連載
講座

放射性廃棄物概論

施設の運転および廃止措置により
発生する放射性廃棄物の対策

第7回 地層処分システムの安全評価

日本原子力研究開発機構 柴田 雅博, 亀井 玄人

I. はじめに

地層処分の対象となる高レベル放射性廃棄物の特徴は、放射性核種の濃度が高く、かつ長寿命の放射性核種も含まれていることである。その処分方針は30～50年間貯蔵冷却した後、安定な地下深部(地下300m以深)に搬入・埋設し、廃棄物の周りに人工的に設けられる複数の障壁(人工バリア)とこれらを長期にわたって固定する働きを備えた天然の地層(天然バリア)とを組み合わせた多重バリアシステム(地層処分システム)によって物理的に生活環境から隔離し、その中の放射性核種からの放射線が人間とその生活環境に影響を及ぼさないようにすることを基本としている¹⁾。(地層処分システムの構成や機能等については、本連載講座第1回「放射性廃棄物対策の概要」及び第5回「放射性廃棄物の処分」を参照)

そのような地層処分システムの安全性を長期にわたって確保するためには、適切な地質環境を有する処分地を選定し、そこに人工バリアや処分施設を適切に設計・施工するとともに、処分事業の各段階でそれぞれの安全確保対策の妥当性について確認すること(安全評価)が必要である。

II. 安全評価の目的と考慮すべき特徴

地層処分システムの安全評価の目的は、処分場が設置されるサイトの地質環境や、安全確保のために施される工学的対策を条件とし、人に健康影響を及ぼす可能性のある種々の現象を考慮して設定したシナリオに基づいて行った評価結果を、予め定められた放射線防護上の基準

等と比較して安全性を確認することである。この安全評価は、対象とする領域が処分場から人間の生活環境に至るまでの広範なものであることと、核種の寿命ゆえに対象期間が長いことが特徴である。坑道掘削や廃棄物の埋設といった処分場の操業の期間については、常に事業者等の管理下に置かれることから、一般労働安全の考え方や通常の原子力施設における放射線管理の方法に準拠して安全の確保が可能であろう。

このような管理期間が過ぎれば、処分坑道も埋め戻され、閉鎖されることとなる。閉鎖後の地層処分システムは、制度的管理など人の関与なしに、長期の安全性確保が期待できる、いわば受動的な安全システム(Passive Safety System)でなければならない。そして、そのようなシステムの安全評価を行うにあたっては、試作品を実際に作動させてその安全性を実証するという直接的な方法をとることができないので、予測解析的な方法によることとなる。

III. 安全評価の一般的方法

閉鎖後長期の安全評価とは、シナリオ、シナリオを表現する数学モデル及びモデルに必要となるデータを用いて将来のシステム挙動を評価することである²⁾。ここでシナリオとは、放射性廃棄物が人間と環境に及ぼす放射線影響を評価する観点から、閉鎖直後の地層処分システムの状態を基点として、長時間のうちにその状態を変化させる可能性のある一連の現象を想定し、これらを組み合わせた地層処分システムの長期挙動とそれに応じた核種の挙動を描いたものである。シナリオには自然過程を介して人間の生活に影響を及ぼすシナリオと、人為過程を介するシナリオとがある³⁾。安全評価ではシナリオ設定に続き、シナリオに従ってシステムの長期的な挙動と核種の移行挙動を定量的に評価するために、物理・化学法則や実験結果等に基づいたモデルの開発と必要なデータの整備が行われる。次に、モデルとデータを用いた解析を行って放射線影響を推定し、この結果を安全規制の

Introduction to Radioactive Waste – Management of Radioactive Waste from Operation and Decommissioning of Nuclear and Other Facilities (7) : Safety assessment of Geological Disposal System : Masahiro SHIBATA, Gento KAMEI.

(2014年8月29日 受理)

■前回タイトル

第6回 わが国の地質環境

指針や基準等と比較して安全性を評価する。このような一連の安全評価手順を第1図に示す。

IV. シナリオ開発

シナリオ開発においては、システムの安全性を損なうような重大なシナリオが抜け落ちなく抽出されていることが重要となる。その開発のためには、第1図のようにシステムの挙動に関する情報として場の性質 (Feature)、事象 (Event) 及びプロセス (Process) (以上をまとめ、頭文字をとって FEP と呼ぶ) を抽出、整理し、個々の FEP の内容とともに FEP の相互関係について記述がなされる。OECD/NEA は国際 FEP リストを作成し、各国のプロジェクトにおける個々の FEP の記述とともにこれらをデータベース化⁴⁾、また、各国の FEP の整備や利用状況について情報収集と分析を進め、同リストの見直しを行っている⁵⁾。

近年、シナリオ開発については、より効率的に行う方法として、期待されるシステムの安全機能に視点を置き、安全機能に影響を及ぼす可能性の高いプロセスや条件に特に留意する手法や、これと従来からの FEP に基づく手法とを組み合わせる手法が主流となってきている⁶⁾。

安全評価を効率的に行うためには、シナリオの適切な分類が不可欠である。一例を挙げれば、核燃料サイクル開発機構⁷⁾は、シナリオを、①地下水によって放射性核種が処分場から人間の生活圏に運ばれることを想定した“地下水移行シナリオ”と、②放射性廃棄物と人との物理的距離が接近することに伴う影響を想定した“接近シナリオ”に大別した。“地下水移行シナリオ”は、処分場が地下水面に設置されることが想定されるような場合においては安全評価上、最も重要である。また、同報告書⁷⁾では、地下水移行シナリオはさらに分割され、現在の地質環境条件が将来まで安定に継続し、システムの安全機能が期待通りに発揮されることを想定したシナリオを“基本シナリオ”、他方、天然現象や将来の人間活動による影響を考慮するシナリオは“変動シナリオ”として定義された。

近年の各国の性能評価では、発生の可能性を考慮したシナリオ分類が進められている⁶⁾。すなわち、発生することの蓋然性が高いシナリオを“基本シナリオ”としている。日本においても、原子力安全委員会³⁾は、安全評

価における不確実性の扱い方として、国際放射線防護委員会 (ICRP)⁸⁾の提案に基づき、シナリオの発生可能性を勘案したリスク論的考え方が有効であるとしている。

また、このほかの分類として、“What-if シナリオ”がある。これは、合理的には想定しにくい現象や状況を取って設定することにより、処分システムのロバスト性や性能限界を確認することを目的としている^{6,9)}。

V. 安全評価モデル

安全評価の次の段階として、シナリオに基づき、安全評価モデルが必要となる。評価モデルの開発は、概念モデルの開発、数学モデルと計算プログラムの開発、検証 (Verification)、確証 (Validation) というステップを繰り返して行われる⁶⁾。概念モデルとは、シナリオにおいて考慮すべき主要なプロセスや相互作用を、現象の科学的理解に基づいて説明する定性的な記述である。概念モデルについては、これを数学的に定式化し (数学モデルの作成)、計算プログラムが作成される。この計算プログラムが数学モデルを数値的に正しく解いていることを確かめることが検証であり、具体的には解析解との比較やベンチマーク計算等によって行われる。また、確証とは、モデルが実際の現象を正しく表現できていることを示すことであり、モデルによる解析結果を実験や現地調査の結果と比較することにより行われる。しかし評価において速度論モデルで扱われるプロセスの中にはきわめて遅い反応もある (例えば還元条件下での金属製廃棄物容器の腐食やガラス固化体の溶解等)。このような場合には、これらの評価に用いる速度論モデルの確証のためにナチュラアナログ (処分後に想定される現象に類似していると考えられる天然現象) の事例を利用する場合もある。一例を挙げれば、炭素鋼製廃棄物容器 (オーバーパック) の腐食挙動評価モデルの長期適用性が、数

第2図 ナチュラアナログにより炭素鋼製廃棄物容器の腐食挙動評価モデルの長期適用性が確認された事例 (谷口, 他¹⁰⁾より転載)

第3図 地下水移行シナリオに基づく安全評価モデルでのプロセスと必要となるデータの例

百年以上にわたって遺跡に埋没していた鉄製遺物の腐食調査結果との比較により確認されている(第2図)¹⁰⁾。

第3図には、地下水移行に基づいた安全評価モデルで取り扱われているプロセスと、そこで必要となるデータの例を示している⁷⁾。

VI. データベース整備

安全評価モデルを用いた解析には、モデルに対応した様々なデータが必要である。

ガラス固化体の溶解に伴う核種(元素)の放出において、その溶解度は、熱力学に基づく平衡計算により、溶液の化学組成に応じて設定される。このために、対象元素の固相と溶存化学種の熱力学データが必要となる。熱力学データの整備の重要性は国際的にも認識され、OECD/NEAは1984年より熱化学データベース(TDB)プロジェクトとして、元素ごとに科学的に信頼性の高い熱力学データの選定を進めている(<http://www.oecd-neo.org/dbtdb/>)。日本では、原子力機構が元素の網羅性の観点から対象元素を拡大し、OECD/NEAのデータベースも参照しつつ、データの品質を確認して熱力学データベースを整備している¹¹⁾。緩衝材と岩石を対象とした収着分配係数、拡散係数については、既報の実測値が収着データベース¹²⁾及び拡散データベース¹³⁾として整備されている。この整備の過程では、個別のデータごとに、実験条件等、情報の十分性、実験方法・条件の適切性等の観点からデータの信頼度評価が行われている¹²⁾。

これらのデータベースは、原子力機構のウェブサイトで公開されている(<https://migrationdb.jaea.go.jp/>)。

VII. 安全指標と防護基準

地層処分システムに対する安全評価モデルによる解析の結果は、適切に設定された指標と比較される。人への放射線影響を示す指標は、線量やリスクである。

第4図は核燃料サイクル開発機構⁷⁾による評価事例

(40,000本のガラス固化体を対象)である。

ICRPは、放射線防護の観点から、放射性廃棄物の処分に関する勧告を行っており、ICRP Pub. 81⁸⁾において、自然過程(個人の被ばくに至る人間侵入以外のすべての過程)に対して、線量拘束値として、0.3mSv/年を勧告し、これは 10^{-5} /年のオーダーのリスク拘束値に相当するとしている。この基準は、IAEAの安全要件(SSR-5)¹⁴⁾においても踏襲されている。一方、諸外国の規制当局が示している放射線影響についての安全基準については、それぞれの考え方に依存するものの、いずれもICRPが示している拘束値よりも低い線量やリスクが設定されている。

指標と評価期間について、日本では、「一般公衆に対する評価線量が最大となる時期においても、あらかじめ基準値として定められた放射線防護レベルを超えていないこと等を確認することが基本」とされている¹⁾。評価期間については、スウェーデンでは少なくとも10万年、または氷期1サイクルに当たる期間を含み、最大でも100万年としているが¹⁵⁾、同時に、時間とともに不確実性が増加するという、地層処分システムの安全評価の特徴を考慮して、安全基準の設定において、時間枠の考え方を導入し、処分場閉鎖後の1,000年までとそれ以降で異なる評価の考え方あるいは指標を適用している¹⁵⁾。同様に、フィンランドにおいても十分に予測可能な期間(少

第4図 線量を指標とした地層処分の安全評価事例 (核燃料サイクル開発機構⁷⁾を一部改変)

第1表 フィンランドの安全指針(YVL D. 5¹⁶⁾)における被ばく線量及び放射性核種の放出率の拘束値(経済産業省資源エネルギー庁¹⁷⁾より引用)

十分予測可能な期間(少なくとも数千年間)において人間の被ばくする可能性のある線量	
公衆の中で最も被ばくした人の1年間あたりの実効線量	0.1mSv 未満
ほかの大きな集団の公衆に対する平均の1年間あたりの実効線量	0.1mSv の 1/100~1/10 以下
数千年後に使用済み燃料から放出され、環境に移行すると予想される放射性核種の長期間にわたる平均値	
処分から生じる放射線影響	最大でも地殻内の自然の放射性物質から生じるものに相当する程度
放射性核種別の環境に放出される1年間あたりの量	個別の規制値以下で、かつ各核種の放出量/規制値の比率の合計が1以下

なくとも数千年間)とそれ以降の期間で、異なる指標を適用している(第1表)¹⁶⁾。なお、両国とも対象廃棄物は使用済み燃料である。

このほか、環境への影響評価として人間以外の生物種への放射線影響についての議論も行われている¹⁸⁾。

VIII. セーフティケースと安全評価

地層処分システムの長期安全性の信頼性を高めるためには、単に安全評価の結果だけでなく、「セーフティケース」の提示が重要であると考えられている^{14, 19)}。セーフティケースとは、さまざまな証拠、解析、論拠等に基づいて地層処分システムが長期的に安全であることを体系的に説明するものである。セーフティケースの中での安全評価(Safety Assessment)の位置づけはOECD/NEA¹⁹⁾により、第5図のように示されている。

セーフティケースは処分事業者が事業の種々の段階で作成するものとされており、事業の進展に伴って更新され、精緻化が進んでいく。セーフティケースにはその作成段階における不確実性と、それが安全性に及ぼす影響、及びその対応策についても示すものとされている¹⁴⁾。セーフティケースの役割は、多様なステークホルダー間に対話のプラットフォームを提供し、段階的に進められる地層処分計画の意思決定の材料となるものである^{19, 20)}。

IX. おわりに

本稿では地層処分システムの安全評価の一般的方法論とそれに沿った国際動向などを解説した。安全評価は、地層処分システムの将来のさまざまな状況を考慮したとしても、適切なレベルの安全性が達成されているかを推

第5図 セーフティケースの構成と安全評価の位置づけ¹⁹⁾

し量るための手法であり、また、セーフティケースの中でも、その役割は重要である。一方、安全評価には、単に地層処分システムの安全性を示すのみならず、システムの長期安全性をより確実なものとするため、サイト調査、処分システムの設計等に対する要求事項の提示や取り組むべき研究開発課題の抽出など、地層処分プログラム全体を統括していく上でも重要な役割がある。

処分事業の長期性を考慮すれば、安全評価の技術について、科学的理解の進展、計算機技術の発展、蓄積される関連データなどの最新の情報を踏まえて、見直し、改良を継続的に進める必要がある。

日本原子力研究開発機構の若杉圭一郎氏及び匿名の査読者より原稿について貴重な意見をいただいた。謝意を表す。

— 参考資料 —

- 1) 原子力安全委員会, “高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第1次報告)” (2000).
- 2) OECD/NEA, “Disposal of Radioactive Waste: Review of Safety Assessment Methods”, (1991).
- 3) 原子力安全委員会, “放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について”, (2004).
- 4) OECD/NEA, “Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste, An International Database”, (2000).
- 5) OECD/NEA, “Updating the NEA International FEP List, An

- Integration Group for the Safety Case (IGSC) Technical Note”, (2014).
- 6) OECD/NEA, “Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Outcomes of the NEA MeSA Initiative”, (2012).
- 7) 核燃料サイクル開発機構, “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-, 分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, (1999).
- 8) ICRP, “Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste”, ICRP Publication 81, (1999).
- 9) 原子力発電環境整備機構, “地層処分事業の安全確保(2010年度版)”, NUMO-TR-11-01 (2010).
- 10) 谷口, 他, “低酸素濃度下での模擬地下水の飽和した圧縮ベントナイト中における炭素鋼の腐食挙動”, 材料と環境, Vol. 59, pp.418-429 (2010).
- 11) Kitamura, et al., “Update of JAEA-TDB: Update of Thermodynamic Data for Palladium and Tin, Refinement of Thermodynamic data for Protactinium, and Preparation of PHREEQC Database for Use of the Brønsted-Guggenheim-Scatchard Model”, JAEA-Data/Code 2014-009, (2014).
- 12) Tachi, et al., “Development of JAEA Sorption Database (JAEA-SDB): Update of Data Evaluation Functions and Sorption/QA Data”, JAEA-Data/Code 2010-031, (2011).
- 13) 栃木, 他, “緩衝材及び岩石中での核種の拡散データベースの整備”, JAEA-Data/Code 2008-035, (2009).
- 14) IAEA, “Disposal of Radioactive Waste”, SSR-5, (2011).
- 15) SSMFS, “The Swedish Radiation Safety Authority’s Regulations concerning the Protection of Human Health and the Environment in connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste”, SSMFS 2008:37, (2009).
- 16) STUK, “Disposal of Nuclear Waste”, Radiation and Nuclear Safety Authority, GUIDE YVL D.5, (2013).
- 17) 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部 放射性廃棄物等対策室, “諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について(2014年版)”, (2014).
- 18) POSIVA, “Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto Dose Assessment for the Plants and Animals in the Biosphere Assessment BSA-2012” POSIVA-2012-32, (2014).
- 19) OECD/NEA, “The Nature and Purpose of the Post-Closure Safety Cases for Geological Repository”, (2013).
- 20) IAEA, “The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste”, SSG-23, (2012).

著者紹介

柴田 雅博(しばた・まさひろ)
日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)放射性廃棄物処分

亀井 玄人(かめい・げんと)
日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)放射性廃棄物処分

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 —
(3月3日第8回編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・1月期に英文誌は22論文, 和文誌は6論文が投稿された。
- ・英文誌の出版社からの入金状況が報告された。
- ・英文誌の引用を向上させるための方策を引き続き検討することとした。
- ・JNSTの編集委員として熱流動分野へ韓国の委員に委嘱することを内定した。
- ・次年度編集委員の分野別総数を決定した。

【学会誌関係】

- ・理事より, 会員サービス委員会で実施したホームページアンケートの結果

について報告があった。学会誌記事の電子化やPDFの閲覧などに対しての要望が特に多かったので, 会員サービス委員会で引き続き, 公開場所, 方法等について検討していくこととなっている。

- ・編集委員会のSNS活用について, 編集長より前回の会議で出た出席者からの意見を踏まえた結果, SNSを開始するにはまだ時期が早いという判断に至った, という報告があった。今後, 理事会からSNS活用の要請があれば, また改めて検討することとした。
- ・春の年会企画セッションからの記事候補を確認した。
- ・5月号以降の巻頭言の記事企画の確認, 検討を行った。5月号巻頭言の執筆依頼を急ぎ進めていく。

編集委員会連絡先<hensyu@aesj.or.jp>