

地層処分研究開発第二次とりまとめ」における天然バリア中核種移行評価モデル

— 到達点と今後への提案 —

京都大学原子炉実験所 正会員 藤川 陽子
京都大学原子炉実験所 福井 正美

〔はじめに〕 わが国においては、「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」(原子力委員会 1994)に従い、21 世紀における高レベル放射性廃棄物地層処分場の操業をめざし、核燃料サイクル開発機構を中核推進機関として研究開発が進められてきた。その成果は、1999 年に、「地層処分研究開発第 2 次取りまとめ」(以下「第 2 次取りまとめ」と呼ぶ)として核燃料サイクル開発機構(以下、「サイクル機構」と略称)から公表された。そこに掲げられた目標は以下の通りである。

1) わが国における地層処分の技術的信頼性を示す。

(1)地層処分場の設置に適した、長期にわたって安定な地質環境がわが国にも存在することを示す。

(2)現在の工学技術で、技術的・経済的に無理なく、地層処分場が建設可能であることを示す。

(3)地層処分システムの性能を、ニアフィールドの性能を中心に、十分な信頼性を持って評価する。

2) 処分予定地の選定ならびに安全基準の策定に資する技術的拠り所(判断材料)を示す。

上記の目標設定からも明らかなように、「第 2 次取りまとめ」では、天然バリア(ファーフールド)の性能評価についても議論は行われているものの(サイクル機構、1999) 表向き、ニアフィールドのバリア性能評価が看板とされている。これは、ひとつには、わが国の高レベル放射性廃棄物地層処分においては、人工バリアの性能に余裕をもたせ、安全性を担保する「ニアフィールドアプローチ」をとっているためである。さらに、処分サイトが定まっていないう現段階では、いわゆる generic な環境アセスメントを行わざるをえないが、現実には存在しない「generic な自然環境」を対象とした評価には限界があるためでもある。実際、処分サイトの環境に関する詳細な情報なしで「安全基準策定に資する」ような環境中放射能移行の精度良い予測を行うことは困難である。

それでは、サイト選定後の天然バリアならびに地表生態圏における放射能移行評価と、その帰結としての公衆の被曝評価を合理的に進めるために、現時点では、どのような研究を推進する必要があるのだろうか。あるいは、サイト選定後に、残された具体的な研究に着手すれば、事足りるのであろうか。本論説は、以上の疑問に対処するために、主に天然バリアにおける放射能移行評価研究の現状を、移行モデルを中心として検討し、今後、地層処分の環境安全評価に関連して進めるべき研究の方向についていくつかの提案を行うものである。

〔地層処分の環境安全評価におけるモデルの適用手順〕 地層処分研究開発においては、特にアセスメント用モデルの適用手順と方法を良く検討することが重要である。環境アセスメント一般において、モデルの役割は、非常に重要であるが、放射性廃棄物深地層処分におけるモデルの役割は、従来にない特殊で困難なものである。このモデルには、無数の「仮定と過程」を数式で表した上で、数百年—数万年単位の遠未来の被曝線量について、正確ではなくとも、少なくとも安全側の予測を行うことが求められている。しかしながら、遠未来の予測についてのモデルの性能を、現在得られているデータに基づいて直接的に検証することは困難である。にもかかわらず、このモデルによる予測に係わる個々の過程と結果は、一般公衆に対して説得的でなければならない。

筆者らは、放射性廃棄物深地層処分の環境安全評価におけるモデルの適用手順は、大よそ以下のようにまとめるのが適切と考える(Beck, 1987、IAEA, 1989)。

- 1) 「スクリーニング用モデル」(シナリオを含む)を構築し、その結果解析を通じて、重点的に研究を必要とする領域をしぼりこむ、
- 2) 重点的な研究を必要とする領域について、以下の手続きをふむことによって、現象の理解をすすめ、その結果を「予測モデル」構築に反映する：
 - a) 「説明モデル」開発、
 - b) 検証用の実データの取得とそれを用いたモデルの「説明(予測)」性能評価、
 - c) モデルの最適パラメータ値の収集、
 - d) モデルの構造の検討とモデルの立証、
- 3) 「予測モデル」開発と不確実性解析、「予測モデル」による予測値とその信頼限界算出、

ここに、「スクリーニング用モデル」とは、環境システムの挙動を大づかみに表すモデルで、潜在的に重要な被ばく経路・核種・パラメータを同定し、重要でない過程を除外するために用いられる。「説明モデル」とは、実現象を理解するための、必要最少限のパラメータ数とできるだけ簡単な構造を有する数理モデルである。「予測モデル」は、通常の条件下では発現しえないような状況にも対応して予測を行うモデルであり、時に「説明モデル」には不必要なパラメータやモデル構造も含む（overparameterizedである）。

【第二次とりまとめの到達点】第2次取りまとめは、ファーフールドにおける放射能移行評価に関し、

- (1) スクリーニング用モデルの開発、
- (2) 重要核種選定（Cs-135, Se-79, Th-229, Np-237）
- (3) 重要でないFEP（Features, Events and Processes）の棄却、
- (4) パラメータおよびシナリオについての簡易的な感度解析、

を実施した、と総括できる。前項の評価におけるモデルの適用手順でいえば1)に相当する。

【今後の研究への提案：1. 不確実性解析・感度解析による研究資源の節約】地層処分という目的論的研究に関する限り、あらゆる種類の放射能の移行に関係する環境中のあらゆる素過程を物理的・化学的・生物学的に徹底して研究する必要はない。「決定集団」の被曝の鍵を握る決定経路と決定核種、シナリオを同定し、実験的研究に必要な素過程をしばらくこむことが可能なことは諸外国における研究でも指摘されている。それはまた、地層処分に必要な技術開発の人的・経済的資源の有効な節約にもなる。

このような重要過程の絞込みは、主にモデルの不確実性解析・感度解析により行われるべきである。例えば、図1は、地質媒体への放射能（この場合 Cs-135）の収着分配係数 K_d それぞれについてモデル計算により算出した公衆の被曝線量の相関を示すものである（各データ点はサイクル機構（1999）の報告より筆者らが抽出したもの）。図から明らかなように、 K_d が $0.005[\text{m}^3/\text{kg}]$ より低い場合、 K_d の単位量変化に対する被ばく線量変化値は非常に大きい。そのため、Se-79 のように K_d が低くなりがちな核種（Fujikawa and Fukui, 1997）あるいはコロイドを形成し K_d が低くなる核種（Fujikawa et al., 1999）については、実験室および野外条件下での K_d 値測定をさらに強化すべきである。逆に K_d が $0.01[\text{m}^3/\text{kg}]$ より高くなる場合は、それほど被ばく線量変化値は K_d 値の変化について敏感ではないために、精密に K_d 値を測定する必要性はうすくなる。従って Th-229 のように概して地質媒体中の K_d が高い核種については、実験的検討の精度はそれほど要求されない、等、研究の重点項目を絞り込むことが可能になる。なお、図1のデータ点は、ある一つの地質環境・地下水流れ場の条件を仮定して行った計算の結果であるため、他の条件下では、異なる結果が出る可能性がある。様々な条件を想定してのモンテカルロ・シミュレーションによる不確実性解析が今後、必要である。

【今後の研究への提案 2. モデルの検証と立証による説得性向上】筆者らの案は、評価におけるモデルの適用手順に示したごとく、「スクリーニング・モデル」の開発・適用が終了し、重要核種・被ばく経路・追加検討事項が明確化した時点で、「説明モデル」を開発し、そのモデルを実データで検証するとともに説明モデルの予測（シミュレーション）性能を統計的に明らかにすること、である。この実データによる検証には、可能な限り、日本の野外条件下で観測されたデータを用いることが望ましい。その根拠は、次の2つである。

実験室で得られた種々のパラメータをモデルに代入すれば、野外条件下での核種移行予測に適用できる、という保証は必ずしもない。野外条件下での核種移行をシミュレートするためのモデルは、構造的に、実験室スケールのモデルと違えなければならない可能性もある。この点を検討するには、野外条件下で得られた実測データとモデルの比較が不可欠である。

わが国の野外条件下で得られたデータと一致する結果を再現するモデルの開発とその適用により、モデルによる安全評価の予測に対して公衆の信頼感が向上する。

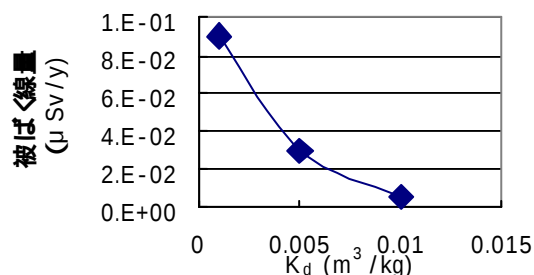


図1. K_d 値の変化に対する被ばく線量の応答

【参考文献】

- サイクル機構、JNC TN1400 99-023、1999。
 Beck, M., Water Resour. Res., 23, 393-1442, 1987。
 Fujikawa Y. and Fukui, M., Radiochimica Acta, 76, 163-172, 1997。
 Fujikawa, Y, et al., Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, v.240, 69-74, 1999。
 IAEA, Safety series No. 100, 1989。