

バックエンド週末基礎講座 地層処分の安全性を評価するための取り組みと核種移行研究の例

北村暁*1

1 講演の目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分システムの安全性を評価するためには、図1に示すとおり、まずシステムの長期挙動を理解したうえで、システムで起こりうるシナリオを構築するとともに、そのシナリオに基づいた評価に必要な数多くの基盤データおよびモデルを整備し、それらの情報を統合して解析を行う必要がある。本講演では、地層処分システムの安全性評価の全体像を理解してもらうために、システムの長期挙動について概説し、そこで必要な基盤データの整備例を紹介した。

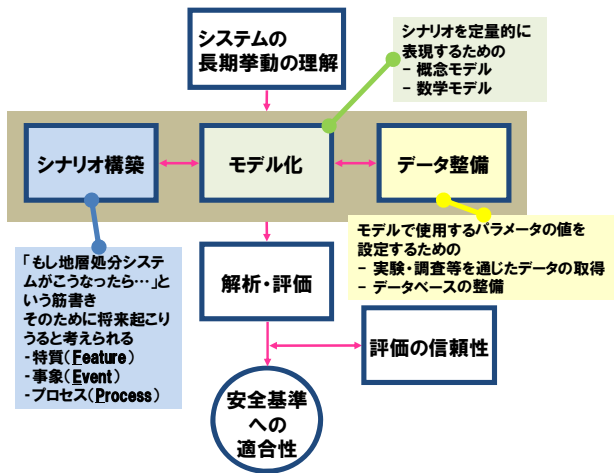


図1 高レベル放射性廃棄物の地層処分システムの安全性を評価するための体系

2 地層処分における安全確保の考え方

高レベル放射性廃棄物の取り扱いについて、なぜ地層処分が最適であるかを概説した。この中では、処分ではなく長期管理貯蔵を行うことは技術的に可能だが無期限に継続するのは困難であること、宇宙空間、海洋投下および極地の氷床における処分は国際条約で禁止されていることを述べた。

放射性核種の隔離および閉じ込めを重視したシステムとして、高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）をオーバーパックと緩衝材（ここまですを人工バリアという）で包み、地下300m以深の地層（天然バリアともいう）中に置いて坑道を埋め戻す多重バリアシステムについて概説した。この中で、実物大の模擬人工バリアが茨城県那珂郡東海村と

北海道天塩郡幌延町に展示されていることを紹介した。

評価すべき地層処分の安全性については、処分場閉鎖前の安全性（操業安全性）と閉鎖後の長期安全性があるものの、数万年以上という人類がかつて経験したことのない評価期間を必要とする後者の方が研究開発の観点からは重要性が高いことを述べた。

3 地層処分の長期安全性の確認

地層処分システムにおいて、処分後の時間経過とともにどのような作用が起こり、どのようなバリア機能が働くかについて概説した。放射性核種が放出される最も可能性の高いシナリオとして、ガラス固化体中に地下水が浸入して放射性核種を溶解させ人間の生活環境に運ばれることを想定した「地下水シナリオ」[1]を選択した。

- ・ 処分開始時より、ガラス固化体中で発生する崩壊熱により緩衝材中の温度が上昇する。また、地下水が緩衝材に浸入し始める。
- ・ 処分開始より数十年後（種々の仮定に基づく目安。以下同様）には、緩衝材が地下水で飽和される（飽和された水を緩衝材間隙水という）とともに、オーバーパックの腐食が始まる。崩壊熱による緩衝材中での温度上昇は、設計で100℃以下に抑える。
- ・ 処分開始より数百年後には、崩壊熱による影響はなくなり、オーバーパックの腐食が継続される。
- ・ 処分開始より数千年後には、オーバーパックは機械的に破損し、緩衝材間隙水がガラス固化体に浸入し、放射性核種の溶解および緩衝材中での移行が始まる。人工バリアの温度は、ほぼ初期地温に戻る。
- ・ 処分開始より数万年後には、ガラス固化体が溶解するとともに、オーバーパックの腐食による膨張が発生する。また、放射性核種が天然バリアまで到達する。
- ・ 処分開始より数十万年後には、放射性核種の天然バリア中への移行が継続され、核種によっては生物圏まで到達する。
- ・ 処分開始より数百万年後には、岩盤亀裂への緩衝材の浸入が進むとともにオーバーパックがすべて腐食する。また、隆起・侵食により、地上から処分場までの深さが変わる可能性もある。

このような長期挙動を前提とすると、地層処分システムには以下のような安全機能が求められると考えられる。

- ・ 廃棄体の閉じ込め（地下水の遮断）
- ・ 緩衝材による廃棄体の保持（応力緩衝性）
- ・ 岩盤による廃棄体の隔離（地質環境の安定性）

Brief introduction to safety assessment and examples of radionuclide migration studies on geological disposal of high-level radioactive waste by Akira KITAMURA (kitamura.akira@jaea.go.jp)

*1 独立行政法人日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門
Geological Isolation Research and Development Directorate,
Japan Atomic Energy Agency (JAEA)
〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

- ・還元環境の維持（オーバーパック腐食生成物の寄与）
- ・放射性物質の地下水への溶出の抑制（ガラス固化体の溶解速度および放射性核種の溶解度）
- ・緩衝材中での放射性物質の移行遅延（拡散，収着，コロイドろ過）
- ・岩盤中での放射性物質の移行遅延（小さな地下水流量・流速，収着，マトリクス拡散）
- ・放射性物質の希釈

以上のようなシステムの長期挙動と安全機能を理解したうえで，核種移行評価モデルを構築し，解析を実施した．解析結果は，処分後からの生物圏における被ばく線量を経過変化として示し，代表的なケース（レファレンスケース）では最大線量がわが国および諸外国で示されている安全基準（ $100\sim 300\ \mu\text{Sv}\ \text{y}^{-1}$ ）を大きく下回る $5\times 10^{-3}\ \mu\text{Sv}\ \text{y}^{-1}$ であること，その線量を支配する核種が Cs-135 であること[1]などがわかった．また，諸外国における安全評価結果[2]についても概説した．さらに，近年，地層処分の安全性の信頼性を定量的・定性的な論拠とともに体系化し，段階的に地層処分事業を進めるための拠り所とするセーフティケースの概念が構築されていることを紹介した．

4 核種移行研究の例

地層処分システムの安全性を評価するために必要なデータ整備の例として，講演者が実施してきた内容を中心とする以下のテーマについて概説した．

- ・放射性元素の熱力学データベースの整備
高レベル放射性廃棄物および地層処分相当 TRU 廃棄物の地層処分の安全性評価において，廃棄体中からの放射性元素の溶解度および溶存化学種同定のために，平衡定数等の熱力学データをレビューおよび選定したうえで，内部整合性を確認しつつデータベース化したものが熱力学データベース（TDB）である．本講演では，日本原子力研究開発機構熱力学データベース（JAEA-TDB）[3]の整備方針や熱力学データ選定方法の例を概説した．
- ・炭酸共存下におけるネプツニウム（IV）の溶解度測定
上記 TDB 整備のための基礎データとして，炭酸共存下におけるネプツニウム（IV）の溶解度測定を実施し，ネプツニウム（IV）のヒドロキソ炭酸錯体（ $\text{Np}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2^{2-}$ ，等）の平衡定数を導出した内容[4]について概説した．
- ・黄鉄鉱に対するセレン（IV, VI）の還元性収着
ベントナイト中に含まれる黄鉄鉱（ FeS_2 ）がセレンの酸化状態にどのような影響を及ぼすかについて，X線吸収端近傍スペクトル（XANES）測定を用いて調べた結果[5]を概説した．
- ・地下水中の無機・有機コロイド-岩石-希土類元素相互作用試験
幌延深地層研究所における核種移行研究の例として，原位置の地球化学条件下における希土類元素の岩石および地下水との相互作用[6]について概説した．

講演のまとめとして，以下のことを述べた．

- ・地層処分の安全評価では，システムの長期挙動の理解を基本に，シナリオ構築，モデル化およびデータ整備を組み合わせたうえで解析・評価を実施する．
- ・すべての環境条件に対応できるような実測データの取得は事実上不可能である．実測データの取得とモデル化・データベースをうまく組み合わせて，種々の環境条件に応じた核種移行パラメータの設定を行うのが現実的である．
- ・原位置試験と室内試験の差異を理解し，より現実的な核種移行挙動を評価できることが重要である．

参考文献

- [1] 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次取りまとめ一冊3 地層処分システムの安全評価. JNC TN1400 99-023 (1999).
- [2] 原子力ハンドブック編集委員会編：原子力ハンドブック. p. 759 (2007).
- [3] Kitamura, A., Fujiwara, K., Doi, R., Yoshida, Y., Mihara, M., Terashima, M., Yui, M.: JAEA Thermodynamic Database for Performance Assessment of Geological Disposal of High-level Radioactive and TRU Wastes. JAEA-Data/Code 2009-024 (2010).
- [4] Kitamura, A., Kohara, Y.: Carbonate Complexation of Neptunium(IV) in Highly Basic Solutions. *Radiochim. Acta*, **92**, 583 (2004).
- [5] Curti, E., Aimoz, L., Kitamura, A.: Selenium Uptake onto Natural Pyrite. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **295**, 1655 (2013).
- [6] 天野由記，雨宮浩樹，村上裕晃，岩月輝希，寺島元基，水野崇，桐島陽，佐々木隆之，窪田卓見，本多照幸：幌延 URL 地下水を用いたコロイドに関する研究；（1）限外濾過手法を用いた地下水中のコロイド特性調査．日本原子力学会 2013 年秋の大会，O10 (2013).