総合講演・報告 3　原子力発電環境整備機構（NUMO）[バックエンド部会共催]

地層処分セーフティケース

Development of Safety Case for geological disposal

*藤山哲雄，*太田久仁雄，*鈴木　覚，*藤﨑　淳，出口　朗，梅木博之
原子力発電環境整備機構（NUMO）

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震ならびに東京電力福島第一原子力発電所事故の発生等を踏まえ，「第２次取りまとめ」[1]により示されたわが国における地層処分の技術的信頼性を再評価することが求められている。一方，国が科学的有望地を示す方針[2]が決定されたことで，処分地選定が新たな局面を迎えつつあり，サイト選定の進展に即応可能な技術の整備状況を示すことは，以前にも増して重要となっている。これらを踏まえ，NUMO では，国際機関（OECD/NEA 等）が提示する指針[3]等を参照しつつ，セーフティケース*の開発を進めている（以下，「NUMO セーフティケース」という）。本報告では，その概要を報告する。

※セーフティケースとは，科学技術的な論拠と証拠を尽くして処分場の安全性が確かなものであることを説明する一連の文書のこと

2. セーフティケース構築の考え方とアプローチ

わが国では現時点で調査サイトや候補母岩が特定されていない。「第２次取りまとめ」では，わが国の地層処分概念を一般的に検討し，その成立性が概括的に論じられた。NUMO セーフティケースは，文献調査段階以降に候補サイトを対象に作成・更新していくセーフティケースの雛型となることを意図しており，実際のサイト調査の段階で行う作業を念頭に置き，最新の科学的知見や技術を反映することはもちろん，事業を進めていくなかで想定される現実的な技術的制約条件などへの対応を具体的に提示することに留意した。

セーフティケースの開発にあたっては，深地層の研究施設などの研究開発成果を含むわが国の地質環境に対する最新の理解に基づき，サイト選定において想定される幅広い地質環境を類型化して候補母岩の現実的な地質環境モデルを作成し，これらに対して処分場の設計から安全評価までの一連の作業を行うことにより，地層処分を実施するための技術的な方法論が整っていること，および処分場の閉鎖前と閉鎖後において安全性を確保できる見通しがあることを示している。併せて，地層処分の信頼性向上に向けた今後の技術開発課題を明らかにしている。

具体的には，わが国の実際のデータに基づき，処分場内に存在する小規模な断層・亀裂といった地質環境の特徴をモデル化し，これに合わせた地下施設レイアウトの設計や，その特徴をできるだけ忠実に表現したモデルによる性能評価の実施など，実際のサイトの相互比較や選定作業，処分場設計の最適化などを視野に入れた技術を例示して，その技術的信頼性を論じるというアプローチを採用している。

3. 地質環境の安定性と深部特性の評価

NUMO は，文献調査，概要調査，精密調査を通じて取得した地質環境情報に基づき，処分場の設計から安全評価にいたる一連の作業を行うことにより，地層処分の観点から好ましい地質環境の特性や条件が長期にわたり維持される「安定な地質環境」を特定する。このプロセスにおいては，調査の詳細度を段階的に高めつつ，法定要件に基づき整備する考慮事項[4]や，国の審議会により示された「地質環境の長期安定性への影響要因に関するサイト調査の方針」[5]などに照らして，地質環境の安全機能を損なう可能性のあ

る自然現象による著しい影響を回避する。さらに，その影響を回避したサイトにおいて，地質環境の特性や条件の時間的・空間的変遷を把握し，その変化の幅を考慮に入れても処分場の安全機能が維持できる安定な地質環境であることを確認する。NUMO セーフティケースでは，最新の科学的知見や技術開発成果などを取りまとめ, 多様な地質環境に適用可能な, 安定な地質環境を適切に選定するための考え方や方法論，調査・評価技術などを体系的に整備した。

また，サイト選定において現実的に想定される幅広い地質環境を処分場の設計および安全評価の観点から類型化し，候補母岩として想定される岩種として深成岩類，新第三紀堆積岩類，先新第三紀堆積岩類を取り上げた。この三岩種について，サイト選定プロセスにおける処分場の設計および安全評価との連携を考慮に入れつつ，段階ごとに質および量が異なる複数の分野にわたる地質環境情報を整合的に解釈し，処分場の設計および安全評価の基盤となる候補母岩の現実的な地質環境モデルとして統合した。さらに，安定な地質環境を確認するための安全評価に必要となる，将来における自然現象の発生可能性とその影響にかかわる科学的知見を取りまとめた。

さらに，技術的信頼性のより一層の向上に関して今後取り組むべき技術課題として，地質環境の調査・評価技術の高度化，サイト調査をより効率的・効果的に進めるための技術的知識や経験の蓄積などを提示した。

4. 地層処分システムの設計と工学的実現性

地層処分事業においては，サイト選定の進展に応じて地質環境特性に関する情報が段階的に詳細化される。このため，処分場の候補母岩となる岩種の特徴を考慮し，人工バリア材料の開発成果といったその時点の最新の科学技術的知見を適宜反映して，処分場の設計を柔軟に行う準備を整えておくことが，処分場の実現可能性と安全確保の観点から重要である。NUMO は，閉鎖前および閉鎖後長期の安全性，工学的成立性，回収可能性，経済的合理性などの要求事項を満たすための設計要件を設定し，これを基軸とした体系的な設計の方法論を構築している[6]。NUMO セーフティケースでは,「第２次取りまとめ」,「第 2 次 TRU レポート」[7]で提示された処分概念を出発点として，候補母岩として想定される三つの岩種分類の地質環境モデルを対象に，整備した設計の方法論を適用し，所要の安全機能を有する処分場の設計を試行するとともに，処分場の建設・操業・閉鎖に必要となる工学技術の実用性の提示や閉鎖前の安全性の評価を行っている。

高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリアは，オーバーパックと緩衝材により構成される。「第２次取りまとめ」以降に得られた炭素鋼の腐食試験，放射線影響評価，緩衝材の塩水条件における膨潤性などの最新のデータに基づいて，人工バリアの仕様が余裕をもって設定されていること，および，降水系地下水だけでなく，塩水系地下水の環境にも適用可能であることなどを確認した。また，TRU 廃棄物処分場についても，操業中の閉じ込めを確保するため，廃棄体パッケージ容器の仕様をあらたに設定するとともに，緩衝材を設置する廃棄体グループの見直しも行った。

人工バリアの施工技術についても，最新の技術開発成果に基づいて，実用的な方法と関連する要素技術の適用性について示した。高レベル放射性廃棄物処分場では，従来の竪置き・ブロック方式に加え，横置き・PEM 方式について操業方法を示した。横置き・PEM 方式は，地上施設にてオーバーパックと緩衝材を鋼製容器内に一体化して地下に搬送する方式であるため，竪置き・ブロック方式に比べて，人工バリア構築の品質管理が容易であるとともに，処分坑道内における定置作業の効率化や坑道面積の縮小化が図れること，および坑道内の湧水や滴水などの環境に対する適用性が高いといった特徴がある。TRU 廃棄物処分場については，構造躯体の仕切り板の施工手順とその際の作業員に対する放射線防護を勘案して，従来検討されていたフォークリフトによる定置方式から，構造躯体の上部を走行する天井クレーンによる定置方

式に変更するなど，安全性と工学的成立性の両面から操業方法を見直した。また，地下施設レイアウトについては，地下に分布する断層への対処の観点から，処分区画のレイアウトを決定する過程を試行的に示すとともに，建設・操業が同時並行で進められることを想定して，一般労働安全の観点から換気経路や作業動線が合理的に確保できることなどを示した。このように，これまで整備してきた技術に基づいて，わが国で想定される地質環境において所要の安全機能を有する処分場を設計できることを示した。

また，今後取り組むべき技術課題として，人工バリア材料の設計・製作に関する信頼性向上や，建設・操業技術の実証試験に向けた準備などを提示した。

5. 地層処分システムの安全性の評価

処分場閉鎖後の安全性の評価では，候補サイトの地質環境とそれに応じて設計された処分施設の特徴を踏まえ，さまざまな不確実性に対処しつつ，処分場が長期間にわたって期待される機能を発揮し安全性を確保できることを予測的に確認することが必要である。NUMO セーフティケースでは，考慮すべき不確実性を，合理性を持って取り扱うための考え方や方法を構築することとした。このため，システムの安全機能に影響を与えると考えられる自然事象の発生の可能性を考慮して安全評価シナリオを作成・分類するというリスク論的な考え方に基づく手法を開発した。また将来の人間活動の影響に関する人為事象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様式化の方法を検討した。

性能評価モデルについては，地質環境条件や処分場設計の特徴をできるだけ忠実に反映することが可能な解析手法の整備を進めた。具体的には，ニアフィールドスケール（人工バリアとニアフィールド母岩を含む数百メートル×数百メートル×数百メートルの空間スケール）における人工バリアの形状や母岩中の亀裂の空間的な分布を表現した三次元物質移行解析を行い，これを複数のチャンネルを有する一次元の核種移行解析モデルに反映する手法を開発した。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た。また評価に用いる核種移行データは，最新の JAEA データベースを利用して，各岩種に対応するデータを抽出・分析したうえで設定した。

開発した方法論を用いて，設計した地層処分システムを対象とした安全評価を行った。地層処分に関する規制基準は今後整備されるため，安全性の目安となる線量の基準は，国際機関や諸外国の規制基準を参考に設定した[8]。これらの線量基準に対し安全評価を行った結果，所要の安全性が確保されることを確認した。

また，今後取り組むべき技術課題として，シナリオ構築やモデル構築技術の高度化，核種移行解析に関するデータベース拡充など，安全評価技術の信頼性向上に向けた課題を提示した。

6. おわりに

NUMO セーフティケースでは，安定な地質環境を適切に特定するための技術を整備していること，サイト選定で想定される候補母岩を代表する三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こと，これらの地質環境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，現時点における最新の科学技術的知見に照らして，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考えている。今後は，セーフティケースの構築を通じて抽出された技術課題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。

参考文献

[1] 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 －地層処分研究開発第２次取りまとめ－

[2] 経済産業省（2015）：特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（平成 27 年 5 月 22 日閣議決定）

[3] OECD/NEA（2013）：The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories，OECD/Nuclear Energy Agency

[4] NUMO（2009）：概要調査地区選定上の考慮事項．放射性廃棄物の地層処分事業について，分冊－2.

[5] 総合資源エネルギー調査会（2014）：最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価－地質環境特性および地質環境の長期安定性について．平成 26 月 5 月，地層処分技術 WG.

[6] NUMO (2004)：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性，NUMO-TR-04-01.

[7] 電事連・JNC（2005）：TRU 廃棄物処分技術検討書－第２次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－，JNC TY1400-2005-013，FEPC TRU-TRU2-2005-02.

[8] 例えば，ICRP（2013）：Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publication 122, Annals of the ICRP, Vol.42, No.3.

---

*Tetsuo Fujiyama, *Kunio Ota, *Satoru Suzuki, *Kiyoshi Fujisaki, Akira Deguchi and Hiroyuki Umeki

Nuclear Waste Management Organization of Japan