



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3 地層処分システムの安全評価



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。

総論レポートは、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。本報告書は、このうちの分冊3であり、総論レポートにおける安全評価に関する記述内容の詳細な技術的根拠を与えるものである。

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、総論レポートでは概説した研究内容に関する情報を補完することに留意し、とくにシナリオの作成手続きやモデル、データの設定において透明性をもたせるように心がけた。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すこととした。本分冊において、わが国の地質環境（分冊1より）を考慮した処分場の仕様例（分冊2より）に基づき明らかにされた地層処分システムに対する安全性を詳細に検討した。

要約

本報告書は第2次取りまとめの分冊3である。分冊1では、わが国において長期的に安定で地層処分にと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ることを示した。また、分冊2では、わが国の地質環境を考慮して適切に設計された処分場の仕様例を示した。これらによって、具体的な地層処分システムを明らかにした。本分冊は、専門部会報告書で示された指針に基づき、分冊1、分冊2で具体化したシステムを対象として安全評価を行ったものであり、9つの章から構成されている。

第1章では、第2次取りまとめの安全評価の作業として、専門部会報告書で示された第2次取りまとめの安全評価の目的に沿って、安全評価手法を構築し、バリア性能を検討したうえで、システムの総合的な安全評価を行うことを示した。

第2章においては、安全評価で考慮するシステムの多様性とシナリオ、モデル、データの不確実性をどのように取り扱うかを示すとともに、安全評価のアプローチとして、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することを述べた。

第3章では、安全評価で対象とする地層処分システムの構成を示すとともに、地層処分システムの安全機能にかかわる地質環境の特性や設計の要件などを整理した。

安全評価のシナリオについては、第4章において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。地下水シナリオに対しては関連するFEPを考慮し、地層処分システムにおいて通常考えることのできる時間的推移を中心として、地下水を介しての放射性核種の移行を取り扱った。

第5章では、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評価の対象とした。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対しては、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との比較・検討を、また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と比較・検討を行った。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室内試験やフィールドでの研究の成果を利用してその妥当性を確認した。

天然バリアからの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、人工バリアや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。

これをもとに第 VI 章では、モデルやデータにともなう不確実性を考慮したケース、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ケース、さらに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をそれぞれ設定し、感度解析を実施した。

感度解析においては、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。

第 VII 章では、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や、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 μ Sv) を下回ることが示された。

第 VIII 章では、安全評価の信頼性に関する検討を行った。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。また、諸外国の安全評価との比較やナチュラルアナログによる傍証について述べた。

以上に述べた研究開発の成果によって、第 IX 章では、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を示した。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づけた。

目 次

第 I 章 はじめに	I-1
1.1 わが国の地層処分概念と安全確保の考え方	I-1
1.2 安全評価の特徴と一般的方法論	I-4
1.3 第 2 次取りまとめにおける安全評価	I-5
1.4 本報告書の構成	I-6
第 II 章 安全評価の進め方	II-1
2.1 専門部会報告書の指針とアプローチ	II-1
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	II-1
2.3 モデル化の考え方	II-4
2.4 安全評価の手順	II-6
第 III 章 地層処分システム	III-1
3.1 地層処分システムの構成	III-1
3.1.1 地質環境	III-1
3.1.2 処分場	III-1
3.1.3 地表環境と生物圏とのインターフェイス	III-3
3.1.4 安全評価で対象とする地層処分システム	III-4
3.2 地層処分システムの安全機能	III-7
3.2.1 地質環境の長期的な安定性	III-7
3.2.2 人工バリアの設置環境	III-8
3.2.3 天然バリアとしての機能	III-9
3.2.4 人工バリアの長期健全性	III-9
第 IV 章 安全評価のシナリオ	IV-1
4.1 シナリオ作成のアプローチと方法論	IV-1
4.1.1 シナリオ作成のアプローチ	IV-1
4.1.2 シナリオ作成の方法論	IV-2
4.1.2.1 包括的 FEP リストの作成	IV-4
4.1.2.2 FEP の内容の明確化と安全評価で考慮する FEP の選択	IV-4
4.1.2.3 シナリオの作成と取り扱い	IV-10
4.2 地層処分システムの理解	IV-13

4.2.1 人工バリアの設置環境にかかわる特性	IV-14
4.2.1.1 地下水化学	IV-14
4.2.1.2 水理	IV-16
4.2.1.3 岩盤の物理的／化学的安定性	IV-20
4.2.1.4 プラグ／グラウト，支保，埋め戻し材の 物理的／化学的安定性	IV-21
4.2.2 人工バリアおよび母岩に期待される安全機能に かかわる現象と特性	IV-23
4.2.2.1 オーバーバックの腐食／破損／腐食生成物の生成	IV-23
4.2.2.2 ガラス固化体の溶解／核種の溶出	IV-24
4.2.2.3 緩衝材の飽和・膨潤	IV-25
4.2.2.4 間隙水化学	IV-26
4.2.2.5 沈殿／溶解	IV-28
4.2.2.6 拡散／収着	IV-30
4.2.2.7 岩盤中での核種移行	IV-35
4.2.3 安全機能に影響を与える可能性のある現象	IV-37
4.2.3.1 有機物／微生物	IV-37
4.2.3.2 コロイド生成／移行	IV-40
4.2.3.3 ガス生成／移行	IV-42
4.2.3.4 放射線分解／放射線損傷	IV-43
4.2.3.5 緩衝材の変質	IV-44
4.2.3.6 亀裂への緩衝材の侵入	IV-46
4.2.3.7 オーバーバックの腐食膨張	IV-48
4.2.3.8 オーバーバックの沈下	IV-48
4.2.4 安全機能に擾乱を与える可能性のある現象	IV-50
4.2.4.1 天然現象	IV-50
4.2.4.2 工学的対策に関する初期欠陥	IV-52
4.2.4.3 将来の人間活動	IV-53
4.2.4.4 臨界	IV-55
4.3 地下水シナリオの記述	IV-56
4.3.1 基本シナリオ	IV-56
4.3.2 変動シナリオ	IV-60

第 V 章 解析ケースの分類とレファレンスケース V-1

5.1 シナリオに基づく解析ケースの分類	V-1
5.1.1 解析ケースの分類と設定の考え方	V-1
5.1.2 安全評価の解析において前提とする考え方	V-12
5.1.3 天然バリアの性能評価モデル設定の考え方	V-15

5.2 安全評価の解析で考慮する核種	V-18
5.3 レファレンスケース	V-20
5.3.1 人工バリアのモデルとデータ	V-21
5.3.1.1 人工バリア中核種移行解析モデル	V-21
5.3.1.1.1 概念モデル	V-21
5.3.1.1.2 数学的定式化	V-22
1) ガラスの溶解	V-24
2) 緩衝材中の核種移行	V-25
3) 母岩への核種移行	V-26
4) 解析コード	V-27
5.3.1.2 データ	V-29
5.3.1.2.1 モデルガラス固化体のインベントリ	V-29
5.3.1.2.2 地下水組成	V-32
5.3.1.2.3 間隙水組成	V-34
5.3.1.2.4 ガラス溶解速度	V-39
5.3.1.2.5 溶解度	V-40
5.3.1.2.6 拡散係数	V-46
5.3.1.2.7 分配係数	V-50
5.3.1.2.8 緩衝材外側での地下水流量	V-53
5.3.2 天然バリアのモデルとデータ	V-54
5.3.2.1 母岩中核種移行解析モデルとデータ	V-54
5.3.2.1.1 概念モデル	V-54
5.3.2.1.2 数学的定式化	V-57
1) 支配方程式	V-57
2) 初期条件・境界条件	V-58
5.3.2.1.3 データ	V-59
1) 動水勾配	V-59
2) 亀裂パラメータ	V-59
2-1) 亀裂の透水量係数分布	V-59
2-2) 亀裂の開口幅分布	V-62
3) 核種移行パラメータ	V-63
3-1) 巨視的分散長	V-63
3-2) マトリクス拡散深さ	V-64
3-3) マトリクス拡散寄与面積率	V-66
3-4) 有効間隙率	V-66
3-5) 乾燥密度	V-67
3-6) 実効拡散係数	V-68
3-7) 分配係数	V-69

5.3.2.2 断層中核種移行解析モデルとデータ	V-72
5.3.2.2.1 概念モデル	V-72
5.3.2.2.2 数学的定式化	V-72
5.3.2.2.3 データ	V-73
5.3.3 生物圏のモデルとデータ	V-75
5.3.3.1 生物圏評価モデルの考え方	V-75
5.3.3.1.1 生物圏評価のアプローチ	V-75
5.3.3.1.2 レファレンスバイオスフィアの概念	V-76
5.3.3.1.3 レファレンスケースにおける生物圏の設定	V-77
5.3.3.2 生物圏評価モデル	V-78
5.3.3.2.1 評価条件 (Assessment Context) の設定	V-78
5.3.3.2.2 評価条件に基づく生物圏の状態設定	V-80
5.3.3.2.3 FEP リストの作成	V-81
5.3.3.2.4 FEP 間の相関関係の特定と概念モデルの構築	V-88
1) 相互作用マトリクスの作成と FEP 間の相関関係の特定	V-88
2) 概念モデル	V-91
5.3.3.2.5 数学モデル	V-93
1) コンパートメント間の移行プロセスにかかわる数学モデル	V-93
2) 被ばく経路にかかわる数学モデル	V-94
5.3.3.3 データ	V-95
5.3.3.3.1 コンパートメントの大きさに関するデータ	V-95
5.3.3.3.2 コンパートメント間の移行プロセスに関するデータ	V-95
5.3.3.3.3 被ばく経路に関するデータ	V-96
5.3.4 安全評価の解析で用いるモデルチェイン	V-98
5.3.5 レファレンスケースの解析結果	V-99
5.3.5.1 線量への換算係数	V-99
5.3.5.2 人工バリアからの核種移行率	V-103
5.3.5.3 天然バリアからの核種移行率	V-107
5.3.5.4 母岩および断層からの核種移行率の線量への換算結果	V-110
5.3.5.5 バリア性能の考察	V-112

第 VI 章 バリア性能の検討 VI-1

6.1 基本シナリオ解析ケース VI-1

6.1.1 線量への換算係数 VI-3

6.1.1.1 幅広い地質環境に対応させた種々の生物圏評価モデルの設定 .. VI-3

6.1.1.2 河川水モデルを用いて算出した線量への換算係数 VI-6

6.1.1.3 河川堆積層モデルを用いて算出した線量への換算係数 VI-8

6.1.1.4 深井戸モデルを用いて算出した線量への換算係数 VI-10

6.1.1.5	沿岸海域水モデルを用いて算出した線量への換算係数	VI-13
6.1.1.6	沿岸海域堆積層モデルを用いて算出した線量への換算係数	VI-15
6.1.1.7	各生物圏評価モデルから得られた線量への換算係数の一覧	VI-17
6.1.1.8	データやモデルの不確実性に関する検討	VI-19
6.1.2	データ不確実性ケース／モデル変更ケース	VI-20
6.1.2.1	人工バリアについてのデータ不確実性ケース	VI-20
6.1.2.1.1	ガラス溶解速度の不確実性	VI-21
6.1.2.1.2	オーバーバック破損時期の不確実性	VI-23
6.1.2.1.3	緩衝材外側での地下水流量の不確実性	VI-26
6.1.2.2	人工バリアについてのモデル変更ケース	VI-30
6.1.2.2.1	腐食生成物層での核種移行遅延	VI-31
6.1.2.2.2	掘削影響領域での核種移行遅延	VI-34
6.1.2.2.3	オーバーバックの腐食膨張と周辺母岩中の 亀裂への緩衝材の侵入	VI-36
6.1.2.3	天然バリアについてのデータ不確実性ケース	VI-40
6.1.2.3.1	透水量係数の不確実性	VI-43
6.1.2.3.2	開口幅分布の不確実性	VI-43
6.1.2.3.3	分散長の不確実性	VI-44
6.1.2.3.4	マトリクス拡散寄与面積率の不確実性	VI-44
6.1.2.3.5	マトリクス拡散深さの不確実性	VI-46
6.1.2.3.6	有効間隙率/乾燥密度/実効拡散係数の不確実性	VI-47
6.1.2.3.7	分配係数の不確実性	VI-48
6.1.2.3.8	断層内動水勾配の不確実性	VI-49
6.1.2.4	天然バリアについてのモデル変更ケース	VI-50
6.1.2.4.1	コロイドの影響を考慮したケース	VI-52
6.1.2.4.2	処分場レイアウトを考慮したケース	VI-57
6.1.2.4.3	処分場内での濃度干渉効果を考慮したケース	VI-60
6.1.2.4.4	断層を多孔質媒体として取り扱うケース	VI-63
6.1.3	代替設計ケース／地質環境変更ケース	VI-66
6.1.3.1	人工バリアについての代替設計ケース	VI-66
6.1.3.1.1	代替材料を用いたオーバーバックの使用	VI-67
6.1.3.1.2	緩衝材厚さの変更	VI-70
6.1.3.2	人工バリアについての地質環境変更ケース	VI-71
6.1.3.2.1	地下水流動の多様性	VI-72
6.1.3.2.2	堆積岩の場合の支保工との反応による間隙水の変化	VI-73
6.1.3.2.3	堆積岩の場合の支保工の変質、腐食膨張、岩盤クリープ・ による緩衝材外側での地下水流量の変化	VI-74
6.1.3.2.4	海水系地下水の想定	VI-75

6.1.3.2.5 海水系地下水の想定でのオーバーバックの 破損時期の不確実性	VI-79
6.1.3.3 天然バリアについての地質環境変更ケース	VI-87
6.1.3.3.1 動水勾配の多様性	VI-90
6.1.3.3.2 岩種の多様性	VI-90
6.1.3.3.3 地下水の多様性	VI-96
6.2 変動シナリオ解析ケース	VI-97
6.2.1 天然現象	VI-97
6.2.1.1 隆起・侵食	VI-98
6.2.1.2 気候・海水準変動	VI-101
6.2.2 工学的対策に関する初期欠陥	VI-102
6.2.3 将来の人間活動	VI-104
6.3 感度解析のまとめ	VI-107
6.3.1 感度解析で得られた知見のまとめ	VI-107
6.3.2 システム性能の総合的解析において考慮する不確実性の抽出	VI-108
第 VII 章 システムの安全性の検討	VII-1
7.1 システム性能の総合的解析	VII-1
7.1.1 システムの多様性を考慮するケース	VII-3
7.1.2 評価における不確実性を考慮するケース	VII-5
7.1.3 天然バリアの機能を考慮しないケース	VII-6
7.2 諸外国で提案されている防護レベルとの比較	VII-6
第 VIII 章 安全評価の信頼性に関する検討	VIII-1
8.1 時間スケールと安全評価	VIII-1
8.2 諸外国の安全評価との比較	VIII-8
8.3 ナチュラルアナログによる傍証	VIII-9
第 IX 章 まとめと結論	IX-1
9.1 安全評価のまとめ	IX-1
9.2 結論	IX-5

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 3次元モデルを用いた天然バリア中核種移行解析

付録 D 生物圏評価における移行プロセスに関する評価式

付録 E 生物圏評価における被ばくモードに関する評価式

付録 F 生物圏評価におけるデータセット

付録 G 生物圏評価におけるデータやモデルの不確実性に関する検討

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