

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—



2013 年 6 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

—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

2013 年 6 月 初版発行

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

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

電話 03-6371-4004 (技術部) FAX 03-6371-4102

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Science and Technology Department

Nuclear Waste Management Organization of Japan

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

©原子力発電環境整備機構

(Nuclear Waste Management Organization of Japan) 2013

目 次

第1章 はじめに.....	1
1.1 背景	1
1.2 目的および構成.....	1
第2章 地層処分事業者としての技術開発の進め方	4
2.1 サイト選定段階の技術開発の目標	4
2.2 技術開発スケジュール	6
2.3 技術開発マネジメント	6
第3章 サイト選定段階の技術開発の概要.....	16
3.1 概要調査段階に向けた技術開発	16
3.2 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発.....	17
3.3 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発.....	19
3.4 事業推進にかかわる検討.....	20
3.5 NUMO の中期技術開発の方針	21
第4章 サイト選定段階に対する分野別の技術開発	22
4.1 検討方針	22
4.2 自然現象の影響にかかわる技術開発.....	25
4.3 地質環境特性の把握にかかわる技術開発.....	31
4.4 人工バリアの設計・施工にかかわる技術開発	38
4.5 地下施設の設計にかかわる技術開発.....	46
4.6 安全評価にかかわる技術開発	52
4.7 安全設計にかかわる技術開発	62
4.8 環境配慮にかかわる技術開発	66
4.9 廃棄体とインベントリにかかわる技術開発	69
4.10 モニタリングにかかわる技術開発.....	72
第5章 NUMO 中期技術開発計画	79
5.1 中期技術開発計画策定の基本方針	79
5.2 地質環境の調査・評価	81
5.3 工学的対策	88
5.4 閉鎖後長期の安全性評価.....	95
5.5 事業期間中の安全確保	101
5.6 廃棄体とインベントリ	105
5.7 モニタリング	108
5.8 事業推進にかかわる検討.....	110
第6章 おわりに.....	112

【参考文献】	113
用語集	用語集-1
付録 1 章 2010 年技術レポートのロードマップ	付録-1
付録 2 章 基盤研究開発などの概略状況	付録-3
2.1 基盤研究開発	付録-3
2.2 規制機関の動向	付録-6
2.3 廃棄物発生者の動向	付録-7

図目次

図 1-1 本計画の構成	2
図 2-1 サイト選定から建設に至る事業の進展	4
図 2-2 技術開発のマネジメント	7
図 2-3 NUMO と基盤研究開発機関における技術開発の相互補完的な分担	8
図 2-4 基盤研究開発機関と NUMO の連携による技術開発プロセスの概略	9
図 2-5 事業に必要な技術、開発の分担、保有の分担のイメージ	12
図 4-1 サイト選定各段階に向けた技術開発の明確化の手順	22

表目次

表 2-1 サイト選定の各段階における事業目標と実施事項	5
表 4-1 各調査段階における技術分野別の主要な技術的实施事項	23
表 4-2 実施事項の遂行に必要な主要技術	24
表 4-3 基盤研究開発と NUMO の技術開発の関係	25
表 4-4 各段階で必要な技術と技術開発の実施内容（自然現象の影響）	30
表 4-5 各段階で必要な技術と技術開発の実施内容（地質環境特性の把握）	37
表 4-6 各段階で必要な技術と技術開発の実施内容（人工バリアの設計・施工）	45
表 4-7 各段階で必要な技術と技術開発の実施内容（地下施設の設計）	51
表 4-8 各段階で必要な技術と技術開発の実施内容（安全評価）	61
表 4-9 各段階で必要な技術と技術開発の実施内容（安全設計）	65
表 4-10 各段階で必要な技術と技術開発の実施内容（環境配慮）	68
表 4-11 各段階で必要な技術と技術開発の実施内容（廃棄体とインベントリ）	71
表 4-12 各段階で必要な技術と技術開発の実施内容（モニタリング）	78
表 5-1 各調査段階に対する今後 5 年間の技術開発スケジュール	80
表 5-2 技術分野のカテゴリーの関係	81
表 5-3 今後 5 年間の実施項目と技術開発工程（地質環境の調査・評価）	87
表 5-4 今後 5 年間の実施項目と技術開発工程（工学的対策）	94

表 5-5	今後 5 年間の実施項目と技術開発工程（閉鎖後長期の安全性評価）	100
表 5-6	今後 5 年間の実施項目と技術開発工程（事業期間中の安全確保）	104
表 5-7	今後 5 年間の実施項目と技術開発工程（廃棄体とインベントリ）	107
表 5-8	今後 5 年間の実施項目と技術開発工程（モニタリング）	109
表 5-9	今後 5 年間の実施項目と技術開発工程（事業推進にかかわる検討）	111

付図目次

付図 1-1	安全確保ロードマップ（概要版）	付録-1
付図 1-2	技術開発ロードマップ（概要版）	付録-2
付図 2-1	国の基盤研究開発の段階と目標設定（高レベル放射性廃棄物）	付録-4
付図 2-2	国の基盤研究開発の段階と目標設定（TRU 廃棄物）	付録-4
付図 2-3	深地層の研究施設計画の段階的な進め方	付録-5

付表目次

付表 2-1	資源エネルギー庁調査等事業一覧	付録-6
--------	-----------------------	------

第1章 はじめに

1.1 背景

高レベル放射性廃棄物などの地層処分にかかわる技術開発は、これまで30年以上にわたって進められ、事業に必要な技術の基盤はすでに整備されている。現在は、技術開発の重点は事業化段階に移行しており、日本原子力研究開発機構（以下、JAEA という）を中心とした基盤研究開発機関は、主に地層処分技術の信頼性向上を目指した技術開発を、実施主体である原子力発電環境整備機構（以下、NUMO という）は、事業の安全な実施、経済性および効率性の向上などを目指した技術開発を進めている。

事業化段階にある技術開発を確実かつ効率的に進めるためには、NUMO が、技術の整備状況について国内外を問わず広く俯瞰的に把握し、自ら計画的に技術開発に取り組むとともに、基盤研究開発機関などに対して技術開発の目標や方向性、ニーズを示し、技術開発全体を主導することが不可欠である。

このため NUMO は、地層処分基盤研究開発調整会議¹（以下、調整会議という）に参画し、処分事業の計画や、概要調査段階の技術開発ニーズの提示を行い、それらは基盤研究の全体計画に反映されてきた。また、NUMO は、「地層処分事業の安全確保（2010 年度版）」（NUMO, 2011a）（以下、2010 年技術レポートという）で、100 年にわたる事業全体を俯瞰し、安全確保に向けた事業推進計画（安全確保ロードマップ）と、それを支える技術の開発計画（技術開発ロードマップ）を示した（付録1章参照）。

現在、NUMO は、概要調査段階に必要となる、サイトを特定しないジェネリックな技術開発（幅広い地質環境の条件に対して共通的に必要となる技術などの開発）を概ね終了し、次段階の精密調査段階〔前半〕の技術開発に重点を移行する時期に来ている。また、基盤研究開発機関は、NUMO の技術開発に先行して、精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発を実施中であり、精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発も含めた次期計画（2013～2017 年度）の策定を、調整会議において進めている。

NUMO は、この時期を技術開発の節目と捉え、更なる関係者間の連携強化による効率的な目標達成を図るため、20 年程度に及ぶサイト選定段階にターゲットを絞った技術開発計画を取りまとめることとした。

1.2 目的および構成

上記の背景を踏まえ、「地層処分事業の技術開発計画 ―概要調査および精密調査段階に向けた技術開発―」（以下、本計画という）は、

¹ 資源エネルギー庁は、地層処分に関する研究開発を計画的、かつ効率的に実施することを目的として、調整会議を 2005 年に設置した。この調整会議に参加している機関（日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中央研究所、産業技術総合研究所、放射線医学総合研究所）を基盤研究開発機関という。調整会議の主な機能は、①研究開発全体計画の策定、②研究開発の連携に関する調整および③成果の体系化に向けた調整である。NUMO は、2005 年の調整会議発足当初はオブザーバーとして参加し、2009 年から正式メンバーとなった。

「地層処分事業に向けた技術開発を確実にかつ効率的に推進するため、概要調査段階および精密調査段階に向けた技術開発のマネジメントに関する NUMO の考え方と、NUMO および基盤研究開発機関などの技術開発の方向性を示すこと」を目的に策定する。

本計画は、以下のような構成である（図 1-1）。

第2章では、事業者として技術開発に対して主導的な役割を果たすに当たり、20年程度に及ぶサイト選定段階における技術開発の目標やスケジュール、各機関との分担や連携など、技術開発マネジメントに関する考え方を示す。

第3章では、概要調査段階、精密調査段階〔前半〕および精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発の概要を示す。

第4章では、第3章で示した技術開発をより具体化し、NUMO と基盤研究開発機関などが分担して取り組む技術開発の実施内容を技術分野別に示す。

第5章では、第4章を踏まえ、NUMO が実施する今後5年間（2013年度～2017年度）の中期的な技術開発計画を示す。

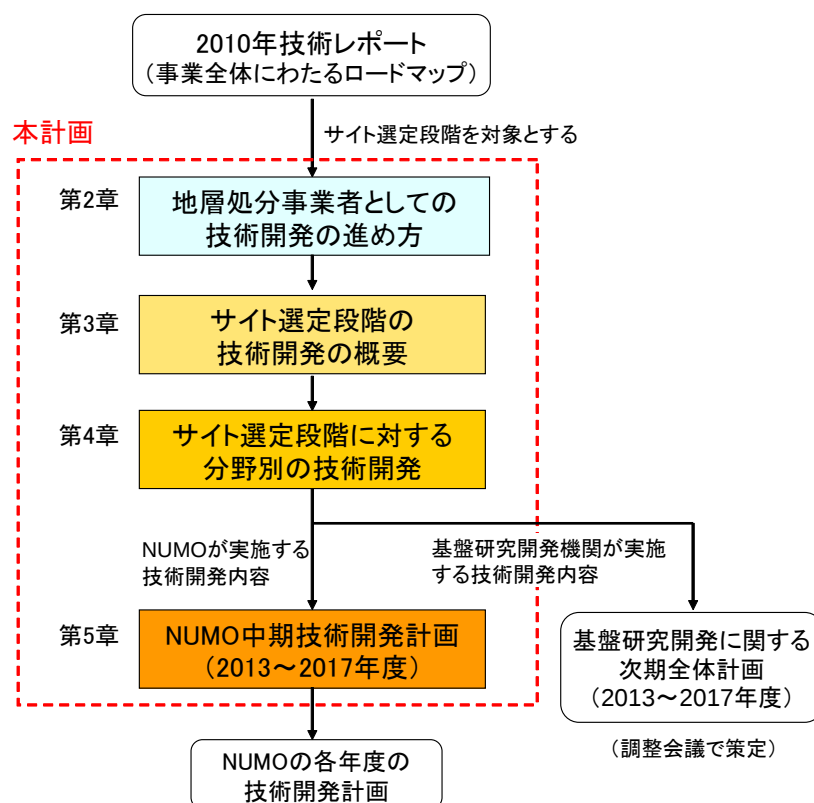


図 1-1 本計画の構成

第4章で示す基盤研究開発機関が実施する技術開発の内容は、調整会議が策定する基盤研究開発に関する次期計画に反映されるよう調整する。また、第5章で示す NUMO の中期技術開発計画は、NUMO が各年度単位で策定・実行する今後の技術開発計画に反映していく。

ここで、本計画で用いる「技術開発」という用語は、基盤研究開発機関が行う現象の理解、モデル開発、解析コードの開発、データベースの構築、工学的な要素技術の開発や、NUMO が行う技術の実用化、統合化、実証・試行、最適化、また基盤研究開発機関と NUMO の両者による知見の整備などをすべて包含するものと定義する。

なお、2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震や東京電力福島第一原子力発電所事故を契機として、原子力発電や核燃料サイクルなど原子力政策に関する議論が現在進められているところである（2013年6月現在）。このため、今後の地層処分を含む原子力政策の動向を注視し、技術開発をとりまく状況の変化に柔軟に対応できるよう、必要に応じて本計画を見直すこととする。

第2章 地層処分事業者としての技術開発の進め方

2.1 サイト選定段階の技術開発の目標

サイト選定の最終目標は、火山・火成活動、地震・断層活動などの自然現象の著しい影響を回避した上で、地質環境特性を踏まえた適切な工学的対策を施すことによって、事業期間中と閉鎖後長期の安全性が確実に確保できるサイトを処分施設建設地として選定することである。

わが国の地層処分事業では、この最終的な目標に向けて、三段階でサイト選定を進めることになっている。その三段階とは、①文献調査に基づき概要調査地区を選定する段階（文献調査段階）、②概要調査に基づき精密調査地区を選定する段階（概要調査段階）、③精密調査に基づき処分施設建設地を選定する段階（精密調査段階）である。また、精密調査段階は、範囲を限定して地上から詳細な調査を行う精密調査段階〔前半〕と、地下調査施設での調査を行う精密調査段階〔後半〕に細分している。

処分施設建設地選定後、NUMO は事業許可を申請し、原子力規制委員会により処分施設建設地において地層処分の安全性が確保されることの審査（安全審査）を受け、許可後、処分施設の建設へと事業は進展することになる（図 2-1）。

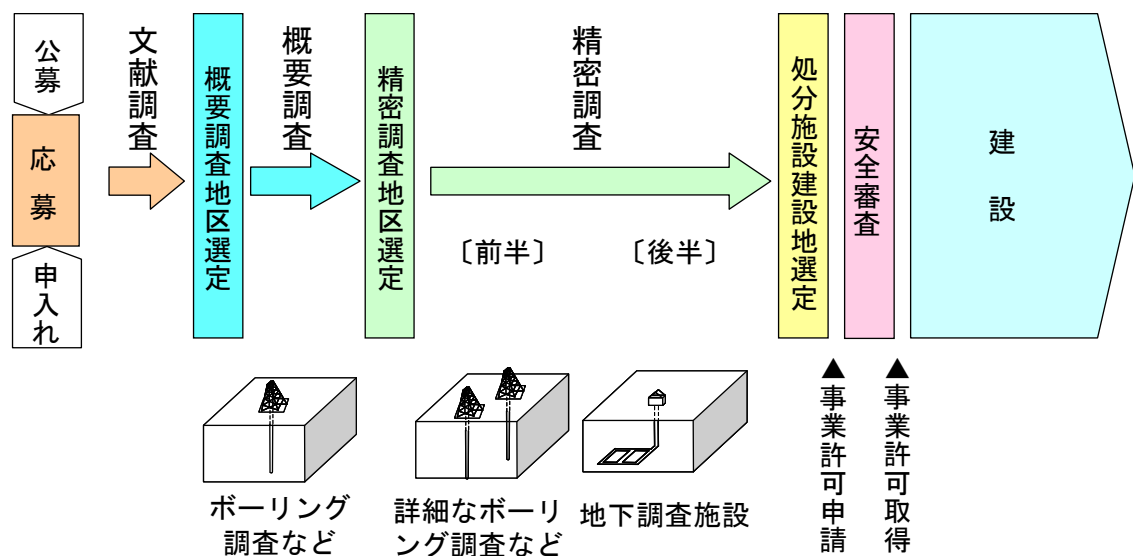


図 2-1 サイト選定から建設に至る事業の進展

文献調査段階、概要調査段階、精密調査段階〔前半〕、精密調査段階〔後半〕のそれぞれの事業目標と、事業目標を達成するために実施する事項を概略的にまとめたものを表 2-1 に示す。サイト選定段階の技術開発の目標は、表 2-1 に示す各段階の実施事項の遂行に必要な技術を、その時期までに確実に整備することである。

表 2-1 サイト選定の各段階における事業目標と実施事項

段階		文献調査段階	概要調査段階	精密調査段階〔前半〕	精密調査段階〔後半〕
各段階での目標	事業目標	概要調査地区選定	精密調査地区選定	基本レイアウトの決定	処分施設建設地選定
	安全確保にかかわる目標	自然現象の著しい影響の回避（明らかに不適格な地域を避ける）	・自然現象の著しい影響の回避 ・閉鎖後長期および事業期間中の安全性確保の見通し	・自然現象の著しい影響の回避を確認 ・閉鎖後長期および事業期間中の安全性の確保	・自然現象の著しい影響の回避を確認 ・閉鎖後長期および事業期間中の安全性の確実な確保
目標に向けた実施事項	地質環境の調査・評価	文献の収集	地上からの調査	地上からの詳細な調査	地下調査施設での調査
		自然現象の明らかな不適格範囲の除外	自然現象の著しい影響の回避	自然現象の著しい影響の回避（確認）	自然現象の著しい影響の回避（確認）
		概略的な地質環境モデルの構築（広域）	地質環境モデル詳細化（概要調査地区スケール）	地質環境モデル詳細化（精密調査地区スケール）	地質環境モデル詳細化（処分場スケール）
	工学的対策	人工バリア仕様の例示	人工バリア仕様の設定	人工バリア仕様の決定	実証試験による人工バリア仕様の確定
		処分施設概念の例示	処分施設概念設計	処分施設の基本レイアウトの決定	処分施設の基本設計
	閉鎖後長期の安全性評価	概略的な安全性の評価	予備的な安全性の評価	基本レイアウトに基づく安全性の評価	基本設計に基づく安全性の評価
	事業期間中の安全確保	建設・操業の概略的な安全性の評価	建設・操業の安全性の見通し	建設・操業の安全性の確認	建設・操業の安全設計

（注） :それぞれの調査段階において相対的に重要な実施事項

文献調査段階では、既存の文献その他の資料を収集し、それらから得られる情報に基づいて、自然現象による著しい影響があると判断される、明らかに不適格な範囲を除外し、概要調査地区を選定する。また、文献情報に基づき、「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―」（核燃料サイクル開発機構，1999）（以下、第2次取りまとめという）を参照しながら、処分施設概念の例示や概略的な安全性の評価を行う。これらの実施事項に対する技術的な準備は、すでに整っている。

概要調査段階では、地上からの調査の結果に基づき、自然現象の著しい影響が回避でき、事業期間中および閉鎖後長期の安全性が確保できる見通しが得られるサイトを精密調査地区として選定する。従って、この段階に向けた技術開発の主な目標は、精密調査地区の選定に当たり判断材料を提供するための、自然現象による影響を評価する技術や予備的な安全性を評価する技術の整備、およびこれらの評価に必要なレベルでの地上からの調査技術、人工バリアや処分施設の設計技術などの整備である。

精密調査段階〔前半〕では、地上からのより詳細な調査の結果に基づき、処分施設の基本レイアウトを決定する。また、次段階の地下調査施設における建設・操業技術の実証に備え、人工バリア仕様の決定も行う。従って、この段階に向けた技術開発の主な目標は、人工バリアや処分施設の設計技術、およびこれらの設計に必要なレベルでの調査や安全性評価技術の整備である。

精密調査段階〔後半〕では、地下調査施設での調査や実証試験の結果に基づき、事業期

間中および閉鎖後長期の安全性が確実に確保できることを確認した上で、処分施設建設地を選定し、その後、事業許可申請を行うことになる。従って、この段階に向けた技術開発の主な目標は、事業許可申請に求められる、事業期間中および閉鎖後長期の安全性を評価する技術の整備、および安全性の評価に必要な情報を提供する調査技術や、設計の妥当性を示すための実証試験技術の整備などである。

2.2 技術開発スケジュール

上記のとおり、文献調査段階は現状の技術で実施可能であるので、本計画ではそれ以後の段階を対象に技術開発スケジュールを設定する。

現状、NUMO は文献調査の着手に至っていないが、至近に文献調査が開始され、順調に概要調査、精密調査へと進捗したとしても、事業に必要な技術が遅滞なく準備できるよう、次のようなスケジュールを設定して、ジェネリックな技術開発²を進めることとする。

- ・ 概要調査段階に向けた技術開発：2013 年度頃に終了
- ・ 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発：2017 年度頃に終了
- ・ 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発：2021 年度頃に終了

サイト・スペシフィックな技術開発³については、文献調査が開始され、サイト条件が特定された後に実施する。

2.3 技術開発マネジメント

2.3.1 技術開発マネジメントの方針

地層処分事業は、事業期間が長期にわたることに加え、その実施に当たっては、原子力・地質・土木・物理・化学など複数の学問領域を横断する学際的かつ専門的な知見が必要となり、社会的にも高い受容性が求められるという特徴がある。このため、地層処分の技術開発は、多くの関係機関との連携が不可欠であり、技術開発期間も長期に及ぶ。また、類似施設を含めて建設する機会も極めて少ないことから、技術開発成果の保有・移転・継承や人材育成などについては、特段の配慮が必要となる。

地層処分の実施主体である NUMO は、このような地層処分の技術開発の特徴を踏まえ、事業に必要な技術を確実に効率的に整備するため、以下の方針に沿って技術開発をマネジメントする（図 2-2 参照）。

① 関係機関との適切な分担と緊密な連携

- NUMO は、事業を進める上で必要な技術・知見とそれらが必要となる時期を、技術開発ニーズとして定期的に取りまとめて提示する。

² ジェネリックな技術開発：地域を特定せず、幅広い地質環境の条件などに対して共通的に必要となる技術開発

³ サイト・スペシフィックな技術開発：特定の地域における地質環境の条件などに応じて必要となる技術開発

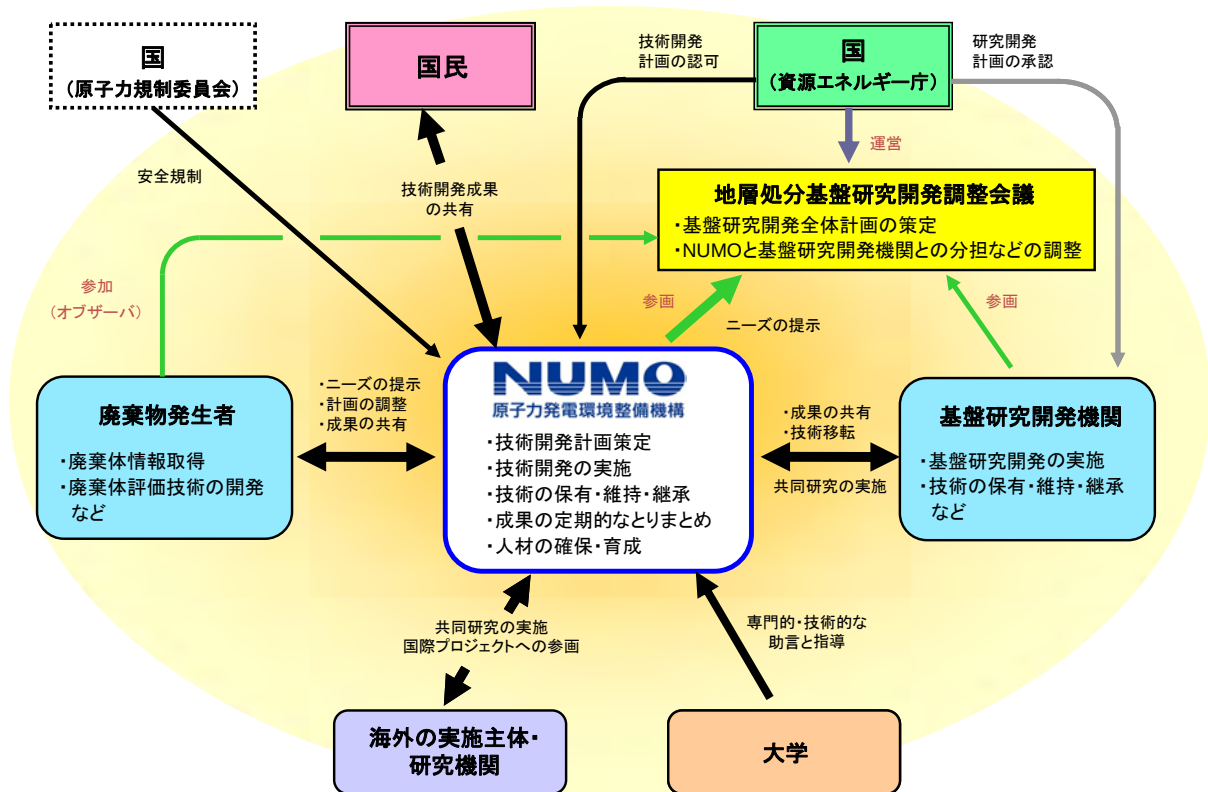


図 2-2 技術開発のマネジメント

- 基盤研究開発機関や廃棄物発生者⁴（以下、両者を合わせて基盤研究開発機関などという）との調整会議などを通じた適切な分担と緊密な連携のもと、効率的に技術開発を行う。
- 技術開発に当たっては、国内の深地層の研究施設で得られる研究成果や、海外の地下研究所および国際共同研究の場を有効に活用する。また、大学の協力も得ながら進める。

② 技術開発成果の確実な保有と移転

- 技術開発に当たっては、技術開発プロセスや成果物の品質確保を図り、技術や知見が確実に維持・継承されるよう、適切な形態に取りまとめる。また、技術開発成果は、定期的に取りまとめ公表する。
- 開発された技術や整備された知見は、事業での適用を考慮し、合理性・効率性の観点から、NUMO と基盤研究開発機関などで分担して保有する。また、必要な際に活用できるよう、各保有機関において維持・継承するとともに、NUMO はその情報を

⁴ 高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）は、電力会社などが海外（イギリス・フランス）に再処理を委託し返還されるもの、JAEA の再処理施設および今後日本原燃の再処理工場で発生するものがある。また、地層処分の対象となる低レベル放射性廃棄物は、電力会社の海外委託や JAEA の再処理過程で発生するもの、および今後日本原燃の再処理工場、MOX 燃料工場の操業・解体時に発生するものがある。これら地層処分対象となる放射性廃棄物の発生者である電力会社、日本原燃、JAEA を、ここでは総称して廃棄物発生者と呼ぶ。

把握する。

- 基盤研究開発機関が開発・整備した技術・知見で、NUMO が保有すべきものは適切な形態・方法で NUMO に移転を図る。

③ 人材の計画的な確保・育成

- NUMO は、基盤研究開発機関などと協力して、人材の確保・育成に努める。

④ 技術開発成果の国民との共有

- 様々な機会を設け、技術開発成果を国民にわかりやすい形で公表し、共有していく。

以下、上記の方針のより具体的な内容について記載する。

2.3.2 技術開発の分担と連携

(1) 技術開発の分担

NUMO と基盤研究開発機関との分担について、原子力政策大綱（原子力委員会、2005）では、「NUMO は、処分事業の安全な実施，経済性および効率性の向上などを目的とする技術開発を実施する」，「基盤研究開発機関は，深地層の研究施設などを活用して，深地層の科学的研究，地層処分技術の信頼性向上や安全評価手法の高度化などに向けた基盤的な研究開発を進める」とされている。調整会議では，この考え方を踏まえ，図 2-3 のような分担の考え方を示している（資源エネルギー庁・JAEA，2006）。

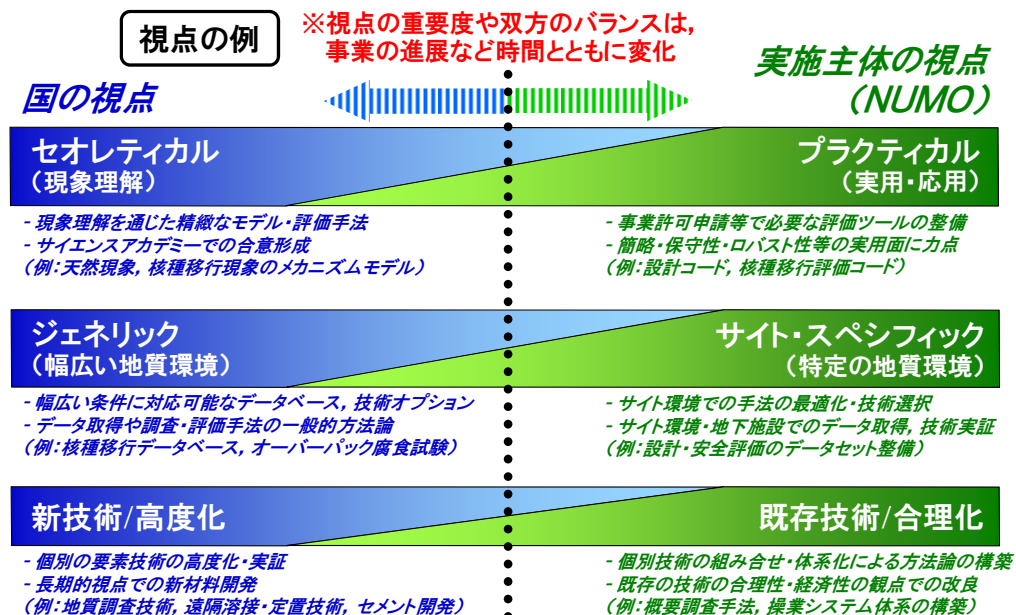
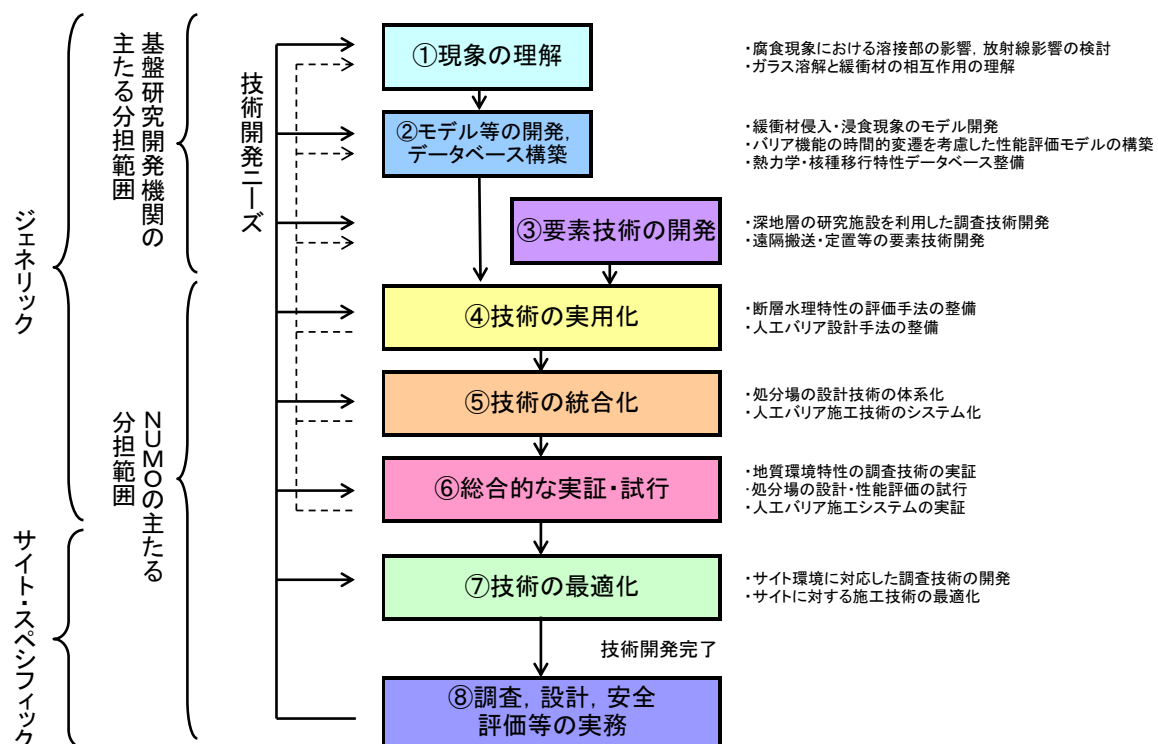


図 2-3 NUMO と基盤研究開発機関における技術開発の相互補完的な分担
(資源エネルギー庁・JAEA，2006)

この分担の考え方を、技術開発の進展の観点で整理し直したものを図 2-4 に示す。

現在、基盤研究開発機関が実施している技術開発は、ジェネリックな技術開発に位置付けられる。基盤研究開発は、①腐食現象やガラス溶解と緩衝材の相互作用などに関する「現象の理解」、②現象理解を踏まえた「モデル・解析コードの開発、データベースの構築」、③地質環境の調査技術や遠隔搬送・定置技術などの「要素技術の開発」に大まかに区分できる。

一方、当面、NUMO が実施する技術開発も、幅広い地質環境条件に対して共通的に適用可能なジェネリックな技術開発と位置付けられる。NUMO による技術開発は、地層処分事業への適用を念頭に、④合理化・効率化などの観点での、基盤研究により開発された「技術の実用化」、⑤実務への適用の観点での実用化された「技術の統合化」、⑥統合化した技術の「総合的な実証・試行」による実務への適用性の確認といったステップを踏んで開発することになる。



※本図は、技術開発の基本的なプロセスを示したものである。実際には、プロセス間でのフィードバックや、各プロセスのスキップや統合があり得る。

図 2-4 基盤研究開発機関と NUMO の連携による技術開発プロセスの概略

このように、ジェネリックな技術開発の段階においては、基盤研究開発機関と NUMO との技術開発を相互補完的に進めている。サイト条件が特定された後のサイト・スペシフィック

イックな技術開発については、⑦サイト固有の条件を踏まえた「技術の最適化」の観点から実施する。この技術開発は、必要に応じて基盤研究開発機関の協力を得ながら進める。

なお、図 2-4 は、基盤研究開発機関と NUMO の役割分担に応じた技術開発の基本的なプロセスを示したものである。実際には、プロセス間でのフィードバックや、各プロセスのスキップや統合があり得る。例えば、技術の実用化の段階で新たな技術課題が見出され、現象の理解に立ち戻って基盤研究開発を再スタートするといったことも考えられる。NUMO は、開発がいったん終了した技術であっても、技術の進展を踏まえて適用性や信頼性を適宜確認し、柔軟性をもって技術開発をマネジメントする。

(2) 基盤研究開発機関との連携

基盤研究開発機関などと分担して実施する技術開発を効果的・効率的に進めるためには、図 2-4 に示すように、⑧「調査、設計、安全評価などの実務」に必要な技術開発ニーズを取りまとめ、基盤研究開発機関などに提示することが不可欠であり、本計画はその一つとなる。

NUMO が示す技術開発ニーズを踏まえた基盤研究の計画段階では、NUMO と基盤研究開発機関などとの分担やスケジュール、優先順位付けなどについての調整が必要である。また、両者の技術開発が相互補完関係にあり重複・抜け落ちがないことの確認も必要である。これらの調整は、基本的に調整会議で行う。

基盤研究の実施段階では、技術開発ニーズの的確な反映や成果の理解・評価などの観点で基盤研究開発機関との連携が重要となる。これについては、基本的に個別課題ごとに両者間で行うこととする。新たな知見や技術開発の進捗などにより、早期に取り組むべき新たな技術開発ニーズが生じた場合には、基本的に調整会議で調整する。

なお、効率的な技術開発・技術移転などの観点で、より緊密な連携が必要と判断される場合には、NUMO と基盤研究開発機関などとの共同研究を実施する。

(3) 国際共同研究

効率的な技術開発の観点では、国際共同研究が有効な場合も考えられる。NUMO および基盤研究開発機関は、技術開発課題の特性を踏まえ、必要に応じて海外の実施主体や研究機関との共同研究の実施や、国際プロジェクトなどへ参画を図っていく。

(4) 大学での研究

基盤研究として実施する現象の理解、解析コードの開発やデータベースの構築などにおいては、大学が保有するノウハウ、施設・設備なども考慮の上、その協力を得る。

NUMO においても、必要に応じて、専門的・技術的な助言と技術指導を含めた大学の協力を得て技術開発を進める。

(5) 地下研究所の活用

(a) 国内の深地層の研究施設で得られた成果の活用

わが国には深地層の研究施設として、JAEA が建設・運用している瑞浪超深地層研究所と幌延深地層研究所がある（以下、これらを併せて深地層の研究施設という）。これらは日本に広く存在する地質環境として、それぞれ結晶質岩と堆積岩を対象として建設されており、深部地質環境への理解を深め、調査・解析・評価を行うための基盤技術の整備に貢献している。今後も主に精密調査段階〔後半〕に必要となる技術の開発の場などとしての活用を期待する。

(b) 海外の地下研究所の活用

NUMO は、精密調査段階〔後半〕で地下調査施設を建設し、地下での調査・試験を実施していく計画であり、そのための技術やノウハウの蓄積が必要である。諸外国にはすでに多くの地下研究所があり、また地層処分を対象とした研究開発が幅広く実施されている。NUMO は、諸外国で得られている知見を有効に活用するとともに、現状の国内における深地層の研究施設の活用に対する社会的制約条件などを考慮し、海外の地下研究プロジェクトへの参画や、海外の地下研究所を活用した技術の実証などを必要に応じて行っていく。

2.3.3 技術開発成果の取りまとめ

(1) 個別課題に対する技術開発成果

(a) 成果の形式知化

NUMO および基盤研究開発機関などで開発された技術や整備された知見などの成果は、次の 2.3.4 で述べる技術・知見の保有と移転が適切に行えるよう、品質の確保を図った上で、文書化あるいはデータベース化する。その際、技術者が有する経験・知見などの暗黙知も極力形式知化する。

なお、暗黙知を形式知化する際には、様々なレベルの意思決定とその根拠を含め、技術開発のすべての過程を文書化、データベース化するよう努める。

(b) 品質の確保

NUMO および基盤研究開発機関などで開発・整備される技術・知見については、第三者による評価などにより、技術開発の品質や信頼性を確保する。

NUMO は、以下のような方法により技術開発のプロセス・成果の品質確保を図る。

- ・ 技術開発は、品質マネジメントシステム（QMS）による自己評価と管理、継続的な改善の下で実施する。
- ・ 技術開発成果は、学識経験者から構成される NUMO 内の会議体で評価・提言を受ける。

基盤研究開発機関などにおいても、上記と類似の方法により、品質の確保を図るなどし

て成果を取りまとめる。

(2) 技術開発成果の定期的な取りまとめ

NUMO は、地層処分全般に対する信頼性の向上、技術の品質確保、技術の維持・継承、人材育成のため、定期的に技術開発成果を取りまとめ、公表していく。これらの活動は、国民との成果の共有（2.3.6 に記述）にも活用する。

- ・ 毎年、年次計画書および報告書（「技術年報」）を発行するとともに、年次報告会などを開催する。
- ・ 基盤研究開発機関などの技術開発成果も取り込んだ包括的な技術開発成果報告書を、定期的（3～5 年ごと）あるいは事業や技術開発の節目ごとに作成し公表する。その際、あわせて技術開発成果報告会も開催する。

2.3.4 技術・知見の保有と移転

(1) 技術・知見の保有

開発された技術や整備された知見は、事業に確実かつ有効に活用できるよう、適切な機関で保有される必要がある。

図 2-5 で示すように、NUMO 自らが開発する技術と、基盤研究を引き継いで NUMO が開発する技術は、NUMO が保有する。基盤研究開発機関などが開発する技術は、NUMO と基盤研究開発機関などが分担の上、保有する。地層処分事業に必要で、企業などで開発された既存技術については、事業に活用する際の効率性や経済性などを勘案した上で、NUMO と開発した企業などが分担して保有する。

以下に、技術・知見の保有に当たって留意すべき事項などを示す。

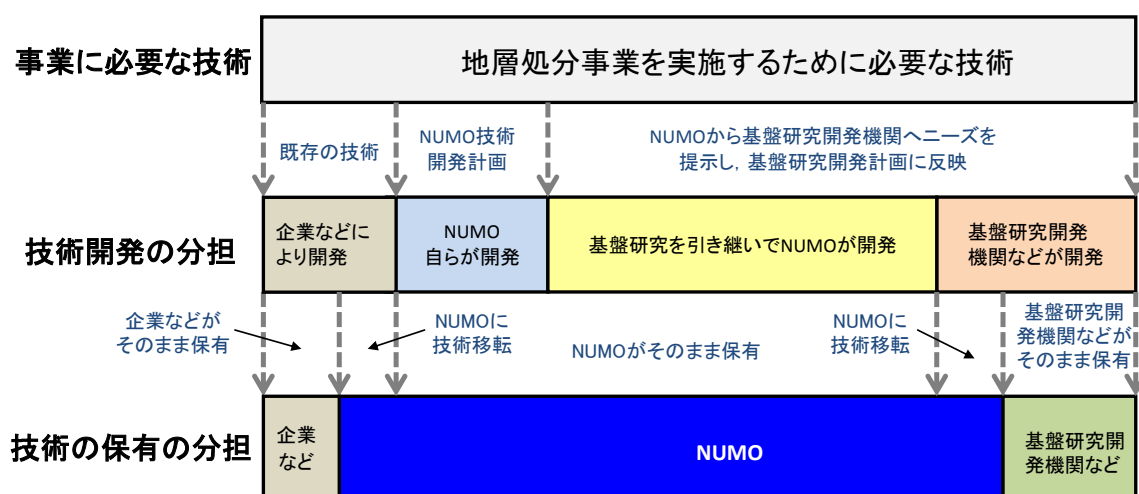


図 2-5 事業に必要な技術、開発の分担、保有の分担のイメージ

(a) NUMO が保有する技術・知見

基盤研究開発機関などで開発が完了・完結し、基盤研究開発機関などでの更なる改良・高度化が不要な技術については、基盤研究開発機関などから技術移転の上、NUMO 自らが開発した技術・知見とあわせ、以下の考え方にに基づき NUMO が保有する。

- ・ 基盤研究開発機関などから移転されたものも含め、報告書などの文書形態のものは、容易に検索・参照できるよう管理する。
- ・ 技術の実証などを通して取得した事業管理にかかわるノウハウ（計画立案，設計・施工・工程・品質の管理，コスト評価など）は，マニュアル化など，形式知化した上で要件管理システム（RMS：Requirements Management System）などの事業管理システムなどに蓄積する。
- ・ 基盤研究開発機関などから移転されたものも含め，解析・評価コードや事業管理システムは，試運用などによる技術の維持・継承を図るとともに，技術の進展や利便性などを考慮し，必要に応じてコードやシステムの改良を図る。

(b) NUMO 以外が保有する技術・知見

基盤研究開発機関などで継続的に技術開発が進められるものや，NUMO が調査などの実務として外部委託を介して使用する技術についても，上記(a)と同様の考え方に従って，開発した機関などが保有することが望まれる。

これに該当する技術・知見の例は，以下のとおりである。

- ① 基盤研究開発機関が保有することが望ましい技術・知見
 - ・ データベース化された研究成果
 - ・ 閉鎖後長期の安全評価にかかわるジェネリックなデータベース など
- ② 廃棄物発生者が保有することが望ましい技術・知見
 - ・ 廃棄体製作技術
 - ・ 廃棄体情報取得・評価技術
 - ・ 廃棄体情報に関するデータベース
- ③ その他企業などが保有することが望ましい技術・知見
 - ・ 地質調査技術・解析技術
 - ・ 遠隔溶接技術
 - ・ 詳細な解析コード など

なお，開発後時間が経過すると，各機関がこれらの技術を保有できなくなるケースも想定される。その場合の対応は，別途，NUMO で検討する。また，NUMO は，事業に必要な技術・知見の保有の状況を一元的に把握・管理する。このため，基盤研究開発機関などとの定期的な情報交換や，国内外の関係機関や関係者とのネットワーク構築を進めていく。

(2) 技術・知見の移転

2.3.3 で述べたように、通常、報告書などに文書化されない技術者の経験・知見といった暗黙知が存在する。NUMO は、事業に必要な暗黙知も集約に努める。このため、トラブルの対処なども含めた経験・知見、様々なレベルでの意思決定とその根拠など、技術開発のすべての過程を極力、文書・データベースといった形式知に変換し、技術移転を図ることが重要である。

そのためには、将来の技術移転を念頭に、日常的に技術・知見を文書化して技術情報データベースに登録しておくことが有効であり、JAEA の知識マネジメントシステム (KMS : Knowledge Management System) などを活用する。

また、データ取得技術、解析コード、データベースなどについては、品質・信頼性の確保の観点から、極力、査読付論文などとしての公表、学会標準などのスタンダード化を図った上で移転することが望まれる。

なお、形式知に変換しきれない技術者の経験・知見については、以下のような方法で NUMO に移転を図る。

- ・ 基盤研究開発機関などとの共同研究を通じた移転
- ・ 人事交流（基盤研究開発機関への派遣、NUMO への転籍など）を通じた移転
- ・ JAEA の保有施設（地層処分基盤研究施設 (ENTRY)、地層処分放射化学研究施設 (QUALITY)) を NUMO 職員が利用することを通じた技術移転

2.3.5 人材の確保・育成

地層処分事業を円滑に進めるためには、NUMO のみならず、基盤研究開発機関や調査・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間を見通して確保・育成する必要がある。

確保すべき分野やその人数については、関係機関の協力を得ながら、今後検討していく。また、人材の育成についても、現在、日本原子力学会で実施中のバックエンド週末基礎講座や、基盤研究開発機関などが開催する講習会などの活用も含め、関係機関と検討していく。

NUMO の事業遂行上必要となる人材については、計画的な採用・育成、国内外の関係機関との連携などにより確保・育成する。具体的な方策としては、以下のとおりである。

- ・ 事業スケジュールや業務内容を見通し、計画的に大学などからの新卒者や地層処分関連業務の経験者を採用する。また、基盤研究開発機関などで開発・整備した技術・知見、深地層の研究施設における経験・知見の移転の一環として、基盤研究開発機関などからの長期出向や転籍を図る。
- ・ 国内外の放射性廃棄物処分の実施主体、研究開発機関への長期派遣や共同研究プロジェクトなどへの参画を通じて実践的な技術能力を向上させる。
- ・ NUMO が保有する技術・知見が常に利用できるよう、また、移転された暗黙知が個人

に帰属しないよう、技術の試行などにより技術力の維持・向上・継承を図る。

- ・ NUMO の技術者は、特定の分野の深い専門知識のみならず、事業者として分野を横断した幅広い知見とプロジェクト管理能力を有することが必要であり、そうした人材が育成できるプログラムを検討・導入していく。
- ・ 地層処分事業は、類似施設を建設する機会が極めて少なく、技術開発期間が長期にわたることを踏まえ、KMS や RMS などのデータベースを世代間の技術継承に用いるだけでなく、人材育成にも活用する。

2.3.6 技術開発成果の国民との共有

地層処分事業を進めていくためには、国民の理解は不可欠であり、地層処分にかかわる技術開発成果を国民と共有していくことが重要である。

そのための方策として、2.3.3 で述べた内容に加え、以下の活動も実施する。

- ・ NUMO が定期的（3～5 年ごと）あるいは事業や技術開発の節目ごとに作成する包括的な技術開発成果報告書の内容を、国民にわかりやすい形態に編集した上で公表する。その際、あわせて国民を対象とした報告会も開催する。
- ・ NUMO は、基盤研究開発機関などの協力も得ながら、地層処分にかかわるトピックスを対象として、講演会やシンポジウムを随時開催する。
- ・ NUMO から一方的に成果を公表するのみならず、地層処分事業の安全・安心に対して国民が求めていることを把握するなど、双方向の情報発信に努めていく。

第3章 サイト選定段階の技術開発の概要

本章では、概要調査段階、精密調査段階〔前半〕および精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発の概要を示す。分野別の技術開発の詳細については、第4章以降で述べる。なお、サイトが特定されていない現状では、本章以降、特に断らない限り、ジェネリックな技術開発の内容について述べる。

3.1 概要調査段階に向けた技術開発

NUMO は、基盤研究で開発された技術や既存技術を体系化するとともに、ボーリング調査などの重要な技術については実証を行う。これらの技術を用いて自然現象の著しい影響などを回避して精密調査地区を選定する。

3.1.1 地質環境の調査・評価技術

概要調査段階では、物理探査、ボーリング調査などの地上からの調査で取得する情報に基づき、火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食などの自然現象による地層の著しい変動の有無を確認する。さらに必要に応じて、これらの自然現象の影響にかかわる調査・評価を行う。これらに必要な技術には、防災あるいは地層処分に関する基盤研究の技術や知見を適用することができる。

また、同様に地上からの地質環境特性にかかわる調査により、概要調査地区のスケールの地下水の流動特性・化学特性、岩盤の力学特性・熱特性などを把握し、地質・地質構造などの地質環境モデルを構築する。地質環境モデルは、次に述べる工学的対策や閉鎖後長期の安全性評価に活用する。これらの地質環境特性の調査技術や地質環境モデル構築技術についても、資源開発や土木分野における実用技術、あるいは基盤研究の技術や知見を適用することができる。

以上のように、地質環境の調査・評価技術にかかわる個別技術は概ね整備されている。これを踏まえて、NUMO は、概要調査の効率化に向け、調査・評価技術の体系化を行い、特に重要なボーリング調査などの技術については実証を行う。

3.1.2 工学的対策技術

概要調査段階では、地質環境の調査・評価から得られた地質環境特性や地質環境モデルに基づき、長期的な性能変化を踏まえた人工バリア基本仕様の設定と、坑道断面・廃棄体定置間隔・坑道離間距離・施設配置の設計を行う。さらに、後述の予備的安全評価の結果をフィードバックしながら候補母岩の選定、基本レイアウトの設定を行う。これらに必要な技術のうち、基盤研究において、人工バリアの各要素および相互作用による長期挙動に関するデータ取得やモデル化技術の開発が進められている。地下施設の設計にかかわる技術は、基本的に既存技術が適用可能と考えられる。

また本段階では、人工バリアの基本仕様を実現することが可能な製作・定置技術を絞り

込む。基盤研究によって、第2次取りまとめで示されたレファレンスの人工バリアに対する製作・定置の要素技術は概ね整備されている。

以上のように、工学的対策にかかわる要素技術は概ね整備されている。これを踏まえて、NUMOは、人工バリアや施設の概念設計の具体的手順と方法を手引書として体系化する。人工バリアの製作・定置技術については、実現性・信頼性・効率性の観点からの技術の絞り込みのための評価体系を整備する。

3.1.3 閉鎖後長期の安全性評価技術

概要調査段階では、地質環境特性や地質環境モデル、処分施設の基本レイアウトや人工バリア基本仕様にに基づき、時間的または空間的な不確実性を考慮して予備的な安全評価解析を行い、事業者として長期の安全性が確保できることの見通しを得る。この結果は、必要に応じて基本レイアウトや人工バリア仕様にフィードバックするとともに、次段階の地質環境調査にも反映させる。安全評価を行うに当たっては、自然現象の長期変遷を踏まえたシナリオ構築技術、地質環境モデルから物質移行モデルを構築する技術や、核種の収着、拡散などに関するデータベースの整備などが必要である。基盤研究によって、これらの基本的な技術は概ね整備されており、現在は不確実性をより適切に評価する手法や、様々な現象理解の進展に基づいた詳細なモデル化技術の開発、データベースの拡充などが継続的に行われている。

NUMOは、基盤研究で開発された個別技術やデータベースを踏まえ、安全評価にかかわる具体的な手順と方法を体系化する。

3.1.4 事業期間中の安全確保技術

概要調査段階では、設定した地上・地下施設の基本レイアウトをもとに、廃棄体取り扱い時の放射線安全対策、換気・排水などの作業環境対策、地震・津波などの自然災害に対する安全対策などを検討し、事業者として事業期間中の安全性が確保できることの見通しを得る。また、地上・地下施設の建設に伴う周辺環境への影響を考慮した環境保全対策を検討する。

これらの評価には、原子力施設を対象とした既存の技術などが適用可能と考えられる。NUMOは、先行する諸外国の対策事例や原子力施設に対する技術開発動向の把握を継続する。

3.2 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発

概要調査段階の技術を基本として、基盤研究において個別技術の高度化・信頼性向上を図り、NUMOはそれらを体系化した技術に反映するとともに、地質環境の調査・評価、工学的対策および安全性評価を相互に連携させた技術体系を構築する。これらの技術を用いて人工バリアの基本仕様と処分施設の基本レイアウトを決定する。

3.2.1 地質環境の調査・評価技術

精密調査段階〔前半〕では、処分施設の基本レイアウトを決定するため、精密調査地区のスケールを対象に概要調査段階より詳細な地質環境モデルを構築する。そのため、概要調査段階よりも高精度・高密度での物理探査やボーリング調査、ボーリング孔間試験などを実施する。ボーリング孔間試験技術を含め、この段階で必要な技術には、資源開発や土木分野などにおける実用技術や知見を適用することができる。

従って、精密調査段階〔前半〕の地質環境の調査・評価にかかわる基本的な個別技術は概ね整備されていると判断される。NUMOは、基盤研究の成果や技術の進展を考慮して個別技術の体系化を図るとともに、ボーリング孔間の物理探査や水理試験の技術については適用性を実証する。

3.2.2 工学的対策技術

精密調査段階〔前半〕では、詳細に把握された地質環境特性を踏まえ、人工バリアの仕様および製作・定置技術の決定、廃棄体の回収方法の提示を行う。さらに、これらの結果や精密調査地区のスケールの地質環境モデルを踏まえた地下施設の設計を行い、長期安全性評価の結果をフィードバックさせながら、基本レイアウトを決定する。

人工バリア仕様の決定には、必要な安全機能を長期にわたり満足する仕様を設定する技術の信頼性向上が必要である。人工バリアの製作・定置技術の決定、回収技術の提示には、実現可能性が確認された製作・定置・回収技術とその選択のための評価技術が必要である。地下施設の設計では、グラウトの影響評価技術も必要となる。

基盤研究ではそれらを支える熱・水・応力・化学連成を考慮したバリア材やニアフィールドの長期挙動の現象理解、およびそのモデル化・解析手法などの個別技術の高度化をサイトの地質環境特性を踏まえて行う。また、人工バリアの製作・定置、廃棄体の回収、グラウトの影響評価などにかかわる要素技術を開発する。一方 NUMO は、基盤研究で高度化された個別技術・要素技術を体系化し、基本設計の手順・方法をまとめる。また、人工バリアの製作・定置・回収技術については、実現性や効率性の観点から選択・決定のための評価技術を開発する。

3.2.3 閉鎖後長期の安全性評価技術

精密調査段階〔前半〕では、処分施設の基本レイアウトや人工バリア仕様の決定のため、詳細化された精密調査地区のスケールの地質環境モデルを踏まえて、安全評価のシナリオや解析モデルの修正、ならびに入力データセットの更新を行った上で安全評価を実施する。それにより事業者として長期安全性が確保できることを確認する。

従って、基盤研究においては、人工バリア内の核種挙動に影響を与える現象モデルの高度化や熱力学データ・収着データなどのデータベースの更新・拡充を行う。一方 NUMO は、概要調査に向けて体系化した安全評価手法の試行や、高度化された個別技術の安全評

価の体系への取り込みなどを行う。

3.2.4 事業期間中の安全確保技術

決定された基本レイアウトや人工バリア仕様，および詳細化された地質環境モデルを踏まえて，その時点での最新の技術を適用して事業期間中の安全性が確保できることを確認する。

NUMO は，地下施設を対象とした耐震設計技術を検討するとともに，原子力施設などを対象とした技術開発動向を踏まえ，必要な技術を開発する。

3.3 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

基盤研究では深地層の研究施設を用いた調査・評価技術や，信頼性向上に向けて現象理解，モデル化などの要素技術の高度化を図り，NUMO はそれらを地下調査施設における調査・評価，基本設計や安全評価などの技術の体系化に反映する。これらの技術を用いて事業者として安全性を確認し，処分施設建設地を選定するとともに，事業許可申請の準備を整える。

3.3.1 地質環境の調査・評価技術

精密調査段階〔後半〕では，地下調査施設での調査およびそこに至るアクセス坑道の掘削時の調査結果を踏まえて，処分場スケール（処分施設建設地程度の大きさ）の詳細な地質環境モデルを構築し，工学的対策や安全評価に用いる。そのためには，坑道を用いた，あるいは坑道からのボーリングを用いた地質環境の調査・評価技術が必要である。これらの技術には，資源開発や土木分野などにおける実用技術や知見が適用できると考えられ，JAEA の深地層研究として技術の検証が進められている。

技術のさらなる信頼性向上に向け，基盤研究において，深地層の研究施設を活用した坑道内からの物理探査や地下水の移行経路・流動特性の調査・評価技術などの高度化を図るとともに，坑道内で遭遇する断層や破碎帯の特性を把握する技術について開発を進める。NUMO は，既存技術および高度化された技術の実証などを通して，地下調査施設における調査・評価技術の体系化を図る。

3.3.2 工学的対策技術

精密調査段階〔後半〕では，事業許可申請に向け，サイトの地質環境特性に適した人工バリアや地下施設の仕様を確定する。これに向けて，地下調査施設を用いて，ニアフィールドで生じる現象の予測技術の検証や，人工バリアの製作・定置および回収技術の実証を行い，人工バリア仕様の妥当性を確認する。

基盤研究においては，熱・水・応力・化学の連成を考慮した人工バリアやニアフィールドの長期挙動の評価技術について，前段階に引き続き高度化を図るとともに，緩衝材，埋

め戻し材およびプラグの性能確認技術を、深地層の研究施設を活用して開発する。また、処分坑道内の地質環境特性を踏まえた工学的対策技術の開発を行う。NUMO は、基盤研究でさらに高度化された個別技術を、地下調査施設で実施する実証試験での性能確認、検証、品質管理に反映する。

3.3.3 閉鎖後長期の安全性評価技術

精密調査段階〔後半〕では、事業許可申請に向けて、地下調査施設などでの調査で把握された詳細な地質環境特性、および実証試験などを通して妥当性を確認した人工バリアと地下施設の設計を踏まえ、シナリオ、モデル、データを更新する。これらを用いて安全評価を行い、閉鎖後長期の安全性を事業者として確認する。

ニアフィールドにおける核種の挙動を踏まえた閉じ込め性能を評価する技術や、採用したモデルやデータの妥当性を主に原位置で実証するための技術が必要である。また、緩衝材仕様や廃棄体定置位置の妥当性を判断するために、処分場スケールの地下水流動モデルの構築や、緩衝材の流出・変質などとの連成も考慮した物質移行評価技術が必要である。

基盤研究においてモデル化やデータベース整備などに関する個別技術の高度化を引き続き行うとともに、モデルやデータの妥当性を地下調査施設で実証するための手法を開発する。一方 NUMO は、事業許可申請に向けて、高度化された個別技術を踏まえて安全評価の体系を更新・改良する。

3.3.4 事業期間中の安全確保技術

事業期間中の安全性の観点では、地下調査施設でのデータの拡充や地上・地下施設の基本設計の更新（詳細化）を踏まえて、操業中の放射線安全や処分施設の耐震安全性などの評価を行い、事業許可申請に向けた準備を整える。

NUMO は、他の原子力施設などを対象とした技術開発動向を踏まえ、必要な技術を開発する。

以上、サイト選定の各段階に向けた技術開発の概要を述べた。これらの具体的な内容（技術分野別の具体的な技術開発）については、第4章にて詳述する。なお、これらはジェネリックな技術開発に関する状況であり、サイト・スペシフィックな条件が明確になった後は、新たな技術開発の課題が見出されることもあり得る。また、開発がいったん終了した技術であっても、最新の科学的知見をもって当該技術の適用性や信頼性を再確認することによって、さらなる技術開発の必要性が出てくる可能性もある。NUMO は、新たな技術開発を行う必要性が生じた場合は、柔軟に技術開発計画を修正していく。

3.4 事業推進にかかわる検討

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震および東京電力福島第一原子力発電所事故

以降、地震・断層活動の地層処分への影響について懸念が示されている。最新の科学的知見を踏まえて地層処分の安全性を繰り返し確認することは、事業推進のために重要な検討項目である。NUMO は、東北地方太平洋沖地震後に得られている地震学・地質学などの最新の科学的知見などを踏まえて、事業期間中および閉鎖後長期の安全確保の考え方に関する総合的な検討を行う。

また、万が一の事態発生を把握・対処するためのモニタリングや廃棄体の回収技術などについて、安全性の確保を目的とした技術開発に加えて、信頼感醸成という視点も踏まえて必要な技術開発を進める。

3.5 NUMO の中期技術開発の方針

前節までに、サイト選定の各段階に向けて基盤研究および NUMO が行うべき技術開発の概要を述べた。これを踏まえ、NUMO は今後 5 年間（2013～2017 年度）、次のような方針で技術開発を進める。

- 概要調査段階に向けたジェネリックな技術開発については、2013 年度を目途に完了させる。
- 精密調査段階〔前半〕および精密調査段階〔後半〕に向けたジェネリックな技術開発課題については、想定される開発期間、重要度などを考慮の上、早期に着手すべき課題を実施する。
- 文献調査の開始によりサイト・スペシフィックな技術開発課題が明らかになった場合は、次段階以降に向けた技術開発と並行し、必要に応じて基盤研究開発機関の協力も得ながら技術開発を進める。

今後 5 年間の NUMO 中期技術開発計画については、第 5 章にて詳述する。

第4章 サイト選定段階に対する分野別の技術開発

4.1 検討方針

第3章において、サイト選定各段階に対する技術開発の概要を述べた。本章では、第3章で示した技術開発をより具体化し、NUMOと基盤研究開発機関などが分担して取り組む技術開発の実施内容を技術分野別に示す。

技術開発の実施内容は、次のような手順で具体化する（図4-1）。

- ① 2010年技術レポートで設定したサイト選定の各段階における事業目標と安全確保にかかわる目標を踏まえ、各段階の目標達成に向けた技術的な実施事項を技術分野別に詳細化する。
- ② 実施事項の遂行に必要な技術を具体化する。
- ③ これまでの基盤研究の進捗状況を整理する。
- ④ 必要な技術に対する基盤研究の進捗状況などを踏まえ、各調査段階に向けて、
 - ・ 基盤研究開発機関での実施を期待する技術開発
 - ・ NUMOが実施する技術開発

をそれぞれ明確にする。この際、「2.3.2 技術開発の分担と連携」に示した基盤研究開発機関とNUMOの技術開発の分担の考え方にに基づき分類する。

これにより、基盤研究開発に関する次期全体計画（2013～2017年度）、およびNUMO中期技術開発計画（2013～2017年度）（次章に記述）の策定に資する。

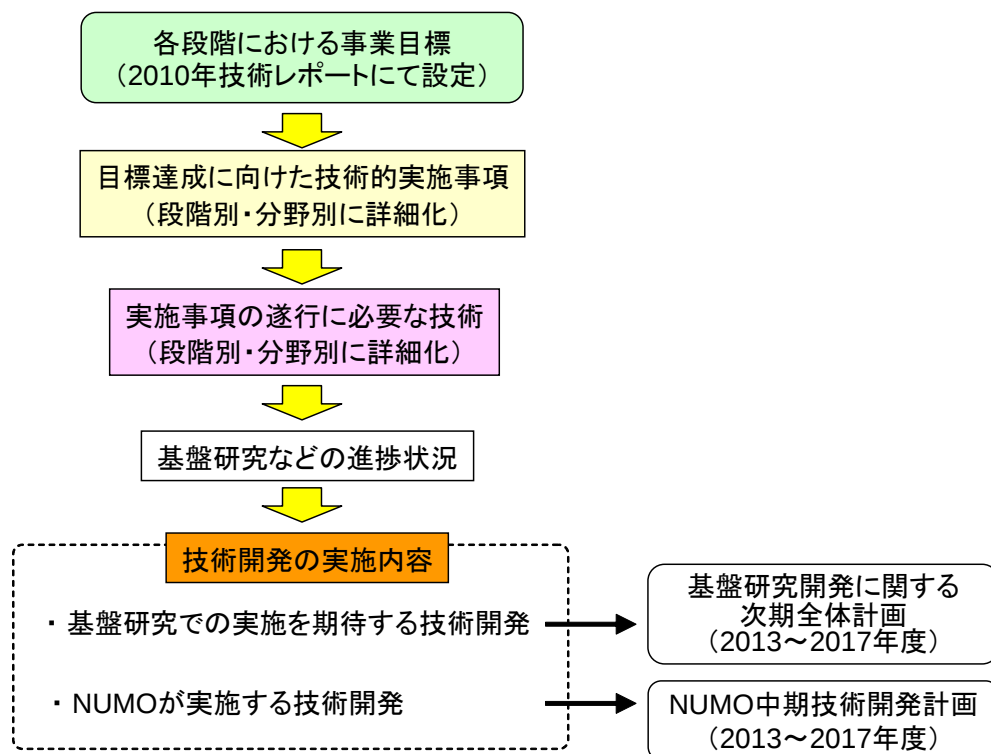


図4-1 サイト選定各段階に向けた技術開発の明確化の手順

「2.1 サイト選定段階の技術開発の目標」において、サイト選定の各段階における事業目標と、事業目標を達成するために実施する事項を概略的に示し（表 2-1）、技術開発の主な目標を概説した。表 2-1 に示した技術分野を細分し、各々の主要な実施事項を示すと表 4-1 のようになる。同表では各段階の成果物も示した。これらによって、各段階でどの程度のレベルの技術が必要かを概略的に把握することができる。

なお、各段階での技術の達成レベルを明確化することが望ましいが、現段階では、精密調査地区選定段階以降の詳細な選定要件や、安全確保のための基準が具体的に定められていない。従って、今後、それらが明確になった段階で技術の達成レベルを確認し、必要に応じて技術開発計画に反映させていく予定である。

表 4-1 各調査段階における技術分野別の主要な技術的实施事項

段階		文献調査段階	概要調査段階	精密調査段階〔前半〕	精密調査段階〔後半〕
各段階での目標	事業目標	概要調査地区選定	精密調査地区選定	基本レイアウトの決定	処分建設地選定
	安全確保にかかわる目標	自然現象の著しい影響の回避	・自然現象の著しい影響の回避 ・閉鎖後長期および事業期間中の安全性確保の見通し	・自然現象の著しい影響の回避を確認 ・閉鎖後長期および事業期間中の安全性の確保	・閉鎖後長期および事業期間中の安全性の確実な確保
各段階での成果物		・文献調査に関する法定報告書 ・文献情報に基づく処分場の概要	・概要調査に関する法定報告書 ・概念設計と予備的安全評価に関する報告書	—	・精密調査に関する法定報告書 ・基本設計と安全評価に関する報告書 ・事業許可申請書
技術的な実施事項	閉鎖後長期の安全性	地質環境の調査・評価	自然現象の影響 全国一律条件で著しい影響を除外	地層の著しい変動の回避に対する評価	概要調査における判断の妥当性確認
		地質環境特性の把握	広域の地質環境モデル構築	・地上からの調査 ・概要調査地区スケールの地質環境モデル構築	・地上からの詳細調査 ・精密調査地区スケールの地質環境モデル構築
		工学的対策	人工バリアの設計・施工 第2次取りまとめを参照した概略の仕様設定	・概念設計 ・長期挙動評価を踏まえた基本仕様の設定（幅を考慮）	・基本設計 ・製作・設置技術の選定、回収技術の提示
		地下施設の設計	・候補母岩の見通し ・敷地・港湾位置の設定	・概念設計 ・候補母岩の選定 ・地下施設基本レイアウトの設定	・地下施設設置位置の設定 ・地下施設基本レイアウトの決定 ・地下調査施設の設計
	閉鎖後長期の安全性評価	安全評価	第2次取りまとめを参照した概略的安全評価	・評価シナリオ作成 ・予備的安全評価（母岩、処分オプションの適格性判断） ・不確実性の特定 ・セーフティケース構築	・処分オプションの適格性確認 ・不確実性の確認 ・セーフティケース更新
		事業期間中の安全確保	安全設計 自然災害の概略評価	概念設計のための安全設計（放射線安全、耐震など）	施設基本レイアウトを踏まえた安全設計（放射線安全、耐震など）
	事業期間中・閉鎖後長期の安全性	環境配慮	概況把握	現地確認による状況把握と影響把握	地下調査施設が環境に及ぼす影響把握
		廃棄体とインベントリ	標準型の核種設定	・予備的安全評価に必要な放射性核種の選定 ・処分事業者の要求事項の明確化	—
		モニタリング	モニタリング概略計画	初期ベースラインモニタリング	・地上からのモニタリング ・地下調査施設でのモニタリング技術の実証
					・地下調査施設でのモニタリング ・環境放射線の初期状態把握 ・地下調査施設建設に伴う周辺環境影響のモニタリング

表 4-1 に示す各分野の実施事項を遂行するために必要となる主要な技術を表 4-2 に示す。また、基盤研究開発機関と NUMO の技術開発の段階的な関係を表 4-3 に示す。基盤研究開発機関による研究開発は、ジェネリックな技術を対象として、NUMO のサイト選定プロ

セスに先行し、3段階の研究フェーズを設定して進められている。フェーズ1の研究開発はすでに終了し、成果は主に概要調査段階の技術に反映された。現在は、主に精密調査段階〔前半〕への反映を意図したフェーズ2が2014年度を最終年度として実施されており、2013年度から精密調査段階〔後半〕に向けたフェーズ3が開始される。なお、フェーズ2の研究成果の一部は、概要調査段階の技術にも反映することが可能である。NUMOは、先行する基盤研究開発の成果を取り込みつつ、事業に必要な技術開発を進める。

表 4-2 実施事項の遂行に必要な主要技術

本計画における技術分野			主な技術の内容
閉鎖後長期 の安全性	地質環境の調査・評価	自然現象の影響	・自然現象(地震・断層活動, 火山・火成活動, 隆起・侵食など)の影響を調査・評価する技術 ・地質環境特性への長期的影響を評価する技術
		地質環境特性の把握	・地質環境特性(地質・地質構造, 地下水流動特性, 岩盤特性など)の調査・評価技術
	工学的対策	人工バリアの設計・施工	・人工バリアの材料選定, 構造設計技術 ・人工バリアの挙動評価技術(相互作用, 長期変化) ・人工バリアの製作・搬送・定置技術 ・TRU廃棄体パッケージの設計技術 ・廃棄体の回収技術
		地下施設の設計	・地下施設レイアウト設計技術(力学・水理・熱・地下水化学特性, 操業, 物流などを考慮) ・坑道設計技術
	閉鎖後長期の安全性評価	安全評価	・安全評価シナリオ・モデル・データ設定技術 ・不確実性の評価技術 ・生物圏シナリオ・モデル・データ設定技術 ・セーフティケース構築技術
事業期間中の安全性	事業期間中の安全確保	安全設計	・地上施設の設計技術 ・坑道掘削時の安全設計技術(力学安定対策, 湧水対策, ガス対策など) ・自然災害への安全設計技術(地震, 津波, 地すべりなど) ・放射線安全設計技術
		環境配慮	・周辺環境への影響評価技術
事業期間中および 閉鎖後長期の安全性		廃棄体とインベントリ	・核種インベントリ設定技術
		モニタリング	・一般労働安全に関するモニタリング技術(坑道安定性など) ・放射線安全に関するモニタリング技術(放射線など) ・周辺環境保全に関するモニタリング技術(地下水, 振動など) ・多重バリアシステムに関するモニタリング技術(地下水流動など)

表 4-3 基盤研究開発と NUMO の技術開発の関係

対象	実施機関	文献調査段階	概要調査段階	精密調査段階	
				前半	後半
ジェネリックな技術開発	基盤研究開発機関	終了	フェーズ1 (終了)	フェーズ2 (~2014年度)	フェーズ3 (2013年度~)
	NUMO	終了	~2013年度	~2017年度	~2021年度
サイト・スペシフィックな技術開発	基盤研究開発機関	—	文献調査の開始後、サイトの地質環境条件などに 応じた技術開発を必要に応じて実施		
	NUMO	—			

(本計画における技術開発の検討対象：■の部分)

次節 4.2 以降では、図 4-1 のフローに従い、技術分野別にサイト選定各段階の実施事項 (表 4-1)、およびその遂行に必要となる技術 (表 4-2) を詳細に述べるとともに、NUMO および基盤研究開発機関が取り組むべき技術開発の実施内容を明確にする。

4.2 自然現象の影響にかかわる技術開発

4.2.1 サイト選定段階の技術的实施事項

文献調査段階では、過去および現在において火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食などの自然現象による地層の著しい変動が生じている場所を避け、事業期間中および閉鎖後長期にわたってより安全が確保できると考えられる場所を選定する。概要調査段階および精密調査段階では、地質環境特性にかかわる調査などで得られる情報に基づき、文献調査での評価の妥当性を確認する。併せて、閉鎖後長期の安全性の評価に向けて、自然現象に伴う地質環境特性への長期的な影響に関する情報を整備する。

以下に各段階における技術的な実施事項を述べる。

(1) 概要調査段階

本段階では、精密調査地区の選定に向けて、地質環境特性にかかわる調査および必要に応じて実施する火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食にかかわる調査の情報に基づき、地層の著しい変動に関する証拠の有無を確認する。

火山・火成活動については、文献調査により著しい変動が生じている場所は基本的に避けているが、本段階における地質環境特性にかかわる調査の情報をもとに、第四紀火山のマグマの貫入・噴出および地熱・熱水活動の証拠の有無を確認する。また、概要調査地区の周辺に第四紀火山や地熱・熱水活動の影響領域が存在する場合には、必要に応じて補足的な調査を実施し、マグマの貫入・噴出、地熱・熱水活動の発生可能性、範囲、規模などについて評価する。

地震・断層活動については、概要調査地区およびその周辺で調査を実施し、地質環境特性にかかわる調査の情報も踏まえて、地層の著しい変動の証拠の有無を確認する。その結

果、活断層が認められた場合には、概要調査地区の近傍に分布する活断層も含めて、空間的な分布、活動性、影響範囲、分岐・伸展などについて評価する。なお、操業中の地上・地下施設への地震動の影響については、耐震設計などの工学的対策により適切に対処する。

隆起・侵食については、概要調査地区および補足的に調査を行う範囲において、隆起・沈降量とその分布、侵食量に関する情報を取得する。そして、地質環境特性にかかわる調査の情報も踏まえて、海水準変動に伴う侵食基準面の低下、それに伴う地形変化、風化作用などを考慮し、将来的に地下施設が酸化的な雰囲気へ接近する可能性について評価する。

以上の評価結果に基づき、策定予定の精密調査地区選定上の考慮事項に照らして除外・回避に関する判断を行う。さらに、予備的な安全評価に向けて、自然現象に伴う地質環境特性への長期的な影響について検討する。

将来の自然現象の評価については、主に外挿法を用いる。その際、地域ごと・事象ごとに、過去の情報の把握期間・品質・量に応じて適切な期間を設定して将来の評価を行う。外挿法による評価の不確実性が大きくなる事象や期間に対しては、確率論的手法、類推による方法、現象論的モデルによる数値解析手法なども適宜用いて、評価の信頼性を向上させる。

(2) 精密調査段階〔前半〕

本段階では、処分施設の基本レイアウトの決定に向けて、精密調査地区内で実施する地質環境特性にかかわる詳細な地上からの調査などの情報を基に、概要調査段階における自然現象にかかわる判断の妥当性を確認する。

地震・断層活動については、地層の著しい変動の証拠の有無を確認する。その結果、活断層が認められた場合には、空間的な分布、活動性、影響範囲、分岐・伸展などについて評価する。

隆起・侵食については、精密調査地区内の地質環境特性にかかわる調査で得られた新たな情報も付加して、将来的に地下施設が酸化的な雰囲気に達するまでの期間などについて定量的に評価する。

以上の評価結果に基づき、策定予定の処分施設建設地選定上の考慮事項に照らして除外・回避に関する判断を行う。

また、安全評価に用いるパラメータの変動幅や基本的なモデルを設定するための情報を整備する。さらに、新たに取得した情報を加えて、自然現象に伴う地質環境特性への長期的な影響に関するより詳細な評価を行う。

なお、火山・火成活動に関連した新たな証拠が調査で得られた場合は、詳細な調査を行った上で、安全性に与える影響について評価を行う。

(3) 精密調査段階〔後半〕

本段階では、処分施設建設地選定に向けて、地下調査施設での地質環境特性に関する調

査を通じて、自然現象にかかわる判断の妥当性を確認する。また、安全評価に必要な、自然現象に伴う地質環境特性への長期的な影響に関する評価を行う。

なお、火山・火成活動に関連した新たな証拠が調査で得られた場合は、詳細な調査を行った上で、安全性に与える影響について評価を行う。

4.2.2 実施事項を遂行するために必要な技術

上記の実施事項を遂行するために、各段階で以下の技術が必要である。

(1) 概要調査段階

火山・火成活動については、第四紀火山のマグマの貫入・噴出および地熱・熱水活動を示す証拠の有無を確認するために、地表踏査、物理探査、物理検層などの調査技術と得られた情報を解析する技術が必要である。また、マグマの貫入・噴出、地熱・熱水活動の発生可能性、範囲、規模などについての評価には、地表踏査や物理探査などの既存情報を用いた解析技術が必要である。これらの調査・評価技術は、資源開発や防災などの分野で開発されてきた。基盤研究では、それらの信頼性向上のため、火成岩や火山灰の年代測定手法の高度化、非火山性熱水の評価手法の開発、火山・熱水活動の予測・評価モデルの開発などを進めてきた。

地震・断層活動については、地層の著しい変動の証拠の有無を確認するため、変動地形が分布する場所、活動性が不明な断層など文献調査段階での情報が十分ではない事項について地表踏査、物理探査、群列ボーリング、トレンチ調査などを実施する。また、地質環境特性の調査における地表踏査、物理探査、およびモニタリング（微小地震観測など）の情報を合わせて総合的な評価を行う。必要となるこれらの調査・評価技術は、資源開発や防災などの分野で開発されてきた。基盤研究では、それらの信頼性向上のため、分布や活動性の不明瞭な活断層の評価や、地震活動の地質環境特性への影響などに関する検討を進めてきた。

隆起・侵食については、将来的に地下施設が地表付近に接近する可能性について評価するため、形成年代が未詳である地形面の形成年代などに関する情報を現地調査により取得する。また、地質環境特性の調査における地表踏査の情報などを合わせて、段丘を用いた隆起量評価、最大下刻量の見積り、隆起・沈降運動の様式や地形・地質構造発達過程、海水準変動に伴う侵食基準面の低下、それに伴う地形変化や風化作用などの評価を行う。必要となるこれらの調査・評価技術は、学術的な研究がなされてきた。基盤研究では、それらの信頼性向上のため、全国的な隆起・侵食に関する情報の拡充、地殻変動を考慮した地形変化モデルの作成およびそれに基づく地下水流動特性への影響に関する検討などを進めてきた。

NUMO は、以上の既存および高度化された技術を統合し、自然現象の調査・評価技術の体系化を進めてきた。また、その一環として、予備的な安全評価での適用も視野に入れ、

外挿法による予測の不確実性が大きい事象・時間枠（例えば、火山フロント背弧側の火山発生可能性、将来 10 万年以降を含む超長期の評価など）に対する確率論的評価手法に関する検討を行ってきた。

（2）精密調査段階〔前半〕

本段階では、精密調査地区における地質環境特性の調査で取得する、より詳細な情報に基づき、前段階で得た自然現象による地層の著しい変動にかかわる判断の妥当性を確認する。このため、必要な技術は、基本的には概要調査段階と大きな違いはないと考えられるが、その時点での最新の知見を踏まえて、それらの技術を改良あるいは更新する。

（3）精密調査段階〔後半〕

本段階では、事業目標である処分施設建設地選定に向けて、地下調査施設での調査により、前段階までの自然現象による地層の著しい変動にかかわる確認を行う。

なお、本段階では、特に坑道内で断層破碎帯などが見出される可能性があるが、その特性や影響把握のための技術については、「4.3 地質環境特性の把握に関する技術開発」で述べる。

4.2.3 基盤研究の状況

地上からの調査に基づく自然現象の調査・評価技術の高度化にかかわる課題に対して、以下の技術開発が行われてきた。

○ 自然現象の調査・評価技術の高度化

第2次取りまとめを通して見出された課題を受けて、地下深部のマグマ・高温岩体、第四紀の火山・地熱活動、非火山性熱水活動、地震に伴う断層の水理学的・地球化学的影響、隆起・沈降・侵食などに関する調査・評価技術の検討が行われた。

さらに、断層活動の影響、火山活動の長期変動、熱水活動の影響、隆起・沈降・侵食に伴う地形変化を評価するためのモデルなどの開発が行われた。

また、地形変化モデルに基づき、時間の経過ごとの地下水流動の変遷を把握する手法の開発が行われた。

4.2.4 基盤研究での実施を期待する技術開発

基盤研究では、フェーズ2での研究開発の進捗などを踏まえ、自然現象の調査・評価にかかわる個別技術の高度化に向けて、引き続き技術開発を実施する。

（1）精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発

○ 自然現象の調査・評価技術の高度化

年代測定・評価手法については、自然現象の評価の信頼性に大きく影響し、さらなる

向上が望まれることから、技術開発を進める。

地震・断層活動にかかわる調査・評価技術は、東北地方太平洋沖地震以降に得られている知見を踏まえ、概要調査段階に向けた技術も含めて、さらに強化すべきと考えられる。特に、変動地形が明瞭でない活断層や地殻内震源断層に対する調査・評価技術の高度化、断層の再活動などにかかわるシミュレーション技術の開発などを進める。

(2) 精密調査〔後半〕に向けた技術開発

○ 自然現象の調査・調査技術の高度化

年代測定・評価手法については、最新の科学的な知見を踏まえた信頼性の向上が望まれることから、継続的に技術開発を進める。

4.2.5 NUMO が実施する技術開発

NUMO は、基盤研究による自然現象の調査・評価にかかわる個別技術の高度化を踏まえて、以下に述べるように各段階に向けた調査・評価技術の体系化を図る。具体的な内容を以下に示す。なお、調査の情報や品質の管理、考慮事項および調査計画の策定のための技術開発も併せて行うが、これらは次の 4.3.5 で述べる地質環境特性の把握に関する技術開発と共通で行うことから、次節において述べる。

(1) 概要調査段階に向けた技術開発

○ 概要調査技術の体系化

策定予定の精密調査地区選定上の考慮事項への適合性を評価するための技術として、隆起・侵食による地形変化などの評価手法に関する検討を進める。

さらに、処分に適した領域の把握あるいは予備的な安全評価のシナリオ構築に資するために、確率論的評価手法の適用方法や結果の取り扱い方を含め、自然現象に伴う地質環境特性への長期的な影響評価手法の検討を進める。

以上の成果と、基盤研究の成果、ならびに最新の科学的知見を加味し、これまで構築してきた概要調査段階における自然現象の調査・評価技術の体系の拡充を図り、概要調査手順書などに反映する。

(2) 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発

○ 地上からの精密調査技術の体系化

概要調査段階と同様、隆起・侵食について、本段階におけるより詳細な調査手法を用いた精度の高い評価に向けて、概要調査段階で開発した技術をさらに改良する。さらに、自然現象に伴う地質環境特性への長期的な影響評価手法の整備を進める。

以上の成果と、基盤研究の成果、ならびに最新の科学的知見を加味し、地上からの精密調査段階における自然現象の調査・評価技術の体系化を図り、精密調査〔前半〕手順

書などに反映する。

(3) 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

○ 地下調査施設での調査技術の体系化

最終的な安全評価に向けて、最新の科学的知見を取り込みつつ、確率論的評価手法なども含めた自然現象に伴う地質環境特性への長期的な影響評価手法を整備する。

以上の成果と、基盤研究の成果、ならびに最新の科学的知見を加味し、地下調査施設での調査における自然現象の調査・評価技術の体系化を図り、精密調査〔後半〕手順書などに反映する。

以上を表 4-4 にまとめる。

表 4-4 各段階に必要な技術と技術開発の実施内容（自然現象の影響）

	概要調査段階	精密調査段階〔前半〕	精密調査段階〔後半〕
NUMOの実施事項（自然現象の影響）	・文献調査における評価の妥当性確認（地層の著しい変動に関する証拠の有無の確認） ・地質環境特性への長期的影響の検討	・概要調査における判断の妥当性の再確認 ・地質環境特性への長期的影響の検討	・地質環境特性への長期的影響に関する最終的な評価
↓			
	概要調査段階	精密調査段階〔前半〕	精密調査段階〔後半〕
実施事項を遂行するために必要な技術	・火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食の影響にかかわる調査・評価技術	・火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食の影響にかかわる調査・評価技術	・地震・断層活動の影響にかかわる調査・評価技術
↓			
	概要調査段階に向けて	精密調査段階〔前半〕に向けて	精密調査段階〔後半〕に向けて
基盤研究での実施を期待する技術開発	開発終了	・自然現象の影響の調査・評価技術の高度化（年代測定・評価技術、変動地形が明瞭でない活断層の調査技術、地殻変動のモデル化・解析技術など）	・自然現象の影響の調査・評価技術の高度化（年代測定・評価技術など）
↓			
	概要調査段階に向けて	精密調査段階〔前半〕に向けて	精密調査段階〔後半〕に向けて
NUMOが実施する技術開発	・概要調査技術の体系化（隆起・侵食の影響評価手法、地質環境特性への長期的影響の評価手法の検討）	・地上からの精密調査技術の体系化（隆起・侵食の影響評価手法、地質環境特性への長期的影響の評価手法の整備）	・地下調査施設での調査技術の体系化（自然現象の長期的影響の評価手法の整備）

4.3 地質環境特性の把握にかかわる技術開発

4.3.1 サイト選定段階の技術的实施事項

自然現象による地層の著しい変動が生じていない領域を対象に、地質環境特性（地質・地質構造、地下水流動特性、地下水化学特性、岩盤特性（力学特性、熱特性など）、物質移行特性）の情報を調査により取得・解析する。その情報を用いて、前段階までに作成した地質環境モデルを確認・更新するとともに、当該段階の評価に必要なスケールの地質環境モデルを構築する。それらの情報および地質環境モデルに基づき、各段階のサイト選定上の考慮事項に照らして処分に適した領域を抽出する。

以下に各段階における技術的な実施事項を述べる。

（1）概要調査段階

本段階では、事業目標である精密調査地区選定に向けて、坑道掘削への支障や地下施設への影響の観点から地質環境を評価し、事業期間中および閉鎖後長期の安全確保の見通しを得る。そのために、地上からの調査（地表踏査、物理探査、ボーリング調査など）および断層などの地質構造を対象とした調査を実施する。そして、文献調査段階で構築した広域あるいは概要調査地区のスケールの地質環境モデルを更新する。新たな情報および更新した地質環境モデルに基づき、策定予定の精密調査地区選定上の考慮事項に照らして、対象地層から地表付近まで連続するような大規模な断層などを回避する。残された領域の中から、施設設計および安全評価との連携を通じて、地下水流動特性、地下水化学特性、岩盤特性（力学特性、熱特性など）の観点からより適切な母岩の候補となる領域を抽出する。そして、その領域を含むスケール（精密調査地区のスケール）の地質環境モデルを構築する。

（2）精密調査段階〔前半〕

本段階では、事業目標である処分施設の基本レイアウトの決定に向けて、人工バリアや処分パネルのレイアウトなどの設計を見直し、廃棄体および人工バリアの運搬・定置にかかわる検討および長期安全性の評価を行う。そのために、地上からの詳細な調査（高密度・高精度の物理探査、ボーリング孔間試験など）により、物質移行特性を含めた地質環境特性や断層の影響に関する詳細な情報を取得する。また、次段階に向けて、精密調査地区のスケールの地質環境モデルを更新する。新たな情報や更新した地質環境モデルに基づき、施設設計および安全評価との連携を通じて、より適切な領域を抽出する。さらに、処分施設建設地の候補領域を設定し、次段階の調査に向けてより詳細なスケール（処分場のスケール）の地質環境モデルを構築する。

（3）精密調査段階〔後半〕

本段階では、事業目標である処分施設建設地選定に向けて、処分施設建設地が地層処分

に適していることを確認し、地下施設の基本設計、人工バリア仕様の確定、施工技術の実証を行うとともに、総合的な安全性の評価を行う。そのために、処分施設建設地候補領域中の母岩を中心に、坑道掘削中および地下調査施設での調査（坑道調査、坑道ボーリングによる原位置試験など）を実施し、詳細な地質環境特性を把握する。坑道調査および坑内でのボーリング調査により断層破碎帯などが確認された場合には、その影響範囲を評価し、必要に応じて施設レイアウトの変更などの工学的な安全確保策の検討を行う。

調査の結果を踏まえ、精密調査段階〔前半〕の地質環境モデルを更新する。さらに、事業許可申請に向けて各種の地質環境モデルを整備する。

4.3.2 実施事項を遂行するために必要な技術

上記の実施事項を遂行するために、各段階で以下の技術が必要である。

（1）概要調査段階

わが国の地質環境の多様性、すなわち地下水・物質の移行媒体（結晶質岩、堆積岩）、地下水の化学的環境（淡水系、塩水系）、地理条件（陸域、沿岸域）などを考慮に入れ、地質・地質構造、地下水流動特性、地下水化学特性、岩盤特性（力学特性、熱特性など）を把握するための調査技術を整備しておく必要がある。また、取得した各特性の情報を解析・統合し、地質環境モデルを構築するための技術が必要である。

これらの技術のうち、陸域における地表踏査、地上物理探査、ボーリング調査などの技術については、資源開発、防災、土木などの分野で開発されてきた。地層処分の分野では、結晶質岩・淡水系地下水および堆積岩・塩水系地下水の地質環境を対象とした二つの深地層研究において、それらの技術を組み合わせた段階的な調査を実施し、地質環境モデルの構築・更新が行われた。また、地上からの調査技術の検証も進められている。

沿岸域については、海底調査、陸域から海域にまたがる物理探査、海域を対象とした陸域からのボーリング調査、海上ボーリング調査などの技術が必要である。これらの技術は、資源開発などの分野で開発されてきた。地層処分への適用に向け、地質環境モデルの構築技術も含め、現在も基盤研究による検討が進められている。

以上の調査結果の評価に当たっては、地質環境モデルに基づき除外・回避する範囲および母岩の候補となる領域を抽出するための評価手法が必要である。評価で特に重要となる断層の水理学的な影響に関する調査・評価手法を整備・体系化しておく必要がある。

（2）精密調査段階〔前半〕

母岩の候補となる領域を中心に、上記の地質環境特性をより詳細に把握することに加えて、物質移行特性の概略を把握するための調査技術が必要である。そのために、概要調査で用いる技術に加え、高密度・高精度の物理探査、ボーリング孔間試験などのさらに詳細に調査するための技術が必要になる。

基盤研究では、陸域については、コントロールボーリングによる調査技術、三次元電磁法、弾性波トモグラフィ技術、より古い時代を対象とした地下水年代測定技術など、従来技術の改良・高度化が行われた。沿岸域については、陸域と海域をまたぐ領域を対象とした物理探査技術、塩淡水境界の分布・性状を把握するための調査・解析手法などの要素技術に関する検討が行われた。

以上の調査結果の評価に当たっては、断層の影響などを考慮して、除外・回避する範囲、および処分施設建設地の候補となる領域を抽出するための技術が必要である。

(3) 精密調査段階〔後半〕

処分施設建設地の候補領域を中心として、物質移行特性も含めた地質環境特性を詳細に把握するために、坑道掘削中および地下調査施設での調査技術（坑道調査、坑道ボーリングによる原位置試験など）が必要となる。坑道内で見出された断層破碎帯などについてその特性や影響を把握する技術が必要である。また、取得した各特性の情報を解析・統合し、地質環境モデルを構築するための技術が必要である。さらに、地質環境モデルに基づき、必要に応じて処分坑道のレイアウトなどで回避する範囲を評価する技術が必要である。

本段階における坑道掘削および坑道での調査・評価技術については、資源開発や土木などの分野で開発されてきた。それらに基づき、前述の深地層研究において、調査および地質環境モデルの構築・更新を含む総合的な技術の構築が進められている。

4.3.3 基盤研究の状況

地上からの調査に基づく地質環境特性の総合的な調査技術、個々の調査技術の高度化、沿岸域を対象とした調査技術にかかわる課題に対して、以下の技術開発が行われてきた。

○ 地質環境特性を把握するための総合的な調査技術の開発

前述の二つの深地層研究において、それぞれ結晶質岩・淡水系地下水および堆積岩・塩水系地下水の地質環境を対象に、坑道掘削中の調査による地上からの調査結果の検証が進められている。そこで得られた知見は、知識マネジメントシステムにより統合化されている。

○ 地質環境特性をより詳細かつ信頼性高く取得する調査技術の高度化

国および基盤研究開発機関により、コントロールボーリング技術を応用したコア採取・孔内試験技術、高精度・高密度の物理探査手法（三次元電磁法、弾性波トモグラフィ技術など）、従来より古い時代を対象とした地下水年代測定技術などに関する検討が行われた。

○ 沿岸域を対象とした調査技術の高度化

沿岸域に特有な条件（陸域と海域をまたぐ領域）で適用可能な物理探査技術、塩淡水境界の分布・性状を把握するための調査・解析手法などの要素技術の開発が行われた。

4.3.4 基盤研究での実施を期待する技術開発

基盤研究では、フェーズ2での研究開発の進捗などを踏まえ、地質環境特性の総合的な調査・評価技術の構築や、地質環境特性の調査・評価にかかわる個別技術の高度化を中心とした技術開発を実施する。

(1) 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発

○ 地質環境特性の総合的な調査・評価技術の構築

概要調査および精密調査段階〔前半〕に向けた総合的な調査・評価技術の先行的な事例検討として深地層の研究施設における坑道掘削中の調査によって、地上からの調査結果のさらなる検証と統合化を進める。

○ 地質環境特性の調査・評価技術の高度化

精密調査段階〔前半〕における適用に向けて、コントロールボーリングによる調査技術の統合化や地下水年代評価手法の信頼性向上をさらに進める。

○ 沿岸域を対象とした調査・評価技術の高度化

検討事例が少ないことから、優先度の高い技術開発課題として、沿岸域を対象とした調査・評価技術の高度化を図るとともに、陸域から海域にかけてのボーリング調査技術（既存技術の地質環境特性調査への適用性確認）をはじめとする調査・評価技術の統合化を進める。

(2) 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

○ 地質環境特性の総合的な調査・評価技術の構築

精密調査段階〔後半〕に向けた総合的な調査・評価技術の先行的な事例検討として、深地層の研究施設における第2・第3段階の研究（付録2章参照）を進め、知識マネジメントシステム（KMS）に得られた知見を集約する。

○ 地質環境特性の調査・評価技術の高度化

精密調査段階〔後半〕に向けた重要な調査・評価技術として、坑道からの精度の高い物理探査技術、岩盤中の地下水の移行経路・流動特性の調査・評価技術などの開発を進める。

4.3.5 NUMOが実施する技術開発

NUMOは、各調査段階の開始前までに、サイト選定上の考慮事項および調査計画を策定するための技術や知見を整備する。そして、必要な情報を取得するための調査技術、情報を解析・評価するための技術を整備する。さらに、これらの技術を各段階の調査に向けて体系化するとともに、特に重要な技術については実証を通じて事業者の観点から適用性を確認する。

また、先の4.2.5で述べた自然現象の影響にかかわる技術開発を含めて、一連の調査の品

質を管理するための調査マニュアル・手順書，事業の透明性・追跡性を担保するためのマネジメントシステムを準備する。

(1) 概要調査段階に向けた技術開発

○ 考慮事項策定・調査計画立案にかかわる検討

NUMO は概要調査の開始に先立ち，精密調査地区選定上の考慮事項を策定するとともに，概要調査計画を立案する。このため，精密調査地区選定上の考慮事項および概要調査計画を策定するための技術や知見を整備する。

○ 概要調査技術の体系化・実証

概要調査段階に向けて，地質環境モデルに基づき，精密調査地区選定上の考慮事項に照らして除外・回避する範囲および母岩の候補となる領域を抽出するための評価技術が必要となる。そのため，母岩の隔離・遅延機能の評価の観点から重要となる断層の水理特性把握技術については，現地調査を含めた技術の確認を行う。さらに，既存技術および新たに高度化された技術の体系化，および本段階の主要な調査技術であるボーリング調査技術を中心に原位置での実証を行う。

以上の成果と，基盤研究の成果，ならびに最新の科学的知見を，概要調査の手順書などに反映する。

○ 情報・品質管理技術の整備

概要調査段階の調査・評価に当たり，現地調査の品質を管理する技術（調査マニュアル・手順書，マネジメントシステムなど），取得した情報を管理する技術（データベース）の整備を行う。

(2) 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発

○ 考慮事項策定・調査計画立案にかかわる検討

処分施設建設地選定上の考慮事項の策定，および精密調査段階〔前半〕の計画を立案するための技術・知見を整備する。

○ 地上からの精密調査技術の体系化・実証

精密調査段階のうち，地上からの調査に向けて，既存技術および新たに高度化された技術の適用性について原位置で確認する。そのうち，母岩の隔離・遅延機能の評価の観点から重要なボーリング孔間の物理探査や水理試験の技術，ならびに断層の力学的・水理的な影響の調査・評価技術については，原位置での技術の確認・実証を行う。さらに，それを踏まえて地上からの調査技術の体系化を行う。

以上の成果と，基盤研究の成果，ならびに最新の科学的知見を精密調査〔前半〕の手順書などに反映する。

○ 情報・品質管理技術の整備

精密調査段階〔前半〕の調査・評価に当たり，現地調査の品質を管理する技術，取得し

た情報を管理する技術を精密調査段階に対応できるように改良する。

(3) 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

○ 調査計画立案にかかわる検討

地上からの調査結果に基づき精密調査計画立案手引書を改定する。

○ 地下調査施設での精密調査技術の体系化・実証

精密調査段階のうち、地下調査施設での調査に向けて、既存技術および新たに高度化された技術については、原位置で適用性の確認および技術の実証を行う。また、これらの技術の適用性や実証の結果を踏まえ、調査技術の体系化を行う。そのうち、物質移行・核種移行の観点から重要となる技術については、現地調査を含めた技術の確認を行う。

以上の成果と、基盤研究の成果、ならびに最新の科学的知見を、精密調査〔後半〕の手順書などに反映する。

○ 情報・品質管理技術の整備

精密調査段階〔後半〕の調査・評価に当たり、現地調査の品質を管理する技術、取得した情報を管理する技術を地下調査施設での調査に対応できるように改良する。

以上を表 4-5 にまとめる。

表 4-5 各段階で必要な技術と技術開発の実施内容（地質環境特性の把握）

NUMOの実施事項(地質環境特性の把握)	概要調査段階	精密調査段階[前半]	精密調査段階[後半]
	- 概要調査地区選定上の考慮事項の策定 - 概要調査計画の立案 - 複数フェーズの地上からの調査(地表踏査, 物理探査, ボーリング調査など) - 地質環境モデル詳細化(概要調査地区のスケール) - 除外・回避する範囲の抽出	- 処分施設建設地選定上の考慮事項の策定 - 精密調査計画の立案 - 母岩候補領域を中心とした地上からの詳細な調査(ボーリング孔間試験など) - 地質環境モデル詳細化(精密調査地区のスケール)	- 精密調査段階[後半]の調査計画の改定 - 地下調査施設を用いた詳細な調査(物質移行試験など) - 地質環境モデル詳細化(処分場スケール)
↓			
実施事項を遂行するために必要な技術	概要調査段階	精密調査段階[前半]	精密調査段階[後半]
	- 概要調査地区選定上の考慮事項策定にかかわる技術 - 概要調査計画立案にかかわる技術 - 調査・モデル構築技術 - 情報・品質管理技術	- 処分施設建設地選定上の考慮事項策定にかかわる技術 - 精密調査段階[前半]計画立案にかかわる技術 - 調査・モデル構築技術 - 情報・品質管理技術	- 精密調査段階[後半]計画立案にかかわる技術 - 調査・モデル構築技術 - 情報・品質管理技術
↓			
基盤研究での実施を期待する技術開発	概要調査段階に向けて	精密調査段階[前半]に向けて	精密調査段階[後半]に向けて
	開発終了	- 深地層研究による地質環境特性の総合的な調査・評価技術の構築 - 地質環境特性の調査・評価技術の高度化(コントロールボーリング調査技術, 地下水年代評価手法) - 沿岸域を対象とした調査・評価技術の高度化(陸域から海域にかけてのボーリング調査技術)	- 深地層研究による地質環境特性の総合的な調査・評価技術の構築 - 地質環境特性の調査・評価技術の高度化(物理探査, 地下水移行経路・流動特性)
↑			
NUMOが実施する技術開発	概要調査段階に向けて	精密調査段階[前半]に向けて	精密調査段階[後半]に向けて
	- 精密調査地区選定上の考慮事項策定, 概要調査計画立案 - 概要調査技術の体系化・実証(断層水理特性の調査・評価手法, 水理の観点からの母岩選定方法, 調査技術・評価手法の実証) - 情報・品質管理技術の整備(地質環境データ管理システム, 概要調査の品質保証体系)	- 処分施設建設地選定上の考慮事項策定, 精密調査[前半]計画立案 - 地上からの精密調査技術の体系化・実証(孔間物理探査・水理試験, 断層の力学的・水理的影響調査・評価技術) - 情報・品質管理技術の整備(地質環境データ管理システム, 精密調査の品質保証体系)	- 精密調査[後半]計画立案 - 地下調査施設での精密調査技術の体系化・実証 - 情報・品質管理技術の整備(地質環境データ管理システム, 精密調査の品質保証体系)

4.4 人工バリアの設計・施工にかかわる技術開発

4.4.1 サイト選定段階の技術的实施事項

サイト選定段階では、人工バリアの安全機能とそれを担保すべき期間を明確にし、地質環境特性や、人工バリア各材料・岩盤・坑道支保やグラウト材料間の相互作用などによる長期的な性能の変化を踏まえた上で、人工バリアの構成、各バリア材料の仕様設定を行い、段階的にその信頼性を向上させていく。また、設定した仕様を満足させるための人工バリアの製作・定置技術を選定し、実証試験を通じて工学的実現性や長期挙動を考慮した上で、の所要性能の達成度を確認しつつ、品質管理方法や手順などの品質保証体系を整備する。あわせて、選定した人工バリアの製作・定置技術に対して、回収技術の選定と実証を行う。

なお、ここでの人工バリアとは、放射性物質の移行抑制機能を期待する埋め戻し材やプラグ、地層処分低レベル放射性廃棄物における充填材を含むものとする。

(1) 概要調査段階

本段階では、処分施設の概念設計を行う。これに向けて、安全機能を満足するために必要な人工バリアの技術要件を明確にし、要件への適合性を判断する指標や基準を設定する。そして、概要調査から得られる地質環境特性や人工バリア材料の長期挙動に関する知見を踏まえて、技術要件に適合する人工バリアの基本仕様を設定する。基本仕様は、文献調査段階の仕様を出発点とし、本段階であわせて実施する予備的安全評価の結果を踏まえて、保守性をもって設定する。また、基本仕様を満足させるための製作・定置技術については、複数の技術オプションを比較するための指標を設定し、指標を用いた評価に基づき有望なオプションを絞り込むとともに、回収方法の見通しを示す。

(2) 精密調査段階〔前半〕

本段階では、絞り込まれたエリアにおける地質環境情報の拡充が期待できる。これに基づき、人工バリアの概念設計をより詳細化した基本設計を行う。これに向けて、地質環境特性にかかわる情報の拡充や人工バリア材料の長期挙動に関する更新された知見を踏まえ、前段階より信頼性が高い人工バリアの基本仕様を決定する。また、決定した基本仕様を満足させるための製作・定置技術については、実現性、品質保証、効率性などの観点から可能な限り一つに絞り込むとともに、適用可能な回収方法を提示する。

(3) 精密調査段階〔後半〕

本段階では、地下調査施設を建設し、処分場スケールでのより詳細な地質環境情報を取得する。これに基づき、事業許可申請に向けて、サイトの地質環境特性に適した人工バリアの仕様や地下施設の仕様を確定していく。これに向けて、地下調査施設を用いて、ニアフィールドで生起することが想定される現象の予測と検証を行うとともに、実規模・実環境条件下において選定した人工バリアの製作・定置技術および回収技術の実証を行う。あ

わせて、施工条件と所要性能の達成度やバラツキの確認を行うとともに、品質管理の項目・方法、基準、頻度などの品質保証体系を確立し、事業許可後の施設確認に向けた準備を整える。

4.4.2 実施事項を遂行するために必要な技術

上記の実施事項を遂行するために、各段階で以下の技術が必要である。

(1) 概要調査段階

概要調査結果に基づき、これまで JAEA や NUMO など示している人工バリアの設計技術の適用性を概略的に検討する。これらを実施するため、地質環境特性や材料間の相互作用に応じて人工バリアの長期挙動を評価する技術を整備し、対象地域で人工バリアに期待する安全機能が確保できることの見通しを確認する。現在、人工バリアの長期挙動に関する評価技術としては、化学的変質、物質移動変化、力学的変化を表すモデル開発が進められているが、その実用においてはモデルの信頼性確認や複数の現象を表現するモデルの連成などの高度化が必要である。また、人工バリアの概念設計の具体的手順と方法の確立が必要である。概要調査段階では、これらの結果を踏まえて、人工バリアの設計方法として構成要素の設定、材料の選定、仕様の設定方法を明らかにするとともに、安全機能が必要な期間において担保できる見通しを得る。特に、地層処分低レベル放射性廃棄物においては、地質環境特性に応じて廃棄体や廃棄体パッケージの閉じ込め性能の実現性に見通しを付ける必要がある。

また、設定した人工バリアの基本仕様を実現するための製作・定置方法については、特に工学的実現性や効率性の高い見通しがある技術を複数準備するとともに、見通しのある回収方法を提示する。現在、人工バリアの施工技術は、第2次取りまとめでレファレンスとして示された人工バリアの仕様に対して、オーバーパックの溶接技術や緩衝材の製作・搬送・定置技術に関して複数の要素技術の開発が進められている。今後は、工学的実現性、品質の信頼性、効率性などの観点から、複数の技術の組み合わせや絞り込みに必要な論拠を整備していく必要がある。

(2) 精密調査段階〔前半〕

本段階で実施する基本設計では、例えば、オーバーパックに関しては、サイトの地質環境特性とオーバーパックに期待する安全機能を考慮し、候補材料（炭素鋼、銅、チタン）の環境条件への適用性、オーバーパックの製作や溶接技術などの施工性の観点から材料を選定するとともに、構造健全性や耐食性を考慮して厚さなどの仕様を設定する。緩衝材に関しても、サイトの地質環境特性と緩衝材に期待する安全機能を考慮し、ベントナイト材料を選定し乾燥密度などの仕様を設定する。候補となるベントナイト材料の選定においては、締固め特性、膨潤性、透水特性などの特性を考慮する。この際には、概要調査段階で

行う人工バリアの長期挙動の評価を、地質環境情報の拡充に加えて、材料の長期挙動評価に関する新たな知見を取り入れて更新する。このため、この段階では、ニアフィールドで生起することが想定される種々の現象を考慮した人工バリアの長期挙動に関する評価が必要であり、現在の人工バリアの化学的変質、物質移動特性の変化、力学的変化を表すモデルに加え、熱影響や周辺岩盤の変質などより複合的な現象を取り扱うことが可能な人工バリアの長期健全性の評価技術の整備が必要である。

また、決定した人工バリアの基本仕様を実現するための製作・定置方法および回収方法についても、有望な技術とその組み合わせを絞り込むために、予備的な実証などを通じて工学的実現性や効率性の論拠の整備を行う。この際、地下の空間的な制約条件などを考慮した試験を行うことにより、次の段階の地下調査施設における実証試験に向けた準備を整える。さらに、地層処分低レベル放射性廃棄物に関して、地質環境特性に応じて廃棄体や廃棄体パッケージの閉じ込め性能の高度化技術の整備が必要である。

(3) 精密調査段階〔後半〕

本段階における人工バリアや地下施設の仕様確定に際しては、閉鎖後長期の安全確保の観点だけではなく、遠隔操作による工学的実現性の観点、さらに事業スケジュール・経済性の観点から総合的に評価する必要がある、そのための手順、方法を整備する。また、人工バリアの製作・定置技術および回収技術に関して、地下調査施設を利用して実規模・実環境条件下において実証を行い、これにより人工バリア施工技術の実証と品質保証体系の整備を行う。閉鎖後長期の安全性の観点からは、確定した人工バリアの仕様に対して、ニアフィールドで生起することが想定される複合的な現象を考慮した長期挙動の評価を総合的に実施する。これにより、安全機能が必要な期間、担保できるかを前段階で予測した結果と比較して、信頼性を確認する。従って、人工バリアの長期挙動に関する評価技術の体系化やその検証などが必要となる。

4.4.3 基盤研究の状況

人工バリアの設計・施工に関係する基盤研究開発では、「処分場の工学技術」、「性能評価技術」および「TRU 廃棄物⁵処分技術」の分類の下で実施されている。これらを、より具体的な技術開発テーマとして分類すると、(1) 人工バリアの各要素および相互作用を考慮した長期挙動に関する特性データの取得や評価技術の開発、(2) 人工バリアの製作・定置および回収技術の開発、(3) TRU 廃棄物の廃棄体や廃棄体パッケージの開発が進められている。

⁵ TRU 廃棄物の中で、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」により定められた「物または定められた放射性物質についての放射能濃度を超えるもの」を含む廃棄物が、地層処分対象の低レベル放射性廃棄物となる。NUMO ではこれを「地層処分低レベル放射性廃棄物」と称しており、本計画でもこの用語を用いる。ただし、基盤研究では、地層処分対象の TRU 廃棄物という表現を用いているので、基盤研究開発機関による地層処分対象の TRU 廃棄物研究を指す場合は、本計画においても TRU 廃棄物という用語を用いる。

以下に、上記3つの技術開発テーマについて、基盤研究で実施している技術開発の状況を整理する。

(1) 人工バリアの各要素および相互作用を考慮した長期挙動に関する特性データの取得や評価技術の開発

ガラス固化体、オーバーパック、廃棄体パッケージ、緩衝材、処分場の坑道支保やグラウトなどに使用されるセメント系材料の各要素および相互作用による長期挙動に関する特性データが、多様な地質環境条件を考慮した条件下で取得されている。また、得られたデータに基づき、地質環境条件の変化や各材料の溶解・変質などに関する化学反応モデル、変質に伴う材料中の物質移行モデル、力学的変化を表す力学モデルなどが検討されており、またそれらを組み合わせた評価技術の開発が進められている。

(2) 人工バリアの製作・定置および回収技術の開発

人工バリアの一つであるオーバーパックは、溶接によってガラス固化体を封入することが現実的であることから、炭素鋼およびチタンを対象として、溶接および溶接部の検査について、適用可能な技術の整備が進められている。また、溶接部の品質の一つとして、長期耐食性の評価が必要であり、オーバーパック候補材料のうち、基本材料の一つである炭素鋼を対象として腐食試験が行われている。

廃棄体や緩衝材などの製作・定置技術に関し、それぞれにかかわる技術調査や適用性確認試験などが実施されている。また、得られた情報や知見などに基づき、各技術の成立性や適用性などを定量的に評価するとともに、地質環境条件および様々な処分概念への対応や品質にかかわる情報なども含めた幅広い技術選択枝の整備が行われている。

また、廃棄体の回収可能性の提示に向けた要素技術の一つとして、塩水を利用した緩衝材除去技術について適用性の検討が行われている。

(3) TRU 廃棄物の廃棄体や廃棄体パッケージの開発

TRU 廃棄物の安全評価上、特に重要な核種である I-129、C-14 に関して、現実的評価のためのデータやモデル整備、ヨウ素の固定化（廃棄体の高度化）や炭素の長期閉じ込め技術（廃棄体パッケージの高度化）などの技術開発が進められている。

4.4.4 基盤研究での実施を期待する技術開発

基盤研究での実施を期待する技術開発を、前項で分類した(1)～(3)の技術開発テーマに分けて、以下に示す。

(1) 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発

① 人工バリアの各要素および相互作用を考慮した長期挙動に関する特性データの取得

や評価技術の開発

精密調査段階〔前半〕では、絞り込まれた範囲における地質環境情報が拡充されることから、それを踏まえてニアフィールドで生起する複合的な現象を考慮した人工バリアの長期挙動評価が必要となる。このため、廃棄体定置後の環境変化を含めた地質環境の多様性、塩濃縮現象や熱影響などによる人工バリアの特性変化や周辺母岩の変質に関するデータの取得および評価モデルの開発を実施する。

また、人工バリアの設計では、地質環境特性と人工バリアに期待する安全機能を考慮する。例えば、オーバーパックに関しては、候補材料（炭素鋼、銅、チタン）の環境条件への適用性や、製作・施工性の観点から材料を選定する。このため、オーバーパックの各材料や溶接部で生起し得る腐食形態、腐食速度の評価手法の開発を実施する。

② 人工バリアの製作・定置および回収技術の開発

精密調査段階〔前半〕では、溶接施工品質を保証するための溶接欠陥の分析・評価技術など、人工バリアの品質を保証するための技術開発および標準化を実施する。このため、現在までの人工バリアの遠隔搬送・定置技術開発や緩衝材の浸食などの課題に対して、例えば PEM⁶の容器周辺も含めた隙間充填技術の確立に向けた検討を実施し、人工バリアシステムとしての品質確保の向上を図る。また、オーバーパックの溶接方法、溶接欠陥の検査方法や合否判定基準、および補修方法の標準化に向けた開発や必要な情報の整備を実施する。

さらに、次段階での実証を視野に入れて、人工バリアの定置方法や回収方法について有望な技術を絞り込むための検討を実施する。

③ TRU 廃棄物の廃棄体や廃棄体パッケージの開発

これまで開発が進められてきた I-129, C-14 に関する現実的評価のためのデータやモデル整備、固定化や閉じ込め技術の実用化に向けて、評価モデルの信頼性向上や性能の確認を実施する。また、放射性炭素の長期閉じ込め機能を有す廃棄体パッケージについては、閉じ込め機能の保証と併せて、製作手順、品質管理方法などに関して、学会などでの標準化に必要な情報を整備する。

(2) 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

① 人工バリアの各要素および相互作用を考慮した長期挙動に関する特性データの取得や評価技術の開発

本段階における人工バリアの仕様確定に際しては、閉鎖後長期の安全性の観点から、

⁶ PEM 方式とは、高レベル放射性廃棄物の人工バリア施工方法の一つで、地上施設であらかじめ廃棄体と緩衝材を専用の容器内に格納し、一体化したものを地下施設に搬送・定置する方法をいう。PEM は、Prefabricated Engineered barrier system Module の略語。

人工バリアの安全機能が必要な期間において担保できることを示す評価結果が必要となることから、ニアフィールドで生起する複合的な現象を考慮した人工バリアの長期挙動評価技術の高度化および信頼性向上が不可欠である。このため、フェーズ2で実施した化学／物質移動／力学に加えて廃棄体定置後の環境変化を含めた地質環境の多様性、塩濃縮現象や熱影響なども考慮した評価モデルの改良・更新を行う。

② 人工バリアの製作・定置および回収技術の開発

この段階では、選定した人工バリアの製作・定置技術および回収技術の実証を行い、施工条件と所要性能の達成度やバラツキを確認する。また、品質管理項目、方法、基準、頻度などの品質保証体系を確立し、事業許可後の施設確認に向けた準備を整える。このため、深地層の研究施設の坑道を活用した緩衝材の設計、施工と性能確認、埋め戻し材およびプラグの設計、施工と性能確認を実施するとともに、回収が必要となる状態の設定および処分方式に応じた回収技術の整備を実施する。

4.4.5 NUMO が実施する技術開発

NUMO は、人工バリア長期挙動評価技術の高度化、製作・定置および回収技術開発、TRU 廃棄体パッケージ開発などの基盤研究成果を踏まえ、人工バリアの設計・施工技術としての体系化と手引書の整備、実証試験に向けた評価指標の整備などを中心とした技術開発を行う。具体的内容を以下に示す。

(1) 概要調査段階に向けた技術開発

- ・ 主に基盤研究開発成果に基づき、地質環境特性や材料間の相互作用に応じて材料の長期挙動がどのように変遷するかを評価する方法を体系的に整理・統合し、その知見を人工バリアの設計に反映する方法を提示する。
- ・ NUMO は、地層処分対象の TRU 廃棄物処分にかかわる検討を通じた新たな課題の一つとして、処分システムの安全性と評価の信頼性を高めることを目的とした廃棄体パッケージへの閉じ込め機能の付加を挙げている (NUMO, 2011b)。このため、基盤研究の成果を踏まえて、廃棄体製作から処分までを総合的に勘案して廃棄体パッケージへの要求事項を明確にし、閉鎖後所定期間の閉じ込め機能を付加した廃棄体パッケージの設計方法を提示する。
- ・ 設計に必要な要件の網羅的かつ体系的な整備、概要調査結果に基づく概念設計の具体的手順と方法を明確にした手引書を整備する。
- ・ 人工バリアの製作・定置技術および回収技術にかかわる基盤研究の成果を踏まえ、実現性や効率性などの観点から、技術の組み合わせを含めて可能な限り技術の絞り込みのための評価指標を整備する。

(2) 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発

- ・ 概要調査に向けたジェネリックな検討段階までに整備した設計手引書の試行を安全評価と連携して行い、手引書の改良を適宜実施していく。精密調査段階〔前半〕では、絞り込まれた範囲における地質環境情報の拡充が期待できることから、基盤研究における最新知見を踏まえて、地質環境特性に応じた人工バリアの長期挙動評価手法の信頼性を向上させ、その結果を人工バリアの基本仕様決定に反映させる方法を整備する。
- ・ 地質環境情報の拡充によるニアフィールド環境の条件設定の更新を想定し、廃棄体パッケージの基本仕様を最適化する方法の検討を行う。
- ・ 決定した人工バリアの仕様を実現させるための製作・定置技術および回収技術について、その組み合わせを含めて絞り込みを行い、地下調査施設における実証に向けて事前に確認すべき事項を明確にする。

(3) 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

- ・ 地下調査施設における実施事項を抽出・整理し、それぞれの位置付け、目的、達成目標を明確にする。
- ・ 選定した人工バリアの製作・定置技術および回収技術を実証するための方法、手順を設定し、品質管理項目、検査方法・手順などの品質保証体系の整備に向けた準備を行う。

以上を表 4-6 にまとめる。

表 4-6 各段階で必要な技術と技術開発の実施内容（人工バリアの設計・施工）

NUMOの実施事項(人工バリア設計・施工)	概要調査段階	精密調査段階〔前半〕	精密調査段階〔後半〕
	・地質環境情報に基づく人工バリア材料の長期挙動評価を踏まえ、技術要件を満足する基本仕様を設定	・基本仕様の決定 ・製作・定置技術の選定、回収技術の提示	・現象理解の検証のための原位置試験の実施 ・製作・定置技術などの実証
実施事項を遂行するために必要な技術	概要調査段階	精密調査段階〔前半〕	精密調査段階〔後半〕
	概念設計技術 ・人工バリアの長期挙動の評価技術 ・長期挙動評価の結果に基づく材料選定・仕様設定(緩衝材配合・厚さ、TRUパッケージ高度化など)の手順・方法の整備	基本設計技術 ・仕様決定の論拠となる長期挙動や相互作用の評価技術 ・基本仕様実現のための製作・定置技術と適用する回収技術	事業許可申請準備 ・調査結果と安全評価に基づく人工バリア仕様の妥当性確認 ・製作・定置および回収の手順・方法、品質保証体系の整備
基盤研究での実施を期待する技術開発	概要調査段階に向けて	精密調査段階〔前半〕に向けて	精密調査段階〔後半〕に向けて
	開発終了	・地化学特性や材料間の相互作用を考慮した人工バリア長期挙動の評価手法の開発 ・人工バリア材料間の相互作用による変質評価の高度化と熱影響評価 ・地質環境特性の変化に対する緩衝材特性データの拡充(廃棄物由来の変化も含む) ・人工バリアの製作(オーバーバックの溶接・検査、PEM一体化モジュールの製作)にかかわる要素技術開発 ・オーバーバックの腐食形態、腐食モードの評価手法の整備 ・オーバーバックの溶接・検査技術の標準化に向けた論拠の整備 ・廃棄体および廃棄体パッケージの閉じ込め性能の高度化技術開発 ・放射性炭素の長期閉じ込め容器の製作・検査技術の標準化に向けた論拠の整備 ・人工バリアの搬送・定置にかかわる要素技術開発 ・緩衝材の回収にかかわる技術の高度化	・人工バリアに対する複合現象を考慮した長期性能変化に関する評価手法の高度化 ・深地層の研究施設坑道を活用した緩衝材、埋め戻し材およびプラグの設計、施工と性能確認 ・回収が必要となる状態の設定および処分方式に応じた回収技術の整備
NUMOが実施する技術開発	概要調査段階に向けて	精密調査段階〔前半〕に向けて	精密調査段階〔後半〕に向けて
	概念設計技術の体系化(概念設計手引書整備) ・人工バリア長期挙動評価の方法の整理とその知見に基づく人工バリア設計方法の設定 ・閉鎖後所定の期間の放射性核種の閉じ込め機能を付与した廃棄体パッケージの設計方法提示 ・概要調査結果に基づく人工バリアの概念設計の手順と方法の整備 ・実現性や効率性の観点からの人工バリアの製作、定置技術および回収技術の有望な選択肢の準備	基本設計技術の体系化(基本設計手引書整備) ・人工バリア設計の手順と方法の更新 ・ニアフィールドで生起する現象予測の信頼性向上と予測結果の人工バリア仕様決定への反映方法の設定 ・閉じ込め機能を付与した廃棄体パッケージ基本仕様の最適化に向けた検討 ・人工バリアの製作、定置技術および回収技術の地下調査施設を利用した実証試験の検討	事業許可申請準備 ・人工バリアの製作、定置技術および回収技術の地下調査施設における実証試験の準備(品質保証体系の整備)

4.5 地下施設の設計にかかわる技術開発

4.5.1 サイト選定段階の技術的实施事項

地下施設の設計では、隔離・閉じ込め機能に優れた候補母岩の中から地下施設設置位置を設定する。そして、バリアシステムの安全機能を阻害する要因（例えば、地下水流による緩衝材のパイピングや、坑道掘削に伴うニアフィールドの水理的・地下水化学的な擾乱による安全機能への影響など）を排除するための工学的対策を検討するとともに、放射性物質の移行抑制に対して有利となるように施設配置を決定する。地下施設の設置位置や配置は、調査の進展に応じて最適化を図っていく。なお、調査の段階では、廃棄体の定置を避けるべき亀裂位置の把握は困難であるので、廃棄体定置可否の判断基準や対応策を準備するとともに、処分場を設置する母岩の領域にどの程度の余裕を持たせておくかの判断基準を明確にする必要がある。

(1) 概要調査段階

本段階では、処分施設の概念設計を行う。これに向けて、地層処分システムの安全性に著しい影響を及ぼす自然現象などについて、4.2.1 で述べた自然現象の影響にかかわる調査により、その影響を回避できると判断される場所の中から、力学、水理、熱、地下水化学特性などの観点から処分場を設置するのに好ましい候補母岩を選定する。選定した候補母岩において、地下施設設置位置を含めて処分場の基本レイアウトを設定する。そのため、必要な人工バリアを設置可能な坑道断面を設定し、力学的安定性や人工バリアへの熱影響回避の観点から坑道離間距離や廃棄体定置間隔を設定する。そして、放射性物質の移行抑制の観点から有利となるように、主に力学場（緩み領域の広がり）や水理場（地下水流、移行時間）を考慮しつつ、施工性や物流の効率性などを考慮し、基本レイアウトを設定する。さらに、基本レイアウトでの水理的、地下水化学的な特性を踏まえ、地下水流（湧水）による緩衝材のパイピングなどの人工バリア材料に対する直接的影響や、坑道掘削に伴うニアフィールドの水理的・地下水化学的な擾乱によるバリアシステムの長期安全機能への影響を概略評価する。影響が懸念される場合、グラウチングなどの工学的な湧水抑制対策について、概略的な検討を行う。

(2) 精密調査段階〔前半〕

本段階では、概念設計をより詳細化した設計を行う。これに向けて、地質環境情報にかかわる情報の拡充、決定した人工バリアの基本仕様や絞り込まれた人工バリアの施工技術を踏まえ、地下施設設置位置や施設仕様の精度の向上を図り、基本レイアウトを決定する。この際、地上からの調査では特定できない廃棄体定置を避けるべき亀裂への遭遇頻度を統計学的に推定し、廃棄体定置可否の判断基準に照らして処分場を設置する母岩の領域の余裕度を考慮する。また、決定した人工バリアの基本仕様や基本レイアウトに対して、地下水流（湧水）による緩衝材のパイピングなど人工バリア材料への直接的影響や、坑道掘削

に伴うニアフィールドの水理的・地下水化学的な擾乱による長期安全機能への影響、および人工バリア定置時の品質に対する湧水の影響を評価し、グラウチングなどの工学的な湧水抑制対策の仕様を設定する。さらに、基本レイアウトに対して、精密調査段階〔後半〕で建設する地下調査施設の範囲を設定し、地下調査施設の詳細設計を実施する。

(3) 精密調査段階〔後半〕

本段階では、地下調査施設における調査結果を踏まえ、廃棄体定置可否の判断基準を決定するとともに、選定した人工バリアの施工技術に適合するように施設仕様の詳細化を図り、詳細レイアウトを設定する。また、グラウチングなどの工学的な湧水抑制対策の仕様を決定する。設定した詳細レイアウトに対して安全評価を実施し、その結果を踏まえて詳細レイアウトの最適化を図り、事業許可申請に向けた準備を整える。

4.5.2 実施事項を遂行するために必要な技術

上記の実施事項を遂行するために、各段階で以下の技術が必要である。

(1) 概要調査段階

わが国の一般的な硬岩（結晶質岩）、軟岩（堆積岩）の岩盤特性を例として、地下施設の設計やレイアウト設定を行うための基本的な考え方については、すでに第2次取りまとめに示されている。本段階に向けては、これをより具体化し、概要調査で得られる地質環境情報と予備的安全評価を連携した概念設計の手順と方法の確立が必要である。その中で、閉鎖後長期の安全性確保の観点からの地下施設の設計方法として、力学、水理、熱、地下水化学特性などの観点から好ましい候補母岩の選定方法を明らかにするとともに、放射性物質の移行抑制に対して有利となるように施設配置（プラグなどの閉鎖システムの配置を含む）を設計する方法を整備しておく必要がある。また、人工バリア材料への直接的影響の回避や、坑道掘削に伴うニアフィールドの擾乱を低減するためのグラウチングなどの工学的な湧水抑制対策について、グラウト材料と人工バリア材料の相互作用などを考慮しつつ、対策の必要性の判断基準や所要性能、および材料や施工法などを概略的に設定するための技術を整備しておく必要がある。

(2) 精密調査段階〔前半〕

基本設計の実施に向けて、更新された地質環境情報などに基づく基本設計の具体的な方法を確立するとともに、決定した人工バリアの基本仕様や絞り込まれた人工バリアの施工技術を具現化するための設計方法も整備しておく必要がある。また、廃棄体定置を避けるべき亀裂の頻度を推定する方法や、廃棄体定置可否の判断基準を整備しておく必要がある。さらに、決定した基本レイアウトに基づき、地下調査施設の設計方法を整備しておく必要がある。また、グラウチングなどの工学的な湧水抑制対策について、決定した人工バリア

の基本仕様や基本レイアウトを踏まえて、所要性能や対策範囲、材料・施工法などの仕様を設定するための具体的な設計技術を整備するとともに、仕様を満足する施工技術の実現性について見通しを得ておく必要がある。

(3) 精密調査段階〔後半〕

本段階では、地下調査施設により処分場スケールでのより詳細な地質環境情報を取得するとともに、選定した人工バリア施工技術の実証試験を行う。また、グラウチングなどの工学的な湧水抑制対策技術の実証試験を行う。これに基づき、事業許可申請に向けて地下施設の仕様を確定していく。このため、地下での調査・実証に基づき設計を詳細化するための具体的な方法を整備しておく必要がある。

4.5.3 基盤研究の状況

地下施設の設計に関しては、①処分方式に応じた設計フローの構築、②低アルカリ性セメント支保・グラウトに関する検討の2つが基盤研究で進められている。②の検討は、本節の冒頭で述べた人工バリアの安全機能を阻害する要因を排除するための対策技術に位置付けられる。

(1) 処分方式に応じた設計フローの構築

処分孔縦置き方式、処分坑道横置き方式を対象とした設計フローについて、深地層の研究施設で取得した地質環境情報に基づき適用性の確認を行っている。また、設計オプションの一つである PEM 方式については、設計や人工バリアの長期健全性の観点からの留意点を整理している。さらに、処分坑道のような多連接坑道特有の変形を把握するため、解析手法の留意点などを整理し、多連接坑道設計検討フロー案が取りまとめられたところである。

(2) 低アルカリ性支保・グラウトに関する検討

処分システムの安全機能への影響を軽減させるために、高アルカリ成分による影響を低減させるための低アルカリ性セメントとして HFSC (Highly Fly-ash contained Silicafume Cement) を開発し、吹付けコンクリートなどの支保部材としての施工性の確認を行っている。また、低アルカリ性を有する新グラウト材料を開発し、基本特性の把握に加えて、原位置での注入試験などを通じて適用性の確認を行っている。併せて、グラウトの注入・浸透挙動を再現するためのグラウト浸透モデルの適用性の評価を行っている。

4.5.4 基盤研究での実施を期待する技術開発

(1) 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発

○ 設計手法の標準化に向けた検討

フェーズ2で整備した処分場の設計、多連接坑道の設計、グラウト技術などについて、設計ガイドライン取りまとめの方向性や、グラウトの材料選定・注入方法・品質管理などの標準化の方向性を明確に提示する。

○ 人工バリア長期性能に対する残置物の影響の提示および有意な影響がある場合の対応策の提示

人工バリアの長期性能に有意な影響を及ぼす可能性がある残置物（例えば、坑道掘削に用いる支保工の鋼材など）への対応策の提示に当たっては、撤去することが困難なもの、代替材料への置き換えが難しいものを区別した上で対応策と論拠を提示する。

○ 地上からの調査結果に基づく水平坑道内における亀裂頻度の予測手法の提示

設計において、廃棄体定置を避けるべき亀裂を考慮して、地下施設設置範囲の余裕をどの程度見込むかの判断ができることが必要である。そのため、深地層の研究施設におけるこれまでの成果を活用して、地上からの調査結果に基づき亀裂頻度や分布を予測する手法を提示する。

(2) 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

○ 深地層の研究施設における調査段階の進展に伴う施設設計の更新方法の具体化

段階的な地質環境情報の拡充に伴って基本レイアウトの更新などの設計の見直しを行う。深地層の研究施設で試行した処分場の設計方法について、地質環境情報の拡充に対応させて更新する具体的方法を先行的に提示する。

○ 緩衝材のパイピング防止などの観点からみた亀裂の評価と廃棄体定置基準の基本方針の提示

亀裂の特性と緩衝材のパイピング発生条件について試験を含めて検討を実施し、パイピング防止の観点から廃棄体定置を避けるべき亀裂の判断基準の方向性を提示する。

○ 深地層の研究施設の坑道を活用したグラウト設計技術の実証および性能確認

坑道掘削に伴うニアフィールドへの擾乱を低減するための工学的対策として、グラウチングの実証試験を深地層の研究施設の坑道において実施し、設計手法（材料選定や注入仕様など）や性能を検証する。

4.5.5 NUMOが実施する技術開発

NUMOは、上記の基盤研究成果を踏まえ、地下施設設計に関する技術の体系化や手引書の整備を中心とした技術開発を段階的に進める。具体的な内容を以下に示す。

(1) 概要調査段階に向けた技術開発

概要調査結果に基づく概念設計技術を体系的にまとめる必要がある。このため、設計に必要な要件を網羅的かつ体系的に整備し、要件に適合するように設計を実施するための具体的手順と方法を明確にした手引書を、4.4.5 で述べた人工バリア設計・施工の技術開発とあわせて整備する。この際、この段階での施設設計の観点からの重要な実施項目は、候補母岩の選定手順と判断指標の整備、基本レイアウトの設定手順と方法の整備である。

(2) 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発

基本設計技術の体系化として、概要調査に向けたジェネリックな検討段階までに整備した設計手引書の試行を安全評価と連携して行い、手引書の改良を適宜実施していく。精密調査段階〔前半〕では、絞り込まれたエリアにおける地質環境情報の拡充が期待できることから、地下施設設置位置の設定手順とその判断基準を整備するとともに、基本レイアウトをどのように更新して決定していくかについての考え方を明確にする。さらに、基本レイアウトに対して、調査範囲の展開や実証などを考慮し、地下調査施設の設計方針および坑道掘削に伴うニアフィールドの擾乱を低減するための工学的な湧水抑制対策（グラウチングなど）の設計技術を整備する。

(3) 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

地下調査施設における実施事項（例えば、グラウチングの実証試験など）を抽出・整理し、それぞれの位置付け、目的、達成目標を明確にする。

また、事業許可申請に向けて、地下での調査・実証に加えて、安全評価に基づく設計の詳細化や妥当性確認の考え方を整備する。

以上を表 4-7 にまとめる。

表 4-7 各段階で必要な技術と技術開発の実施内容（地下施設の設計）

NUMOの実施事項（地下施設の設計）	概要調査段階	精密調査段階〔前半〕	精密調査段階〔後半〕
	- 候補母岩の選定 - 地下施設基本レイアウトの設定 - 工学的な湧水抑制対策（グラウチングなど）の概略検討	- 地下施設設置位置の設定 - 地下施設基本レイアウトの決定 - 地下調査施設の設計 - 工学的な湧水抑制対策（グラウチングなど）の仕様設定	- 詳細レイアウトの設定 - 安全評価などによる設計の妥当性確認 - 廃棄体定置基準の設定 - 工学的な湧水抑制対策（グラウチングなど）の仕様決定
↓			
実施事項を遂行するために必要な技術	概要調査段階	精密調査段階〔前半〕	精密調査段階〔後半〕
	概念設計技術 - THMCの観点から処分場に適した候補母岩の選定技術および岩体規模設定技術 - 長期安全性確保の観点からの施設設計技術 - 湧水抑制対策の概略仕様設定技術	基本設計技術 - 処分場深度、平面的位置、広がりを設定する技術 - 選定した人工バリア施工技術を施設設計に反映する具体策 - 地下調査施設の設計技術 - 湧水抑制対策の仕様設定技術（施工技術の実現性の見通しを含む）	事業許可申請準備 - 湧水抑制対策を含む地下での調査・実証に基づく設計の詳細化の具体策 - 調査と安全評価に基づく廃棄体定置基準の設定と対応策の具体化
↓			
基盤研究での実施を期待する技術開発	概要調査段階に向けて	精密調査段階〔前半〕に向けて	精密調査段階〔後半〕に向けて
	開発終了	- 処分方式に応じた全体設計フローの構築 - 設計手法の標準化に向けた技術の整備 - 残置物の影響軽減策としての低アルカリ性セメント材料の開発、施工性の確認 - 人工バリア長期性能に対する残置物の影響評価および影響低減技術の整備 - グラウト技術の整備 - 地上からの調査結果に基づく水平坑道内の亀裂頻度の予測技術の整備	- 調査の進展に応じた施設設計の更新方法の具体化 - 亀裂評価と廃棄体定置基準の基本方針の提示 - 深地層の研究施設の坑道を活用したグラウト設計技術の実証および性能確認
⇕			
NUMOが実施する技術開発	概要調査段階に向けて	精密調査段階〔前半〕に向けて	精密調査段階〔後半〕に向けて
	概念設計技術の体系化（概念設計手引書整備） - 候補母岩の選定手順、判断指標の整備 - 基本レイアウト設計手順・方法の整備	基本設計技術の体系化（基本設計手引書整備） - 地下施設設置位置設定手順、判断基準の整備 - 基本レイアウトの更新方法の整備 - 地下調査施設の設計方針の整備 - 湧水抑制対策設計技術の整備	事業許可申請準備 - 地下調査施設における実施事項の明確化 - 調査、実証、安全評価に基づく施設設計の妥当性確認の考え方の整備

4.6 安全評価にかかわる技術開発

4.6.1 サイト選定段階の技術的实施事項

閉鎖後長期の安全評価においては、調査の各段階で明らかとなる情報を用いて定量的な評価を実施し、その結果を安全性を示す指標などと比較することにより、安全性の確認を行う。従って、得られる情報に基づく評価のためのシナリオ設定、シナリオを評価するためのモデル設定、モデルに基づき定量的な評価をするためのデータや解析コードの準備が必要となる。また、評価に用いられるシナリオ、モデル、データについては、その設定根拠や評価の過程における品質の管理が重要となる。それらは、評価結果とともにセーフティケースの中核としてまとめる。

(1) 概要調査段階

概要調査段階の初期の安全評価では、既存情報に基づき類型化された地質条件や処分概念で対応するが、概要調査の進展に応じて拡充される地質環境調査の情報や、地質環境および人工バリアの長期変遷の不確実性を踏まえ、予備的安全評価に適用すべきシナリオを構築・分類する。また、水理地質構造モデルに基づく地下水流動の解析結果、ボーリング調査から得られる岩盤特性や地下水化学特性、表層の地質環境の調査結果を踏まえ、地層処分システム全体を評価するモデルを構築する。さらには、これらを定量的に評価するためのデータを整備し、予備的安全評価を実施することにより地層処分システムが有する概略的な核種の隔離・閉じ込め性能を把握する。また、水理地質構造モデルや地下水化学モデル、システム評価モデルに対応する現象論的な評価を実施するためのモデル選択の不確実性や、これらモデルへの入力条件となるデータの不確実性を評価し、次段階で優先して調査すべきデータを特定する。

この段階においては、処分場の候補となり得る場所や地層、および人工バリア構築のオプションが複数存在することが想定されることから、安全評価上、これらを比較し、本段階で実施する概念設計との連携を行う。

この段階から、処分場の安全性に関する事業者としての主張をセーフティケースとしてまとめていく。安全評価の観点からは、長期安全性を踏まえたシナリオ・モデル・データの論拠を中心に、セーフティケースとして構造的にまとめていく。

(2) 精密調査段階〔前半〕

精密調査段階〔前半〕においては、地質環境調査に基づき更新される水理地質構造モデルや地下水化学モデル、および地質環境調査結果に対応した処分概念を前提として、それらが有する不確実性を踏まえ、安全評価のためのシナリオや、システム評価モデルの修正を精密調査地区のスケールの空間規模を想定して行う。これらは、処分施設の基本レイアウトや人工バリア基本仕様の設定と連携して行う。また、地質環境の調査により得られるデータを用いて入力データセットの更新を行う。

概要調査段階で構築したセーフティケースは、この段階から繰り返し更新することが必要となる。そのため、セーフティケースの更新・追加とともに品質管理が可能な構造として安全性の論拠を体系化し構築していく。

(3) 精密調査段階〔後半〕

精密調査段階〔後半〕においては、核種閉じ込め性能を期待する人工バリア周辺の母岩を主な対象として、亀裂の性状や規模、不均質性を把握し、化学物質や核種およびコロイドなどの物質移行モデルの構築と、地下調査施設を用いた試験によるモデルの妥当性検証を行う。これらに基づき、安全審査に向けたシナリオ、モデル、データの構築を実施し、処分施設の安全性を提示する。

これらを用いて、セーフティケースの更新を行う。また、廃棄体スケールでの詳細な地下水流動を把握し、人工バリアの安定性（岩盤亀裂への緩衝材流出の可能性など）について評価を行い、処分施設の基本設計にフィードバックする。

安全審査に対応するためには、基本シナリオや変動シナリオといったシナリオの区分に関する検討や、人為シナリオなどの様式化に関する考え方の整理が重要となる。これらは、安全審査に向けて、第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方（原子力安全委員会、2010）などを参考にして継続的に検討し、必要に応じて評価シナリオや評価モデルに取り込む。

4.6.2 実施事項を遂行するために必要な技術

上記の実施事項を遂行するために、以下の技術が必要である。

(1) 概要調査段階

予備的安全評価を実施するためには、これまでの知見を統合し、定量的な評価を実施するための技術を確立することが必要である。また、評価の妥当性を示すためのセーフティケースを構築する技術が必要となる。

定量的な評価に向けたシナリオ設定方法、モデル開発、データ整備の各々の要素に関する技術開発は概ね終了しており、今後、これらを予備的安全評価を実施するための技術として統合する必要がある。

また、ジェネリックな段階で検討されてきたシナリオ構築に関する方法論や基盤となるデータを用いて、具体的な地質環境条件を例題とした試行を通じて、シナリオ構築に関する方法論の改良を継続する。モデル開発、データ整備においても、シナリオ開発に歩調を合わせて高度化する。

本段階の安全評価においては、調査より得られる情報が限定される。そのため、シナリオ、モデル、データの設定においては、これまで検討されてきた不確実性に対処するための手法を中心に、概略的な安全性を示すためのシステム安全評価モデルを構築する技術が

必要である。また、複数となった場合の概要調査地区から精密調査地区を選定するためには、候補地区間の比較を実施するための技術が必要となる。そのためには、不確実性を考慮しつつ、処分システムの核種閉じ込め性能を概略的に把握し、諸条件の相違を比較できる詳細度を有するシステム安全評価モデルを構築する技術が必要である。

本段階で得られる地質環境調査結果の量は限られることから、地下水化学モデルから導かれる核種の溶解性や収着性については、既存のデータベースなどを用いて予測・補間する。そのため、多様な鉱物や岩種の熱力学、収着、拡散に関するデータベースを整備しておくことが必要である。また、生物圏における被ばく経路の同定や被ばく線量の算定においては、表層水に関するデータや人間の食物摂取に関するデータなど、幅広い情報が必要となる。データの中には、人間の生活様式にかかわるデータや植物への核種の移行係数など、サイト環境に強く依存しないデータも多い。そのため、様式化を含めた評価の方法論や、評価のためのデータとそのデータベースを整備する必要がある。

(2) 精密調査段階〔前半〕

精密調査段階の目標は安全審査に向けた評価である。そのため、安全性を示すための定量化技術の改良を続ける必要がある。また、精密調査段階〔前半〕では、評価結果に大きな影響がある不確実性を特定し、それらの不確実性を低減することを目的に、設計や精密調査段階〔後半〕の調査計画に反映する必要がある。

精密調査段階〔前半〕に向けては、評価における不確実性の取り込み手法や安全評価手法（例えば、リスク論的評価）について、安全評価の目的に合わせて複数の評価技術が必要である。また、精密調査地区のスケールレベルの調査に基づき地質環境モデルが更新されることから、水理地質構造モデルや地下水化学モデルを更新し、ニアフィールドにおける核種の閉じ込め性を詳細に定量化するための高度化された技術が必要である。生物圏の評価においては、地域性および地域の長期的変遷を踏まえた生物圏の様式化、およびモデルの構築とデータ整備を継続する。

調査データの増加に伴う安全評価解析およびセーフティケースの更新は、この段階以降、高い頻度で実施することになる。そのため、セーフティケース更新のための仕組みおよび品質管理技術が必要である。

(3) 精密調査段階〔後半〕

安全審査に向けた安全評価における定量化技術の高度化を進め、かつ、評価の妥当性に関する論拠について更新する。また、安全評価上、適切な廃棄体の定置位置を決定するための詳細な性能評価技術が必要となる。

この段階の特徴として、地下調査施設において、母岩の亀裂などの透水構造や掘削影響領域（EDZ）について調査を実施することが挙げられる。これらの情報を用いて前段階までに取得されたデータを更新し、ニアフィールドにおける核種閉じ込め性を適切に評価す

るための技術が必要である。また、緩衝材などの仕様や廃棄体定置位置の適格性の判断のために、処分孔や処分坑道スケールの地下水流動の把握が必要となることから、不均質性を考慮する詳細スケールでの地下水流動モデルの構築技術、緩衝材の流出、変質などとの連成評価技術、および各技術に対する実証技術が必要となる。これらの技術開発については、基盤研究などで概ね着手されており、今後これらの技術の高度化および実用化を図り、系統的に整備する必要がある。

また、評価に用いたシナリオ、モデル、データについては、安全審査を前提としたセーフティケースとして取りまとめる。これに向けて、地下調査施設においてモデルやデータを検証するための技術の実用化を図る必要がある。

長期安全性に関する指針類に関しては、国から提示されるものと考えられる。そのため、人為シナリオなどを含めた幅広い安全確保の基本的考え方については、関連事業の指針類などを参考に、既存の安全評価の枠組みとの整合性を踏まえ、シナリオ構築や評価の枠組みに反映させることが重要となる。また、国民の信頼感醸成のために、安全審査の枠組みを幅広くとらえた包括的な安全性を示す視点も重要である。これらは安全審査に向けて、継続的な検討が必要である。

4.6.3 基盤研究の状況

安全評価および性能評価に関する基盤研究開発では、①評価手法の整備、②モデル化技術の整備、③データベース開発の3つが進められている。地層処分対象のTRU廃棄物に関しても、TRU廃棄物特有の課題として、セメントや硝酸塩の影響、ガス影響について①～③の検討が実施されている。また、TRU廃棄物に特有な核種であるI-129やC-14に対するデータベース拡張が実施されている。

(1) 評価手法の整備

シナリオ解析技術については、トップダウン的アプローチとボトムアップ的アプローチを組み合わせた基本的なシナリオ解析手法が構築された。これらの基本的アプローチを用い、シナリオの抽出やスクリーニングにかかわる技術を整備し体系化するための検討が進められている。また、自然事象を起因とするシナリオに関して、自然事象の地層処分システムへの影響を類型化した状態設定を視野に入れたシナリオ解析手法の構築がなされている。

地層処分システムの不確実性評価技術に関しては、処分システムの安全裕度の定量的な提示、およびその頑健性を高めることに寄与する因子の抽出手法が構築されている。また、事象の発生やデータ設定に関して専門家の意見を集約し、統計的な手法を用いてリスク論的な評価を実施する方法についても検討されている。

また、総合的な性能評価にかかわる技術を多様な側面から向上させるため、解析スケールに応じた核種移行解析を行うための技術の体系化、核種移行評価に対する地球化学の役

割に関する体系的な検討と実用的な解析技術の具体化，安全性の理解促進のための説明技術の拡充，ナチュラルアナログ事例の利用を具体化する手法やツールの開発が進められている。

(2) モデル化技術の整備

地下水化学や間隙水化学に関するモデル化技術に関して，深地層の研究施設における地下水など，実際の地下化学環境とモデル化による結果との比較により，モデルに基づいた一般的な手法による地下水水質形成モデルの適用性検討については，概ね終了している。間隙水化学に関するモデル化は，地下水水質形成モデルを用いて進められている。

ガラス溶解と核種溶出に関するより現実的な評価のために，ガラス溶解と緩衝材の相互作用やオーバーパック腐食膨張の影響などの理解，評価手法やツールの高度化，緩衝材の核種移行モデルの構築，および現象論的な詳細モデルの開発が進められている。緩衝材中での核種の収着と拡散について，環境条件や緩衝材の状態に応じたプロセスの理解を進めるとともに，分配係数や拡散係数の設定に適用可能なモデル化技術が整備された。溶解度制限固相については，固溶体モデルの拡充継続と不確実性の検討を行い，それらの設定手順が検討されている。放射線影響については，地下水環境での放射線分解生成物挙動に関するデータの継続的拡充・整備と，緩衝材内の化学環境の変遷に基づく核種移行モデルの構築が進められている。

水理・物質移行現象については，処分場周辺を対象とした水理・物質移行評価のための一連の技術の整備・体系化が行われている。また，岩盤中での核種の収着と拡散については，環境条件や岩石の状態に応じたプロセスの理解を進めるとともに，分配係数や拡散係数の設定に適用可能なモデル化技術が整備されつつある。また，核種移行に及ぼすコロイド，有機物および微生物の影響にかかわるデータの拡充と，現象のより現実的な理解とそのモデル化が進められている。

(3) データベース開発

収着データベースおよび拡散データベースについて，信頼性向上のためのデータの拡充や，国内外の情報などを取り込んだ最新のデータベースとしての整備が継続されており，適宜公開されている。さらに，核種移行解析で用いる分配係数と拡散係数の設定について，データベースの活用を含めた一連の設定手順・手法の整備が進められている。また，適切なデータ取得のための試験手法や手順に関する知見の整備が進められている。

熱力学データベース，収着データベースおよび拡散データベース以外の性能評価技術分野で用いるデータは，利用しやすい形態での集約・整備が進められている。人工バリアのオプションや定置・レイアウトのオプションなどの処分概念は，地質環境条件への対応性などの関連情報とともにデータベース化することで，性能評価で参照しやすい形で整備された。さらに，国内外での廃棄物特性に関する情報の収集・整理結果，および発電用原子

炉の利用の特徴に応じた廃棄物特性（発生量や核種量・組成など）の評価結果をツールとともにデータベース化することで、性能評価で参照しやすいように整備された。

生物圏評価にかかわる研究としては、TRU 廃棄物特有の核種も含め、多様な対象に対する分配係数や濃縮係数のデータベース化、条件の異なる環境へのデータの適用方法の検討が実施されている。

4.6.4 基盤研究での実施を期待する技術開発

基盤研究では、これまでに引き続き、NUMO が実施する安全評価に必要となる評価手法やモデル化に関する個別技術の整備・高度化、性能評価に用いる熱力学などのデータベース整備・更新を中心とした研究開発を行う。

(1) 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発

NUMO で必要とする技術については、以下の技術を適切に取り込み、これを実用化するものとする。

- 人工バリア内および天然バリア内における核種の挙動に影響を与える現象のモデル化とシステム性能評価モデルとの対応の明確化

人工バリアで生じる核種移行挙動に関する事象群（ガラス固化体の溶解、核種の沈殿・収着・拡散など）の現象論的モデルについて、最新の知見やモデルの適用事例などを参考に更新を行い、これとシステム性能評価モデルとの関係を明確化する。また、人工バリアでの核種移行の不確実性要因（コロイド影響や有機物影響、微生物影響、放射線分解影響、セメントや硝酸塩影響などの時間的変遷）となる事象に対して最新の知見を用いた評価を行い、システム性能評価モデルへの反映方法を明確化する。また深地層の研究施設などで得られた調査情報のシステム性能評価モデルへの反映方法を明確化する。

- 安全評価を目標とした解析技術のツール化

決定論的評価やリスク論的評価などの目的に即した複数のシステム性能評価モデルの構築を前提とし、それらに組み込むための、多様なプロセス各々の解析技術のツール化と標準化、および、これらを取り込み安全評価を実施するためのモデルチェーンの更新を実施する。

- 熱力学データベースや収着データベースなど、各種データベースの更新および標準化

熱力学データベースや収着データベースなどの各種データベースに関して、TRU 廃棄物の対象核種も含めて既存データベースを更新し、材料などの長期変遷を踏まえた物質移行評価に寄与するデータの設定技術、およびデータベースの構築とパラメータ設定手法の標準化を行う。

- 表層環境とその時間的変遷を踏まえた生物圏での核種移行挙動の現象論的モデル化、生物圏評価のための様式化手法の確立

生物圏での核種移行挙動の現象論的なモデル化や、生物圏評価のための様式化手法の

検討を行う。TRU 廃棄物処分においては、特に I-129 および C-14 の生物圏での挙動を明らかにし、生物圏評価モデルに反映させる。

○ 生物圏評価における非サイト依存データのデータベース化

生物圏評価に用いるサイト条件に依存しないデータについて、データベース化を行う。

○ セーフティケース構築に資するナチュラルアナログ事例の収集と安全評価におけるナチュラルアナログ事象の適用性の確認

セーフティケースの構築に資するナチュラルアナログ事例を収集するとともに、安全評価における適用性を確認する。

(2) 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

精密調査段階〔後半〕に向けた研究開発は、精密調査段階〔前半〕に向けた研究開発の内容をさらに高度化することを目的として進める。地下調査施設において、現象論的モデル、およびそれに基づく安全評価に用いるモデルやデータの妥当性に関する詳細な検証を行うことから、検証に向けた試験手法や手順について、深地層の研究施設での成果を反映させる。また、廃棄体などの定置位置を判断するために、廃棄体スケールでの水理・物質移行評価手法を確立する。

○ 人工バリア内および天然バリア内における核種の挙動を律する現象のモデル化とシステム性能評価モデルの更新

前段階に引き続き、最新の知見を反映して、人工バリアで生じる核種挙動に関する事象群（ガラス固化体の溶解、核種の沈殿・収着・拡散など）の現象論的モデルや、システム性能評価モデルを更新する。特に、天然バリアスケールとしては、掘削影響領域（EDZ）を含む廃棄体周辺のモデル化を中心とした検討を行う。

○ 詳細評価および安全評価を目標とした要素解析技術のツール化

ニアフィールドの熱・水・化学・力学連成挙動も含めた詳細な解析技術の開発とその体系化や、廃棄体スケールでの水理・物質移行の詳細解析ツール、システム評価モデルの構築と標準化に向けた解析ツールなどの開発を行う。

○ 現象論モデルや性能評価モデルおよびこれに用いるデータに関する、地下調査施設での実証手法および手順の明示化

NUMO は、性能評価モデルや、これに用いるデータの妥当性を地下調査施設で実証する。これに向けて、その手法や手順を明確にする。

○ 熱力学データベースや収着データベースなど、データベースの更新

熱力学データベースや収着データベースなどの各種データベースに関して、セメント影響や硝酸塩影響を含めた材料などの長期変遷を踏まえてデータベースを更新する。

○ セーフティケース構築に資するナチュラルアナログ事例の収集と安全評価における現象の適用手法の更新

セーフティケースの構築に資するナチュラルアナログ事例を前段階に引き続き収集す

るとともに、安全評価における適用性を確認する。

- 生物圏評価における時間変遷などを踏まえた高度化技術に対応する様式化方法とデータベースの構築

現在のわが国の幅広い地形・気候状態を参照して整備した生物圏環境の類型化に基づき、将来の地形・気候状態の様式化を考える現状の生物圏評価の考え方を高度化し、将来の地形、気候変化を数学モデルを用いて予測を行い、将来の生物圏環境をより詳細に様式化する。また、関連するデータを整備する。

4.6.5 NUMO が実施する技術開発

基盤研究などで進められる評価手法やモデル化に関する個別技術の高度化、性能評価に用いる熱力学などのデータベース整備・更新などを踏まえて、NUMO はこれらの技術を各段階で実施する安全評価に適用可能な体系に整備することを中心とした技術開発を行う。具体的な内容を以下に示す。

(1) 概要調査段階に向けた技術開発

概要調査段階における技術開発は、個別要素については概ね終了しており、これらを統合し予備的安全評価を実施するための手引書を作成する。手引書は、この段階からセーフティケースを作成することを考慮し、セーフティケースの構造や品質管理についての検討を実施し、その概要を手引書に記述する。手引書完成以降においては、この手引書に基づく評価の試行を通じて、手引書の更新および修正を継続する。

また、予備的安全評価に用いる解析コードや入力データの所在、取得すべきデータを明らかにするとともに、実際の定量的解析を目標として NUMO で取りまとめるモデルチェーンに必要となる情報についても手引書に記載する。このモデルチェーンに必要となる情報は、概要調査地区から精密調査地区を選定する際の複数の候補地区間の比較、また、複数の人工バリアに関するオプション間の比較に用いることを前提としてまとめる。

(2) 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発

精密調査段階〔前半〕においては、最終目標となる安全審査に向けて、シナリオ、モデル、データおよびデータの論拠を整備する。論拠は、セーフティケースの一部として構築するため、その品質管理体系も含めてセーフティケースのフレームを準備する。安全審査の段階までのデータの増加に伴い繰り返し安全評価が実施される。これに向け、精密調査段階〔前半〕での安全評価の在り方について検討し、安全審査に対応した安全評価手法に関する技術開発を実施する。

また、概要調査段階で特定される影響の大きな不確実性を低減するための評価方法や、統計的な処理方法に関する技術開発については、評価に必要となる地質調査項目や調査技術の検討と合わせて進める。

(3) 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

精密調査段階〔後半〕では、安全審査に向け、シナリオ、モデル、データについての検証や論証、論拠を統合する必要がある。これらは、セーフティケースの一部としてまとめられる。概要調査の段階から構築されるセーフティケースは、最終的な安全審査の方針に合わせて修正する必要がある。地下調査施設を用いた検証は、施設での調査技術と密接にかかわることから、地質環境特性にかかわる調査の技術開発と整合を取りながら進める。

また、地下施設においては、処分ピットスケールにおいて廃棄体定置位置の適格性についての判断が必要となり、設計の観点だけではなく、安全評価の観点からも評価が求められる。人工バリアの安定性評価においては、基盤研究などで高度化が図られる廃棄体スケールでの地下水流動モデルの構築技術や、熱・水・化学・力学連成評価技術の適用性確認を行う。

以上の結果を踏まえて、安全評価マニュアルやモデルチェーンを更新する。

また、シナリオ構築などに必要となる人為シナリオなどを含めた幅広い安全確保の基本的考え方の構築については、関連事業の指針類の動向と、関連事業における安全評価の枠組みとの整合性を踏まえながら、安全審査に向けてサイト選定段階を通じて継続的に検討を行う。

以上を表 4-8 にまとめる。

表 4-8 各段階で必要な技術と技術開発の実施内容（安全評価）

NUMOの実施事項(安全評価)	概要調査段階	精密調査段階〔前半〕	精密調査段階〔後半〕
	・調査結果に基づく評価シナリオの作成 ・予備的安全評価(母岩の適格性, 処分オプションの適格性の判断) ・次段階で調査すべき不確実性の特性 ・セーフティケースの構築	・処分オプションの適格性の確認 ・不確実性の所在の確認 ・セーフティケース更新(シナリオ, モデル, データの検証, 論拠作成)	・セーフティケース更新(シナリオ, モデル, データの検証, 論拠作成) ・処分ピット毎の位置位置の適格性判断 ・安全審査に向けた安全評価
実施事項を遂行するために必要な技術	概要調査段階	精密調査段階〔前半〕	精密調査段階〔後半〕
	・サイト環境を踏まえたシナリオ構築技術, モデル化技術(様式化手法を含む), データ設定技術 ・広域スケール評価からの概略的安全評価技術 ・セーフティケースの構築, 品質管理技術	・安全評価技術の統合技術 ・サイトスケールデータを用いた安全評価技術	・安全評価手法の更新により体系化された安全評価技術 ・廃棄体スケールでの物質移行・安全評価技術
基盤研究での実施を期待する技術開発	概要調査段階に向けて	精密調査段階〔前半〕に向けて	精密調査段階〔後半〕に向けて
	開発終了	・人工バリアおよび天然バリアにおける核種の挙動を律する現象のモデル化とシステム性能評価モデルとの対応の明確化 ・安全評価を目標とした解析技術のツール化 ・熱力学データベースや収着データベースなど, 各種データベースの更新および標準化 ・表層環境とその時間的変遷を踏まえた生物圏での核種移行挙動の現象論的モデル化, 生物圏評価のための様式化手法の確立 ・ナチュラルアナログ事例の収集と安全評価におけるナチュラルアナログ事象の適用性の確認	・現象のモデル化とシステム性能評価モデルの更新 ・解析技術のツール化 ・熱力学データベースや収着データベースなど, データベースの更新 ・地下調査施設での実証手法および手順の明示化 ・生物圏評価における時間変遷などに対応する, 様式化方法とデータベースの構築 ・ナチュラルアナログ事例の収集と安全評価における現象の適用手法の更新
NUMOが実施する技術課題	概要調査段階に向けて	精密調査段階〔前半〕に向けて	精密調査段階〔後半〕に向けて
	・予備的安全評価技術の体系化(予備的安全評価手引き整備)	・安全評価マニュアルの整備 ・安全評価モデル更新・統合化技術 ・安全性の論拠とりまとめのフレーム準備(品質管理計画の策定を含む) ・安全評価モデルチェーン準備	- 事業許可申請準備 ・安全性の論拠とりまとめの更新(シナリオ, モデル, データの更新と検証技術の準備, 品質管理) ・安全評価マニュアル更新 ・安全評価モデルチェーン更新 ・閉鎖後長期における安全確保の基本的考え方の構築

4.7 安全設計にかかわる技術開発

4.7.1 サイト選定段階の技術的实施事項

事業期間中の安全性に関しては、一般労働安全の確保、放射線安全の確保の観点から検討を行う。

このうち、一般労働安全については、一般的な土木工事における安全対策を適用するとともに、原子力施設および鉱山施設など類似施設の建設・操業時の事故・災害情報を整理・分析し、処分施設建設時において最も信頼性の高い技術を用いる。なお、坑道掘削時における支保工による岩盤の力学的安定対策、およびグラウチングや排水工法などによる湧水対策においては、「4.4 人工バリアの設計・施工にかかわる技術開発」や「4.5 地下施設の設計にかかわる技術開発」で述べたように、バリアシステムの長期安全機能に有意な影響を及ぼさないように考慮した設計を行う。

安全設計では、事業期間中に発生する地震、津波、地すべりなどの自然現象による施設への影響を考慮する。これに先立ち、各調査段階の調査精度に応じた検討用地震動および津波の想定を行う。

放射線安全、ならびに考慮すべき自然現象の中でも特に注意を要する地震・津波に対する安全設計について、各段階の実施項目を以下に述べる。

(1) 概要調査段階

放射線安全については、放射線安全に対する安全確保の考え方を整理し（安全設計方針の検討）、これを反映させた概念設計の手引書を作成する。

地震・津波に対する安全性については、概念設計のうちの耐震設計の手順を整備するとともに、サイト特有の地震および津波の概略評価を実施する。

(2) 精密調査段階〔前半〕

放射線安全については、安全設計方針を策定する。

地震・津波に対する安全性については、本段階で決定する施設の基本レイアウトや人工バリア仕様などに基づいて耐震設計を実施し、処分坑道や周辺岩盤の耐震安全性評価を行う。そのために必要となる、サイト特有の地震および津波の評価を精密調査段階〔前半〕の調査結果に基づいて実施する。

(3) 精密調査段階〔後半〕

放射線安全については、基本設計を構成する安全設計を実施する。

地震・津波に対する安全性については、基本設計のうちの耐震設計を実施し、処分坑道や周辺岩盤の耐震安全性評価を行う。そのために必要となる、基本設計用地震および津波の想定を、精密調査段階〔後半〕の調査結果に基づいて行う。

4.7.2 実施事項を遂行するために必要な技術

上記の実施事項を遂行するために必要な技術のうち、耐震設計における地震動の設定方法は、原子力発電所に準拠した方法で設定可能である。また、地下施設である処分坑道の耐震設計手法については、一般的な地下構造物の考え方に準拠することが可能である。ただし、これらをそのまま適用することは適切ではないため、地層処分特有の条件に適した技術開発が必要である。具体的な内容を以下に示す。

(1) 概要調査段階

放射線安全については、一般公衆および作業者の安全確保のための基本的考え方を整理する技術（安全設計方針の検討）や、これらを踏まえた概念設計の方法を構築するための技術が必要である。

地震・津波に対する安全性については、概要調査から得られる地質・地盤情報から検討用地震動を設定する技術、地盤モデルを設定し、耐震安全性を評価する技術などが必要である。

(2) 精密調査段階〔前半〕

放射線安全については、重要度分類や管理区域の設定方法を示した放射線安全設計方針を作成する技術が必要である。

地震・津波に対する安全性については、精密調査段階〔前半〕で得られる地質・地盤情報と、地震観測に基づく地震データから震源断層モデルを設定する技術が必要である。また、耐震設計の観点から、地下の構造物に適用する静的震度、大深度の処分坑道支保と周辺岩盤の地震時安定性にかかわる評価基準について整備する必要がある。

(3) 精密調査段階〔後半〕

放射線安全については、安全設計説明書を作成する技術が必要である。

地震・津波に対する安全性については、精密調査段階〔後半〕で得られる地質・地盤情報と、地震観測に基づく地震データから震源断層モデルを見直し、検討用地震動および津波を想定する手法が必要である。また、深い地質構造の傾斜や褶曲構造が地中の地震動の伝播に及ぼす影響について検討が必要との最新の知見を踏まえて、このことが処分坑道支保と周辺岩盤の地震時安定性に及ぼす影響について評価する技術が必要である。

4.7.3 基盤研究の状況

放射線安全については、現在操業中の日本原燃の廃棄物管理事業や埋設事業の安全設計が基本的に参照できることから、現在、基盤研究において体系的な研究は実施されていない。

深地層の科学的研究においては、地下坑道建設時の安全対策などが検討されている。

耐震設計については、原子力発電所の耐震設計手法が参考になる。また、4.3 で述べた地質環境特性の把握にかかわる技術開発の内容が、震源断層などの把握に活用できる。

この分野に関連すると考えられる研究として、処分場の建設、操業、閉鎖段階における巨大地震・津波への対策に関する技術開発が挙げられる。この研究は、巨大地震・津波のリスク低減対策に必要な工学的対策技術について、既存技術の技術調査や試験、および、新規技術の技術調査などを行うことで、各技術の適用性を確認、提示するとしている。

4.7.4 基盤研究での実施を期待する技術開発

精密調査段階〔後半〕に向けては、深地層の研究施設の地下坑道建設・維持管理などにおける安全対策について、知見を取りまとめる。また、深地層の研究施設における深部地下の地震観測により、地震動特性を把握してその知見の提示を行う。

4.7.5 NUMO が実施する技術開発

検討用地震動や津波の調査に始まる設計手順は既往の知見を活用できるが、今後の耐震審査指針の見直しに伴い、地下施設への適用性検討が必要になると考えられる。NUMO は、放射線安全確保のための計画、設計手順に関する既往の知見などを活用しながら、耐震設計を含む安全設計の考え方や手順整備を中心とした技術開発を進める。具体的な内容を以下に示す。

(1) 概要調査段階に向けた技術開発

概念設計技術を構成する放射線安全に対する安全確保の考え方や、耐震設計の手順について、2012 年度に取りまとめを完了している。その成果は、2013 年度に作成する概念設計手引書に反映する。

(2) 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発

基本設計技術を構成する耐震設計、および安全設計方針作成のために必要な、以下の技術開発を実施する。

○ 耐震設計手法の整備

概念設計のための耐震設計技術は、既往技術を用いた保守的な考え方に基づいている。精密調査段階〔前半〕では、概念設計を詳細化した基本設計における耐震安全性評価に適用するため、信頼性向上や合理化を目的とした技術開発を実施する。また、その成果を基本設計手引書に反映させる。

○ 安全設計方針の作成

放射線安全に対する安全確保の考え方（概要調査段階の技術開発成果）に基づいて、地下施設の基本レイアウトに対する放射線安全のための管理区域の設定方法や、地震以

外の自然災害などに関する安全設計方針の作成を目的とした技術開発を実施する。また、その成果を基本設計手引書に反映させる。

(3) 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

基本設計技術を構成する耐震設計のために必要な、以下の技術開発を実施する。

精密調査段階〔後半〕では、地質環境の調査によって深い地盤の地質構造が明らかになることが期待される。地質の傾斜や褶曲構造が地震動の伝播に及ぼす影響を考慮した、処分坑道支保と周辺岩盤の耐震安全性評価のための技術開発を実施する。

なお、NUMO は、東北地方太平洋沖地震や東京電力福島第一原子力発電所事故後に得られている知見を踏まえて、地層処分の安全性に関して総合的な評価を別途実施している（5.8.1 参照）。今後、これらの検討成果や、国および他の原子力事業者の動向も踏まえて、操業期間中における安全確保の基本的考え方の構築を継続して実施する予定である。これによって安全設計の技術開発にフィードバックする事項が具体化すれば、必要に応じて対応していく。

以上を表 4-9 にまとめる。

表 4-9 各段階で必要な技術と技術開発の実施内容（安全設計）

	概要調査段階	精密調査段階〔前半〕	精密調査段階〔後半〕
NUMOの実施事項（安全設計）	概念設計のための安全設計 ・放射線安全の考え方の提示 ・概略の耐震設計	施設基本レイアウトを踏まえた安全設計 ・放射線安全設計方針の提示 ・耐震安全性評価	基本設計のための安全設計 ・放射線安全設計 ・基本設計としての耐震安全性評価
↓			
	概要調査段階	精密調査段階〔前半〕	精密調査段階〔後半〕
実施事項を遂行するために必要な技術	概念設計のための安全設計技術 ・放射線安全確保の基本的考え方 ・概略の耐震設計の考え方	施設基本レイアウトを踏まえた安全設計技術 ・放射線安全設計方針（重要度分類、管理区域設定を含む） ・耐震設計手法（静的震度、耐震安全性評価基準などの設定方法）	基本設計のための安全設計技術 ・深い地質構造の影響を考慮した処分坑道・周辺岩盤の耐震安全性評価手法
↓			
	概要調査段階に向けて	精密調査段階〔前半〕に向けて	精密調査段階〔後半〕に向けて
基盤研究での実施を期待する技術開発	開発終了	処分場の建設、操業、閉鎖段階における巨大地震・津波への対策技術開発	深地層研究施設の知見提示 ・地下坑道建設・維持管理などにおける安全対策の知見 ・深部地下地震観測による地震動特性の把握と知見提示
⇕			
	概要調査段階に向けて	精密調査段階〔前半〕に向けて	精密調査段階〔後半〕に向けて
NUMOが実施する技術開発	概念設計技術の体系化（概念設計手引書整備） ・放射線安全対策の基本的考え方の検討 ・地震動評価・耐震性評価手法の検討	基本設計技術の体系化（基本設計手引書整備） ・放射線安全設計方針（重要度分類、管理区域含む）の検討 ・基本設計のための耐震設計手法の検討	・深い地質構造の影響を考慮した処分坑道・周辺岩盤の耐震安全性評価のための技術開発 ・操業期間中における安全確保の基本的考え方の構築

4.8 環境配慮にかかわる技術開発

4.8.1 サイト選定段階の技術的实施事項

環境配慮に関しては、文献による事業開始前の状況把握に始まり、概要調査以降の各段階では現地調査、事業による影響の把握、影響評価書の準備と進む。

3段階の調査の進展に伴い、調査内容や処分施設の建設・操業に関する事業計画の詳細度が高まっていくが、これに応じて、環境への影響に関する予測の精度を高め、それに伴い環境保全措置を見直していく。

なお、第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方（原子力安全委員会，2010）において、廃棄体に含まれる非放射性の有害物質そのものの環境影響への配慮が示された。NUMOの第一種廃棄物埋設事業においても、同様の対応が必要になる可能性を視野に入れ、先行している第二種廃棄物埋設事業などの動向も注視しつつ、第一種廃棄物埋設事業での非放射性の有害物質そのものの環境影響について取り扱いの検討を進める。

（1）概要調査段階

本段階では、文献調査で実施した既存文献による状況把握や、現地調査を行い、地層処分事業が環境に及ぼす可能性のある影響を評価する。なお、ボーリング掘削など本段階で実施する調査に伴う環境影響についても同様の配慮を行う。

（2）精密調査段階〔前半〕

精密調査段階〔前半〕では、応募地区周辺の概略の現地調査を行い、事業や地下調査施設の建設が環境に及ぼす可能性のある影響を評価する。なお、ボーリング掘削など本段階で実施する調査に伴う環境影響についても同様の配慮を行う。

（3）精密調査段階〔後半〕

サイト選定段階の最終である精密調査段階〔後半〕においては、最終処分施設建設予定地周辺の現地調査を実施し、事業が環境に及ぼす可能性のある影響を評価し、環境影響評価書の準備を行う。なお、本段階で実施する地下調査施設の建設や調査に伴う環境影響についても同様の配慮を行う。

4.8.2 実施事項を遂行するために必要な技術

サイト選定段階から環境影響評価の対象になることを想定し、上記の実施事項を遂行するための技術の整備が必要である。環境配慮については、サイト選定の各段階において、情報の詳細度に応じて状況把握から事業による影響の評価、そして影響低減・保全対策の検討という一連の手順を繰り返すため、これらに必要な技術の整備が必要である。

なお、周辺環境を調査する上で必要なモニタリング技術に関しては、後の「4.10 モニタリングにかかわる技術開発」で述べる。

(1) 概要調査段階

本段階での環境配慮を行うため、各環境要素（大気環境、水環境、土壌環境、動物・植物・生態系、廃棄物・温室効果ガス）に関する技術的事項（調査・予測・評価）を、既存の技術をもとに地層処分事業に適する形に体系化しておく必要がある。なお、本段階で実施するボーリングなどの調査に対する環境配慮技術もその対象とする。

体系化が必要な内容は、上記の環境要素ごとに、現地確認の項目・実施方法、環境影響評価方法、および事業による影響を低減させるための保全対策の検討手順である。

(2) 精密調査段階〔前半〕

本段階で得られる情報に応じて、上記環境要素ごとに、現地確認の項目・実施方法から、影響低減のための各保全対策の検討に至る一連の手順を体系化する必要がある。なお、本段階で実施するボーリングなどの調査に対する環境配慮技術もその対象とする。

(3) 精密調査段階〔後半〕

本段階で得られる情報に応じて、上記と同様の一連の手順を体系化する必要がある。なお、本段階で実施する地下調査施設の建設・調査に対する環境配慮技術についてもその対象とする。

4.8.3 基盤研究などの状況

この分野については、火力発電所や原子力発電所など関連する施設で実施されている環境影響評価の知見を参照できる。なお、JAEA の深地層の科学研究において、地下施設建設に伴う周辺環境への影響調査が実施されている。

4.8.4 基盤研究での実施を期待する技術開発

精密調査段階〔後半〕に向けた基盤研究に対しては、深地層の研究施設における環境影響に関する知見を NUMO 事業に反映させる。

4.8.5 NUMO が実施する技術開発

NUMO は、状況把握、事業による影響評価、影響低減・保全対策の検討という、各段階で実施する一連の手順について、基盤研究の深地層の研究施設で得られる知見なども踏まえながら、手順書の整備を行っていく。ただし、適用する技術は、原則としてその時点での最新技術を利用するとともに、基盤研究の進展などを考慮する。

なお、廃棄体に含まれる非放射性の有害物質そのものの環境影響への配慮に関しては、現状では対応の必要性が明確ではない。第二種廃棄物埋設事業の動向も注視しながら、必要に応じて予備的な検討を実施する。

以上を表 4-10 にまとめる。

表 4-10 各段階で必要な技術と技術開発の実施内容（環境配慮）

NUMOの実施事項（環境配慮）	概要調査段階	精密調査段階〔前半〕	精密調査段階〔後半〕
	現地確認による状況把握と影響の把握	現地概略調査と地下調査施設が環境に及ぼす影響の把握	・現地詳細調査と影響の把握 ・評価書作成
			
実施事項を遂行するために必要な技術	概要調査段階	精密調査段階〔前半〕	精密調査段階〔後半〕
	・現地確認の手順整備 ・環境影響の評価方針の検討	・現地概略調査の手順整備 ・環境影響の評価方針の検討	・現地詳細調査の手順整備 ・環境影響の評価方針の検討
			
基盤研究での実施を期待する技術開発	概要調査段階に向けて	精密調査段階〔前半〕に向けて	精密調査段階〔後半〕に向けて
	—	—	—
			
NUMOが実施する技術開発	概要調査段階に向けて	精密調査段階〔前半〕に向けて	精密調査段階〔後半〕に向けて
	本段階における環境配慮の体系化	本段階における環境配慮の体系化	本段階における環境配慮の体系化

4.9 廃棄体とインベントリにかかわる技術開発

4.9.1 サイト選定段階の技術的实施事項

廃棄体とインベントリに関する技術開発は、サイトの選定の各段階前に整備すべきものではなく、安全規制の制度化の時期、廃棄物発生者の事業工程または NUMO の報告書（例えば予備的安全評価報告書）の作成時期に密接に関係しており、廃棄物発生者と協議を進めながら実施する必要がある。従って、各段階のジェネリックな技術開発では、その技術が必要となる概要調査段階と精密調査段階〔後半〕の時期に間に合うように実施する。精密調査段階〔前半〕には、本項目に関し必要な技術的实施事項はない。

(1) 概要調査段階

本段階の後半では、NUMO は概念設計と予備的安全評価を実施し報告書として取りまとめ、公表することとしている。

上記を実施するには、特に核種インベントリ情報（放射性核種の種類および放射能濃度などの情報）が重要であり、NUMO は評価に必要な放射性核種の選定、および予備的安全評価向けに廃棄物発生者から提供される核種インベントリの妥当性検証を実施する。

また、廃棄体製造に関しては、日本原燃の再処理工場では 2013 年 10 月竣工が予定されており（2013 年 3 月現在）、高レベル放射性廃棄物については、本格的な製造が開始される予定である。また、地層処分低レベル放射性廃棄物については、現在製造施設の設計に関する検討がなされている状況である。円滑な処分事業の実施に向けて、NUMO としては、廃棄体製造仕様に関する要求事項について早期に明確にし、必要に応じて廃棄物発生者に示しておくことが重要であるため、予備的な受入基準の検討を実施する。

(2) 精密調査段階〔後半〕

本段階の後に実施する事業許可申請（安全審査）およびその後段の廃棄体埋設時の確認申請に向け、NUMO は、安全評価に必要な重要核種の選定および廃棄物発生者から提供される重要核種インベントリの妥当性検証を実施するとともに、廃棄体の受入基準を策定する。

4.9.2 実施事項を遂行するために必要な技術

上記の実施事項を行うために、以下の技術が必要である。

(1) 概要調査段階

NUMO は、予備的安全評価に必要な放射性核種の選定方法を構築する必要がある。廃棄物発生者は、NUMO が選定した放射性核種に対する核種インベントリの設定方法を構築する必要がある。また NUMO は、廃棄物発生者が設定した核種インベントリの設定方法について、妥当性を検証する方法を構築する必要がある。

また、予備的な廃棄体受入基準値の設定方法の構築が必要である。

(2) 精密調査段階〔後半〕

事業許可申請（安全審査）および廃棄体埋設時の確認申請に向け、NUMO は安全評価のための重要核種の選定方法を構築する必要がある。廃棄物発生者は、NUMO が選定した重要核種に対する核種インベントリの設定方法を構築する必要がある。また NUMO は、廃棄物発生者が設定した重要核種インベントリの設定方法の妥当性を検証する方法を構築する必要がある。

また、NUMO は廃棄体の受入基準値の設定方法を構築する必要がある。

4.9.3 基盤研究などの状況

(1) 日本原子力学会

日本原子力学会は、旧原子力安全・保安院の要請により、「地層処分対象放射性廃棄物の品質マネジメント」特別専門委員会を立ち上げ、地層処分対象廃棄物（高レベル放射性廃棄物）の処分の観点で必要な品質特性などの検討を実施し、取りまとめている。

(2) 基盤研究

フェーズ 1, 2 では、TRU 廃棄体において重要と考えられる C-14 について、インベントリの合理的な設定方法や、放射化金属からの放出挙動評価に関する研究が進められている。

4.9.4 基盤研究などでの実施を期待する技術開発

設計や安全評価で用いる核種に関するインベントリ設定技術は、設定の妥当性の提示を含め必須となる。将来の安全審査や廃棄体埋設時の確認においては、廃棄物発生者から提供される核種インベントリの妥当性について、NUMO は申請者（処分側）として検証することが必要になると考えられる。そのためには、早い段階から廃棄物発生者と協議・調整・協力することが重要となる。検証に必要な技術のうち、重要核種の分析手法、放射能濃度決定方法などにかかわる計算コードの開発など、基礎的な研究開発が必要な内容については、事業者ではなく基盤研究側の支援があることが望ましい。

4.9.5 NUMO が実施する技術開発

(1) 概要調査段階に向けた技術開発

予備的安全評価に必要な放射性核種を選定するために、操業中および閉鎖後長期の安全性の観点を考慮したケーススタディの実施、および線量支配核種や影響の大きな核種の選出方法にかかわる検討を実施する。また、核種インベントリの検証方法の構築を行う。なお、廃棄物発生者が行う核種インベントリの設定方法に関する技術開発に対して、NUMO は安全評価上必要なニーズの提示などの技術協力を必要に応じて実施する。

日本原燃の再処理工場竣工時期を踏まえ、予備的な受入基準値の設定方法にかかわる検討の実施と、廃棄物発生者への要求事項の有無について検討する。

(2) 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

安全審査および廃棄体埋設時の確認申請に必要な重要核種を選定するために、廃棄体仕様、施設設計条件、サイト環境条件などを踏まえたケーススタディの実施、および線量影響の大きな核種の選出方法にかかわる検討を実施する。また、重要核種インベントリの検証方法を構築する。なお、概要調査段階同様、廃棄物発生者が行う核種インベントリの設定方法に関する技術開発に対して、NUMOは必要な技術協力を実施する。

また、処分場への受入基準の設定方法の構築にかかわる検討を実施する。

以上を表 4-11 にまとめる。

表 4-11 各段階に必要な技術と技術開発の実施内容（廃棄体とインベントリ）

	概要調査段階	精密調査段階〔前半〕	精密調査段階〔後半〕
NUMOの実施事項(廃棄体とインベントリ)	- 予備的安全評価に必要な放射性核種の選定 - 処分事業者の要求事項の明確化(廃棄体受入基準の予備検討)	—	- 安全審査および廃棄体埋設時の確認申請に必要な核種(重要核種)の選定 - 廃棄体受入基準の策定
↓			
	概要調査段階	精密調査段階〔前半〕	精密調査段階〔後半〕
実施事項を遂行するために必要な技術	- 予備的安全評価に必要な放射性核種の選定方法の構築(NUMO) - 核種インベントリの設定方法の構築(廃棄物発生者) - 予備的な廃棄体受入基準値設定方法の構築	—	- 安全審査および廃棄体埋設時の確認申請に必要な重要核種の選定方法の構築(NUMO) - 重要核種インベントリの設定方法の構築(廃棄物発生者) - 廃棄体受入基準値設定方法の構築
↓			
	概要調査段階に向けて	精密調査段階〔前半〕に向けて	精密調査段階〔後半〕に向けて
基盤研究での実施を期待する技術開発	—	重要核種の分析手法、放射性核種濃度などの決定にかかわる計算コードの開発など	重要核種の分析手法、放射性核種濃度などの決定にかかわる計算コードの開発など
↑			
	概要調査段階に向けて	精密調査段階〔前半〕に向けて	精密調査段階〔後半〕に向けて
NUMOが実施する技術開発	- 予備的安全評価の核種選出方法の検討 - 核種インベントリの検証方法の検討 - 予備的な廃棄体受入基準値の設定方法にかかわる検討	—	- 重要核種選出方法の検討 - 核種インベントリの検証方法の検討 - 廃棄体受入基準値の設定方法にかかわる検討

4.10 モニタリングにかかわる技術開発

4.10.1 サイト選定段階の技術的实施事項

事業者として実施するモニタリングは、下記の2つに分類できる。

- ・ 閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリング
- ・ 事業期間中の安全確保に関するモニタリング（放射線安全の確保、一般労働安全の確保、周辺環境の保全）

このうち、閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリングは、事業許可申請、事業期間中の安全レビュー、処分場閉鎖計画の申請、閉鎖措置の確認ならびに閉鎖後事業廃止までの期間の各段階で、意思決定を支援する情報を提供する役割を持つ。

事業期間中の安全確保に関するモニタリングは、操業段階で放射性物質を取り扱うため、環境放射線モニタリングの指針などに沿ったモニタリング、坑道内の作業安全や良好な作業環境の確保のためのモニタリング、事業の実施による周辺環境への影響などのモニタリングを実施する。なお、環境配慮に関する技術開発の内容については、先の「4.8 環境配慮にかかわる技術開発」に示している。

サイト選定の各段階では、地質環境モデルを作成し、次段階で得られる新たな情報によって、それらを更新していく。そのため、モニタリングで得られる地球科学的な情報（例えば、地下水の変動など）は、地質環境の理解を深めるための調査活動の一部としての役割を持つ。

また、モニタリングを実施することで地層処分に対する社会受容や信頼性の向上にも寄与する。以下にサイト選定各段階におけるモニタリングの実施事項を示す。

(1) 概要調査段階

地層処分事業におけるモニタリングの戦略を構築し、安全レビュー、処分場閉鎖計画申請、処分場閉鎖措置の各段階で意思決定を支援する情報を提供する方や、モニタリング期間、モニタリングデータの種類・保管方法などについて、計画を策定する。このうち、地下水流動場、地下水化学特性、自然放射能レベル、気象、水文などについては、初期ベースラインを把握するため、地上からのモニタリングを開始する。初期ベースラインは、概要調査段階から地下調査施設建設を経て、処分場閉鎖までの期間継続されるモニタリングの初期段階の情報を提供することになる。ここには周辺環境の保全に関する生態系のモニタリングが含まれる。

(2) 精密調査段階〔前半〕

地上からのモニタリングが継続される。地下調査施設建設によって地質環境が擾乱を受ける可能性があるため、その前の状態を把握しておくとともに、地質環境や周辺環境への影響を予測しておく。この段階で、地下調査施設でのモニタリングについて実施計画を策定する。なお、実施計画に沿った各要素技術については、深地層の研究施設などを活用し

て、技術の適用性、耐久性、交換性を確認しておく。

(3) 精密調査段階〔後半〕

地上からのモニタリングが継続される。この段階で、地上の環境放射線の初期状況を把握しておく。地上施設および地下施設でのモニタリング項目および実施方法について実施計画を策定する。地質環境および周辺環境については、地上施設および地下施設の建設に伴う影響を予測しておく。

地下調査施設の建設による地質環境の擾乱について把握する。また、建設に伴い発生する掘削土の管理や、地下水の処理・放出にかかわる周辺環境のモニタリングを開始する。

地下調査施設では、坑道内の作業環境（温度や粉塵など）や坑道の安定性など、一般労働安全の確保のためのモニタリングを開始する。また、放射性廃棄物を取り扱う前の環境放射線を把握しておく。また、閉鎖後長期の安全確保にかかわるモニタリングとして、地質環境特性の把握、多重バリアシステムの機能確認などに関するモニタリングを実施する。

4.10.2 実施事項を遂行するために必要な技術

上記の実施事項を遂行するために、以下の技術が必要である。適用する技術はその時点での最新技術を原則として利用する。

(1) 概要調査段階

地下調査施設の建設および処分施設の建設・操業・閉鎖に伴う地下水流動場、地下水化学特性、地表形状、微小地震活動などの変化の初期ベースラインを把握するための技術が必要である。また、自然放射線レベル、気象、水文ならびに周辺環境の保全に関するモニタリング技術が必要となる。これらのモニタリング技術は、主として既存技術を適用することから、適用性、耐久性ならびに交換性について、技術の実証を通じて事前に確認しておくことが必要である。

(2) 精密調査段階〔前半〕

地上からのモニタリングは、概要調査段階から継続して実施するため、基本的に概要調査段階のモニタリング技術を適用する。さらに、地下調査施設建設に伴う、地上の周辺環境への影響については、それらを計測する技術ならびに影響を予測する手法を準備する。なお、地下調査施設の建設に伴い発生する掘削土や地下水の管理にかかわる、地上の周辺環境をモニタリングする技術については、既存技術を適用することから、事前に適用性、耐久性ならびに交換性について確認しておくことが必要である。

この段階で、地下調査施設で実施するモニタリング項目および実施方法について実施計画を検討するため、地下坑道の安定性に関するモニタリング技術、また地質環境特性の把握や多重バリアシステム（人工バリアとニアフィールド岩盤）の機能確認など、地層処分

システムの長期安全性の評価にかかわるモニタリング技術の適用性検討が必要となる。なお、これら地下調査施設で適用するモニタリング技術については、この段階で、適用性、耐久性ならびに一部の技術についてはセンサーや電源などの交換性について、技術の実証を通じて事前に確認しておくことが必要である。

(3) 精密調査段階〔後半〕

地上からのモニタリングは、概要調査段階から継続して実施するため、基本的に概要調査段階のモニタリング技術を適用する。

この段階では、地上および地下の環境放射線の初期状況を把握するための技術、地下調査施設の掘削土や地下水の管理にかかわる地上の周辺環境をモニタリングする技術、坑道掘削作業に伴う一般労働安全の確保に関するモニタリング技術が必要になる。また、地上施設および地下施設の建設に伴う周辺環境への影響を予測する手法を準備する。

さらに、地下調査施設で実施する地下坑道の安定性に関するモニタリング技術、ニアフィールドの地質環境特性の把握や多重バリアシステム(人工バリアとニアフィールド岩盤)の機能確認などの地層処分システムの長期安全性評価にかかわるモニタリング技術が必要となる。

事業許可申請に向けて、事業期間中の地下調査施設または、必要に応じて地下施設におけるモニタリング計画を作成するため、関連する技術については、技術の実証を通じた事前の適用性確認が必要となる。

4.10.3 基盤研究の状況

基盤研究では、これまで以下に挙げる検討が進められてきた。

○ モニタリングの意義・位置付けと機器システムなど要素技術の調査・検討

国内外の動向調査を実施し、サイト選定から処分場閉鎖後の各段階における計測・モニタリングを対象に、地層処分におけるモニタリングの在り方について検討した。また、モニタリングシステム構築ならびに具体的な利用を勘案した技術メニューを高度化するとともに、人工バリアの性能確認に資するモニタリングの重要性と制約条件を提示した。一部技術については、バリア機能を阻害しないモニタリング技術の開発を目的として、通信技術、機器システムなど要素技術の調査とフィジビリティ研究を実施した。また、記録保存の精度、事例調査とシステム要件を検討した。

○ 深地層の研究施設でのモニタリング技術開発

地上からのモニタリングとして、地下坑道掘削時における地下水流動特性や地下水化学特性などのモニタリング、騒音、振動、水質、動植物などの環境モニタリングを実施した。また、深地層の研究施設内で地下坑道の覆工に及ぼす地震の力学的影響に関するモニタリング研究を実施した。

4.10.4 基盤研究での実施を期待する技術開発

これまでの基盤研究（フェーズ 1, 2）の進捗などを踏まえ、今後の NUMO の事業展開に有益となる以下の研究開発を進める。

(1) 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発

- 地下水長期モニタリング（地下水流動特性、地球化学特性、装置の長期耐久性確認）
地上および深地層の研究施設の坑道内での地下水長期モニタリングを行い、地下水流動特性、地球化学特性の状態を把握する技術について開発し、システムの適用性、装置の長期耐久性ならびに交換頻度などに関する知見を取得する。
- モニタリングシステム構築ならびに具体的な利用を勘案した技術メニューの高度化
ベースラインモニタリングの実施に際しては、その時点の最新のセンサーおよび計測装置を採用する。そこで、要素技術のフィジビリティ調査によって整備された技術メニューを参照して、高度化する要素技術を用いたモニタリングシステムの構築を検討する。また、記録保存方法についての検討を行う。

(2) 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

- モニタリングの意義・位置付け、パラメータ、計測通信装置の検討
地下坑道内で実施するモニタリングの意義・位置付けについて検討する。また、海外の先行事例を参考にして、測定するパラメータの種類、精度、実施期間などを抽出する。取得したデータの通信技術、機器システムなど要素技術の調査とフィジビリティ研究を実施する。
- 坑道掘削に並行した地上からのモニタリング
NUMO の地下調査施設建設によって、地下水位や地球化学などの地質環境特性が擾乱を受けることが考えられる。そのために、現在の深地層の研究施設および周辺地域を対象に、坑道掘削による擾乱前の状態を把握しておくとともに、地質環境や周辺環境（騒音、振動、水質、動植物）への影響予測技術を整備する。
- 坑道を利用したモニタリング
坑道を掘削したことで変化する地下水流動特性や地下水の地球化学特性については、地層処分システムの長期安定性に関連するため、長期モニタリングを継続し、その結果を反映して、地質環境の地球科学的な理解を深める。また、地質環境モデルの妥当性確認に適用する。また、深地層の研究施設を用いて、地震などによる坑道覆工の影響や健全性の評価を行う。
- 人工バリアシステムの機能・閉鎖後長期の安全性に関するモニタリング技術
地下調査施設または処分坑道において、人工バリアシステム（緩衝材、埋め戻し材、プラグなど）が本来の機能を発揮することをモニタリングによって確認することで、システムの機能および閉鎖後長期の安全性に関する情報を取得する検討を行う。各種モニ

タリング技術の選択肢，機器寿命に伴う交換性や配置などについても検討し，人工バリアシステムの長期性能の確認について，工学試験を通じて検討する。

○ 制度的管理，回収可能性にかかわるモニタリング

地層処分事業の信頼感醸成への寄与を視野に入れて，廃棄体回収の判断に資する発端事象，回収の意思決定にかかわる基準の策定，ならびに回収可能性維持にかかる事象のモニタリング項目と手法の整備，さらに，処分場閉鎖後のモニタリング項目および手法の整備に関する検討を進める。

4.10.5 NUMO が実施する技術開発

NUMO は，既存のモニタリング技術と，基盤研究で適用性が確認された技術や取得された知見を組み合わせ，各段階におけるモニタリングの計画策定と実施に向けた技術開発に適用する。具体的な内容を以下に示す。

(1) 概要調査段階に向けた技術開発

NUMO は，既存のモニタリング技術と，基盤研究で適用性が確認された個別のモニタリング技術，ならびにシステムの適用性，装置の長期耐久性や交換頻度，記録の保存方法などに関する知見を組み合わせ，地上からのベースラインモニタリングの計画策定と実施に適用する。

○ 地層処分事業におけるモニタリング戦略検討

地層処分事業におけるモニタリングの戦略を構築するため，安全レビュー，処分場閉鎖計画申請，処分場閉鎖措置の確認などの各段階における意思決定への支援も念頭におきながら，事業の各段階におけるモニタリングの位置付けについて検討を加える。これを踏まえて，概要調査段階から実施するモニタリング期間，モニタリングデータの種類・保管方法などについて概略の計画を策定する。

(2) 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発

NUMO は，既存のモニタリング技術と，基盤研究で適用性が確認された技術や知見を組み合わせ，地上からのモニタリングの計画策定と実施に適用する。

○ 調査ボーリング孔を利用した地下水モニタリングの実証

地上からのモニタリング技術として，精密調査段階の近接したボーリング掘削の影響を把握するために，地下水特性の初期ベースラインの継続観測による技術の実証を行う。

○ 地表形状，微小地震活動などの変化の初期状態を把握するためのモニタリング技術の実証

精密調査地区において，地下調査施設および地下施設の建設に伴う地下水位などの変化に付随した地表変状，微小地震活動について，その初期状況から変化を把握する技術を整備する。

○ 初期ベースラインの把握に関する知見の取得

静穏な状況から、近接ボーリングの影響などを加味した、初期ベースラインのモニタリングデータが示す場の地球科学的な意味を理解し、閉鎖後長期の安全性確保に関する知見を取得する。

○ モニタリング結果の提示方法など社会科学との連携検討

地上および地下調査施設で取得するモニタリングの結果について、国民への提示方法について検討する。地層処分の安全性への理解を促進する効果的な社会的な手法を整備する。

○ 放射線安全確保および周辺環境の保全に関するモニタリング技術の実証

処分施設建設地ならびにその周辺地域について、環境放射線の初期状態ならびにその変化、変動を把握する技術を整備し、実証する。

(3) 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

NUMO は、既存のモニタリング技術と、基盤研究で高度化され、適用性が確認された技術や知見を組み合わせ、地下調査施設でのモニタリングの計画策定と実施に適用する。

○ 地下調査施設におけるモニタリングの在り方と実施方法の検討

基盤研究で実施される地下坑道内でのモニタリングの意義・位置付けに関する検討、および計測・通信に関する要素技術のフィジビリティ研究などの成果を踏まえて、地下調査施設におけるモニタリングの在り方（目的、必要性）や、その実施方法ならびに実施期間などについて検討する。

○ 多重バリアシステムの機能・長期安全性の評価に関するモニタリング技術の実証

基盤研究で実施される人工バリアシステムに対するモニタリング技術開発などの成果を踏まえて、地下調査施設または地下施設において、多重バリアシステム（人工バリアとニアフィールド岩盤）の機能および長期安全性の評価に関するデータを取得するモニタリング技術を実証する。ただし、詳細は今後の地下調査施設の在り方および地下施設でのモニタリングの必要性に関連して検討する。

○ 地下調査施設における環境放射線・一般労働安全モニタリング技術の検討および実証

地下調査施設における環境放射線の初期状態を把握する技術を検討し、実証する。また、地下施設の建設、操業、埋め戻しなどの作業に関連して、地下調査施設の建設に伴う一般労働安全に関するモニタリング技術を検討し、実証する。

以上を表 4-12 にまとめる。

表 4-12 各段階で必要な技術と技術開発の実施内容（モニタリング）

NUMOの実施事項(モニタリング)	概要調査段階	精密調査段階〔前半〕	精密調査段階〔後半〕
	・地上からのモニタリング計画の策定 ・初期ベースラインモニタリング	・地上からのモニタリング ・地下調査施設建設による周辺環境への影響予測 ・地下調査施設でのモニタリング計画策定 ・地下調査施設で用いるモニタリング技術の適用性検討	・地上からのモニタリング（継続） ・環境放射線の初期状態把握 ・地上施設および地下施設建設に伴う周辺環境の影響予測 ・地下調査施設建設に伴う地質環境の擾乱把握、および掘削土、地下水処理・放出にかかわるモニタリング ・地下調査施設でのモニタリング ・地層処分システム長期安全性の評価にかかわるモニタリング ・地上施設および地下施設でのモニタリング計画策定
実施事項を遂行するために必要な技術	概要調査段階	精密調査段階〔前半〕	精密調査段階〔後半〕
	・地上からの初期ベースライン把握技術 ・初期ベースライン把握技術の実証 ・周辺環境保全のモニタリング技術	・地上からのモニタリング技術 ・地上の周辺環境への影響予測手法 ・周辺環境の影響把握技術の実証 ・地下調査施設でのモニタリング技術 ・地下調査施設で適用する技術の実証 ・モニタリング結果の提示方法	・地上からのモニタリング技術 ・環境放射線モニタリング技術 ・周辺環境の影響予測手法 ・地下調査施設でのモニタリング技術 ・地下施設（処分坑道）で適用する技術の実証 ・環境保全モニタリング技術 ・地下調査施設での一般労働安全確保モニタリング技術
基盤研究での実施を期待する技術開発	概要調査段階に向けて	精密調査段階〔前半〕に向けて	精密調査段階〔後半〕に向けて
	開発終了	・要素技術のフィジビリティ調査 ・モニタリングパラメータ・技術メニュー整備 ・記録の保存方法 ・地上および坑道内での地下水長期モニタリング技術 ・周辺環境への影響予測手法	・地下坑道でのモニタリングの意義検討、パラメータ・計測通信装置検討 ・坑道掘削に並行した地上からのモニタリング技術 ・坑道を利用したモニタリング技術 ・人工バリアシステム機能と閉鎖後長期安定性に関するモニタリング技術 ・制度的管理・回収可能性にかかわるモニタリング技術
NUMOが実施する技術開発	概要調査段階に向けて	精密調査段階〔前半〕に向けて	精密調査段階〔後半〕に向けて
	・モニタリング戦略検討 ・地下水モニタリング技術の実証	・地下水モニタリング技術の実証 ・地表面形状・微小地震活動モニタリング技術の実証 ・初期ベースライン把握の知見取得 ・モニタリング結果の一般社会への提示手法検討 ・放射線安全確保および周辺環境保全に関するモニタリング技術の実証	・地下調査施設でのモニタリング実施方法検討 ・多重バリアシステム機能・長期安定性評価に関するモニタリング技術実証 ・環境放射線および一般労働安全確保のためのモニタリング技術の検討と実証

第5章 NUMO 中期技術開発計画

前章で述べた 20 年程度に及ぶサイト選定段階全体を対象とした技術開発の進め方を踏まえて、本章では NUMO の中期技術開発計画（2013～2017 年度）について述べる。

5.1 中期技術開発計画策定の基本方針

2.2 で述べたように、至近に文献調査が開始され、順調に概要調査、精密調査へと進捗したとしても事業に必要な技術が遅滞なく準備できるよう、NUMO は次のようなスケジュールを設定して、ジェネリックな技術開発を進める。

- ・ 概要調査段階に向けた技術開発：2013 年度頃に終了
- ・ 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発：2017 年度頃に終了
- ・ 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発：2021 年度頃に終了

なお、サイト・スペシフィックな技術開発については、文献調査が開始され、サイト条件が特定された後に実施する。

2013～2017 年度の 5 年間は、以下の基本方針で技術開発を進める。

5.1.1 概要調査段階に向けた技術開発

「第 3 章 サイト選定段階の技術開発の概要」でも述べたように、概要調査段階に向けた技術開発は概ね終了している。2013 年度終了に向け、現時点での技術を体系化し、必要に応じて体系化された技術の実証を行い、本段階に向けたジェネリックな技術開発を終了する。至近に文献調査が開始され、サイト・スペシフィックな技術開発が必要となった場合は、ジェネリックな技術開発に引き続いて実施する。

5.1.2 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発

上記のとおり、精密調査段階〔前半〕に向けたジェネリックな技術開発は、原則として 2017 年度に完了することを目標とする。本段階に向けては、精密調査計画の策定と地表からの調査技術、さらには同段階〔後半〕の実証試験に向けて、技術オプションの選定に関するジェネリックな技術開発を中心に実施する。

個別技術を整備するために、地質環境調査技術などの既存技術や評価手法の適用性検討や、地層処分に特有な技術（人工バリア施工技術など）の開発を実施する。その後、ジェネリックな技術開発成果を統合し、総合的な技術実証や試行的な設計、安全評価解析などを実施し、精密調査段階の業務に適用できるよう、一連の技術体系として整備する。

5.1.3 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

精密調査段階〔後半〕に向け、開発に長期を要する技術については、今後 5 年間のうちに開発に着手する。本段階に実施する地下調査施設での地質環境調査や工学技術の実証に向けて、今後の技術開発の計画を策定するために、実証試験の内容や、適用する技術を検

討する。

5.1.4 事業推進にかかわる技術検討

最新の社会情勢や、信頼感醸成などの観点から必要となる事業推進にかかわる検討は、サイト選定段階に依存せず実施する。

上記の基本方針に基づく、今後5年間の基本的な技術開発スケジュールを表5-1に示す。

表5-1 各調査段階に対する今後5年間の技術開発スケジュール

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	...
文献調査段階に向けた技術開発	完了済み						
概要調査段階に向けた技術開発	ジェネリックな技術開発						調査・設計等の実務
精密調査段階[前半]に向けた技術開発	ジェネリックな技術開発					サイト・スペシフィックな技術開発	
精密調査段階[後半]に向けた技術開発	ジェネリックな技術開発						
事業推進にかかわる検討	ジェネリックな技術検討						
基盤研究開発のスケジュール	フェーズ2 (精密調査前半に向けて)	フェーズ2(強化)					
		フェーズ3(精密調査後半に向けて)					

5.1.5 技術分野の区分

第4章では、技術開発の具体的内容を抽出しやすくするため、技術分野を9分野に細分して検討した。本章で示す今後5年間の中期技術開発計画については、関連性の深い技術分野における各技術開発項目の年度展開や相互関係を見やすくするため、表5-2に示すように第4章の技術分野を幾つかのカテゴリーに括って示す。

表 5-2 技術分野のカテゴリーの関係

第4章 サイト選定段階に対する技術開発			第5章 NUMO の中期技術開発計画	
4.2.5	自然現象の影響	⇒	5.2	地質環境の調査・評価
4.3.5	地質環境特性の把握			
4.4.5	人工バリアの設計・施工	⇒	5.3	工学的対策
4.5.5	地下施設の設計			
4.6.5	安全評価	⇒	5.4	閉鎖後長期の安全性評価
4.7.5	安全設計	⇒	5.5	事業期間中の安全確保
4.8.5	環境配慮			
4.9.5	廃棄体とインベントリ	⇒	5.6	廃棄体とインベントリ
4.10.5	モニタリング	⇒	5.7	モニタリング
			5.8	事業推進にかかわる検討

5.2 地質環境の調査・評価

4.2.5 および 4.3.5 を踏まえ、NUMO が開発すべき地質環境の調査・評価にかかわる技術としては、以下のものがある。

- 自然現象の影響にかかわる調査・評価技術（4.2.5 に対応）
 - ・ 考慮事項策定・調査計画立案にかかわる検討
 - ・ 調査・評価技術の体系化（自然現象の長期影響評価技術を含む）
 - ・ 情報・品質管理技術の整備
- 地質環境特性の把握にかかわる調査・評価技術（4.3.5 に対応）
 - ・ 考慮事項策定・調査計画立案にかかわる検討
 - ・ 調査・評価技術の体系化・実証
 - ・ 情報・品質管理技術の整備

なお、「考慮事項策定・調査計画立案にかかわる検討」および「情報・品質管理技術の整備」については、自然現象の影響と地質環境特性の把握をあわせて実施することから、これらの中心となる地質環境特性の調査・評価技術において記述する。

5.2.1 概要調査段階に向けた技術開発

信頼性高く効率的な概要調査の実施に向けて、考慮事項策定にかかわる検討、これまで整備してきた調査・評価技術の体系化・実証、および情報・品質管理技術の整備を 2013 年度までに終える。その成果に基づき、概要調査計画立案手引書などの整備を終了する。具体的には、以下のとおりである。

(1) 自然現象の影響にかかわる調査・評価技術

○ 調査・評価技術の体系化

地殻変動の視点を踏まえた隆起量評価のために、山地・山脈における指標地形面の分布、形成年代に関する情報、および測地データなどの短期的な地殻変動の傾向を解析する。また、指標地形面の地形的特徴を踏まえた侵食量評価を目的とし、指標地形面が多く存在する山地・山脈を対象に侵食様式の解析や地形面の特徴の定量化などを行う。さらに、概要調査において、隆起・侵食量評価に要する地形の抽出ならびに過去の変遷に関する情報を得るための調査・解析手法について検討を行う。

これまでに 10 万年を超える期間と地層処分場規模の領域の影響評価を行う手法として、確率論的評価手法を取り入れ、プレート運動の変遷に伴い生じ得る影響シナリオの構築方法を検討してきた。今後、概要調査に向けた手法の実用化および信頼性向上を目的に、隆起・沈降を対象とした評価手法の改良、専門家の意見集約手法の適用、地質環境の長期安定性の観点から見たより適切な地域の評価に関する検討を行う。

これまでに、安全評価に向けたモデルやパラメータ設定への反映を目的として、自然現象の長期変動が地下深部の地質環境特性に及ぼす影響について、文献情報の整理を行ってきた。今後、国内外の専門家の協力を得て長期の状態変遷に関する情報を取得し、概要調査段階の予備的な安全評価に向けてパラメータを設定する際の目安などに関する検討を行う。

以上の成果と基盤研究の成果、ならびに最新の科学的知見を加味し、これまで構築してきた概要調査における自然現象の影響の調査・評価技術の体系の拡充を図る。

(2) 地質環境特性の把握にかかわる調査・評価技術

○ 考慮事項策定・調査計画立案にかかわる検討

精密調査地区選定上の考慮事項については、これまでに法定要件および自主基準による除外要件、相対比較の評価基準を検討してきた。そのうち、処分システムに影響を及ぼす自然現象や地質環境特性などについては、その科学技術的背景や根拠について専門家の意見を踏まえて検討してきた。特に断層破砕帯については、精密調査地区選定の手順に沿って評価の試行を行い、評価対象となる断層を選定する手順・基準・目安値に関する検討や、地下施設への力学的・水理学的影響を評価する手法についての検討を行う。2013 年度には、関連する技術開発の成果を踏まえ、精密調査地区選定上の考慮事項の検討を終える。

調査計画については、これまでに概要調査（陸域・海域の地質調査・評価）の手法・仕様・配置・組み合わせ、および工程・費用、現場管理などに関する情報を収集・整理し、概要調査実施計画や概要調査計画立案実務手引書の骨子を検討してきた。2013 年度は、調査内容の精査、費用・工程の精緻化などの観点から上記骨子を基にさらに検討を進めていく。

○ 調査・評価技術の体系化・実証

母岩の隔離・遅延機能の評価の観点から、断層の水理特性を把握する調査・評価手法を検討してきた。2013 年度には、LBNL（ローレンスバークレー国立研究所）との共同研究の成果を取りまとめ、概要調査段階での断層の水理特性を把握する調査・評価手法を体系化することを目標とする。得られた成果を用いて、概要調査計画策定および概要調査での断層水理特性調査に適用する。

策定予定の精密調査地区選定上の考慮事項に照らして、著しい自然現象の影響を受ける地域を除外・回避した上で母岩の候補となる領域を抽出するために、水理的観点から処分施設を設置する対象となる母岩としての適性を評価する手法を整備する。そのために、結晶質岩および堆積岩について、不確実性を考慮した地質環境モデルに基づき、地下水の移行時間などの指標により評価する方法を整備しておく。

概要調査で使用する既存の調査技術・評価手法については、2011 年度までに主要技術の実証を終え、適用性や技術的課題について検討してきた。これらの技術・手法に加えて、基盤研究で高度化された技術についても適用性の検討を行い、概要調査の開始までに体系化しておく。検討結果は、概要調査計画の策定および合理的な調査の実施に適用する。

○ 情報・品質管理技術の整備

文献調査段階で取得したデータおよび地質環境モデルをもとに、概要調査で新たに取得したデータを加えて、モデルの妥当性検討およびモデルの更新を実施する。そのためには、現地調査段階にて高品質かつ信頼性の高い情報を管理する技術（調査マニュアル、手順書）の整備を目標とする。そして、概要調査開始前までに、管理技術を整備し、追跡性を担保したデータ管理システムを完成させる。

これまでに、品質マネジメントの国際規格 ISO9001 に準拠した品質保証体系を構築し、現地調査に対応できるシステムを構築した。このシステムの文書体系のうち、品質保証基準、各種要領書、品質計画にかかわる手引書の拡充を実施してきた。2013 年度は、これまで構築してきた文書体系を、概要調査の目的の一つである地質環境モデル構築まで拡張し、概要調査段階の品質マネジメントシステムを完成させる。

5.2.2 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発

精密調査段階〔前半〕に向けては、2017 年度をジェネリックな技術開発の最終年度として、それまで検討を進めてきた技術開発成果に基づいて、地質環境の調査・評価技術の体系化を図る。その成果は、精密調査計画立案の手引書に反映する。

(1) 自然現象の影響にかかわる調査・評価技術

○ 調査・評価技術の体系化

隆起・侵食量の評価に向けて、精密調査段階〔前半〕で得られるより詳細な情報に基づく地形変化について検討する。地球科学研究における最新の知見も踏まえ、隆起・侵食量の評価に必要な地形の抽出ならびに過去の変遷に関する情報を得るための調査・解析手法について検討を行う。

より信頼性の高い安全評価シナリオ構築に向けて、最新の科学的な知見を加え、これまで行ってきた自然現象に伴う地質環境特性への長期的影響を評価するための手法を改良する。さらに、別途検討を進めてきた超長期の自然現象の確率論的評価手法と統合し、総合的かつ体系的な評価手法を構築する。

(2) 地質環境特性の把握にかかわる調査・評価技術

○ 考慮事項策定・調査計画立案にかかわる検討

これまでに精密調査地区選定上の考慮事項を検討してきた。この検討過程で、処分システムに影響を及ぼす自然現象や地質環境特性などについては、その背景や根拠となる科学技術的成果を取りまとめ、外部専門家のレビューを受けてきた。本検討でも処分施設建設地選定段階の要件について同様の検討を行う。

その一環として、断層破碎帯の影響の評価に向けて、評価対象となる断層を選定する手順・基準・目安値に関する検討、地下施設への力学的・水理学的影響を評価する手法について検討する。

精密調査段階〔前半〕において、処分施設の基本レイアウトの決定に向け、人工バリアや処分パネルのレイアウトなどの設計を見直し、廃棄体および人工バリア材の運搬・定置にかかわる検討および長期安全性の評価を行う。このため、地上からの調査（精密な物理探査、ボーリング孔間試験など）の手法・仕様・配置・組み合わせ、および工程・費用、現場管理などに関する情報を収集・整理し、精密調査前半の実施計画および計画立案実務手引書の策定に適用する。

○ 調査・評価技術の体系化・実証

精密調査段階の地上からの調査では、概要調査技術の他に、三次元物理探査技術、ボーリング孔間調査・試験技術、地質環境モデルの精緻化など、調査・評価の精度および信頼性向上を図る。精密調査で使用する調査技術・評価手法については、合理的な精密調査計画の策定および効率的な調査の実施を目標として、精密調査開始前までに体系化しておく。

精密調査段階で使用する、三次元探査技術、ボーリング孔間調査・試験技術、地質環境モデルの精緻化などの調査技術については、主要な技術の適用性と調査結果の信頼性を使用前に確認・評価するために実証が必要となる。このため 2012 年度より、それらの

技術の適用性に関する現地確認を進めている。2013 年度からは新たに掘削した調査ボーリングと既存孔との間で、孔間調査・試験を実施し、取得したデータをもとに地質環境モデルの精緻化検討を実施する。さらにボーリング孔閉塞技術についても適用性を実証する。

精密調査地区から処分施設建設地を選定する際には、小規模な断層や破碎帯の水理的影響を考慮する。ここでは、概要調査段階で体系化した断層水理特性の調査技術・評価手法を精密調査段階で適用できる精度まで向上させることを目標として、断層の水理特性把握に有効な手法の整備を行う。このうち主要な手法については、これまでの断層水理特性の検討で蓄積されたデータが活用できるサイトを用いた実証を行い、精密調査開始までに、技術の適用性と検出限界などの整理を行う。ここで得られた成果は、精密調査の計画策定と調査の実施に適用する。

○ 情報・品質管理技術の整備

精密調査段階では、本段階特有の三次元探査、ボーリング孔間調査・試験、モデルの高精度化などを含めた地質環境データを管理する技術（調査マニュアル、手順書）の整備が必要となる。そのため、精密調査開始前までに、これらを整備することを目標として、これまでの概要調査段階の管理技術を見直し、高精度で追跡性を担保したデータ管理システムを完成させる。

精密調査段階〔前半〕では、三次元探査技術やボーリング孔間の調査技術・評価手法を適用する。そのため、これらの調査・評価における品質管理にかかわる手引書の拡充を目標とする。概要調査段階の品質マネジメントシステムに本検討結果を加え、精密調査段階まで適用できる品質マネジメントシステムを精密調査開始前までに整備する。

5.2.3 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

精密調査段階〔後半〕に向けては、主要な技術である地下調査施設での調査・試験手法について、2014 年度までに基礎検討、2016 年度までに計画手引書作成にかかわる検討、2017 年度より地質環境の調査・評価技術の体系化・実証を行う。その成果は、精密調査計画（地下調査施設での調査計画）立案の手引書に反映する。自然現象の影響の調査・評価技術については、基盤研究の成果および科学的知見の拡充を踏まえた既存技術の改良が主となることから、2018 年度以降に開始する。

(1) 自然現象の影響にかかわる調査・評価技術

○ 調査・評価技術の体系化

自然現象の長期影響評価手法については、事業許可申請に向けた評価を行うことから、より信頼性の高い安全評価シナリオを構築するために、それまでのすべての検討成果と最新の科学的知見を統合し、総合的かつ体系的な評価手法を構築する。本技術開発は、

2018 年度以降に実施する。

(2) 地質環境特性の把握にかかわる調査・評価技術

○ 調査計画立案にかかわる検討

地下調査施設での調査・評価技術については、国内外の先行事例を踏まえ、計画立案に関する基礎的な検討を 2011 年度より開始した。これまでの 2 ヶ年に、欧州諸国の実施主体が地下研究所で実施してきた調査・試験、実証に関する規模、実施体制、内容やその成果の自国の地層処分計画に対する反映などについて、情報収集してきた。また、わが国の地下調査施設で行うべき調査・試験項目についても 2012 年度より基礎検討を開始した。2014 年度までにこれらの情報・検討成果を集約し、精密調査段階〔後半〕での調査・試験方法について取りまとめる。

なお、精密調査段階〔後半〕で掘削する坑道で遭遇した場合の断層については、除外・回避について判断するとともに、工学的対策および安全評価上の取り扱いについて検討する必要がある。そのために、手順・基準・目安値に関する検討や、断層破碎帯の地下施設への力学的・水理学的影響を評価する手法について検討を行う。

調査計画立案手引書についても同様に、上記の地下調査施設での調査・試験に関する検討の結果を踏まえ、早い段階から検討を進めておく必要がある。また、地下調査施設で実施する調査・試験・評価方法は、精密調査段階〔後半〕の開始前までに計画を策定する必要がある。このため、本検討は 2015 年度より開始する。本検討では、地下調査施設での調査計画を作成するに当たり、地質調査・評価の手法・仕様・配置・組み合わせ、および工程・費用、現場管理などに関する情報を収集・整理し、精密調査実施計画策定に反映する。精密調査計画立案手引書は、3 ヶ年程度で整備を完了することを目標とする。

○ 調査・評価技術の体系化・実証

地下調査施設で使用する調査技術は、地上からの精密調査技術に比べてさらに高精度となる。合理的な地下調査施設での調査を実施するために、地下研究所や室内試験による技術の適用性確認および実証が必要となる。本検討では、地下調査施設で適用する技術の体系化と実証を目標として、地下調査施設での調査開始前までに検討を完了する。調査・評価技術によっては、調査の実施に相当の時間を要する技術があることから、技術評価に必要な十分なリードタイムをとるため、2017 年度を目処に体系化・実証に向けた検討を開始する。

○ 情報・品質管理技術の整備

精密調査段階〔後半〕では、坑道掘削中の調査および地下調査施設での調査に伴い、取り扱う情報量が飛躍的に増加する。そのため、これらの調査・評価における品質管理にかかわる手引書の拡充を目標とする。概要調査段階の品質マネジメントシステムに本検

討結果を加え、精密調査段階まで適用できる品質マネジメントシステムを、精密調査段階〔後半〕の開始前までに整備する。

また、地下調査施設で得られる高精度な調査・試験結果、モデルの高精度化などを含めた地質環境データを管理する技術（調査マニュアル、手順書）の整備が必要となる。そのため、地下調査施設での調査開始前までに、これらを整備することを目標として、それまでの地上からの調査段階の管理技術を見直し、高精度で追跡性を担保したデータ管理システムを完成させる。本技術開発は、2018年度以降に実施する。

以上の技術開発について、今後5年間の実施項目と開発工程を表5-3に示す。

表 5-3 今後5年間の実施項目と技術開発工程（地質環境の調査・評価）

段階	項目	2013	2014	2015	2016	2017
概要調査段階 に向けた技術 開発	自然現象の影響にかかわる調査・評価技術	調査・評価技術の体系化				
	地質環境特性の把握にかかわる調査・評価技術	調査・評価技術の体系化・実証				
	自然現象の影響にかかわる調査・評価技術	考慮事項策定・調査計画立案にかかわる検討				
	地質環境特性の把握にかかわる調査・評価技術	情報・品質管理技術の整備				
精密調査段階 〔前半〕に向け た技術開発	自然現象の影響にかかわる調査・評価技術	調査・評価技術の体系化				
	地質環境特性の把握にかかわる調査・評価技術	調査・評価技術の体系化・実証	ボーリング孔間試験技術実証			
	自然現象の影響にかかわる調査・評価技術	考慮事項策定・調査計画立案にかかわる検討			断層影響評価技術実証、地表からの精密調査技術体系化	
	地質環境特性の把握にかかわる調査・評価技術	情報・品質管理技術の整備				
精密調査段階 〔後半〕に向け た技術開発	自然現象の影響にかかわる調査・評価技術	調査・評価技術の体系化				(2018年度以降に実施)
	地質環境特性の把握にかかわる調査・評価技術	調査・評価技術の体系化・実証				
	自然現象の影響にかかわる調査・評価技術	調査計画立案にかかわる検討	地下調査施設における調査・試験方法の基礎検討			
	地質環境特性の把握にかかわる調査・評価技術	情報・品質管理技術の整備			精密調査計画立案手引き検討	(2018年度以降に実施)

5.3 工学的対策

4.4.5 および 4.5.5 を踏まえ、NUMO が開発すべき工学的対策の設計・施工にかかわる技術としては、以下のものがある。

○ 人工バリアの設計・施工技術（4.4.5 に対応）

- ・ バリア材の長期挙動評価を踏まえた人工バリアの設計手法の整備
- ・ 閉鎖後の所定期間の閉じ込め機能を付加した廃棄体パッケージの開発
- ・ 人工バリアの製作・定置および回収技術の整備

○ 地下施設の設計技術（4.5.5 に対応）

- ・ 候補母岩選定、地下施設設置位置設定のための技術の整備
- ・ 地下施設の基本レイアウト設計技術の整備

なお、バリア材の長期挙動評価に関しては、「5.4 閉鎖後長期の安全性評価」におけるシナリオ・モデル・データの設定にもかかわるものである。このため、当該評価技術は、安全評価と連携を取りつつ主として本分野で整備するとともに、評価結果を安全評価の前提条件設定などに反映させる具体的手順と方法を整備する。

5.3.1 概要調査段階に向けた技術開発

概要調査段階に向けては、2013 年度をジェネリックな技術開発の最終年度として、これまで検討を進めてきた技術開発成果に基づいて、概念設計に必要な技術の体系化を図る。概念設計に必要な技術としては、人工バリアの設計手法、事業期間中の安全設計を含めた地下施設の設計手法、地上施設の設計手法に大別される。ここでは、閉鎖後長期の安全性確保の観点からの工学的対策に着目し、人工バリアの設計手法と地下施設の設計手法を取り上げる。成果は、処分場の概念設計手引書として取りまとめる。

(1) 人工バリアの設計・施工技術

2012 年度までに得られた人工バリアの長期挙動に関する科学的知見や、所要の性能を達成できる見込みがある人工バリアの施工技術オプションの開発成果を踏まえ、人工バリアの基本仕様設定や有望な施工技術の選定に必要な情報を整備する。そして、これらを概念設計に取り込み、設計技術の体系化を図ることを目標として、以下の技術開発を実施する。成果は処分場の概念設計手引書に反映する。

○ バリア材の長期挙動評価を踏まえた人工バリアの設計手法の整備

2013 年度までに、人工バリアの設計技術として必要な要件の網羅的かつ体系的な整備を行い、人工バリア設計の具体的手順と方法を明確にして、概念設計手引書へ反映させる。ここでは、要件に適合する判断指標を整理した上で、人工バリアの材料選定や仕様設定方法との関連付けを明確にすることに力点を置く。そして、この段階に向けた技術開発を完了させる。

人工バリアの長期挙動の設計への反映に関しては、これまでの基盤研究成果などに基づき、地質環境特性や材料間の相互作用に応じて人工バリアの長期挙動と性能変化を関係付けた評価方法を整理し、評価結果を人工バリアの設計に反映する方法を提示する。なお、ここでの人工バリアの長期挙動の評価は、周辺岩盤も含めた系での評価を対象とする。

○ 閉鎖後所定期間の閉じ込め機能を付加した廃棄体パッケージの開発

地層処分低レベル放射性廃棄物の廃棄体製造から地層処分までを総合的に見た合理的な安全性確保の実現を目標として、廃棄体および廃棄体パッケージそれぞれに対する要求事項を整理する。さらに、その要求事項を満足するような廃棄体パッケージの基本仕様を検討する。

○ 人工バリアの製作・定置および回収技術の整備

2012年度までに、基盤研究で実施された人工バリア施工や回収に関する要素技術の開発成果や、NUMOで実施したPEM概念の高度化などの成果が得られている。これまで、人工バリアの製作・施工技術の技術オプションの整備を進め、10種類あった概念と技術オプションの組み合わせから、多様な操業環境への適用性と操業安全性、長期安全性の確保のやり易さの観点から有望な組み合わせを3つに絞り込んだ。今後はこれまでの取り組みの成果を踏まえて、有望な技術の組み合わせとさらなる絞り込みの方向性を提示するものとし、概要調査段階に向けての新たな技術開発は実施しない計画である。

(2) 地下施設の設計技術

2012年度までに実施してきた候補母岩の評価に関する検討や、基盤研究の成果として示された設計フローなどの成果を踏まえ、地下施設を設置するのに好ましい候補母岩選定の方法を整備する。また、放射性物質の移行抑制に対して有利な施設配置の設定方法を検討し、基本レイアウトの設定方法を整備する。そして、これらを概念設計に取り込み、設計技術の体系化を図ることを目標として、以下の技術開発を実施する。成果は処分場の概念設計手引書に反映する。

○ 候補母岩選定技術の整備

地下施設設置に好ましい候補母岩を選定するための要件を明確にし、要件への適合性を判断するための指標を整理する。そして、候補母岩としての適性評価と選定の方法を明確にする。

○ 基本レイアウトの設計技術の整備

2013年度までに、設計に必要な要件の網羅的かつ体系的な整備を行い、地下施設の基

本レイアウトを設計するための具体的手順と方法を明確にして、概念設計手引書へ反映させる。そして、この段階に向けた技術開発を完了させる。

5.3.2 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発

精密調査段階〔前半〕に向けては、2013年度までに工学技術を体系的に整備した設計手引書の試行などを通じて、2017年度までに基本レイアウト決定に向けた基本設計技術の体系化を図ることを目標として、以下の技術開発を実施する。

(1) 人工バリアの設計・施工技術

人工バリアの設計・施工技術に関しては、2017年度までに、基本設計の方法の明確化や、人工バリア施工技術や回収技術の選定に必要な論拠を整備することを目標として、以下の技術開発を実施する。

○ バリア材の長期挙動評価を踏まえた人工バリアの設計手法の整備

2013年度までに作成する概念設計手引書に基づいて、試行的な設計を安全評価と連携して実施することで、基本設計方法の具体化における課題を抽出し、必要な改良を加えていく。その上で、2017年度までにジェネリックな基本設計手引書の作成を目指す。

手引書の作成においては、地上からの精密調査において、人工バリアの基本設計を実施する上で取得すべき地質環境特性（特に地下水化学特性）などの調査項目を明らかにし、精密調査計画（前半）に反映できるようにする。また、人工バリア長期挙動と性能変化を周辺岩盤を含めた体系で定量的に評価することによりニアフィールドの状態変遷を予測し、人工バリアの基本仕様の決定に反映する。このために、基盤研究成果をもとに事業者として長期挙動評価モデルを選定してその解析コードを開発し、解析に必要なパラメータ類に関する特性データ群を整備する。なお、モデルの選定に際しては、試行的な設計や、後述する人工バリア施工技術の整備の結果などを反映する。また、人工バリア材料や残置物の数量などを具体的に設定して評価を行い、あわせて実施する変質試験などの結果を用いて、評価結果の保守性を考慮してモデルの適用性を確認する。

以上を実施することにより、精密調査を対象としたジェネリックな人工バリアの基本設計の整備を着実に進める。

○ 閉鎖後所定期間の閉じ込め機能を付加した廃棄体パッケージの開発

2013年度までに検討する、廃棄体パッケージの基本仕様をもとに、地質環境情報の拡充を考慮に入れた最適化に向けた検討を実施する。

○ 人工バリアの製作・定置および回収技術の整備

精密調査段階〔前半〕に向けては、後半の地下調査施設における人工バリア施工技術

の実証を視野に入れ、技術開発を効率的に実施するために、現在の技術オプションから、さらに 1 種類程度にまで絞り込む。絞り込んだ結果は、基本レイアウトの決定や地下調査施設での実証試験計画に反映する。

そこで、2013～2015 年度に人工バリア施工技術の絞り込みのために、現状ある 3 種類の技術オプションの技術的な比較検討を実施し、実現性や安全性に加え、回収のやり易さなども考慮して、最も有望な施工技術を選定する。2015 年度以降については、絞り込みの結果に基づいてあらためて技術開発計画を策定し、地下調査施設での実証を開始するまでに、地上において要素技術の開発、関連装置の設計と試作、全体システムの動作確認を実施する。また、あわせて、施工品質や残置物などが閉鎖後長期の安全性に影響を与える可能性を検討するために、ニアフィールドの状態設定にも上記の検討結果を反映する。

(2) 地下施設の設計技術

地下施設の設計技術に関しては、2017 年度までに、基本設計の中で地下施設設置位置設定や基本レイアウト決定の方法を整備することを目標として、以下の技術開発を実施する。これらを踏まえて、地下調査施設の設計技術や、工学的な湧水抑制対策（グラウチングなど）の設計技術に関する検討は、2018 年度以降に実施する。

○ 地下施設設置位置設定技術の整備

概要調査に向けたジェネリックな検討段階までに整備した設計手引書の試行を安全評価と連携して行うとともに、更新された地質環境情報の設計への反映方法を明確にするために、手引書の改良を適宜実施していく。ここでは、概要調査段階に向けた技術開発で整備した候補母岩選定技術に対して、地質環境情報の拡充と安全評価との連携試行を通じて地下施設設置位置の精度向上の方法を整備する。整備した方法は、最終的に基本設計手引書として取りまとめる。

○ 基本レイアウト更新技術の整備

概要調査段階に向けた技術開発で整備した基本レイアウト設定技術に対して、地質環境情報の拡充と安全評価との連携試行を通じて基本レイアウトの更新方法を整備する。この際、別途の検討から得られる人工バリアの基本仕様、仕様を具現化するための施工技術や回収技術を基本レイアウトに反映する方法を明確にする。整備した方法は、最終的に基本設計手引書として取りまとめる。

5.3.3 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

精密調査段階の後半では、地下調査施設を建設し、処分場スケールでのより詳細な地質環境情報を取得するとともに必要な実証を行う。工学技術の分野で必要な実証は、大別し

て次の二つがある。一つは、ニアフィールドで生起する現象の予測の妥当性確認と評価方法の検証であり、これによって人工バリアの基本仕様の具現化や安全評価に用いる状態設定やシナリオなどの前提条件の確からしさを向上させる。もう一つは、人工バリアの施工や回収技術の実証であり、これによって技術の実現性を明示するとともに、品質保証体系を整備する。

このため、精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発としては、詳細な地質環境情報に基づいてバリア材の長期挙動を踏まえた人工バリアの仕様や地下施設の仕様を確定させるための設計技術や、地下調査施設で実施する実証などの試験による品質保証体系の整備が必要である。

人工バリアの設計、施工、回収技術の準備には相当の時間を要することから、地下調査施設における人工バリアの実証試験に関する基礎的な検討を 2011 年度より開始している。これまで、国内外の地下研究所における既往の人工バリア実証試験事例について、調査・試験内容やその規模、自国の地層処分計画に対する成果の反映方法などの情報収集を行ってきた。また、わが国の地下調査施設で行うべき実施事項についても 2012 年度より基礎検討を開始した。2013～2017 年度の 5 年間には、精密調査段階〔後半〕に向けたジェネリックな技術開発として、地下調査施設における実施事項の位置付けや目的を整備するとともに、品質保証体系の整備に必要な検討に着手する。なお、地下施設の設計にかかわる技術開発に関しては、2017 年度を目途に作成する処分場の基本設計手引書を受けて、地下施設の仕様確定に向けた設計方法の検討を 2018 年度以降に実施する。

(1) 人工バリアの設計・施工技術

2013～2017 年度の 5 年間は、地下調査施設における実施事項とその目標を整備することに主眼を置き、以下の事項に取り組む。

○ バリア材の長期挙動評価を踏まえた人工バリアの設計手法の整備

バリア材の長期挙動評価を踏まえた人工バリアの設計手法については、2017 年度を目途に作成する処分場の基本設計手引書を受けて、2018 年度以降に実施する。

○ 人工バリアの製作・定置および回収技術の整備

2014 年度までに、地下調査施設における人工バリアの製作・定置技術の実証を目的とした実施事項の整備や、海外の地下研究所の活用を含めた先行的な実証試験の検討を実施する。また、2016 年度以降は、これらの成果や、精密調査段階〔前半〕に向けた人工バリア施工技術の選定結果などを踏まえて、人工バリア製作・定置および回収技術を実証するための方法、手順を設定する。また、品質管理項目、検査方法・手順などの品質保証体系の整備に向けた検討を行う。なお、海外の地下研究所を活用した先行的な実証試験の実施可能性やその有効性が確認された場合、2015 年度以降にその具体化を検討す

る。

(2) 地下施設の設計技術

2017 年度を目途に作成する処分場の基本設計手引書を受けて、地質環境特性を考慮した地下施設の仕様確定に向けたより詳細な設計方法、設計の妥当性を確認するための方法(地下調査施設における実施事項など) の検討を 2018 年度以降に実施する。

以上の技術開発について、今後 5 年間の実施項目と開発工程を表 5-4 に示す。

表 5-4 今後 5 年間の実施項目と技術開発工程（工学的対策）

	項目	2013	2014	2015	2016	2017
概要調査段階 に向けた技術 開発	人工バリアの設計・ 施工技術	人工バリア材の長期挙動 評価を踏まえた人工バリ アの設計手法の整備	ニアフィールド長期 挙動の設計への反映に かかわる情報整備 概念設計手引書 の整備			
		閉鎖後所定期間の閉じ込 め機能を付加した廃棄体 パッケージの開発	廃棄体製造と地層処分を 総合的に勘案した廃棄体 パッケージへの要求事項の 整理と基本仕様の検討			
		人工バリアの製作・定置 及び回収技術の整備	(2012年度までにPEM概念の 高度化を実施済み)			
	地下施設の 設計技術	候補母岩選定技術の整備	候補母岩の評価 に関する検討（JAEAとの共同研究で実施）			
		基本レイアウト設計技術 の整備	概念設計手引書 の整備			
精密調査段階 〔前半〕に向け た技術開発	人工バリアの設計・ 施工技術	人工バリア材の長期挙動 評価を踏まえた人工バリ アの設計手法の整備	手引書に基づく設計・安全評価の連携の試行 ニアフィールド状態設定の信頼性向上 試行等を通じた基本設計手引書の 整備			
		閉鎖後所定期間の閉じ込 め機能を付加した廃棄体 パッケージの開発	廃棄体パッケージ基本仕様の最適化に向けた検討			
		人工バリアの製作・定置 及び回収技術の実証	人工バリアの施工技術の選定に関する技術課題検討 (回収技術の検討も含む)			
	地下施設の 設計技術	地下施設設置位置 設定技術の整備	手引書に基づく設計・安全評価の連携の試行 試行等を通じた基本設計手引書の 作成			
		基本レイアウト更新 技術の整備	手引書に基づく設計・安全評価の連携の試行 試行等を通じた基本設計手引書の 作成			
		地下調査施設設計技術	(2018年度以降に実施)			
	人工バリアの設計・ 施工技術	人工バリア材の長期挙動 評価を踏まえた人工バリ アの設計手法の整備	(2018年度以降に実施)			
		人工バリアの製作・定置 及び回収技術の整備	地下調査施設における実施事項の 整備 先行的な実証試験(実施する場合) 人工バリア施工技術の実証および 品質保証体系の整備に必要な検討			
精密調査段階 〔後半〕に向け た技術開発	地下施設の 設計技術	詳細レイアウト設計技術と 妥当性確認方法の整備	(2018年度以降に実施)			

5.4 閉鎖後長期の安全性評価

4.6.5 を踏まえ、NUMO が開発すべき閉鎖後長期の安全性評価にかかわる技術としては、以下のものがある。

- 安全評価の実施技術
 - ・ シナリオ・モデル・データの設定技術
 - ・ 被ばく経路の設定と評価技術（生物圏評価技術）
- 安全性の論拠の統合技術
 - ・ 安全評価における不確実性の取り扱い技術の整備
 - ・ セーフティケース構築に資するための安全性の論拠の整備

5.4.1 概要調査段階に向けた技術開発

概要調査段階に向けては、予備的安全評価書を作成するために、JAEA と共同で実施している設計・性能評価の高度化検討など、これまで検討を進めてきた技術開発成果に基づいて、2013 年度までに安全評価技術の体系化を図る。

予備的安全評価においては、対象となる空間的領域（精密調査地区の候補となる空間的領域）において、適用する人工バリアなどの処分オプション間の比較、評価対象となる岩盤の処分場としての適格性を評価する必要がある。その際、空間的な大きさに比較して調査データが少ないことによる不確実性や、長期にわたる時間スケールに起因する不確実性を適切に取り扱う必要がある。これらは、地質環境調査技術や人工バリアの長期変遷評価技術に依存することから、これらの研究や技術開発成果を踏まえ、予備的安全評価の技術としてまとめる必要がある。

また、生物圏での核種の挙動に関しては、地下深部の環境の時間的な変遷に比較して、地表環境の時間的な変遷がより不確実であると予想される。そのため、評価手法に関する国際的な動向も踏まえて、予備的安全評価に向けた評価手法とデータセット設定手法の体系化を行うこととする。

なお、サイト調査段階を通じて、安全規制に対応するための安全確保に関する基本的考え方の策定や、廃棄体の製作・受入基準に関する検討が必要であり、これらは予備的安全評価にも反映する（受入基準に関しては、「5.6 廃棄体とインベントリ」を参照）。その際、関連事業にかかわる国の動向などにも留意しておくことが重要である。

(1) 安全評価の実施技術

予備的安全評価における実施内容と実施手順の明確化を目的として、以下の技術開発を実施する。

- シナリオ・モデル・データの設定技術
概要調査段階において取得されると予想される地質環境データや、これまでの人工バ

リア材料の長期挙動、ニアフィールドの状態設定に関する検討結果、FEP⁷データベース、既存施設の安全評価における評価の枠組みを踏まえ、予備的安全評価で用いるシナリオの抽出方法や区分の方法をまとめる。また、各シナリオについて定量的な安全評価解析を実施するためのモデルや解析コードの所在、およびその整備状況、さらには、解析に必要なデータセットを構築するための基礎データとなる熱力学データベースなどの所在や整備状況、使用方法についてまとめ、シナリオ設定から評価・解析に至るまでの一連の手法と手順を予備的安全評価の手引書としてまとめる。なお、FEP データベースなどの基礎情報に関しては、次段階以降においても継続的に整備を続ける。

○ 被ばく経路の設定と評価技術（生物圏評価技術）

概要調査段階に向けた準備としては、表層環境や人間の生活様式の変遷の不確実性を考慮し、多様な環境条件に対応できるように、データの取得方法や様式化の方法と、定量評価を実施するために必要となるデータやデータベースの評価への適用方法をまとめ、予備的安全評価の手引書に記載する。

(2) 安全性の論拠の統合技術

予備的安全評価の信頼性を確保することを目的に、以下の技術開発を実施する。

○ 安全評価における不確実性の取り扱い技術の整備

人工バリア材料の長期挙動評価の不確実性や天然バリアにおける調査結果の不確実性を、シナリオ設定やモデル設定、データセット設定に反映させることを目的として、これまでの技術開発結果や基盤技術の開発成果（性能評価手法の高度化）をまとめ、予備的安全評価の手引書にまとめる。

○ セーフティケース構築のための安全性の論拠の整備

予備的安全評価結果の信頼性を確保するために、シナリオ設定やモデル設定、データセット設定のそれぞれについて説明性の高い論拠をまとめ、評価の追跡性と透明性を確保する必要がある。このために、シナリオやモデル、データセットの設定の方法論と、評価に用いるデータを構造的にまとめる手法の構築を行い、予備的安全評価の手引書に反映させる。

また、地層処分低レベル放射性廃棄物に関しては、処分の安全性に関する検討を継続し、安全性に関する論拠の信頼性を向上させる。

⁷ 地層処分システムの各要素の特性（Feature）、特性に影響を与える事象（Event）、地層処分システムの時間的変遷の過程（Process）の略称。

5.4.2 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発

精密調査段階からは、安全審査に向けて、モデルやデータおよびデータの論拠を整備することとなる。論拠はセーフティケースの一部として構築することとなることから、品質管理の体系も含めセーフティケース構築のためのフレームを準備する。

安全審査の段階までのデータの増加に伴い、繰り返し安全評価が実施されるものと予想される。そのため、安全規制などの動向を踏まえ、安全審査を念頭に精密調査段階〔前半〕での安全評価の在り方について検討を実施し、精密調査段階〔前半〕での安全評価手法についての技術開発を実施する。

また、概要調査段階で特定される影響の大きな不確実性について、これを低減するための評価方法や統計的な処理方法に関する技術開発については、評価に必要な地質調査項目や調査技術の検討と併せて進めることとなる。

以下の技術開発に関しては、その時点での技術開発成果を踏まえ、継続的に更新を続ける必要がある。今後5年間は、基礎的な検討と準備を進めるものとする。

(1) 安全評価の実施技術

精密調査段階〔前半〕においては、概要調査における評価結果の確認と安全審査に向けた評価手法の枠組みの構築を目的として、以下の技術開発を実施する。

○ シナリオ・モデル・データの設定技術

概要調査手引書の内容をベースに、地質環境調査などのデータの増加と安全規制などの動向を踏まえた安全性の論拠の構築を想定し、この段階での安全評価に向けた評価の手順について検討を行う。安全評価手順について概略をまとめ、この手順に従い、安全評価モデルの構築に必要な FEP データベースや現象論的解析モデル、解析コード、熱力学・収着データベース、生物圏評価に必要なデータベースを含め、定量的評価の実施体系（モデルチェインの構築）の整備に着手する。ここに整備されるモデルやコード、データベースに関しては、セーフティケースの構築において要求される品質管理を実施する。また、ニアフィールド状態設定の信頼性向上や設計・性能評価の高度化検討などを行い、これらの検討を通じた知見の拡充に伴い更新するものとする。

○ 被ばく経路の設定と評価技術（生物圏評価技術）

生物圏の評価技術の更新においては、地質環境特性などの長期変遷を踏まえたモデル化手法について検討を実施し、安全評価マニュアルの検討やモデルチェインの検討・整備に反映させる。

(2) 安全性の論拠の統合技術

安全審査を念頭に、精密調査段階〔前半〕において反復的に実施される安全評価の実施

内容と実施手順について、データ取得量の増加を想定し、以下の技術開発を実施する。

○ 安全評価における不確実性の取り扱い技術の整備

本段階では、概要調査段階に比べて評価対象とする領域が限定される。従って、取得データの増加に伴い取得されたデータの処理方法や不確実性の取り扱い方法は、評価すべき対象の空間的スケールや評価の目的の点で、概要調査段階での評価とは異なったものになると予想される。性能評価手法の高度化などで検討する内容を中心として、不確実性を低減するためのデータ取得方法、処理方法について検討を実施し、これをモデルチェーンの構築検討やセーフティケース構築のための整備に反映させる。また、精密調査段階〔後半〕においては、廃棄体スケールでの母岩性能についての評価が必要と考えられることから、評価スケールの詳細化にともない精度を上げるべきデータなどに関する評価方法の技術開発を行い、モデルチェーンに反映させる。

○ セーフティケース構築のための安全性の論拠の整備

安全性の論拠は、データの増加や知見の拡充ごとに更新することが必要となる。ニアフィールドの長期挙動の検討や性能評価手法の高度化、地質環境調査・評価技術の進展を踏まえたシナリオやモデル、データの設定技術の改良を行う。

5.4.3 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

(1) 安全評価の実施技術

精密調査段階〔後半〕では、安全審査に向けた安全評価手法を確立することを目的とする。

○ シナリオ・モデル・データの設定技術および、被ばく経路の設定と評価技術（生物圏評価技術）

シナリオ・モデル・データの設定技術としては、廃棄体スケールでの核種移行評価に向けた検討を実施する。そのために、地下調査施設において取得されるデータの種類や質を想定し、これを用いた定量的評価が可能となるモデルチェーンが必要となる。これらのモデルチェーンの統合に必要となる技術開発は、2018年度以降に実施する。

○ 安全確保の基本的考え方の構築

関連事業の指針類策定の動きや、安全評価の枠組みとの整合性を勘案しつつ、シナリオ構築などに必要となる安全確保の基本的考え方の構築する。本検討については、安全審査に向けて継続的な動向把握とその対応が必要となることから、2013年度から継続して実施する。

(2) 安全性の論拠の統合技術

精密調査段階〔後半〕では、安全審査に向けた安全評価の論拠をまとめることを目的とした技術開発を行う。

○ 安全評価における不確実性の取り扱い技術の整備

適切な廃棄体の定置位置などの詳細な評価を地下施設の設計に反映するためには、廃棄体スケールでの地下水流動などの評価が必要となるため、地下水流動モデルの検証や、地下調査施設で取得されると予想されるデータの不確実性を定量化する技術を開発する必要がある。これに向けて、2015 年度以降、地下調査施設におけるモデル検証やデータの取得に対する計画を整備する。

○ セーフティケース構築のための安全性の論拠の整備

データや知見の充実に従い、精密調査段階〔前半〕で構築されるセーフティケースを更新する必要がある。これらに関する技術開発については、精密調査段階〔前半〕に対する開発終了後の 2018 年度以降に実施する。

以上の技術開発について、今後 5 年間の実施項目と開発工程を表 5-5 に示す。

表 5-5 今後 5 年間の実施項目と技術開発工程（閉鎖後長期の安全性評価）

	項目		2013	2014	2015	2016	2017		
概要調査段階 に向けた技術 開発	安全評価の 実施技術	シナリオ・モデル・データ の設定技術	予備的安全評価 手引書の整備						
			性能評価手法の 高度化						
			ニアフィールド長期 挙動の性能評価への 反映にかかわる情報整備						
	安全性の論拠の 統合技術	被ばく経路の設定と評価 技術(生物圏評価技術)	予備的安全評価 手引書の整備						
		安全評価における不確実 性の取り扱い技術の整備	予備的安全評価 手引書の整備						
			セーフティケース構築のた めの安全性の論拠の整備	性能評価手法の 高度化					
精密調査段階 〔前半〕に向 けた技術開発	安全評価の 実施技術	シナリオ・モデル・データ の設定技術	安全評価マニュアルの整備						
			モデルチェーンの整備						
			性能評価手法の高度化						
			ニアフィールド状態設定の信頼性向上						
	安全性の論拠の 統合技術	被ばく経路の設定と評価 技術(生物圏評価技術)	安全評価マニュアルの整備						
		安全評価における不確実 性の取り扱い技術の整備	モデルチェーンの整備						
			セーフティケース構築のた めの安全性の論拠の整備	セーフティケース構築のための整備					
		低レベル放射性廃棄物 安全性検討							
		精密調査段階 〔後半〕に向 けた技術開発	安全評価の 実施技術	シナリオ・モデル・データ の設定技術	(2018年度以降に実施)				
				被ばく経路の設定と評価 技術(生物圏評価技術)	(2018年度以降に実施)				
安全確保の基本的 考え方の構築	閉鎖後長期における安全確保の基本的考え方の構築								
安全性の論拠の 統合技術	安全評価における不確実 性の取り扱い技術の整備		地下調査施設におけるモデル検証、データ取得計画 の整備						
	セーフティケース構築のた めの安全性の論拠の整備								
			(2018年度以降に実施)						

5.5 事業期間中の安全確保

4.7.5 や 4.8.5 を踏まえ、NUMO が開発すべき事業期間中の安全確保にかかわる技術としては、以下のものがある。

- 安全設計技術（4.7.5 に対応）
 - ・ 安全設計方針の作成
 - ・ 耐震設計手法の整備
- 環境配慮にかかわる技術（4.8.5 に対応）
 - ・ 環境配慮に対する調査手順、影響把握などの手順書の整備

5.5.1 概要調査段階に向けた技術開発

(1) 安全設計技術

- 安全設計方針の作成

概念設計技術を構成する放射線安全に対する安全確保の考え方を取りまとめることで、安全設計方針の作成を 2012 年度に完了している。成果は、「5.3 工学的対策」で述べた概念設計手引書の一部に反映する。

- 耐震設計手法の整備

概念設計技術を構成する耐震設計の手順を取りまとめることで、耐震設計手法の整備を 2012 年度に完了している。成果は、「5.3 工学的対策」で述べた概念設計手引書の一部に反映する。

(2) 環境配慮にかかわる技術

概要調査段階での環境配慮の体系化に必要な以下の技術開発を実施する。概要調査段階の体系化は、環境影響評価法改正の動向を踏まえた対応が必要となることを反映し、2013 年度中に完了させる。

- 環境状況調査の手順整備

各環境要素（大気環境、水環境、土壌環境、動物・植物・生態系、廃棄物・温室効果ガス）に関して、既存技術を適用して、文献調査における事業の影響の把握をもとにした状況調査に関する手順を検討する。

- サイト選定段階の環境配慮に関する検討

概要調査段階で実施する各環境要素に関する予測や評価などの技術的手法について、予備的検討を行う。

○ 廃棄物由来の有害物質の検討

廃棄体から発生する非放射性の有害物質そのものの環境影響に関して、今後の法改正などによる対応の必要性が明確になった際に速やかに対応できるよう、関連事業の検討状況を踏まえながら、地層処分対象廃棄物に含まれる有害物質を予備的に抽出するとともに、評価方法などに関する予備的な検討を実施する。

なお、本検討は2013年度までに終了する。今後は、関連法改正の動向などに合わせて、必要に応じて技術開発を実施する。

5.5.2 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発

(1) 安全設計技術

基本設計技術を構成する耐震設計、および安全設計方針作成のために必要な以下の技術開発を実施する。

○ 安全設計方針の作成

放射線安全に対する安全確保の考え方（概要調査段階の技術開発成果）に基づいて、地下施設の基本レイアウトに対する放射線安全のための管理区域の設定方法や、地震以外の自然災害、および火災・爆発などに関する安全設計方針の作成を目的として技術開発を実施する。成果を基本設計手引書の一部に反映させるために、2014年度に着手し2015年度までの2年間で技術開発を完了させる。基本設計のうち、安全設計の実施に必要な安全設計方針を作成することを技術開発目標とする。

○ 耐震設計手法の整備

概念設計のための耐震設計技術は、既往技術を用いた保守的な考え方に基づいている。精密調査段階〔前半〕では、施設の基本レイアウトや決定した人工バリア仕様に合わせた耐震安全性評価に適用するため、信頼性向上や合理化を目的とした技術開発を実施する。成果を基本設計手引書の一部に反映させるために、2013年度に着手し2015年度までの3年間で技術開発を完了させる。基本設計のうち、耐震設計の実施に必要な耐震解析の方法、設計用地震力の設定方法、および耐震安全性の評価基準を示すことを技術開発目標とする。

(2) 環境配慮にかかわる技術

2014年度より、精密調査段階〔前半〕での環境配慮の体系化に必要な以下の技術開発を実施する。

○ 環境状況調査の手順整備

各環境要素（大気環境、水環境、土壌環境、動物・植物・生態系、廃棄物・温室効果

ガス) に関し、既存技術を適用して、応募地区周辺の概略の状況調査に関する手順を整備する。

○ サイト選定段階の環境配慮に関する検討

精密調査段階〔前半〕で実施する技術的手法（各環境要素に関する予測および評価）について、体系化を行う。なお、この段階で実施する地下調査施設が環境に与える影響の把握についても併せて体系化する。

5.5.3 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

(1) 安全設計技術

基本設計技術を構成する以下の技術開発を実施する。

○ 安全設計方針の作成

精密調査段階〔前半〕の技術開発成果を活用できるので、精密調査段階〔後半〕に向けては、ジェネリックな技術開発は実施しない。

○ 耐震設計手法の整備

地層の傾斜や褶曲構造が地震動の伝播に及ぼす影響を考慮した、処分坑道支保と周辺岩盤の耐震安全性評価のための技術開発を 2018 年度以降に実施する。

○ 安全確保の基本的考え方の構築

東北地方太平洋沖地震や東京電力福島第一原子力発電所事故の発生を踏まえた地層処分の安全性に関する総合的な評価（5.8.1 参照）の検討成果や、国および他の原子力事業者の動向も踏まえて、操業期間中における安全確保の基本的考え方の構築に関する検討を、2013 年度以降、継続して実施する。これにより安全設計の技術開発にフィードバックする事項が具体化すれば、必要に応じて対応していく。

(2) 環境配慮にかかわる技術

本段階での環境配慮の体系化に必要な以下の技術開発を 2014 年度より実施する。

○ 環境状況調査の手順整備

各環境要素（大気環境、水環境、土壌環境、動物・植物・生態系、廃棄物・温室効果ガス）に関し、既存技術を適用して、処分施設建設予定地周辺の状況調査に関する手順を整備する。

○ サイト選定段階の環境配慮に関する検討

精密調査段階〔後半〕で実施する技術的手法（各環境要素に関する予測および評価）について、体系化を行う。

以上の技術開発について、今後5年間の実施項目と開発工程を表5-6に示す。

表 5-6 今後5年間の実施項目と技術開発工程（事業期間中の安全確保）

	項目	2013	2014	2015	2016	2017
概要調査段階 に向けた技術 開発	安全設計技術	耐震設計手法の整備	概念設計手引書 への一部反映			
		安全設計方針の作成	(2012年度までに実施済み)			
	環境配慮に かかわる技術	環境現況調査の手順整備	環境状況調査の手順検討			
		サイト選定段階の環境 配慮に関する検討	サイト選定段階の 環境配慮に関する検討			
		廃棄物由来の有害物質の 検討	有害物質の予備検討			
精密調査段階 〔前半〕向け 技術開発	安全設計技術	耐震設計手法の整備	地下施設の耐震設計手法の信頼性向上・合理化 試行等を通じた基本設計手引書の 作成(適切な工学的対策)			
		安全設計方針の作成	操業期間中の安全確保のための設 計方針などの策定			
	環境配慮に かかわる技術	環境現況調査の手順整備	環境状況調査の手順整備			
		サイト選定段階の環境 配慮に関する検討	サイト選定段階の 環境配慮に関する検討			
精密調査段階 〔後半〕向け 技術開発	安全設計技術	耐震設計手法の整備	(2018年度以降に実施)			
		安全確保の基本的 考え方の構築	操業期間中における安全確保の基本的考え方の構築			
	環境配慮に かかわる技術	環境現況調査の手順整備	環境状況調査の手順整備			
		サイト選定段階の環境 配慮に関する検討	サイト選定段階の 環境配慮に関する検討			

5.6 廃棄体とインベントリ

4.9.5 を踏まえ、NUMO が開発すべき廃棄体とインベントリにかかわる技術としては、以下のものがある。

5.6.1 概要調査段階に向けた技術開発

概要調査段階に実施する概念設計および予備的安全評価に向け、NUMO は安全評価に必要な核種の選定方法および核種インベントリの検証方法の構築が必要になり、廃棄物発生者としては核種インベントリの設定方法の検討が必要になる。これらに必要な技術は、NUMO が「概念設計と予備的安全評価に関する報告書」を作成する概要調査の終わり頃までには整備しておく必要がある。

また、円滑に処分事業を実施するためには、将来の地層処分場への受入基準についても早期に検討を開始しておくことが必要である。特に日本原燃の再処理工場が 2013 年 10 月に竣工予定であることを踏まえると、速やかに受入基準の予備検討を実施し、製造者への要求事項がないかを検討しておくことが重要である。

以上を考慮して、2013～2017 年の 5 ヶ年においては、主に予備的安全評価に用いる核種選定方法の検討、核種インベントリの検証、廃棄物発生者が実施する核種インベントリ設定方法にかかわる研究開発への技術協力、および廃棄体に関する処分施設への影響評価および受入基準の予備的な検討を実施する。廃棄物発生者と協議・調整を実施しながら、NUMO 側の要求事項を明確化することで合理的に事業を進める。

○ 予備的安全評価に用いる核種選定方法の検討

概要調査の段階においては、概念設計と予備的安全評価を実施する。この段階に得られる限られた情報の中で安全評価を行うためには、用いる核種を合理的な範囲で保守的に設定することが重要である。そのために、安全評価上支配的になる可能性のある核種の選定方法を事前に整備しておく。

○ 核種インベントリの検証

概念設計と予備的安全評価のために廃棄物発生者から提供される核種インベントリの妥当性について、NUMO は事業主体として検証することが重要である。そのために、検証方法にかかわる技術を整備する。

○ 受入基準の予備的な検討

上記再処理工場の竣工に伴い、高レベル放射性廃棄物の本格的な製造が開始される予定である。また、地層処分低レベル放射性廃棄物の製造については、その施設設計について現在検討がなされているところである。一方、概念設計と予備的安全評価の実施に際しては、特に設計に大きく影響を与えるようなパラメータなどについては、製造前も

しくは初期までに廃棄物発生者に対して要求事項を明確に示しておくことが重要であることから、受入基準を予備的に検討する。

5.6.2 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

精密調査段階〔後半〕の次に実施する事業許可申請（安全審査）およびその後段の廃棄体埋設時の確認申請に向け、NUMO としては安全評価のための重要核種選定方法および重要核種インベントリ検証方法の構築が必要になる。また、廃棄物発生者としては重要核種インベントリの設定方法の検討が必要になる。重要核種は、規制対象になるものであり、新たな分析手法などについての研究開発が必要になった場合には、技術開発に5年以上かかる可能性がある。加えて、日本原燃の再処理工場の竣工時期を踏まえると、早急に廃棄体受入基準の見通しを得ておき、安全規制対象になり得る核種を予備的に選出し、廃棄物発生者に提示しておくことは、将来の許認可を円滑に進めるためにも重要である。

以上を考慮して、2013～2017年の5ヶ年においては、主に安全審査などに用いる重要核種選定方法の予備検討および廃棄物発生者の実施する重要核種インベントリ設定方法にかかわる研究開発への技術協力を実施する。そして、廃棄物発生者と協議・調整を実施することで、合理的に事業を進めることに注力する。

○ 安全審査などに用いる重要核種選定方法の予備的な検討

精密調査段階〔後半〕の次には、事業許可申請と安全審査が実施される。事業許可申請に記載される核種は、後段の廃棄体の埋設確認申請核種にもなり得るものであり、予備的安全評価で抽出した核種に対し、より重要な核種を精緻に選定することが必要となる。本格検討については2018年度以降に実施するものの、核種の選定結果によっては分析方法などの開発が新たに発生する可能性もあることから、技術開発などの期間も考慮し、現時点で予備的に重要核種選定方法の検討と、重要核種の予備抽出をしておく。

以上の技術開発の実施内容について、今後5年間の実施項目と開発工程を表 5-7 に示す。

表 5-7 今後 5 年間の実施項目と技術開発工程（廃棄体とインベントリ）

	項目	2013	2014	2015	2016	2017
概要調査段階 に向けた技術 開発	予備的安全評価に用いる核種 選定方法の検討	予備的安全評価向けの核種選定 方法の検討			日本原燃で廃棄体の本格製造が開始 する予定であることから、この段階で ・予備的安全評価向け ・事業許可申請向け の2つの観点で、検討を実施する。	
		線量支配核種および影響の大きな 核種の抽出				
	核種インベントリの検証方法の検討				核種インベントリの検証	
	廃棄体受入基準の予備的検討	高レベル放射性 廃棄物				
		地層処分低レベル放射性廃棄物				
精密調査段階 〔後半〕に向け た技術開発	安全審査などに用いる重要核種 選定方法の検討	安全審査向けの重要核種選定方法 の予備検討			(本格検討は2018年度以降に実施)	
		核種の予備抽出			(本格検討は2018年度以降に実施)	
	核種インベントリの検証方法の検討				(2018年度以降に実施)	
	廃棄体受入基準の検討	高レベル放射性廃棄物			(2018年度以降に実施)	
		地層処分低レベル放射性廃棄物			(2018年度以降に実施)	

5.7 モニタリング

4.10.5 を踏まえ、NUMO が開発すべきモニタリングにかかわる技術としては、以下のものがある。

5.7.1 概要調査段階に向けた技術開発

この段階では、現地調査で掘削するボーリング孔を利用したモニタリングを開始する。そのために、概要調査開始前までに初期ベースラインモニタリングの戦略を構築し、ベースラインを把握する技術を整備しておく。このうち、概要調査段階の地下水ベースラインモニタリング技術の実証は、2011 年度に実施している。

○ 地層処分事業におけるモニタリング戦略検討

安全レビュー、処分場閉鎖計画申請、処分場閉鎖措置の確認などの各段階における意思決定への支援も念頭に置きながら、事業の各段階におけるモニタリングの位置付けについて検討を加える。これを踏まえて、概要調査段階から実施するモニタリング期間、モニタリングデータの種類・保管方法などについて概略の計画を策定する。

5.7.2 精密調査段階〔前半〕に向けた技術開発

○ 調査ボーリング孔を利用した地下水モニタリングの実証と初期ベースラインに関する知見の整備

地上からのモニタリング技術として、概要調査技術の実証で掘削したボーリング孔内の地下水ベースラインモニタリングを 2012 年度から継続して実施している。精密調査段階〔前半〕を想定した実証では、近接するボーリング孔の掘削が地下水特性の初期ベースラインに与える影響を把握する。また、降水量や地震活動などによる地下水位や地下水化学特性の変動傾向を把握するためのモニタリングを継続し、初期ベースラインのモニタリングデータが示す場の地球科学的な意味を理解するとともに、長期安全性の評価にかかわる知見を取得する。これらを通じて、精密調査段階における初期ベースラインの把握技術を整備する。

○ 地表形状、微小地震活動などの変化の初期状態を把握するためのモニタリング技術の検討

地下調査施設および地下施設の建設に伴う地下水位などの変化に付随した、地表変状や微小地震活動の把握技術について検討を行う。地表形状の変化については、初期状況からの変動を把握するリモートセンシング技術、傾斜測定技術などのモニタリング技術の適用性検討を行う。また微小地震活動については、計測装置や観測網に関する検討を行う。これらのモニタリング技術は、精密調査技術の実証を通じて、精密調査開始前までに適用性の検討を行う。

○ 放射線安全確保・周辺環境把握技術の検討

精密調査地区に入る前に処分施設建設予定地ならびにその周辺地域について、本格的な地上からの調査による影響を受ける前の環境放射線の初期状態，ならびにその変化，変動を把握する技術を検討する。各技術については，精密調査での適用前までに実証しておく。

5.7.3 精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発

○ 地下調査施設におけるモニタリングの在り方，実施方法の検討

地下調査施設におけるモニタリングの目的，必要性，実施方法ならびに実施期間などについて検討する。低透水性の地層や，緩衝材など水の動きが遅い媒体を対象にしたモニタリング技術は，技術の適用性確認ならびに実証に時間を要する場合がある。そのため，精密調査開始前までに検討を開始する。なお，ここで検討された技術については，精密調査後半の開始までに，適用性の確認と実証を終了する。

以上の技術開発について，今後5年間の実施項目と開発工程を表5-8に示す。

なお，社会における信頼感醸成の観点から，地上および地下調査施設でのモニタリング結果の社会への提示方法などについて検討を行う必要がある。これについては，5.8.2「地層処分の安全性の信頼感醸成にかかわる社会科学的検討」において実施する。

表 5-8 今後5年間の実施項目と技術開発工程（モニタリング）

	項目	2013	2014	2015	2016	2017
概要調査段階 に向けた技術 開発	地層処分事業におけるモニタリング戦略検討					
精密調査段階 〔前半〕向け た技術開発	地下水モニタリングの実証と初期ベースライン の知見取得	近接ボーリング掘削の影響把握 モニタリング継続と初期ベースラインの知見取得				
	地表形状・微小地震活動の把握技術					
	放射線安全確保・周辺環境の把握技術					
精密調査段階 〔後半〕向け た技術開発	地下調査施設でのモニタリングの 在り方・実施方法					

5.8 事業推進にかかわる検討

サイト選定の段階的な事業目標の達成に向けた技術開発に加え、最新の社会情勢などを踏まえ適切な時期に実施すべき技術開発、信頼感醸成の観点から継続的に実施することが望ましい検討など、事業推進に必要な以下の項目を実施する。

5.8.1 東北地方太平洋沖地震と福島第一原子力発電所事故を踏まえた検討

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震および東京電力福島第一原子力発電所事故以降、地震・断層活動に対する安全性や、万が一の事態が発生した際の影響について懸念が示されている。東北地方太平洋沖地震後の最新の科学的な知見、NUMO および基盤研究開発機関の技術開発成果を反映して、事業期間中および閉鎖後長期の安全性と技術的な実現性を総合的に評価する。また、これらの検討結果を踏まえて新たな技術開発課題が見出された場合は、適宜、事業期間中の安全確保（5.5）や閉鎖後長期の安全性評価（5.4）などの技術開発計画に反映していく。

5.8.2 地層処分の安全性の信頼感醸成にかかわる社会科学的検討

地層処分事業が社会に受け入れられるためには、社会の声に耳を傾け、信頼感醸成活動を継続的に実施する必要がある。そのためには、地層処分事業に対する不安要因を的確に把握し、それらを解消していくことで信頼感の醸成に努める必要がある。信頼感を醸成するためには、地道な理解活動を実施していく必要があるが、そのような理解活動の基礎となる技術的な裏付けを技術開発を通して構築する必要がある。

NUMO は、これまでも社会科学や環境倫理などの幅広い専門家から意見聴取を行ってきた。その結果、社会が地層処分事業に求めるものが次第に明らかになりつつある。例えば、安全性を提示するためのモニタリングの在り方や、一旦定置した廃棄物の回収可能性といった課題が挙げられている。今後は、これらの意見聴取に基づきながら、地層処分事業が社会に受け入れられるために取り組むべき技術的方策を明確化する試みを継続し、必要な技術開発課題に取り組んでいく。

社会科学的な検討によって見出された技術開発課題については、サイト調査・評価、工学的な対策、安全評価といった各専門分野の検討の中で取り組む課題に加えて、個別の検討課題として取り組む場合がある。それらの結果については、適宜、社会科学の専門家への意見聴取や、対話活動などを通したフィードバックによって評価を行い、必要な修正を加えていく。

5.8.3 放射性廃棄物処分にかかわる国外の技術情報の収集・活用にかかわる検討

地層処分事業は、原子力発電所を有する多くの国に共通の課題であり、国際的な協力のもとに事業が進められている。地層処分分野で先行する諸外国においては、地下研究所を活用した研究開発が数十年間にわたって実施された実績を有しており、多くの科学技術的

な知見が得られている。NUMO としては、先進諸外国で得られている知見を有効に活用するために常に最新の情報を収集し、わが国の地層処分事業に反映する方策を検討する。

以上の技術開発について、今後 5 年間の実施項目と開発工程を表 5-9 に示す。

表 5-9 今後 5 年間の実施項目と技術開発工程（事業推進にかかわる検討）

	項目	2013	2014	2015	2016	2017
事業推進にかかわる検討	東北地方太平洋沖地震と福島第一原子力発電所事故を踏まえた検討	事業期間中、閉鎖後長期の安全性				
	地層処分の安全性の信頼感醸成にかかわる社会科学的検討	技術的方策の検討 専門分野(地質環境の調査・評価, 工学的対策, 安全性評価)における継続的な取り組み				
	放射性廃棄物処分にかかわる国外の技術情報の収集・活用にかかわる検討	情報収集・仕組み検討				

第6章 おわりに

地層処分事業に必要な技術は、基盤研究開発機関と NUMO で分担して開発を進めている。NUMO は、実施主体として、事業に必要な技術が確実かつ効率的に準備できるよう技術開発全体をマネジメントしていく。

本計画において、20 年程度に及ぶサイト選定段階のうち、すでに準備が完了している文献調査段階以降の、概要調査段階、精密調査段階〔前半〕、精密調査段階〔後半〕を対象に、NUMO と基盤研究開発機関などのそれぞれで実施する技術開発の実施内容を示した。そのうち NUMO が実施する技術開発については、2013～2017 年度の中期技術開発計画としてより詳細に示した。また、技術開発のマネジメントに関する NUMO の考え方を示した。

NUMO は、これらの考え方や計画に従い、サイトを特定しないジェネリックな技術開発などを着実に実施していく。

基盤研究開発機関においては、本計画で示した基盤研究開発機関での実施を期待する技術開発の内容が基盤研究開発の次期全体計画に反映され、その計画に従って技術開発が進められることを期待する。

NUMO は、技術開発の計画段階や実施段階において、基盤研究開発機関と緊密に連携を図りながら進める。

技術開発成果は、NUMO と基盤研究開発機関で分担して保有、維持・蓄積を図るとともに、必要なものは NUMO に経験・知見も含めて技術移転を図る。また、地層処分全般に対する信頼性の向上、技術の継承、国民との成果の共有などの観点から、個々の技術開発成果の公開はもとより、その時点での最新の知見を踏まえ、基盤研究の成果も含めた包括的な技術開発成果報告書を定期的に作成し公表していく。

本計画は、今後の地層処分を含む原子力政策の動向を注視し、技術開発をとりまく状況の変化に柔軟に対応できるよう、必要に応じて見直しを行い、事業に必要な技術が確実かつ効率的に準備できるようにしていく。

【参考文献】

原子力安全委員会 (2010) : 第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方.

原子力発電環境整備機構 (2011a) : 地層処分事業の安全確保 (2010 年度版) ー確かな技術による安全な地層処分の実現のためにー, NUMO-TR-11-01.

原子力発電環境整備機構 (2011b) : 地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性 ー「処分場の概要」の説明資料ー, NUMO-TR-10-03.

原子力委員会 (2005) : 原子力政策大綱.

核燃料サイクル開発機構 (1999) : 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 ー地層処分研究開発第2次取りまとめー.

資源エネルギー庁, 日本原子力研究開発機構 (2006) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画, 2006 年 12 月.

用語集

【ア行】

安全審査

原子力事業者は、原子力施設の設置または変更を行おうとする場合、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」などの関係法令の定めるところにより、施設や設備の基本設計などの安全性について、行政庁による審査（一次審査）を受け、その結果についてさらに原子力安全委員会による審査（二次審査）を受けて、必要な許可を取得することとされており、この許可を得るまでの審査のことをいう。

安全評価

地層処分システムに関連する危険性に対して、サイトの地質環境や処分場の設計が技術的な要件を満足するだけの安全機能を発揮し得るか否かを体系的に分析する作業過程（IAEA, 2006）。安全評価は、地層処分システムの全体レベルの性能の定量化、関連する不確実性の分析、および安全基準との比較を含む。

安全レビュー

事業の進展に伴い得られるデータや最新知見を踏まえてもなお、廃棄物埋設施設の操業中のみならず閉鎖後も含めた長期的な安全性が担保される見通しであることを事業者が確認すること。事業の許可を受けた日から 20 年を超えない期間ごとの実施が「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第一種廃棄物埋設の事業に関する規則」によって規定されている。

埋め戻し材

坑道の掘削により影響を受けた領域を空間として放置しておく、地圧の作用により坑道の力学的安定性が損なわれたり、地下水の卓越した水みちとなるなど、処分場全体のバリア性能に有意な影響を及ぼすことが想定される。このような影響を排除するために、処分のために掘削した坑道や立坑（地上施設と地下施設を結ぶトンネル）などを埋めるもの。材料としては粘土などが考えられている。

塩淡水境界

地下における海水と淡水の境界面をいう。海岸部付近の地層中では、降水系地下水（淡水）と海水系地下水（塩水）の密度差に起因して、淡水の下に海水が浸入している現象が見られる。

オーバーパック

ガラス固化体を封入する容器をいう。発熱が著しい期間、ガラス固化体に地下水が接触することを防止し、地圧などの外力からガラス固化体を保護する機能を期待する。人工バ

リアの構成要素の一つで、材料としては鉄などが考えられている。

【力行】

回収可能性

地層処分において、いったん定置した廃棄物を再度取り出す行為が可能であることをいう。「地層処分場における長寿命放射性廃棄物の回収可能性に関する協調行動」(Grupa et al., 2000) では「処分場システムが具備する能力であり、何らかの理由によって回収が望まれた場合に廃棄体パッケージを回収すること」とされている。

概要調査

三段階のサイト選定段階のうち、二段階目の精密調査地区選定のための調査 (Preliminary Investigation)。ボーリング調査、地表踏査、物理探査などの地上からの調査が行われる。

概要調査地区

概要調査を実施する地区。文献調査結果に基づき、NUMO が選定する。

環境保全

事業活動その他の人の活動に伴って環境に加えられる影響に関して、環境の良好な状態を維持する上での支障の原因となるおそれのあるもの（環境負荷）の発生の防止、抑制または回避、影響の除去、発生した被害の回復を図ること、またはこれらに資する取り組みをいう。

緩衝材

人工バリアの構成要素の一つで、候補材料はベントナイトなどの粘土。オーバーパックと岩盤の間に充填し、地下水の浸入や放射性物質の移動を抑制するものをいう。さらに岩盤の変位を物理的に緩衝するクッションの働きや、地下水の水質を化学的に緩衝して変化を抑える働きを持つ。

基盤研究開発機関

資源エネルギー庁が設置した地層処分基盤研究開発調整会議に参加している、日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター、電力中央研究所、産業技術総合研究所、放射線医学総合研究所を基盤研究開発機関とする。

掘削影響領域 (EDZ : Excavated Disturbed Zone)

岩盤が、掘削の影響を受け、初期の性質から変化している領域をいう。破壊特性や変形

特性などの力学特性、透水係数などの水理特性、あるいは空気の侵入により地下水の酸化還元電位などの地球化学特性が変化することが想定される。

原子力政策大綱

原子力委員会は、原子力基本法に沿って国の施策を計画的に進めるために、1956年（昭和31年）からおおむね5年ごとに、9回にわたって「原子力長期計画」（正式名称：原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画）を策定してきた。10回目の見直しでは、「原子力政策大綱」と名称を改め、2005年（平成17年）10月に、今後10年程度の原子力の基本方針として閣議決定された。

原子炉等規制法

核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律。この法律は1957年（昭和32年）に制定され、核原料物質、核燃料物質および原子炉に関し、(1) 平和利用に限定、(2) 計画的利用実施の確保、(3) 災害防止と安全確保、を図るための規制を定めている。また、国際規制物資に関し、原子力の研究、開発および利用に関する条約、その他の国際約束を実施するための規制を定めている。

建設・操業・閉鎖

建設は、廃棄体定置のための地下施設（坑道群）と地上施設を構築することをいう。操業は廃棄体の受け入れに始まり、オーバーパックへの封入や廃棄体パッケージ、緩衝材などの製作、これらの搬送・定置、その後に行う処分坑道の埋め戻しまでの一連の作業をいう。閉鎖は、連絡坑道、アクセス坑道の埋め戻しをいう。

高レベル放射性廃棄物

再処理の過程において使用済燃料から分離される高レベル放射性廃液またはそれを固化したガラス固化体をいうが、一般には後者の意味でガラス固化体を指して用いられることが多い。なお、諸外国の中には使用済燃料を再処理しない方針の国もあり、その場合には使用済燃料自体が高レベル放射性廃棄物となる。本計画では、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」における「第一種特定放射性廃棄物」という語の代わりに「高レベル放射性廃棄物」を用いている。「第一種特定放射性廃棄物」には、海外再処理により発生するTRU廃棄物を一定の基準に基づき交換され返還されるガラス固化体も含まれる。

【サ行】

最終処分法

特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律。原子力発電所の運転に伴って生じた使用済

燃料の再処理後に生ずる高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の最終処分を計画的かつ確実に実施するため、最終処分費用の拠出制度、最終処分を実施する主体の設立、拠出金の管理を行う法人の指定などの関係規定の整備を行うことを目的として 2000 年に制定された法律。2008 年に改定され、長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU 廃棄物）の一部などが地層処分対象（地層処分低レベル放射性廃棄物）として追加された。

サイト

本計画では、地層処分施設を建設することが可能と考えられる場所を幅広く意味する語として「サイト」を用いる。特定の地域を指している「処分施設建設地」および「応募区域」とは別の語として使い分けている。

サイト選定／サイト選定段階

概要調査地区、精密調査地区、処分施設建設地を順次選定する段階を総称して、サイト選定段階という。

サイト調査・評価

サイトの地質環境特性、ならびに、地質環境の安定性に係る地形・地質・岩盤・地下水などの調査・評価全般のことをいう。

サイト・スペシフィックな技術開発

本計画では、特定の地域における地質環境条件に応じて必要となる技術の開発を意味する語として用いる。

ジェネリックな技術開発

本計画では、地域を特定せず、幅広い地質環境条件に対応する、または幅広い地質環境条件に対して共通的に必要となる技術の開発を意味する語として用いる。

自主基準

実施主体が安全な処分の実現に向けて自主的に定める基準で、上位の行動規範から、地層処分事業各段階でのサイト選定の考慮事項、意思決定の判断指標や尺度、品質保証のルールなどから構成され、その項目は階層構造をなす。自主基準は、事業の進展に伴い整備されていく法規制や技術基準に従い見直される性格を有する。項目によっては、法規制が整備されたのちにも実施主体独自の基準として保持していくものもある。

収着

人工バリア材、天然バリアなどの固相と間隙水などの液相との界面において、間隙水中

に溶存する溶質が固相へ吸着，吸収される現象を収着という。収着性が高い溶質は固相への移行率が高く，間隙水中の濃度が低下する。放射性核種の収着性は固相と液相との収着分配係数（ m^3/kg ）として評価される。

初期ベースラインモニタリング

地下調査施設建設や，処分施設建設などによる影響を受ける前の基準となる地下水流動場や地球化学特性，自然放射線レベルなどに関する情報を取得することをいう。

処分坑道

廃棄体と廃棄体に応じた人工バリアを定置する坑道のことをいう。

処分場

地層処分に必要な人工バリアを含む一群の施設（処分施設）と天然の地層（天然バリア）によって構成され，閉鎖後長期間にわたって高レベル放射性廃棄物などを人間環境から安全に隔離するための機能を持つシステムをいう。従って処分場は，閉鎖までに必要な一群の施設と閉鎖後長期にわたる安全機能が期待される構成要素すべてを総称したものをいう。閉鎖後の長期にわたる安全機能に着目し，一つのシステムとして表現する際には，多重バリアシステムという。

処分パネル

高レベル放射性廃棄物を埋設するための処分坑道群とそれを取り囲む坑道からなる一つの区画をいう。

人工バリア

生活環境への放射性廃棄物の漏出を防止，および低減するために設けられる人工構築物をいう。高レベル放射性廃棄物の場合，ガラス固化体，オーバーパックおよび緩衝材からなる。地層処分低レベル放射性廃棄物のハル・エンドピースの場合は，充填材，緩衝材および埋め戻し材からなる。また，廃棄体や構造躯体であっても，セメント系材料などを利用する場合には，収着などの機能を期待できる可能性があると考えられる。多重バリアシステムの構成要素の一つ。

深地層の研究施設

高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の一環として，深部地質環境の調査・解析・評価技術および深地層における工学技術の基盤の整備を目的とした研究施設をいう。わが国においては，JAEA が建設・運用している瑞浪超深地層研究所と幌延深地層研究所があり，ここではこれらを併せて深地層の研究施設という。

生物圏

地球表面において、人間を含むいろいろな生物が住んでいる部分であり、大気圏、水圏および地圏の一部から成る。生物圏は、人間の生存場所、あるいは最も広義の人間環境を含んでいる。

精密調査

三段階のサイト選定段階のうち、三段階目の処分施設建設地選定のための調査（Detailed Investigation）。地表からさらに詳細な調査を行うとともに、地下に調査施設を建設して、地下の特性などを調べるための調査が行われる。

精密調査地区

精密調査を実施する地区。概要調査結果に基づき、NUMO が選定する。

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およ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。

【タ行】

第一種／第二種特定放射性廃棄物

「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」では「第一種特定放射性廃棄物」と「第二種特定放射性廃棄物」を定めている。「第一種特定放射性廃棄物」は具体的にはガラス固化体を意味している。わが国では、再処理委託した外国より返還されたガラス固化体（再処理に伴い発生する TRU 廃棄物を一定の基準に基づきガラス固化体と交換したものを含む）や、JAEA および原燃において作られるガラス固化体が地層処分の対象となる。「第二種特定放射性廃棄物」は具体的に政令で定められている。JAEA および原燃の再処理や MOX 燃料工場の操業・解体に伴って生じる TRU 廃棄物のうちの一部が地層処分の対象となる。

第一種／第二種廃棄物埋設

2007 年に改正された「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」により、廃棄物埋設の事業区分に係る基準が定められた。同法では、核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物であって、これらに含まれる政令で定める放射性物質の放射能濃度が政令で定める基準を超える物の埋設の方法による最終的な処分を第一種廃棄物埋設（地層処分）といい、第一種廃棄物埋設以外は第二種廃棄物埋設という。

第2次取りまとめ

1997年4月に公表された原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会報告書「高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発などの今後の進め方について」に従い、関連する研究機関などの協力を得て、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をいう。正式名称：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―

多重バリアシステム

放射性廃棄物を，長期間にわたり生物圏から隔離し，放射性物質の移動を抑えることにより，処分された放射性廃棄物による影響が，将来にわたって人間とその環境に及ばないようにするための多層の防護系から成るシステムをいう。工学技術により設けられる人工バリアと，天然の地層である天然バリアにより構成される。

地下研究所

国内外の関係研究機関が設置する地下の研究施設をいう。なお，国内の地下研究所として建設・運用されている瑞浪超深地層研究所と幌延深地層研究所を併せて指す場合は，本計画では深地層の研究施設という。

地下施設

廃棄体を地上から地下に搬送するためのアクセス坑道や連絡坑道，廃棄体を埋設するための処分坑道と処分孔などをいう。

地下調査施設

処分施設建設地選定段階（精密調査の段階）において，最終処分法第二条第十一号で定める調査などを実施するために，精密調査地区内に設置する地下の調査施設をいう。

地質環境／地質環境特性

地層処分の観点から見た地下の環境を地質環境という。地質・地質構造，岩盤の性状・力学特性，地下水の地球化学特性，地下水の流動特性などが含まれ，これらの特性を総称し，地質環境特性という。

地質環境モデル

地質環境特性にかかわるサイトの具体的なデータを用いて，二次元または三次元座標における構造の幾何学的性状や諸特性の分布を可視化するもので，地質構造モデル，水理地質構造モデル，地球化学モデル，岩盤力学モデル，物質移動モデルなどがあり，これらのモデルを総称して，地質環境モデルという。

地上施設

ガラス固化体受入・封入・検査施設，緩衝材製作・検査施設，管理棟など，地下での建設や操業から閉鎖までに必要な地上の施設をいう。地下施設の閉鎖後は撤去されるが，閉鎖後管理が行われる場合，その間には必要な施設が残される。

地層処分基盤研究開発調整会議

地層処分に関する研究開発を計画的かつ効率的に実施することを目的として，資源エネルギー庁や日本原子力研究開発機構が中心となって，国の基盤研究開発を対象とした全体計画（高レベル放射性廃棄物および TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画）を策定し，技術基盤の継続的な強化を目指して研究開発が進められている。資源エネルギー庁が設置した地層処分基盤研究開発調整会議には，日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進・資金管理センター，電力中央研究所，産業技術総合研究所，放射線医学総合研究所が基盤研究開発機関として参加している（2012 年度現在）。

地層処分システム

閉鎖後長期の安全性を評価する上で対象となるシステム全体の総称。一般に多重バリアシステム（または処分場）に人間環境（生物圏）が含まれる。

地層処分低レベル放射性廃棄物

TRU 廃棄物の中には，長期間にわたり環境に影響を及ぼすおそれがあるため，高レベル放射性廃棄物と同様に深い地層へ処分する必要のある廃棄物があり，「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」では「第二種特定放射性廃棄物」と特定されている。本計画では，この「第二種特定放射性廃棄物」という語の代わりに「地層処分低レベル放射性廃棄物」を用いている。

地表踏査

地表面を踏査して行う現地調査をいう。地表で確認できる事項，例えば，地層・岩石の分布，地質構造，活断層の分布などを調べる。

長期安定性

ここでは地質環境の状態（変動の傾向などを含む）の長期にわたる安定性をいう。岩盤や地下水などの地質環境に大きな変化を及ぼす可能性のある自然現象として，地震・断層運動，噴火，隆起・侵食といったものが考えられる。

超長期

10 万年程度を超える長期間をいう。

低アルカリ性セメント

その浸出液の pH が最大でも 11.0 程度のセメントをいう。現在国内で市販されているセメント系材料(普通ポルトランドセメント)の pH は約 12.5～13.0 の高アルカリ性を示し、これを処分場において使用した場合、地下水の pH を上昇させることが想定される。この場合、ニアフィールドのバリア機能に有意な影響を及ぼす可能性があり、この影響を低減するためには、セメント系材料の pH を 11.0 程度にすることが必要であるといわれている。

定置

オーバーパックに封入したガラス固化体、廃棄体パッケージや緩衝材などを処分坑道内の所定の位置に据えることをいう。

天然バリア

処分された廃棄物と人間の生活環境との間にある地層などをいい、天然のものではあるが、廃棄物が人間の生活環境に影響を及ぼさないようにする障壁としての役割も期待される。多重バリアシステムの構成要素の一つ。

閉じ込め

放射性核種の放出を防止する、または放出を最少限に抑制するための処分施設の設計を意味する。閉じ込めは、人工バリアまたは人工バリアとサイトの地質環境によって提供される。通常は、廃棄物が地層処分システムに対して悪影響を与え得る熱エネルギーを生じる期間、あるいは、放射能の減衰によって廃棄物に起因する危険性が十分に低減するまでの期間において、閉じ込めを提供するように地層処分システムの設計がなされる。

トレンチ調査

主に、活断層の活動履歴を明らかにすることなどを目的に、細長い溝（トレンチ）を掘って行う地質調査をいう。断層を横切る方向に溝を掘り、断層にそって生じた地層のずれ（変位）の量、ずれた地層・断層を覆う地層の年代を測定するなどして、活断層が活動した年代や活動の頻度を調べる。

【ナ行】

ナチュラルアナログ

放射性廃棄物埋設後の放射性物質の挙動や人工バリアの腐食・変質など、地層処分システムにおいて想定される現象と類似した、自然界で過去に起こった長期的変化に関する現象をいう。火山から噴出した火山ガラス、古代の遺跡などから発掘される銅鐸、地下に埋設された古い鉄管などは、人工バリアの候補材であるガラスや金属に類似しているため、

これらの地下での長期的な変化を調べることにより、人工バリアで生じ得る現象を確認したり、評価方法の妥当性をチェックすることができる。また、天然の放射性物質を含むウラン鉱床などは、地層処分システム全体のナチュラルアナログの研究の場として利用できる。

ニアフィールド

人工バリアと、その設置などにより影響を受けると考えられる人工バリア近傍の岩盤とを合わせた領域をいう。

【ハ行】

廃棄体

容器に封入し、または容器に固型化した放射性廃棄物をいう。

廃棄体パッケージ

廃棄体をまとめて金属性などの箱に収納し充填材を充填したものをいう。

廃棄物発生者

高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）は、電力会社などが海外（イギリス・フランス）に再処理を委託し返還されるもの、JAEA の再処理施設および今後日本原燃の再処理工場で発生するものがある。また、地層処分の対象となる低レベル放射性廃棄物は、電力会社の海外委託や JAEA の再処理過程で発生するもの、および今後日本原燃の再処理工場、MOX 燃料工場の操業・解体時に発生するものがある。これら地層処分対象となる放射性廃棄物の発生者である電力会社、日本原燃、JAEA を、ここでは総称して廃棄物発生者と呼ぶ。

品質管理、品質保証、品質マネジメント

国際標準化機構（International Organization for Standardization）の規格（ISO 9000:2005）では、以下のように定義されている。

- ・ 品質管理（Quality Control）：品質要求事項を満たすことに焦点を合わせた品質マネジメントの一部。
- ・ 品質保証（Quality Assurance）：品質要求事項が満たされるという確信を与えることに焦点を合わせた品質マネジメントの一部。
- ・ 品質マネジメント（Quality Management）：品質に関して組織を指揮し、管理するための調整された活動。品質に関する指揮および管理には、通常、品質方針および品

質目標の設定、品質計画、品質管理、品質保証および品質改善が含まれる。

不確実性

天然現象には偶然的要素に支配される側面もあり、現象の理解の程度や定義のあいまいさなどから、これに基づくモデルやデータには必然的に結果を確実に予測できない面があり、不確実性を有する。放射性廃棄物処分の性能評価では取り扱う現象が多岐にわたり、空間的規模や時間的領域が広範にわたるため、必要とされる精度のレベルも個々の解析に応じて異なると考えられ、不確実性についても十分考慮しておく必要がある。

物理探査

人工的に発生させた地震波や電磁波などを利用して、空中、地上、水上などから地下の状況を間接的に調査することをいう。地質構造の状況、鉱床の有無などを調査することができる。

プラグ

坑道の間中部や端部をふさぐために設置される構造物。埋め戻し材や緩衝材の移動や流出を防いだり、水の通りやすい経路を分断したり、不用意な人間侵入を防ぐ目的で設置される。

法定要件

「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」および同施行規則に示された概要調査地区等（概要調査地区、精密調査地区、最終処分施設建設地）の選定要件のことをいう。

母岩

処分場が設置される地層のことをいう。

【マ行】

モデルチェイン

核種移行解析とこれらを支援する情報を設定するために用いた解析コードのつながりをいう。

【ヤ行】

余裕深度処分

一般的であると考えられる地下利用に対して十分な余裕を持った深度（例えば、地表か

ら 50～100m 程度) に埋設する処分をいう。

【A～Z 行】

EDZ

→掘削影響領域を参照。

FEP

地層処分システムの各要素の特性 (Feature), 特性に影響を与える事象 (Event), 地層処分システムの時間的変遷の過程 (Process) の略語。

HFSC

Highly Fly-ash contained Silicafume Cement の略語。アーク式電気炉などにより金属シリコンやフェロシリコンを精錬する際の排気ガス中に含まれる微粒子を電気集塵器により捕集したシリカヒュームを含有したセメントで、低アルカリ性を示すセメント材料として開発されている。

KMS

Knowledge Management System の略語。JAEA が、これまでに蓄積した地層処分技術に関する研究開発で得られた知識を社会的な共有化を図り、処分事業の実施主体や安全規制機関をはじめとする幅広いユーザーが活用するとともに、ユーザーから必要とされる知識をタイムリーに提供することをめざして、開発したシステム。

MOX 燃料

MOX 燃料 (Mixed Oxide Fuel の略語) のこと。ウランとプルトニウムを混合させて作られる燃料をいう。

PEM

Prefabricated Engineered barrier system Module の略語。高レベル放射性廃棄物の人工バリア施工方法の一つで、地上施設であらかじめ廃棄体を含むオーバーパック、緩衝材を専用の容器内に格納し、一体化したものを地下施設に定置する方法をいう。

RMS

Requirements Management System の略語。意思決定に必要な要件および要件を充足するための論拠などの情報を体系的に管理し、必要な時に必要な情報を検索し、意思決定の場に提供することを支援するためのシステム。

TRU 廃棄物

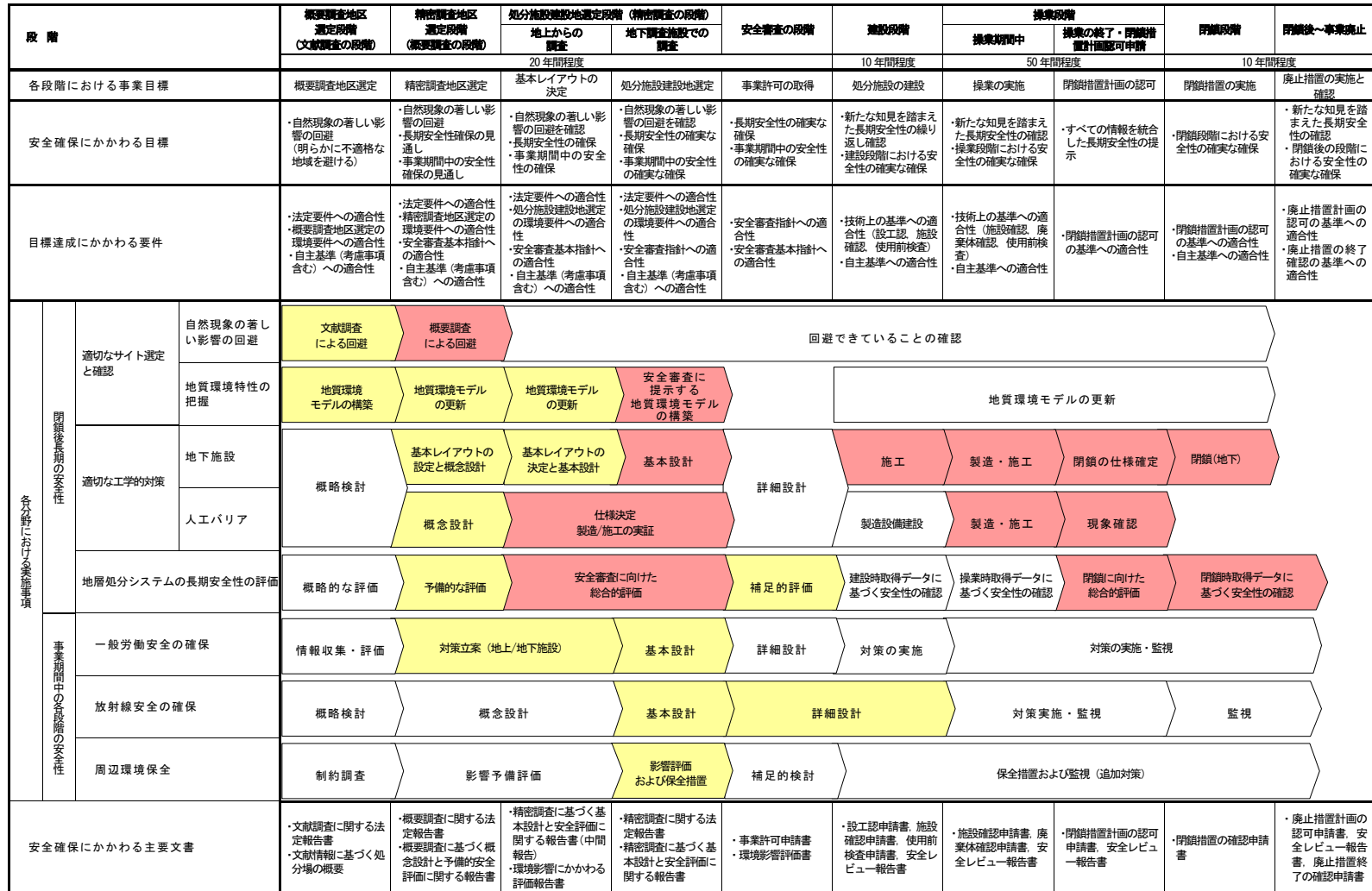
再処理工場や MOX 燃料工場の操業および解体に伴って発生する低レベル放射性廃棄物。ウランより原子番号が大きい放射性核種（TRU 核種：Transuranium nuclides）を含む廃棄物であることから TRU 廃棄物と呼ばれる。TRU 廃棄物は、使用済燃料の燃料被覆管（ハル）や使用済燃料集合体の末端部分（エンドピース）、放射性ヨウ素を除去するために使用した使用済銀吸着材（廃銀吸着材）、使用済燃料の溶解などに用いられたプロセス濃縮廃液、施設内で使用されるゴム手袋（難燃性廃棄物）、工具、金属配管（不燃性廃棄物）などの雑固体廃棄物など、施設の操業に伴い発生する廃棄物（操業廃棄物）や、施設の解体に伴い発生する配管や設備などの廃棄物（解体廃棄物）などさまざまなものを含む廃棄物である。この TRU 廃棄物の中で、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」に基づく施行令により定められた「物」を含む廃棄物または「定められた放射性物質についての放射能濃度を超えるもの」を含む廃棄物が、地層処分対象となる「地層処分低レベル放射性廃棄物」となる。

【用語集の参考文献】

- Grupa, J. B., Dodd, D. H., Hoorelbeke, J. M., Mouroux, B., Potier, J. M., Ziegenhagen, J., Santiago, J. L., Alonso, J., Fernandez, J. J., Zuidema, P., Crossland, I. G., McKirdy, B., Vrijen, J., Vira, J., Volckaert, G., Papp, T. and Svemar, C. (2000) : Concerted action on the retrievability of long-lived radioactive waste in deep underground repositories, Final Report, Nuclear Science and Technology, EUR19145EN, ISBN92-828-9466-5.
- IAEA (2006) : Geological Disposal of Radioactive Waste, Safety Requirements, IAEA Safety Standard Series No. WS-R-4, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

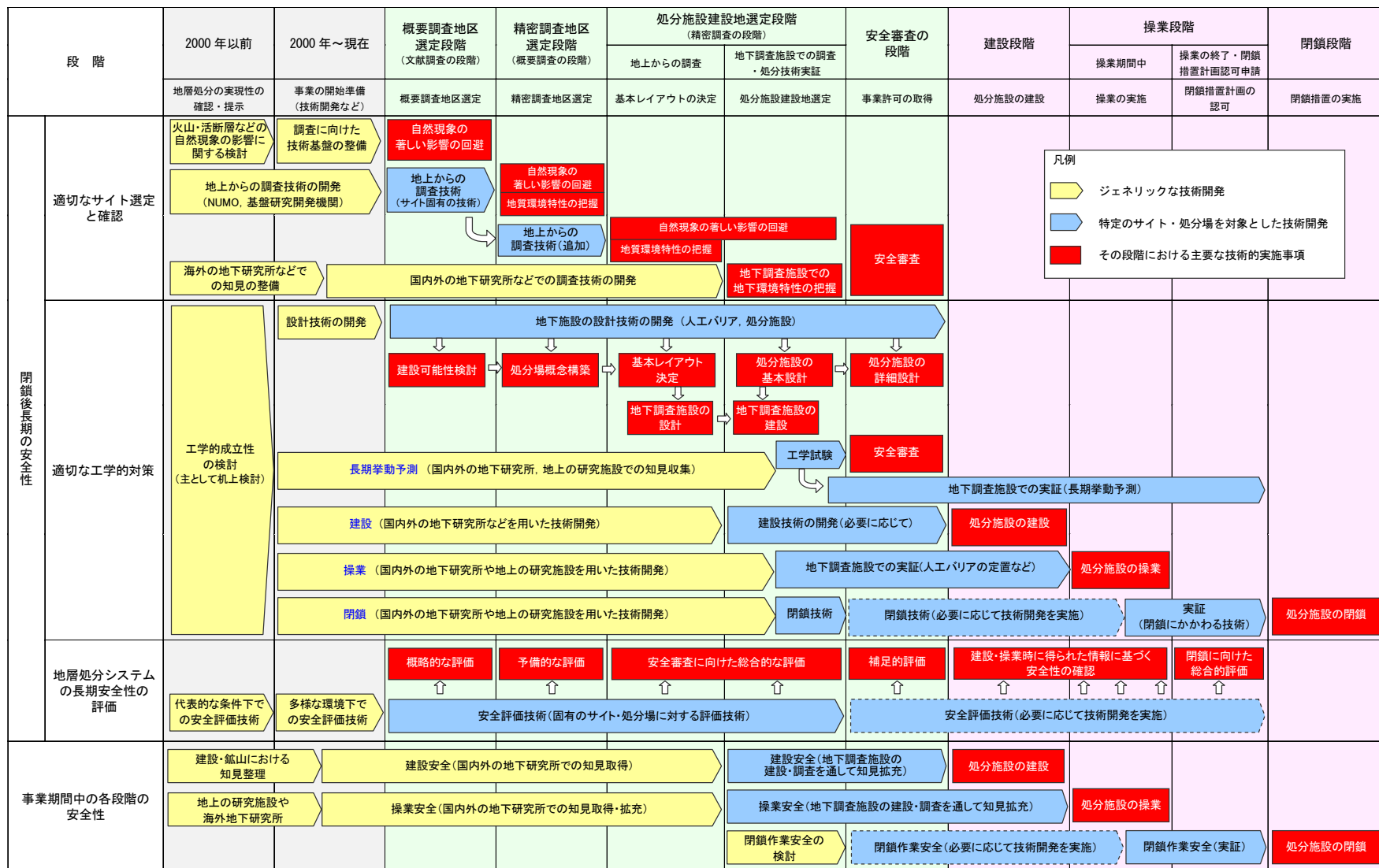
付 録

付録1章 2010 年技術レポートのロードマップ



凡例 : 安全確保上特に重要な実施事項 : 安全確保上重要な実施事項

付図 1-1 安全確保ロードマップ (概要版)



付図 1-2 技術開発ロードマップ(概要版)

付録2章 基盤研究開発などの概略状況

2.1 基盤研究開発

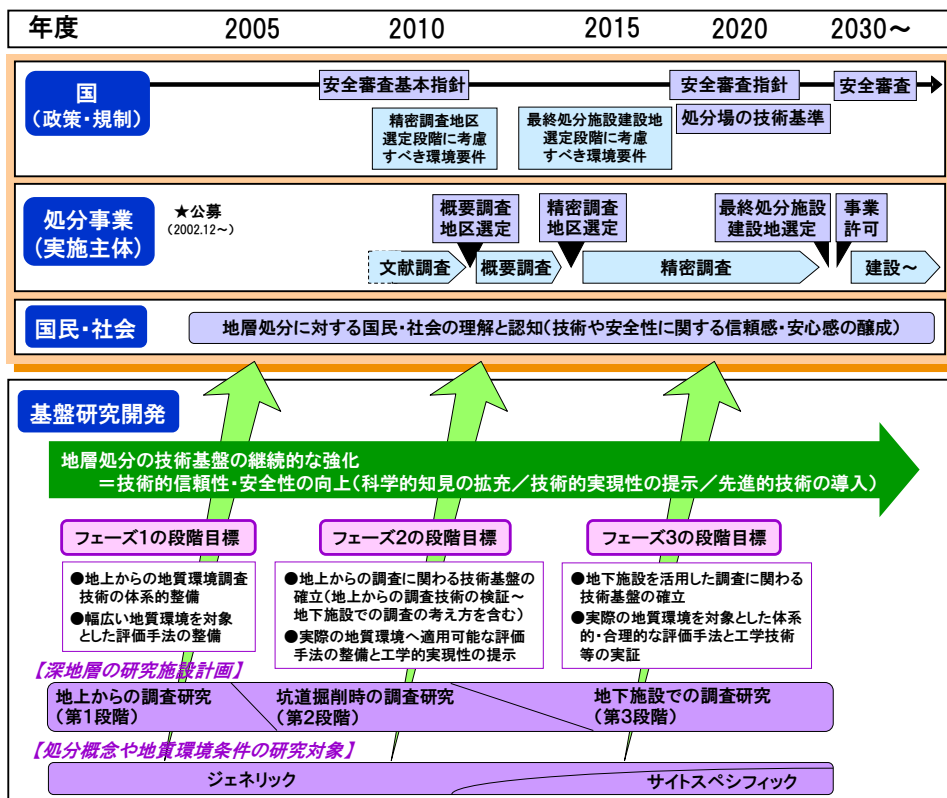
2.1.1 概要

基盤研究開発は、NUMO の三段階のサイト選定プロセスや安全規制の準備の進展などを念頭に置いて、第2次取りまとめ以降について、段階的な研究フェーズを設定している（付図 2-1）。具体的には以下のように研究フェーズを設定し、NUMO のサイト選定プロセスに先行する形で研究が進められている。現在、精密調査段階〔前半〕への反映を意図したフェーズ2まで概ね終了し、精密調査段階〔後半〕に向けた技術開発が2013年度より開始される予定である。

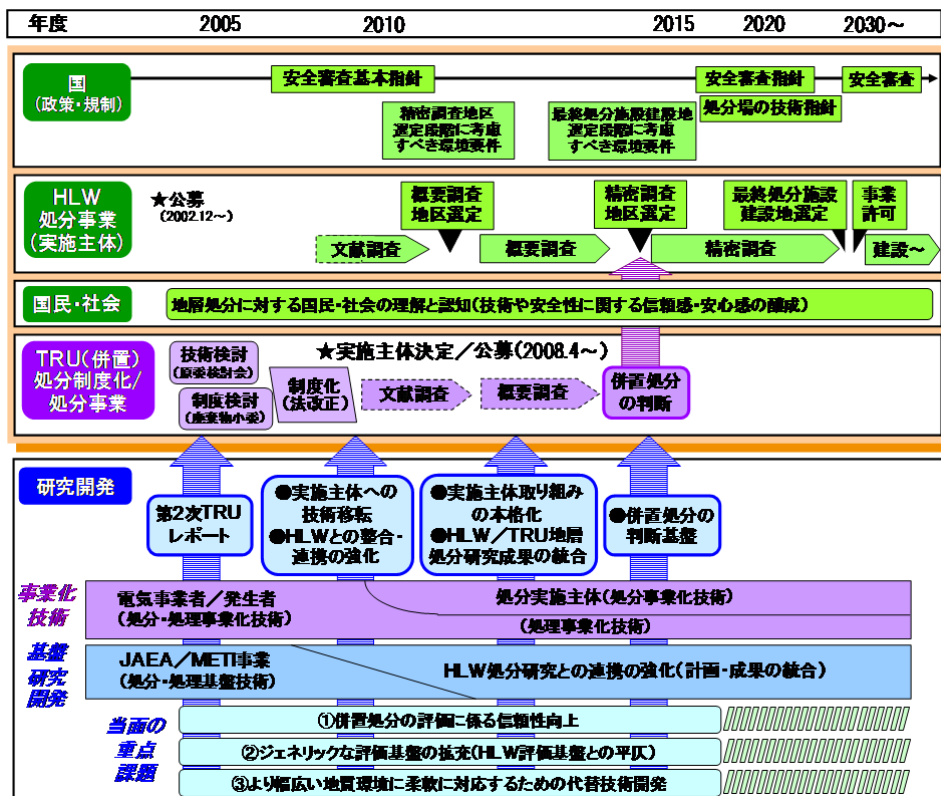
フェーズ1（すでに終了）	：成果を概要調査段階へ反映
フェーズ2（概ね終了）	：成果を精密調査段階〔前半〕へ反映
フェーズ3（2013年度より開始）	：成果を精密調査段階〔後半〕へ反映

ただし、フェーズ2の研究成果の一部は概要調査段階に向けた技術にも反映されている。

なお TRU 廃棄物については、高レベル放射性廃棄物より若干研究開発の開始が遅れているため、高レベル放射性廃棄物とは別途に段階と目標が設定されている（付図 2-2）。



付図 2-1 国の基盤研究開発の段階と目標設定 (高レベル放射性廃棄物)



付図 2-2 国の基盤研究開発の段階と目標設定 (TRU 廃棄物)

2.1.2 JAEA の基盤研究開発

JAEA は第2次取りまとめ以降、以下の2つの研究開発目標を設定し、これらを達成するために以下の研究開発課題を設定している。

(研究開発目標)

- 実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認
- 地層処分システムの長期挙動の理解

(研究開発課題)

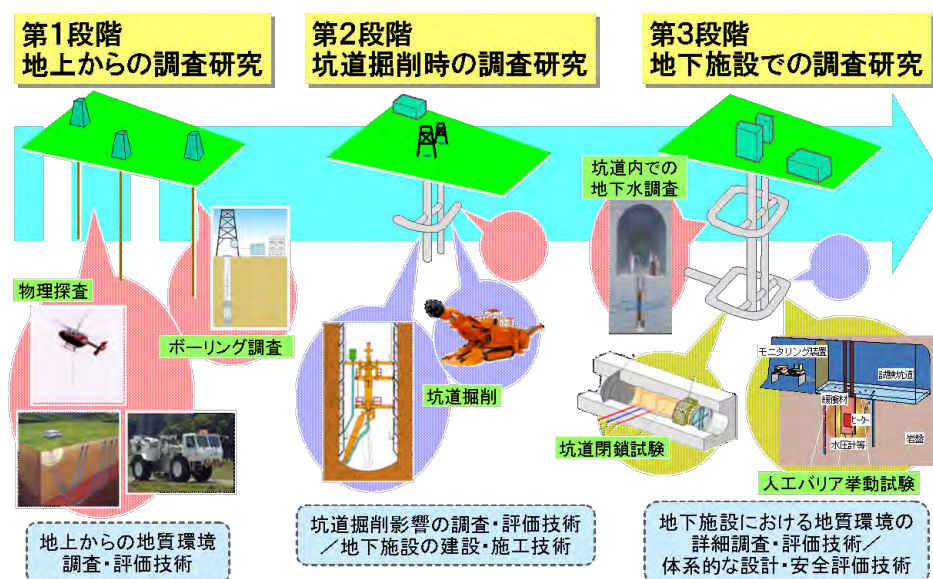
- ✓ 地層処分研究開発：処分技術の信頼性向上と安全評価手法の高度化
- ✓ 深地層の科学的研究

深地層の科学的研究は、堆積岩と塩水系地下水を対象とした北海道幌延町および結晶質岩と淡水型地下水を対象とした岐阜県瑞浪市において進められている。いずれも、地上からの調査段階（第1段階）、坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第2段階）、地下施設での調査研究段階（第3段階）の3段階からなる。NUMO のサイト調査段階との関係は以下のとおりである。

第1段階：概要調査および精密調査段階〔前半〕

第2段階：精密調査段階〔後半〕

第3段階：精密調査段階〔後半〕



付図 2-3 深地層の研究施設設計画の段階的な進め方

2.1.3 資源エネルギー庁調査等事業

基盤研究開発のうち、JAEA では深地層の科学的研究や安全評価手法の高度化など主に科学的な視点や体系化の視点に重点をおいた研究開発を進められている。一方、資源エネルギー庁調査等事業は、主に工学的視点に重点をおいた周辺基盤技術の開発が進められてきている。

NUMO の技術開発に関連すると考えられる資源エネルギー庁調査等事業を付表 2-1 に取りまとめる（付録参考文献[1]～[25]参照）。

付表 2-1 資源エネルギー庁調査等事業一覧

地層処分技術	
(地質環境調査関連) ボーリング技術高度化開発 岩盤中地下水移行評価技術高度化開発 地質環境評価技術高度化開発 沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発 海域地質環境調査技術高度化開発 (性能評価関係) 先進的地層処分概念・性能評価技術高度化開発 処分システム化学影響評価高度化開発	(工学技術関係) 処分システム工学要素高度化開発 地層処分回収技術高度化開発 地下坑道施工技術高度化開発 (TRU 関係) 人工バリア長期性能評価技術開発 セメント材料評価技術高度化開発 ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発 硝酸塩処理・処分技術高度化開発
管理型処分技術	放射性廃棄物共通技術
地下空洞型処分施設性能確認試験	放射性廃棄物重要基礎技術研究調査 放射性核種生物圏移行評価高度化調査

2.2 規制機関の動向

2.2.1 安全審査関係

2008 年に原子炉等規制法が改定され、地層処分事業が第一種廃棄物埋設事業等として原子炉等規制法により安全規制を受けることとなった。原子炉等規制法による規制は事業許可申請時に始まる。事業許可時の安全審査の考え方については、今後、サイト調査選定の進捗と並行して、順次「安全審査基本指針」、「安全審査指針」が策定される予定である。

2.2.2 環境要件

事業許可申請前のサイト調査選定段階は、原子炉等規制法の規制は受けず、最終処分法の規程に従う。最終処分法ではサイト選定の各段階における選定条件を定めている。また、サイト選定の 3 段階のうち概要調査による精密調査地区選定時や精密調査による最終処分施設建設地選定時においては、国による審査が考えられており、それぞれの選定時について「精密調査地区選定段階に考慮すべき環境要件」および「最終処分施設建設地選定段階に考慮すべき環境要件」が策定される予定である。なお、「概要調査地区選定段階に考慮すべき環境要件」はすでに策定されている。

2.3 廃棄物発生者の動向

NUMO が行う地層処分事業の対象廃棄物を発生者別にまとめると、次のとおりである。

- 高レベル放射性廃棄物（第一種特定放射性廃棄物）
 - ・ JAEA 製造のガラス固化体
 - ・ 海外からの返還ガラス固化体
 - ・ 原燃製造のガラス固化体
- 地層処分低レベル放射性廃棄物（第二種特定放射性廃棄物）
 - ・ JAEA の再処理工場，MOX 工場から発生する廃棄物
 - ・ 海外からの返還廃棄物
 - ・ 日本原燃の再処理工場，MOX 工場から発生する廃棄物

JAEA における廃棄物はすでに発生し，JAEA 施設にて保管されている。海外からの返還ガラス固化体については，すでに 10 年以上原燃の貯蔵施設に受入れを続けており，海外からの返還される地層処分低レベル放射性廃棄物はこれから受入れが開始される予定である。日本原燃における廃棄物は，日本原燃の再処理工場の運転開始後，発生が本格化する。

日本原燃の再処理工場の運転開始を念頭に，日本原子力学会は，旧原子力安全・保安院の要請により，処分の観点で必要な地層処分対象放射性廃棄物の廃棄体特性の製造時における記録の録取方法などを検討し取りまとめている。

【付録参考文献】

- [1] 電力中央研究所：平成 23 年度地層処分技術調査等事業，地層処分共通技術調査：ボーリング技術高度化開発 成果報告書，平成 24 年 3 月。
- [2] 電力中央研究所：平成 23 年度地層処分技術調査等事業（地層処分共通技術調査：岩盤中地下水移行評価技術高度化開発）―岩盤中物質移行特性評価技術高度化調査― 報告書，平成 24 年 3 月。
- [3] 電力中央研究所：平成 23 年度地層処分技術調査等事業（地層処分共通技術調査：岩盤中地下水移行評価技術高度化開発）―地下水年代測定技術調査― 報告書，平成 24 年 3 月。
- [4] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度地層処分技術調査等事業，高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第 1 分冊）―遠隔操作技術高度化開発―，平成 24 年 3 月。
- [5] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度地層処分技術調査等事業，高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第 2 分冊）―人工バリア品質評価技術の開発―，平成 24 年 3 月。
- [6] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度地層処分技術調査等事業，高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第 3 分冊）―モニタリング技術の開発―，平成 24 年 3 月。
- [7] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度地層処分技術調査等事業（高レベル放射性廃棄物処分関連：地層処分回収技術高度化開発）報告書，平成 24 年 3 月。
- [8] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度地層処分技術調査等事業，TRU 廃棄物処分技術，人工バリア長期性能評価技術開発：報告書（第 1 分冊）―人工バリアの長期挙動の評価―，平成 24 年 3 月。
- [9] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度地層処分技術調査等事業，TRU 廃棄物処分技術，人工バリア長期性能評価技術開発：報告書（第 2 分冊）―ガス移行挙動の評価―，平成 24 年 3 月。
- [10] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度地層処分技術調査等事業，TRU 廃棄物処分技術，ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発：報告書（第 1 分冊）―ヨウ素固定化処理技術開発―，平成 24 年 3 月。
- [11] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度地層処分技術調査等事業，TRU 廃棄物処分技術，ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発：報告書（第 2 分冊）―C-14 の長期閉じ込め技術の高度化―，平成 24 年 3 月。
- [12] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度地層処分技術調査等事業，TRU 廃棄物処分技術，ヨウ素・炭素処理・処分技術高度化開発：報告書（第 3 分冊）―放射化金属廃棄物中の C-14 の放出挙動評価―，平成 24 年 3 月。
- [13] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度放射性廃棄物共通技術調査等事

- 業，放射性廃棄物重要基礎技術研究調査：報告書（第 1 分冊）―基礎的研究テーマの整理―，平成 24 年 3 月。
- [14] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業，放射性廃棄物重要基礎技術研究調査：報告書（第 2 分冊）―重要基礎技術研究調査―，平成 24 年 3 月。
- [15] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業，放射性廃棄物重要基礎技術研究調査：報告書（第 3 分冊）―多重バリアの長期安定性に関する基礎情報の収集および整備―，平成 24 年 3 月。
- [16] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度管理型処分技術調査等事業，地下空洞型処分施設性能確証試験：報告書，平成 24 年 3 月。
- [17] 放射線医学総合研究所：平成 23 年度放射性廃棄物共通技術調査等委託事業，放射性核種生物圏移行評価高度化調査 平成 24 年 3 月。
- [18] 日本原子力研究開発機構：平成 23 年度地層処分技術調査等事業，地層処分共通技術調査：地質環境評価技術高度化開発，報告書，平成 24 年 3 月。
- [19] 日本原子力研究開発機構：平成 23 年度地層処分技術調査等事業，高レベル放射性廃棄物処分関連：先進的地層処分概念・性能評価技術高度化開発，報告書，平成 24 年 3 月。
- [20] 日本原子力研究開発機構：平成 23 年度地層処分技術調査等事業，高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム化学影響評価高度化開発，報告書，平成 24 年 3 月。
- [21] 日本原子力研究開発機構：平成 23 年度地層処分技術調査等事業，高レベル放射性廃棄物処分関連：地下坑道施工技術高度化開発，報告書，平成 24 年 3 月。
- [22] 日本原子力研究開発機構：平成 23 年度地層処分技術調査等事業，TRU 廃棄物処分技術：セメント材料評価技術高度化開発，報告書，平成 24 年 3 月。
- [23] 日本原子力研究開発機構：平成 23 年度地層処分技術調査等事業，TRU 廃棄物処分技術：硝酸塩処理・処分技術高度化開発，報告書，平成 24 年 3 月。
- [24] 産業総合研究所：沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発，成果報告書，平成 24 年 3 月。
- [25] 産業総合研究所：海域地質環境調査技術高度化開発，成果報告書，平成 24 年 3 月。