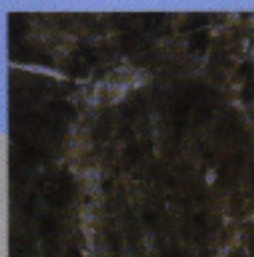


わが国における高レベル放射性廃棄物 地層処分の技術的信頼性

—地層処分研究開発第2次取りまとめ—

分冊2 地層処分の工学技術



平成11年11月26日

まえがき

平成9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等の今後の進め方について」（以下、「専門部会報告書」という）に従い、核燃料サイクル開発機構は関連する研究機関等の協力を得て、地層処分研究開発の第2次取りまとめを進めてきた。

第2次取りまとめは、1992年に公表した第1次取りまとめの成果を受けて、わが国における地層処分の技術的信頼性を示すとともに、2000年を目安に設立される実施主体が処分事業を進めるうえでの処分予定地の選定、安全基準の策定の技術的拠り所を与えるものであり、国の評価を経て2000年以降の研究開発を具体化するうえで重要なものと位置づけられている。

わが国においては、1984年の原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会報告書によって、研究開発にあたり岩石の種類を特定することなく幅広い地質環境を対象とすることとされている。また地層処分に関する安全規制上の基準については現在準備段階にある。これらのことから第2次取りまとめは、専門部会報告書に示された技術的課題に対する科学的知見を積み重ねることによって、わが国の地層処分概念を一般的に検討しその成立性を概括的に論じたものであり、地層処分計画を研究開発の段階から実施段階に進めることについての技術的な判断材料となることを意図している。

取りまとめにあたっては、研究開発の成果を積極的に公開し、技術的内容について個々に評価を受けるとともに、取りまとめの過程においても種々の機会を利用して国内外から広く意見を求めてきた。平成9年9月には、第2次取りまとめに向け、関係研究機関等の協力を一層進めるため、日本原子力研究所、地質調査所、防災科学技術研究所、電力中央研究所、原子力環境整備センター、電気事業連合会、高レベル事業推進準備会、核燃料サイクル開発機構の各機関および大学の専門家による「地層処分研究開発協議会」が発足した。この協議会のもとに設けられた検討部会とタスクフォースにおいて、ほぼ毎月1回の頻度で詳細な技術的検討が進められ、その成果は適宜第2次取りまとめに反映されてきた。

第2次取りまとめの過程で、平成10年9月および平成11年4月の2度にわたり、研究開発の進捗をドラフトとして中間的に整理し、原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会に報告するとともに公表した。さらに、これにあわせて地層処分研究開発報告会の開催、ホームページへの掲載を行い、関係する幅広い分野の専門家等の方々からご意見をいただきながら、取りまとめを進めてきた。また、専門部会報告書の指針に従い、ドラフトの段階で経済協力開発機構・原子力機関（OECD/NEA）による国際レビューを受けるとともに、ワークショップ等を通じて海外の専門家とも技術

的な内容について意見交換を行った。

このように地層処分研究開発協議会をはじめとして、多くの方々のご意見、ご協力をいただき、これらを反映して、このたび第2次取りまとめの報告書「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性―地層処分研究開発第2次取りまとめ―」（以下、報告書の呼称として「第2次取りまとめ」という）を作成した。報告書は、総論レポートと専門部会報告書に示された主要な研究開発分野に対応する3つの分冊、分冊1「わが国の地質環境」、分冊2「地層処分の工学技術」および分冊3「地層処分システムの安全評価」から構成した。また、地層処分に関する基本的な事項、諸外国や日本の計画の進展などについてのこれまでの議論や情報を整理し、別冊「地層処分の背景」を用意した。

本報告書は、第2次取りまとめの分冊2「地層処分の工学技術」であり、総論レポートでの記述内容のうち、地層処分を実現するための工学技術に関する研究開発成果の詳細をまとめたものである。本分冊の取りまとめにおいては、総論レポートで記述した内容の根拠となる個々の研究成果の品質を示すとともに、試験研究や設計解析手法などに関する情報を詳細に補完することに留意し、試験や解析の結果だけでなく実施内容にも透明性をもたせるよう心がけた。ただし、すべての研究項目にわたって細部まで記述することは量的に困難であるため、適宜個々の研究に関する公開文献を示した。また、研究開発全体としての統合化は総論レポートに委ね、本分冊においては、人工バリアと処分施設の設計、処分場の建設・操業・閉鎖、および処分場の管理について、材料の特性などに関する基礎的研究の成果も含め、設計評価の一連の流れと具体的な設計例、技術の適用性を示した。

要 約

本報告書は、これまで核燃料サイクル開発機構が実施してきた処分技術の研究開発の成果を取りまとめたものである。その内容は、基本的に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等の今後の進め方について」に示された第2次取りまとめの処分技術の目標および課題に応えるものとなっている。また、総論レポート第IV章の「地層処分の工学技術」に示した内容を透明性と追跡性をもって技術的に支えるものである。

専門部会報告書では、人工バリアと処分施設の設計、製作・施工、建設などに関し、第2次取りまとめの目標は、安全性を実現するための信頼性の高い人工バリアならびに処分施設についての設計要件を提示するとともに、これらが現実的な工学技術によって合理的に構築できることを示すこととされている。この目標に対して、わが国の長期的な安定性を備えた幅広い地質環境を考慮しつつ、人工バリアや処分施設の設計の考え方や設計要件を示し、これらに基づいて設計を試みることにした。さらに、設計したそれらの仕様例に対して、合理的に製作、施工ができることを示すことにした。また、専門部会報告書では、処分場の地質環境と地層処分システムの状態を監視し安全性を確認するため、建設開始から閉鎖に至るまでの各段階において取得すべき情報、計測方法などを技術的に検討し、処分場の管理に関する技術的基盤を整えることとされている。これに対しては、処分場の管理の目的を明らかにするとともに、その目的に沿った、建設、操業、閉鎖の各作業段階で行われる管理の項目と、その項目ごとに取得すべき主な情報の内容を示すことにした。

本報告書は全8章から構成されている。第I章は、専門部会報告書に示された内容を踏まえて、目的、構成および概要を示し、第II章から第III章にかけては、わが国の地層処分の概念と人工バリアと処分施設の基本概念、人工バリアと処分施設の設計の基本的考え方、検討に必要な前提について論じている。第IV章では、人工バリアや処分施設の設計要件を検討し、これらに基づいて設計を試み、処分場のレイアウト、埋設後の人工バリアの健全性に関する検討結果を示している。第V章では、現状技術あるいは近い将来実現可能と考えられる技術に基づいた、処分場の建設・操業・閉鎖について論じている。第VI章では、地層処分の基本概念や制度的管理などに関する国際的なコンセンサスを念頭に、処分場の管理の目的、内容について論じている。第VII章では、国の基本方針などに示された処分の基本スケジュールと関連させて、検討した処分場のレイアウトの例に対応する全体工程について論じている。最後に処分技術の研究開発の全体的な結論として、専門部会報告書の目標や

課題に対する総括を VIII 章に示している。

人工バリアや処分施設の設計を合理的に行うために、「設計要件」、「設計の進め方」、「設計解析」を組み合わせ、設計の基本的な流れを設定した。オーバーバックや緩衝材の設置環境としては、わが国の地質環境を幅広く考慮するため、設計にあたって、オーバーバックや緩衝材の設置環境としては、地下水を降水起源から海水起源のものまで幅広くとらえることとした。また、岩盤の物性については、岩種ごとに整理した岩盤の力学特性の分布や割れ目頻度より、硬岩系岩盤データセットと軟岩系岩盤データセットに区分し、岩盤の一軸圧縮強度との相関関係などを考慮して設計に用いる各物性を設定した。このとき、文献などをもとに広く収集したデータの幅を検討し、それらが地下深部の物性を表現していると考えてよいことを東濃地域・釜石鉱山での実測値によって確認した。処分深度に関しては、地層処分の長期安全性、地質環境の特性、現状における建設技術や調査技術の適用範囲、設計において把握される深度の範囲という 4 つの観点から概略検討を行った。この結果を参考に、技術的に厳しい条件を設定することにより技術の適用範囲を幅広く示しておくという観点から、硬岩系岩盤で 1,000m、軟岩系岩盤で 500m と設定した。廃棄体を定置するためのレイアウトに関して、技術の適用範囲を幅広く示しておくという観点から、掘削・埋め戻し量と操業性の面で対照的な特徴を有する、処分坑道横置き方式と処分孔縦置き方式を例にとり、検討を行った。

オーバーバックの設計

地層処分の安全性確保の観点から、オーバーバックには、放射性核種の物理的な閉じ込めが基本的な要件として求められている。この要件に対して、オーバーバックは、少なくともガラス固化体中の放射能がある程度減衰するまでの期間、地下水をガラス固化体に接触させないようにする機能を有する必要がある。また、人工バリアが成立するための要件として、ガラス固化体および緩衝材の性能に有意な影響を与えないことや、オーバーバックの製作・施工が技術的に可能であることについても十分考慮する必要がある。設計要件のうち、オーバーバック成立の可否は、まず第 1 に腐食により定まるものと考え、耐食性の見通しを有しつつ、耐食性以外の要件に対しても有望と考えられる炭素鋼を第 1 に検討すべき材料とした。次に、その貴金属的な性質から還元性である処分環境において優れた耐食性を発揮し得る準耐食性金属に分類される銅も検討対象の 1 つとした。一方、高耐食性金属については、耐すきま腐食性の観点からチタン（低合金チタンを含む）を優先的な検討対象として取り挙げた。

炭素鋼の腐食シナリオの検討の結果、圧縮ベントナイト中において炭素鋼は不動態化しにくいことがわかった。また、水素脆化の生起の可能性、微生物による影響が生じる可能性および還元環境下において腐食生成物が炭素鋼の腐食を加速する可能性は低いと考えた。炭素鋼の腐食寿命評価においては、酸素による腐食深さ、水の還元による腐食深さを合算し、1,000 年間の腐食深さを横置き方式、硬岩縦置き方式および軟岩縦置き方式についてそれぞれ評価した結果、約 32 mm 以上の腐食代を与えることにより 1,000 年以上の放射性物質の閉じ込めを期待できることを示した。また、オーバーバックの置かれる環境の不確実性を考慮し、仮に炭素鋼が不動態化したとして局部腐食の生起／進展挙動を検討した。その結果、たとえ炭素鋼が不動態化した場合でも局部腐食が進展しうるのは初期の不飽和期間に限定されることが推察された。また、孔食およびすきま腐食の進展を仮定しても、酸素による腐食深さの評価は十分保守的であることが確認された。さらに、これまでの知見から処分環境において炭素鋼に応力腐食割れの生起する可能性は低いものと考えられた。

チタンの腐食シナリオの検討の結果、環境条件に応じて適切な合金種を選択すれば、チタンのすきま腐食をさけることができると考えられた。チタンの腐食寿命評価では、全面腐食と水素脆化を考慮した。すきま腐食が起こらなければ、全面腐食速度はきわめて小さく、1,000 年程度の期間における腐食深さは製作・ハンドリング上必要な肉厚と比較して無視し得るほど小さいことがわかった。また、水素脆化についてもチタン中の水素濃度の経時変化を評価した結果、1,000 年間程度では脆化しないことを示した。

銅については、酸素、硫化物による腐食と孔食の影響評価より、39 mm 以上の腐食代を与えることにより 1,000 年間の腐食寿命が期待できると考えられた。

炭素鋼オーバーバックの耐圧性の検討では、地下水静水圧、岩盤のクリープ変形、およびオーバーバックの腐食膨張後の緩衝材の圧密反力を外圧としてオーバーバックの耐圧強度計算を行い、耐圧上必要な厚さを、硬岩系岩盤で蓋部；110 mm、胴部；50 mm、軟岩系岩盤では蓋部；80 mm、胴部；30 mm と設定した。また、オーバーバック表面位置での放射線の吸収線量率を算出し、オーバーバック表面近傍の緩衝材での放射線分解を検討した結果、局部腐食の進展を防止するために放射線の遮へい上必要な厚さは約 130 mm 以上であり、ここでは設計上 150 mm と設定した。

以上の炭素鋼オーバーバックの厚さに関する評価結果より、炭素鋼オーバーバックの厚さを、岩盤の種類、オーバーバックの部位によらず、放射線遮へい厚さ 150 mm

(耐圧厚さを含む)に腐食代 40 mm を加え 190 mm と設定した。この厚さは、第 1 次取りまとめで示した厚さに比べ、約 30% 低減されたことになった。

蓋と円筒胴の製作では、鍛造による材料製造および成形加工について、現状技術で十分対応可能であり、とくに問題ないことを試作を通じて確認した。オーバーバックの封入溶接には低入熱で材料に与える熱影響を小さくでき、長期の品質保証といった観点から不純元素や異物混入の可能性の低い方法が望まれる。また操業性の観点から作業能率と遠隔自動化の可否が重要となる。いくつかの溶接法のうち電子ビーム溶接を封入溶接の有力な候補の 1 つと考えた。溶接部に対する検査には、非破壊試験や漏れ試験の適用を考えた。非破壊試験のうち超音波探傷試験はオーバーバック溶接部への適用性や自動化の観点から最も有望な方法と考えた。オーバーバックのハンドリング方法としては、電磁石や真空吸引などによる方法も考えられるが、電源喪失時の対策のほか課題が多いため、現状では把持の確実性の観点から機械的機構による方法が最適と考えた。

オーバーバックの品質管理は、材料調達にかかわる管理、材料の 2 次加工、組み立てにかかわる管理、処分場地上施設におけるガラス固化体封入時の管理、および地下での搬送や定置作業にかかわる管理に大別した。

地下深部における地質環境条件のバリエーションに柔軟に対応するといった観点から、炭素鋼オーバーバックの代替案として複合オーバーバックについても検討を行い、チタン-炭素鋼複合オーバーバック、銅-炭素鋼複合オーバーバックを試作し、製作の可能性を示した。

緩衝材の設計

長期的な安全確保の観点からは、放射性核種の移行を抑制することが緩衝材の基本的な要件となる。この要件に対しては、地下水の移動の抑制、溶解した核種の収着およびコロイドの移行の防止といった機能が求められる。また、人工バリアが成立するための要件として、製作・施工が可能であることや、人工バリアの性能にかかわる熱移動、水分移動、核種移行、応力緩和などに関する性質に有意な影響を及ぼさないことについても十分考慮する必要がある。これらの性能が長期にわたって維持されるためには、緩衝材の岩盤中への侵入、緩衝材の変質、廃棄体の沈下、ガスの移行、オーバーバックの腐食膨張の影響に関して埋設後の健全性評価解析において確認しておくことが重要である。

第1次取りまとめ以降にサイクル機構で取得したデータや国内外の研究機関における試験研究などから、緩衝材に関して、締固め特性、熱的性質、水理的特性、力学的特性、膨潤特性、化学的性質、緩衝材の乾燥収縮、透気性、コロイドフィルトレーション、高温環境下における特性、ブロック間継ぎ目の特性、変質と流出の特性のデータや知見についてまとめた。緩衝材の施工実績などから、ベントナイト 70 wt %とケイ砂 30 wt %を混合した、乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} のケイ砂混合体材料を緩衝材の仕様とすることとした。緩衝材厚さに関しては、応力緩衝性に着目して、オーバーバックと緩衝材の力学的相互作用を考慮して、オーバーバック耐圧厚さと緩衝材厚さの関係を求めた。その結果、合理的であると考えられる緩衝材厚さの範囲は、40cm 程度から 70cm 程度であることがわかった。本検討では、応力緩衝性能に余裕を見込み、オーバーバックの腐食量などに対してオーバーバック耐圧厚さの変動幅をできるだけ小さくすることを考慮して、緩衝材厚さを 70cm と設定した。

緩衝材の製作・施工技術に関して、釜石鉱山で実施した試験などの国内の試験研究の実績を参考に、現場締固め方式の場合の施工方法とブロック方式の場合の施工方法を検討した。その結果、縦置き方式における現場締固め方式の施工方法としては、掘削工法や、内型枠工法あるいは直接工法が実現性が高いと考えられた。一方、横置き方式の場合は、掘削工法あるいは内型枠工法、半径方向圧縮工法が実現性が高いと考えられる。ブロック方式の場合の緩衝材ブロックの分割数は、操作性および力学的な観点から、横置き方式に関しては 6 分割が、縦置き方式に関しては、分割なし、あるいは 4 分割が候補と考えられた。

緩衝材の膨出対策として、処分坑道の両端部にコンクリートプラグを、処分孔縦置き方式の場合の処分孔の孔口にはキャップの設置を考えた。

緩衝材の各設計要件を満足する指標を、ベントナイトの品質と緩衝材の密度を管理項目として、現場締固め方式とブロック定置方式の施工工程と品質管理の内容を整理した。

処分施設の設計

処分場の地下施設は、人工バリアを設置するための手段を提供するもので、サイトの地質環境条件に基づいて、敷地条件や廃棄体本数などの設計上の前提となる条件を満たすように設計を行う必要がある。設計にあたっては、経済性や建設・操業・閉鎖の作業性について十分考慮するとともに、人工バリアの性能に対して有意な影響を与えないように配慮しておくことが重要である。

地下施設には、建設・操業・閉鎖時における廃棄体などの搬送のための安全な物流経路を提供することが求められる。具体的には、廃棄体の搬入路、人員や資材の運搬路、換気路、給水路、排水路、給配電路、通信路、緊急時避難路などを確保することが各坑道に求められる。このためには、各坑道が所要の内空断面（形状、寸法、断面積）を有し、建設・操業・閉鎖の各作業段階を通じて空洞の力学的安定性が確保される必要がある。

処分場の仕様およびレイアウトの検討項目として、処分坑道離間距離と廃棄体ピッチがある。これらを適切に設定するためには、連設空洞の力学的安定性およびニアフィールドの温度条件を考慮する必要がある。処分パネルの配置などの処分場全体のレイアウトを設定する際には、敷地条件（地形、敷地の形状、面積）や初期地圧の主応力方向などの地質環境条件とともに、建設・操業・閉鎖時の作業性、物流などを考慮する必要がある。核種移行遅延性能に対して有意な影響を及ぼす可能性のある透水性の高い主要な割れ目帯や断層破碎帯に対しては、水理学的特性を考慮して、適切な離隔距離を確保して処分パネルや廃棄体などを配置しておくことが重要である。

空洞の力学的安定性を確保するために必要な支保工の仕様を理論解析で算定し、次に数値解析を用いて、理論解析で求めた支保工仕様の妥当性を確認するとともに、力学的安定性の観点から必要となる坑道離間距離、処分孔間隔を設定した。その結果、硬岩系岩盤の場合、理論解析上は深度 1,000m 程度でも無支保で空洞が力学的に安定することがわかった。一方、軟岩系岩盤の場合、理論解析で求めた支保工仕様の妥当性を有限要素法による数値解析で確認することができた。また、空洞の力学的安定性を確保するために必要な坑道離間距離は、主要・連絡坑道および竖置き方式の処分坑道では、硬岩系岩盤で 10m (2.0D, D:坑道径) 軟岩系岩盤で 13m (2.6D)、横置き方式の処分坑道では、硬岩系岩盤で 13.32m (2.0D) 軟岩系岩盤で 9.99m (2.5D) となった。また、竖置き方式での処分孔間隔は、硬岩系岩盤で 4.44m (2.0d, d:処分孔径) 軟岩系岩盤で 5.55m (2.5d) となった。また、得られた坑道仕様に対し、主要坑道と処分坑道交差部の掘削が周辺地山に及ぼす影響を検討し、交差部の補強範囲を設定した。さらに、設定されたアクセス坑道、竖置き方式における処分坑道を対象に、地表面での最大加速度が 1,000gal 以上の地震を想定し静的線形解析により地震荷重に対する力学的安定性の概略検討を行った。その結果、処分場の建設時の各坑道の力学的安定性が確保されれば、地震時の坑道力学的安定性は確保できることがわかった。

ニアフィールドの温度の時間的な変化を解析し、廃棄体、緩衝材の温度が制限を下回る坑道離間距離と廃棄体ピッチの組み合わせを求めた。その結果、処分孔竖置き方式の場合、力学的安定性から設定された最小の坑道離間距離および廃棄体ピッチの組み合わせでの緩衝材の最大上昇温度は、制限（100℃）を下回る結果となった。処分坑道横置き方式の場合、制限温度を下回る廃棄体1本あたりの専有面積は、硬岩系岩盤では約 40m²/本、軟岩系岩盤では約 30m²/本となる結果が得られた。

処分坑道横置き方式に関して、経済性の目安の1つとして、主要、処分坑道の総掘削量が少なくなる処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの組み合わせを検討した。その結果、処分坑道離間距離／廃棄体ピッチは、硬岩系岩盤で 13.32m(6D)／3.13m、軟岩系岩盤で 9.99m(4.5D)／3.13m となった。以上の検討結果に基づいて、建設・操業・閉鎖の作業を独立に並行して実施できるような処分場レイアウトの例示を行った。

人工バリアが埋設後も健全であることを確認するとともに、地層処分システムの安全評価に資するために、ここでは、設定した人工バリアと処分施設の仕様に基づいて、再冠水時の人工バリア挙動、人工バリアの長期構造力学安定性、人工バリアと周辺岩盤の耐震安定性、ガス移行挙動、緩衝材の岩盤内侵入について解析・評価を行った。

人工バリア埋設後のオーバーバックの腐食挙動や緩衝材の機能を評価するうえで、廃棄体埋設後に、周辺岩盤から緩衝材への地下水の浸潤にともなって緩衝材が再冠水（飽和）するまでの期間（再冠水時間）やその状態を把握するために、釜石鉱山で実施した試験結果をもとにモデルの適用性を検討し、岩盤の透水性や圧力水圧をパラメータにとってニアフィールドの熱－水－応力連成解析を実施した。その結果、再冠水時間は、岩盤の透水性、初期圧力水頭に影響され、岩盤内の初期圧力水頭が 1000m 程度の場合、再冠水時間は 5～15 年程度となった。また、想定した岩盤の透水係数の範囲であれば、圧力水頭が 0m 程度であっても再冠水時間は 50 年程度となった。

人工バリアやその周辺岩盤で長期にわたり起り得る力学的現象を整理したうえで、岩盤クリープ解析、オーバーバックの腐食膨張解析、沈下解析・評価を行った。岩盤クリープ解析の結果、硬岩系岩盤では 10,000 年経過してもクリープ変形はほとんど見られなかった。軟岩系岩盤では、10,000 年後に天端で 21.8mm 変位し、影響領

域は、半径の 3 倍弱まで広がる結果となった。また、オーバーパック腐食膨張解析の結果、10,000 年後の緩衝材は破壊状態に至らなかった。オーバーパック沈下解析の結果、オーバーパックの沈下量は、横置き方式のケースでは 10,000 年経過時点で 2.6mm 程度、縦置き方式のケースでも 10,000 年経過時点で 5.1mm 程度であった。以上の検討より、人工バリアおよび周辺岩盤は、長期にわたって力学的には安定した状態にあることが確認された。

廃棄体埋設後の緩衝材の耐震安定性を評価するために、人工バリアの振動試験結果をもとに開発したコードの適用性を検討し、動的解析を行った。その結果、緩衝材の地震時の力学的安定性の観点からは、地震によりせん断破壊に至る可能性は低いことが確かめられた。また緩衝材に生じるせん断ひずみは微小であり、その動的力学特性に関し非線形性が顕著に表れないこともわかった。さらに、緩衝材中の過剰間隙水圧の上昇は解析上認められず、液状化が生じる可能性は低いことが推察された。

炭素鋼オーバーパックが腐食した際に発生する水素ガスは、緩衝材中の間隙水に溶存し拡散移行するか、気相として緩衝材中を移動する。よって、溶存水素の拡散解析と保守的な炭素鋼オーバーパックの腐食速度を用いたガス／水の二相流モデルによるガス移行解析を行った。溶存水素の拡散解析の結果、拡散移行により移動する割合はわずかであり、ガス発生量のほとんどが炭素鋼オーバーパックと緩衝材の界面に蓄積される結果となった。ガス移行解析の結果、処分後から 30 年以降においては、ガス発生による間隙圧への寄与は小さく、ガスが岩盤側部へ侵入した後も緩衝材のほとんどが飽和状態のままガスが移動することがわかった。以上の結果より、炭素鋼オーバーパックが腐食により発生する水素ガスは、緩衝材や岩盤の構造力学的安定性や核種移行に影響を与えないことが示された。

緩衝材の岩盤内への侵入挙動を、緩衝材の膨潤圧と粘性抵抗をもとに拡散係数を設定して拡散モデルとして取り扱う考え方で解析し、埋設後の緩衝材の密度低下を評価した。ここでの評価は、亀裂が直線的に入っており、初期の亀裂内部には何も詰まっていないという仮定をした。実際の岩盤の割れ目は充填物が介在していたり、割れ目が交差していたりしてどこまでも流出するとは考えにくく、このめんで、定性的ではあるが、かなり保守側の設定になっている可能性があることに留意する必要がある。解析の結果、1,000,000 年後の緩衝材の密度は、処分場全体の平均で 20% 程度の低下が見込まれることがわかった。

処分場の建設・操業・閉鎖

地層処分場の建設でとくに考慮しなければならない留意点を念頭に置きつつ、幅広い地質環境を対象に、アクセス坑道、主要坑道、連絡坑道、処分坑道および処分孔の建設技術について、既存の工法を整理するとともに、現状の技術に基づいた各坑道の建設方法の検討を行いその概要を示した。さらに、大深度地下を対象とすることによりとくに留意すべき事項（地圧、湧水など）については、現状の対策工の整理を行うとともに、トンネルの施工事例の中から発生した現象と対策工について調査し、その有効性について検討を行った。その結果、大深度地下を対象とした処分場の建設技術については、基本的に現状のトンネルや地下空洞の掘削技術を適用または準用することが可能であることがわかった。また、予想以上の現象に遭遇することも十分あり得ることから、地下深部で遭遇する環境下で安全かつ合理的な施工を行うため適正な対策工法の選択あるいは組み合わせによる対応に加えて、従来のトンネル工事にも増して、より綿密な施工管理が必要となり、さらに、各種の計測結果を適切に判断するためのシステムの構築も重要であることが示された。

ガラス固化体の受け入れから人工バリア定置までの工程を地上施設、アクセス坑道、連絡坑道・主要坑道・処分坑道に区分して、各施設における作業の内容、手順、および作業に必要となる設備類について検討し、各施設の概念を示すとともに、放射線管理区域の考え方などについて検討した。その結果、廃棄体や緩衝材の定置については、現状技術あるいは近い将来実現可能と考えられる技術を用いて実施できる見通しが得られた。また、連絡坑道・主要坑道・処分坑道においては、廃棄体の定置作業のスケジュールや方法により、パネルごとあるいは処分坑道ごとに放射線管理区域を移動していく考え方を示した。人工バリアの定置後に実施する主要坑道（廃棄体定置方式が堅置方式の場合には処分坑道も含む）の埋め戻しの施工技術および品質管理については、類似の建設工事で適用されている現状技術により十分に行うことができることがわかった。

地下施設の閉鎖段階における、連絡坑道、アクセス坑道およびボーリング孔などの埋め戻しに関する施工技術、および地下施設の埋め戻し終了後実施する地上施設の解体・撤去、品質管理について検討した。その結果、連絡坑道は、主要坑道における埋め戻し技術を適用することができ、閉鎖の品質管理に関しては、操業の埋め戻しにおける品質管理項目を適用できることがわかった。また、閉鎖の概念に関しては、カナダの AECL の地下研究施設において施工技術の確認を行っている。

処分場の管理については、国際的な共通認識なども参考に、制度的管理に依存せ

ず処分場を閉鎖する判断に必要な技術的情報を整えておくことを目的として、閉鎖までに行う管理の項目を明らかにした。処分場の管理の具体的内容として、設計・施工上の品質管理、人工バリア周辺および処分施設周辺部の地質環境条件に関するモニタリングとその他の管理（処分場敷地周辺部の環境に関するモニタリング、作業安全にかかわる管理など）に分けて考えた。また、これらの項目に対して、計測を行うために用いることが可能と考えられる要素技術はすでに多く存在することを示した。今後、その技術の高度化と体系的なモニタリングシステムの構築が必要であり、諸外国を含めた地下研究施設などより得られる成果を活用して確認することが重要である。また、地層処分の概念から考えて、閉鎖後に、安全性の観点からのモニタリングや廃棄体の再取り出しを行うことを想定する必要はないと考えた。

処分場の建設、操業、閉鎖の基本スケジュールとして、原子力開発利用長期計画などを参考に、2,035 年に操業開始し、2,085 年に操業終了すると仮定して、処分場の建設、操業、閉鎖の各技術にもとづいて全体スケジュールを検討した。

将来、処分サイトが特定されれば、ここで示した設計要件や設計の手順および方法をそのサイトの地質環境条件に、その時点までの技術の進展も考慮して適合させ、これを用いて人工バリアと処分施設の最適な設計を行うことが可能である。処分場を閉鎖するための前提として、処分場の管理を建設・操業・閉鎖の各段階を通じて適切に行っておくことが極めて重要であり、ここで明らかにした管理すべき項目や取得すべき情報などは、処分サイトに応じた管理を議論するうえでの出発点とすることができる。

このように、本分冊で示した技術的内容は、将来、処分サイトが特定される段階で行われる人工バリアと処分施設の設計、製作・施工にかかわる技術的基盤を与えるものとなっている。

分冊 2 地層処分の工学技術

目 次

第I章 はじめに	I - 1
1.1 目的	I - 1
1.2 構成および概要	I - 1
第I章 参考文献	I - 2
第II章 人工バリアおよび処分施設の基本概念	II - 1
2.1 安全確保の考え方	II - 1
2.1.1 わが国の地層処分概念	II - 1
2.1.2 地層処分システムとその機能	II - 1
2.1.3 安全確保のための対策	II - 3
2.1.3.1 サイト選定	II - 3
2.1.3.2 工学的対策	II - 4
2.1.3.3 安全評価	II - 4
2.2 人工バリアおよび処分施設の基本概念	II - 5
2.2.1 人工バリアの基本概念	II - 5
2.2.1.1 人工バリアの構成	II - 5
2.2.1.2 定置レイアウト	II - 5
2.2.2 処分施設の基本概念	II - 8
2.2.2.1 処分施設の構成	II - 8
2.2.2.2 処分パネルの概念とパネルレイアウト	II - 9
第II章 参考文献	II - 10
第III章 設計の基本的考え方および前提となる条件	III - 1
3.1 設計の基本的考え方	III - 1
3.2 前提となる条件	III - 4
3.2.1 ガラス固化体の仕様、発熱量、放射能、貯蔵期間 および処分施設の規模	III - 4
3.2.1.1 ガラス固化体の仕様、発熱量および放射能	III - 4
3.2.1.2 貯蔵期間と冷却期間	III - 9
3.2.1.3 処分施設の規模	III - 10
3.2.2 地質環境	III - 11

3.2.2.1 地質構造要素と地形的条件	III - 11
3.2.2.2 岩盤特性	III - 12
3.2.3 処分深度	III - 18
3.2.3.1 地層処分の長期安全性	III - 18
3.2.3.2 地質環境の特性	III - 19
3.2.3.3 建設技術や調査技術の現状	III - 19
3.2.3.4 設計において把握される深度の範囲	III - 19
第III章 参考文献	III - 22
第IV章 処分場の設計に関する検討	IV - 1
4.1 人工バリアの設計・製作	IV - 1
4.1.1 オーバーバック	IV - 2
4.1.1.1 オーバーバックの設計要件	IV - 2
4.1.1.2 オーバーバックの候補材料	IV - 6
4.1.1.2.1 候補材料選定の考え方	IV - 6
4.1.1.2.2 候補材料の特徴	IV - 8
4.1.1.3 オーバーバック材料の腐食評価	IV - 10
4.1.1.3.1 オーバーバックの置かれる環境	IV - 10
4.1.1.3.2 オーバーバック候補材料の腐食シナリオの検討と 腐食寿命評価	IV - 11
4.1.1.4 オーバーバックの設計	IV - 50
4.1.1.4.1 基本形状およびガラス固化体収容孔の寸法	IV - 50
4.1.1.4.2 オーバーバック厚さの検討	IV - 52
4.1.1.4.3 製作・施工に関する検討	IV - 61
4.1.1.4.4 オーバーバック仕様	IV - 67
4.1.1.5 オーバーバックに関する品質管理	IV - 68
4.1.2 緩衝材	IV - 69
4.1.2.1 緩衝材の性質	IV - 69
4.1.2.1.1 人工バリアにおける緩衝材の性質について	IV - 69
4.1.2.1.2 ベントナイト	IV - 72
4.1.2.1.3 締固め特性	IV - 77
4.1.2.1.4 熱的性質	IV - 81
4.1.2.1.5 水理的性質	IV - 87
4.1.2.1.6 力学的性質	IV - 95
4.1.2.1.7 膨潤特性	IV - 105

4.1.2.1.8	化学的性質	IV - 110
4.1.2.1.9	その他の性質	IV - 112
4.1.2.1.10	ブロック間継目部の特性	IV - 128
4.1.2.1.11	経年挙動	IV - 135
4.1.2.2	緩衝材の設計	IV - 143
4.1.2.2.1	設計の考え方	IV - 143
4.1.2.2.2	緩衝材の仕様設定	IV - 145
4.1.2.3	緩衝材の製作・施工技術に関する検討	IV - 157
4.1.2.3.1	製作施工実績	IV - 157
4.1.2.3.2	緩衝材の製作施工方法	IV - 170
4.1.2.3.3	緩衝材の膨出対策	IV - 189
4.1.2.4	緩衝材に関する品質管理	IV - 195
4.1.3	人工バリア仕様	IV - 199
4.1.4	代替人工バリア概念の検討	IV - 200
4.1.4.1	代替オーバーバック	IV - 200
4.1.4.1.1	チタン-炭素鋼複合オーバーバック	IV - 200
4.1.4.1.2	銅-炭素鋼複合オーバーバック	IV - 202
4.1.4.2	その他の人工バリア概念	IV - 204
4.2	処分施設設計	IV - 206
4.2.1	処分施設設計の考え方	IV - 206
4.2.2	処分坑道の仕様と廃棄体ピッチの設定	IV - 208
4.2.2.1	坑道断面諸元の設定	IV - 216
4.2.2.1.1	設計の考え方	IV - 216
4.2.2.1.2	断面の設定	IV - 216
4.2.2.2	支保工材料の考え方	IV - 220
4.2.2.3	空洞の力学的安定性の評価	IV - 221
4.2.2.3.1	空洞の力学的安定性評価の考え方	IV - 221
4.2.2.3.2	理論解による支保工厚の概略検討	IV - 228
4.2.2.3.3	有限要素法による支保工厚の確認	IV - 232
4.2.2.3.4	坑道交差部の検討	IV - 247
4.2.2.3.5	坑道の耐震安定性評価	IV - 252
4.2.2.4	廃棄体、緩衝材の温度からの制限	IV - 272
4.2.2.4.1	解析条件	IV - 272
4.2.2.4.2	解析結果	IV - 278
4.2.3	処分場レイアウトの設定	IV - 290

4.2.3.1	設計の基本的考え方	IV - 290
4.2.3.2	処分場位置での地質環境条件等の仮定	IV - 297
4.2.3.3	処分パネルの検討	IV - 298
4.2.3.4	アクセス坑道の検討	IV - 301
4.2.3.5	主要坑道・連絡坑道の配置の検討	IV - 302
4.2.3.6	処分場レイアウトの例示	IV - 304
4.2.4	埋め戻し材	IV - 321
4.2.4.1	埋め戻し材の物性	IV - 322
4.2.4.1.1	透水特性	IV - 323
4.2.4.1.2	締固め特性	IV - 324
4.2.4.1.3	膨潤特性	IV - 325
4.2.4.1.4	強度特性	IV - 326
4.2.4.2	埋め戻し材の設計	IV - 327
4.3	人工バリアの長期健全性評価	IV - 329
4.3.1	再冠水時の人工バリア挙動評価	IV - 329
4.3.1.1	熱-水-応力連成モデル	IV - 330
4.3.1.2	原位置連成試験およびモデルの適用性の検討	IV - 332
4.3.1.3	ニアフィールド熱-水-応力連成解析	IV - 334
4.3.1.4	まとめ	IV - 351
4.3.2	構造力学安定性評価	IV - 352
4.3.2.1	想定される現象	IV - 352
4.3.2.2	解析・評価の流れ	IV - 353
4.3.2.3	岩盤クリープ解析	IV - 355
4.3.2.4	オーバーバック腐食膨張解析	IV - 362
4.3.2.5	オーバーバック沈下解析	IV - 369
4.3.2.6	まとめ	IV - 374
4.3.3	耐震安定性評価	IV - 375
4.3.3.1	人工バリア地震応答解析コードの開発	IV - 375
4.3.3.2	振動試験	IV - 379
4.3.3.3	解析コードの適用性の確認	IV - 384
4.3.3.4	ニアフィールド耐震安定性解析	IV - 392
4.3.3.5	まとめ	IV - 420
4.3.4	ガス移行評価	IV - 421
4.3.4.1	溶存水素の拡散移行評価	IV - 421
4.3.4.2	ガス移行挙動評価	IV - 430

4.3.4.3	まとめ	IV - 443
4.3.5	緩衝材の岩盤内侵入の評価	IV - 445
4.3.5.1	解析内容	IV - 445
4.3.5.2	解析結果	IV - 447
4.3.5.3	評価	IV - 448
4.3.5.4	まとめ	IV - 449
第IV章	参考文献	IV - 450
第V章	処分場の建設・操業・閉鎖	V - 1
5.1	建設	V - 1
5.1.1	アクセス坑道	V - 2
5.1.1.1	掘削・支保工法	V - 2
5.1.1.2	施工概要	V - 4
5.1.2	主要・連絡坑道	V - 10
5.1.2.1	掘削・支保工法	V - 10
5.1.2.2	施工概要	V - 11
5.1.3	処分坑道	V - 14
5.1.3.1	掘削・支保工法	V - 14
5.1.3.2	施工概要	V - 15
5.1.4	処分孔	V - 17
5.1.4.1	掘削・支保工法	V - 17
5.1.4.2	施工概要	V - 19
5.1.5	プラグ部の拡幅工法	V - 21
5.1.6	対策工	V - 23
5.1.6.1	坑道の建設における対策工	V - 23
5.1.6.2	処分孔掘削における対策工	V - 30
5.1.7	建設に関する品質管理	V - 31
5.2	操業	V - 34
5.2.1	人工バリアの定置	V - 34
5.2.1.1	作業内容および手順	V - 34
5.2.1.1.1	地上施設での作業	V - 34
5.2.1.1.2	アクセス坑道での作業	V - 35
5.2.1.1.3	連絡坑道・主要坑道・処分坑道での作業	V - 37
5.2.1.2	施設および設備の概念	V - 40
5.2.1.2.1	地上施設	V - 40

5.2.1.2.2	アクセス坑道搬送設備	V - 48
5.2.1.2.3	地下搬送および定置設備	V - 51
5.2.1.2.4	換気設備	V - 54
5.2.1.3	放射線管理区域の考え方	V - 56
5.2.1.3.1	管理区域設定の基本的な考え方	V - 56
5.2.1.3.2	管理区域の移動	V - 58
5.2.1.3.3	管理区域における管理内容	V - 59
5.2.1.4	搬送・定置に関する品質管理	V - 60
5.2.1.5	人工バリア定置技術の確認の必要性について	V - 61
5.2.2	処分坑道および主要坑道の埋め戻し	V - 63
5.2.2.1	施工方法	V - 63
5.2.2.2	対策工	V - 67
5.2.2.3	埋め戻しに関する品質管理	V - 68
5.3	閉鎖	V - 73
5.3.1	連絡坑道の埋め戻し	V - 73
5.3.2	アクセス坑道の埋め戻し	V - 73
5.3.3	ボーリング孔の埋め戻し	V - 75
5.3.4	地上施設の解体・撤去	V - 76
5.3.5	閉鎖に関する品質管理	V - 76
第V章	参考文献	V - 77
第VI章	処分場の管理	VI - 1
6.1	地層処分の基本概念と制度的管理に関する国際的コンセンサス	VI - 1
6.2	処分場の管理の基本的考え方	VI - 2
6.3	処分場の管理の内容	VI - 3
6.4	計測技術	VI - 7
6.5	所要の措置	VI - 7
第VI章	参考文献	VI - 8
第VII章	全体スケジュール	VII - 1
7.1	検討の進め方	VII - 1
7.2	基本スケジュールの設定	VII - 1
7.3	建設・操業・閉鎖段階のスケジュールの検討	VII - 2
7.3.1	建設段階のスケジュール	VII - 2
7.3.2	操業段階のスケジュール	VII - 5

7.3.3 閉鎖段階のスケジュール	VII - 6
7.4 全体スケジュールの策定	VII - 7
第VII章 参考文献	VII - 13
 第VIII章 結論	 VIII - 1
 付録 A 岩盤特性の設定	 A - 1
A.1 検討方法	A - 1
A.2 岩種の分類	A - 4
A.3 設計用岩盤特性値	A - 7
A.4 まとめ	A - 24
付録 A 参考文献	A - 26

今回の会議にて配布した資料は多量な資料の為、入手を希望される方は下記3機関において閲覧・複写（有料）に応じております。

●原子力公開資料センター（東京都文京区白山5-1-3-101）

TEL 03（5804）8484 東京富山会館ビル6F

土・日・祝日、10/1日は休館

●未来科学技術情報館（東京都新宿区西新宿）

TEL 03（3340）1821 新宿三井ビル1F

第2・第4火曜日は休館

●サイエンス・サテライト（大阪府大阪市北区扇町）

TEL 06（6316）8110 扇町キッズパーク3F

月曜日、祝祭日の翌日は休館