

[寄稿]

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全確保の考え方 ～国際基準とフランスの事例の紹介～

田辺 博三 ((一社) 日本原子力学会
フェロー)



1. はじめに

高レベル放射性廃棄物にはさまざまな放射性物質が多量に含まれる。放射性物質の出す放射線は、人に外部被ばく、あるいは吸入、摂取による内部被ばくを生じ、有意な影響を与える可能性がある。地層処分は、そのような影響から人と環境を防護するための方法であり、各国が採用して取り組んでいる。

本稿は、処分分野以外の技術的専門家の方々に、地層処分の安全確保の仕組みを理解してもらうことを目的としている。

はじめに、放射性廃棄物全般の発生、区分と処分方法について、国内や国際原子力機関(IAEA)の安全基準文書などに基づいて紹介し、処分が「閉じ込め」と「隔離」の方策に基づいていることを説明する。

次に、フランスの地層処分概念の研究事例を取り上げて、開発している地層処分において、安全確保を具体的にどのような仕組みで行っているかについて説明する。フランスの事例を取り上げる理由は、日本と同じ再処理後のガラス固化体を処分対象としていること、および粘土層の優れた低透水性、収着性により、放射性物質の生活環境までの移行時間が長いことを利用した処分概念で、評価モデルがシンプルであり、放射性物質の移行挙動と結果として生じる人への被ばく影響が理解しやすいと思われるからである。

地層処分の安全確保の仕組み、その結果ど

のような放射性物質が生活環境に出てくる可能性があるのか、安全防護目標を下回ることができるのか、などについて基本的な理解が得られることを期待している。

2. 放射性廃棄物の発生、区分と処分

(1) 放射性廃棄物の発生

原子力発電所、核燃料サイクル施設、大学、研究施設、医療機関等における原子力のエネルギー利用や放射線利用、関連する施設の廃止措置等において、廃棄物が発生する。これらの廃棄物には放射性物質を含むものがあり、放射性廃棄物と呼ばれる。

(2) 放射性廃棄物の区分、処理後の処分

原子力利用や放射線利用に伴い発生する廃棄物には、大きく区分して次の3種類のものがある。

- 放射性廃棄物でない廃棄物：一般の産業廃棄物として扱う。
- 放射性廃棄物として扱う必要のないもの(クリアランス^{※1}のレベル以下の廃棄物)：再利用(リサイクル)あるいは一般の産業廃棄物として処分ができる。
- 放射性廃棄物：放射性物質で汚染されたもので放射性廃棄物として処分する。

このような放射性廃棄物の管理の考え方の例を図1に示す。

IAEAは放射性廃棄物の安全基準を策定し

※1 クリアランスとは、認可された行為内にある放射性の物質または物を規制機関による更なる管理から解除することと定義されている⁽¹⁾。クリアランスされると放射性廃棄物として考慮されない。

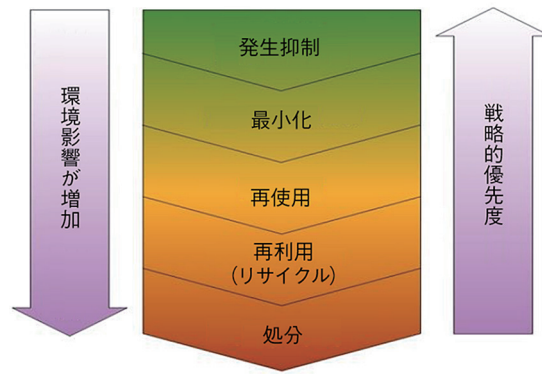


図1 低レベル放射性廃棄物の管理ヒエラルキーの例 (2)

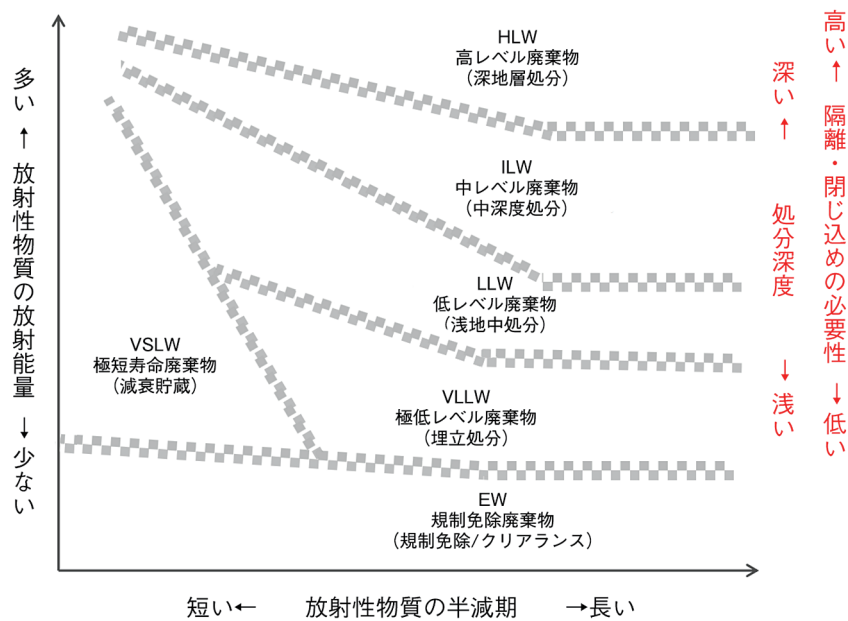


図2 廃棄物区分スキームの概念図 (3)

ている。安全基準文書は、安全原則 (SF : Safety Fundamentals), 安全要件 (SR : Safety Requirements), 安全指針 (SG : Safety Guides) の3段階の階層構造を有する多数の文書から構成されている。

一般安全指針、放射性廃棄物の分類 (GSG-1) (3) では、主に長期的な安全に関する考慮に基づいて、処分の観点から放射性廃棄物を区分するための一般的なスキームを設定している。図2に、GSG-1に示された放射性廃棄物の区分と処分方法を示す。以下には、図中の各区分の概要を示す。

① 規制免除廃棄物 (EW) : 放射線防護目的のための規制上の管理から、クリアランス、規制免

除または規制除外するための規準を満たす廃棄物。

② 極短寿命廃棄物 (VSLW) : 最長でも数年程度という一定期間にわたり減衰貯蔵されることができ、その後、管理無しの処分や利用あるいは放出のため、規制機関により承認された措置に従って、規制上の管理からクリアランスされることができる廃棄物。

③ 極低レベル廃棄物 (VLLW) : 必ずしも EW の規準を満たさないが、高いレベルの「閉じ込め」および「隔離」の必要がなく、そのため、限られた規制上の管理を伴う、浅地中の埋立方式の施設への処分に適している廃棄物。VLLW 中のより半減期の長い放射性物質の放射能濃度は、通常かなり限られる。

④ 低レベル廃棄物 (LLW)：クリアランスレベルを超えているが、長寿命放射性物質の量が限られている廃棄物。このような廃棄物は、最長で数100年程度にわたり頑健な「閉じ込め」と「隔離」を必要とし、浅地中施設での処分が適当である。どのような放射性廃棄物が浅地中および中深度処分に適しているかは、多くの場合、制度的管理が保証され廃棄物への人間侵入が回避できる時間枠にわたる管理の必要性に基づき区別される。多くの国では、制度的管理が最長で300年前後は信頼できると想定している。

⑤ 中レベル廃棄物 (ILW)：特に長寿命放射性物質を含んでいるため、浅地中処分で提供されるよりもより高い程度の「閉じ込め」と「隔離」が必要となる廃棄物。しかしながら、ILWは、貯蔵および処分期間中の熱放散に対する措置を必要としない、あるいは限られた措置だけを必要とする。ILWは長寿命放射性物質、とくにアルファ線を放出する放射性物質を含むかもしれず、それは、制度的管理に依存することができる期間において、浅地中処分に対して受入れ可能となる放射能濃度レベルまでには減衰しない。それゆえ、この区分の廃棄物は、数10メートルのオーダーから数100メートル程度のより深い深度での処分が必要となる。

⑥ 高レベル廃棄物 (HLW)：放射性崩壊プロセスにより多量の熱が発生するほど十分に放射能

濃度のレベルが高い廃棄物、あるいは、そのような廃棄物に対する処分施設の設計において考慮される必要がある長寿命放射性物質が大量である廃棄物。通常、地下数100メートル程度から、それ以上の深く安定な地層への処分が、HLWの処分オプションとして一般的に認識されている。

(3) 日本の放射性廃棄物の区分と処分方法

一般的に、放射性物質の含有量が多くなるほど、放射性物質の「閉じ込め」と生活環境からの「隔離」の必要性が高まる。しかしながら、実際の区分と処分の選択においては、各国の方針に基づいて、含まれる放射性物質の種類と量に応じて適切に区分した上で処分するという考え方にに基づき、必要な安全規制等の枠組みの整備を進めるとともに処分を推進してきており、区分や処分方法は必ずしも図2と同じではない。

日本の放射性廃棄物の区分と処分方法を図3に示す。放射性廃棄物は、地下300メートル以上の深さの地層に設置された地層処分⁽⁴⁾、地表から深さ70メートル以上の地下に設置された中深度処分、地上または地表から深さ70メートル未満の地下に設置されたピット処分、あるいはトレンチ処分に区分されて処分される⁽⁵⁾。

放射能レベルに応じた深度や障壁(バリア)を選び、トレンチ・ピット処分、中深度処分、地層処分に分けて処分が行われる。

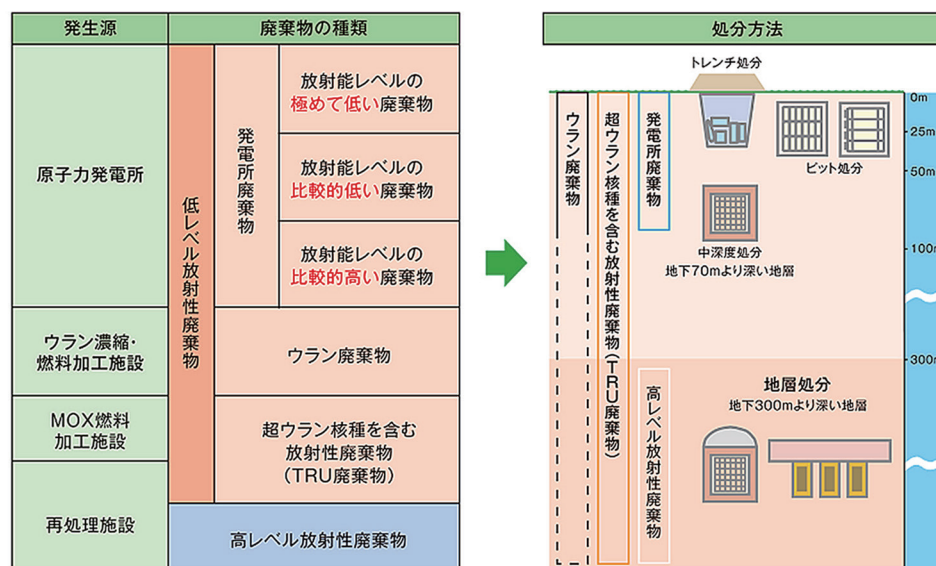


図3 放射性廃棄物の区分と処分方法（日本）⁽⁶⁾

3. 放射性廃棄物の処分の安全確保

安全原則, 基本安全原則 (SF-1) ⁽⁷⁾ によれば, 処分の基本安全目的は, 人と環境を電離放射線の有害な影響から防護することである。個別安全要件, 放射性廃棄物の処分 (SSR-5) ⁽⁸⁾ は, この基本安全目的を達成するために現在採用されている方策は, 必要な程度に廃棄物を「閉じ込め」, 生活環境からそれを「隔離」することである, とし, 処分に関する安全目的と安全規準を設定し, 放射性廃棄物の処分において満足されなければならない26の要件を規定している。

以下では, 日本の浅い地中での処分 (ピット処分) を例として, 「閉じ込め」と「隔離」について説明する。図4に日本のピット処分の概念図 ⁽⁹⁾ を示す。

原子力安全委員会の「低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について」 ⁽¹⁰⁾ は, 処分の方法毎に処分できる低レベル放射性廃棄物中の放射性物質濃度の最大値を定めるものである。この中で, ピット処分に想定された処分場管理期間終了後の人の被ばくは, 図5に示す3つのシナリオ (建設シナリオ, 居住シナリオおよび河川水利用シナリオ) の被ばく経路で生じることが想定されている。

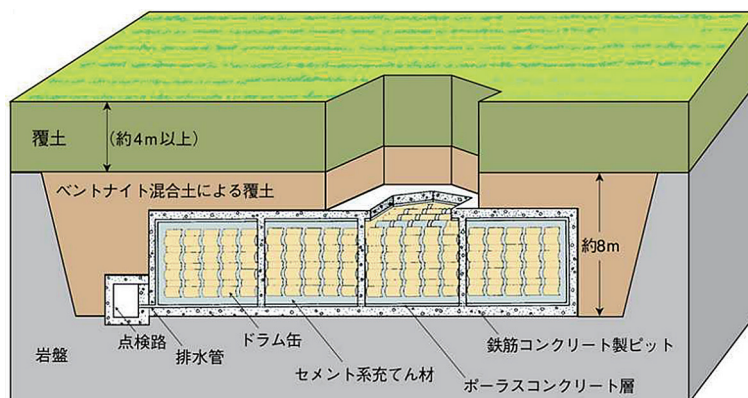


図4 ピット処分の概念図 ⁽⁹⁾

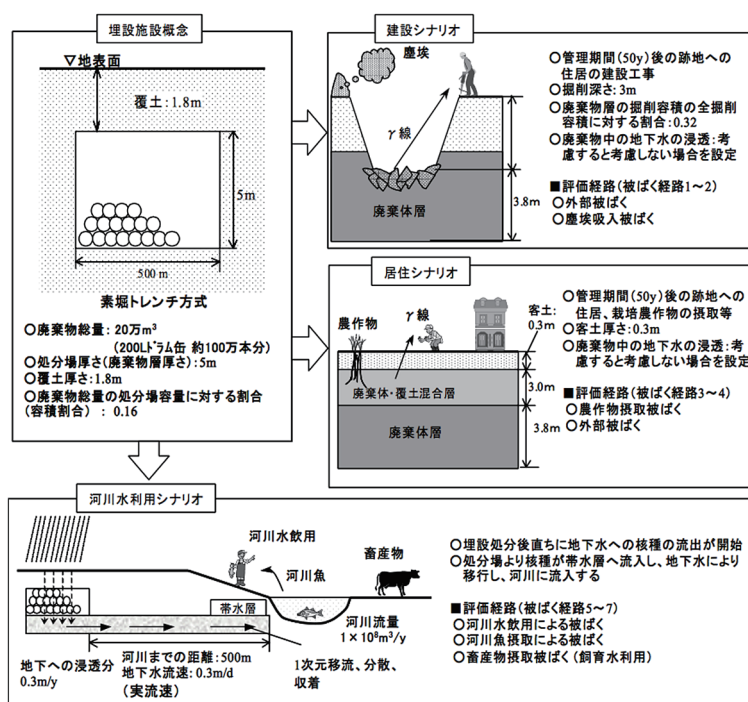


図5 ピット処分の管理期間終了後の評価シナリオ ⁽¹⁰⁾

河川水利用シナリオによる被ばくは、放射性物質が、処分施設（廃棄物、構造物など）から地下水へ漏えいし、地層中を移行し、河川に流出した後、飲用水、河川産物、畜産物として人に摂取されることにより発生する。これは、SSR-5で、放射性廃棄物に含まれる放射性物質の、廃棄物から生活環境への移行を常に抑制し、減らし、遅らせること（「閉じ込め」）を要求していることに対応する。建設シナリオと居住シナリオによる被ばくを防止するため、特に浅地中処分施設の場合は、廃棄物を定置した後の数100年間は処分場に人が侵入しないように管理期間を設けて管理するので、管理期間が終了した後に発生する。これは、SSR-5で、廃棄物を生活環境から「隔離」し、偶発的な廃棄物への人間侵入の可能性と全ての可能性のある影響を実質的に減らすことを要求していることに対応する。

いずれのシナリオでも、人の被ばくを減らす上で大切なことは、図6に示すように、放射性物質の放射能が時間の経過とともに減少するという特徴である。

このような特徴を踏まえると、放射性物質の「閉じ込め」においては、人の生活環境への到達時間をできる限り長くすることが、「隔離」においては、処分場の閉鎖後の管理期間の長さが、それぞれ重要になる。

なお、放射能濃度上限値を下回るからと言っ

て、直ちに埋設事業の許可がなされるものではなく、廃棄物埋設事業の許可の際の安全審査によって、個々の廃棄物埋設施設・埋設計画ごとに安全性が見極められ、その可否が判断されることに留意が必要である。

地層処分では、高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性物質が多く寿命も長いことから、「隔離」は、ピット処分のような人による数100年間の管理期間に依存することはできない。

SSR-5では、「中レベルおよび高レベル廃棄物に対しては少なくとも数1000年程度の隔離をもたらすことを目指さなければならない。そのようにすることによって、処分システムの自然の変化と施設の擾乱を引き起こす事象の双方に考慮が払われなければならない」ことを要件としており、「放射性廃棄物の地層処分に対して、隔離は、処分の深度の結果として主に地層処分施設を設置する地層（母岩という。）によってもたらされることになる。」、「安定な地層に処分施設を設置することによって、侵食や氷河作用のような地形学的プロセスの影響からの施設の防護をもたらす。処分施設は、有意な地下鉱物資源または他の価値のある資源がある既知の地域から離れて設置されなければならない。これは、施設の偶発的な擾乱の可能性を減少させ、また資源の掘削ができなくなることを避けることになる。」としている。

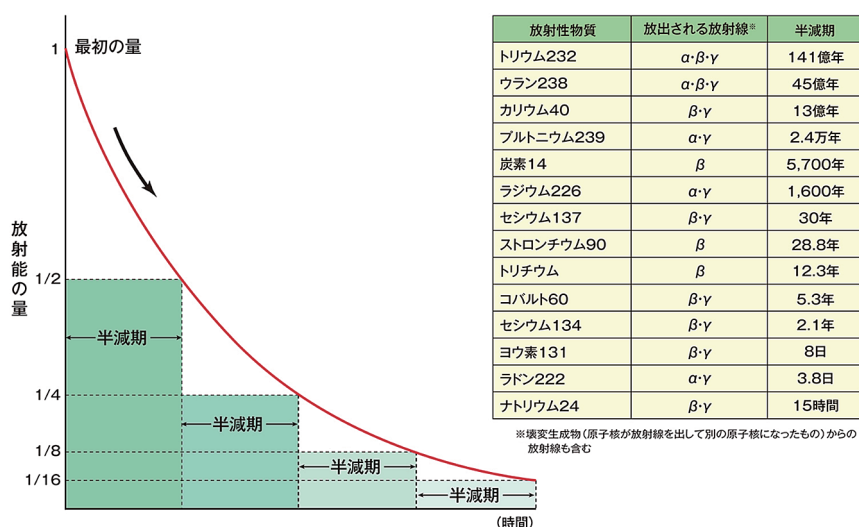


図6 放射性物質の特徴 (6)

4. フランスにおける高レベル放射性廃棄物の地層処分研究の概要

本章と次章では、高レベル放射性廃棄物の地層処分でどのようにして安全確保を行うのかについて、フランスの事例⁽¹¹⁾⁽¹²⁾を紹介する。

(1) 地層処分研究の経緯

フランスでは、1991年に制定された「放射性廃棄物管理研究法」⁽¹³⁾により地層処分の実現可能性調査が本格的に開始された。

処分の実施主体である放射性廃棄物管理機関(Andra)は、フランス東部のムーズ県とオート＝マルヌ県にまたがるサイトで地下研究所を建設した。そこで、カロボ・オックスフォードイアン粘土層(処分場の候補地層)の特性、工学技術等の調査を行い、それらの成果も踏まえて、2005年に研究成果を、「処分場の設計・操業安全・可逆性」、「処分場の地層と工学バリアの長期変遷」、「処分場閉鎖後の安全評価」の3分冊の報告書“Dossier 2005”としてとりまとめた。

(2) 地層処分の安全防護目標

地層処分の安全規則は、規制機関である原子力施設安全局(DSIN)の安全基本規則(RFS: Règle fondamentale de sûreté) III .2.f 放射性廃棄物の深地層処分⁽¹⁴⁾(2008年改訂))に規定されている。閉鎖後長期安全性に係る主な規定内容を以下に示す。

① 基本目標

- 短期的および長期的な人および環境の防護が基本的な目標である。
- 考慮されるあらゆる状況において、放射性物質の放出に関連したリスクに対する防護がもたらされなければならない。また、一定期間以降は保証することのできない制度的管理に依存してはならない。
- 設計概念は、「放射線学的な影響を、技術的、経済的および社会的な要素を考慮した上で、合

理的に達成可能な限り低く制限」できるものでなければならない。

② 放射線防護基準等

- 基準状況：発生が確実であるか、極めて可能性の高い事象に伴って予想される処分場の将来の状況が、0.25 mSv/年に制限、1万年間の天然バリアの安定性立証と基準適用、1万年以降は定性的評価により補足。
- 仮想状況：自然を起源とする、あるいは人間活動に関連した偶発的な事象の発生に対応して生じる状況。確定的影響を生じるレベルを大きく下回ること。リスク概念の適用が可能。
- 評価期間：明確には規定されていない。

③ 隔離に関連する基準(サイト選定のための技術基準等から抜粋)

- 安定性：とくに1万年未満の期間に関して、この安定性が(限定的かつ予見可能な変遷をカバーする形で)立証されなければならない。
- 最小深度要件：サイトは、天然バリアの隔離性能が侵食現象(とくに氷河作用後のもの)、地震の効果、そして通常の人による侵入によって著しい影響を受けないことが、処分場の建設計画深度により保証されるように選定しなければならない。また、こうした方法による擾乱を受けやすい地表ゾーンの厚さが、150～200m程度になると仮定することも可能。
- 地下資源：サイトは、既知または推測される地下資源が重要性な性質のものである区域を避けて選定しなければならない。
- 記録保存：人の防護は、「限られた期間(500年)を超えて確実に期待することが不可能な制度的管理に依存することなく」提供されなければならない。

(3) 処分概念とその特徴

① 処分場サイト

処分場サイトになりうる互換性ゾーン(ムーズ/オート＝マルヌ地下研究所で研究されたカロボ・オックスフォードイアン粘土層の特性：厚さ130m以上、機械的・物理的・化学的・閉じ込め性に関する特性、および最大深度、と置き換えることができる範囲)を図7に、カロボ・オックスフォードイアン粘土層と周辺地層を図8に示す。

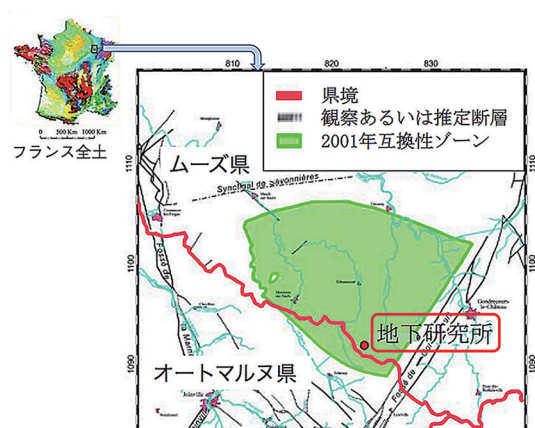


図7 地下研究所サイトと互換性ゾーン (11)

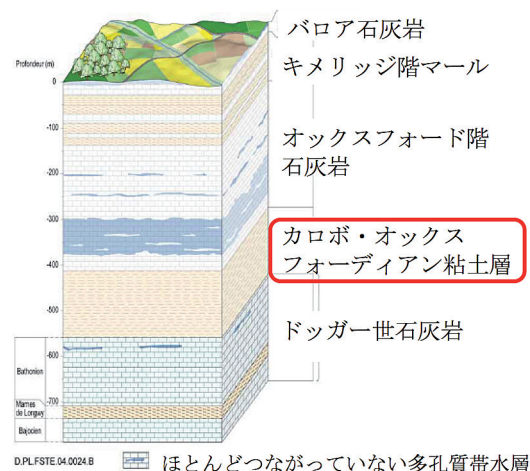


図8 カロボ・オックスフォードイアン粘土層と周辺地層 (11)

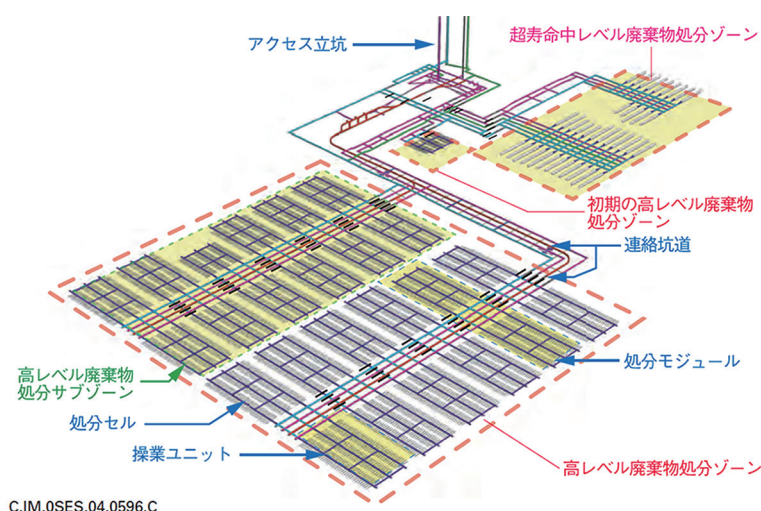


図9 処分場の全体概念 (12)

②処分概念

処分場の全体概念を図9に示す。深度約500mのカロボ・オックスフォードイアン粘土層の中央に設置される処分場地下施設はアクセス立坑により地上と連絡している。処分セルは処分の最小の単位であり、約70cm径で約40m長の坑道内部に鋼製スリーブが敷設され、その中に高レベル廃棄物が横置される。日本と異なり、周囲にベントナイト緩衝材は設置されない。高レベル廃棄物の発熱による粘土層への影響を避けるため、初期温度が90℃、1000年後には70℃以下になるように配置している。また地下水温度が50℃以下になるまではガラス固化体と接触しないようにオーバーバック

に密封するよう設計している。処分セルと高レベル廃棄物パッケージを図10に示す。

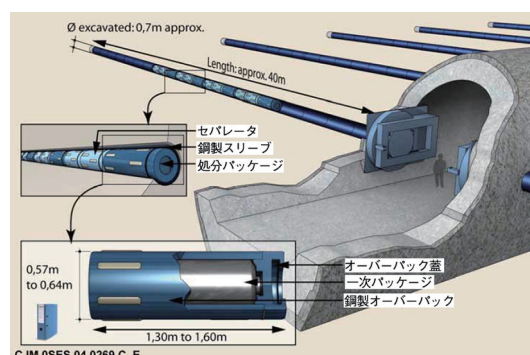


図10 高レベル廃棄物の処分セルと高レベル廃棄物パッケージ (12)

表 1 対象廃棄物 (11) (12)

項 目	特 徴
対象廃棄物： 高レベルガラス固化体 (C1+C2)	C1：燃料 UOx1 (平均燃焼度 33 GWd / t), UOx2 / URE (平均燃焼度 45GWd / t), および UOx3 (平均燃焼度 55 GWd/t) の再処理から発生する高レベル廃液をガラス 固化したもの C2：燃料 UOx2 / URE (平均燃焼度 45GWd / t), および UOx3 (平均燃焼度 55 GWd/t) の再処理から発生する高レベル廃液をガラス固化したもの URE は回収ウランを含む燃料
処分量	32,100 本 (C1：4,640 本, C2：27,460 本) (42,300tHM の使用済燃料に相当)

表 2 処分概念の主な特徴 (11) (12)

項 目	特 徴
地層	母岩：カロボ・オックスフォーディアン粘土層。層厚 130 ～ 160m 透水係数 $5 \times 10^{-13} \sim 5 \times 10^{-14}$ m/s, 拡散係数 2.5×10^{-11} m ² /s (トリチウム水), 5×10^{-12} m ² /s (ヨウ素), 還元性, pH7 程度, 周辺地層も移流 / 分散, 拡散による地下水移行経路として考慮するが放射性物質の減衰効 果は考慮せず。地下水流出地点は 3 ヲ所を評価し保守的な地点 (Saulx 溪谷) を選択
処分深度	約 500m, カロボ・オックスフォーディアン粘土層のほぼ中間
ガラス固化体	ホウケイ酸ガラス。ケイ素の溶解度律速。溶解速度モデルは 2 段階 (初期溶解速度 $V_0 \cdot S$ と残存溶解 速度 V_r)。50℃ ～ 90℃ の温度では初期速度は 30 倍, 残存速度は 15 倍に加速 放射性物質はガラスマトリックスとの調和溶解を想定 総溶解期間は少なくとも 30 万年。処分坑道横置き
オーバーバック	非合金鋼, 厚さ 55mm, 寿命 4,000 年 (保守的評価。現実的評価では約 15,000 年), 製造時の欠陥率は $10^{-4} \sim 10^{-5}$, C1+C2 では 1 本が閉鎖後 200 年で貫通を想定
処分セルシール	低透水性。ベントナイト等。カロボ・オックスフォーディアン粘土層とともに, 処分セルの地下水の 循環を抑えガラス溶解を抑制
坑道, 立坑シール	低透水性。ベントナイト等。地下水の移流を制限し循環を抑制
埋め戻し材	掘削粘土の再利用, プラグの支持, 地圧による坑道破損の防止, 低透水性

③ 処分概念の主な特徴

本稿で紹介する処分概念の対象廃棄物と処分概念構成要素の主な特徴を各々表 1, 表 2 に示す。

5. フランスにおける高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価の概要

(1) 安全評価シナリオ

Andra は, 表 3 に示すように, 安全評価シ

ナリオを, 通常変遷シナリオ (SEN: Scénario d'évolution normale) (構成要素が期待される機能を果たし最も可能性の高いシナリオ) および変動変遷シナリオ (SEA: Scénario d'évolution altérée) (安全機能の機能不全あるいは非常にありそうもないシナリオ) に区分し, さらにその下にいくつかのケースを設定して, 「閉じ込め」, 「隔離」に関連する解析を行っている。

表 3 安全評価シナリオの全体 (11)

通常変遷シナリオ (SEN)	レファレンスケース (防護基準の基準状況に相当)	
	感度解析ケース	不確実性ケース
		代替モデルケース
変動変遷シナリオ (SEA)	シーリング材の欠陥シナリオ	
	パッケージの欠陥シナリオ	
	機能の著しい欠陥シナリオ	
	ボーリング掘削シナリオ	

(2)「閉じ込め」に関連する安全評価

通常変遷シナリオのレファレンスケースの安全評価結果に基づいて説明する。

①安全評価モデル

通常変遷シナリオの安全評価モデルを図 11 に示す。

②3つの主要な安全機能

Andra は、カロボ・オックスフォーディアン粘土層および人工バリア等工学的構造物の閉じ込め性を踏まえて、以下の3つの主要な安全機能（カッコ内は寄与する主な特性）を設定している。

安全機能1：地下水の循環を抑制する機能（低透水性、拡散場）

カロボ・オックスフォーディアン粘土層の優れた低透水性の性質により、放射性物質の移流

による移行が制限され、拡散による移行が支配的な場となっている（ヨウ素 129 の解析例は図 15 に示す）。

廃棄物パッケージがもはや十分に隔離する役割を果たさなくなった場合、長期的に放射性物質の拡散は不可避である。移流運動が存在しないことは、劣化プロセスの反応速度をより遅く、より良好に制御するのに寄与する。図 12 に示すように、移流を制限することは、長期的には放射性物質の移行にも有利である。

安全機能2：放射性物質の放出制限と処分場に固定する機能（容器、ガラス固化体、沈殿）

オーバーバックによる 4000 年間の密封、ガラス固化体による閉じ込め、一部の放射性物質（溶解度を越えるもの）の沈殿により、図 12 に示すように、放射性物質は処分セルに固定される。

安全機能3：放射性物質の移行を遅延し低減する機能（地層の低透水性、収着性）

この機能は、図 13 に示すように、「放射性物

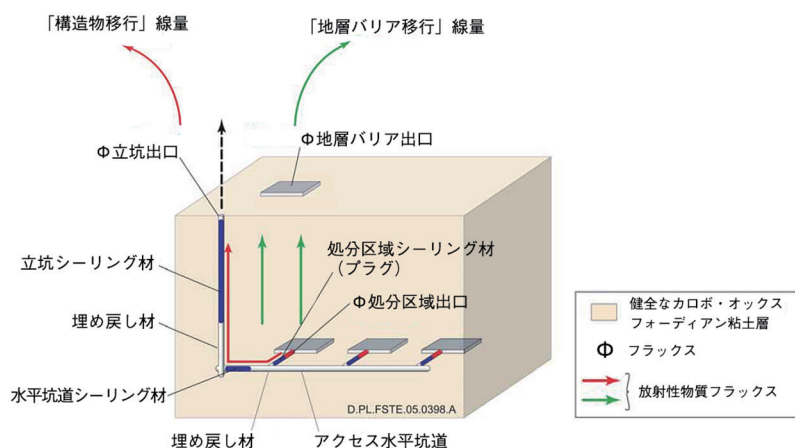


図 11 通常変遷シナリオの安全評価モデル (11)

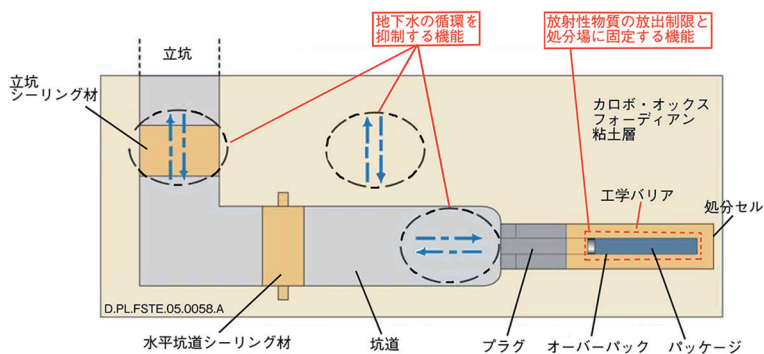


図 12 安全機能1, 2 (11)

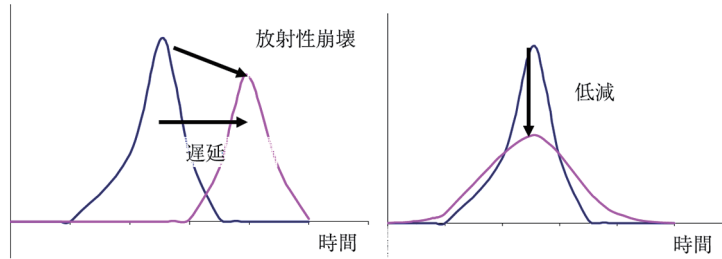


図 13 安全機能 3 ⁽¹¹⁾

質の放出を制限し、それらを処分場に固定する」機能が完全に効果的である期間は適用されないが、最初の放出が起こると直ちに作用し始め、それらの移行を遅らせ、低減することが可能である。「遅延」とは、それらが生活環境に移行するのにかかる時間を増加させることで、放射性崩壊による放射能の減衰によりその影響を減少させることを意味する。「低減する」とは、時間と物理的な二重の意味で低減することを意味しており、放射性物質の流れがカバーする距離が大きいほど、有害度が小さくなり、生活環境に到達するまでに時間がかかる。遅延と低減の機能により、生活環境への放射性物質の移行量を制限しピーク値を下げる。

③ 放射性物質の閉じ込めの評価

閉じ込め性に関連して、Andra が考慮している半減期が 6 カ月を超える 144 種類の放射

性物質（アクチノイド、核分裂生成物、放射化生成物）の移行解析が行われた。結果の概要を以下に示す。

(a) アクチノイドの予備評価

ガラス固化体、カロボ・オックスフォーディアン 粘土層におけるアクチノイドの高い化学的保持性能（溶解度が低く沈殿する、またガラス変質生成物への保持も大、収着性）のため、**図 14** に示すように「アクチノイドの放出を抑制し、処分場に固定する機能」により 50 万年では処分場近傍にほとんど留まり、100 万年以上にわたり粘土層に留まる結果となったことから、通常変遷シナリオでは対象外とした。

(b) 核分裂生成物と放射化生成物の選択

2 段階の選択プロセスが採用された。第 1 段階では、母岩における理論上の移行時間が

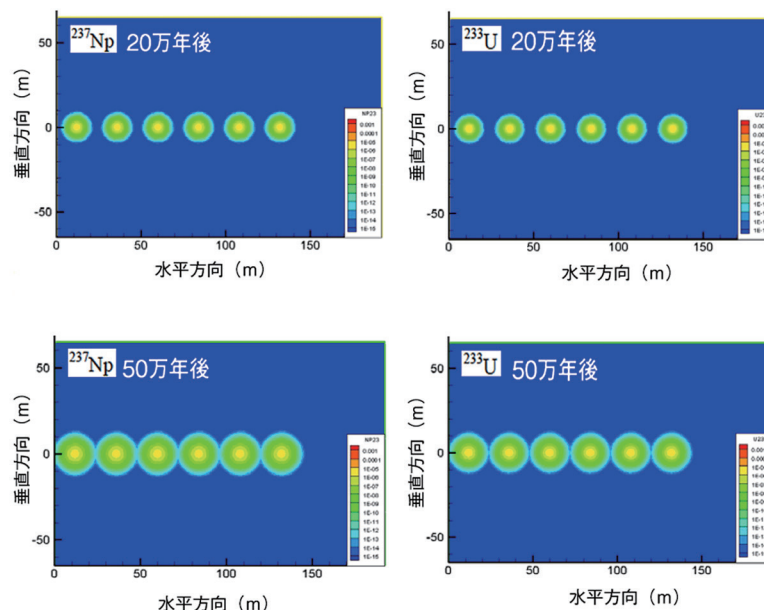


図 14 予備的計算による収着性の最も低いネプツニウム 237（半減期 214 万年）とウラン 233（半減期 16 万年）の 20 万年後と 50 万年後の質量濃度 (mol/m³) 分布 ⁽¹¹⁾

数 10 万年であることを踏まえ、母岩中で崩壊する半減期 1000 年未満の放射性物質を排除した。第 2 段階では、半減期が 1000 年を超える放射性物質を検討し、影響を与えない放射性物質を排除した。

また、このアプローチを検証し、それがいかなる重要な放射性物質も除外することにならないことを確認するために、半減期 1000 年以上のすべての放射性物質に関する包括的な計算も行われた。

以上により、すべての異なるタイプの廃棄物パッケージを考慮した後、最終的に、通常変遷シナリオの影響計算に使用する 1000 年を超える半減期を有する 15 種類の放射性物質と、ニオブウム 93m（ジルコニウム 93 の子孫）の 16 種類の放射性物質を選択した。表 4 にそれらの放射性物質を示す。

④安全評価結果

(a) 放射性物質の移行解析結果

高レベルガラス固化体から放出され、カロボ・オックスフォーディアン粘土層中の移行に伴う評価対象放射性物質の減衰（100 万年間）の検討結果を表 5 に示す。主な結果は以下の通りである。

● 検討対象の放射性物質の約半数が、カロボ・オックスフォーディアン粘土層内の 10 メートルの間で完全に減衰（> 99%）。したがって、それらはこの外では無視できる量である。

表 4 通常変遷シナリオで考慮される放射性物質⁽¹¹⁾

放射性物質	アニオン/カチオン	半減期（年）
¹²⁹ I	anionic form	15,700,000
¹⁰⁷ Pd	cationic form	6,500,000
¹³⁵ Cs	cationic form	2,300,000
¹⁰ Be	cationic form	1,600,000
⁹³ Zr (⇒ ⁹³ Nb)	cationic form	1,530,000 (TNb93m ≒ 16.4)
³⁶ Cl	anionic form	302,000
⁹⁹ Tc	cationic form	213,000
⁴¹ Ca	cationic form	103,000
¹²⁶ Sn	cationic form	100,000
⁵⁹ Ni	cationic form	75,000
⁷⁹ Se	anionic form	65,000
⁹⁴ Nb	anionic form	20,300
¹⁴ C	anionic form	5,730
⁹³ Mo	anionic form	3,500
¹⁶⁶ Ho	cationic form	1,200

- カロボ・オックスフォーディアン粘土層上部、すなわち母岩の外では、ほとんどの放射性物質の流れが完全に減衰する。同じことがカロボ・オックスフォーディアン粘土層下部でもいえる。
- ヨウ素 129、塩素 36、セレン 79、カルシウム 41 の 4 つの元素だけが、カロボ・オックスフォーディアン粘土層上部においてまだ存在している。しかし、カルシウム 41 とセレン 79 はすでに相当量が減衰している。
- ヨウ素と塩素のみが減衰量が小さく、塩素が 65～75%、ヨウ素が 20～30% である。

(b) ヨウ素 129 の移行解析結果

主要放射性物質であるヨウ素の移行挙動について、インベントリの多い使用済燃料を対象にして解析している。

カロボ・オックスフォーディアン粘土層中の移行に関する数値シミュレーションの結果から得られた拡散と移流によるモル流量の時間変化から、拡散による移行が移流による移行に対してほぼ 2 桁大きいことから、図 15 に示すように、拡散支配の場となっていることが確認された。

また、処分場構造物 / カロボ・オックスフォーディアン粘土層中を移行するヨウ素 129 の質量分布に関する数値シミュレーションの結果から得られたヨウ素 129 の移行経路

表 5 通常変遷シナリオで考慮される放射性物質の減衰⁽¹¹⁾

放射性物質	減衰に寄与する現象	粘土層（上部＋下部）から放出される放射性物質の質量の減衰
¹⁴ C	拡散	完全に減衰（100%）
⁹³ Mo	拡散，収着	
¹⁰ Be	収着	
^{93m} Nb		
⁹⁴ Nb		
⁹⁹ Tc		
¹²⁶ Sn		
^{166m} Ho		
¹³⁵ Cs		
¹⁰⁷ Pd		
⁵⁹ Ni		
⁹³ Zr		
⁷⁹ Se	拡散，沈殿	>99. 95%
⁴¹ Ca	拡散，収着	90～95%
³⁶ Cl	拡散	65～75%
¹²⁹ I		20～30%

注：背景が黄色の放射性物質は粘土層の 10m 以内で完全に減衰
背景が緑色の放射性物質は粘土層の 10m 以内でほとんど減衰

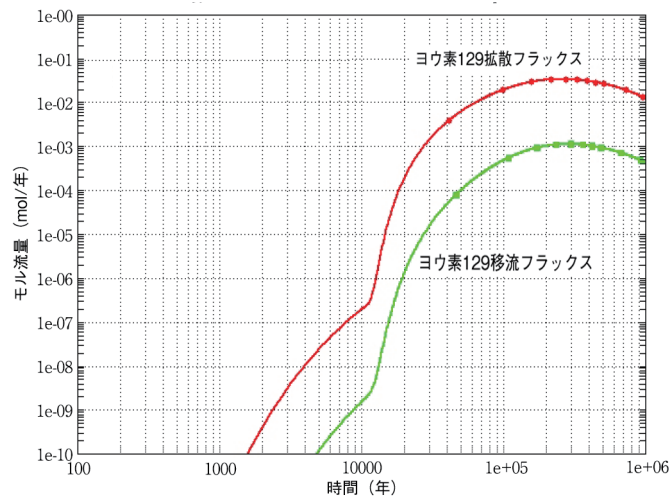


図 15 通常変遷シナリオ – カロボ・オックスフォーディアン粘土層と上部地層との境界における使用済燃料のヨウ素 129 のモル流量の時間変化⁽¹¹⁾

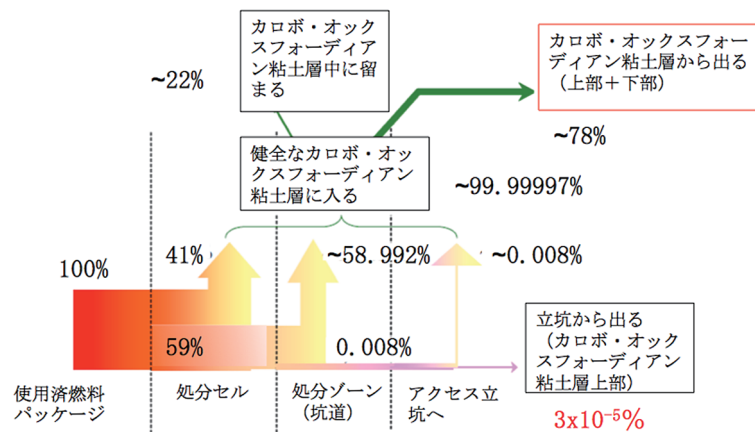


図 16 通常変遷シナリオにおける異なる移行経路を流れる使用済燃料のヨウ素 129 の質量分布⁽¹¹⁾

毎の質量分布を図 16 に示す。概要は以下の通りである。

- 廃棄物セル内を移行した後、パッケージから放出される質量の 41% が直接カロボ・オックスフォーディアン粘土層に到達する。
- パッケージから放出される質量の 59% が、パッケージとアクセス坑道（特に粘土プラグ）との間に位置する構造を通して拡散することによって坑道に達する。これは、パッケージとアクセス坑道との間で高濃度勾配となるようプラグ周囲に課されたゼロ濃度假説により保守的に計算した結果である。この保守的な仮説にもかかわらず、処分ゾーンの処分セルアクセス坑道および接続坑道に到達する 59% の質量のうち、ほぼすべてが最終的にカロボ・オックスフォーディアン粘土層に再び合流する。
- その結果、立坑から放出されるヨウ素 129 の

質量は総質量の約 $3 \times 10^{-5} \%$ となり、健全なカロボ・オックスフォーディアン粘土層の上部と下部から出るものより約 6 桁小さく、無視できる。

- ヨウ素 129 の約 22% はカロボ・オックスフォーディアン粘土層中に留まっており、生活環境に放出されていない。
- 以上の結果、最終的に使用済燃料パッケージから放出されたヨウ素 129 の質量のほぼすべて (99.999%) は、健全なカロボ・オックスフォーディアン粘土層を拡散により移行した後、カロボ・オックスフォーディアン粘土層の上部または下部から放出される。

(c) 線量評価結果

図 17 に、通常変遷シナリオの安全評価結果を示す。図 17 は、保守的に移行距離が短く希釈率の少ない流出地点（Saulx 谷）にお

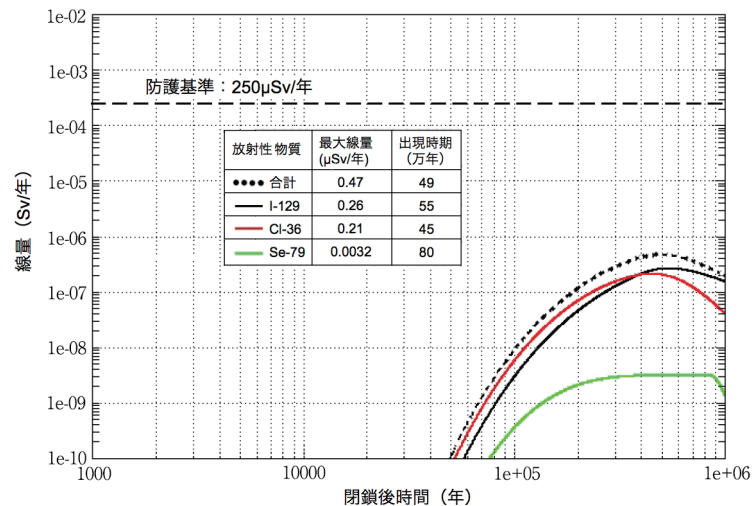


図 17 通常変遷シナリオの安全評価結果 - レファレンスケース - 100 万年水理モデル - (流出地点: Saulx 谷) - ガラス固化体⁽¹¹⁾

ける井戸水シナリオ（飲用水，農業用水）の被ばく線量を示している。以下に概要を示す。

- 粘土層の低透水性，収着性により，放射性物質の生活環境までの移行時間が長いことから，評価対象 16 放射性物質のうち，大半の放射性物質が放射性崩壊により影響を無視できるレベルまで減衰した。
- 一方，長半減期で，溶解度が大きく，粘土層への収着係数が小さい放射性物質（ヨウ素 129，塩素 36，セレン 79，特に前二者）が線量に寄与する重要放射性物質として現れている。その合計線量は最大約 $0.5 \mu\text{Sv/年}$ であり，約 50 万年後に現れる。主要放射性物質とその線量（出現時期）はヨウ素 129，約 $0.3 \mu\text{Sv/年}$ （約 55 万年後），塩素 36，約 $0.2 \mu\text{Sv/年}$ （約 45 万年後），セレン 79，約 $0.003 \mu\text{Sv/年}$ （約 80 万年後）となっている。
- いずれも防護基準値の $250 \mu\text{Sv/年}$ を大きく下回っている。

なお，Andra は，評価期間として，100 万年まで評価を行うこととしている。その妥当性は，母岩の安定性の予測可能期間（母岩の特性を使用できると見込める期間），放射能インベントリの減衰，放射性物質が母岩を通過する期間（影響がピークになる期間）の考察に基づいて説明している。

（3）「隔離」に関連する評価

① 隔離に関連する安全機能

Andra は隔離に関連する安全機能について次の通り評価している。

（a）地表の現象や人間の侵入から廃棄物を隔離する

既存の情報やデータ，および自ら取得したボーリングデータなどに基づいた評価の概要を以下に示す。

- 少なくとも深さ 500 メートルに処分場を設置することによって，侵食や日常の人間活動などの現象から廃棄物を遠ざける。
- 火山の影響を受けない場所を選択することで，廃棄物が地表に隆起するのを防ぐ。
- 内部の地球力学に起因する処分場内の主要な垂直方向の動きに関連するリスクも研究されており，廃棄物を大幅に移動させる可能性のある動きの可能性を排除することができる。
- 氷河に起因する現象は，150 メートルを超える深さでは大きな影響を及ぼさない。
- 粘土層ははるかに長い期間安定しており，この状況が今後 100 万年で変化する可能性があるという兆候はない。
- 以上の状況では，廃棄物は，掘削の形で，意図的な人間の行動によってのみ地表に上がることができるが，このリスクは，処分場の近くに有意な鉱物資源など（石炭，石油，地熱資源）がないことによって制限される。また，地下の

探査で鉱物の堆積物や水源を利用する可能性はほとんどない。

これらの観点から、「処分場候補サイトとその地域は、RFS.III.2fの推奨事項に従って保証を提供する」等と評価している。

(b) 処分場の記録の保存

Andra は、フランスではじめての短寿命・低中レベル放射性廃棄物処分場（浅地中処分場）であるマンシュ処分場の操業を 1994 年に終了し、現在、モニタリング・監視等を実施している。マンシュ処分場の記録の保存は、処分場の詳細な記録と記録の要約の確立、掘削制限を伴う土地登記所への記録、およびコミュニケーションの取り決めの 4 つの要素に依存している。Andra は、マンシュ処分場の経験も参照して、地層処分場の記録の保存システムの検討を行っている。以下に概要を示す。

- 記録の対象は、初期の調査段階から始まる処分場プロジェクトの開始から、処分場の設計と正当性および安全性実証、処分場の建設、操業および定置する廃棄物処分パッケージの管理、処分場の段階的閉鎖と最終閉鎖までに関連する知識とデータであり、知識ベースとデータベースとして管理することにより処分場の記録が段階的に確立される。全体の期間は、可逆性が要求される期間に応じて約 100 年以上になる。

- 蓄積された知識が失われる可能性を防ぐために、知識ベースの記録自体と、それらを活用するために必要なツールや機器を保護するために、いくつかの異なる方法を使用できる。さまざまな場所に保存されている別々のバックアップ媒体で重複するアーカイブは、記録を保存し、偶発的な損失を防ぐために一般的に使用される方法の 1 つである。操業者は、ほぼ毎日、取得および蓄積された知識を使用する必要があるため、処分場が操業段階にある間は、データの保存に問題はない。

- マンシュ処分場の記録の保存の要素を地層処分の場合に移すと、RFS.III.2f で提案されているように、処分場の記録を保存するための合理的な期間は約 5 世紀であると考えられることになる。さらに遠い将来にわたって、情報を失うことなく 2 セットの記録が定期的かつ正しく複製されることを保証することは困難である。処分場の

存在の記録をより長期間保存する必要がある場合のために、数 1000 年にわたる地表標識（巨石やその他の構造物など）の有効性を研究するための国際的な研究が、現在、進行中である。これらの研究は、地表標識の盗難や劣化のリスク、および、例えばそれらが正しく保存されていたとしても、私たちの世代によって与えられた真の意味を維持することの難しさに直面している。

Andra は、処分場サイトの選択により、地表の現象が処分場に及ぼす影響や放射性物質が地表に隆起する可能性を排除できるとしている。

一方で、有意な天然資源を有さないサイトを選択したとしても、ボーリング掘削による偶発的な人間の侵入など、特定の種類の行動を完全に排除することはできず、また、記録の保存を行ったとしても、それが無期限に続くことを信頼することはできないとしている。このため、深層防護の関連で、この掘削が天然資源の探査によって動機付けられていない場合も含め、ボーリング掘削が処分場ゾーンを横切る事象を設計や安全評価で考慮するため、コアの表面加工、破片、削りくず、および汚染した岩石に起因する状況、1 つまたは複数の試錐孔の放棄に起因する状況を調査している。

6. おわりに

高レベル放射性廃棄物の地層処分は、日本を含む世界各国で開発に取り組んでいる方法である。フィンランドは建設を進めており、数年以内に操業を開始する、スウェーデンは建設を開始する、フランスは近年中に建設許可を申請する、などが予定されている。日本では文献調査を進めている。

地層処分とは、高レベル放射性廃棄物を地下深部の地層という天然のバリアと廃棄物形態（ガラス固化体、あるいは使用済燃料）、容器、緩衝材等の工学的に設けたバリアの組み合わせにより、長期間にわたり「閉じ込め」、生活環境から「隔離」する方法である。その結果、高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性物質

の生活環境への移行を抑制し、放射性崩壊により減衰させるなどによって、生活環境に到達する量を減らし、人に与える影響を問題のないレベルにまで下げることができる。

地層処分を進めるためには、地層処分の安全確保の仕組み、その結果どのような放射性物質が生活環境に出てくる可能性があるのか、安全防護目標を下回ることができるのか、などについて、より多くの方々に理解していただくことが必要である。本稿がその一助となることを期待している。

参考文献

- (1) IAEA, Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, Safety Standard Series No. RS-G-1.7, IAEA, Vienna, 2004
- (2) DECC, et al, UK Strategy for the Management of Solid Low Level Waste from the Nuclear Industry, 2016
- (3) IAEA, Classification of Radioactive Waste, Safety Standard Series No. GSG-1, IAEA, Vienna, 2009
- (4) 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律
- (5) 核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則
- (6) 日本原子力文化財団, 原子力・エネルギー図面集
- (7) IAEA, et.al, Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1, IAEA, Vienna, 2006
- (8) IAEA, Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Requirements, IAEA Safety Standards Series No. SSR-5, IAEA, Vienna, 2011
- (9) 原子力規制庁, 第二種廃棄物埋設に係る規制制度の概要, 平成 27 年 1 月 26 日
- (10) 原子力安全委員会, 低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について, 平成 19 年 5 月 21 日
- (11) Andra, Dossier 2005 Argile Tome Safety evaluation of a geological repository, 2005
- (12) Andra, Dossier 2005 Argile Tome Architecture and Management of a Geological Disposal System, 2005
- (13) Loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs, 1991
- (14) Direction de la Sûreté des Installations Nucléaires - 10 Juin 1991- Règle n° III.2.f - Stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde, 1991 (2008 年改訂)