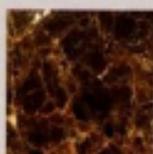
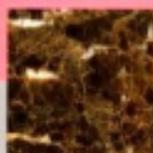




わが国における高レベル放射性廃棄物 地層処分の技術的信頼性

—地層処分研究開発第2次取りまとめ—

総論レポート



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。本報告書はこのうちの総論レポートであり、専門部会報告書に示された第2次取りまとめに盛り込まれるべき技術的内容に対して総合的に応え、わが国の地層処分の技術的信頼性について示すとともに、地層処分の事業や安全規制を進めるうえで必要となる技術情報を提供するものである。3つの分冊は総論レポートの記述内容を支える各分野の研究開発成果の詳細をまとめている。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。

要 約

本報告書は、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）に示された第 2 次取りまとめに盛り込まれるべき技術的内容に対して、総合的に応えることを目標とした総論レポートであり、7 つの章から構成されている。第 1 章では、高レベル放射性廃棄物の発生とその特徴を示し、地層処分の研究開発がどのように進められてきたかを述べた後、第 II 章において、わが国における地層処分の基本概念について論じている。第 III 章から第 V 章にかけては、わが国において地層処分概念が成立することを信頼性をもって示すうえで重要な 3 つの技術的要素（わが国の地質環境、地層処分の工学技術、地層処分システムの安全評価）について論じている。第 VI 章では、原子力委員会によって示された処分事業の段階的アプローチに対応し、処分予定地の選定および安全基準の策定に資するための技術的拠り所を示すという観点から、第 V 章までに論じられた技術的要素をまとめている。最後にまとめとして、わが国における地層処分の技術的信頼性について総括するとともに、今後の研究開発の展開の考え方について第 VII 章に示している。

わが国の地層処分概念と第 2 次取りまとめ

高レベル放射性廃棄物は原子力を利用してエネルギーを得ることにより必然的に発生する。わが国の場合高レベル放射性廃棄物は、使用済燃料を再処理し、再び燃料として使用できるウランやプルトニウムを回収した後に残る廃液を安定な形態に固化したガラス固化体を指す。その放射能は発生当初きわめて高く、時間とともに減衰するものの長く継続することから、その対策にあたっては長期にわたる安全確保に留意しなければならない。このため、地層処分によって高レベル放射性廃棄物を人間の生活環境から安全に隔離する方法が、わが国も含め国際的に最も好ましい対策として考えられている。

わが国の地層処分概念は、「安定な地質環境に、性能に余裕をもたせた人工バリアを含む多重バリアシステムを構築する」というものである。すなわち、諸外国と同様、天然の地質環境（天然バリア）と工学的な防護系（人工バリア）を組み合わせた多重バリアの考え方に基づいている。変動帯に位置するというわが国の地質学的特徴を踏まえ、地質環境の長期的な安定性に配慮する必要がある。人工バリアは、ガラス固化体、金属製のオーバーバック（容器）および緩衝材（粘土）で構成される。わが国では幅広い地質環境に対応できるよう、性能に余裕をもたせた人工バリアを考えておくことが合理的である。

この概念に基づけば、安全性を確保するための対策としては、

- 地層処分にとって適切な地質環境を選定すること（サイト選定）、
- 安定な地質環境に対して、人工バリアや処分施設を適切に設計・施工すること（工学的対策）、

によって地層処分システムが備えるべき固有の性能を確保すること、さらに

- 構築された地層処分システムの安全性を評価すること（安全評価）

によって長期的な安全性の確認を行うこととなる。

第2次取りまとめの包括的な目標である「わが国における地層処分の技術的信頼性を示すこと」について、核燃料サイクル開発機構（以下、「サイクル機構」という）では「高レベル放射性廃棄物を地層処分するための、実用可能かつ合理性を備えた技術の存在を明らかにすること、さらにそのような技術と適切な地質環境によって長期にわたる地層処分の安全性が保たれることを、科学的な根拠に基づいて示すこと」と認識し、これに応えるため、「地質環境条件の調査研究」、「処分技術の研究開発」、「性能評価研究」という3つの研究開発分野の成果を次のとおり取りまとめることとした。

「地質環境条件の調査研究」によって、地層処分の観点から重要な地質環境条件を明らかにし、処分場の設計や性能評価研究への入力情報として整備することとした。

「処分技術の研究開発」によって、わが国の幅広い地質環境を考慮した人工バリアの仕様や処分場のレイアウトを検討し、地層処分の工学的実現性を示すこととした。

「性能評価研究」によって、与えられた地質環境条件や人工バリア仕様、処分場レイアウトに基づいて構築される地層処分システムについて、その性能を評価する手法の確立とそれを用いた評価によって地層処分システムの長期安全性を示すこととした。

これら3分野の個々の研究開発の成果は、データ、モデル、知見などの形で、あるいは技術そのものとして各分野間で双方向にやりとりされ、その結果がそれぞれの分野の中にフィードバックされることにより、必要に応じて研究開発を反復しながら全体目標に照らして総合的な評価に備える形で取りまとめられていくものである。

また、「地質環境条件の調査研究」の成果に基づいて整備される処分予定地選定の要件やサイト特性調査技術、「処分技術の研究開発」の成果として得られる人工バリアおよび処分施設の設計施工要件、「性能評価研究」の成果を踏まえて検討される地層処分システムの安全評価上の要件、安全評価手法とデータベースなどから、処分予定地の選定や安全基準策定の技術的拠り所が導かれる。

わが国の地層処分の技術的信頼性

わが国の地質環境

地質環境の長期安定性に影響を与える可能性のある天然現象には、地震・断層活動、火山・火成活動、隆起・沈降・侵食、気候・海水準変動がある。これらの活動の記録が残されている地質や地形を対象に現地調査や年代測定を主体とする事例研究を進めた。また、これまでの地球科学に関する知見をもとに各天然現象の現在までの活動履歴を整理した。その結果、現象の種類や地域によって違いがあるものの、おおむね過去数十万年までさかのぼって活動の場所や規模を追跡することができた。また、現象によっては、過去数十万年程度よりも古い時代における活動の特徴や傾向を推定することができた。

火山活動や断層活動は過去数十万年程度にわたり限られた地域でくり返し起きていることが示された。また、岩盤の破碎などの断層活動の影響や地温の上昇などの火山活動にともなう影響は、個々に違いがあるもののそれぞれ活断層や火山からの距離によって限定できるとの目安が得られた。このことから、火山活動や断層活動による影響を被らないような地域がわが国にも広く存在しているといえる。個々の地域での調査に基づき、これらの現象の活動の可能性とその影響範囲を考慮して処分地を適切に選定し、また処分場を適切に設計することにより、地層処分システムに対する影響を回避することが可能である。

隆起・沈降・侵食については、過去数十万年程度にわたって、地域ごとにおおむね一定の速度で進行し、その速度は山岳地域などを除く多くの地域で十万年間に数十 m～百 m 程度である。気候・海水準変動については、過去数十万年程度にわたって、氷期・間氷期サイクルによる地球規模での変動がおおむね十万年周期で繰り返されていること、それにともないわが国では 10℃程度の気温の変化と 100～120 m 程度の海面変化が起こったことが認められた。これらの現象については、変動の激しい一部の地域を避けたうえで、個々の地域において想定される変動の規模を適切に考慮して処分場の深度を設定することにより対応することが可能である。

地下深部の地質環境特性については、人工バリアの設置環境や天然バリアとしての機能の観点から重要な地下水や岩盤の特性に焦点をあて、文献データを整備するとともに、東濃地域や釜石鉱山における地層科学研究の成果を活用して検討を行った。

その結果、

- －わが国における岩盤の性質は多様であるが、地温が十分に低く応力がほぼ均等に働いているような岩盤が、わが国の地下深部にも広く存在することが確認できた。
- －地下深部の地下水は、土壌や岩石中に存在する鉱物や有機物などとの反応によ

り還元性になることが実測値や理論解析により確認された。また地下深部では、地表に比べて動水勾配が小さく、地下水の動きが遅くなることが確認された。このような深部地下水の一般的な性質は、金属を腐食させにくく、また地下水への物質の溶解や地下水による物質の移動を制限する観点から、人工バリアの設置環境として重要である。

一物質の移行経路となる岩石中の粒子間隙や割れ目などの分布・形状は、岩石の種類や場所により異なるが、一般に地下水によって物質が移動する際に、鉱物の表面へ収着されたり、岩石の組織中を拡散する。このような性質は、地下水による物質の移動を遅延させ、天然バリアとしての機能の面から重要である。

以上のことから、将来十万年程度にわたって十分に安定で、かつ人工バリアの設置環境および天然バリアとして好ましい地質環境がわが国にも広く存在すると考えられる。

地層処分工学技術

人工バリアや処分施設の工学技術に関しては、わが国の幅広い地質環境を考慮しつつ、現状の技術に基づいて人工バリアや処分施設の設計要件を明らかにするとともに、現実的なデータや信頼性の高い解析評価手法を適用して合理的な設計を行うことにより、人工バリアと処分施設の仕様例を示した。

第1次取りまとめ以降、サイクル機構の地層処分基盤研究施設（ENTRY）などにおける試験研究や、東濃地域、釜石鉱山における地層科学研究および海外の地下研究施設での国際共同研究、ならびに国内外の研究機関における試験研究など、実験室規模あるいは工学規模での試験を通じて、実測によるデータや知見が蓄積された。これらに基づいて設計要件を見直しつつ、設計のツールである解析評価手法の改良と設計用データベースの整備を進めてきた。

とくに、わが国の幅広い地質環境を考慮するため、文献などを中心に幅広く収集したデータについて東濃地域や釜石鉱山での地層科学研究で得られた知見による確認を行ったうえで、設計・施工を検討する際に必要となる岩盤物性値を幅で示し、この幅に対して現実的に設計・施工が可能であることを示した。これにより、将来選定される処分地の特徴に応じて最適な設計、施工を行うための技術基盤を与えることができた。

人工バリアについては、上記のような検討を経て明らかとなった設計要件、開発された設計手法やデータベースに基づく合理的な設計によって、オーバーバックと緩衝材の材料、厚さなどを検討し、仕様例を提示した。この例では、第1次取りまとめの段階での知見に基づいて示された仕様例に比べ、安全性能を損なうことなくオーバーバック、緩衝材とも、厚さを約30%低減することが可能となった。緩衝材

の材料については、必要な性能を維持しつつベントナイトにケイ砂を混合することによって、より経済的なものとすることができた。

処分施設については、まず、現実的な設計データを用いた坑道の力学的安定性の検討を行い、施工が可能と考えられる深度と支保工の厚さの関係を例示するとともに詳細な解析を実施し、支保工を含めたアクセス坑道、主要坑道、連絡坑道、および処分坑道や処分孔の仕様例を設定した。これらの坑道仕様に対し、建設、操業時の耐震安定性について検討し、その安定性が確保されることを確認した。また、処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの組み合わせについて、処分場の性能を損なうことなく坑道掘削量が最小となるように設定する合理的な設計の考え方を示した。この考え方に沿って、熱解析を行い、坑道の力学的安定性解析の結果とあわせて、硬岩系と軟岩系岩盤における処分坑道横置き方式と処分孔縦置き方式のそれぞれについて処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの組み合わせの例を設定した。

処分施設の仕様例に基づいて、処分場の建設、操業の各作業手順について検討し、これらの作業が独立に並行して実施可能となるような処分場全体のレイアウトを示した。また、それぞれの作業について基本的に現状の技術あるいは近い将来実現すると考えられる技術で実施可能であり、処分場の品質管理ができることを示した。

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、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。処分場における各作業段階に応じて、これらの管理項目ごとに取得する情報の内容と主な計測項目を例示した。なお、このような管理において処分場閉鎖後に安全性の観点からモニタリングや廃棄体の再取り出しを行うことについては想定する必要がないと考えることができる。

地層処分システムの安全評価

上述したように、わが国の地質環境条件に関する調査研究の結果、長期的に安定で地層処分にあって好ましい特性を有する地質環境を選ぶことが可能であり、そのようにして選ばれた地質環境の条件を考慮して、適切に設計された処分場の仕様例を示すことによって、具体的な地層処分システムが明らかになった。

このシステムを対象として、とくに人工バリアとその近傍の岩盤の領域（ニアフィールド）の性能に重点をおいた評価手法を構築するとともにその手法を用いて安全評価を実施した。

安全評価手法については、体系的なシナリオ開発を進め、シナリオにしたがって、より現象に即したモデルの開発とより現実的なデータの整備を行った。シナリオについては、廃棄物と人間との物理的な距離が接近することによって人間の生活環境に影響が及ぶと想定した接近シナリオと、地下水により放射性核種が人間の生活環

境に運ばれると想定した地下水シナリオを考えた。地層処分において考慮すべき現象をすべて抽出して、包括的な FEP（特質(Feature)、事象(Event)、プロセス(Process)の頭文字をとったもの）リストを作成し、2つのシナリオに関係付けを行った。

接近シナリオを引き起こす現象には天然現象や人間活動が考えられ、地質環境の長期安定性に関する知見などをもとに適切な処分地を選定することによって、その影響を基本的に排除できるものとした。

地下水シナリオについては関連する FEP を考慮し、解析評価を行ううえで参照とする解析ケース（レファレンスケース）を設定した。レファレンスケースでは、わが国の地層処分概念に基づいて構築される地層処分システムを、現実的な地質環境のデータとそれを踏まえて合理的に設計された人工バリア仕様によって特徴づけ、安全評価の対象とした。これをもとにモデルやデータにともなう不確実性を考慮したケース、天然現象により地質環境が変動すると想定したケースや人間活動が影響を及ぼすケース、さらに地質環境の多様性や処分場の仕様の幅を考慮した多様な地層処分システムに対する解析ケースをそれぞれ設定した。

モデルの開発は基本的にレファレンスケースに沿って行った。人工バリア中の核種移行については、同位体の存在比を考慮に入れた核種の沈殿／溶解と移行の各現象に対し、人工バリア周辺母岩での地下水の流れを境界条件として扱うことが可能なモデルを開発した。天然バリアについては不均質性を考慮し、種々の岩盤を包絡して安全評価を行うための簡略化したモデルを作成した。あわせて、このモデルをより詳細な解析に適用するため、亀裂が卓越した岩盤に対しては亀裂ネットワークモデルを、亀裂が少なく亀裂内の流れよりも粒子間隙内の流れが支配的となるような岩盤に対しては不均質連続体モデルを開発した。これらのモデルやデータの多くは、地下深部の環境を模擬した ENTRY での室内試験や地層処分放射化学研究施設（QUALITY）での放射性核種を用いた試験、地層科学研究の成果を利用してその妥当性を確認した。

放射性核種が人間の生活環境に到達した後の移行プロセスと種々の被ばく経路を考慮して生物圏モデルを作成した。この生物圏モデルを人工バリアと天然バリアに関する解析モデルと接続することにより、線量を安全評価の指標とした解析モデルの基本体系を整備することができた。

解析モデルの基本体系を用いたレファレンスケースの評価を通じて、地下水の流速に依存するものの、天然バリアがもつ性能は処分場から数十 m 程度までの岩盤で十分な効果が期待できることがわかった。

データやモデルにともなう不確実性を考慮したケースに対しては、レファレンスケースに用いたパラメータの値やモデルを置き換えることにより、個々のバリア性能に対する影響を把握した。その結果、地下水の流れや地球化学的性質、岩盤中の

地下水による物質移行経路などにかかわるパラメータが安全評価上重要となることが示された。

また、地下水を介して地層処分システムに及ぼす影響について、天然現象により地質環境が変動すると想定したケースや人間活動が影響を及ぼすケースの評価を行った。多様な地層処分システムに対する解析ケースでは、上記の安全評価上重要なパラメータに着目し、その組み合わせを絞り込んだうえで解析を行った。これらの解析の結果から、モデルやデータの不確実性、天然現象などによる処分システムへの地下水を介した影響とともに、地質環境と処分場の仕様に関する多様性を考慮しても、線量の最大値は、たとえば諸外国で提案されている年間の防護レベル（100～300 μSv ）を下回ることが示された。

安全評価の指標の基本となる線量などは、人間の生活様式に関する長期的な予測に大きな不確実性をともなう。これを補完するため、解析モデルによる推定値と天然に存在する放射性核種濃度の実測値との比較が可能な河川や地下水などでの放射性核種の濃度が、安全性の判断に資するうえで有効であることを示した。

以上に述べた研究開発の成果によって、わが国においても、地層処分に適切な地質環境を選定し、その地質環境に適合した処分場を設計・施工することにより、長期間安全性を維持できる地層処分システムを構築することが可能であることが示された。このようにして構築されたシステムの長期的安全性は、ニアフィールド性能を中心として体系的に開発された方法論による評価を通じて確認された。これらのことから、わが国において高レベル放射性廃棄物地層処分を安全に実施する上での技術的な基盤が信頼性をもって示されたと結論できる。

処分予定地選定と安全基準策定に資する技術的検討

3つの分野の研究開発成果を、処分予定地の選定や安全基準の策定といった今後の処分の事業や安全規制にどのように反映できるかについて検討を行った。

まず処分地の選定が、①処分候補地の選定、②処分予定地の選定、③処分地の選定、の3段階によって進められることを前提に、選定にあたって考慮すべき地質環境上の要件および必要となる情報を整理した。また、これらの重要な地質環境情報を取得するために必要な調査手法・技術の開発状況を整理した。

処分予定地やその候補地の選定においては、地層処分にとって不適切な地質環境を除外するという観点から、

- ・断層活動や火山活動による影響、急激な隆起・侵食を被らない地域であること、
- ・処分場の必要な規模に対し十分な空間的な広がりを持つこと、

- ・将来の人間侵入の動機となり得る地下資源が存在しない地域であること。

を重要な地質環境上の要件として明らかにした。これらの要件については、処分候補地の選定段階に主に文献調査による検討を行った上で、処分予定地の選定段階で、ボーリングや物理探査などの現地調査により実際に確認することが可能である。また、各段階で得られる地下水の流れなど重要な地質環境の特性の取得・収集に加え、処分地の選定段階での地下施設などを利用したサイト特性調査により、処分場の設計と安全評価に必要なデータを包括的に整えることが可能となる。このようなデータ取得に対応するため、ボーリング孔を利用して深度 1,000 m に至る岩盤の透水係数や地下水の酸化還元電位などを高精度で計測する装置など、基盤となる要素技術を、東濃地域や釜石鉱山での地層科学研究の成果を通じて整備することができた。

わが国の幅広い地質環境を対象として人工バリアおよび処分施設の設計・施工要件を示し、処分予定地の地質環境条件に応じて適切に設計を行うための手法や必要なデータを明らかにすることができた。これらの知見に基づき、わが国の幅広い地質環境条件と安全性の観点から、現段階において適用性の高い処分場の仕様例を示した。処分予定地においては、サイト特性調査による地質環境条件の把握、これに基づく処分場の設計、設計された処分場を含む地層処分システム全体の安全評価による確認という作業をくり返すことによって最適な処分システムの構築を行うことが可能である。処分場の管理などを通じて実施される処分場の建設、操業、埋め戻しに関する品質管理の考え方を明らかにし、これらが基本的には既存の手法やモニタリング技術によって実施可能であることを示した。

第2次取りまとめまでに開発された地層処分システムの安全評価手法、すなわちシナリオ作成のための方法論やシナリオに沿って影響を評価するためのモデル、データは、実際の処分予定地の地質環境に対応して具体化される地層処分システムの安全評価手法に基盤を与えることができる。この際、安全評価のためのシナリオ、モデルおよびデータは、処分予定地の地質環境条件と最適化した処分場や人工バリアから構成される地層処分システムの固有の性能に着目し、現実的な範囲で保守性をもつように設定することが重要である。

安全指標の基本となる線量あるいはリスクを補完する指標については、一つの例として河川、海、土壌あるいは岩石中の放射性核種濃度を考えることができる。サイト特性調査において予めこれら天然の放射性核種濃度を測定することにより、実際のサイトにおけるシステムの安全評価に対して用いることが可能である。

安全評価の時間スケールを考察するうえで重要な因子は、地質環境の長期安定性、人間の生活環境の長期的な変化の予測の限界および廃棄物の潜在的な危険性の時間の経過による減少である。地質環境の安定性については将来十万年程度、人間の生活環境には次の氷期が到来するまでの一万年程度の期間に対し、ある程度の信頼性をもって予測することが可能である。廃棄物の潜在的な危険性の放射性崩壊による

時間的減少については、どの程度のレベルまでの低減を考慮するかを決定する必要がある。一つの考え方として、その廃棄物を発生させる源となるウラン鉱石総量の潜在的な危険性と同等レベルを目安とすることができ、そのようなレベルとなるまでの時間は数万年程度である。これらを勘案すれば、少なくとも地質環境の安定性に関する予測が可能と考えられる十万年程度までは、線量の評価と安全性を判断するうえでの補完的な指標を適切に組み合わせて評価を行うべきと考えられる。それ以降の期間については、評価の不確実性が大きくなることを考慮し、発生の可能性が非常に小さいと考えられるシナリオをどのように安全評価に取り込んでいくかについて、規制の観点から検討することが必要であると考えられる。

結論として、これまでの研究開発により、

- 地層処分概念の成立に必要な条件をみたく地質環境がわが国に広く存在し、特定の地質環境がそのような条件を備えているか否かを評価する方法が開発されたこと、
- 幅広い地質環境条件に対して人工バリアや処分施設を適切に設計・施工する技術が開発されたこと、
- 地層処分の長期にわたる安全性を予測的に評価する方法が開発され、それを用いて安全性が確認されたこと

といった技術基盤が整備された。

また、研究開発施設としてすでに ENTRY や QUALITY が活用されており、さらに超深地層研究所（岐阜県瑞浪市）計画や現在北海道および幌延町に申し入れている深地層研究所（仮称）（北海道幌延町）計画が進むことにより、事業化に向けたスケジュールと整合をとりつつ、次段階の研究開発を展開していくことが可能な状況となる。

以上のことから、サイクル機構としては、わが国においても地層処分を事業化の段階に進めるための、信頼性のある技術的基盤が整備されたものと総括した。

目次

第Ⅰ章 高レベル放射性廃棄物対策の考え方と進め方

1.1 わが国における原子力利用と高レベル放射性廃棄物の発生	I-1
1.1.1 原子力によるエネルギーの生産と核燃料サイクル	I-1
1.1.2 高レベル放射性廃棄物の特徴	I-3
1.2 高レベル放射性廃棄物対策	I-6
1.2.1 基本的考え方	I-6
1.2.2 地層処分の選択	I-7
1.3 高レベル放射性廃棄物の地層処分への取り組み	I-9
1.3.1 わが国における地層処分計画	I-9
1.3.2 研究開発の経緯	I-11
1.3.3 地層処分研究開発の第2次取りまとめ	I-13
1) 第2次取りまとめの日標	I-13
2) 研究開発の進め方	I-14
(1) 研究開発分野の設定	I-14
(2) 研究協力の推進	I-15
3) 第2次取りまとめ報告書の全体構成	I-16
4) 透明性と追跡性の確保	I-17
5) 総論レポートの構成	I-18
参考文献	I-19

第Ⅱ章 地層処分の概念と安全確保の考え方

2.1 地層処分概念の進展	II-1
2.1.1 背景	II-1
2.1.2 多重バリアの概念	II-1
2.2 わが国の地層処分概念	II-3
2.2.1 基本的考え方	II-3
2.2.2 地層処分システムの構成とその機能	II-4
2.3 安全確保の考え方	II-6
2.3.1 安全性の議論の前提	II-6

2.3.2 安全確保のための対策	II- 8
1) サイト選定	II- 8
2) 工学的対策	II- 9
3) 安全評価	II- 9
(1) 地層処分システムの安全評価の特徴	II- 9
(2) 安全評価の方法論	II- 9
(3) 評価の信頼性	II-10

参考文献	II-13
------	-------

第III章 わが国の地質環境

3.1 地層処分にとって重要な地質環境条件	III- 1
3.1.1 地質環境に期待される役割	III- 1
3.1.2 地質環境の長期安定性	III- 1
3.1.3 重要な地質環境の特性	III- 3
3.1.4 わが国の地質環境の特徴	III- 4
3.1.5 地質環境条件の調査研究	III- 5
3.2 わが国における地質環境の長期安定性	III- 8
3.2.1 地質環境の長期安定性に影響を及ぼす天然現象	III- 8
3.2.2 将来における天然現象の予測的評価	III- 9
1) 基本的な考え方	III- 9
2) 日本列島のテクトニクス	III-10
3.2.3 地震・断層活動	III-13
1) わが国における地震・断層活動の特徴	III-13
2) 地震・断層活動が地質環境に及ぼす影響	III-19
3.2.4 火山・火成活動	III-21
1) わが国における火山・火成活動の特徴	III-21
2) 火山・火成活動が地質環境に及ぼす影響	III-28
3.2.5 隆起・沈降・侵食	III-30
1) わが国における隆起・沈降・侵食の特徴	III-32
(1) 隆起・沈降	III-32
(2) 侵食	III-35
2) 隆起・沈降・侵食・堆積が地質環境に及ぼす影響	III-39
3.2.6 気候・海水準変動	III-39
1) 第四紀における気候・海水準変動	III-40
2) 気候・海水準変動が地質環境に及ぼす影響	III-41

3.2.7	まとめ：安定な地質環境の存在	III- 43
3.3	わが国における地質環境の特性	III- 46
3.3.1	地層処分にとって重要な地質環境の特性	III- 46
3.3.2	地質構造	III- 47
1)	初生的構造要因による移行経路	III- 49
2)	二次的構造要因による移行経路	III- 50
3.3.3	地下深部における地下水の流動特性	III- 51
1)	地下深部の動水勾配	III- 53
2)	地下深部の岩盤における透水性	III- 54
3.3.4	地下深部における地下水の地球化学特性	III- 57
1)	降水起源の地下水	III- 60
2)	海水起源の地下水	III- 64
3.3.5	岩盤の熱特性・力学特性	III- 66
1)	熱特性	III- 67
2)	力学特性	III- 67
3)	掘削影響領域	III- 71
3.3.6	まとめ：深部地質環境の一般的な特性	III- 75
3.4	地質環境に関するナチュラルアナログ研究の事例	III- 79
1)	ウラン鉱床の保存と履歴	III- 79
2)	ウランの保持	III- 80
	参考文献	III- 82

第IV章 地層処分の工学技術

4.1	目的および検討の範囲	IV- 1
4.2	人工バリアおよび処分施設の基本概念	IV- 3
4.2.1	人工バリアの基本概念	IV- 3
1)	人工バリアの構成	IV- 3
2)	定置レイアウト	IV- 4
4.2.2	処分施設の基本概念	IV- 5
1)	処分施設の構成	IV- 5
2)	処分パネルの概念とパネルレイアウト	IV- 6
4.3	人工バリアおよび処分施設的设计	IV- 7

4.3.1 設計の基本的考え方	IV-7
4.3.2 設計条件および設計要件	IV-10
1) ガラス固化体の発熱量、放射能、貯蔵期間および処分施設の規模	IV-10
2) 地質構造要素と地形的条件	IV-12
3) 岩盤特性	IV-12
(1) 設計、製作・施工検討のための岩種の分類	IV-13
(2) 力学特性	IV-14
(3) 熱特性	IV-15
(4) 水理特性	IV-16
4) 処分深度	IV-18
(1) 地層処分の長期安全性	IV-18
(2) 地質環境の特性	IV-19
(3) 建設技術や調査技術の現状	IV-19
(4) 設計により把握される深度の範囲	IV-19
5) オーバーバック、緩衝材、地下施設の設計要件	IV-21
(1) オーバーバックの設計要件	IV-21
(2) 緩衝材の設計要件	IV-22
(3) 地下施設の設計要件	IV-23
6) 人工バリアの埋設後の健全性評価による設計へのフィードバック	IV-25
4.3.3 人工バリアの設計・製作	IV-26
1) オーバーバックの設計・製作	IV-26
(1) オーバーバックの材料および形状	IV-26
(2) オーバーバックの厚さ	IV-26
(3) オーバーバックの製作	IV-34
(4) 仕様例	IV-36
(5) 品質管理	IV-36
(6) 複合オーバーバック	IV-36
2) 緩衝材の設計・製作	IV-41
(1) 緩衝材の基本特性	IV-41
(2) 緩衝材の仕様	IV-52
(3) 緩衝材の製作・施工	IV-58
(4) 品質管理	IV-60
(5) 緩衝材の膨出対策	IV-61
3) 人工バリアの仕様例	IV-63
4.3.4 地下施設の設計	IV-64
1) 坑道の力学的安定性評価	IV-64
(1) 支保工材料に対する考え方	IV-64
(2) 坑道の基本仕様の設定	IV-65

(3) 坑道の力学的安定性の検討	IV-67
(4) 坑道交差部の検討	IV-73
(5) 坑道の耐震安定性の検討	IV-73
2) 処分坑道離間距離および廃棄体ピッチの検討	IV-77
(1) 人工バリアに必要な寸法	IV-77
(2) 建設・操業技術からの制限	IV-77
(3) 空洞の力学的安定性による制限	IV-77
(4) 人工バリアに対する熱的影響の検討	IV-78
(5) 処分坑道離間距離と廃棄体ピッチ	IV-81
3) 処分坑道の仕様と廃棄体ピッチ	IV-82
4) 処分場のレイアウト	IV-84
5) 埋め戻し材の設計	IV-88
(1) 期待される役割と設計上考慮すべき項目	IV-89
(2) 仕様の設定	IV-89
4.4 人工バリア埋設後の健全性評価	IV-91
4.4.1 再冠水時の人工バリア挙動評価	IV-91
1) 熱-水-応力連成モデル	IV-92
2) 原位置連成試験およびモデルの適用性の検討	IV-92
3) ニアフィールド熱-水-応力連成解析	IV-93
4.4.2 構造力学安定性評価	IV-95
1) 岩盤クリーブ解析	IV-96
2) オーバーバック腐食膨張解析	IV-97
3) オーバーバック沈下解析	IV-98
4.4.3 ニアフィールドの耐震安定性評価	IV-100
1) 人工バリア地震応答解析コードの開発および振動試験	IV-100
(1) 人工バリア地震応答解析コードの開発	IV-100
(2) 人工バリア模型振動試験	IV-101
(3) 人工バリア地震応答解析コードによる解析	IV-101
2) ニアフィールド耐震安定性解析	IV-102
4.4.4 ガス移行評価	IV-105
1) 溶存水素の拡散移行評価	IV-105
2) ガス移行挙動評価	IV-106
4.4.5 緩衝材の岩盤内侵入の評価	IV-109
4.5 処分場の建設, 操業, 閉鎖	IV-110
4.5.1 建設, 操業, 閉鎖の基本手順	IV-110
4.5.2 建設	IV-111

1) 処分場の建設の特徴と留意すべき事項	IV-111
2) 建設技術の検討	IV-112
(1) アクセス坑道	IV-112
(2) 連絡坑道、主要坑道および処分坑道	IV-113
(3) 処分孔	IV-115
3) 各種対策工法	IV-116
4) 品質管理	IV-117
4.5.3 操業	IV-118
1) ガラス固化体の受け入れから廃棄体や緩衝材の搬送・定置までの作業	IV-118
(1) 地上施設	IV-118
(2) アクセス坑道	IV-118
(3) 連絡坑道・主要坑道・処分坑道	IV-120
(4) 換気、排水設備	IV-125
2) 処分坑道および主要坑道の埋め戻し	IV-126
(1) 施工方法	IV-126
(2) 対策工 — 湧水割れ目の隔離 —	IV-127
(3) 品質管理	IV-128
4.5.4 閉鎖	IV-129
1) 連絡坑道の埋め戻し	IV-129
2) アクセス坑道の埋め戻し	IV-129
(1) 施工方法	IV-129
(2) 対策工 — 坑口の処置 —	IV-129
3) ボーリング孔の埋め戻し	IV-130
4) 地上施設の解体・撤去	IV-131
5) 品質管理	IV-131
4.6 処分場の管理に関する技術的検討	IV-132
4.6.1 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	IV-132
4.6.2 処分場の管理の基本的考え方	IV-133
4.6.3 処分場の管理の内容	IV-134
1) 設計・施工上の品質管理	IV-134
2) 人工バリア周辺部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	IV-135
3) その他の管理	IV-136
4.6.4 計測技術	IV-138
4.6.5 所要の措置	IV-138
4.7 まとめ	IV-139

第 V 章 地層処分システムの安全評価

5.1	はじめに	V-1
5.1.1	第 2 次取りまとめにおける安全評価	V-1
5.1.2	本章の構成	V-1
5.2	安全評価の進め方	V-3
5.2.1	専門部会報告書の指針とアプローチ	V-3
5.2.2	システムの多様性と評価における不確実性の取り扱い	V-3
5.2.3	モデル化の考え方	V-6
5.2.4	安全評価の手順	V-7
5.3	地層処分システム	V-9
5.3.1	地層処分システムの構築と特徴	V-9
1)	地質環境	V-10
(1)	地質環境の長期安定性	V-10
(2)	地質環境の特性	V-10
2)	処分場	V-11
3)	地質環境と生物圏のインターフェイス	V-12
4)	安全評価のためのレファレンスシステム	V-13
5.3.2	地層処分システムの安全機能	V-15
5.4	安全評価のシナリオ	V-17
5.4.1	シナリオ作成の方法論	V-17
1)	シナリオ作成のアプローチ	V-17
2)	方法論	V-18
5.4.2	FEP リスト	V-21
1)	包括的 FEP リストの作成	V-21
2)	FEP の内容の明確化と安全評価で考慮する FEP	V-21
5.4.3	シナリオの作成と取り扱い	V-25
1)	FEP に基づくシナリオの作成	V-25
2)	接近シナリオ	V-25
3)	地下水シナリオ	V-27
(1)	基本シナリオ	V-27
(2)	変動シナリオ	V-31

5.5 解析ケースの分類とレファレンスケース	V-34
5.5.1 シナリオに基づく解析ケースの分類	V-34
1) 分類の考え方	V-34
2) 基本シナリオ解析ケース	V-37
3) 変動シナリオ解析ケース	V-38
5.5.2 レファレンスケース	V-38
1) 地層処分システムと概念モデル	V-38
2) モデルとデータ	V-40
(1) 人工バリア	V-40
(2) 天然バリア	V-51
(3) 生物圏	V-62
(4) 解析で用いるモデルチェーン	V-71
3) 解析結果	V-73
(1) 人工バリア中核種移行	V-73
(2) 天然バリア中核種移行	V-74
(3) 線量の算出	V-76
(4) 各バリアの役割	V-78
5.6 バリア性能の検討	V-81
5.6.1 検討の進め方	V-81
1) 解析ケースの設定	V-81
2) 代替生物圏	V-83
(1) 幅広い地質環境に対応させた生物圏評価モデルの設定	V-83
(2) 各生物圏評価モデルから得られた線量への換算係数	V-86
5.6.2 基本シナリオ解析ケース	V-88
1) データ不確実性ケース/モデル変更ケース	V-88
(1) 人工バリア	V-88
(2) 天然バリア	V-92
2) 代替設計ケース/地質環境変更ケース	V-99
(1) 人工バリア	V-100
(2) 天然バリア	V-105
5.6.3 変動シナリオ解析ケース	V-107
1) 天然現象	V-107
2) 工学的対策に関する初期欠陥	V-110
3) 将来の人間活動	V-112
5.6.4 システムの安全性の検討において考慮すべき要因の抽出	V-113
5.7 システムの安全性の検討	V-115

5.7.1 システム性能の総合的解析	V-115
1) システムの多様性	V-116
(1) 地質環境の多様性	V-116
(2) GBI の多様性	V-119
(3) 処分場の仕様の多様性	V-119
2) 不確実性	V-119
(1) データの不確実性	V-119
(2) モデルの不確実性	V-119
(3) シナリオの不確実性	V-120
3) 天然バリアの機能を考慮しないケース	V-120
5.7.2 諸外国で提案されている防護レベルとの比較	V-120
5.8 安全評価の信頼性に関する検討	V-125
5.8.1 方法論的観点	V-125
5.8.2 その他の議論	V-127
1) 補完的解析	V-127
2) 諸外国の安全評価との比較	V-133
3) ナチュラルアナログによる傍証	V-134
5.9 まとめ	V-135
参考文献	V-138

第 VI 章 処分予定地選定と安全基準策定に資するための技術的検討

6.1 はじめに	VI- 1
6.2 技術的拠り所としての研究開発成果の統合化	VI- 2
6.2.1 検討の方法	VI- 2
6.2.2 研究開発成果の反映	VI- 2
6.2.3 事業化のプロセスとの関係	VI- 4
6.2.4 技術的拠り所の構成	VI- 6
6.3 処分予定地選定に資するための技術的拠り所	VI- 9
6.3.1 サイト選定のプロセス	VI- 9
1) 処分候補地の選定	VI- 9
2) 処分予定地の選定	VI- 9
3) 処分地の選定	VI-10

6.3.2 サイト選定の要件	VI-10
1) 要件の抽出	VI-10
2) サイト選定の可否にかかわる地質環境の要件	VI-11
(1) 地質環境の長期安定性に関する要件	VI-11
(2) 処分場の建設可能性に関する要件	VI-12
(3) 人間侵入に関する要件	VI-12
3) サイト選定にとって考慮すべき地質環境条件	VI-13
(1) 人工バリアの設置環境として考慮すべき地質環境条件	VI-13
(2) 天然バリアとして重要な地質環境条件	VI-15
6.3.3 地質環境の調査手法	VI-16
1) 調査の進め方	VI-16
(1) 文献調査	VI-16
(2) 地上からの調査	VI-20
(3) 地下施設を利用した調査	VI-22
(4) ナチュラルアナログ研究の適用	VI-22
2) 調査技術の開発	VI-23
(1) 地下水調査機器の開発	VI-24
(2) 物理探査技術の高度化	VI-27
6.3.4 適用性の高い地層処分システム	VI-29
1) オーバーバック材質	VI-29
2) オーバーバック厚さ	VI-30
3) 緩衝材厚さ	VI-30
4) 緩衝材施工方法	VI-31
5) 地質環境	VI-32
6) アクセス方式	VI-32
6.4 安全基準の策定に資する技術的拠り所	VI-34
6.4.1 人工バリアおよび処分施設の設計・施工要件	VI-34
1) 設計の基本的なプロセス	VI-34
2) 設計にあたっての前提条件	VI-34
3) 人工バリアおよび処分施設の設計要件と製作・施工技術の品質管理	VI-34
(1) オーバーバック	VI-35
(2) 緩衝材	VI-35
(3) 地下施設	VI-36
4) 人工バリアの埋設後の健全性評価	VI-38
5) 処分場の管理	VI-38
(1) 処分場の閉鎖に至るまでのプロセス	VI-38
(2) 処分場の管理に関する技術的基盤	VI-38

6.4.2 地層処分システムの安全評価上の要件	VI-39
1) 安全評価の前提条件	VI-39
(1) 防護目標	VI-39
(2) 安全指標	VI-39
(3) 時間スケール	VI-40
2) 安全評価の方法論に関する要件	VI-41
(1) 安全評価シナリオの明確化	VI-41
(2) 地下水シナリオに対する多重バリアシステムの安全評価	VI-43
(3) 接近シナリオに対する考察	VI-44
(4) 総合的な安全評価	VI-45
6.5 まとめ	VI-46
参考文献	VI-49

第 VII 章 まとめ

7.1 第 2 次取りまとめの成果	VII- 1
7.2 2000 年以降の研究開発の考え方について	VII- 4
7.2.1 地層処分研究開発の特徴	VII- 4
7.2.2 2000 年以降の研究開発の展開	VII- 5
1) 第 2 次取りまとめまでの研究開発	VII- 5
2) 2000 年以降の研究開発	VII- 5
7.2.3 期待される成果	VII- 6
1) 地層処分事業化技術	VII- 6
(1) 地質環境条件の調査研究	VII- 6
(2) 処分技術の研究開発	VII- 7
(3) 性能評価研究	VII- 8
2) 地層処分技術のデジタル体系化「数値地層処分システム」の構築	VII- 8

付 録

付録 A 人間侵入による接近シナリオの評価事例
付録 B 天然現象による仮想的シナリオの評価事例
付録 C 解析ケースの設定
付録 D 感度解析で用いるデータ集

用語集

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