

研究開発の進め方について（案）

本資料については、事前に外部有識者に情報提供し、
ご意見をいただいた上で、取りまとめた。

2017年12月

原子力発電環境整備機構（NUMO）

1. 地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化

(1) 自然現象の影響

① 火山・火成活動の発生および影響の調査・評価技術の高度化

目的

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

実施概要

a. 将来の火山・火成活動の発生に係る評価技術の高度化

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

b. マグマの影響範囲を把握するための技術の高度化

マグマの影響範囲を把握するための技術として、これまでに第四紀火山の活動特性や形成発達史などを把握するための地質学的手法に加え、火山体の地下構造を把握するための地球物理学的・地球化学的手法の整備が進められてきた。また、マグマの影響範囲については、火山の活動様式に応じて異なることなどが明らかにされてきたものの、その調査・評価の事例は限定的である。今後は成層火山、カルデラ、単成火山群などの火山の活動様式に応じたマグマの影響範囲について、特に影響範囲が大きくなる場合の調査・評価事例（カルデラ、単成火山群など）に係る知見の蓄積を通じて調査・評価技術の高度化を図る。

c. 沿岸部海域におけるマグマの有無を確認するための技術の高度化

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

1. 地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化

(1) 自然現象の影響

② 深部流体の移動・流入に係る現象理解および影響の評価技術の整備

目的

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

実施概要

a. 深部流体の形成・移動に係る調査・評価技術の整備

深部流体については、これまでに海洋プレートの沈み込みに伴う脱水流体を起源とする深部上昇水、古い海水などを起源とする長期停滞水などの存在が明らかにされてきた。深部流体の流入やその影響を適切に評価するためには、その形成メカニズムや分布特性、移動・流入に関与する地殻内の条件や地質環境の特性のほか、起源の異なる流体（深部上昇水や長期停滞水など）の性状に係る理解を深める必要がある。このため、特にその賦存域が地下深部に形成され得る地域の条件（発生・形成メカニズムを踏まえた分布の規則性など）や、地表付近への流入に関与する地殻内や地質環境の特性（流体の移動に関与する断層・クラックの性状など）の抽出に着目して、これらに関連する地質学的・地球物理学的・地球化学的特徴などの知見を調査の事例を通じて蓄積する。また、これらの知見に基づき深部流体の流入の可能性や熱・水理・地化学的な影響の評価に係る技術基盤の整備を図る。

b. 沿岸部海域における深部流体の有無などを確認するための技術の整備

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

1. 地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化

(1) 自然現象の影響

③ 地震・断層活動の活動性および影響の調査・評価技術の高度化

目的

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

実施概要

- a. 地表地形から特定が困難な活断層を検出し活動性を把握するための技術の高度化
地表から活断層を検出する技術について，これまでに変動地形学的手法や地球物理学的手法といった従来手法を補完する新たな調査技術として，断層沿いに放出されるガスの特徴を指標とした地球化学的手法などを用いた調査技術の開発が行われてきた。今後は地形的に不明瞭な活断層を検出する精度の向上に向けて，GNSS（全球測位衛星システム）観測などの測地学的手法も取り入れることにより地下深部の地殻変動の特徴を把握し，地殻変動シミュレーションや地形・地質学的手法，物理探査などの組み合わせにより地下に伏在する断層の活動性を評価する技術へ高度化を図り，概要調査の段階における断層の調査・評価技術として整備する。
- b. 上載地層がない場合の断層の活動性や地質断層の再活動性を把握するための技術の高度化
断層変位の有無の判定に係る年代既知の被覆層がない場合の断層の活動性や地質学的に古い時期に形成された断層の再活動性の評価について，地質構造発達史を背景とした断層の発達履歴などの検討に加えて，これまでに断層破碎帯内物質について定性的な特徴（鉱物粒子の形状など）に基づく検討が主に行われてきたが，今後は鉱物・化学組成，同位体組成などの定量的な指標を取り入れた調査・評価技術へ高度化を図る。また，破碎帯内物質の放射年代測定を用いた断層の活動性評価技術について，適用する年代測定手法を拡充することで技術の高度化を図る。以上の技術は，主にボーリングや坑道調査の段階に遭遇した断層に対する調査・評価技術として整備するとともに，断層の活動性のみならず断層活動に伴う周辺岩盤の破碎などの影響の評価にも反映する。
- c. 地震および断層活動による水理学的・力学的影響を把握するための技術の高度化
これまでに断層運動に伴う破碎帯の分布と発達過程などに係る調査事例の蓄積により，地震および断層活動による水理学的・力学的影響を把握するための技術が構築されてきた。また，水理学的影響については地震に伴う地下水圧の変化の要因を明らかにするための検討が行われてきた。今後は地震・断層活動による水理学的影響などの評価に反映するため，地震の発生に伴う長期間湧水や地下水圧・水質の変化に係る調査・解析事例を蓄積し分析することにより，技術の高度化を図り技術基盤として整備する。
- d. 陸域から海域にかけて活断層の分布を連続的に確認するための技術の高度化
これまでに陸域から海域にかけて連続的に分布する活断層を対象とした調査技術および調査事例に係る技術情報が網羅的に収集・整理された。今後は海陸接合部付近における活断層の検出・評価の観点から技術情報の取りまとめを行い技術基盤として整備する。

1. 地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化

(1) 自然現象の影響

④ 地形・地質学的情報に基づく隆起・侵食の調査・評価技術の高度化

目的

- ◆ 将来の隆起・侵食の予測の信頼性向上に向け、地形学的手法や堆積物などの年代測定に基づく隆起・侵食の調査・評価技術に加え、過去百万～数十万年前以前の隆起・侵食量の調査・評価に適用可能な手法を拡充するとともに、海成段丘などの有効な指標に乏しい沿岸部陸域および海域における隆起・侵食の調査・評価技術を整備し、それらの適用事例の蓄積を通じて、気候・海水準変動も考慮した隆起・侵食の調査・評価技術の高度化を図る。

実施概要

- a. 地形学的手法や年代測定などを用いた過去百万～数十万年前以前の隆起・侵食を把握するための技術の拡充
これまでに隆起量・侵食量の推定の指標となる海成および河成段丘などを用いた地形学的手法と堆積物の年代測定（広域火山灰による編年、放射性炭素年代測定など）に基づく検討を通じて、隆起・侵食を把握するための技術の整備が進められてきた。今後は過去百万～数十万年前以前の隆起・侵食量の調査・評価に適用可能な手法を用いたデータ取得密度の拡充に資するため、鉬物の年代測定法における閉鎖温度の違いを用いた熱年代学的手法や、分布が局所的な堆積物を対象とした化学分析・年代測定などの適用を検討し、各手法の精度・適用限界について整理したうえで幅広い地質環境に対する隆起量・侵食量の評価が可能となる技術を整備する。
- b. 沿岸部の隆起・侵食を把握するための技術の高度化
沿岸部のうち海成段丘などの有効な指標に乏しい地域における隆起・侵食を把握するため、これまでに岩石侵食段丘における露出年代測定（宇宙線生成核種の蓄積量などに基づく）の適用性に加え、礫層や土壌に係る経験的な風化指標を重視した総合的な段丘対比・編年手法の検討が進められてきた。また、沿岸部で海水準変動により海底が陸化した際の下刻を考慮した長期的な隆起・侵食を精度よく把握するため、高精度の地形デジタルデータなどを用いた陸域～海域の地形解析に加え、地形地質断面図を用いた陸域での隆起・侵食様式の海域への外挿に基づく沿岸部の隆起量・侵食量の評価手法の検討が進められている。今後は個別の要素技術・評価手法の適用性について取りまとめを行うとともに、各手法を適切に組み合わせた最適なアプローチによる沿岸部での適用事例を蓄積し適用方法の整備を行うことにより、沿岸部の隆起量・侵食量に係る調査・評価技術の高度化を図る。

1. 地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化

(1) 自然現象の影響

⑤ 長期的な自然現象の発生可能性および地質環境の状態変遷の評価技術の整備

目的

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

実施概要

- a. 自然現象に係る長期的なシナリオ設定と地質環境の状態変遷に係る影響評価のための手法の整備
わが国における自然現象（火山・火成活動、深部流体の移動・流入、地震・断層活動、隆起・侵食、気候・海水準変動）の発生可能性に係る予測の信頼性向上に向け、プレート運動や地殻応力状態に支配された自然現象の変動傾向について科学的知見の蓄積に基づく現象理解を踏まえて必要な情報を整理し、その一様継続性や発生様式の観点から地域的な特徴を類型化する。自然現象の著しい影響を回避したサイトにおける不確実性に起因して、将来10万年程度を超える期間において新規に発生する可能性のある事象が地質環境へ及ぼす影響については、これまでにサイトを特定しないジェネリックな条件における検討が進められてきた。今後は自然現象の地域的な変動傾向を踏まえた科学的知見（1.(1)①～④で取得）に基づき、将来10万年程度を超える期間において考慮すべき自然現象が地質環境へ及ぼす影響の程度・範囲とその時間変化に係るシナリオを体系的に整理し、地域性を考慮した地質環境の状態変遷に係る影響評価のための手法を整備する。
- b. 長期にわたる自然現象の発生可能性およびその不確実性を評価するための技術の高度化
将来10万年程度を超える期間において想定される自然現象が地質環境に及ぼす影響に係るシナリオの設定の科学的な説明性を向上させるためには、プレート運動の継続性の変化や気候・海水準変動も考慮した自然現象の発生可能性とその不確実性を定量化するための技術の高度化が必要である。これまでに将来10万年程度を対象とした自然現象の発生可能性に係る外挿法による将来予測の考え方が示され、確率論的な評価手法の開発とその適用性の検討が行われてきた。今後は将来予測における不確実性がより大きくなる将来10万年程度を超える期間を対象に、自然現象の変動傾向に係る地域的な特徴に基づき、プレート運動の継続性の変化や気候・海水準変動も考慮した自然現象の発生可能性とその不確実性を定量化（確率論的に数値化）するための技術の高度化を図る。

1. 地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化

(2) 地質環境の特性

① 水みちの水理・物質移動特性の評価技術の整備

目的

- ◆ 概要調査において重要となる涵養域から流出域までの広域的な地下水流動（移流場）や地下水が長期にわたり滞留する領域（拡散場）の三次元分布に係る調査・評価の信頼性向上に向け、これまでに整備された水理・物質移動場・特性に係る調査・評価技術の妥当性の確認および高度化を通じて、それぞれの水理・物質移動場に応じた方法論を整備する。

実施概要

- a. 内陸部の広域的な地下水流動を評価するための技術の高度化
これまでに事例研究を通じて広域地下水流動解析手法や地下水の水質・年代に係る調査技術の整備が進められてきた。今後はボーリング孔を利用して取得される地質環境データを用いた広域地下水流動解析の結果と長期にわたる地下水流動に伴う地下水の水質・年代の三次元分布との対比を行い、水理地質構造モデルおよび解析条件の設定の妥当性を確認するとともに、実施項目cの結果を踏まえて解析結果に大きな影響を及ぼす条件や重要な地質環境データの種類・取得密度などを評価する。この取り組みを通じて、広域的な地下水の流動および水質・年代の三次元分布を整合的に解釈することができるようモデル化・解析技術の高度化を図る。なお、取得した科学技術的知見やノウハウは1.(2)⑤に反映する。
- b. 内陸部の地下深部に存在する長期的に安定な水理場・化学環境を評価するための技術の高度化
これまでに事例研究を通じて岩盤中の水みちの透水性を把握するための調査技術や水理学的な不均質性をモデル化・解析する技術の整備が進められてきた。今後は地下深部に水理学的に閉鎖的な環境が形成・維持されてきていると推定される化石海水が滞留している領域を対象に、実施項目cの結果に加えボーリング調査や物理探査などのデータも統合して水みちの透水性および連結性に基づく巨視的な透水性を評価するとともに、その結果を踏まえ水理場・化学環境の古水理地質学的変遷などの評価を行う。この取り組みを通じて、長期的に安定な水理場や化学環境の三次元分布を地表から把握できるように調査・評価技術の体系化を図る。なお、取得した科学技術的知見やノウハウは1.(2)⑤に反映する。
- c. 水みちの水理・物質移動特性を調査・評価するための技術の高度化
これまでに事例研究として岩盤中の水みちを検出するための各種の検層や単一の水みちを対象としたトレーサー試験などが実施され、岩盤中の水理・物質移動特性に係る調査・評価技術の整備が進められてきている。今後はわが国に特徴的な高割れ目密度の岩盤を対象に、地下水検層やトレーサー試験などの既存技術の改良や組み合わせにより、より精度良く水みちを検出しその三次元分布や水理・物質移動特性を把握できるように調査・評価技術の高度化を図る。また、水みちの微細透水構造モデルを構築するとともに、水みちの分布に起因する水理・物質移動場の不均質性を把握し、この結果を踏まえた実施項目a・bの解析条件の設定に係る手法の最適化を図る。なお、水みちの微細透水構造モデルは1.(2)③および3.(2)④に、取得した科学技術的知見やノウハウは1.(2)⑤にそれぞれ反映する。

1. 地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化

(2) 地質環境の特性

② 沿岸海底下の地質環境特性の調査・評価技術の整備

目的

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

実施概要

- a. 沿岸部陸域・海域を対象としたサイト調査の観点からの既存の調査技術の適用性確認および高度化
これまでに資源探査や学術調査を通じて海域を対象とした物理探査やボーリング孔の掘削および孔内試験に係る個別技術が整備されてきた。今後は沿岸部の陸域から海域にかけて連続した三次元物理探査、海水の影響を考慮したボーリング孔の掘削および孔内試験や地下水モニタリングなどの実証的な取り組みを行うとともに、沿岸部海域の微地形および海底湧水の調査技術の体系化を図る。この取り組みを通じて、地質構造や広域地下水流動などの調査技術について、地層処分におけるサイト調査の観点から適用性を評価し、陸域と同様に処分場の設計や安全評価に必要となる地質環境情報を求められる精度で取得することができるよう高度化を図る。なお、取得した科学技術的知見やノウハウは1.(2)⑤に反映する。
- b. 沿岸海底下に存在する長期的に安定な水理場・化学環境を把握するための技術の整備
これまでに事例研究が実施された地域において、沿岸海底下に1～10万年程度にわたる淡水の張り出しの形成やその下位に10～100万年オーダーの長期間にわたる安定な地下水の存在が確認された。今後はこのような地質環境が想定される地域を対象に事例研究を実施し、サイト調査の観点から適用性が確認された調査技術を組み合わせて地下水の水質や年代の三次元分布などを把握するとともに、わが国の多様な地質環境を考慮に入れつつ全国規模で水理場・化学環境に係る地質環境情報を取得し、これらの結果の統合することによりわが国の沿岸部の水理場・化学環境モデルを構築する。この取り組みを通じて、沿岸部陸域から沿岸海底下までを対象とした広域地下水流動の連続性や長期にわたり安定な水理場や化学環境の存在、断層の地下水流動への影響などが把握できるように調査・評価技術を体系的に整備する。なお、わが国の沿岸部の水理場・化学環境モデルは1.(2)③に、取得した科学技術的知見やノウハウは1.(2)⑤にそれぞれ反映する。

1. 地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化

(2) 地質環境の特性

③ 地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化

目的

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

実施概要

a. 水理場・化学環境の長期変遷をモデル化する技術の高度化

これまでに実施された事例研究を通じて、不均質性を有する地下深部を対象に水理場・化学環境の過去から現在までの長期変遷をモデル化する技術が整備されてきた。今後は断層活動に伴う水理場などの地質環境の変化に係る調査・解析などを通じて評価技術の妥当性を確認し高度化を図ることにより、水理場・化学環境の長期変遷をモデル化する技術の信頼性向上を図る。また、このモデル化技術を活用し、水理場や化学環境の時間的・空間的变化を将来予測するための方法論を整備する。なお、取得した科学技術的知見やノウハウは1.(2)⑤に反映する。

b. 生活圏を考慮した地質環境特性の長期変遷をモデル化する技術の整備

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

1. 地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化

(2) 地質環境の特性

④ ボーリング孔における体系的な調査・モニタリング・閉塞技術の整備

目的

- ◆ わが国の多様な地質環境を対象としたサイト調査を的確に実施するために、実証的な取り組みを通じて技術課題の解決を図るとともに、サイトにおける適用性などを考慮しボーリング孔の掘削・調査から長期モニタリングおよび閉塞に至るまでの一連の技術の高度化を図り体系的に整備する。

実施概要

a. 脆弱層を対象としたボーリング孔の掘削・調査技術の整備

これまでに異なる地質環境を対象とした事例研究を通じて、地層処分ににおけるサイト調査の観点から陸域の地質環境を対象としたボーリング調査技術は整備されてきた。今後は膨潤性・崩壊性を有し脆弱な地層を挟在する岩盤を対象に、ボーリング孔壁の崩壊や押し出しの回避、高いコア回収率の確保、掘削泥水がボーリング孔周囲の地層に及ぼす水理学的・化学的な影響の低減などに向け、新たに開発した掘削泥水や掘削機器の適用性の確認および掘削手法の最適化を図る。また、サイト調査の観点から求められる地質環境情報の品質を念頭に置き、掘削泥水の影響を考慮した同孔における各種の検層や調査・試験およびコア試料を用いた調査・試験の合理化を図る。この取り組みを通じてボーリング孔の掘削・調査技術の体系的な整備を図るとともに、取得した科学技術的知見やノウハウは1.(2)⑤に反映する。

b. 岩盤の力学的・水理学的変化および地下水の地球化学的变化の長期モニタリング技術の高度化

これまでに異なる地質環境を対象とした事例研究を通じて、ボーリング孔を利用した岩盤の変形および地下水の水圧・水質に係る個別のモニタリング技術が整備されてきた。今後は当該技術に必要な改良を加え、サイトにおける数十年という時間スケールを視野に入れつつ最先端の光ファイバセンシング技術を用いて岩盤の力学的な変形を高精度で測定できるようにするとともに、水圧計や採水装置の小型化を図り、ガスの影響を排除した水圧観測および採水を同一のボーリング孔内で同時に実施できるように高度化を図る。さらに、上記のボーリング孔への適用を通じて当該技術の適用性を確認する。なお、取得した科学技術的知見やノウハウは1.(2)⑤に反映する。

c. ボーリング孔の閉塞技術の整備

処分場の閉鎖後に地表から掘削したボーリング孔が地下水や放射性核種の移行経路とならないように確実に閉塞することが国際的な課題となっているものの、これまでに当該技術の整備は十分に進められていない状況にある。今後は大深度ボーリング孔内に残置した試験装置やケーシングパイプなどの回収技術、対象とする地質環境に応じたボーリング孔閉塞材の選定・設置に係る技術について、国際的な枠組みにおける各国の実施主体との技術的な情報交換などを利用しつつ、既存のボーリング孔を対象とした適用試験などを通じて新たに整備する。なお、取得した科学技術的知見やノウハウは1.(2)⑤に反映する。

1. 地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化

(2) 地質環境の特性

⑤ サイト調査のための技術基盤の強化

目的

- ◆ わが国の多様な地質環境を対象としたサイト選定の技術的な信頼性向上に向け、1.(1)および1.(2)①～④の研究開発を通じて取得される地質環境特性に係る最新の科学的知見および地質環境調査・評価に係る技術的知見の集約や品質マネジメントシステムなどの整備を継続し、サイト調査のための技術基盤の強化を図る。

実施概要

- a. 多様な地質環境の特性に係る科学的知見の拡充
これまでに地下深部の地質環境特性とその長期変遷に係る科学的知見の収集・整理が適宜進められ、その理解が深められてきた。今後もサイト調査やセーフティケースの構築・更新への反映を念頭に置き、1.(1)および1.(2)①～④の研究開発などを通じて、自然現象が及ぼす影響なども考慮しつつ地下深部の地質環境特性とその長期変遷に係る最新の科学的知見を集約する。特にサイト選定において現実的に想定される地質環境のうち、情報量が少ない付加体堆積岩類などに係る科学的知見を優先的に拡充する。
- b. 陸域～海域を対象とした地質環境調査・評価に係る技術基盤の拡充
これまでにわが国の多様な地質環境を対象としたサイト選定の実施に向け、調査・評価技術に係る技術的知見の蓄積・拡充や調査・評価に係るマネジメントシステムなどの整備が進められてきた。今後も1.(1)および1.(2)①～④の研究開発に加え、二酸化炭素の地下貯留や海域を対象とした地下探査などに適用されている技術に係る最新の技術的知見を集約するとともに、特にその手法・適用方法、有効性や技術的課題などを分析・整理する。また、これまでに整備したサイト調査に適用する品質マネジメントシステムやデータマネジメントの考え方などについて、実証的な取り組みへの適用を通じて実効性の向上を図る。

2. 処分場の設計と工学技術

(1) 人工バリア

① 人工バリア代替材料と設計オプションの整備

目的

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

実施概要

a. 人工バリア代替材料の成立性の検討

これまでオーバーパックに用いる材料は炭素鋼鍛鋼品をレファレンスの仕様として検討を行ってきたが、炭素鋼であれば鋳鋼品も経済合理性の観点から候補材料として考えられる。さらに、より耐食性の高い材料として、銅複合オーバーパックやチタン複合オーバーパックについても、海外実施主体などで研究開発が進められている。また、緩衝材に用いるベントナイトについては、Na型ベントナイトのクニゲルV1を候補材料として、さまざまな材料特性の取得が実施されてきたが、経済合理性や調達の高多様性を確保する観点からは、上記のベントナイト以外についてもその適用性を確認していく必要がある。今後は、安全性の確保を前提に合理的な人工バリア材料の選定や仕様設定を進めるために、これまで優先的に研究開発されてきた材料に加えて様々な代替材料（例えば、炭素鋼鋳鋼品や銅コーティングによるオーバーパック、Ca型ベントナイトによる緩衝材など）の特性データを多様な環境条件を考慮して取得し、代替材料の技術的な成立性を確認する。なお、技術的な成立性を確認した代替材料の特性データは、「2.(1)①b, 2.(2)①a, 3.(3)①a」へ反映する。

b. 人工バリア設計オプションの整備

これまで安全性に加えて、操業の効率性や回収の容易性などにも考慮した設計オプションを整備してきた。今後、サイトの地質環境特性に対し柔軟に対応して、より合理的な人工バリア仕様を設計できるようにするために、安全性や回収の容易性などの性能をさらに高めた設計オプションや上記の代替材料に対する技術的な成立性を踏まえた設計オプションを検討する。高レベル放射性廃棄物については、耐食性を高めた銅複合オーバーパックや蓋部をドーム型構造にして耐圧性を向上させたオーバーパックを採用した場合の人工バリアなどが、TRU等廃棄物についてはPEM方式を採用した場合の人工バリアなどが新たな設計オプションとして考えられ、これらの設計オプションの工学的な実現性を試行的な設計検討により評価する。有望な設計オプションについては、人工バリア仕様の最適化に取り組む。なお、最適化を進めた人工バリア設計オプションの仕様は、「2.(1)③ab, 2.(2)①a, 2.(3)①ab」へ反映する。

2. 処分場の設計と工学技術

(1) 人工バリア

② TRU等廃棄物に対する人工バリアの閉じ込め機能の向上

目的

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

実施概要

a. 廃棄体パッケージの閉じ込め性能に係る試験と評価

操業期間中の安全性の向上を目的としたTRU等廃棄物の廃棄体パッケージについて検討し、これまでに操業中に加えて閉鎖後数百年程度の放射性物質の閉じ込め性能が期待できる廃棄体パッケージの設計仕様を示している。今後こうした設計オプションについて、さらに安全性や定置性などの性能の向上を図るために、製作性および構造健全性に関する実証的な試験等を実施して性能を評価し、廃棄体パッケージの設計オプションの改良を進める。廃棄体パッケージの製作技術については、パッケージ内の充填材に残存する水分の放射線分解による水素ガスの発生を抑制する技術や、廃棄体への熱影響を低減可能な遠隔蓋接合技術の開発に取り組み安全性の向上を図る。また、廃棄体パッケージの長期間の閉じ込め性能を評価するために、応力腐食割れや内部ガス圧の増加などを考慮した構造健全性の評価に必要なデータを、様々な処分環境を考慮して取得する。さらに、落下試験等の操業期間中の異常事象を対象とした実証試験により、廃棄体パッケージの堅牢性を確認する。なお、改良を進めた廃棄体パッケージの設計仕様は、「2.(2)①a, 2.(3)①b, 2.(4)①ab」へ反映する。

b. 陰イオン核種に対する閉じ込め技術の開発

これまでヨウ素除去フィルタ廃棄物はセメント固化することとし、長期の閉じ込め機能を期待していなかった。しかし、廃棄体の製造方法によっては、廃棄体からの浸出率を低減できる可能性が示されている。例えば、アルミナを基材とするヨウ素廃銀吸着材を高温高圧下で焼結し固定化する技術、ヨウ素を別の吸着材に固定化しガラス固化する技術などが開発されている。これら陰イオン核種に対する固定化技術は、化学的な特性の違いにより適用可能な処分環境が異なるため、今後は実現性が高いと判断する固定化技術を対象として、最適な処分方法を評価できるように、様々な処分環境を考慮した固化体の長期浸出試験と評価モデルの開発を実施する。また、廃棄体パッケージ内の充填材などとして、陰イオン吸着材を施工することで、さらに陰イオン核種の浸出率を抑制することが可能になると考えられる。これまでに、ハイドロタルサイトなどの複数の材料が陰イオンに対して高い吸着性能を有することを確認しているが、モルタル製充填材を使用すると化学環境が高アルカリ性になるため、適用性が低いと考えられてきた。今後、陰イオン吸着材の性能が発揮可能な環境となるような人工バリア概念について検討を進めた上で、実現可能な環境条件に対して複数の陰イオン吸着材の吸着試験を実施し、適用可能な吸着材を選定する。なお、陰イオン核種の吸着材などを適用した人工バリア概念は「2.(2)①a」へ、吸着試験などのデータは「3.(3)①a」へ反映する。

2. 処分場の設計と工学技術

(1) 人工バリア

③ 高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術の開発

目的

- ◆ 地上施設でガラス固化体と人工バリアを一体化するPEM (Prefabricated Engineered barrier system Module) 方式などの人工バリアの製作・施工、搬送定置といった人工バリアの構築技術の実用化と信頼性向上に向けて、段階的に技術の実証と遠隔操作化・自動化を含む装置の改良を進める。また、構築された人工バリアが閉鎖後長期の安全性を担保することを示すための品質保証体系を整備するために、施工プロセスの品質管理の具体化に加えてそれを補完するモニタリング技術を高度化する。

実施概要

a. PEMの製作・施工技術の開発

高レベル放射性廃棄物に対する人工バリアの製作・施工技術については、これまで豎置き方式を中心に研究開発が進められてきた。今後は有力な設計オプションと考えるPEM方式を対象として、適用性・実用性という観点で段階的に技術の実証に取り組む。そのためにまず、これまでの検討によるPEMの重量は約37トンと重いことから、地下での搬送定置作業を効率的に実施するために、安全性の確保を前提にPEMの設計仕様を合理化する。また、PEM容器は閉鎖後も残置されるため、容器の水密性や緩衝材の再冠水挙動に関する検討を実施して、緩衝材の安全機能に支障を生じないようにPEM容器をはじめとした改良型PEMの設計仕様を決定していく。改良型PEMの設計仕様に対しては、組み立て試験を実施して、PEMの製作性や品質を確認する。さらに、PEM方式では搬送定置装置が走行するための隙間の埋め戻しが技術課題と考えられるので、処分坑道内に湧水がある場合にも適用可能な隙間埋め戻し材の開発と作業の遠隔・自動化を前提とした施工技術を開発する。搬送定置技術については、従来装置の把持方法などの機構や遠隔操作化・自動化技術に改良を加えて安全性と効率性を高めた搬送定置装置の設計検討を進める。その上で、搬送定置装置の試作に向けた把持機構や遠隔操作化・自動化に必要な要素技術の開発を進めて、操業技術の実証試験の準備を整える。なお、PEMの設計仕様と設計に基づく搬送定置方法についてはその結果を、「2.(2)①a」へ反映する。

b. オーバーパックの製作技術の開発

オーバーパックの製作技術については、これまでに主に炭素鋼鍛鋼品に対する製作技術が構築されている。今後は2.(1)①で述べた炭素鋼鋳鋼品や銅との複合品などの代替材料に対する製作技術の構築を目的として開発に取り組む。また、蓋接合技術については、炭素鋼鍛鋼品およびそれぞれの代替材料に対しても適用できるように、溶接後の後熱処理や検査技術を含む遠隔操作化・自動化技術を前提とした開発を進める。

c. 製作・施工技術に係る品質保証体系の整備

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

2. 処分場の設計と工学技術

(2) 地上・地下施設

① 処分施設の設計技術の向上

目的

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

実施概要

a. 設計技術の体系的整備

これまでにサイト選定で想定される三種類の候補母岩を対象として処分場の設計を試行して、所要の設計要件を満足する処分場の仕様を提示している。この中で、現実的な地質環境に対応した地下施設の設計手法として、断層の分布を考慮したレイアウトの判断指標、割れ目からの湧水を考慮した廃棄体定置の判断指標など安全機能を確保するための判断指標を導入し、既存知見に基づいた設計基準値の目安を設定している。これらの判断指標および基準の目安に関しその妥当性を確認し、適切に整備・更新していく。また、人工バリア設計オプションの整備等を踏まえつつ、事業期間中の安全対策を含め実用性と合理性を高めてより最適化された処分場の設計を「処分場の概念設計」として示し、今後の事業実施に備える。なお、設計した処分場の仕様は閉鎖後長期の安全性の評価の初期条件として、「3.(2)②a」へ反映する。

b. 建設・操業システムの設計技術の整備

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

2. 処分場の設計と工学技術

(2) 地上・地下施設

② 処分場閉鎖後の水みちを防止する技術の整備

目的

- ◆ 処分場の閉鎖後に坑道が水みちとなることを防止するためのプラグや埋め戻し材などの坑道シーリング技術については、これまでの設計概念の詳細化や施工技術の成立性を確認するために、坑道シーリングが処分場全体の閉じ込め性能に与える影響の評価や、湧水をとまなう割れ目帯などの様々な地質環境を考慮した試験を行う。

実施概要

a. 坑道シーリングの設計・評価技術の整備

プラグや埋め戻し材による坑道シーリングの設計・評価技術については、これまでに原位置での人工バリア性能確認試験等を通じて試行的な設計とその適用性などに関する検討が進められおり、現在、再冠水過程のモニタリングデータを分析して、設計で期待したシーリング材の性能の評価を実施中である。今後は、坑道シーリングにより処分場全体の閉じ込め性能を評価すること、これまでの設計概念をさらに詳細化することを目的とした検討を進める。そのために、わが国の多様な地質環境条件を想定した地下水流動解析等により、埋め戻し後の坑道や掘削損傷領域が処分場の安全機能に与える影響の幅を把握し、止水プラグや埋め戻し材に期待する役割を明確化する。また、操業から閉鎖後長期に影響を及ぼす可能性のある事象を特定して、これら坑道シーリングを構成する要素の設計要件を整理するとともに、構成要素を組み合わせた場合のシステムとして設計が可能となるように、設計・評価技術の高度化を図る。なお、坑道シーリングの設計は「2.(2)①a」へ、坑道シーリングの評価技術は「3.(2)②a」へ反映する。

b. 坑道シーリング技術の性能確認

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

c. 坑道シーリングに関わる施工技術の整備

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

2. 処分場の設計と工学技術

(2) 地上・地下施設

③ 処分場建設の安全性を確保する技術の高度化

目的

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

実施概要

a. 坑道の掘削損傷領域の評価技術の整備

水平坑道や立坑における掘削損傷領域の大きさや水理特性の変化については、これまでに原位置試験や数値解析により定量的な評価が実施され、掘削方法の違いによる亀裂発達状況の違いなどの知見が得られている。これまでに得られた情報は、単設坑道における局所的なものが主であったが、処分場の閉鎖前および閉鎖後の安全性確保の観点からは、三次元かつ広範囲にわたる掘削損傷領域の水理・力学特性の予測・評価手法の構築が求められる。今後は坑道周辺の応力方向や大きさ、岩盤の力学特性や亀裂特性、透水性が増大した領域、坑道形状の影響などについて、数値解析や計測データ等に基づき、坑道が接続するような場合も含めて広範囲な領域における掘削損傷領域の拡がりや経時変化を把握できるように、評価技術を整備する。なお、掘削損傷領域の大きさや特性については、「2.(2)②a, 3.(2)②a」の設定値に反映する。

b. 掘削技術の高度化

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

c. 湧水対策技術の整備

処分場の操業期間を対象として湧水対策を実施する場合は数十年、閉鎖以降も考慮する場合は数万年を対象としてグラウトの周辺岩盤や人工バリアシステムに与える影響を評価する必要がある。その影響低減策として、これまで地下坑道を対象として、低アルカリセメントを用いたグラウト施工の実証的な検討が進められている。今後は沿岸部など多様な環境条件に対するグラウト施工の適用性の向上を図ることを目的として、周辺環境への化学的影響がより小さいと考えられる溶液型グラウトの海水系条件における適用性を評価する。また、地下施設におけるグラウト施工実績により得られた湧水抑制対策に関する成果は、これまで単一坑道を対象に適切な止水効果が得られることが確認されている。しかしながら、処分場において想定される多連接坑道では、グラウト施工箇所からの地下水の回り込みにより他の坑道に地下水が流入することなどの影響が生じる場合も想定される。このため、今後は湧水に対する安全性の向上と排水およびその処理にかかるコストを低減することを目的として、多連接坑道を対象としたグラウト施工の影響と対策効果について、解析などによる湧水量評価を実施して検討するとともに、多連接坑道において適切な止水効果を得るためのグラウト施工手法について知見を取りまとめる。なお、湧水対策技術の考え方は、「2.(2)①ab」へ反映する。

2. 処分場の設計と工学技術

(3) 回収可能性

① 廃棄体の回収可能性を確保する技術の整備

目的

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

実施概要

- a. 高レベル放射性廃棄物に対する廃棄体回収技術の開発
高レベル放射性廃棄物に対する廃棄体の回収技術については、これまでに縦置き方式を対象として緩衝材の除去技術など、回収方法の要素技術の開発とその適用性の確認が進められてきた。今後は横置きPEM方式を対象として、これまでに整備を進めた要素技術に基づき、回収技術の実現性を確認する。また、回収装置については遠隔操作化・自動化に関わる技術開発を進める。
- b. TRU等廃棄物に対する廃棄体回収技術の開発
TRU等廃棄物に対する人工バリア設計オプションの整備（2.(1)①，2.(1)②）を踏まえて、各設計オプションに適用可能な回収技術の概念検討を実施する。そして、有望な回収技術概念については段階的な研究開発と技術実証への取り組みを進め、信頼性と実現性の高い回収技術を確立する。
- c. 回収可能性の維持に伴う影響評価技術の整備
様々な処分概念や坑道埋め戻し状態に対する回収の容易性を設計に反映するため、回収可能性を維持した時の地質環境や人工バリアへの影響について、これまでに包括的な影響要因等を抽出している。この結果を踏まえ今後は、定置作業後に回収可能性の維持期間を設けることに伴い、坑道の開放期間が延長されることによる安全性への影響について、操業期間中の安全性（開放坑道の健全性、埋め戻した坑道の再利用時の健全性、定置済み廃棄体容器の健全性など）および閉鎖後長期の安全性（維持期間中の地下環境の擾乱継続に伴う人工バリア等の機能変遷、母岩への擾乱影響など）の双方の観点から、個々の影響の解析的な評価技術を整備する。また、回収可能性の維持に伴う影響を最小化するための対策技術の開発に取り組む。なお、回収可能性を維持した時のニアフィールドの状態については閉鎖後長期の安全性の評価の初期条件として、「3.(2)②a」へ反映する。

2. 処分場の設計と工学技術

(4) 閉鎖前の安全性の評価

① 閉鎖前の処分場の安全性評価技術の向上

目的

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

実施概要

a. 閉鎖前の安全性の評価シナリオの構築

建設から閉鎖までの処分場の地上・地下施設で発生する可能性のある異常事象として、これまでに火災、水没、電源喪失、廃棄体の落下などを特定し、それらが最終的にどのような事故に発展する可能性があるかについてイベントツリー分析を実施し、評価シナリオを作成した。今後さらにシナリオの網羅性を高めていくために、事象の重畳など複合的な事象の発生についても評価シナリオの検討を実施する。また、海外の分析事例についても情報を収集し、今後の検討に反映する。

b. 閉鎖前の安全性評価技術の整備

これまでに火災、水没、電源喪失、廃棄体の落下を異常事象として抽出し、閉鎖前の処分場の安全性確保の見通しについて評価してきた。今後は上記の複合的な事象の発生などさらに過酷な状況を想定した評価シナリオに対する評価結果の妥当性、信頼性の向上のために、必要に応じて異常事象を模擬した試験を実施する等して評価技術の整備を進める。廃棄体周辺の放射性分解による水素ガスの発生量など安全性の評価上重要なパラメータについては、今後の人工バリア仕様の検討結果を踏まえた条件等に対して試験を実施して取得する。また、アスファルト固化体の火災の延焼に伴う硝酸塩と有機物の化学反応の促進の可能性について評価するために、特性評価試験を実施し、反応評価モデルの開発と検証を実施する。なお、異常事象に対する評価結果は「2.(2)①a」へ、ガス発生量やアスファルト固化体に対する評価結果は「2.(1)②a」へ反映する。

c. 事故対応技術の整備

評価シナリオに基づく異常事象への対応策として、これまでにアクセス坑道で搬送車両が逸走した場合や定置作業中の異常出水等に伴い水没した状態を想定して、その対応策および復旧作業の進め方の検討を行っている。今後閉鎖前の処分場のさらなる安全性の確保を目的として、関連する施設の具体的な事故事例を参考に実践的な検討を実施し、事故対策および影響緩和策を「2.(2)①ab」の施設設計に反映する。

3. 閉鎖後長期の安全性の評価

(1) シナリオ構築

① 地層処分システムの状態設定のための現象解析モデルの高度化 (1/2)

目的

- ◆ これまで、シナリオ構築に必要な処分場閉鎖後の地層処分システムの状態理解のため、熱、水理、力学、化学（THMC）の観点から重要な個々の現象に重点を置き、解析モデルを開発してきた。今後は、地層処分が本来有する安全性を示すため、地層処分システムの構成要素間及び諸現象間の相互作用による場の変化を、廃棄体定置直後の過渡的な時期から閉鎖後長期に至るまでの期間を対象に評価することが出来るよう、現象解析モデルの構築・高度化や統合化を可能とする技術の開発を行う。

実施項目

a. 廃棄体からの核種溶出モデルの高度化

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

b. ニアフィールド構成要素の現象解析モデルの構築・高度化

複数の異なる構成材料からなるニアフィールドの状態変遷の評価を目的として、これまでは、オーバーパックやセメント系材料による緩衝材の変質に関する試験データを取得し、これらを表現できる解析モデルの構築を実施してきている。今後は、沿岸部を含む幅広い地下水環境に留意し、オーバーパックやセメント系材料による緩衝材変質についてTHMCの観点からデータを取得し、現象解析モデルの妥当性確認を行うとともに、重要な反応系が明らかになった場合には現象解析モデルへ取り込む。また、先進的なセメント系材料であるHFSC（Highly Fly-ash contained Silica-fume Cement）については、変質に重要な二次鉱物の生成現象について現象解析モデルへ取り込む。加えて、地下施設でのグラウト施工事例を対象に試験・分析等を実施し、母岩中のアルカリブルームの反応輸送解析モデルを構築する。一方、過渡期に想定される緩衝材流出現象については、緩衝材流出現象に係るデータの取得と現象解析モデルの開発を行う。そして、開発した現象解析モデルを用いて緩衝材流出対策の妥当性評価を実施する。なお、構築した現象解析モデルは「3.（1）①f.」へ反映し、取得したデータは、「3.（3）①a」へ反映する。

c. 廃棄体由来の発生ガスに関する現象解析モデルの妥当性検討

廃棄体の放射線分解等に由来して発生するガスによる影響評価を目的として、これまでは緩衝材及びセメント系材料のガス移行試験を実施しガス移行特性に係るデータを取得するとともに、ガス移行に加え力学の連成解析が可能なモデルを構築してきた。そこで、今後は処分坑道を模擬した小規模試験体によるガス移行実験などにより既往の現象解析モデルの妥当性を確認する。加えて、その現象解析を試行的に実施し、核種移行挙動へのガス影響を分析する。

3. 閉鎖後長期の安全性の評価

(1) シナリオ構築

① 地層処分システムの状態設定のための現象解析モデルの高度化 (2/2)

実施項目

d. コロイド・有機物・微生物の影響評価手法の構築・高度化

これまでに、ベントナイトコロイドの移行に伴う核種移行への影響評価モデルを構築した。そこで、今後は緩衝材からのベントナイトコロイドの生成挙動を影響評価モデルへ反映した後、影響評価モデルの妥当性確認を実施する。一方、天然コロイドについては、これまでに比較的大きいコロイド ($>0.2\mu\text{m}$) を対象とした影響評価モデルを構築しており、今後は粒径の小さいコロイド固有の特性を当該モデルへ反映する。有機物については、廃棄体由来のイソサッカリン酸 (ISA) によるアクチノイド元素の溶解度への影響評価や、天然有機物と核種の錯体形成モデルの構築を実施してきた。今後は、前者については、遷移元素の溶解度への影響や収着への影響に関するデータを取得し、後者については天然有機物-核種-岩石の三元系における核種収着データを取得する。そして、これらの成果を用いて影響評価モデルを構築する。微生物については、一部の種類を対象に核種の取り込み等に関するデータを取得してきた。今後は、その他の主要な微生物についてもデータの取得を行う。なお、得られた知見に関しては「3. (3) ①a」へ反映する。

e. 硝酸塩の現象解析モデルの妥当性検討

TRU廃棄物に含まれる硝酸塩の地層処分システムへの影響評価を目的として、地下深部における硝酸イオンの化学的変遷モデル (硝酸イオン-金属等) の開発を行った。今後は、長期浸漬試験により取得したデータや地下水の硝酸塩汚染事例を用い、モデルの妥当性の確認と高度化を行う。また、硝酸イオンに加え、反応生成物であるアンモニアなどの核種移行への影響に関する知見の拡充を行う。なお、得られた知見に関しては「3. (3) ①a」へ反映する。

f. 現象解析モデルの統合化技術の構築

空間的・時間的な地層処分システムの変遷を理解するため、ニアフィールドに注目し、様々な現象解析モデルを統一したプラットフォームで連成し、解析することが可能となるシステムを構築してきた。今後は、「3. (1) ①」において構築した現象解析モデルについても当該プラットフォームに取り込み、それらの連成解析を可能とするシステムの拡張を行う。さらに、本システムを用いた試行的な連成解析により、安全上の重要な課題について抽出する。

3. 閉鎖後長期の安全性の評価

(1) シナリオ構築

② リスク論的考え方に則したシナリオの構築手法の高度化

目的

- ◆ これまでに、国際機関における地層処分の安全規制の考え方などを参考に、リスク論的考え方を包括的技術報告書の安全性の評価では採用し、発生可能性を考慮したシナリオ構築手法を開発した。加えて、シナリオ構築プロセスにおける個々の現象の発生可能性に関する判断やその論拠の分析ツールを構築した。今後は、安全性の評価の信頼性向上を目的として、構築したシナリオに対応する核種移行解析ケースの設定作業に関する情報の管理ツールを整備するとともに、シナリオの発生可能性の議論をより効果的かつ効率化するためストーリーボードの高度化を行う。また、極めて発生可能性が小さいと考えられる人間侵入シナリオと稀頻度事象シナリオについては、国内外における最新の考え方を反映して評価を実施している。今後も引き続き情報収集を図り、評価手法へ反映する。

実施項目

- a. シナリオ構築から核種移行解析ケース設定に用いる情報の管理ツールの整備
安全機能を視軸として、FEPの発生可能性に基づきシナリオを構築する手法を開発し、シナリオ構築の追跡性等を確保するため、様々な管理ツールを整備してきた。今後は、構築したシナリオから核種移行解析ケース設定までのプロセスについても同様に、判断の経緯や結果、およびその論拠についての管理ツールの整備を図る。また、シナリオ構築手法において重要なFEPリストについては、これまでにOECD/NEAのNEA FEP Database Projectへの参画や包括的技術報告書の策定を通じて、更新を行ってきた。今後も、基盤研究や諸外国における検討の情報を収集し、適宜FEPリストの更新を図る。
- b. 様々なデータを利用可能なストーリーボードの高度化
シナリオの十分に資するため、最新の科学的知見を様々な分野の専門家が共有し、処分システムの状態設定を議論することを目的としたストーリーボードを開発してきた。今後は、閉鎖前も含めた一連の状態設定の理解を容易にするために、「1. (2) ③ 地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化」で整備する地質環境の長期変遷モデルや現象解析モデルを用いた緩衝材の変質の進展挙動などをアニメーションとして描画する機能を取り入れる。また、ストーリーボードに示した処分システムの状態設定に関する論拠を閲覧できるようデータベースとのリンク機能を取り入れる。加えて、リスク論的考え方に則したシナリオの作成に資するため、考えられる複数の状態設定についても表現できるようにする。
- c. 人間侵入シナリオと稀頻度事象シナリオに関する検討
国際機関や諸外国の実施主体、規制機関、国内における類似事業で示された評価の考え方やシナリオなどを参考に、人間侵入シナリオや稀頻度事象シナリオで取り扱う事象の選定や様式化方法を検討してきた。今後も国際会議等を通じて情報（例えば、記録の保存の人間侵入に対する有効性）を収集し、最新の知見を反映した評価手法の検討を実施する。なお、稀頻度事象の発生可能性の考慮において、「1. (1) ⑤b」の成果を反映する。

3. 閉鎖後長期の安全性の評価

(2) 核種移行解析モデル開発

① 地層処分システムの状態変遷等を反映した核種移行解析モデルの高度化

目的

- ◆ 核種移行解析におけるニアフィールドの時間変遷については、例えば解析の初期から緩衝材がすべて変質した際のパラメータを適用するなど、保守的な条件を設定することを基本的なアプローチとしてきた。また、母岩の割れ目中の核種移行解析モデルでは、水みちの微細透水構造や充填物への収着等を詳細に考慮していなかった。今後は、地層処分システムが本来有する安全性を示すため、保守的に取扱ってきた諸現象をより現実的に反映することが可能な核種移行解析モデルの開発を行う。

実施項目

- a. ニアフィールドにおける状態変遷を考慮した核種移行解析モデルの構築
セメント系材料と緩衝材との反応など、様々な現象が複合的に進行するニアフィールドを対象として、これまでは、緩衝材等が変質した場合の基礎データを取得してきた。例えば、セメント系材料によりCa型化した緩衝材やオーバーパックの腐食によりFe化した緩衝材における核種の収着・拡散に係るデータを取得した。今後は、「1. (2) ③地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化」において取得した地下水化学の変遷に関する情報や「3. (1) ①」の現象解析モデルの高度化において取得した情報に基づき、ニアフィールドの状態の変遷を設定する。その設定に応じた条件において変質したセメント系材料や緩衝材中の核種の移行挙動に係るデータを取得し、変質した材料を対象とした核種移行解析モデルを構築し、さらに、その妥当性を確認する。また、時間変化を考慮した地質環境モデルやニアフィールドを対象とした連成解析の結果を、核種移行解析モデルへ反映する手法を構築する。例えば、核種移行パラメータの時間変化に対応した核種移行解析の実施などが考えられる。
- b. 水みちの微細透水構造などを反映した核種移行解析モデルの構築・高度化
水みちの微細透水構造を反映したより現実的な場を反映した核種移行解析モデルの構築に関し、これまでは結晶質岩（花崗岩）および堆積岩（泥岩）のマトリクス中の核種移行特性を反映した核種移行解析モデルを構築してきた。今後は、母岩中の割れ目内における充填鉱物への収着や、マトリクス部の間隙構造や鉱物分布等の不均質性を反映することが可能な核種移行解析モデルを開発する。さらに、構築した核種移行解析モデルの妥当性を確認する。また、複数の割れ目が連結した場（数十メートルから100メートル程度の領域）を対象とした既存の水理・物質移動モデルについて妥当性を確認する（「1. (2) ①c」と連携）。さらに、この取り組みを通じて、モデルの妥当性を確認する手法を取りまとめる。

3. 閉鎖後長期の安全性の評価

(2) 核種移行解析モデル開発

② 施設設計等を反映した核種移行解析モデルの高度化

目的

- ◆ 閉鎖後長期の安全性の評価の信頼性の向上を目的として、これまでは、ニアフィールドスケールを対象に地質環境条件や施設設計を精緻に反映可能な核種移行解析モデルの構築手法を開発した。今後は、処分場パネルやアクセス坑道などの配置等の比較的規模が大きい施設を対象とした核種移行解析モデルの構築を図る。加えて、地質環境特性の長期変遷等の成果を反映し、地質圏-生活圏インターフェイス（GBI）の時間的変化をより現実に取り扱うことが可能となるよう生活圏評価手法の高度化を図る。

実施項目

a. 施設設計を反映した核種移行解析モデルの構築・高度化

これまでは、ニアフィールドスケールを対象に、三次元の粒子追跡解析に基づき、母岩中の割れ目の連結性を反映した一次元マルチチャンネルモデルの構築手法、および、ニアフィールドと処分場スケールを比較的簡易に結合させる手法を開発した。今後は「1. (2) ③地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化」で整備する地質環境の長期変遷モデルや「2. 処分場の設計と工学技術」等で検討される設計を対象に、広域スケール、処分場スケール、パネルスケール、およびニアフィールドスケールの各スケールを対象とした三次元の粒子追跡解析を行う。そして、その結果を用いて坑道や人工バリア、埋戻し材といった処分施設の構成要素の配置や形状、物理化学的特性を明示的に取り込むことが可能な核種移行解析モデルの構築手法を開発する。さらに、各スケール間の地下水流動解析や粒子追跡解析等の結合方法を開発する。また、核種の移行挙動は、気候・海水準変動などによる地下水流動方向や地下水組成の変化などに影響を受けることから、「1. (2) ③地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化」の成果を反映し、地質環境の時間変遷を核種移行解析で考慮する手法を構築する。なお、大規模スケールを対象とした数値解析を並列計算などにより高速処理する手法についても併せて構築する。

b. 地質環境の変遷に応じた生活圏評価手法の高度化

これまでは、気候や地形の観点から、日本を類型化し、それぞれに対して生活圏モデルを整備し、農作業従事者などの決定グループを対象に一般的な生活圏評価を実施してきた。今後は、「1. (2) ③地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化」で整備する地質環境の長期変遷モデルを用いて、時間変化するGBIの空間分布を特定する手法を構築する。加えて、整備してきた生活圏モデルとの結合手法をコンパートメントモデルの改良も視野に入れて構築する。なお、本検討にて、重要かつ整備に時間を要するデータや課題についても分析し、適宜、パラメータ設定に係るデータの取得計画（「3. (3) ①」）へ反映する。

3. 閉鎖後長期の安全性の評価

(3) 核種移行解析に用いるパラメータに関するデータの整備

① 核種移行等に関するデータの取得およびデータベース整備

目的

- ◆ 3. (2) で整備される現実的な地層処分システムの状態や設計の特徴を反映可能な核種移行解析モデルに対応するために、核種移行解析におけるパラメータの設定に用いる熱力学・収着・拡散データベースや生活圈評価に用いるデータベースについて、不十分なデータを拡充する。また、これまでに特定のサイトの情報を用いずに核種移行パラメータを設定する手法を構築したが、今後は、概要調査段階の準備を目的として、サイトで取得した地下水水質などのサイト固有のデータを使用してパラメータを設定する手法を構築する。

実施項目

- a. 想定される様々な処分場環境を対象とした核種移行パラメータ設定に資するデータの拡充
文献調査に加え、室内試験を通じて熱力学データベース (TDB)、収着データベース (SDB)、拡散データベース (DDB) の拡充を図ってきた。今後は、沿岸海底下や比較的炭酸濃度が高い地下水が存在する場等に重点を置き、岩石、緩衝材および主要鉱物等への収着・拡散データ、溶解度設定に係る熱力学データを取得する。さらに、ニアフィールド環境の長期状態変遷を考慮した核種移行パラメータの設定のため、「3. (1) ①」や「3. (2) ①」で重要と分析されたデータ（例えば、高濃度硝酸塩環境下における鉱物への核種の収着データやCa型ベントナイトへの核種の収着データ等）について取得する。また、これら取得データに加え、現象解析モデルや核種移行解析モデルの構築・高度化の際に取得したデータも含め、データベース (TDB, SDB, DDB) へ反映する。
- b. 様々な生活圈を想定した生活圈評価に係るデータの拡充
これまでは、日本全体を幅広く対象とした地下環境（岩種、地下水組成）を対象とし、安全性の評価上重要な核種の地表土壌への収着分配係数等のデータの取得や、地表における炭素の循環メカニズムなどに関する研究を実施してきた。今後は、データが十分に整備されていない沿岸海底下や比較的炭酸濃度が高い地下水が存在する場などの地質環境条件に重点を置き、地質環境モデルや現象解析モデルの検討において得られる地層処分システムの長期的な変遷を考慮して、核種移行パラメータ設定に係るデータを拡充する。また、これらの地質環境条件などにおいて重要であることが明らかとなったアクチニドやその子孫核種に重点を置いてデータを拡充する。また、従来からの支配核種であるヨウ素を対象に、地表における循環に関するデータについても拡充を図る。なお、「3. (2) ②b」の生活圈評価方法の高度化の検討成果に応じて、重要であることが示されたデータについては適宜データ取得計画へ反映する。
- c. サイト調査を反映した核種移行パラメータの設定方法の構築
これまでは仮想的に設定した地質環境を対象に、実験室で取得された既存のデータを用いて、溶解度や収着分配係数、拡散係数のパラメータを設定する手法を構築した。今後は、概要調査段階を想定し、実際のボーリング調査により取得された地質環境情報や核種移行に係るデータなどを用いて、核種移行パラメータ（溶解度、収着分配係数、拡散係数等）を設定する手法を構築する。