報告

可逆性を担保する回収可能性に関する技術的対応と 性能評価に向けた工学技術の役割 ～(2)より確からしい性能評価に向けた工学技術の役割～

原子力環境整備促進・資金管理センター 江守 稔

2019年12月に開催された原子力環境整備促進・資金管理センター(以下、「原環センター」という。)の研究発表会において標題の観点から取りまとめて紹介された調査研究成果を2回に分けて報告する。本稿では第2回として、副題の性能評価の実施に向けた工学技術の役割を扱う。

原環センターでは資源エネルギー庁委託事業の一環として、地層処分事業における製造・施工技術に係る品質保証体系やモニタリング技術の整備に取り組んでいる。閉鎖後長期の安全性の確保が求められる地層処分施設を対象とした品質保証体系の構築という工学的な取組の具体化に向けて、相互に関連する品質保証、モニタリングならびに性能確認などの取組を、施設の最終閉鎖の判断に資する取組(セーフティケース開発におけるより確からしい性能評価の実施に資する取組)と位置付けて整理し、今後の研究開発の方向性について考察した¹⁾。

I. はじめに

隔離、閉じ込め、多重安全機能ならびに受動的手法といった地層処分が有する安全確保の概念が国際的に共有されていること、また、長期に及ぶ処分事業の実施過程において地層処分の信頼性を段階的に向上させるという技術的な観点等から事業を段階的に進めることが提案されていることを第1回目で紹介した。このような地層処分の概念や特徴を踏まえれば、閉鎖後の長期安全性は人の能動的な管理に依存しないものとなるが、その反面、閉鎖に至るまでの作業段階における人工バリア等の製作・施工に係る品質の確保や状態把握のためのモニタリングといった工学的な取組が重要となる。

これらの取組に関する先行的な検討や共同研究などが諸外国でも精力的に進められているものの、地質環境や処分概念(地下施設の構成等)の違いや各国の規制制度の違いに加え、品質保証やモニタリングという用語が幅広い取組を想像させることもあり、個々の用語ならびに取組の範囲や役割など、その捉え方に課題も見受けられる。そのような状況を踏まえ、諸外国の検討事例などを概観しつつ、品質保証やモニタリングの考え方や役割の整理を試みた。そのうえで、わが国の地層処分施設の製造・施工に係る品質保証体系の整備・構築に向けた技術的対応の考え方や研究開発の方向性について考察した。

II. 地層処分施設の安全性の示し方

品質保証などの工学技術の役割を考察するうえで、これらの取組で得られる情報が、どの様に処分場の安全性などの評価に反映されるのかを理解しておく必要がある。地層処分施設の安全性を立証するための知見や論拠等を体系化・構造化するための手法として、「セーフティケース」と称される手法が開発されている。

1. 段階的な進め方とセーフティケース開発

セーフティケース開発に関する考え方の整理に向けた議論が1990年代より国際機関によって進められてきた¹⁾。その開発の目的や特徴ならびに役割は表1のように要約整理できる^{2, 3)}。表内の「処分事業の主要な節目」とは、研究開発や概念・戦略決定ならびにサイト選定段階などを含む「作業前段階」、施設の最終閉鎖までの「作業段階」ならびに「閉鎖後段階(閉鎖後に一定の管理期間が含まれる場合がある)」の各節目および各段階に含まれるステップを指す³⁾。現在のわが国の制度で例えると、特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律が定める段階的な調査ステップの節目ならびに核原料物質、核燃料物質および原子炉の規制に関する法律が定める各種の段階的な許認可手続きや定期安全レビューなどがこれらの主なステップと考えることができる。

Technical approach associated with the adoption of reversibility and retrievability, and the role of engineering in contributing to performance evaluation (2); Role of engineering in contributing to performance evaluation: Minoru Emori.

(2020年3月10日 受理)

¹⁾ 国際機関の主導のもとで1990年代より着手された検討を経て、その概念(構成や要素の定義を含む)や開発の方法論などが経済協力開発機構/原子力機関(OECD/NEA)や国際原子力機関(IAEA)によって取りまとめられている^{2, 3)}。

表1 セーフティケース開発の目的・特徴と役割

セーフティケース開発の目的・特徴
セーフティケースとは、処分場が安全であるという主張を、定量化し立証するための根拠、解析、論拠等を統合したものであり、処分事業の主要な節目に整備され、段階を追って逐次更新され、成熟してゆくものである。具体的には、 ○閉鎖後の処分システムの挙動と性能の理解の実証のために、構造化された追跡可能で透明性のある方法で関連する情報を統合する、 ○処分施設が人の健康と環境を防護するように機能するという合理的な保証を提供することにより、その安全を実証する、更に、 ○処分システムの挙動と性能に関する不確実性を特定し、その重要性を解析し、重要な不確実性の管理のためのアプローチを特定する。
セーフティケースの役割
セーフティケース開発(各節目における段階的なセーフティケースの整備)によって、上記に加えて、次のような役割が期待されている。 ○処分施設の開発の段階的なアプローチにおける重要な各節目における意思決定を支援する。 ○処分に関連する課題やテーマについて、規制当局や利害関係者間のコミュニケーションを促進する。

表2 主要国の技術報告書(取りまとめ)の例

国 (発行者)	技術報告書の名称等	種別
フィンランド (Posiva 社)	2012/TURVA-2012, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiloto, Synthesis	許認可申請 (付属書)
スウェーデン (SKB 社)	2011/SR-Site, Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project	許認可申請 (付属書)
米国 (DOE)	2008/Yucca Mountain Repository License Application Safety Analysis Report	許認可申請 (付属書)
フランス (ANDRA)	2005/Dossier 2005 Argile SYNTHESES, Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation	研究成果報告書
スイス (Nagra)	2002/Project Opalinus Clay Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent	研究成果報告書
ベルギー (ONDRAF)	2001/SAFIR2 Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2	研究成果報告書
英国 (NDA)	2010/gDSSC 2010, Geological Disposal, An overview of the generic Disposal System Safety Case	研究成果報告書

2. セーフティケースの構造と性能評価の役割

前述のセーフティケース開発の概念を踏まえると、表2に示す諸外国の主要な技術報告書(取りまとめ)は、各国の事業の節目におけるセーフティケースと位置付けることができる。国際機関の取りまとめや諸外国の先行検討事例などを概観すると、セーフティケースは概ね次の

表3 セーフティケースの主要な項目に関する目的や役割に関する分析

構成要素名	目的・役割
処分場の設計 DESCRIPTION OF THE DISPOSAL SYSTEM (DESIGN)	○処分場の構成要素や施設展開方法を定義 ○閉鎖後長期の安全性が確保できるように、処分場の各構成要素に対して安全機能や性能要件・目標を設定し、設計要件・設計仕様へと展開
処分システムの性能評価 PERFORMANCE ASSESSMENT	○地質環境を含む処分システムの構成要素に関する短～長期の変遷挙動(状態変化や機能変化)について分析・評価を実施(要件や性能目標の達成を確認) ○性能評価をととして、処分システムの変遷に関する基本シナリオを具体化(同シナリオに対する要件や性能目標の達成を確認)、併せて、 ○発生確率の低い事象や許容可能な不確実性を特定
安全評価 SAFETY ASSESSMENT	○性能評価結果を踏まえ、安全規制が要求する安全評価方法(統合/分解アプローチなど)に従い、安全性を示すための指標や基準(リスク基準/線量基準など)を満たすことを示す ○安全規制の要求事項や性能評価結果(核種移行パラメータの変遷を含むシステムの機能変化など)を踏まえ、安全評価としてのシナリオ分類や核種移行パラメータの設定などが検討される、併せて、 ○不確実性の特定およびその管理方法が検討される

注)参考資料4)に示された解説等を参照して原環センターで分析・整理。

ような項目、①サイトの地質環境、②処分場の設計、③処分システムの性能評価、④シナリオ開発、⑤安全評価を包含している。これらの主要な構成要素の目的や役割は表3のように整理できる。

工学的な取組である処分場の設計手法に関する一例として、フィンランドのPosiva 社が示している要件管理システムを用いた設計手順を図1に示す。上位の法規制で規定される要件等から処分場構成要素に関する個々の設計仕様に至るまで、要件を階層的に展開・管理するのである⁴⁾。要件や仕様の展開・設定の適切性が表3に示す「処分システムの性能評価」を通して評価され、線量基準等の規制要件などへの適合性が「安全評価」で確認されることとなる。

表3に整理したように、性能評価は人工バリアおよび天然バリアの双方の状態や機能の変遷挙動を評価するものである(図2)。フィンランドのように、地質環境を含む処分システムの短期～長期的な変遷挙動を「処分システムの性能評価」と題して安全評価とは別に展開してい

図1 Posiva社の要件管理に基づく処分場の設計手順

図2 性能評価の実施期間と評価対象の概念

図3 Posiva社のセーフティケースの構成

（出典）参考資料4）の情報を図式化。右上図は、資源エネルギー庁発行「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について2019年度版」のP39の図より転載

る例（図3）もあれば、これを「変遷挙動」と題して扱う例もある。例えば、フランス（Dossier 2005）では「地層処分場の現象論的変遷」、スイス（Project Opalinus Clay）では「システムの変遷」と題して処分システムの変遷挙動に関する評価結果を取りまとめている。

Ⅲ. 品質保証やモニタリングの役割

1. 最終閉鎖判断に資する取組としての考え方

諸外国における先行的な検討を通して、「品質保証」や「モニタリング」ならびにそれらを包含した「性能確認」といったプログラムの概念が検討・具体化されつつある（以下、これらを総じて「一連のプログラム」と称す）。モニタリングについては、事業期間中の安全確保に関連するものを含めて（例えば放射線安全、一般労働安全、周辺環境保全など）、多様な目的や意図に応じた活動を想定し得るが、ここでは地層処分事業に特徴的な取組となる「閉鎖後長期の安全確保」に関連するものを指す。

例えば、米国の規制文書では、これら一連のプログラムを表4のように規定している。また、これらに関する国際共同研究も進められておりⁱⁱ、このような諸外国の検討事例を概観すると、一連のプログラムは、必ずしも原位置での直接/間接測定などのモニタリングだけで達成するのではなく、品質保証や別の場所での事前の実験や実証など、多様な取組を組み合わせることで達成することが窺える。

表4 米国の規制文書における品質保証や性能確認に関する規定（抜粋要約）

サブパートG：品質保証（以下「範囲」より）
○地層処分場およびその構造物、システムまたは構成要素が、実際の使用において満足のゆく性能を発揮する点について適切な確信を得るために必要な、あらゆる計画的および系統立った措置。
○品質保証には品質管理が含まれ、この品質管理は材料、構造物、構成要素またはシステムの物理的な特徴に関連する品質保証措置で、材料、構造物、構成要素またはシステムの品質が予め規定された要件に適合したものとなるように管理する手段・措置で構成される。

サブパートF：性能確認プログラム（以下「一般的な要件」より）

○以下の判断に資するための情報を提供する（「§ 63.131より」）
・建設・操業期間中に得られる地下環境（および環境の変化）が、許認可審査で想定された限度内に収まっているか。
・閉鎖後長期にわたりバリア機能の発揮が期待される天然/人工バリアが、意図および予測された機能を果たしているか。
○性能確認プログラムは、サイト特性調査中に開始され、最終閉鎖段階まで継続されなければならない。
○性能確認プログラムには、要求されるデータを入手する上で適切と考えられる原位置モニタリング、室内試験およびフィールド試験、原位置実験が含まれなければならない。

注）上表は、米国NRC規則（10 CFR Part 63）より抜粋要約したもの。

ⁱⁱ 欧州委員会による研究フレームワークの一環として実施された、MoDeRnプロジェクト（2009～2013年）やModern2020プロジェクト（2015～2019年）など。詳細は同プロジェクトのポータルサイト（<http://www.modern2020.eu/>）を参照されたい。

2. セーフティケースへの反映の考え方

標記を考えるうえで、事業進展に伴いアップデートされるセーフティケースの構成要素の1つである性能評価と一連のプログラムとの関係を整理する。

(1) サイト選定段階における性能評価

操業前段階(建設前の段階)では、地下環境等に関する情報は限定的なものとなる。また、人工バリアを含む地下構成要素の施工も行われていないことから、実際の施工品質(施工実績)は得られていない。ゆえに、この段階における性能評価は、地下環境等に関する限定的な情報や設計ベースでの地下構成要素の施工品質(設計仕様あるいは施工仕様)を前提として、モデルや解析等を主体とした状態予測やシミュレーションによって処分システムの性能評価が行われる。

(2) 建設・操業～閉鎖段階における性能評価

建設・操業段階では、その進展に応じて、地下環境等に関する情報が拡充・詳細化され、地下構成要素の施工品質は施工実績として得ることができる。従前の性能評価の一部を、本段階を通して得られる情報に置き換えることで、より確からしい性能評価を実施することができる。ゆえに、一連のプログラムは、より確からしい性能評価の入力情報を提供するための取組と整理することができる。つまり、図2に示した段階的なセーフティケース開発における性能評価は、一連のプログラムを通して、より確からしい評価とすることができる(図4)。具体的には、これらの運用を通して、次のような情報が拡充・詳細化されることが期待される。

- 地下構成要素の施工品質を施工実績として把握(他の類似環境での事前確認や実証を含む)
- 原位置における地下環境や施工した構造物の変遷挙動に関する、より確からしい予測評価に資するための情報を取得(原位置モニタリングならびに事前の実験や実証によるデータや知見の拡充など)
- 地下活動の進展に応じて地下環境等に関する詳細な情報を把握

図4 一連のプログラムの役割に関する概念

IV. 一連のプログラムの具体化に向けた技術的対応(研究開発)の考え方

地層処分の候補サイトが具体化した後は、適用する処分場の概念や設計が具体化され、併せて「一連のプログラム」が事業許可申請段階までに開発整備されることとなる。これらの円滑な整備に向けた今後の検討の出発点として、当面の技術的な対応や研究開発の進め方について考察・提案する。

1. 工学的観点からの技術的対応の考え方

今後、わが国に適用可能な一連のプログラムを具体化していくうえで、「品質保証プログラム」と「性能確認プログラム」の2つを切り分けて考える。これらに関する適切な用語や定義が必要となるが、ここではその一案として表5のように整理する。

モニタリングについては、広範な意味や取組を包含するため、何を対象として何を取得するためのものか、表5に示す2つのプログラムのサブ・プログラムとして位置付ける可能性にも留意して、注意深く検討を進めていく必要がある。

より確からしい性能評価に資するという目的を踏まえれば、性能確認プログラムの対象は人工バリアを含む地下構成要素および母岩(ニアフィールド)の双方であり、また、閉鎖後の長期にわたる性能評価に資するものとなるべきであるが、まずは今後の検討や研究開発の出発点として、工学技術(設計、製造・施工)の観点から取り組むべき当面の範囲を次のように提案する(図5)。

○地下の人工構造物を対象

○長期にわたる性能評価のうち再冠水に至るまでの期間を念頭(図2を参照)

前者については、人工構造物の変遷挙動に影響する母岩側(ニアフィールドの地下環境)との関係に留意が必要である。後者については、建設・操業～閉鎖に伴う擾乱を経て再冠水に至った段階における処分システムの状態

表5 品質保証や性能確認プログラム等の定義の例

品質保証プログラム

人工構造物を対象として、一定の施工品質(仕様)を確保するための取組。製造・施工プロセス管理によって達成するものもあれば、施工物の現物検査などによって品質を確認することもある。

性能確認プログラム

構築した処分システムの変遷挙動に関する、より確からしい評価(性能評価)に資するための情報を取得するための取組。品質保証プログラムをとおして得られた構造物の初期の施工品質(製造・施工実績)に加え、その後の人工構造物の変遷挙動に関する確からしい予測評価のための情報を取得する。性能確認プログラムの対象には、人工構造物と母岩(ニアフィールド領域+α)の双方が含まれ、それらの変遷挙動の把握のために、原位置でのモニタリングが行われることもある。

図5 当面の工学的な対応や研究の対象とする範囲

をより確からしく予測評価し、その後の長期にわたる性能評価の初期条件として引き渡すことで、より確からしい性能評価の実施に寄与することを目標とする。

2. プログラムの具体化の方向性と留意点

諸外国における先行的な検討や他分野の事例などを踏まえると、一定の施工品質を確保するための品質保証プログラムを具体化するための参考事例は多く存在する。例えば、近年の一般産業界では、従来の現物確認を伴う「品質規定方式」から、一定の品質レベルの達成が実証された工法で品質を確保する「工法規定方式」への転換が図られつつある。他方、性能確認プログラムは、地層処分に固有の取組であり、その具体化に向けて表6に示す2つのアプローチ(技術的対応や研究開発の方向性)を想定し得る。

地層処分分野におけるこれまでの研究開発は、主に方向性1に注力されてきたと推察するが、何をどこまで開発すべきか際限が見えないといった状況も窺える。方向性2では、原位置での測定機器等の導入を伴う取組を最小化することで、機械化・自動化の促進、費用の合理化ならびに閉鎖後管理活動の最小化など、将来の事業実施において多くのメリットを想定し得る。

一方で、2つの方向性には図6に示すようなトレードオフの関係が生じ得る可能性が想定され、また現時点において、いずれの方向にも技術的な制約や課題も存在する。このようなプログラムを最終化する段階では、実施主体や規制当局などの関係者が、トレードオフのバランスならびに技術的な実現性や制約を踏まえて、2つの方

図6 具体化の方向性とトレードオフの関係

図7 品質保証プログラムの概念化の検討例

向性のいずれかの選択、あるいは両者の相互補完による中間点を模索して、「現実的なプログラム」を調整する必要があることが諸外国の検討動向などから窺える。

3. 研究開発の進め方

前述した特徴を有する品質保証や性能確認プログラムの具体化に向けた研究開発の目的は、適用技術の実現性や制約を示し、現実的なプログラムの最終化に向けた検討や調整を支援することである。当面の研究開発における最初のステップでは、これらに関する理想的なプログラムのイメージを関係者間で共有できるレベルに概念化し、その実現における技術課題を抽出することと考える。

概念化に向けて、例えば、材料調達、地上施設での製造、地下への搬送・施工といったプロセスを対象として構成される「品質保証プログラム」については、他分野における類似のプロセス管理手法や、北欧や米国で整備された地層処分事業に特化した具体的なプログラムなどを先行事例として参照することで概念化が可能である(図7に埋め戻し材の吹き付け施工を例題とした概念化の検討例を示す)。「性能確認プログラム」のうち、方向性1については、特定の処分坑道に多くの測定機器を配置するようなプログラムを検討しているフランスや米国の検討事例が、方向性2については、模擬環境での事前の試験に相当するフィンランドの実証試験の取組事例などを参考にすることができるⁱⁱⁱ。ただし、これらの諸外国の事例を参照する際には、各国特有の地下環境や処分概念の違いに加え、プログラムに対する要求事項(規制要件

表6 具体化に向けた2つのアプローチ(方向性)

	プログラム具体化の方向性	研究開発の指向性
方向性1	処分場原位置での測定やモニタリングを主体としてプログラムを具体化	原位置測定・モニタリング技術の高度化を指向
	モニタリング技術の高度化⇒地下原位置で必要な測定が可能⇒状態予測技術の役割は小	
方向性2	模擬した環境(別の場所)での試験等を主体としてプログラムを具体化	原位置測定・モニタリングに係る活動を最小化した取組の開発を指向
	状態予測技術の高度化⇒原位置の状態・機能の変遷の予測が可能⇒原位置測定・モニタリングの役割は小	

など)や成立条件の違いにも留意が必要である。

V. おわりに

本稿では、原環センター研究発表会での報告内容を原著となった資源エネルギー庁委託事業「平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業(地層処分施設閉鎖技術確証試験)」の成果¹⁾の一部で補完しつつ紹介した。紙面の都合から本稿での報告は限定的となったが、委託事業の全体成果は参考資料 1)に取りまとめているので参照されたい。

－ 参考資料 －

- 1) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業(地層処分施設閉鎖技術確証試験) 報告書, 2020.
- 2) OECD/NEA, “The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories”, 2013.
- 3) IAEA, Safety Standards Series, Specific Safety Guide No. SSG-23, “The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste”, International Atomic Energy Agency, 2012.
- 4) Posiva, POSIVA 2012-12, “Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Synthesis 2012”, 2012.

著者紹介

江守 稔(えもり・みのる)

本誌, 62[6], p.25(2020)参照.

From Editors 編集委員会からのお知らせ

－ 最近の編集委員会の話題より －

(6月2日 第12回 論文誌編集幹事会)

- ・4月16日から5月15日までに英文論文誌に19報の新規投稿があった。
- ・英訳公表事業の出版に関する理事会の了承が得られたことが報告された。
- ・英訳公表事業の進捗状況が報告された。Vol.3の翻訳が進行中である。
- ・各グループの2019年度の活動報告と2020年度の活動方針が示された。
- ・若手編集委員からの英文誌の現状に対する意見聴取結果の概要が報告された。
- ・英文論文審査・査読要領の改訂案を検討した。
- ・各分野別責任者から状況報告があった。
- ・今後の委員会、幹事会等の進め方について意見交換した。

(6月2日 第9回 学会誌編集幹事会)

- ・「福島原発事故から10年」企画の進捗状況について報告があった。コロナ対応についても言及を依頼することも検討中。
- ・来年度編集委員体制と特集号発行に伴う委員増員について改めて説明があった。
- ・巻頭言、時論の提案状況を確認した。
- ・核燃料部会より連載講座の提案書が提出され、内容が審議された。来年から連載開始の予定。
- ・zoomを使用した座談会などの提案が出された。今後前向きに検討していく。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>

ⁱⁱⁱ フィンランドのPosiva社では、資材供給から施工までの操業作業の実証や処分システムの初期の変遷挙動に係る情報取得を目的として、2016年よりわが国の精密調査施設での活動に相当する原位置実規模実証試験に着手している。