

バックエンド週末基礎講座 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する検討状況

大石英希*1

1 はじめに

日本原燃は低レベル放射性廃棄物のうち放射能レベルが比較的高い廃棄物を対象とした余裕深度処分の検討を進めている。余裕深度処分埋設施設の安全性を確保するためには、施設の安全機能を明確にした上で、安全機能に影響する各事象の感度構造を踏まえて線量感度の大きい影響事象やバリア性能を抽出すること、それらに対して適切に長期状態設定を行い評価パラメータ等の設定、モデル化等を行なった上で安全性を評価する事が重要である。同時にそれら評価に関わる不確実性も留意しつつ対策を講じる必要がある。これらの内容について整理したものを週末基礎講座の講演再録として記載する。

2 余裕深度処分とは

2.1 概念

わが国では、原子炉施設や原子燃料サイクル施設の運転、解体に伴って発生する放射化金属、使用済樹脂等といった低レベル放射性廃棄物の中でも比較的高い放射能レベルの廃棄物は、地表から深さ50m以上の地下に埋設される[1]。

余裕深度処分とは、一般的な地下利用(共同溝や地下鉄、大規模建造物の基礎部等)に対して十分な余裕を持った深度へ処分する概念である[2,3]。また、余裕深度処分は、放射能レベルに応じた段階的管理に依存して放射能の影響を防止する管理型処分の考え方を適用できる[4]。図1に余裕深度処分埋設施設概念図[5]を示す。バリア構成および設置深度は、要求される安全機能を踏まえて決定する。このとき、被ばく評価を行い安全性が適切に確保されていることを確認する必要がある[6]。

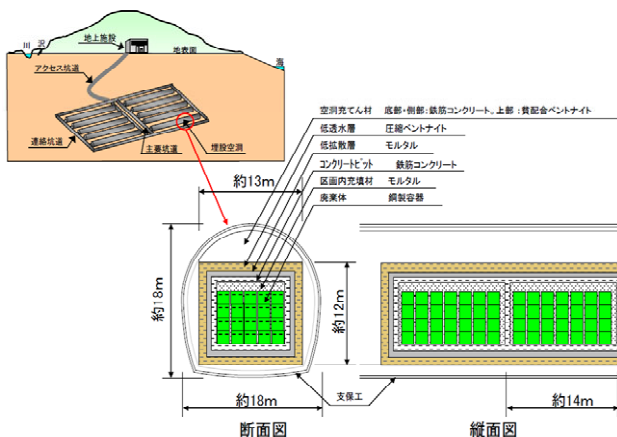


図1 余裕深度処分埋設施設概念図

2.2 安全確保策

埋め戻し後の安全性を確保するための方法の概要を図2に示す。

放射性物質の移動形態としては、自然過程によるものと、人為過程によるものに分けられる。自然過程における放射性物質の移動形態は、主に、地下水による生活環境への移行、隆起侵食による生活環境への近接、きわめて稀な自然現象(稀頻度事象)による生活環境への移行、等が考えられる。

地下水移行の場合、相対的に半減期が短い放射性物質については、天然バリアおよび人工バリアによって移行を抑制し、放射能の減衰に期待しつつ、生活環境への漏出時期を遅延させることが基本となる。一方、相対的に半減期が長い放射性物質については、放出割合の抑制および空間的希釈に配慮した施設設計が求められる。放出割合の抑制に関しては埋設施設の化学的環境を長期的に維持できるように人工バリアを検討することで、空間的希釈に関しては埋設空洞の分散配置および地表水として多量の涵養水量を見込める場所への施設配置等について検討することで、安全性を確保する。そのような方策を採用したとしても長期的な安全性が確保できない場合には、対象廃棄物の放射能や濃度の制限が必要となる。

隆起侵食を考慮する場合は、深度による離隔が失われても安全性を確保するため、離隔喪失時の被ばく評価結果が線量基準を下回るよう、放射能の減衰時間を考慮した適切な初期深度の設定が求められる。

稀頻度事象に対しては、所要の期間、地震・断層活動、火山・火成活動による埋設地の破壊が起こらない場所を選定することが求められる。

人為過程では、人間侵入により放射性物質が人工バリアおよび天然バリアをバイパスする過程を評価する必要がある。その事象の発生する時期は、埋設施設の有する物理的な抵抗性、すなわちトンネル掘削や地表からの開発行為に対する抵抗性により決定される。このため、必要に応じて物理的な抵抗性を長期にわたり確保することが求められる。

以上のように、安全確保を達成するための方策を考慮したうえで具体的な調査・設計へ展開することとなる。

3 所要の安全機能に対するバリアの検討

余裕深度処分は、廃棄体を定置・充てんして全坑道を埋め戻すまでの段階と、埋め戻し以降の段階とに大別でき、前者では「閉じ込め」が、後者では「離隔」「移行抑制」が安全機能として要求される。これらの要求を踏まえて適切な人工バリアおよび天然バリアの検討を行う。

「閉じ込め」については、廃棄体を定置して区画内を充填するまでは、鋼製の廃棄体容器によって水の浸入を防止

Current status of sub-surface disposal for low-level radioactive waste. by Hideki OISHI (hideki.oishi@jnfl.co.jp).

*1 日本原燃株式会社

Japan Nuclear Fuel Limited (JNFL)

〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目1番15号

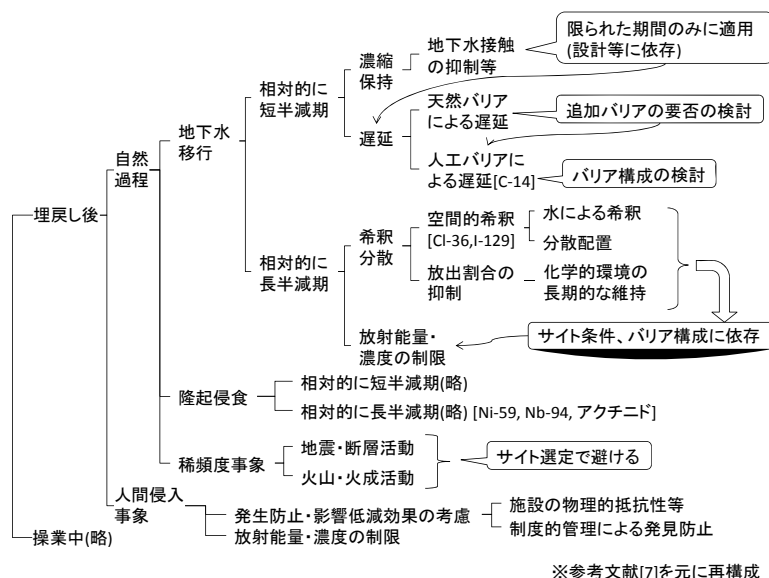


図2 安全確保策の概要[7,8]

できるように検討を行う。区内充填以降はセメント系材料によって、空洞充填材施工後アクセス坑道を埋め戻すまでは高密度のベントナイトを用いた低透水層によって廃棄体への地下水到達を十分に抑制できるように検討を行う。

「隔離」については一般的な地下利用に対する余裕を確保するとともに、隆起・侵食作用等の長期的な変動を考慮し適切な深度を設定する。

「移行抑制」については、人工バリアと天然バリアの視点からそれぞれ検討する。人工バリアについては、低透水層により人工バリア内部の物質移動を拡散場に加えることに加え、高緻密なモルタルを用いた低拡散層により拡散フラックスを抑制し、人工バリアの収着性を考慮した検討を行う。この際、バリア材同士の相互影響を考慮し、バリア性能が長期的に維持できるように設計することが重要である[9]。

天然バリアについては、候補地点周辺における天然バリアの調査結果を踏まえた地下水流動解析により移行経路・移行時間を推定し、移行抑制に係るバリア性能が高い地点を選定するとともに、廃棄物性状を考慮した施設配置にも留意することが必要である。選定にあたり、設置岩盤の層厚が空洞を設置するに十分な規模であることも1つの要件である。

日本原燃は、余裕深度処分埋設施設の検討に必要な地質、地下水、地盤に関する詳細な情報を得ることを目的に、2002年11月から2006年3月にかけて同社敷地内にて調査を実施した[10]。

地質調査では、調査地点には割れ目が非常に少ない岩盤が分布しており、いくつかの断層があるもののその性状、分布等から地下水の移動の面で問題となるような高透水性を示すものではないこと、また、これらの断層の形成時期は非常に古く今後繰り返し活動する断層ではないことを確認している。地下水調査では、地下水は敷地内の台地から周辺の沢・沼に向かって流れていて、その流速は10cm/年程度であること、岩盤の透水性は岩種や深度で異なるが高透水性を示す箇所は限られることを確認している。地盤調

査では、試験空洞(幅18m、高さ16m)の掘削・測定を行い、既往の土木技術で力学的に安定な空洞が構築可能であることを確認している。

これらの調査結果から、日本原燃の敷地は余裕深度処分埋設施設の設置に問題となる岩盤ではないことを確認した。

4 余裕深度処分の安全評価

ここでは、埋め戻し以降の段階における移行抑制機能に着目し、評価の進め方について示す。この中で長期状態設定と人工バリアの評価モデルの例について紹介する。

4.1 評価手順

安全評価に当たっては、埋設施設やその周辺環境の長期状態設定を効率的かつ漏れなく実施し、被ばく評価に繋げられる一連の手順をあらかじめ整理しておくことが重要である。そのためには長期状態設定において重視すべき感度の高い影響事象やバリア性能を明確化した上でパラメータ設定、モデル化設定を行うことが重要である。評価手順を図3に示す[7]。

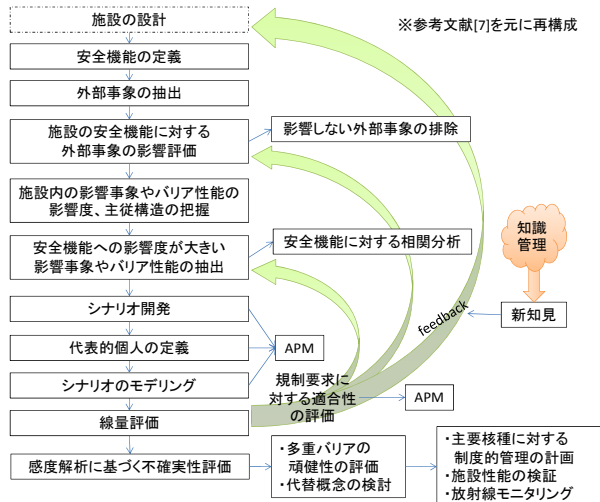


図3 安全評価手順

安全機能については、ここまで触れたように、埋め戻しまでの段階では「閉じ込め」が、埋め戻し以後の段階では「隔離」と「移行抑制」が該当する。ここでは、埋め戻し以後の段階における「移行抑制」に着目する。

安全機能の定義後は外部事象に該当する事象を漏れなく抽出する。外部事象とは、外部から埋設施設に影響を及ぼすものの、それ自身は施設からの影響を受けない事象と定義する。その次に、外部事象が埋設施設の安全機能に与える影響を評価し、影響度の大きい外部事象を抽出した上で、抽出した外部事象をインプット条件として、施設内で発生する影響事象やバリア性能の変化について検討する。検討においては、安全機能に影響を及ぼす施設内での影響事象やバリア性能の関係を整理するとともに、それら影響度の大小関係を確認する。

これらの外部事象や影響事象、バリア性能に関する検討の初期段階においては、国際的な FEP リストを参照することが有効である。サイト条件や施設形態に基づいてスクリーニングを行う。事象の依存関係や相互影響を確認するために、ロジックツリーによる分析および熱・水理・力学・化学の各環境条件に関する定性的な分析を行い、それぞれの相互影響に対応した解析や実験等を実施する。これにより安全機能に関係する影響事象の影響度および主従構造について漏れなく整理する。このとき、影響事象やバリア性能を数値化した各パラメータの被ばく評価への感度を確認すると、影響度の大小関係を整理しやすい。安全機能への影響度が大きい影響事象としては、低透水層の変質や低拡散層のひび割れ等が挙げられる。

なお、影響事象の検討においては、長期の状態変化を十分考慮する必要がある。その長期状態設定の考え方については 4.2 にて後述する。

影響事象の組合せは多岐にわたるため、最終的には後段で実施する被ばく評価上の感度を参照して考慮すべき事象を選定しつつ、蓋然性が高いと考えられる事象を時間軸に整理してシナリオを作成する。

また、地表環境の変化を考慮して、生活環境における代表的個人を設定する。代表的個人は、国際放射線防護委員会 (ICRP) の勧告する被ばく評価対象の考え方であり、(1)すべての関連する被ばく経路を扱うこと、(2)放射性物質の空間分布を考慮すること、(3)習慣データは合理的・持続可能で均質であること、等を考慮したものである[11]。

以上に基づき、放射性物質の漏出から人による摂取までを被ばく評価モデルとして表現し、被ばく評価を行う。被ばく評価では、多数の感度解析を実施することによって、処分システムの感度構造を明らかにし、その結果は設計や影響事象検討にフィードバックする。

4.2 長期状態設定

埋設施設の安全評価を行う際には、地表環境および地下の水理環境に影響を与える気候・海水準の変動や、人工バリアの長期的な性能変化等を十分考慮することが必要である。その理由は、人工バリア、天然バリアおよび生活環境の状態が評価期間を通じて有意に変化し、放射性物質の移行挙動および周辺公衆の被ばく様式に大きな影響を与える

ためである。長期の状態を評価する際には、過去の変動の情報が得られる場合は、それらを外挿して将来の変動とするが、過去の変動の情報が得られない場合は、基礎理論や実験によって得られた入力等をもとに数値解析手法により将来の状態を評価することとなる。

例えば低透水層は、隣接するセメント系材料の溶脱物質によってベントナイト中の主要鉱物であるモンモリロナイトやその他の随伴鉱物の変質し、その透水性が上昇する。この現象を熱力学データベースに基づく地化学解析により予測し、透水係数の長期的な変遷を推定すること[12]が必要である。また、低拡散層は低透水層の内側に配置されるため、化学的環境は安定しているものの、長期的には人工バリア構成材料中の金属の腐食膨張によって発生した応力の影響を受ける。したがって、金属の腐食環境の推定とその腐食特性およびそれらをインプット条件とした長期的な低拡散層のひび割れの評価が重要となる。ひび割れの時間的変遷を評価するためには数値解析によるアプローチが有効となる。

気候・海水準変動は、温暖期が継続するケースと寒冷化に進むケースが想定される。寒冷化に進むケースでは過去約 40 万年間の海水準変動に関する知見等をもとに長期的な海水準変動の設定を行う[13]。これにより地表環境における涵養水量や天然バリアの動水勾配等の設定に資する。

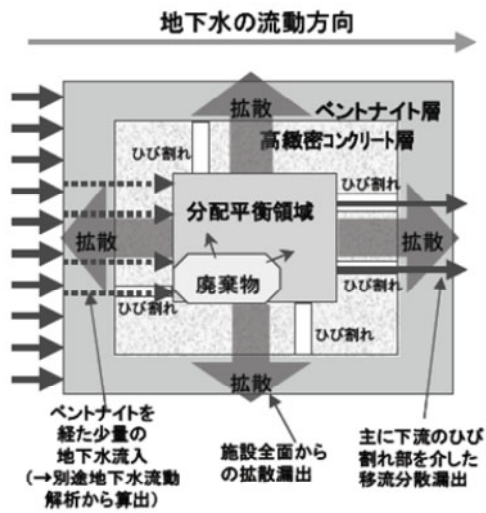
長期の状態の評価において、確からしい状態の評価が求められる。各種の文献調査や解析、実材料を用いた要素試験等を通じて知見を充実させ、不確実性を低減していくことが重要である。

4.3 評価モデル

長期的な状態設定を基に、被ばく評価計算のモデル化、パラメータの設定を行う。状態設定の不確実性を被ばく評価に反映するに当たり、その不確実性をモデルの違いとして表現するか、パラメータの違いとして表現するかについては、評価者の裁量に委ねられる。ただし、モデルは統一しておきパラメータの違いとして状態設定の不確実性を表現しておくほうが利便性は高い。その理由は、設計基準へのフィードバックや線量基準に対する裕度を評価する場合、意思決定者にとっては具体的な目標を数値 (パラメータ) として表現することができることである。一方で、被ばく評価モデルを構築する場合は、長期状態設定に基づく詳細モデルをある程度保守側に簡略化することが求められる。

埋設施設の被ばく評価用の計算モデルでは、放射性物質が移流あるいは拡散によって人工バリア中を移行する現象をモデル化した。(図 4 参照[14])。

低拡散層に用いるモルタルのひび割れは避けられないものとして、モルタル健全部を拡散で移行する経路とひび割れ部分を移流分散で移行する経路に分けて表現している。なお、ひび割れ部分は廃棄体等の金属の腐食膨張に伴い、時間の経過に応じて徐々に開口していくモデルとしている[14]。人工バリアの性能の変化や、天然バリアの水理条件の変化、地表水の変化についても時間の経過を考慮する。



<想定される人工バリアの状況>

図4 人工バリアの評価モデル

4.4 不確実性の管理

安全評価は、さまざまな不確実性に配慮して、シナリオ別に保守性を考慮して被ばく評価を行い、埋設施設の安全性を示すために行われるものである。

評価では一定の保守性を考慮するものの、新知見によりこれまで考慮していなかった事象を想定することでより保守的な設定となり、被ばく線量が上昇する可能性を否定できない。一方、知見の蓄積により、従前見込んでいた保守性を現実的な設定に見直すことができ、被ばく線量の低減を見込める可能性がある。

このため定期的に安全評価を実施し、その結果を更新する過程で、新知見の取り扱いを常に確認しておくことが重要となる。新知見を反映すべきか否かは、その波及先を確認し、感度解析に基づく安全裕度の再評価が必要となる。その反映によって線量基準を超過する可能性がある場合は、追試等により知見の信頼性を向上させ、他のパラメータの保守性を削減し、安全裕度を確保する必要がある。

これらの活動を円滑に実施していくためには、迅速かつ柔軟に安全評価を行う環境の整備と、体系化された知識管理が重要となる。前者については、手順書や計算ツールの整備、評価方法の習熟等人材育成による対応となる。後者についてはツールとしての知識管理システムの整備はもとより、それを安全評価の更新作業の中心的なシステムとして、常に利用されメンテナンスされるような活動の枠組みに位置づけることが重要である。知見の収集に当たっては、処分事業者間のみならず関係研究機関・企業との連携を密に行い、情報共有を図っていくことが必要である。

5 まとめ

2013年10月26～27日に実施された2013年度バックエンド週末基礎講座の内容に基づき、一部説明を追記して講演再録として取りまとめたものである。余裕深度処分の概念や安全確保策、安全機能、安全評価について概説した。

参考文献

- [1] 原子力規制委員会規則第16号：“核燃料物質または核燃料物質によって汚染された第二種廃棄物埋設の事業に関する規則”，平成25年12月6日
- [2] 原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会：“現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物の基本的考え方について”，平成10年10月16日(1998)
- [3] 経済産業省資源エネルギー庁放射性廃棄物等対策室：“余裕深度処分”
<http://www.enecho.meti.go.jp/rw/gaiyo/gaiyo03-3.html>
(最終アクセス年月日：2014年2月19日)
- [4] 原子力安全委員会 放射性廃棄物安全規制専門部会：“現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物処分に係る安全規制の基本的考え方”，平成12年9月14日(2000).
- [5] 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会埋設処分技術ワーキンググループ：“余裕深度処分の概要”，第6回資料2(2011).
- [6] 電気事業連合会：“余裕深度処分の安全確保の考え方”，原子力安全委員会 放射性廃棄物・廃止措置専門部会 第二種廃棄物埋設分科会 二分第1-4号(2007).
- [7] Shimizu, T.：“The outline of JNFL sub-surface disposal plan for relatively higher LLW -Activity to improve reliability of the safety assessment-”，IAEA/PURAM International Workshop on R&D studies in support of enhancing confidence in safety case for LILW repositories, Budapest, Hungary, 28-30 May 2013 (2013).
- [8] Kato, K.：“Safety Concept of Sub-Surface Disposal and New Safety Regulation System for Radioactive Waste Disposal in Japan”，IAEA TM-45865 Technical Meeting on the Disposal of Intermediate Level Waste, Vienna, Austria, 9-13 September 2013 (2013).
- [9] 庭瀬一仁 他：“低レベル放射性廃棄物処分におけるセメント系材料の設計と施工に関する基礎的研究”，コンクリート工学, 50, No.7, pp.585-592 (2012).
- [10] 日本原燃株式会社：“低レベル放射性廃棄物の次期埋設に関する本格調査の結果について”，2006年9月1日
<http://www.jnfl.co.jp/press/pressj2006/pr060901-1.html>
(最終アクセス年月日2014年2月19日)
- [11] ICRP：Publication 101, “Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public” and “The Optimisation of Radiological Protection: Broadening the Process”，ICRP (2007).
- [12] 一般社団法人日本原子力学会：日本原子力学会標準「浅地中ピット処分の安全評価手法：2012」，AESJ-SC-F023:2012 (2013).
- [13] 加藤和之 他：余裕深度処分の技術的な信頼性構築に向けた検討状況について，原子力バックエンド研究 13, No.1 (2006).
- [14] Shimizu, T.：“Development of Safety Assessment for Radioactive Waste Disposal”，Global 2007 Advanced Nuclear Fuel Cycles and Systems, 9-13 September 2007, Boise, Idaho, USA (2007).