係るデータ、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、例えば、Na型ベントナイトが変質して形成されるCa型ベントナイトへの核種の収着分配係数や拡散係数の設定に係るデータの取得を行う。本実施項目の技術開発工程を表2.3-11に示す。

表 2.3-11 今後5年間の技術開発工程

実施項目	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022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	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			収着モデルの構築と適用性の評価	
			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		
	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			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	

(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、主に関係研究機関により、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壌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等に関する研究が実施されてきた。今後は、関係研究機関と連携し、生活圏評価に必要な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地下水水質に対するアクチノドやその子孫核種に重点をおいてデータの拡充を図る。また、線量を支配する核種の一つ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、生活圏評価手法の高度化に応じて、必要となるデータについては適宜データ取得を進める。本実施項目の技術開発工程を表2.3-12に示す。

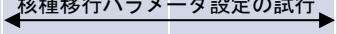
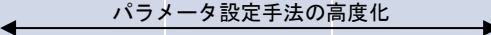
表 2.3-12 今後5年間の技術開発工程

実施項目	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	データ取得計画の策定				
	重要核種（U等）の土壌への収着分配係数等のデータの取得				
	ヨウ素の揮散率設定に係る文献調査				
				揮散率の設定	
				高精度質量分析法の標準化	
				沿岸域及び高炭酸地下水に特徴的なデータの拡充	

(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

これまで、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、拡散係数といった核種移行パラメータを設定する手法を構築した。今後は、関係研究機関と連携し、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）を設定する手法を構築する。本実施項目の技術開発工程を表2.3-13に示す。

表2.3-13 今後5年間の技術開発工程

実施項目	2018年度	2019年度	2020年度	2021年	2022年度
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	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 		実サイトデータを用いた核種移行パラメータ設定手法の高度化 		

3. 中長期的に研究開発を進めるうえでの重要事項

3.1 技術マネジメント

3.1.1 中長期的に研究開発を進めるための技術マネジメント

地層処分事業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の変化への適確な対応が求められる。また、様々な論拠を統合したセーフティケースを用いて、長期にわたる安全性を示すことが必要となる。このためには、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・統合し、多様なステークホルダーとの対話の促進も視野に入れ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。

研究開発は、地層処分に関するこうした技術マネジメントのもとに適切に行われることが必要である。技術マネジメントに関しては、全体計画においてその構造が示されており、また、技術マネジメントを支えるためには、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として、今後の取組みが整理されている。

本章では、技術マネジメントを支える体制及び仕組みの観点から NUMO が取り組む内容を記述する。

添付 2 『「地層処分事業の技術開発計画（2018 年度～2022 年度）」における各取組みの相互関係図』に示す通り、本章での取組みを通じて、包括的技術報告書の信頼性の確認や、関係機関との情報共有体制等を構築する。技術マネジメントに関する取組みを継続的に実施することが NUMO の組織運営のベースとなる。

3.1.2 技術マネジメントを支える体制に係る取組み

(1) 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て、具体的に検討を進めていく。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、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、連携を強化していく。

また、長期的視点に立って、若手技術者を継続的に確保していくための施策を講ずることが必要である。このため、若手技術者が将来にわたり活躍できるイメージや目標を持てるような材料を提供すること等により、科学・工学・社会学等の多岐にわたる分野を統合しながら、調査、建設、操業、閉鎖まで長期にわたるプロジェクトである地層処分に携わることの魅力を産業界や大学・研究機関等に対して効果的に発信し、認知度の向上を図る。今後は、NUMO を中心として、産業界と大学・研究機関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実施する。また、NUMO 及び関係研究機関は、2018 年度から合同で専門家育成のための研修を開始している。さらに、産業界や大学との連携を強化し、より実効的な研修の場として拡充する。

(2) NUMO 技術者の人材育成

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、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・交流を通し、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が、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より積極化し、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。また、関係研究機関のみならず関連する産業界と広く連携を模索し、様々な技術情報や動向等の情報交換を可能とするような場の構築を図っていく。

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、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研究現場へ派遣するとともに、IAEA 等の国際機関が主催するトレーニングコースへの参加等を通じて、人材育成を図ってきているが、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等、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。この際、地層処分に直接関連しない他産業でも部分的には地層処分と共通的で実践的な現場経験が得られると考えられることから、他産業での現場経験の機会も念頭において取り組んでいく。こうした現場経験を積むことが可能な、より実践的な研究基盤の長期にわたる活用や、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、事業の進展に合わせて適切に高度な専門性を発揮できるよう、若手技術者を継続的に育成していく。

3.2 技術マネジメントを支える仕組みに係る取組み

技術マネジメントを適切に進めるためには、技術に対する様々な要件、関連のある多岐にわたる科学技術的知識・情報・データと、それらの品質を体系的に管理することが必要である。

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・データを一元管理し、処分場の最適化に活用していくための仕組みの構築を図る。このため、NUMO は国際プロジェク

トへの参加や二国間協力の枠組みを利用し、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ている。さらに、原子力委員会が提案した連携プラットフォームの構築に積極的に協力している。

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、データ等の取得や取扱いの技量等を継続的に改善していく。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、継続的な改善を図る。また、NUMO や関係研究機関間のデータベースの連携等をさらに進める。加えて、今後の事業展開を見据え、テレワークを含めて、的確に業務を遂行できるよう、仕組み・体制の検討及び機構職員の技量の向上に取り組む。

2019 年度までの取組みにおいては、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等を検討する。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。

3.3 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、技術的成果や経験を相互に共有することや「2.本計画における技術開発の内容」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地層処分に係る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。

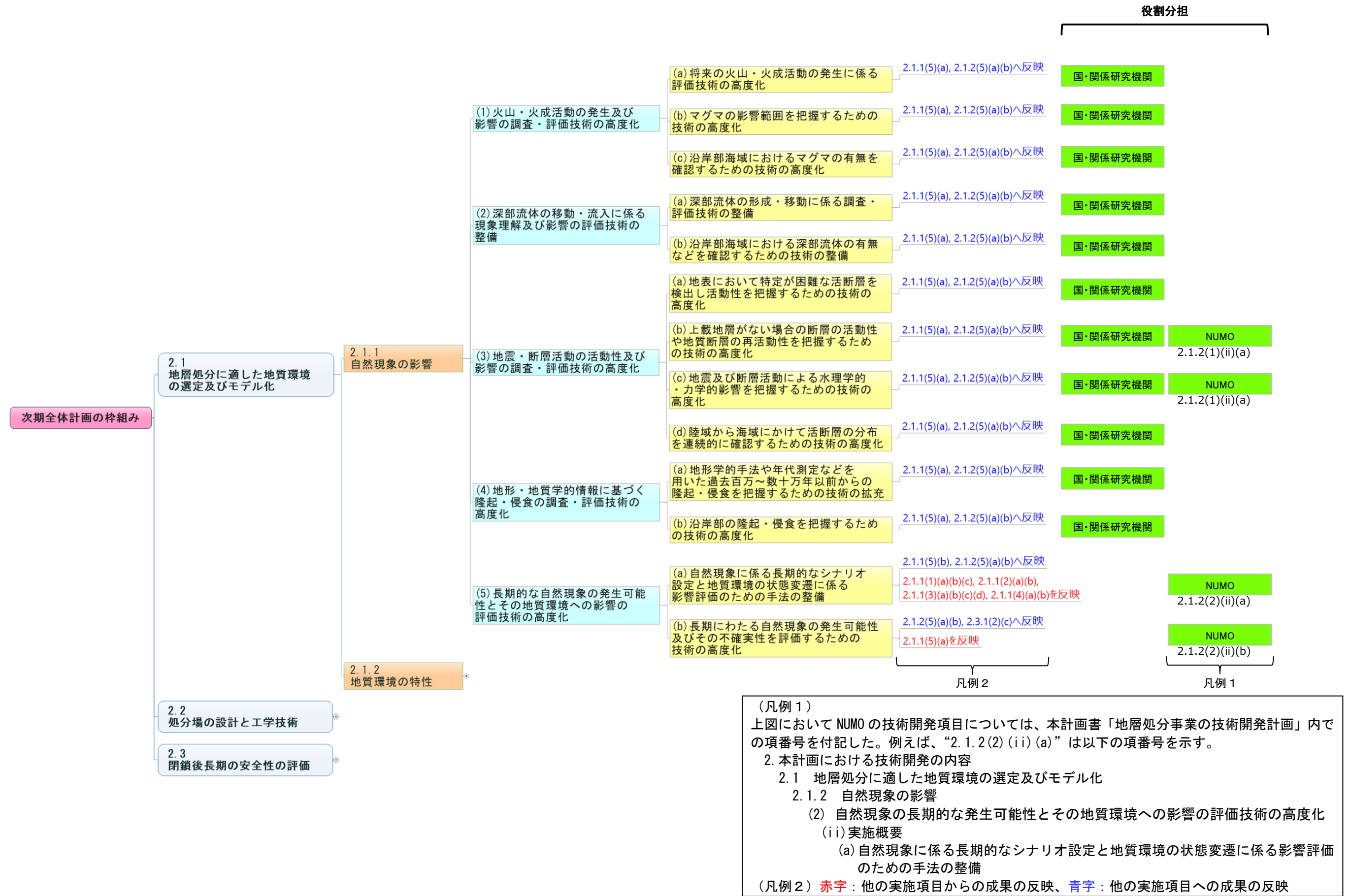
4. おわりに

地層処分に係る技術開発は、国及び関係機関とNUMOが、適切な役割分担のもと緊密に連携・協力を図りつつ、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、計画的に進めていくことが重要である。

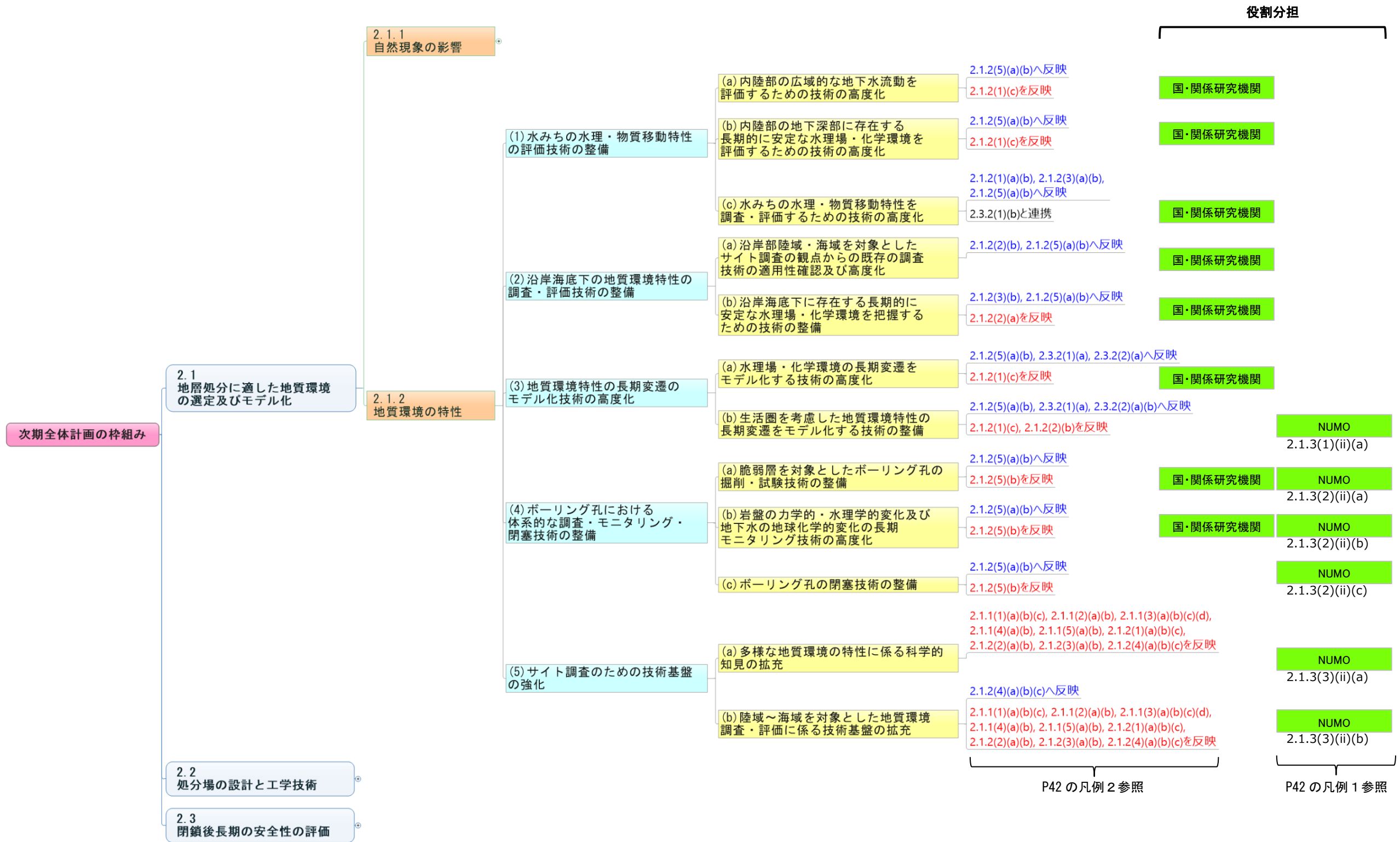
全体計画に基づき、本計画において、事業の安全な実施、経済性及び効率性の向上等の観点からNUMOが2018年度～2022年度の5ヶ年で実施する技術開発について、目的、実施概要、技術開発工程等を示すとともに、全体計画における研究項目との相互関係を示した。今後の技術開発課題は、地層処分にに関する諸外国や国際機関等での議論の進展に応じて将来的に変化する可能性がある。今後、NUMOは本計画に従って、これらの議論の進展や予見される規制制度、さらには将来技術に対する国民の関心となる様々な技術分野の進展等の事業環境の変化を考慮し、適宜見直しを図りながら、技術開発を計画的かつ着実に進めていく。

技術開発成果については、国内外に情報発信するとともに、地層処分事業に着実に反映していく。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みにおいて、こうした技術開発成果を常に念頭において取り組む。

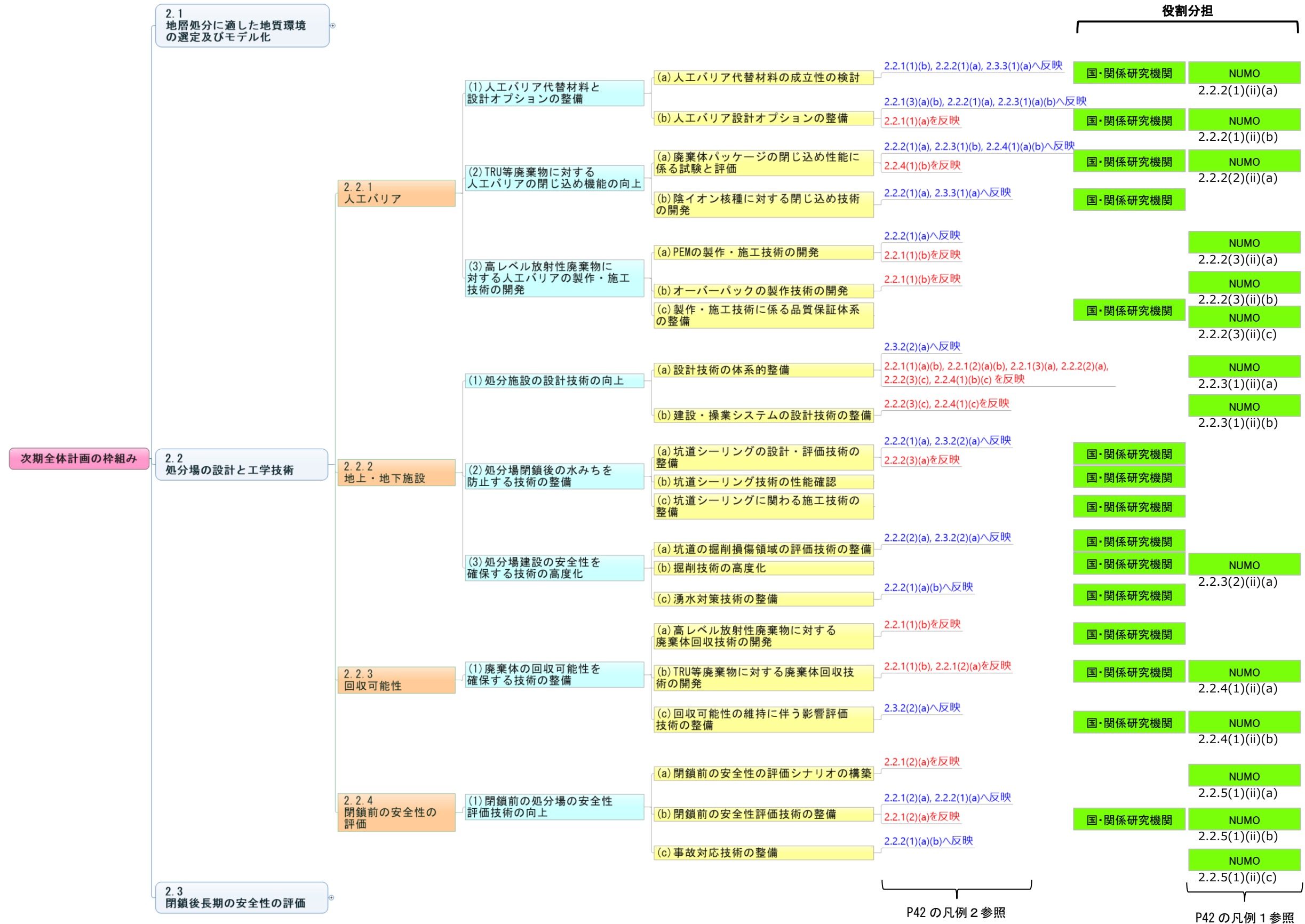
添付1 「地層処分研究開発に関する全体計画（平成30年度～令和4年度）」で示された枠組み（樹形図）における NUMO の技術開発項目（1 / 4）



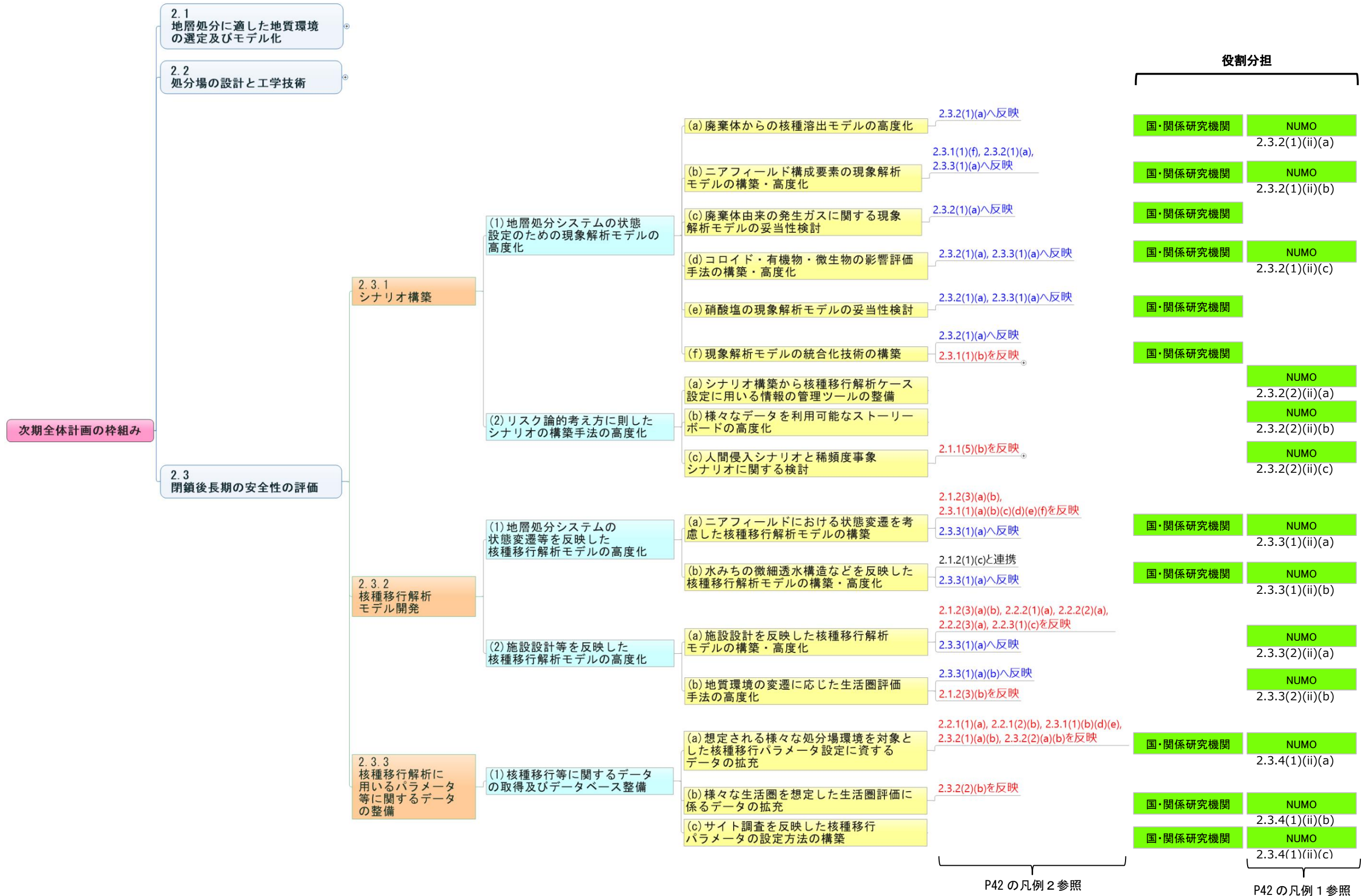
添付1 「地層処分研究開発に関する全体計画（平成30年度～令和4年度）」で示された枠組み（樹形図）における NUMO の技術開発項目（2 / 4）



添付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）」で示された枠組み（樹形図）における NUMO の技術開発項目（3 / 4）



添付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）」で示された枠組み（樹形図）における NUMO の技術開発項目（4 / 4）



添付2 「地層処分事業の技術開発計画（2018年度～2022年度）」における各取組みの相互関係図

