

## 中深度処分の安全確保に向けた課題について

前田敏克\*1

中深度処分では数万年を超える長期の安全確保が必要である。その安全性を判断するために、事業開始前に安全評価が行われるが、事業開始後の埋設施設の建設時や廃棄物の受け入れ時、地上からのアクセス坑道等の埋め戻し時において、できあがった施設や廃棄物の放射能インベントリ、埋め戻された状態が、安全評価の前提とした設計どおりであることの確認ができなければ、安全評価は「絵に描いた餅」となってしまう。また、100年を超える事業期間中における管理の方法や事業者の経理的基礎などの確保に加えて、事業終了後も含めた不測の事態への対応など、技術以外の観点も含めて様々な課題がある。こうした課題の解決のためには、多分野の専門家による早期の技術連携や国の関与が必要である。

**Keywords: 中深度処分, 安全評価の前提, 管理, 不測の事態, 技術連携**

### 1 はじめに

原子炉压力容器内での放射化等により放射能濃度が高くなった炉内構造物等の廃棄物（「炉内等廃棄物」という）のように、半減期が数百年を超える核種の濃度が高い放射性廃棄物は、適切な対策がなされないと数万年以上の長期にわたり人に影響を及ぼす可能性がある。

このような長期の安全を管理のみに頼って確保することは不可能なので、根幹的な対策として、火山や断層活動のように施設を破壊しうる事象の影響の及ばない安定な深い地下に処分することで放射性廃棄物（単に「廃棄物」という）を人の生活環境から隔離することとしている。また、廃棄物を工学的なバリア（「人工バリア」という）で閉じ込めて核種が漏れないようにするとともに、漏れ出た核種は、天然の岩盤など（「天然バリア」という）に吸着したり沈殿したりすることによって生活環境への移行が遅延される。このような処分概念を中深度処分（以前は「余裕深度処分」と呼ばれていた）という[1]。

このように中深度処分の長期の安全は、人の手を借りなくても確保できるように対策を講じることが基本だが、一方で、将来の掘削技術や人の活動は予測できないので、どんなに深く埋めても、廃棄物が掘り返されてしまう可能性は否定できない。このため、処分場の掘削行為は法律によって無期限に制限される[2]。ただし無期限といっても、数万年も政府機能が存在し続けることは期待できないので、この制度は国としてのできる限りの措置の一環として位置づけられる。

中深度処分の安全性は、事業開始前において施設設計や安全評価をふまえて判断されるが、事業開始後には設計どおりの施設が設置されているかどうかを確認しなければならない。また、100年を超える事業期間（事業者が規制を受ける期間として300～400年が想定されている）中における管理の方法や事業者の経理的基礎の確保など、技術以外の観点も含めた様々な課題がある。

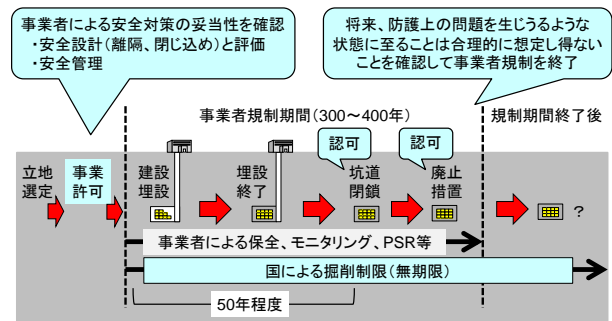


図1 中深度処分の事業段階

### 2 安全評価を「絵に描いた餅」にしないために

人工バリアの閉じ込め機能はいずれ失われることから、生活環境への核種移行は通常起こる事象としてあつかう必要がある。このため安全評価では、人工バリアの劣化や天然バリア中の核種移行、生活環境での希釈を考えたシナリオに基づいて公衆の線量を計算する。

事業者は事業開始前の事業許可の段階において、中深度処分の安全性を判断するために、埋設施設の位置も含めた設計や処分する予定の廃棄物を前提とした安全評価を行う。

規制当局は、事業者が実施した安全評価の妥当性について確認するが、この段階では埋設施設の建設も廃棄体（処分のために埋設施設に受け入れる廃棄物のことをここでは「廃棄体」という）の受け入れも行われていないため、feasibleであるか？の確認となる。

したがって、その後の埋設施設の建設時や廃棄体の受け入れ時、地上からのアクセス坑道（単に「坑道」という）の埋め戻し（「坑道の閉鎖」という）時において、できあがった施設や廃棄体の放射能インベントリ（単に「インベントリ」という）、埋め戻された状態が、安全評価の前提とした設計どおりであることの確認ができなければ、安全評価は「絵に描いた餅」となってしまう。

ここでは、安全評価を「絵に描いた餅」にしないために押さえておくべきことの例について述べる。

#### 2.1 廃棄体のインベントリの確認は可能か？

地下水を介した核種移行を考慮したシナリオ（「地下水移

Issues for the Safety of Intermediate depth disposal by Toshikatsu MAEDA (maeda.toshikatsu@jaea.go.jp)

\*1 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第 34 回「バックエンド」夏期セミナーにおける講演内容を加筆・修正したものである。

行シナリオ」という) についての安全評価では、半減期が長くかつ人工バリアや天然バリアに吸着しにくく移行しやすい核種が主要な核種となるが、人による掘削によって処分場が擾乱されることを仮想したシナリオの場合は、掘削を仮想する時点において、廃棄体を埋設した地下施設(「廃棄物埋設地」という)に多く存在している核種などが主要核種となる。また、事業期間中における廃棄体の取り扱い時の被ばく評価においては、例えばCo-60のような線量率の高い核種が主要核種となる。

このように、安全評価の前提としての廃棄体のインベントリの確認対象となる主要核種は安全評価のシナリオによって異なる。また、地下水移行シナリオでは、処分した廃棄体一体一体のインベントリよりも、埋設した廃棄体全体のインベントリが重要であるのに対し、廃棄体の取り扱い時の被ばく評価では、一体あるいは取り扱い単位での廃棄体のインベントリが重要となる。このように、確認が必要な主要核種だけでなく、確認すべき廃棄体の単位も安全評価のシナリオごとに異なる。

**表1 中深度処分における放射能インベントリの確認単位等の例**

確認事項	核種	濃度, 量	確認単位
政令で濃度上限を規定	C-14, Cl-36, Tc-99, I-129, 全 $\alpha$	最大濃度	廃棄体一体
取扱い中の遮蔽評価	Co-60 など	最大濃度	廃棄体一体
		量	最大取扱い単位
スカイシャイン(地上施設)	Co-60 など	量	全量, 区画ごと
長半減期核種濃度制限	長半減期, かつ居住シナリオに寄与する核種	量	隣接して埋設する廃棄体一群
自然事象シナリオ評価	主要核種	量	全量
人間侵入シナリオ評価	主要核種	量	一区画分

中深度処分の対象となる廃棄体は比較的放射能レベルが高いため、そのほとんどを遠隔で取り扱う必要がある。また、主要核種の中には難測定核種も含まれるため、廃棄体のインベントリを埋設施設への受け入れ時に詳細に確認することは困難である。

廃棄体中の難測定核種の放射能濃度が、廃棄体の外部から測定が可能な核種(例えばCo-60やCs-137など)の放射能濃度と相関関係が成立する場合は、放射化学分析などによりあらかじめ設定した難測定核種とCo-60やCs-137との放射能濃度の相関比(スケーリングファクタ)から難測定核種の放射能濃度を評価することが可能だが、このような方法が適用できない廃棄体については、合理的にインベントリを確認するための手法整備が必要である。

また、廃棄物の発生者は原子力発電所や核燃料サイクル施設、研究施設などの原子力施設の事業者であり、これら事業者によって廃棄物を容器に封入あるいは固型化された

ものを廃棄体として中深度処分の事業者が埋設施設に受け入れる。したがって、実質的に廃棄体を作製する事業者と処分する事業者は別であるため、両者の間で、インベントリの確認を始めとする品質保証のための適切な仕組みの構築や技術連携が必要である。

## 2.2 人工バリアの初期性能の設定は現実的か?

中深度処分では、廃棄物埋設地に浸入する地下水量を低減するための止水機能や、核種の漏出を抑制する機能等を有した人工バリアの設置が想定されており[3]、安全評価ではこれら人工バリアの長期的な劣化に伴う各機能の性能の変化を考慮する必要がある。

安全評価に用いる人工バリアの性能のパラメータとしては、例えば止水機能については透水係数、漏出抑制機能については核種の拡散係数といったものが代表的であり、人工バリアの劣化に伴う各パラメータ変化に関するデータを取得するために、処分環境を模擬した条件下での人工バリアの透水試験や拡散試験などが行われている。

多くの試験では、人工バリアを模擬した小さく均質な試験片が用いられているが、実際の廃棄物埋設地に設置されるスケールで製作・施工する際の不均質性や、施工状態の確認方法や品質保証も考慮した性能を設定すべきであるため、安全評価における初期性能は、模擬試験片を用いて得られた性能に比べて1桁か2桁、あるいはそれ以上に保守的に設定しておく必要があるかもしれない。

例えば、セメント系人工バリアの拡散係数は、硬化体中の物質移行に寄与する空隙の構造に大きく依存するが、ベース材料の配合が同じであっても、混和材や化学混和剤の違い、施工方法の違い、養生条件の違いによって硬化体の空隙構造が異なってくる可能性があるのであれば、材料設計だけでなく、施工方法や養生条件もセットにした拡散データの取得やパラメータ設定、並びに建設時における確認方法も含めた検討が必要となる。

## 2.3 天然バリアの特性は確認できるのか?

天然バリアは、人工バリアから漏れ出した核種の生活環境への移行を遅延するための重要なバリアであるが、天然ゆえに不均質であり、大小様々なき裂が存在する可能性もある。

天然バリアの特性を調べるための代表的な方法は立地選定の段階で実施されるボーリングによる調査であるが、ボーリングは天然バリアに対する擾乱を伴う行為でもあるため数多くは行えない。特に、処分場の敷地外については、権利関係によって調査の制約がかかることも考えられる。

このため、天然バリアの特性把握においては、調査の頻度や内容に応じた不確かさがあり、安全評価ではその不確かさをふまえて保守的な移行経路や核種移行の遅延に関するパラメータが設定される。

一方、坑道や廃棄物埋設地の建設時には、掘削した場所について天然バリアのより詳細な状態を観察することが可

能だが、これらは局所的な情報であり、安全評価で設定した天然バリアの特性を代表しているとは限らない。

したがって、天然バリアは、人工バリアと違って、建設時に詳細な確認が必ずしも可能ではないことを認識することが必要である。その上で、安全評価における天然バリアの特性に関する設定に対して、建設時に得られる情報から確認・検証できると考えられる内容やその方法についての見通しを示しておくことが必要である。

## 2.4 坑道の埋戻しとその確認は可能か？

坑道の閉鎖によって廃棄物埋設地を生活環境から離隔するためには、ただ埋め戻せば良いわけではなく、埋め戻した坑道やその周囲に安全上支障をきたすような核種移行経路が生じないようにしなければならない。

廃棄物埋設地の建設から坑道の閉鎖までには数十年以上の期間が想定されることから、その期間中の作業の安全を確保するために、坑道の壁面にはセメント製のライナーが設置されることも考えられる。

このような場合、岩盤に接するライナーの裏面が溶脱するなどして水みちが形成される可能性があるが、閉鎖の際にライナーを全て取り除くことは技術的に困難と考えられる。

したがって、長期的な地下水流動変遷をふまえても生活環境への核種移行経路となりにくいような坑道の設計、あるいは安全上支障をきたすような核種移行経路を遮断する観点で特に有効と考えられる地点について、ライナーの裏面を含めた止水措置を講じるなどの措置が必要である。止水措置を講じた場所については、その周囲も含め水みちができていないことの確認が必要である。

もしも、坑道の埋め戻し部分が核種移行に大きく影響する場合は、埋め戻し技術やその確認における不確実さ、品質保証の程度に見合った透水性や移行経路の設定を行った上で安全評価を行う必要がある。これは、坑道だけでなく、廃棄物埋設地の埋め戻し部分や後述するモニタリング観測孔の閉塞部分についても同様である。

## 3 100年を超える管理について

中深度処分の長期の安全は、人の手を借りなくても確保できるような対策を講じることが基本であり、ハード面での対策の大部分は坑道の閉鎖によって完了する。

一方で、坑道の閉鎖後も、100年を超える事業期間中においては、安全性の再確認などを目的としたモニタリングや最新知見を反映した定期的な評価（Periodic Safety Review; PSR）といった管理を行うことが、事業者求められる[1]。

### 3.1 坑道の閉鎖後の漏えいモニタリングは可能か？

人工バリアの閉じ込め機能はいずれ失われることを想定するが、リスク低減の観点から、人工バリアの中でできるだけ多くの核種を減衰させ、天然バリアへの漏出を抑える

ため、少なくとも事業期間（300～400年を想定）中は廃棄物埋設地からの核種の漏出を抑制することが求められる[1]。

このため、人工バリアの設計上の問題や施工の不具合等による異常な漏えいを監視するためのモニタリングが必要となる。

漏えいモニタリングにあたっては、実用上必要な精度で監視・測定ができる性能を有していることに加え、モニタリング設備の設置により核種移行の促進をもたらすことがないように、最適な設計を講じることが求められる[1]。

これらの要求を満たすためには、廃棄物埋設地から核種の漏えいが生じた場合、比較的早期に核種が到達すると考えられる廃棄物埋設地近傍の代表的な地点をモニタリング地点として選定した上で、100年間を超える長期間の使用を念頭においたモニタリング設備のメンテナンス性、交換性等を考慮する必要がある。

また、モニタリング終了後には、前述の坑道の埋め戻しと同様に、安全上支障をきたすような核種移行経路にならないようモニタリング用の観測孔を閉塞する必要があるが、閉塞作業は地上からの遠隔で行うため、原位置での状態確認は困難であることもふまえた確認方法の検討や、孔内残置物の有無も考慮した閉塞部分の長期的な透水性の評価が必要である。

### 3.2 事業者の経理的基礎等をどうやって確保するか？

廃炉するまでの間は発電による収入が見込める原子力発電施設とは異なり、中深度処分事業は、廃棄物の受け入れを終了した時点から事業終了までの100年を超える期間中の収入を期待できないことから、事業費用の確保に係る見通しの不確実性が他の原子力施設に比べて高い。

事業者にはその間の管理に加えて、万一の漏えいなど不測の事態への対応も求められ、特に坑道の閉鎖後に不測の事態が起こった場合は、多大な費用と高度な技術力を要することも考えられる。

したがって、中深度処分の事業者は、不測の事態への対応も含めた高い技術的能力、経理的基礎と責任を100年以上の期間にわたって保持しなければならない。

地層処分については、事業者の資金の確保に関する措置や業務困難な場合等の措置が国により講じられることが法律に規定されているが[4]、中深度処分についても国による同様の措置が講じられる必要がある[5]。

### 3.3 想定外に対してどこまで対応するのか？

計画の変更や不測の事態への対応としての施設の設計変更や補修は、事業段階の進展とともに難しくなり、特に坑道の閉鎖後の廃棄物埋設地の補修や廃棄物の取り出しは技術的に困難な上に、コストや措置に伴うリスクも高くなる。

一方で、事業期間中においては例えば以下のような不適合状況が生じる可能性がある。

- ・異常な漏えいやその徴候が確認された

- ・PSRの結果、立地基準に適合しなくなった
- ・PSRの結果、数万年後の地下水移行シナリオの計算結果が線量基準を超えた
- ・規制基準そのものが厳しくなり、適合しなくなった

規制基準が改正された場合に既存の施設に対しても遡及して適合を求める、いわゆる「バックフィット」は法律上は中深度処分には求められていないが、合理的に実施可能な範囲での措置を講じることは、社会的な受容性の観点でも必要であろう。

どの事業段階における、どういう場合に、どのような措置を講じるべきか？といった具体的な内容についてはともかく、考え方や方針については、事業開始前に明らかにしておくことが必要と考える。

また、事業者が存在しない事業期間終了後における不測の事態への対応についても考えておく必要がある。

無断の掘削行為による廃棄物埋設地の損壊等への対処については法律によって規定されているが、事業期間終了後に異常な漏えい等の万一の事態が生じた場合の対処については定められていない。具体的な対処の方法は状況に応じて検討されるべきだが、国が責任をもって対処することについては事業開始前に明らかにしておくことが必要である[5]。

#### 4 おわりに

廃棄体や施設の確認、坑道の閉鎖や閉鎖後のモニタリング及びモニタリング終了後の観測孔の閉塞確認などの具体的な方法については各段階で事業者が示し、規制当局はその妥当性を判断することとなるが、事業許可の際、「現状技術では困難だが、50年後、300年後の技術であればおそらく可能」といった説明では不十分と考える。

事業者は事業許可の時点においても、十分な技術的成立性があるという見通しを示す必要があり、そのためには人工バリアの材料メーカーや性能評価、土木建築、化学、核種移行、水理、地質といった分野の異なる専門家の技術連携が早期に必要と考える。

加えて、中深度処分の実現のためには、合理的な規制も欠かせない。規制判断には独立性が求められるが、科学的合理的な判断を行うためには、立地地点のサイト特性や施設の詳細設計及び施工方法についての理解が不可欠であり、規制当局はこれらの技術的な情報から疎遠な状態であってはならない。中深度処分の埋設施設は、おそらくわが国に1つか2つしか設置されない、サイトの特性に大きく依存する施設であるため、立地選定の段階においても、詳細設計や施工方法、管理の方法に関して、審査に予断を与えないという前提のもとで、規制当局と事業申請予定者は積極的にコミュニケーションを図るべきと考える。

また、中深度処分を始めとする廃棄物処分の安全性について社会とのコミュニケーションを図っていくためには、

まずは同じ「原子力安全」である廃棄物処分安全と原子炉施設等の安全の専門家の間で、安全確保の考え方等についての認識を共有することも重要と考える。今後、原子力学会における分野間での活発なコミュニケーションにも期待したい。

#### 参考文献

- [1] 「炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について」（平成28年8月 原子力規制委員会決定）(2016).
- [2] 原子炉等規制法第五十一条の二十七（H29.4.14 公布）(2017).
- [3] 原子力規制委員会「廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム第2回会合」資料2-1, 平成27年2月12日(2015).
- [4] 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律第六十七条, 第七十四条
- [5] 改正原子炉等規制法（H29.4.14 公布）に対する衆参の附帯決議において、「中深度処分を行う第二種廃棄物埋設施設については、放射能濃度が比較的高い廃棄物を数百年にも及ぶ長期間取り扱うことから、その間、事業者によって安定的に事業が継続されるよう、当該事業者の体制強化を図る施策の実施も含め、必要な指導・監督を行うこと。また、事業者による管理終了後に放射性物質の漏えい等が発生した場合においては、国が責任を持ってその対処に当たること。」としている(2017).