

長期間を対象とした高レベル放射性廃棄物の管理における バリデーション・性能担保の考え方

梅木博之*1

高レベル放射性廃棄物の管理 (management) における特徴的な点は、管理の最終目標である処分 (disposal) について安全性を考慮する期間が数万年を超える極めて長期に及ぶことである。このための対策が地下深部の安定な地質環境を利用した受動的な安全系である地層処分システムを構築することである。地層処分システムによって安全性が確保されることは、最新の科学技術的知識に基づく様々な論拠を統合して作成されるセーフティケースによって説明される。セーフティケースの信頼性 (confidence) に重要なことはシステムの長期的なふるまいに関する様々な不確実性の取り扱いである。本稿ではこうした不確実性への対処について概観し、特にセーフティケースの中核となる安全評価に用いるモデルや計算コードの開発戦略について検証 (verification) や確認 (validation) という観点から論ずる。

Keywords: 高レベル放射性廃棄物, セーフティケース, 安全評価, ベリフィケーションとバリデーション, 信頼構築

A specific feature of the management of high-level radioactive waste is that the time to consider the safety of disposal, which is the ultimate goal of the management, is extremely long, exceeding tens of thousands of years. For this purpose, a geological disposal system, which is a passive safety system that utilises the stable geological environment deep underground, is developed. The long-term safety of the geological disposal system is ensured by providing a safety case through the integration of related evidences and arguments based on the state-of-the-art scientific and technical knowledge. In building confidence of a safety case, it is essential to manage uncertainties associated with the long-term behaviour of the system are managed. This paper overviews the uncertainty management, focusing on the development of models and calculation codes used for safety assessment, which is a key element of the safety case, especially from the perspective of verification and validation.

Keywords: High-level waste, Safety case, Safety assessment, Verification and validation, Confidence building

1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の管理 (management) における特徴的な点は、管理の最終目標である処分 (disposal) について安全性を考慮する期間が数万年を超える極めて長期に及ぶことである。こうした長期間に対して人間の監視に基づく安全確保の方法が機能することを保証するのは困難であり、地下深部の安定な地質環境を利用した受動的な安全系である地層処分システムを構築することが最も現実的で実施可能な対策と考えられている。

地層処分システムは、地下に設置する人工的に設計されたバリアと地質環境及び人間の生活圏を含む不均質で広大な空間領域と長期の時間領域を対象とするシステムであり、これを実際に試作しその安全機能をシステム全体にわたって確認するという、通常の工学システムに適用されるような直接的な方法をとることはできない。

このため、適切な地質環境を選定し、選定した地質環境に適合した処分場を設計することによって構築される地層処分システムの安全性を、安全評価によって確認するという方法によって、処分場の操業時と閉鎖後の長期安全性が確保される。

2 長期安全性に関する不確実性への対処

構築した地層処分システムの長期的なふるまいについての理解には、科学技術的知識や不均質で広大な地質環境の特性に関する調査上の制約などから、不可避免的に不確実性

が伴う。こうした不確実性への対処は地層処分システムの信頼性 (confidence) を高めるうえで本質的な問題である。

2.1 地層処分システム構築の基本的アプローチ

地層処分では、安全確保の基本的な概念[例えば、1])である「隔離」と「閉じ込め」を実現することによって、処分場の建設から操業・閉鎖を経て閉鎖後の長期にわたり、処分する放射性廃棄物の潜在的危険性から人間と環境を保護することが求められる。このため、処分場の閉鎖前には放射性廃棄物を取り扱ううえで放射線に対する安全対策が必要である。併せて、地上施設に対する地震、津波、火砕物密度流、地すべりなど、また、地下施設における切羽崩壊、山はね、異常出水、有害ガス突出、火災などといった事象を要因とする放射線防護上あるいはその他の重大な災害の発生によるリスクに対する作業従事者や周辺住民を防護するための安全対策を考慮する必要がある。さらに、サイトの調査から処分場の建設・操業・閉鎖までの間、施設周辺の一般公衆や環境に悪影響を及ぼさないように環境保全対策を講ずる必要がある。

最終的に処分場を埋め戻して閉鎖することにより、地下深部が本来的に有する安定的な性質を利用するとともに、その不確実性への対処という観点も含め、安全機能をより高めるための工学的な対策 (人工バリア) を施すことによって多重バリアシステムを構築して「隔離」と「閉じ込め」という安全機能を実現するように処分場を設計する。これにより、人間が監視を行わなくても処分した放射性廃棄物が長期間にわたって人間や環境に許容できない影響を及ぼすことのないよう、自律的に安全を確保する。

処分場を設置するサイトは、地質環境の調査・評価によって処分場閉鎖前の安全対策、及び閉鎖後の長期安全性を確保するうえで好ましい特性を有するよう選定する。調査や評価によって明らかにされるサイトの特性とその不確実性を考慮して、所要の安全機能を備えるように処分場を

Validation and performance assurance approach to long-term management of high-level waste by Hiroyuki UMEKI (humeeki@numo.or.jp)

*1 原子力発電環境整備機構

Nuclear Waste Management Organization of Japan

〒108-0014 東京都港区芝4丁目1番23号三田NNビル

本稿は、日本原子力学会 2023 年秋の大会バックエンド部企画セッションにおける講演内容に加筆したものである。

設計する。設計した処分場に対し不確実性を考慮して安全評価を行い、処分場閉鎖前及び閉鎖後の長期間において安全機能に影響を与える可能性のある様々な事象が発生することを想定しても、その影響が規制基準に照らして許容できる範囲に収まることを確認する。

このようにサイトの地質環境の調査・評価、処分場の設計、安全性の評価という一連の作業を通じた安全性の確認を、段階的に進める事業のなかで繰り返し実施することで安全性に関する不確実性を低減しその信頼性をより確かなものとしていく。

適切なサイト選定、地質環境に適合した処分場の設計、地層処分システムの安全評価の作業は相互に連携しながら、地質環境に関する情報や利用可能な科学技術的知識とそれらに伴う不確実性を考慮しつつ実施され、様々な要件に適合するように、技術的に実現可能で安全性を確保した地層処分システムの開発を行う (Fig.1 [2])。

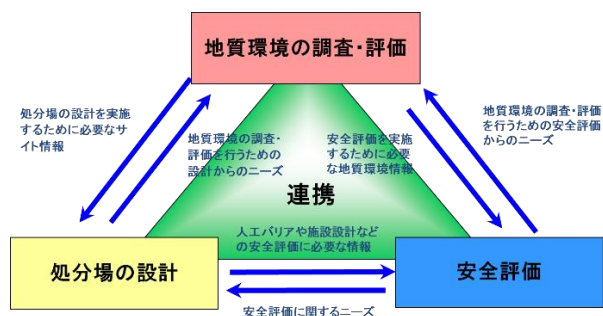


Fig.1 Coupling of site characterisation, repository design and safety assessment [2]

2.2 セーフティケースの作成

処分場の安全性を説明するためにセーフティケースが作成される。セーフティケースは、地層処分計画の実施責任を負う主体が科学技術的な論拠や証拠を尽くして処分施設の安全性を説明する文書である。セーフティケースは処分施設の建設、操業から閉鎖にいたる閉鎖前の段階と閉鎖後長期間の安全性の両者を包含する。

2.2.1 セーフティケースの性格と目的

閉鎖後の地層処分システムは開放系 (open system) であり、システムの長期的なふるまいの評価には、境界条件、空間的不均質性、科学的知識などに関する不確実性によって様々な制約が伴う。こうした不確実性に対処するため、安全評価においては、考慮すべきシステムのふるまいを記述したシナリオの作成、これに沿って地層処分システムによる放射線学的影響を定量的に算出することを目的とする一連の数理モデルの作成と解析に必要な境界条件やデータセットの設定が行われる。

安全評価の信頼性を高めるために、安全評価に用いるモデルやデータの検証 (verification) や確認 (validation) がどうあるべきかについて、1990年代半ばまで、INTRAVAL[例えば, 3]など国際プロジェクトとして盛んに研究開発が進められた。しかし、安全評価で考慮すべき時間スケールや地層処分システムの空間スケールと地質環境が有する不均質性から、安全評価モデルの確認を実験結果に基づいて直

接的な意味で行うことは困難であること、またモデルによる予測に伴う不確実性をなくすことは本質的に不可能であるということから、意思決定において重要となるのは、安全評価の結果自体よりも地層処分の安全性に対する信頼 (confidence) 構築であるとの認識に至っている[4]。

このことは安全評価の信頼性 (reliability) に依存した安全確保の考え方から、安全評価だけでなくあらゆる論拠や証拠をそろえ、また処分の実施組織や意思決定過程自体の在り方も含めた包括的な概念として安全確保とその信頼構築を捉える必要があることを意味している。セーフティケースはこうした考え方の転換から生まれたものである[5]。

セーフティケースには、処分場の閉鎖前及び閉鎖後の長期間における安全性を確保するために、どのように候補サイトを調査・評価し、どのような工学的対策を施してシステムを構築するか、そのシステムが安全に機能することをどのように安全評価によって確認するか、といった地層処分計画における安全性に関わるすべての側面が記述される。事業が段階的に進められるなかで、セーフティケースは、サイトの調査、処分施設の設計や安全評価を通じて繰り返し作成され、その時点で得られている地質環境情報や研究開発の成果、科学技術の進歩など最新の科学技術的知識に基づいて地層処分場の安全性を確認しつつ、その信頼度を恒常的に高めていくものである。この観点から、セーフティケースには、その段階における地層処分場の安全性とその信頼性ととも、残された不確実性と次段階における対処が示される。これによって、各段階におけるセーフティケースは、地層処分計画を次の段階に進めるための重要な判断材料となる。

セーフティケースの別の重要な側面は、事業の進展に応じてステークホルダーの関心事や懸念に柔軟に 대응していくことを可能とする点である。このため、様々なステークホルダーがコミュニケーションを行う際、共通の土台としての役割を果たすものと期待されることから、セーフティケースはステークホルダーが理解しやすいよう提示されることにも留意する必要がある。

2.2.2 セーフティケースの構造

セーフティケースの一般的な構成は、Fig.2 のように示されている[5]。

構築される地層処分システムの安全機能の確保は、多様な証拠 (地質学的知識、工学システムの実証試験、解析評価の結果など) やそれらに基づく論拠を明示することによって、第一義的には注意深いサイト選定やサイトの条件に応じた設計を通じて行われる。こうして確保される安全機能は、その裏付けとなる証拠や論拠とともにこれらに伴う不確実性を考慮し、安全評価によって確認される。サイトの調査に基づく地質環境情報とこれに適合した処分場の設計によって構築される地層処分システムの明確化とそれに対する安全評価の実施という一連のプロセスはセーフティケースとして統合され、その信頼性を論じたうえで対象とする地層処分システムの安全性が説明される。

閉鎖前の段階では、建設や操業による影響をモニタリングによって監視しながら、必要に応じてフィードバックし、これらの作業プロセスを適宜は正しながら安全を確保する

ことが可能である。閉鎖後も一定期間のモニタリングは可能であるものの、対象とする長期にわたる時間スケールに対しては地層処分システムのふるまいを表現する数理モデルを用いた予測的解析に基づく安全評価が重要な役割を果たす。安全評価のための予測解析には不確実性が伴い、セーフティケースの信頼性を高めるため、ナチュラルアナログや補完的安全指標等を用いた多面的な証拠に基づく論拠が補強される。

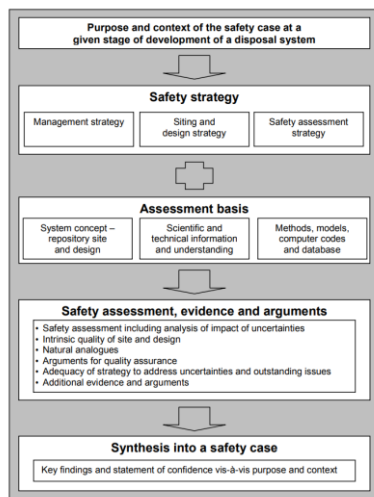


Fig.2 An overview of the relationship between the different elements of a safety case [5]

2.2.3 セーフティケース作成のための情報統合

サイト調査の進捗に応じて、得られる情報の種類、質、量、及びその結果として得られる地層処分システムを構成する地質環境の理解度は繰り返し評価され、地質環境モデル (SDM: site descriptive model) として統合される。このような理解を次の調査段階の計画にフィードバックすることにより、地質環境の特性とその時間的な変化に関連する不確実性を徐々に低減していく。地質環境の時間の経過に伴う進化を捉える定量的 SDM (“4D” SDM) は、そのような理解を視覚化し、地質環境に関する異なる分野の専門家間や非専門家とのコミュニケーションに有効である。

SDM に基づき閉鎖前及び閉鎖後に必要となる安全機能を備えた処分場を設計するためには、

- 人工バリアや地上/地下施設など、処分場構成要素の安全機能の設計要件を導くための詳細な廃棄物インベントリ
- 設計要件を満足し、サイトの条件に応じて柔軟に各構成要素の仕様を決定するための方法論
- 処分場の建設・操業・閉鎖のための実証された技術の存在、あるいは進行中の技術開発に基づき合理的に期待することが可能な技術の可用性に関する論拠

といった情報の統合やそのための方法論が必要である。

処分場の個々の構成要素に対する設計要件は、「設計因子」[2]に基づいて特定される。設計因子には、閉鎖前及び閉鎖後の安全性に加え、工学的な実用性、回収の容易さ、環境への影響、社会経済的側面などが含まれる。特定された設

計要件に対し、構成要素の詳細な仕様（材質、形状、寸法など）が導出される。

処分場設計の柔軟性を高めるために、処分概念のバリエーションとその実装に関連する技術が検討され、これらは立地環境に対する処分場の設計の最適化を進めるための基盤を提供する。

地質環境情報を統合した SDM とそれに基づいて開発された地層処分システムは、処分場の建設・操業・閉鎖のプロセスとともに、安全評価の基礎を形成する。国際的に合意された放射線学的影響を評価するための方法論[6]には次のタスクが含まれ、これらによって SDM や設計仕様に関する情報が統合される。

- 安全機能に影響を与える処分システムの特徴 (feature)、事象 (event) 及びプロセス (process) (これらを総称して FEP という) の体系的な検討によるシナリオのセットの明確化
- それぞれのシナリオに対するモデル解析によって処分場閉鎖前及び閉鎖後における放射線影響を定量的に把握し、所定の安全基準や目標を満たしているかどうかを評価

3 処分場閉鎖後の長期安全評価モデルの開発と V&V

安全評価で用いる数値解析モデルの開発にあたっては、セーフティケースの対象となる地層処分システムを規定する SDM や処分場の設計仕様を導出するための多様で複雑な情報統合の過程やそれらに伴う不確実性を考慮することが必要である。また、地層処分システムは、1 m 程度の高レベル放射性廃棄物ガラス固化体 (以下、ガラス固化体) から数十 km 程度の地質圏にわたる幅広い空間スケールと不均質性を有する要素から構成されていることや、地層処分システムの安全性を評価する期間が数万年以上と長期にわたることに留意する必要がある。

3.1 階層構造に基づくモデル開発戦略とアプローチ

安全評価に用いる数値解析モデルの技術的信頼性 (reliability) を確保するための基本要件として、「広く認められた原理・法則、観察事実や実験結果、最新の科学的知見を適切に反映すること」と同時に、「地層処分システムに関わる様々な不確実性 (SDM や設計における情報統合過程、空間的不均質性、時間変遷に関する知識の限界などに起因する不確実性) に対応して合理的に保守性を付与すること」が挙げられる。

対象とする幅広い空間スケールと長期にわたる時間スケールに対し、これらの要件に対応するため、処分場閉鎖後の安全評価では、現象解析モデル (Process-level model) とシステム評価モデル (System-level model) という二つの階層で関連づけた数値解析モデルを用いるという考え方[6]が示されている (Fig.3)。

現象解析モデルは、地層処分システムを構成するサブシステムを対象として、そのふるまいや核種移行の挙動を最新の科学的知見に基づき現実的に表現した数値解析モデルである。このモデルは、サブシステムの性能を規定する主

要なパラメータやプロセス、これらに関する重要な不確実性を抽出するために使用される。近年の科学的知識量の増加と計算機能力の向上に伴い、様々な連成現象や廃棄体定置後の過渡期における現象などについて、より複雑な連成解析が可能となりつつある[6]。

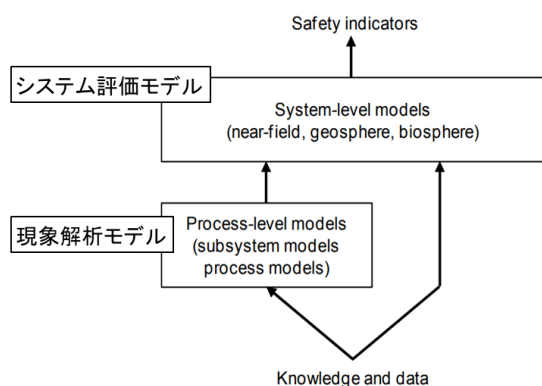


Fig.3 Hierarchy of models used in a safety assessment (revised from Figure 6.1 in [6])

システム評価モデルは、現象解析モデルを用いた解析で抽出された各サブモデルの性能を規定する主要なプロセスやパラメータを合理的な保守性を確保しつつ簡略化して作成され、地層処分システム全体の性能を対象とする全時間・空間スケールに対して評価するための数値解析モデルである。このモデルでは、例えば、廃棄体から地下水へ溶出した核種が人工バリアや母岩、地質圏を経て生活圏に到達し、人間に摂取されるという地下水シナリオに沿って被ばく線量を算出し、地層処分システム全体の性能が評価される。

Fig.4 は現象解析モデルとシステム評価モデルの関係性を示した一例である。

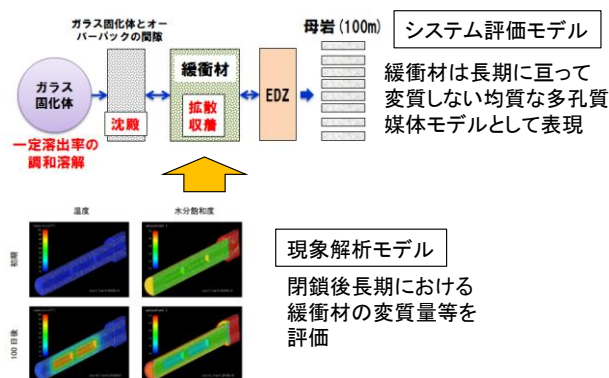


Fig.4 An example on the use of process-level model analysis ([7]) for structuring the system-level model

この例では、ガラス固化体周辺の処分場構成要素を忠実に表現した三次元の幾何学モデルを対象として、この領域に生じる連成現象を反映した数値解析モデル（現象解析モデル）により、緩衝材の長期変遷が解析される。この解析結果から、長期にわたり緩衝材の変質量やその位置が極めて限定的で緩衝材の機能は維持されると結論づけられ、ガ

ラス固化体から溶出した核種の生活圏までの物質移動現象を扱う核種移行解析モデルとして設定されたシステム評価モデルにおいては、緩衝材を評価期間にわたって変質を伴わない多孔質媒体モデルとして表現している。

これらの二階層のモデルが対象とする時間的・空間的領域は、ニアフィールドスケール（処分坑道周辺の 100 m 四方程度の領域）における設計の最適化などの解析の目的と必要な精度、新たな科学的発見や並列計算などの計算技術による科学技術の進歩や利用可能な計算機資源の変化といった観点から柔軟に取り扱うが必要である。例えば、限定的な領域の性能を評価したい場合は、現象解析モデルを直接システム評価モデルとして取り扱うことも可能である。

現象解析モデルの開発は、その性格から科学的知見を適切に反映したものとなるようにする必要がある。このためには、地層処分システムで生じる現象に関して、地層処分の分野も含め様々な分野で広く利用された実績を有し、すでに信頼性が確保された数値解析モデルを導入することが重要である。これらの分析と適用性の確認の後、必要に応じて、最新の科学的知見に基づき、地質環境やそれに適合して設計した処分場の特徴をより現実的に評価可能となるよう、既存の数値解析モデルの改良や新しい解析モデルの開発を行う。

システム評価モデルの開発では、現象解析モデルを参照しつつ、簡略化のプロセスが安全評価上の保守主義に立って合理的に行われていることを、追跡性と透明性をもって明確に示すことが重要である。

3.2 Verification (検証) と Validation (確証) (V&V)

安全評価で用いる数理モデルは、NEA や IAEA などの文書に一般的基準や指針[例えば、8]として示されているように、正当化 (justification), 検証 (verification), 確証 (validation) というプロセスを経て作成される必要がある。これによって、科学的知識が正しく反映されているか、数理モデルに対応する計算コードは正しく解を導出するか、数理モデルは現象を適切に表現しているか、といった点を確認し、安全評価が信頼のおける (reliable) ものであることを示すことが求められる。地層処分の安全評価モデルについては、既に述べたように、科学的知識の限界や利用可能な情報の制約（実験における時間・空間スケールの制約など）から直接的な意味での確証を行うことは困難であり、安全評価を行ううえでモデルに十分な保守性を考慮して不確実性に対処しているかどうか重要となる。

地層処分における V&V については、前節で述べた現象解析モデルとシステム評価モデルの階層構造によるモデル開発戦略の中で、セーフティケースの信頼構築という観点から新たに体系化を行う必要があると考えられる。

4 おわりに-安全性に関する信頼構築

地層処分の安全性に関する信頼構築には、長い事業期間を通じて科学的知識や技術の進化をセーフティケースに反映する必要がある。安全評価に用いる数理モデルや計算コ

ードもこうした進歩を柔軟に受け入れて更新していく構造的な仕組みの構築と、不確実性を低減するための継続的研究開発が不可欠である。この観点から、セーフティケースに関連する多様で膨大な量の情報を取り扱うための知識マネジメントの役割は極めて重要である。

謝辞

本稿の作成にあたっては、原子力発電環境整備機構の石田圭輔博士から多くのご支援をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- [1] IAEA: Disposal of radioactive waste. Specific Safety Requirements, IAEA Safety Standards Series No. SSR-5 (2011).
- [2] 原子力発電環境整備機構: 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—。NUMO-TR-20-03, 原子力発電環境整備機構 (2021).
- [3] Larsson, A. et al. ed.: The international INTRAVAL project. To study validation of geosphere transport models for performance assessment of nuclear waste disposal. Phase 2 Summary report, The Coordinating Group of the INTRAVAL Project, Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI) and OECD Nuclear Energy Agency (1995).
- [4] OECD NEA: Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories, Its development and communication. OECD Nuclear Energy Agency, No. 1809 (1999).
- [5] OECD NEA: The nature and purpose of the post-closure safety cases for geological repositories - "Safety Case Brochure 2012". OECD Nuclear Energy Agency, NEA/RWM/R(2013)1 (2013).
- [6] OECD NEA: Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste - Outcomes of the NEA MeSA Initiative. OECD Nuclear Energy Agency, ISBN 978-92-64-99190-3 (2012).
- [7] 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構, 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 30 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業ニアフィールドシステム評価確証技術開発. (2019).
- [8] IAEA: IAEA safety glossary - Terminology used in nuclear safety and radiation protection 2018 Edition. IAEA (2019).