

バックエンド部会セッション

地層処分セーフティケース —進捗状況—

Safety case for geological disposal of radioactive waste -Current status-

(5)閉鎖後長期の安全性の評価

(5)Post-closure long-term safety of geological disposal system

*藤崎淳，黒澤進，澁谷早苗，石田圭輔，浜本貴史，稲垣学，石黒勝彦，梅木博之
原子力発電環境整備機構（NUMO）

1. はじめに

閉鎖後長期の安全性の評価では、検討対象母岩に対する地質環境モデル、ならびにこれに対応して設計した処分場に対して、最新の科学技術的知見に基づいて安全評価を実施し、処分場閉鎖後の長期安全性について論ずる。これによって、わが国においてもこれまでに蓄積された科学技術的知識に基づいて、地層処分を安全に実施できるとともに、今後、サイトが特定された場合に、その地域の地質環境を対象とした地層処分システムに対する安全評価を実施するための科学技術的基盤が整っていることを示す。

2. 安全評価の枠組み

わが国の地層処分に関しては、安全評価の基準や時間スケールといった基本的枠組みを与える安全規制は今後検討されることになっている。そこで NUMO セーフティケースでは、国際機関で示されている考え方や諸外国の安全規制などを参考に、安全評価の枠組みを次のように設定した。

- ・ 安全評価で考慮すべきシナリオにおける放射線学的影響を、その発生可能性を考慮したうえで議論するリスク論的な考え方を適用して評価する。具体的には、考慮すべきシナリオをその発生可能性に応じて基本シナリオ、変動シナリオ、稀頻度事象シナリオ、および人間侵入シナリオに区分するとともに、各区分に対して放射線学的な影響を論ずるための「めやす」となる基準を仮に設定し、算出した線量やリスクをこれと比較することで、設計した処分場に対する安全性の見通しについて考察する。
- ・ 基本シナリオと変動シナリオは、比較的発生可能性が高い自然現象を想定したシナリオとして、次のように定義する。
 - 基本シナリオ:適切なサイト選定とそのサイトの地質環境条件を考慮した処分場の設計がなされ、期待する安全機能を発揮できるように地層処分システムが構築されていれば、そこで生ずる可能性が最も高いと考えられるシナリオ
 - 変動シナリオ:基本シナリオに対して科学的に合理的と考えられる不確実性を考慮したシナリオ
- ・ これらの比較的発生可能性が高いシナリオに対しては、ICRP^[1]が勧告している一般公衆に対する線量拘束値 $300 \mu\text{Sv/y}$ をめやすとして設定する。ただし、基本シナリオについては、可能な限り被ばく線量を抑えるように事業者として最大限の努力を行っていることを示すため、諸外国の安全規制に適用されている基準において最も厳しい $10 \mu\text{Sv/y}$ を目標値として設定する。
- ・ 稀頻度事象シナリオや人間侵入シナリオは、想定が必要がないほど発生の可能性が極めて小さいと考えられる事象を考慮したとしても、著しい放射線学的影響がないことを念のために確認するためのシナリオとして定義する。これらと比較するめやすは、ICRPが「破壊的自然現象」に対して設定した考え方や、「人間侵入」に対する設定の考え方を参考に線量を設定する。
- ・ 安全評価の対象とする期間については、「第2次取りまとめ」^[2]における考え方を踏襲するとともに、国際機関^{[3][4]}や諸外国の安全規制などで定量的な評価を行う期間として考慮されている将来百万年程度を念頭に置いて考える。

3. シナリオ構築と解析ケースの設定

シナリオの構築手法としては、地層処分システムの構成要素に期待される安全機能に影響があると考えられる事象をトップダウン的に検討する視点と、網羅的に整備した FEP に基づき地層処分システムにおいて想定される事象をボトムアップ的に検討する視点を組み合わせ、システムの安全機能と FEP を関連付けることで、網羅性を確保しながら安全機能に直結する重要なシナリオを効率的に構築する方法を開発した。個々の FEP がシステムの安全機能に与える影響とその発生可能性について分析し、基本シナリオ、変動シナリオ、稀頻度事象シナリオの分類とシナリオの記述を行う。このうち稀頻度事象シナリオについては、適切なサイト選定を行うことにより発生の可能性は極めて小さいものの、発生した場合に処分システムに重大な影響を与える可能性がある自然事象を取り扱うこととし、新規に発生した火山が偶発的に処分場を直撃することを想定したシナリオ、および処分場より深い地震核発生層（一般には地下深部 6～20 km 程度）に存在する断層が進展し将来のある時期に偶発的に処分場を直撃することを想定したシナリオを設定した。人間侵入シナリオについては、システムの頑健性を評価することを主たる目的として、国際的な考え方や⁴などを参考に、想定し得る人間侵入の行為としてボーリング掘削を選定し評価を行うこととした。

記述したシナリオに対して、核種の移行モデルやパラメータなど、線量の評価解析を行うための条件を設定したものを NUMO セーフティケースでは解析ケースと称している。シナリオの記述や解析ケースの設定にあたっては、例えばセメントや鉄との相互作用に伴う緩衝材の変質解析など、最新の知見に基づくニアフィールドの状態変化に関する現象解析の結果を利用した。

4. 解析モデル

基本シナリオおよび変動シナリオの解析ケースに対する線量評価では、人工バリアを含むニアフィールドスケール（150 m×100 m×深度方向 100 m 程度）、地下施設を包含する処分場スケール（5 km×5 km×深度方向 1-1.5 km 程度）、その外側の広域スケール（30-50 km×30-50 km×深度方向 2-3 km 程度）の 3 つの空間スケールで階層的に作成した地質環境モデルのうち、サイトが特定されていないことを考慮して処分場が設置される地下深部の安定な母岩領域に注目し、処分場スケールの領域内に対して核種移行解析を行うこととした。

具体的には、地下施設の各処分区分画から避けた断層（NUMO セーフティケースではトレース長 1 km 以上の断層）は規模が大きく、地表まで到達している可能性が高いとみなし、地下施設の各処分区分画からそれぞれ最も近傍のトレース長 1 km 以上の断層まで、もしくは地下水流動の下流側における解析領域境界までの核種移行率を核種移行解析によって算出し、これに生活圏評価により取得した線量への換算係数を乗じて、地表での線量を算出する。これによって、地下深部の処分場スケールから生活圏までのあいだに存在する地質媒体の移行・遅延機能を保守的に無視する評価とした。

一方、核種移行解析を行う処分場スケール範囲内の解析モデルの設定にあたっては、検討対象母岩の地質環境やそれに応じて設計された処分場の特徴（人工バリアの形状や材料特性、地下施設レイアウトなど）を可能な限り忠実に反映し、これらが核種移行挙動に与える影響をできる限り現実的に評価できるように配慮した。具体的には、次のような検討を行っている。

- ・ ニアフィールドスケール（150 m×100 m×深度方向 100 m 程度）の領域について、処分場の構成要素と母岩中の割れ目ネットワークを三次元のモデルを用いて詳細に表現し、より現実的な地下水流動と核種移行挙動を解析できるコードを適用した（図 1 上段参照）。この際、各母岩中の割れ目ネットワークは、地質環境モデルで設定した割れ目の長さ、分布密度、方向性、透水量係数などの統計量に基づき、100 通りのパターンを確率論的に発生させて、それぞれで地下水流動解析を行った。
- ・ 地下水流動解析結果から解析領域全体を対象として算出した平均透水係数を指標として、層別サン

プリングにより 10 個の割れ目ネットワークを抽出し、それぞれについて三次元の物質移行解析を実施した。

- そのうえで、10 ケースの三次元の物質移行解析により得られるモデル下流端における破過曲線の平均値を図 1 下段に示すような一次元のマルチチャンネルモデルで近似して、三次元の物質移行特性を表現可能な一次元の核種移行解析モデルを開発した。これにより、安全評価シナリオに基づくさまざまな解析ケースに対する計算を、設計とニアフィールド母岩の特徴をできるだけ忠実に考慮に入れて柔軟かつ効率的に進めることが可能となっている。

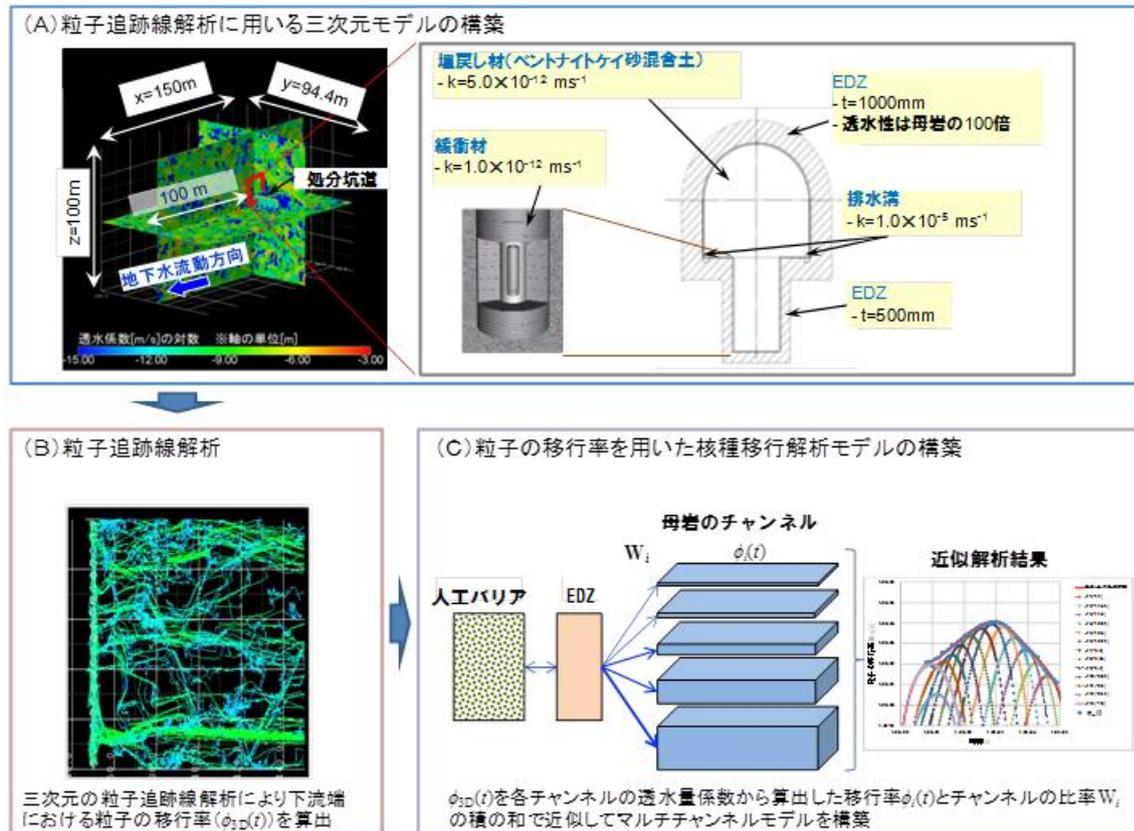


図 1 処分場の施設設計を反映した三次元モデルを用いた粒子追跡線解析に基づく核種移行解析モデルの構築

5. データセット

核種移行解析に必要な主要なパラメータは、人工バリア各要素および母岩のそれぞれにおける透水性、間隙率、核種の溶解度、拡散係数、吸着分配係数などである。また、これらを設定するためには、地下水水質や、緩衝材や母岩の長期的な変質を考慮した人工バリア各要素および母岩の「場の状態」を明らかにする必要がある。このような場の状態や核種移行解析などの安全評価解析に必要な一連のパラメータの設定値を総称して、ここではデータセットと呼ぶ。データセットの設定値によって、核種移行解析から求まる線量計算結果は大きく影響されるため、セーフティケースの技術的信頼性を確保するためには、どのような科学的知見や情報に基づいて数値を決定したかについて妥当性のある説明が極めて重要となる。サイトが特定された以降は、当該サイトで採取する岩石や地下水を用いた試験等によってデータを取得することも可能であるが、サイトが特定されていない現段階では、公開されている既存のデータベースや文献情報をもとに、今回の検討対象母岩の地質環境特性に対応すると考えられるデータを設定しつつ、地質環境条件に合致した情報・データがない場合は、設定条件を明確にしたうえで推定等により設定した。

基本シナリオおよび変動シナリオのデータセットの設定に関しては、人工バリア内の間隙水組成や元素の溶解度の計算、変質解析などに用いる熱力学データや、元素の吸着分配係数や拡散係数の設定に関するデータについて、最新のデータベースや文献情報を用いて設定した。

このうち地下水水質のデータセットは、溶解度、拡散係数、吸着分配係数の設定に大きく影響する。わが国の地下水は、天水起源の地下水から沿岸部の地下水または化石海水まで、塩分濃度が低～高まで幅広く存在することから、検討対象とした3つの岩種に対して、それぞれ低塩分濃度と高塩分濃度の2種類の地下水組成を設定し、各岩種の核種移行パラメータを設定することとした。ここで、地下水のモデル水質の設定に用いた地下水データは、JAEAが整備した温泉地化学データベースや深地層の研究施設などで実施された採水調査などのデータから、深度300 m以深において掘削水の影響や地下水中に溶存しているCO₂の脱ガスに配慮して慎重に採水された品質の高いデータを抽出している（「(2) 地層処分に適した地質環境の選定とモデル化」参照）。

線量への換算係数を評価する生活圏モデルについては、特定のサイトが明らかになっていないことから、「第2次取りまとめ」^[2]や「第2次 TRU レポート」^[5]で用いられた特定のサイトに依存しない生活圏モデルを用いた。ただし、核種の移行係数や、地表環境にかかわる地下水流量や灌漑水量などの統計データについては、ICRPの勧告やわが国で公表されている最新の統計情報に基づき更新を行っている。

6. 線量評価解析

各シナリオ区分に属するシナリオに対して、3種類の検討対象母岩と対応する処分場の設計仕様毎に核種移行解析を実施し、生活圏の評価を実施して被ばく線量を計算した結果、いずれもめやすを下回ることを確認した。このことから、サイト選定で想定される母岩に対して構築された地層処分システムにより安全性を確保できる見通しを示すことができたと考えられる。なお、高レベル放射性廃棄物処分の堅置き・ブロック方式と横置き・PEM方式では、線量の評価結果にほとんど差がなく、放射性核種の閉じ込め性能という観点では定置方式による違いはほとんどないことがわかった。

7. まとめと包括的技術報告書公表後の技術開発の取り組み

閉鎖後長期の安全評価を行うためのシナリオ構築、モデルおよびデータの設定、線量評価解析にいたる一連の手法を整備しており、これらを適用して安全評価を行った結果、深成岩類、新第三紀堆積岩類、および先新第三紀堆積岩類を対象として設計した処分場は、閉鎖後長期にわたって安全性を確保できる見通しがあることを確認した。また、整備した安全評価のモデルやデータセットは、特に文献調査の段階ではサイトスペシフィックな文献情報を加味しつつ直接的に適用できるものであるということが出来る。

包括的技術報告書公表後は、シナリオ構築に必要な知識基盤や現象解析モデルについて、原位置や室内試験、ナチュラルアナログ等により拡充・高度化するとともに、シナリオの発生可能性をより定量的に取扱うことが可能な方法へ高度化を図る。核種移行モデルに関しては、原位置または室内試験等により母岩中における核種の移行に係る諸現象の知見を拡充することによってその妥当性を確認して信頼性の向上を図るとともに、その現象間の相互作用を直接反映することや適用可能な空間スケールの拡張などによって高度化を図る。データセットに関しては、核種移行解析に用いるデータの拡充およびその設定手法について、原位置や室内試験やナチュラルアナログ等により拡充する。特に、沿岸域や高炭酸環境などの多様な地質環境を想定した安全評価解析の信頼性向上を図るため、これらを対象とした核種移行パラメータ設定に要するデータの拡充を図る。

8. NUMO セーフティケースの総括

NUMO セーフティケースでは、地層処分にとって適切な地質環境が長期間安定に継続するサイトを特定するための技術を整備し、その場所の地質環境情報を地質環境モデルとして統合することができること、サイト選定において検討対象になると考えられる母岩を3つの類型として示したこと、これら3つの岩種について長期的な安全機能を満足する処分場を設計できる技術が存在していること、これらの地質環境モデルや処分場の仕様の特徴を反映して、処分場閉鎖前及び閉鎖後長期にわたる安全評価を行うことが可能であり、その結果は国際機関や諸外国の規制等を参考にした安全基準を満たすことなどを示した。これにより、「第2次取りまとめ」や「第2次 TRU レポート」に比して、現時点における最新の科学技術的知見を反映し、より現実的な技術として、わが国においても安全に地層処分を実現できることを提示するとともに今後のサイト選定の進展に即応する準備を整えることができたといえる。

また、セーフティケースの構築を通じて技術課題を抽出したことにより、これを中期的な技術開発計画に反映し、地層処分の技術的な信頼性の一層の向上に向けて、関連機関と連携しながら技術開発を進めていくための基礎が作られた。

参考文献

- [1] ICRP (1999) : Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste, Publication 81.
- [2] 核燃料サイクル開発機構 (1999) : 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 ー地層処分研究開発第2次取りまとめー, JNC TN1400 99-020~99-023.
- [3] IAEA (2012) : The Safety Case and Safety Assessment for Radioactive Waste, Specific Safety Guide, No.SSG-23.
- [4] OECD/NEA (2009) : Considering timescales in the post-closure safety of geological disposal of radioactive waste, NEA No.6424.
- [5] 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 (2005) : TRU 廃棄物処分技術検討書ー第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめー, JNC TY1400-2005-013, FEPC TRU-TRU2-2005-02.

*Kiyoshi Fujisaki, Susumu Kurosawa, Sanae Shibutani, Keisuke Ishida, Takahumi Hamamoto, Manabu Inagaki, Katsuhiko Ishiguro and Hiroyuki Umeki
Nuclear Waste Management Organization of Japan