

分冊3「安全評価手法の開発」

要 約

本報告書は、第2次取りまとめ以降処分事業や安全規制に関する動向を踏まえ、核燃料サイクル開発機構が実施してきた安全評価手法の開発の成果を取りまとめたものである。その内容は、核燃料サイクル開発機構が課題評価委員会による評価を受けながら策定した「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の全体計画」（以下、「全体計画」という）に示された目標および課題に対応したものになっている。

全体計画で示された第2次取りまとめ以降の安全評価手法の高度化に関する目標は、これまで整備してきた安全評価に関連する様々なモデルや手法を、実際の地質環境へ適用することを通じて、その信頼性を確認していくこと（実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認）および処分システムに関連する現象への理解を深め、評価の信頼性を高めていくこと（地層処分システムの長期挙動の理解）である。第2次取りまとめ以降の安全評価手法の高度化については、以下の4つの課題について取り組むこととした。

①核種移行のデータベース整備

核種移行パラメータについては、第2次取りまとめで使用した溶解度、収着、拡散などの核種移行パラメータの信頼性向上および拡充を目的とし、還元雰囲気、炭酸系でのアクチノイド元素の溶存化学種の明確化、海水系や堆積岩系を対象としたデータの拡充などを行うこととした。また、透明性を高めるためにデータベースを定期的に更新・公開することとした。

②安全評価モデルの高度化

安全評価モデルの高度化については、重要現象の理解とモデル化を通じて安全評価解析の信頼性を向上させるため、亀裂中の水理・物質移行現象、堆積岩中の水理・物質移行現象、ガラスの長期溶解挙動、核種の溶解現象、核種の収着・拡散現象、コロイドなどの影響評価について現象理解を進め、個別現象モデルを開発・改良することとした。また、実際の地質環境の重要な特徴のモデルへの取り込みを図るため、水理地質構造モデルと生物圏評価モデルについて必要な検討・改良を行うとともに、深部地下水の水質予測の信頼性を高めるために、地下水水質のモデル化について検討することとした。

さらに、不確実性の取扱い技術を向上させるため、不均質性が重要となる地下水流動の分野において、堆積プロセスを考慮した地質構造推定技術、地下水流動解析結果の不確実性定量化技術や原位置トレーサー試験より得られる水理・物質移行特性値の不確実性について検討することとした。

③安全評価手法の整備・高度化

安全評価の信頼性を確保するためには、モデルやデータの信頼性を高めるだけでなく、追跡性、透明性やわかりやすさなどを確保すること、不確実性が適切に取り扱われていること、評価者と研究者や調査担当者との間で適切なコミュニケーションが確保され評価の品質が保証されていることなどが必要とされている。こうした課題に対処するために、シナリオ解析技術、天然現象影響評価技術、不確実性評価技術の技術開発、技術情報の統合技術の開発に取り組むこととした。

④安全評価手法の適用性確認

安全評価手法の適用性確認については、データ整備、現象理解・モデル化、安全評価手法の個別技術について、改良した技術を実際の地質環境に適用することにより、実際の地質環境を対象とする場合の留意点・課題の抽出を行うとともに、地質環境の調査・評価から物質移行解析に至る一連の評価の中で、評価項目間の重要な接続部分における作業手順の開発と試行を行うこととした。

なお、本報告書で取扱う課題は、第2次取りまとめと異なり安全評価関連の全分野を網羅的にカバーするのではなく、安全評価の基盤として現象理解、モデル開発、データベース開発、手法開発などの中から、重要な課題を選択して実施している。

本報告書は、全6章から構成されている。第1章は全体計画に基づく目標および課題と研究の進め方を示している。第2章（核種移行データベースの整備）、第3章（安全評価モデルの高度化）、第4章（安全評価手法の整備・高度化）、第5章（安全評価手法の適用性確認）の各項目においては、課題を設定した背景、第2次取りまとめ以降の進捗と事業・規制への反映、今後の課題について記述した。課題を設定した背景においては、どのように第2次取りまとめの課題、国際的動向、事業・規制のニーズなどを考慮して課題を設定したかを記述した。第2次取りまとめ以降の進捗と事業・規制への反映においては、各課題において得られた成果の安全評価および事業・規制における位置づけや反映点について記述した。また、最後に今後の課題として、次のフェーズで取り組むべき課題について記述した。第6章では、第2次取りまとめ以降の研究の進捗および事業・規制への反映点を要約した。

以下に、第2次取りまとめ以降の進捗を中心に各項目の概要を述べる。

核種移行データベースの整備

放射性元素の熱力学データベースの整備については、アクチニドIV価の水酸化炭酸錯体やアモルファス含水酸化物の溶解度積や加水分解定数などの熱力学データを取得し、既存データとの比較などを踏まえ、その信頼性の向上を図った。また、放射性元素の熱力学データベース（JNC-TDB）について、最新の経済協力開発機構・原子力機関の熱力学データベース（OECD/NEA TDB）も含めて、各種地球化学計算コードに対応したフォーマットに変換し、透明性、客観性の確保などの観点から外部公開ホームページ上で一般に公開した。本データベースへの国内外の利用者登録は、2005年7月時点で300名を突破しており、利用者からの指摘に対する改訂も行なっている。

収着・拡散データベースの整備については、幅広い地質環境への適用性を考慮して、セシウム、セレン、スズなどの海水系環境などにおける堆積岩に対する収着データを拡充した。また、核種の収着データベース（JNC-SDB）についても、JNC-TDBと同じく、透明性、客観性の確保などの観点から外部公開ホームページ上で一般に公開した。利用者登録数は熱力学データベースに同じである。また、1998～2003年に公開された収着データ約1,200件を追加、更新した。データ数が増えたことにより、セシウム、アメリカシウムなどの元素の分配係数のイオン強度やpHに対する依存性がより明確になり、イオン交換や表面錯体反応といったメカニズム推定に有効なものとなった。さらに、2万件を超える収着データの信頼度付与のための指標を作成した。核種の収着データベース開発などにより、社団法人日本原子力学会標準化委員会の活動の一環で行われている深地層の分配係数の測定方法の標準化作業に汎用的な条件や方法などの基盤情報が提供できた。

安全評価モデルの高度化

岩盤中水理・物質移行モデルの高度化については、地上からの調査段階で必要となる地下水流動解析の信頼性向上に資するモデル化技術の整備として、以下の成果が得られた。

- ・データの少ない広域とデータの多い処分場近傍領域を同時に解析するために、亀裂ネットワークモデルと連続体モデルを接続した「入れ子式モデル」を開発するとともに、その有効性を確認した。
- ・間隙水圧データから地下深部の透水係数を推定する技術を、幌延地域で観測されている間隙水圧データに適用し、稚内層で観測された高い間隙水圧は、稚内層あるいはその上位の声間層の上部に低透水性の地層が存在することに起因する可能性が示唆され、本手法を用いることにより、対象地域の地下水流動に影響を及ぼす可能性がある要因を抽出し、調査や解析にフィードバックできる可能性が示された。

- ・水理と地下水水質変化を統一的にモデル化するために、ケモメトリックス法とバックワードトラッキングを組み合わせて地下水の端成分の混合割合の時間変化をモデル化する手法を開発し、スウェーデンのエスポ地下研究施設周辺地域における坑道掘削に伴う水質変化の予測解析に適用した。その結果、本手法が水理地質構造モデルの信頼性の確認とともに、間隙率の補正にも有効であることが分かった。
- ・定量的知見だけでなく定性的な地質学的データなども考慮することがモデルの信頼性向上に有効であるため、堆積プロセスを考慮して堆積岩中の不均質な堆積構造を再現することにより地質構造モデルの不確実性を推定する手法を開発した。
- ・水理解析から物質移行解析に受け渡す重要情報となる移行経路長は、透水係数の不均質性の影響を受けるため、移行経路長などの不確実性を確率有限要素法を用いて評価する手法を提案するとともに、モンテカルロ法との比較・検討を行った。

また、結晶質岩・堆積岩について安全評価上重要となる亀裂を対象とした水理・物質移行の現象理解に関して以下の成果が得られた。

- ・1 ケースではあるが亀裂交差部と交差部周辺の亀裂の透水性を測定し、亀裂交差部は周辺の亀裂より透水性が高く、移行経路となりうることを示した。
- ・亀裂充填物質の拡散係数を測定し、移流間隙と接する岩石基質部に拡散するだけでなく、亀裂充填物質を介して亀裂面全体からマトリクス拡散が起きうる可能性があることを示した。また、トレーサー試験に基づき安全評価で用いるパラメータを解釈するに当たっては、亀裂充填物質の影響を考慮する必要性があることを示した。
- ・原位置トレーサー試験からパラメータ値とその不確実性を推定する手法を開発した。
- ・新第三紀堆積岩中の亀裂の影響を、コアを用いた室内試験で評価し、間隙率の異なる堆積岩で亀裂が移行経路になり得る場合とそうでない場合があることが示され、実際のサイトでは亀裂の影響を確認する必要性があることが示唆された。また、物質移行開口幅と透水係数の相関性については、第2次取りまとめの知見が堆積岩においても利用可能であることを示した。

地下水・間隙水水質形成モデルのうち、地下水水質に関しては、幌延の深地層の研究施設計画や茂原地域においてボーリング孔から採水され地表で測定された地下水データに基づき、地下深部での pH、Eh などの値を熱力学的手法により推定し、地表からの調査段階において深部地下水水質を測定することが困難な場合の推定方法を提示した。間隙水水質に関しては、圧縮ベントナイト中の間隙水の pH の時空間変化を直接測定する技術を開発した。また、セメントに起因して発生する高アルカリ溶液とベントナイトの変質を検討する際に必要な鉱物などに関する熱力学データベースを整備した。

現象論的核種移行モデルの開発のうち、ガラスの長期浸出挙動では、変質鉱物として pH11 以上では方沸石、pH11 以下ではスメクタイトの生成が確認され、方沸石生成の場合はガラス溶解が加速されることがわかった。核種の溶解現象では、溶解度制限固相の変遷について、トリウムに引き続き、ウランについても溶液中において非晶質含水酸化物の結晶性酸化物への変化が確認され、第2次取りまとめにおける溶解度制限固相の設定が保守的であることが示された。また、固溶体モデルの開発について、ネプツニウム IV 価とウラン IV 価が混合したアモルファス含水酸化物の溶解挙動が理想固溶体モデルで表現できることを示した。さらに、ラジウム（バリウム）とカルシウムが混合した炭酸塩の共沈挙動について、元素分配比の方解石沈殿速度依存性を取得するとともに、ラジウム（バリウム）の溶解挙動が、非理想系の固溶体モデルにより解釈できることを示した。収着拡散挙動では、収着メカニズムに基づくモデルの妥当性を確認するとともに、現状では適用可能な元素には制限があるものの、環境条件に対応した分配係数値の推定および環境条件の変化に対する感度の予測が可能となった。さらに、緩衝材中の微細間隙構造中における各イオンの移行経路などに関する現象理解が進んだ。

コロイド、有機物および微生物のうち、コロイド影響に関する研究では、原位置地下水中

のコロイド特性（濃度・粒径分布）などを評価した。圧縮ベントナイトによるコロイドフィルター効果を均質化モデルにより検討し、コロイドろ過に必要な有効粘土密度を計算した。セシウムベントナイトコロイドに対する収着性は粉末状ベントナイトより大きいことを確認した。さらに、亀裂性媒体と多孔質媒体の両方に適用可能であり核種のコロイドへの収脱着速度を考慮できる核種移行計算コードを開発し、海外の地下研究施設における原位置試験においてその有効性を確認した。有機物の影響に関する研究では、実際の地下水中の有機物の同定と濃度測定を行った。圧縮ベントナイトへの有機物透過特性を調査し、蒸留水条件に比べ人工海水条件下では透過しやすいことを確認した。有機物と核種の相互作用については、トリウム、ネプツニウム IV 価と有機物の相互作用について錯生成定数を取得した。また、トリウムは溶液中の炭酸濃度がある程度以上の場合には有意に錯体を形成しないことを確認した。微生物影響に関する研究では、微生物がコロイド的挙動をする場合、微生物濃度によっては核種移行が促進される可能性があることを示した。

生物圏評価モデルの高度化については、実際の地表環境の特徴を考慮するため、希釈などの効果に大きく係わる地質環境と生物圏とのインターフェース（GBI）を実際の地表環境に応じて設定するための着眼点や考え方、および設定上考慮すべき要因を把握するための調査項目を概略的に検討した。また、海域を GBI としたモデル、下部土壌を GBI としたモデル、気候変動を考慮したモデルなどを拡充した。さらに、実際のサイトにおいて、パラメータの重要度と設定状況に基づき優先的に取得すべきデータを絞り込む手順を作成した。線量およびリスク以外の安全指標としての天然放射性核種の濃度とフラックスについて、基盤的情報としてわが国における天然放射性核種の濃度とフラックスのデータを収集・整理するとともに、集水域に着目した天然放射性核種のフラックスの算出方法を例示した。

安全評価手法の整備・高度化

シナリオ解析技術については、シナリオ解析において重要である反面複雑で時間を要する主要な原因となっていた FEP の相関関係の整理に対して、FEP の相関関係をマトリクス形式で表現することに加え、安全機能という結果側の視点からの階層的整理を行うことによって構造化するとともに、計算機上に展開することにより、相関関係の十分性の確保、作業の効率化、および作業の追跡性・透明性の確保を可能とする技術を開発した。

天然現象影響評価技術に関しては、地質学的知見をより合理的に評価に反映することにより過度の保守性を排除可能とするとともに、整合性・追跡性についても確保可能な作業フレームを整備した。

不確実性評価技術のうち、パラメータの分布設定技術については、誘出法を用いた分布設定手順の検討および試行から、分布設定手順を具体化するとともに、留意点として、パラメータの変動要因について専門家間で情報を共有することが重要であるとの知見を得た。データ不確実性の影響の定量化については、複数のデータの不確実性が同時に存在する場合の影響をモンテカルロシミュレーションで評価可能な核種移行解析モデルを開発するとともに、決定論的な手法と確率論的な手法を相互に補完的に用いることにより、不確実性評価の信頼性と効率を向上させることができる見通しを得た。感度分析技術については、従来の重回帰分析に加えて、クラスタ分析、判別分析、決定木分析などの手法を、分析の目的に応じて使い分けること、および組み合わせる使用の有効性を提示した。モデルの不確実性の影響の定量化については、第 2 次取りまとめの段階で、簡略化したり、安全側の観点からあえて効果を無視していたプロセスの検討として、掘削影響領域での移行遅延や、ガラス溶解に対するガラスの割れの影響について評価を行い、これらの現象の現実的評価がシステム性能の頑健性を示す上で有効となる見通しが得られた。

技術情報の統合技術については、広範囲におよぶ地層処分の各研究要素間で技術情報の共有化を図ることにより、調査・設計・安全評価の整合性を確保し、評価の信頼性の向上を図るため、技術情報を利用しやすい形で統合的に管理することが可能なシステム（技術情報統

合システム：JGIS) を構築した。

安全評価手法の適用性確認

実際の地質環境を対象とした、地質環境の調査・評価から物質移行解析に至る一連の作業の枠組みを整理した。また、実際の地質環境を対象とした物質移行解析の大きな特徴のひとつである、地下水流動解析から得られる移行経路情報を物質移行モデルに反映する方法について検討し、複雑なモデルと簡略化したモデルを構築するとともに、簡略化したモデルで複雑なモデルを近似する手法を提示した。

安全評価手法を個別に深地層の研究施設計画や海外の地下研究施設における実際の地質環境データに対して適用した結果、実際の地質環境を対象とする際の留意点・課題について以下の事項を提示した。

地下水流動評価のうち、補完モデルとしての入れ子式モデルについては、適用結果と亀裂ネットワークモデルを構築する上での留意点・課題として、流体検層による水みちの透水量係数の測定精度の検討、亀裂の長さを設定する際のフラクタル特性データの活用などを示した。実測されたデータから水理パラメータを推定する手法については、幌延の深地層の研究施設計画のボーリング孔で観測された間隙水圧から地下深部の透水係数の推定を行い、留意点として、断層部分の透水係数の設定（高透水性部と低透水性部からなるサンドイッチ構造、あるいは低透水性部のみの一層構造）が地層の透水係数の推定値に影響を与えることを示した。水理地質構造モデルの信頼性を確認する上で、地下水水質変化との整合性を確認する手法については、留意点として、地下水水質の初期状態の把握とその後の変動の把握が重要であることなどを示した。堆積岩の地質構造を推定する技術の開発については、堆積プロセスおよび圧密プロセスを考慮して堆積岩の堆積構造を推定するうえでの留意点として、入力パラメータの設定にあたって、初期条件や堆積作用に影響する要因について堆積学的知見に基づき慎重な検討を行う必要があることを示した。

地下水水質の設定については、地下水水質を熱力学的解析に基づき補正する手法を検討し、留意点・課題として、地下水水質を推定するうえでの鉱物情報の取得の重要性や微生物影響などを含めた評価の必要性について述べた。

物質移行のための解析モデルの選定およびパラメータ設定に関しては、間隙率の異なる新第三紀堆積岩における卓越した水みちとして、亀裂の重要性が異なることが示唆されたことから、実際のサイトにおいて亀裂が岩石の透水性に与える影響を確認することを留意点として示すとともに、原位置での亀裂の連結性についても検討する必要性を今後の課題として示した。結晶質岩については、留意点として、トレーサー試験から安全評価に用いる物質移行パラメータを解釈する際には、亀裂中の充填物質への拡散が短期的には卓越するため、その影響を考慮した解釈を行う必要性を示した。

分配係数の設定に際しては、留意点として、岩石と地下水水質の把握が重要であり、特に後者については天然有機物の把握が重要であることを指摘した。また、実際の地質環境を対象とする際には、得られるデータが限られる可能性があり、そのような場合に既存の収着データベースを基に分配係数を推定する手法を示した。

コロイド、有機物の影響評価を行う際には、留意点として、地下水中における濃度、安定性、移行性、核種収着性・錯形成能およびそれらの不可逆性の 5 つの特性を評価する必要があること、地下水中のコロイド特性は地下水流速や Eh, pH などの影響を受けやすいため、できるだけ地下深部の環境を乱さずに地下水を採取する必要があること、また、有機物についても、コロイドレベルの大きさを持つ有機物が存在する可能性があるため、コロイドと同様に擾乱の小さい手法で地下水を採取する必要があることを述べた。

シナリオ解析については、留意点として、地質環境に対する理解が十分でない段階におい

ては、地質環境条件などを一義的に定めることができないことが想定されるため、そのような場合には複数の地質環境条件のそれぞれに対してシナリオを設定し、不確実性として評価できるようにしておく必要と、このような課題に対応可能なシナリオ構築手法を整備したことを述べた。

不確実性評価については、パラメータ分布の設定技術、データ不確実性の影響の評価技術、重要な不確実性の抽出技術が整備され、今後実際の調査・研究にフィードバックすることが課題であることを述べた。

生物圏評価については、調査により得られる情報に応じて GBI 候補を絞り込むことの手順について検討を行い、今後深地層の研究施設計画で行われる調査を活用して検討することが今後の課題であることを述べた。

技術情報統合システムの開発については、実際の地質環境を対象とした調査・研究の進展に伴う技術的な情報の増大や複雑化への対応の実績の蓄積を図ることが課題であることを述べた。

今後に向けて

今後、地層処分のセーフティケースの作成に必要となる地質環境の調査、処分場の設計および安全評価に関するデータや情報、および専門家の判断根拠などを知識という形でわが国共通の資源とするために、安全評価に関する技術基盤の強化を進めるとともに、知識の拡充と具体化、統合化の方法論の開発およびそれに基づく知識ベースの構築を進める。

安全評価に関する技術基盤の強化については、地層処分基盤研究施設や地層処分放射化学研究施設などの研究施設において、核種移行などに関するデータの拡充、現象理解の深化に基づくモデルの高度化を図る。また、安全評価への反映の筋道を明らかにしながら個別研究課題を進めるとともに、それらの連携を強化し、総合技術としての安全評価技術を向上させる。さらに、これらの技術の開発・整備に、深地層の研究施設計画で得られる地質環境データなどを活用していくとともに、全体システムモデルの整備も図りながら、個別の技術のみならず安全評価技術全体としての深部地質環境での適用性確認を行う。

知識の統合化に関する方法論の開発および知識ベースを管理する知識マネジメントシステムの開発と整合をとりつつ、上述のデータ、モデル、手法、それらの適用性などの安全評価に関する技術的成果、および深地層の科学研究の成果やすでに開発を進めている熱力学データベースなどを知識として整理し、それらを知識ベースとして体系化する。これにより、事業の進展に応じて研究開発成果や科学技術的進歩を反映した最新の知識を提供することを可能とする。また、関係機関の研究開発成果もこの知識ベースに統合し、地層処分技術に関する研究開発における中核機関としての役割を果たす。