

原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT FUNDING AND RESEARCH CENTER TOPICS

2018.6.NO.126

目次

センターの活動状況	①
放射性廃棄物の処分と分離変換（その1）	③

センターの活動状況

I 運営状況

第26回理事会の開催

平成30年6月4日（月）開催の第26回理事会において、平成29年度事業報告、平成29年度決算及び第19回評議員会（定時）の招集について、資料に基づき説明し、その承認を求めたところ、それぞれ原案のとおり、承認可決されました。

第19回評議員会（定時）の開催

平成30年6月20日（水）開催の第19回評議員会（定時）において、平成29年度事業報告及び決算について、説明報告し、了承されました。また、理事の選任について、原案のとおり、承認可決されました。

今回の選任により、次の方が交代されました。

（敬称略）

区分	退任者	新任者	新任者所属・役職
理事	海老塚 清	高本 学	一般社団法人日本電機工業会 専務理事

Ⅱ 成果等普及活動の実施状況

平成 30 年度 第 1 回原環センターセミナーの開催

放射性廃棄物処分の安全評価から処分の全体像を把握する第一歩として、安全評価の入門知識を習得したい技術者・研究者を対象とした、第 1 回原環センターセミナー「放射性廃棄物最終処分の安全評価の基礎Ⅰ」を以下のとおり開催しました。このセミナーでは、弊センターが刊行した「放射性廃棄物処分の原則と基礎」(朽山修著)に基づき以下のプログラムで安全評価の基礎知識の講義を行いました。講義後の総合討論では、講義への質疑応答を通じて、理解を深めていただきました。

開催日時：平成 30 年 5 月 24 日（木） 10:30～18:30

開催場所：京都大学 東京オフィス A, B 会議室

講師：公益財団法人原子力安全研究協会

技術顧問 朽山 修 氏

プログラム：

講義 1：放射性廃棄物と社会

- 廃棄物と環境
- 廃棄物の処分を巡る慣行：条約や法令および処分施設
- 廃棄物の管理の基本的考え方
- 放射性廃棄物の管理
- 社会における処分の実践：リスクコミュニケーション

講義 2：核反応と放射線

- 原子の構造
- 核反応
- 放射線と物質の相互作用

講義 3：放射線の健康影響と放射線防護

- 照射の生物学的影響
- バックグラウンド放射線と放射線の健康影響
- 規制勧告と防護基準

総合討論



平成 30 年度 第 1 回原環センター講演会の開催

平成 30 年度第 1 回原環センター講演会を以下のとおり開催しました。

開催日時：平成 30 年 6 月 15 日（金） 14:00～16:00

会場：原環センター 第 1、2 会議室

演題：欧米主要国における高レベル放射性廃棄物処分の進捗状況

講演者：技術情報調査プロジェクト

チーフ・プロジェクト・マネジャー 佐原 聡

使用済燃料の処分場としては世界で初めて建設許可が発給されたフィンランドを初めとして、特定の場所での地層処分事業の実施間近にあるスウェーデンとフランス、サイト選定プロセスの途上にあるスイスとカナダ、新たなサイト選定プロセスの開始に向けた準備が進められているドイツと英国、ユッカマウンテン計画継続を検討している米国を取り上げ、各国のサイト選定プロセスにおいて他国の成功例を取り入れたり、参考にしているコンセプトに焦点をあてつつ、現在の進捗状況を紹介しました。



放射性廃棄物の処分と分離変換（その1）

内閣府 原子力政策担当室 政策企画調査官
日本原子力学会フェロー
田辺 博三

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物¹⁾を対象とした放射性核種の分離、及び分離した放射性核種の核変換（以下、「分離変換」という。）の研究が、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構²⁾（以下、「JAEA」という。）を中心に長年取り組まれてきました³⁾。その中で、分離変換を行うことによって、放射性廃棄物の管理にどのような効果（メリット）を与え得るかという評価も行われてきました。簡単に述べますと、高レベル放射性廃棄物に含まれるある放射性核種を分離変換によって取り除き、処分場に処分しないこと等によって、放射性廃棄物の管理にどのような効果があるか、ということです。分離変換の調査研究の最近の成果は、例えば、（一社）日本原子力学会「放射性廃棄物の分離変換」研究専門委員会報告書、分離変換技術総論、（2016）としてまとめられています。

私と池田隆夫氏（日揮（株））はこの専門委員会にバックエンド分野から参加しまして、報告書の2.3章に、処分から見た分離変換への期待について意見をまとめました。本稿は、この内容をベースに、分離変換の廃棄物管理への効果を評価する際に考慮すべき事項とは何か、分離変換を実用化するためにどのような評価を行っていく必要があるかなどに関して、私見を紹介し、皆さんと一緒に考えたいと思います。

今後、今回の内容も参考にして、分離変換分野の方々とは処分分野の方々の間で理解の共有が出来ること、そして将来の発電炉、燃料サイクル及び廃棄物管理のあるべき姿に関して、客観的な情報にもとづき、より良い方向に向けた議論が行われることを期待しています。

ご説明の内容は、以下のとおりです。

- 何を対象としているのか、分離変換技術とはどのような技術か

- 分離変換から見た処分への効果の例
- 使用済燃料と分離変換後の放射性廃棄物を比較する場合の処分からみた注意事項
- 処分の立場からは、分離変換に何を期待するか、懸念事項は何か
- 分離変換の実用化のロードマップの必要性
- フランスにおける方針、研究の状況
- 分離変換技術の実用化に向けて

説明は本号と次号に分けて行います。今回は、使用済燃料と分離変換後の放射性廃棄物を比較する場合の処分からみた注意事項までを説明します。

2. 何を対象としているのか、分離変換技術とはどのような技術か

分離変換技術は、高レベル廃棄物を対象にしています⁴⁾。高レベル廃棄物には、図-1に例示しますように、すべての放射性廃棄物の放射能の90%以上が含まれています。一方、体積でいえば、高レベル廃棄物の体積はすべての放射性廃棄物の1%未満にしかすぎません。すなわち、非常に高濃度に放射性核種が存在していますので、分離変換を効率的・効果的に行う上では最も適したターゲットだといえます。

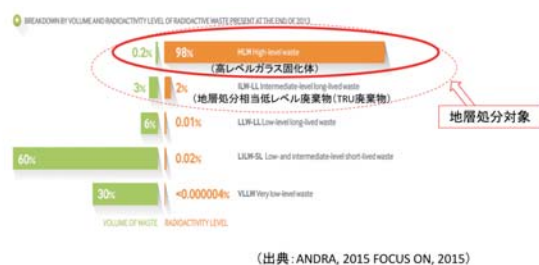


図-1 放射性廃棄物の放射エネルギーと体積の分布（フランスの例、2013年末時点の在庫、体積は処分体積相当）

1) 日本やフランスのように再処理方針の国の場合は、使用済燃料を再処理しウランとプルトニウムを回収した後に残る高レベル廃液等が対象です。なお、本稿では、文脈上誤解の無いように、あるいは引用した文献の表示にもとづき、高レベル廃棄物、高レベルガラス固化体、ガラス固化体、あるいは高レベル廃液と表記します。

2) JAEA 原子力基礎工学研究センター分離変換技術開発ディビジョン、次世代高速炉研究開発センターにおいて研究開発が行われています。もっと詳しくお知りになりたい方はこちらのサイトの情報もご覧ください。

3) 例えば、（一社）日本原子力学会「放射性廃棄物の分離変換」研究専門委員会報告書、分離変換技術総論、（2016）の1.3章参照。

4) ヨウ素 129 を対象とする研究もありますが、こちらは日本では地層処分相当の低レベル放射性廃棄物（以下「地層処分相当低レベル廃棄物」という。）に分類されています。

次に、高レベル廃棄物に含まれる放射性核種について紹介します。図-2の左側は原子炉で燃焼する前の新燃料です。ウラン 235 とウラン 238 で構成されています。これを原子炉で燃焼しますと、ウラン 235 の核分裂反応により熱エネルギーを発生しますが、同時に核分裂生成物 (FP) を生成します。また、中性子捕獲反応により、ウラン 236 が生成します。ウラン 238 の一部は、中性子捕獲反応により、プルトニウムやマイナーアクチノイド (MA: ネプツニウム、アメリシウム、キュリウム)、ウラン 234 が生成します。また、生成したプルトニウムの一部は核分裂し、熱エネルギーを発生し、同時に FP を生成します。その結果、右側の使用済燃料のように核種組成が変化します。

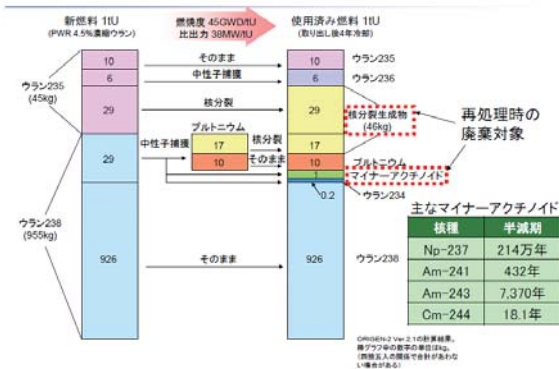


図-2 ウラン燃料の燃焼前後の核種組成の変化⁵⁾

図-3は、使用済燃料に含まれる主な長寿命放射性核種の含有量と、その核種を仮に人体に直接摂取すると想定した場合の影響を、線量換算係数⁶⁾という潜在的有害度⁷⁾で示しています。図-3から分か

核種	半減期	線量換算係数 (μ Sv/kBq)	含有量 (1トン当たり)
U-235	7億年	47	10kg
U-238	45億年	45	930kg
Pu-238	87.7年	230	0.3kg
Pu-239	2万4千年	250	6kg
Pu-240	6,564年	250	3kg
Pu-241	14.3年	4.8	1kg
Np-237	214万年	110	0.6kg
Am-241	432年	200	0.4kg
Am-243	7,370年	200	0.2kg
Cm-244	18.1年	120	60g

図-3 使用済燃料に含まれる主な長寿命核種と潜在的有害度⁵⁾

りますように、潜在的有害度が最も大きいのはプルトニウムであり、次いで MA ということになります。FP の中では、ヨウ素 129 の潜在的有害度が大きいということになります。

そこで、この使用済燃料中にできた有害度の高い核種をどうやって減らして、全体としての放射性廃棄物の量も減らすかということが、図-4に例示されています。まず再処理と、再処理に加えた分離という方法で、様々な核種を分離します。例えば MA は前述のように有害度が高いことから、分離し短寿命の核種に変換します。白金族は、水素製造等で触媒等に利用する。ストロンチウム 90、セシウム 137 は半減期が 30 年程度と短いのですが、発熱量の大きい FP であり、再処理後 100 年程度までは高レベル廃棄物の発熱量を支配しており、高レベル廃棄物の貯蔵や処分に影響を及ぼしますので、分離をして高レベル廃棄物の発熱量を小さくし処分場をコンパクトにする。ストロンチウム、セシウムは、貯蔵するか利用をして、その後に処分する。その他の核種は高レベル廃棄物として処分する。これらの分離変換によって、もともとの使用済燃料中の放射性核種を減らし、全体として放射性廃棄物の量を減らし、処分場もコンパクトにするということです。

分離技術については、現在の再処理でウランとプルトニウムを回収する技術も分離技術の一つです。分離する対象の核種に応じて適切な抽出剤等が開発されてきました。一方、変換を行う仕組みですが、大きく 2 つの方法が考えられています。1 つ目は高速中性子炉 (高速炉) を使ってプルトニウムを燃やして発電するとともに、MA も変換するという方法です。2 つ目は、プルトニウムは高速炉で燃やして発電

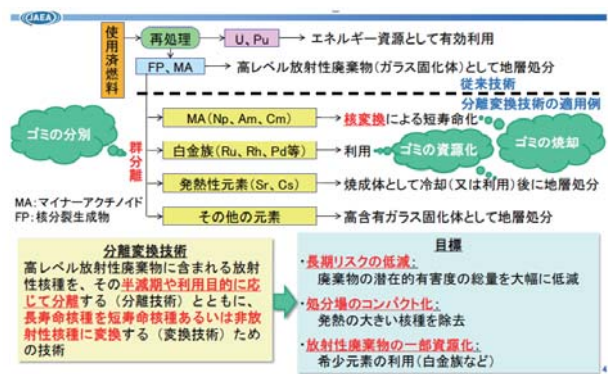


図-4 分離変換技術の適用例、目標⁵⁾

5) 出典：大井川宏之、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減への挑戦、第9回原子力機構報告会 (平成 26 年)
 6) 線量換算係数は、その核種を 1 ベクレル (放射エネルギーの単位) 摂取した場合に人体に及ぼす被ばく線量 (シーベルト) で表示しています。
 7) これらの放射性核種を貯蔵、処分する等で取扱う場合、通常は人体への影響を防止、低減するためのさまざまな防護手段がとられますので直接摂取されることはありませんが、このような仮想的な被ばくを潜在的有害度と呼んでいます。なお、文献により、これ以外の用語として毒性、危険度などが用いられる場合が混在していますが、本稿では同義語として原文のまま扱っています。

し、MA は核変換の専用システムである、加速器駆動システム（ADS 等）を使って変換を行う 2 層構造になっていますので階層型と呼ばれています。

3. 分離変換から見た処分への効果の例

分離変換の導入による主な効果として、以下の 2 点がよく取り上げられています。

(1) 潜在的有害度の低減

図-5 は潜在的有害度の低減効果を示しています。比較対象にしているのは、新燃料 1 トンを製造するのに必要な 9 トンの天然ウランであり、ウランの子孫核種の潜在的有害度も含まれています。比較対象のレベルになるまでの時間は、使用済燃料で約 10 万年、高レベル廃棄物で数千年、分離変換導入後の放射性廃棄物で数百年となっています。

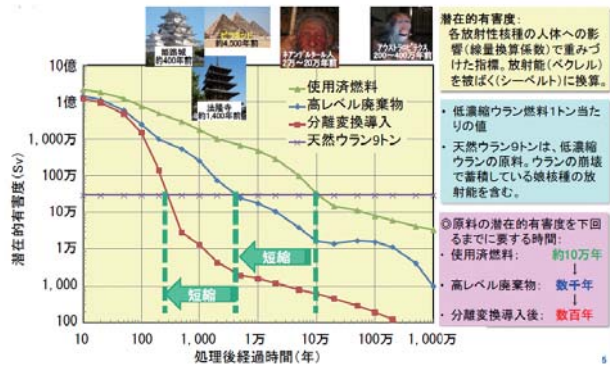


図-5 使用済燃料、高レベル廃棄物（再処理後）及び分離変換導入（再処理+分離変換）後の放射性廃棄物の潜在的有害度の経時変化と低減効果（新燃料 1 トンの製造に必要な天然ウラン 9 トンの潜在的有害度との比較）⁵⁾

(2) 地層処分場の面積の低減効果

図-6 は地層処分場の面積の低減（コンパクト化）効果を示しています。MA を分離変換すること及びストロンチウム、セシウムを分離し 100 から 130 年間貯蔵した後に処分することにより、処分場面積を約 4 分の 1 に低減できるとしています。さらに、ストロンチウム、セシウムを 300 年間程度まで貯蔵すると、ストロンチウム、セシウムの発熱量が地層処分相当低レベル廃棄物（地層処分相当の TRU 廃棄物⁸⁾）と同等の発熱量まで下げることができることから大坑道で密に処

分することができるとした場合には、処分場面積を約 100 分の 1 まで低減できるとしています。なお、これらの面積には、分離変換の対象になっていない地層処分相当低レベル廃棄物の処分場面積は含まれていないことに留意が必要です。もし含めた場合は、処分場面積の低減効果は各々約 4 分の 1、約 10 分の 1 になります。

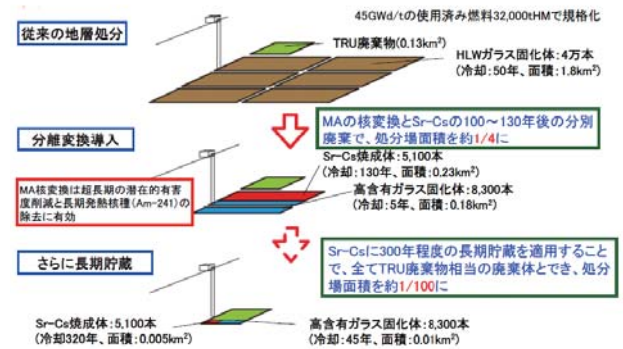


図-6 分離変換導入後の地層処分場面積の低減効果^{3) 9)}

4. 使用済燃料と分離変換後の放射性廃棄物を比較する場合の処分からみた注意事項

4.1 潜在的有害度の低減効果に関すること

(1) 地層処分の安全性

高レベル廃棄物と地層処分相当低レベル廃棄物は、現時点では深部の安定した地層に処分する地層処分が最も有望であるということが国際的な合意になっています。再処理を行わない国は、使用済燃料を地層処分する方針です。各国でどのように地層処分するかというコンセプトの開発が進められた結果、地層処分の成立性が各国の評価で証明されつつある段階にあると考えています。多くの国ではさらに地層処分サイトを選定する段階にあり、一部の国ではサイトを選定し建設段階に入ろうとしています。具体的には、フィンランドでは建設許可がおりて、今、地下施設の建設を行っている最中です。スウェーデンでは処分場の立地・建設の審査中ですが、先日、環境裁判所が使用済燃料を封入するキャニスタの長期閉じ込め能力に関する補足説明が必要であるとした意見書を政府に提出しています。いずれにしろ、もう建設に入る段階まで来ているということです。それからフランスは、2019 年には設置許可申請を行う段階まで来ています。ということで、実際の高レベル廃棄物の地層処分場が 2020 年代には操業を開始する予定です¹⁰⁾。

8) TRU 廃棄物とは、再処理施設と MOX 燃料加工施設から発生する低レベル廃棄物の総称です。TRU 廃棄物は含まれる放射性核種の種類と量の幅が広く分布しており、濃度に応じて浅地中処分（トレンチ処分、ピット処分）、中深度処分、及び地層処分に区分して処分される考えです。この地層処分相当の TRU 廃棄物を、本稿では地層処分相当低レベル廃棄物と呼んでいます。

9) 図中の TRU 廃棄物には、再処理施設だけでなく MOX 燃料加工施設の操業、廃止措置に伴い発生する地層処分相当低レベル廃棄物も含まれます。

10) 高レベル廃棄物、使用済燃料以外では、米国では軍事施設廃棄物である TRU 廃棄物用の廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）地層処分場が操業中であり、ドイツでは低レベル廃棄物用のモルスレーベン地層処分場が閉鎖され、コンラッド地層処分場が建設中です。

地層処分に関する安全性については、以下のように要約できると考えます。

【地層処分の安全性】

使用済燃料の直接地層処分（直接処分）あるいは再処理した後の高レベルガラス固化体と地層処分相当低レベル廃棄物の地層処分の安全性は、わが国だけでなく、各国の評価で証明されつつある。フィンランド（直接処分）では処分場を建設中、スウェーデン（直接処分）では処分場の審査中、フランス（再処理）では申請段階まで来ている。

高レベル廃棄物に含有されるマイナーアクチノイド（MA）は人に摂取されると有害度が大きい物質だが、地層中では移動しにくく¹¹⁾、地下水移行シナリオでは被ばく線量評価の支配核種にはならない。人に直接接触するシナリオ（人間侵入シナリオ、隆起・侵食シナリオ）は、資源のない深い地層を選択する、あるいは隆起・侵食が大きい地層を選ばないことにより、その確率を出来るだけ低くする考えである。

したがって、安全確保のために、分離変換をしなければならないということではありません。

わが国の地層処分の安全評価の例を図-7、図-8に示します。

なお、地層処分の実施主体である原子力発電環境整備機構（NUMO）が現在、包括的技術報告書（セーフティケース）を作成中であり、その中で最新知見にもとづいて核種移行解析が行われていると聞いています。図-7、図-8に示しました結果は2000年以前あるいは2005年に行われた評価結果ですので、NUMOの評価結果とは異なっている可能性がありますので留意してください。

① 地下水シナリオの評価結果

地下水シナリオの評価結果を図-7に示します。地下水シナリオは以下の結果となっており、廃棄物全体ではTRU廃棄物中のヨウ素129が支配核種になっています。

- 高レベルガラス固化体は、地質環境の多様性を考慮するケースにおいては、ほとんどのケースにおいてFPのセシウム135が支配核種となっているが、地下水流動が速い（動水勾配が大きい）ケースを中心に、トリウム229（ネプツニウム237の放射平衡）が支配核種になっているケースが見ら

れる。それらの最大値は1マイクロシーベルト/年を下回っている。

- TRU廃棄物は、支配核種はヨウ素129であり、最大線量は約2マイクロシーベルト/年となっている。最大線量に対して地質環境条件（水理）に関連するパラメータが非常に大きな影響をもっている。

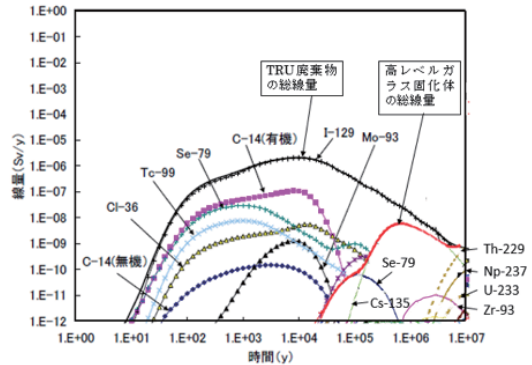


図-7 地層処分の被ばく評価例（地下水シナリオ）¹²⁾

② 隆起・侵食シナリオの評価結果

隆起・侵食シナリオの評価結果を図-8に示します。隆起・侵食シナリオは以下の結果となっており、廃棄物全体では高レベルガラス固化体中のネプツニウム237が支配核種になっています。

- 高レベルガラス固化体は、花崗岩を対象としたケースでは、隆起・侵食速度が1ミリメートル/年の場合、約90万年後において地表付近の酸化性の環境（地表から100メートル以浅）に到達後すみやかに線量のピーク（支配核種ネプツニウム237）が発生し、最大線量は63マイクロシーベルト/年となった。処分場全体が急激に還元状態から酸化状態に変化するとの仮定により、処分場内に沈澱していた核種のうち酸化状態での溶解度が大きいネプツニウムなどの元素が急激に地下水に溶解するためと考えられる。
- TRU廃棄物は、隆起・侵食速度を1ミリメートル/年とし、高レベルガラス固化体と同様の条件で評価した結果、処分場が風化帯に達した時点で線量が増大しているが、それ以前に主要核種は既に生物圏に回帰して1万年程度で最大線量率を与えており、最大線量率についてはレファレンスケースの場合（約2マイクロシーベルト/年）とほとんど変化のな

11) ただし、アクチノイド元素は地下水での化学種、炭酸濃度、コロイド、イソサッカリン酸（ISA）の共存等により溶解度、吸着係数等の移行特性に影響があるという知見があります。

12) 出典：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（以下、2000年レポート）、1999。及び電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構、TRU廃棄物処分技術検討書—第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ、2005。

い評価結果（支配核種はトリウム 229、ヨウ素 129 等）となった。

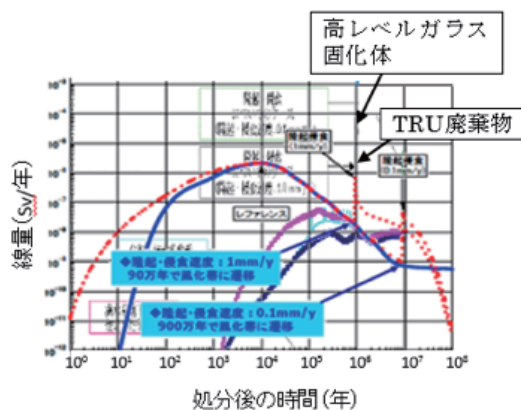


図-8 地層処分の被ばく評価例（隆起・侵食シナリオ）¹²⁾

(2) 閉じ込め期間=潜在的有害度が燃料の元となった天然ウランと同等になる期間とは

分離変換の効果を示す指標として、3. (1) で紹介しました潜在的有害度の低減があげられています。そして、燃料の元となった天然ウランの潜在的有害度と比較することにより、例えば、“本稿で紹介する加速器による放射性廃棄物の低減技術は、この地層処分の負担を軽減することを目指す技術であり、実現すれば廃棄物の量そのものを減らすと共に、閉じ込めべき期間を数百年程度に短縮し、廃棄物処分の概念を一新できる可能性を秘めている。”(JAEA 西原氏¹³⁾)と述べておられるように、天然ウランの潜在的有害度と同等になる期間を「閉じ込めべき期間」と認識されています。

また、過去に筆者がフランス原子力・代替エネルギー庁（CEA）の方と意見交換を行った際に提示されたものを図-9に示しています。図-9から、種々の廃棄物の潜在的有害度がウラン燃料の元となった天然ウランの潜在的有害度と同等になる時期が読み取れますが、使用済燃料は、約30万年、再処理後の高レベルガラス固化体は約1万年、再処理・MA分離変換後の高レベルガラス固化体は約300年、B廃棄物は約20年となっています。ここで、B廃棄物といえるのは、日本でいうところの地層処分相当低レベル廃棄物と同等のものです。ただし、フランスでは再処理時に放出されるヨウ素は積極的に捕獲することなく海洋放出していますので、これを除いたものとなります。当時既に、日本のTRU廃棄物の

処分コンセプトが開発されていたので、ジルカロイ被覆管、アスファルト固化体等、地層処分相当低レベル廃棄物が存在することが分かっていました。

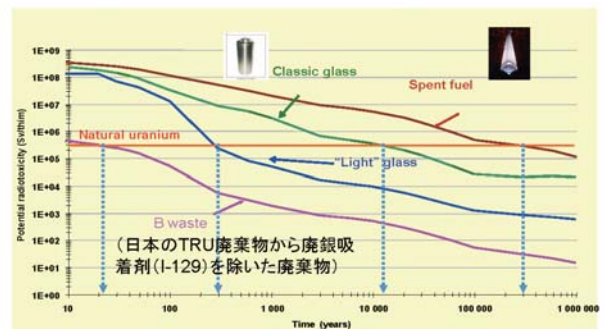


図-9 フランス原子力・代替エネルギー庁（CEA）の潜在的有害度の図を参照して考えたこと

そこで、今回改めて、この20年というものは処分にとっては何を意味するのだろうか、閉じ込めべき期間とは何なのだろうかということについて考えました。また、天然ウランの潜在的有害度と比較することの意味合いを考えただけです。

①天然ウランと比較することの意味は

天然ウランとの比較は、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、1999.の総論レポートに示されています(図-10参照)。その目的として、「高レベル放射性廃棄物の特徴を理解するため、核燃料サイクルを放射能の推移という視点でながめてみると(中略)図では核燃料(ウラン濃縮度45%)1MTUを基準に、核燃料が原子炉に装荷される時点を中心にそれ以前(アップストリーム)とそれ以後(ダウンストリーム)の放射能の変化を示している。(中略)核燃料1MTUから発生するガラス固化体の放射能が、燃料の製造に必要なウラン鉱石の全量(約750t)¹⁴⁾がもつ放射能と同レベルになるまでに数万年程度という時間を要する。(中略)これらのことから、ウラン鉱石を原子力利用することにより発生したガラス固化体の潜在的危険性については、少なくともウラン鉱石が本来有している潜在的危険性と同程度まで低下する数万年という長い時間を考慮しなければならないことがわかる。」と述べており、高レベル廃棄物の特徴として、放射能が高く、その放射能による潜在的危険性が長期にわたることを説

13) 出典：「特集 核のゴミを減らせ 放射性廃棄物はどこまで減るか」、エネルギーレビュー、p.7-p.10、2017年9月号。より抜粋。下線は筆者が記載しました。

14) 本稿で述べている天然ウランとの違いは、前者が100%のウランであるのに対して、後者はウラン含有量1%の鉱石であることです。したがって、ウランの等価量で見ると、前者が7.5tとした場合、後者は750tということになります。

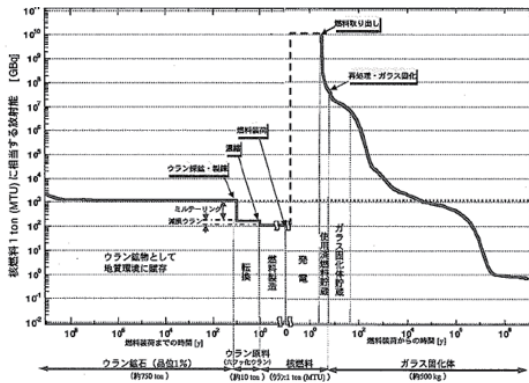


図-10 放射能の推移から眺めた高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の特徴（濃縮度 4.5% の核燃料 1MTU 相当）¹²⁾

明するために示したものと思われる。

それでは、そもそも元となった天然ウランと同等になれば、高レベル廃棄物自体が安全になるといえるのでしょうか。前述の【地層処分の安全性】で述べましたように、廃棄物自体の潜在的有害度と、処分した場合の安全性は異なりますので、ここでは前者について考えます。単純化のため、天然ウランの放射能はウラン 238 のみとし、子孫核種の影響を考えないとした場合、ウラン 238 の比放射能は 12,400 ベクレル/グラムです。一方、ウラン 238 のクリアランスレベル¹⁵⁾は 1 ベクレル/グラムですので、クリアランスレベル以下にするためには、放射能濃度を約 1 万分の 1 まで下げることがあります。

したがって、天然ウランの潜在的有害度と同等になったからといって高レベル廃棄物自体が人の健康への影響が無視できるレベル（クリアランスレベル）になるということではありません。

② 処分における閉じ込めについて

放射性廃棄物の閉じ込めに関して、国際原子力機関（IAEA）の安全基準をもとに紹介します。IAEA、放射性廃棄物の処分、個別安全要件 No.SSR-5、2011.¹⁶⁾によれば、閉じ込めに関していくつかの要求事項がみられます。主な事項を以下に示します。

一般

- 1.6. 全ての放射性廃棄物の管理のための好ましい戦略は、廃棄物を閉じ込め（すなわち、廃棄物マトリクス、パッケージ及び処分施設の中に放射性核種を封じ込める

こと）、接近可能な生物圏から隔離することである。

放射性廃棄物の処分（及び貯蔵）に関連する概念

1.10. これまでに多数の処分施設のための設計オプションが開発され、さまざまな種類の処分施設が各国で建設され、操業している。これらの設計オプションは、受け取る放射性廃棄物に適切な、異なる閉じ込めの程度や隔離容量を持つ。処分の固有の目的は以下のとおりである。

- (a) 廃棄物を閉じ込めること。
 - (b) 廃棄物を接近可能な生物圏から隔離し、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。
 - (c) 放射性核種の廃棄物から接近可能な生物圏への移行を常に抑制し、減らし及び、遅らせること。
 - (d) 放射性核種が処分施設からの移行により接近可能な生物圏に到達する量が、起こり得る放射線学的影響が常に許容できるほど低いことを確保すること。
- 1.12. 処分施設が廃棄物の完全な閉じ込めや隔離を永久に実現することは期待されない。これは実現可能でもなければ、時間とともに減少する廃棄物に伴う危険性により必要とされることでもない。
- 1.16. 廃棄物を閉じ込めて、人と環境からそれを隔離する各処分システムの能力は、廃棄物の潜在的危険性に見合うものとなる。

要件 8：放射性廃棄物の閉じ込め

廃棄物に付随する放射性核種の閉じ込めを備えるように、廃棄物形態やパッケージングを含む人工バリアは、設計されなければならない。立地環境が選定されなければならない。閉じ込めは、放射能の減衰が廃棄物によって引き起こされる危険を十分に減じるまで、備えられなければならない。さらに、熱を生じる廃棄物の場合において、廃棄物が処分システムの性能に対して悪影響を与え得る量の熱エネルギーを生じている間、閉じ込めが備えられなければならない。

15) 固体の放射性物質であって、放射線レベルが低く人の健康への影響が無視できるものについては、規制の対象から除外され、再利用あるいは通常の廃棄物として処分されます。これをクリアランスといいます。その放射能レベル（クリアランスレベル）は、工場等において用いた資材その他の物に含まれる放射性物質についての放射能濃度が放射線による障害の防止のための措置を必要としないものとして原子力規制委員会規則で定める基準（原子炉等規制法第六十一条の二）等に規定されています。

16) IAEA、放射性廃棄物の処分、個別安全要件 No.SSR-5、2011。公益財団法人 原子力安全研究協会 HP、放射性廃棄物に関連する国際原子力機関（IAEA）安全基準の翻訳版より引用しました。以下同様です。

安全のための設計概念

3.32. 処分施設は、放射性廃棄物に付随する放射性核種を閉じ込めるように、及びそれらを接近可能な生物圏から隔離するように設計される。処分施設はまた、地圏及び生物圏における放射性核種の分散を遅延するために、及び、施設の健全性を低下させうる激しい現象からの廃棄物の隔離をもたらすように設計されなければならない。処分システムの様々な要素は、物理的な構成要素及び管理手順を含めて、異なる時間スケールにわたり、種々の仕方で安全機能を果たすことに寄与する。

セーフティケースと安全評価

4.6. 規制機関及び利害関係者によるレビューのためのセーフティケース及びその裏づけとなる安全評価書の作成は、放射性廃棄物の処分施設の開発、操業及び閉鎖にとって中心となる。セーフティケースは、処分施設の安全を立証し、その安全に対する信頼に寄与する。セーフティケースは、処分施設に関する全ての重要な決定にとって不可欠な入力情報である。それは、処分システム及びそれがどの様に長期にわたり振る舞うことになるのか理解するための基盤を、提供しなければならない。それは、サイトの側面と工学の側面、及び設計の論理と合理性を提供することを扱わなければならない。安全評価によって裏付けられなければならない。それはまた、安全に対して重要な全ての側面の品質を確保するために整備されたマネジメントシステム措置も扱わなければならない。

すなわち、簡単に述べますと、処分の戦略は、放射性廃棄物に含まれる放射性核種を閉じ込め、それらを接近可能な生物圏から隔離するように処分システムを設計することであり、その安全性はセーフティケースによって確認される、ということです。そして、その中で、処分施設の閉じ込めと隔離の妥当性も評価されることになります。

同様の用語として、管理期間や隔離期間が使われていることがあります¹⁷⁾。

処分では、これらに関連する用語が前述のIAEA、放射性廃棄物の処分、個別安全要件 No.SSR-5、2011.¹⁶⁾ において以下のように規定されています。

要件 9：放射性廃棄物の隔離

処分施設は、人と接近可能な生物圏から、

放射性廃棄物の隔離を図る特質をもたらすように、立地され、設計され、操業されなければならない。特質は、短寿命廃棄物に対して数百年程度 (several hundreds of years)、中レベル及び高レベル廃棄物に対しては少なくとも数千年程度 (several thousand years) の隔離をもたらすことを目指さなければならない。その様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。

3.43. 浅地中施設の隔離は、処分施設の位置と設計によって、及び操業上の管理と制度的管理によってもたらされなければならない。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母岩となる地層によってもたらされることになる。

閉じ込めに関する説明でも申し上げましたが、処分の戦略は、閉じ込めと隔離です。おそらく、脚注17の資料では、隔離期間は閉じ込め期間と同じ意味で使われたものと思いますので、その処分における意味合いについては前述を参照してください。ここでは、処分で使われる管理期間について説明します。放射性廃棄物に含まれる放射能は、一般的にははじめが高く、時間の経過とともに減少していきます。放射性廃棄物を処分場に処分した後、一定の期間は放射エネルギーが高く、人間が直接放射性廃棄物に接触しないように隔離する必要があります。この期間は、放射性廃棄物に含まれる放射性核種の種類と量によって異なりますが、浅地中処分場では、数十年から数百年の管理期間で直接接触しても有意な被ばくを受けないような放射性廃棄物が受け入れられ処分されることとなります。このように、人が管理することによって人間が直接接触することを防ぐ管理期間というものが浅地中処分場では適用されます。ただし、ここで注意してもらわなければならないことがあります。それは、管理期間が終了しても放射性廃棄物自体が安全になる（ここではクリアランスレベルになることを考えていますが）ということではないということです。引き続き閉じ込めによって処分の安全が確保されます。

③ 放射性廃棄物に含まれる放射性核種の種類と量による処分方法の選択

分離変換によって、高レベル廃棄物中に含有される放射性核種の種類と量が低減されることによる効

17) 科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会原子力科学技術委員会群分離・核変換技術評価作業部会（第7回）資料7-1（H26.8.20）

果をみる指標として、天然ウランのような他の放射性物質との比較を指標とするのではなく、地層処分以外の処分方法に移すことができる、という指標が考えられます。日本では、地層処分以外の処分方法は浅地中のトレンチ処分、ピット処分、及び中深度処分が実施あるいは検討されています。これらの処分方法には、処分方法毎に濃度上限値、区分値が規定されています（図-11 参照）。なお、実際の処分場においては、処分サイトの固有の条件にもとづいた処分施設の設計及び安全評価が行われ、その結果にもとづき放射性廃棄物の受入基準（WAC）、特に放射能濃度の制限値、が検討されることになっており、その際、処分実施主体の申請値はトレンチ処分とピット処分に係る濃度上限値あるいは中深度処分に係る政令濃度区分値を下回る値に設定されます。

したがって、分離変換により地層処分をなくそうという試みであれば、図-11 に示された放射能濃度、さらには処分実施主体の申請値を下回る必要があり、これを分離変換の目標値として設定することが考えられます。なお、地層処分対象には、高レベル廃棄物だけでなく低レベル廃棄物も存在しますので、地層処分を完全になくすためには、後者の分離変換も検討する必要があります。

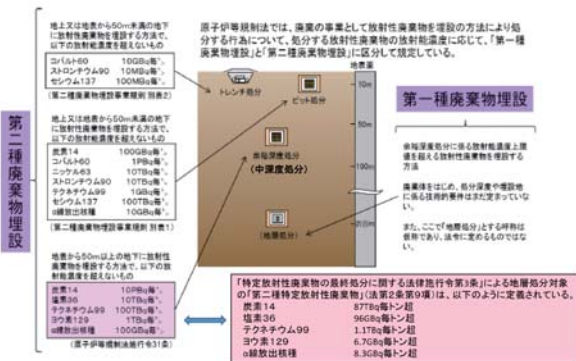


図-11 処分方法と放射性核種の種類と量に関する区分値、濃度上限値等¹⁸⁾

(3) 放射線防護の観点から潜在的有害度を用いることは妥当か

国際放射線防護委員会（ICRP）は1977年勧告において、放射線防護の三原則として、行為の正当化、防護の最適化及び個人の線量限度をあげています。放射性廃棄物の処分に関しても、防護基準は線量が適用されます。

また、前述の処分方法毎に受け入れられる放射性核種の種類と量に関しても、線量拘束値あるいは各

国独自に規定された処分の防護基準等から導出した廃棄物区分が適用されており、潜在的有害度で評価したものではありません。

なお、処分の分野で著名な学者であるカリフォルニア大学バークレー校の Thomas H. Pigford 教授は、次世代型原子炉技術に関する国際会議の招待レビュー¹⁹⁾で、以下のように述べておられます。

アクチノイド変換液体高速炉（ALMR）計画では、毒性をリスクと表現してアクチノイド変換のインセンティブとしているが、これは誤りである。ウラン鉱石と同等の毒性であればリスクは受容されるものとなり地層処分は不要とみなしている。ウラン鉱石の毒性は主に子孫核種によるものであり、地上におかれたウラン製錬の鉱さいは安全ではない。毒性はリスクと等価ではない。リスク基準としての公衆被ばく線量率は、安全評価で求める。安全評価例では、アクチノイド変換のメリットはみられない等。

4.2 地層処分対象放射性廃棄物の減容による地層処分場面積の低減効果に関すること

(1) 使用済燃料、再処理後及び分離変換（再処理＋分離変換）導入後の放射性廃棄物

先ほどの図-2 あるいは図-5、図-6 は、原子炉で燃やす燃料のウランにのみ着目した説明でした。実際には、燃料はジルカロイ被覆管に封入される等、燃料集合体として組み立てられています。地層処分相当の放射性廃棄物の体積という観点で見ると、使用済燃料をそのまま処分する場合には集合体が相当しますが、再処理を行う場合は、高レベルガラス固化体のほか、ジルカロイ被覆管等の部材、再処理施設の操業や廃止措置に伴って発生する地層処分相当低レベル廃棄物が相当します。さらに、分離変換を行う場合は、分離変換のために追加された工程の操業や廃止措置に伴って発生する地層処分相当低レベル廃棄物が加わることになります。表-1 に使用済燃料 32,000tU ベースでの使用済燃料直接処分、再処理後処分及び分離変換（再処理＋分離変換）導入後処分の放射性廃棄物量の試算例を示します。

使用済燃料を直接処分から再処理後処分にした場合、使用済燃料中のウランとプルトニウムが分離されます。1 トンの使用済燃料から約 950kg の物質が除去されることとなりますので、大幅に減容されることとなります。その他、ガス状の核種であるヨウ素、キセノン、クリプトン等が除去されます。残りのうち、高レベル廃液はガラス固化され容器に封入されて高レベルガラス固化体として地層処分されます。ジル

18) 出典:使用済燃料管理及び放射性廃棄物管理の安全に関する条約（廃棄物等合同条約）第5回日本国別報告書（2014）に一部加筆しました。
19) Thomas H. Pigford, Actinide Burning and Waste Disposal, An Invited Review for the MIT International Conference on the Next Generation of Nuclear Power Technology, UCB-NE-4176, 1990.

カロイ被覆管等や低レベル廃液等は減容処理や安定化処理された後に容器に封入され、含まれる放射性核種の種類と量に応じて、地層処分からトレンチ処分に区分して処分されます。

さらに分離変換が導入されまると、MA は分離された後に核変換により短寿命核種に変換される、あるいは白金族は分離され再利用される、さらに発熱性核種のストロンチウム、セシウムは分離され、貯蔵され冷却された後に、あるいは利用された後に処分されることになり、その他のものはガラス固化体にされます。この結果、さらに減容されることとなります。この場合も、上述の再処理に伴い発生する低レベル廃棄物に加えて、追加される分離工程の操業や廃止措置に伴い発生する低レベル廃棄物が加わることとなります。

したがって、地層処分場の面積を考える場合、あるいは地層処分場の必要性を考える場合は、高レベル廃棄物だけでなく、地層処分相当低レベル廃棄物の存在も考慮する必要があります。

表-1 使用済燃料直接処分、再処理後処分及び分離変換(再処理+分離変換)導入後処分の地層処分相当放射性廃棄物量の試算例²⁰⁾(廃棄体量は民間再処理 32,000tU ベースの試算)

廃棄物の発生源	廃棄物の内訳 (発生量)	直接処分 ^{*1}		再処理		分離・変換例
		質量	体積	質量	体積	
燃料棒	U	940kg	0.422%	4.2kg	×	
	Pu	30kg	0.548%	0.09kg	×	
	MA	1.2kg		1.2kg	×	
	FR	ガス状核種 (T, Kr, Xe, U)	46kg		×	× ^{*4} *4
		発熱性核種 (Sr, Cs)			×	×
		白金族			×	×
燃料棒材貯蔵	ジルカロイ					
	イハル	Ca. 300kg		Ca. 300kg	×	×
	エント					
	ピース等	Ca. 30kg		Ca. 30kg	×	×
再処理	プロセス起源					
	再処理					
再処理	プロセス起源					
	再処理					

*1 U の 0.422% が移行。 *2 Pu の 0.548% が移行。 *3 U、Pu の 0.2% が移行。 T の 70% が吸蔵。 *4 I はプロセス起源に含む。

*5 分離・変換の廃棄物量、使用済燃料の量は Hiroyuki OIGAWA, et al. Parametric Survey on Possible Impact of Partitioning and Transmutation of High-level Radioactive Waste, Proceedings of GLOBAL 2005, Tsukuba, Japan, Paper No. 266, 2005. を基に編集。

*6 廃棄物処理設備を含む。 *7 電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物処分技術検討書—第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ、2005。 *8 総合資源エネルギー調査会 電気事業分科会 原子力部会 放射性廃棄物小委員会 (平成 25 年度第 1 回) 参考資料「高レベル放射性廃棄物処分について」、2017. を基に算出。

(2) 分離変換の効果の現実的な評価の必要性

(1) では再処理や分離変換に伴って発生する放射性廃棄物について述べました。ウランやプルトニウムを回収して燃料としてリサイクルする場合には、再処理だけでなく、燃料加工 (ウラン・プルトニウ

ム混合酸化物燃料 (MOX 燃料) 加工) に伴い発生する放射性廃棄物についても考慮する必要があります。分離変換の場合は、ウラン、プルトニウム以外に分離した核種を燃料と混合してあるいはターゲットとして加工する必要があり、それらに伴って発生する放射性廃棄物も考慮する必要があります。

また、現実的な観点からは、分離変換技術の実用化までのスケジュールを考慮する必要があります。使用済燃料の再処理や高レベル廃液のガラス固化は現時点で既に行われており、さらに分離変換技術の実用化までには、再処理施設の操業に伴い相当量のガラス固化や低レベル廃棄物の処理が行われることはもとより、地層処分場で処分が始まっている可能性もあります。これらの廃棄物の取扱いについて、分離変換の対象とするのかどうか、適切な時点で判断する必要があります。

処分場の面積の評価においては、処分実施主体 NUMO の設計指針にもとづいて評価をすることが必要だと思います。現在の NUMO の設計は、まだ公開されていないので分かりませんが、例えば 2000 年レポート¹²⁾ の段階では、ガラス固化体の埋設の間隔を決める設計上の制約条件は、主に温度制限と、埋める岩盤の健全性の 2 つだったと思います。今の NUMO の設計でどのような制約条件があるのか、分かりませんが、やはり実施主体の設計指針にもとづいて評価をすることが現実的だと思います。その際、既にガラス固化した高レベル廃棄物がありますので、その分だけ処分場面積の低減効果が少なくなることになります。

以下に現実的な評価を行う際に考慮すべき事項をあげてみました。

① 廃棄物の量を減らし処分場を小さくすることが出来るとする試算の妥当性

- 処分実施主体の設計にもとづく検討

② 現実的な評価

a. 分離変換の導入ロードマップの想定

(a) 分離

- 分離プロセスの実用化時期
- 再処理工場への適用 (設計)
- 既存再処理工場の改造のための変更許可、改造工事、運転あるいは新規再処理工場の許可、建設、運転

(b) 変換

- 高速炉 (FR) (プルトニウム、MA、長寿命核分裂生成物 (LLFP) の燃焼、変換) あるいは FR (プルトニウムの燃焼) + 加速器駆動シス

20) 物量などの数値は必ずしも正確なものではありませんが、イメージを持ってもらうために、敢えて提示したものであることに留意してください。

テム：ADS等（MA、LLFPの変換）の実用化時期

- 設計、許可、建設、運転
- b. 分離変換の実用化時期までに発生済みの廃棄物及び二次廃棄物等の評価と対策
- 分離変換が可能になるまでに発生した廃棄物（高レベル廃棄物）への適用の有無
 - 変換が可能になるまでに先行して分離した廃棄物の対策（分離を先行する場合）
 - 分離プロセス、廃棄物処理設備の操業、解体から発生する廃棄物の種類と量、及びこれらの廃棄物の処分策

(3) 規制上の制限

高レベル廃棄物の発熱量を小さくすることができれば、極端な話として、地層処分相当低レベル廃棄物のように大坑道に密に定置して処分することができるのではないかと考えられます。たしかに、高レベル廃棄物1本の発熱量を数ワットにまで低減することができれば、発熱量の観点からはジルカロイ被覆管等の廃棄物と同様の処分方法¹²⁾で処分することが可能なように思われます。

しかし、現在、原子力規制委員会で審議中の中深度処分の規制基準では、「念のための要求として、人間侵入の発生をあえて想定したとしても周辺公衆に対する影響が甚大なものとならないよう設計上対応可能なものについては可能な限り工学的に措置され、放射線影響の評価が一定の水準以下になることを要求する²¹⁾。」が適用される予定であり、地層処分にも適用される可能性があります。具体的には、「掘削によって地表と廃棄物を短絡する経路が形成されたとしても、その影響が及ぶ廃棄物に含まれる放射性核種の量が限定され、埋設した廃棄物全体に及ぶことなく生活圏への放射性核種の移行量が抑えられるよう、廃棄物埋設地の内部を人工バリアで区画することを要求する。」とされています。

高レベル廃棄物は1本1本が区画されて定置されますのでこの制限をクリアするものと思われませんが、

MA等を分離変換した残りの廃棄物について、1つの区画（処分坑道）に定置できる量を前述の要求にもとづいて評価する必要があります。

(4) 放射性廃棄物の最小化

分離変換の効果の一つに高レベル廃棄物の減容化があげられています。実は、バックエンド分野でも、燃料サイクル施設から出てくる廃棄物や、原子炉施設から出てくる放射性廃棄物をできるだけ最小化する努力をすることが求められています。

例えば、国際原子力機関（IAEA）の安全基準文書²²⁾では、要件8として、放射性廃棄物発生と抑制を要求し、「全ての放射性廃棄物は、特定され抑制されなければならない。発生する放射性廃棄物は、可能な限り低く保たれなければならない。」としています。同様の要求は、欧州連合（EU）指令、Waste Framework Directive 2008/98/EC等にも示されています。英国ではEU指令にもとづき、低レベル固体廃棄物に対してwaste prevention, minimization, reuse, recycling, volume reduction, disposal（廃棄物発生抑制、再使用、再利用、減容、処分）をWaste hierarchy戦略としています。具体的には、体積と放射性核種の量の観点から、放射性廃棄物の発生そのものを抑制する、クリアランス等により再使用、再利用する、それらの結果においても処分しなければならない放射性廃棄物については減容処理を行う、ということだと理解しています。

このような目的を達成するうえでは、バックエンド分野の方々が継続的に努力すべきことはいうまでもないことですが、将来の原子炉と燃料サイクルに分離変換技術を組み入れることによって、放射性廃棄物の体積とそれに含まれる放射性核種の量を合理的に達成可能な範囲で効果的に減少させることができるのであれば、是非実用化を進めてもらいたいと思います。

（本稿は、平成29年度第4回原環センター講演会（平成30年3月2日）の講演をもとに編集したものです。）

21) 第26回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム資料26-3-2 中深度処分における人間侵入の影響評価に関する考え方（案）

22) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Predisposal Management of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 5, IAEA, Vienna (2009)

編集発行

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

〒104-0044 東京都中央区明石町6番4号（ニチレイ明石町ビル12階）

TEL 03-6264-2111（代表） FAX 03-5550-9116

ホームページ <https://www.rwmc.or.jp/>