

原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT FUNDING AND RESEARCH CENTER TOPICS

2018.9.NO.127

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2）	③

センターの活動状況

I 国際交流

スイス放射性廃棄物管理共同組合（NAGRA）との情報交換会議の開催

当センターと協力協定を締結しているスイス放射性廃棄物管理共同組合（NAGRA）のコリーナ・アイヘンバーガー（Corina Eichenberger）評議会議長、トーマス・エルンスト（Thomas Ernst）理事長及びストラティス・フォンフォリス（Stratis Vomvoris）国際支援・協力本部長を迎え、情報交換会議を開催しました。

開催日時：平成30年7月6日（金）15:00～18:00

議題：原環センターにおける研究開発の現状

スイスにおける地層処分プログラムの現状とNAGRAの活動

冒頭、国会議員でもあるアイヘンバーガー評議会議長から、スイスの連邦及び州の放射性廃棄物処分への関与について説明していただきました。引き続き、当センターが実施している地層処分に関する研究開発とNAGRAがスイス国内にある2か所の地下研究所で実施している地層処分に関する研究開発の情報共有を図り、研究開発分野における今後の協力の可能性について意見交換を行いました。

最後に、今後も2機関の協力を通じて、両国の放射性廃棄物処分プログラムの進展に貢献していくことを再確認しました。



Ⅱ 成果等普及活動の実施状況

地層処分実規模試験施設における公開試験の実施

平成30年7月21日（土）、22日（日）に北海道幌延町で「おもしろ科学館 2018 in ほろのべ」（主催：経済産業省北海道経済産業局、幌延町）が開催され、地層処分実規模試験施設では、緩衝材定置装置を用いた「緩衝材定置試験」を公開しました。今年度は緩衝材定置装置の遠隔監視用カメラの映像を投影しながら、装置の動きに合わせて各カメラの役割を紹介しました。また、来場者に人工バリアの機能を体感していただく新たな取組として、ベントナイトの特性を体感する色水によるお絵描き試験を実施し、多くの来場者から好評をいただきました。おもしろ科学館開催中は両日で792名の方にご来場いただき、公開試験の他にも実物のオーバーパックや緩衝材、人工バリアカットモデル、緩衝材除去システムなどを間近で実感していただきました。



緩衝材定置試験の様子



ベントナイトお絵描き試験の様子

平成30年度 第2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開催した、第1回原環センターセミナー「放射性廃棄物処分の安全評価の基礎Ⅰ」に引き続き、第2回原環センターセミナー「放射性廃棄物処分の安全評価の基礎Ⅱ」を開催しました。このセミナーでは、朽山修先生著の「放射性廃棄物処分の原則と基礎」の後半部分の内容を分かり易く講義していただき、講義後の総合討論で、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7月25日（水） 10:00～18:00

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4：放射性廃棄物の発生

講義5：放射性廃棄物処分の基本戦略

講義6：放射性廃棄物の隔離と閉じ込めの達成

講義7：放射性廃棄物処分のセーフティケースと安全評価

総合討論



放射性廃棄物の処分と分離変換（その2）

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

「放射性廃棄物の処分と分離変換」について、以下の内容にまとめました。前号(2018. 6. No.126)に続き、本号では、5.以降について説明したいと思います。

2. 何を対象としているのか
3. 分離変換から見た処分への効果の例
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
5. 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
6. 分離変換の実用化のロードマップの必要性
7. フランスにおける方針、研究の状況
8. 分離変換技術の実用化に向けて

5. 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

4.では、分離変換の方々が処分への効果について述べられていることに関して、処分の立場から注意すべき事項を説明してきました。一方で、分離変換の方々に、処分の立場から期待することは何かということについて、述べなければならぬと思います。そうすることによって、分離変換の分野の方々と処分分野の方々の意思疎通が深まると思うからです。

処分の立場からも、廃棄物量を減らして処分場を小さくする、あるいは、できるだけ処分場を有効に使っていくということは必要だと思います。しかしながら、地層処分をなくすということを目指るのであれば、潜在的有害度の低減を指標とするのではなく、中深度処分や浅地中処分のような別の処分方法で処分可能な放射能濃度を指標にするべきだと思います。また、その際は、地層処分相当低レベル廃棄物についても考える必要があります。一般市場で利用するというのであればクリアランスレベルにするということを指標にするべきだと思います。発熱量を小さくして処分場を小さくすることについては、発熱量を低減するだけでなく、4.の規制基準の制限事項をクリアすることも検討する必要があります。私の個人的な期待としては、これまでの安全評価で地層処分の支配核種である、地層処分相当低レベル廃棄物のヨウ素 129 についてです。もちろん今の処分方法でも防護基準をクリアするのですが、

ヨウ素 129 のピーク線量は、地下水の流速条件にかなり影響を受けます。六ヶ所の再処理施設ではヨウ素はオフガス系で銀吸着材によって捕獲されていますので、このヨウ素 129 をターゲットとして、短寿命化あるいは安定な核種に変換できることを期待します。バックエンド分野でも、この核種をできるだけ長期に閉じ込めることができる固化体を研究開発中ですが、分離変換でも可能性が示されるのであれば、廃棄物管理の有望な選択肢になると思います。地層処分では、念のための what if シナリオを評価することがあります。例えば、何らかの理由で高レベル廃棄物に人が直接接触するシナリオです。そういう場合でもできるだけ潜在的な被ばくを低くしたいと考えた場合に、経済性、防護基準との関係から合理性を考慮したうえで、MA の分離変換を取り入れることが有効になる可能性があります。MA の分離変換は、中期的な発熱量の低減にも効果があります。

以上のことは、分離変換の方々だけに申し上げるのではなく、バックエンド分野のわれわれ自身が、そのような努力をしていかなければならないと思います。例えば、ガラス固化体に代わる、FP、アクチノイドをより多く含むことができる固化体の開発のような減容努力が引き続き必要だと思いますし、処分場の設計にも工夫の余地があると思います。

一方、懸念として、分離変換を行う対象をどこまで広げるかということがあります。ある核種を分離変換し処分場に持ち込まないとすれば、有害度、発熱量等、何らかのメリットを期待することは可能だと思います。しかしながら、デメリットとしてはそのためには追加コストがかかるということです。分離変換を導入する原子炉、燃料サイクルは、発電コストが他の電源に比べて同等以下であることが望ましいと思います。このため、発電コストが合理的な範囲に収まるように、分離変換の対象を議論し判断する必要があると思います。具体的には、対象とする放射性核種であるとか、放射性廃棄物ということです。例えば、後者について処分する側からいいますと、分離変換を行う対象を高レベル廃液にとどまらず、ガラス固化体にも適用するのかということが気になります。というのはガラス固化体を対象にするということになりますと、ガラス固化体を溶か

して、分離工場にかけて核種を分離し、さらに変換するということとなりますが、このためにはかなりの設備と作業とコストが必要になると思います。さらに、処分したガラス固化体まで対象とするのであれば、全て回収して、オーバーパックから取り出す必要があり、さらに設備、作業、コストが増えます。したがって、分離変換の効果に関しては、メリットだけでなく、追加コストの評価が必要ですし、コスト以外にも、7.のフランスの事例に示すようにMAからの発熱量や中性子放出量に伴う、原子炉や燃料サイクル施設に与える技術的課題や作業者の放射線被ばく等のデメリットも考慮する必要があると思います。「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」(平成27年5月22日閣議決定)において、幅広い選択肢を確保する観点から、使用済燃料の直接処分その他の処分方法に関する調査研究を推進すること、および最終処分の負担軽減等を図るため、長寿命核種の変換技術の研究開発について着実に推進すること、とされ、また、今後より良い処分方法が実用化された場合等に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにすること、とされています。これらの選択肢をどのように評価し、適用するかどうかを決めるのは将来世代の方々だと思いますので、現世代としては、幅広い選択肢を確保する観点から、様々な選択肢について、技術的成立性やメリット、デメリット等を総合的に考察し、現時点での判断根拠を明確にして後世代に伝えていく必要があると思います。

6. 分離変換の実用化のためのロードマップの必要性

分離変換に関して、様々な研究が行われており、若い方々に興味を持って取り組んでいただけることはよいことだと思います。一方、実用化のためには、そのためのロードマップを考えて、ある時期に判断するマイルストーンを置き、そして判断し、その次のステップに移るといった段階的な判断の繰り返しを行いながら進めていくことが望ましいのではないかと思います。分離変換の研究が始められてすでに40年ぐらいい経過するわけですが、具体的に何を実用化されようとしているのか、外から見ますとなかなか分からないところがあります。実用化するためには、7.のフランスの事例のように、絞込みが必要な気がしています。そのために、ロードマップを作り、段階的に判断をしながら進めていかれてはどうかと思うのです。

ロードマップを考えるうえで、前提となるのは、潜在的有害度が最も大きいプルトニウムの燃焼を可能とすることです。具体的には高速中性子炉(以下、高速炉、FR)のサイクルを構築することが必要になると思います。次に、その他の核種はどうするのか、選定のマイルストーンを設けて、そこで判断をして、その段階までの技術で可能なものに絞り込んでいく等が必要になります。様々な可能性、選択肢がいつまでも並行して進んでいるという状態は、実用化という観点では予算的、人的資源を考えてもなかなか厳しいのではないかと思います。

そのうえで、分離変換のための技術、プロセスがいつ成立するかということが課題になります。高速炉とその燃料サイクル(以下、高速炉サイクル)を構築するためのロードマップに間に合うように開発していくことが合理的だと思います。また、5.で述べましたように、既に発生しているガラス固化体はどうするのかということも、どこかの時点で決めなければならないと思います。

それから潜在的有害度の低減という意味では、原子炉全体のライフサイクルで考えた場合、分離変換を定常的に行っているときもそうですけれども、原子力をいよいよ使わなくなるエンド・ポイントにおいて、その時点で残された潜在的有害度をどうやって減少させていくのかというシナリオも必要になります。JAEA西原氏等の論文²³⁾では、エンド・ポイントのシナリオも含めたトータルの有害度が論じられています。このシナリオを間違えますと、折角それまで分離変換によって得てきた潜在的有害度の低減効果が小さくなる可能性があります。

経済性に関しては、分離変換自体の経済性評価は当然ですが、分離変換単独で経済性を議論するのではなくて、発電コスト全体として議論する必要があります。例えば、日本の軽水炉サイクルの発電コストの2015年の評価²⁴⁾ですけれども、キロワット時当たりの発電コストが10.1円ぐらいで、そのうちサイクルコストが1.5円程度、うち高レベル廃棄物の処分コストは0.04円ということが示されています。これと同じような評価を高速炉サイクルについても行う。そのうえで、分離変換を導入した際の評価を行う。分離変換によって処分コストは低減されますが、その他のサイクルコスト等が増加することが予想されます。このように、経済性に関しては個別ではなく全体としての発電コストを評価する必要

23) K. NISHIHARA, T. IWAMURA, H. AKIE, Y. NAKANO, W. V. ROOIJEN, Y. SHIMAZU, "Comparative Study of Plutonium and Minor Actinide Transmutation Scenario", Proceedings of 21st International Conference & Exhibition: Nuclear Fuel Cycle for a Low-Carbon Future (GLOBAL 2015), p.388 - 395, 2015/09

24) 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会長期エネルギー需給見通し小委員会発電コスト検証ワーキンググループ「長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告」(平成27年5月)。

があると思います。もちろん、実用化の観点からは、経済性以外にも様々な論点があると思います。

7. 海外における事例

－フランスにおける方針、研究状況－

7.1 経緯

ロードマップに関する海外事例として、フランスにおける研究状況を紹介します。

フランスの研究のはじめは1991年の放射性廃棄物管理に関する法律（放射性廃棄物管理研究法、通称バタイユ法）です。この法律にもとづいて・分離変換・可逆的／非可逆的な地層処分・長期貯蔵・処理の3つの研究が開始されました。このうち、分離変換と長期貯蔵・処理の研究は原子力・代替エネルギー庁（CEA）が担当し、可逆的／非可逆的な地層処分の研究は放射性廃棄物管理機関（ANDRA）が担当しました。

放射性廃棄物管理研究法にもとづいて15年後に研究成果が評価され、その結果を受けて、2006年放射性廃棄物及び放射性物質の持続可能な管理に関する計画法（放射性廃棄物等管理計画法）が新たに制定され、・分離変換・可逆的な地層処分・中間貯蔵・処理の研究継続方針が示されました。分離変換に関しては、「この分野に対応する研究及び調査は、エネルギー政策の方針を設定するための計画に関する2005年7月13日付のNo.2005-781の法律の第5条において言及された新世代の原子炉に関して実施される研究及び調査、さらには廃棄物の核種変換を専用に行う加速器駆動システムに関する研究及び調査との関連において、実施されるものである。その目的は、2012年にこれらの原子炉の産業面での展望に関する評価を実施すると共に、2020年12月31日以前にプロトタイプ施設の運転を開始することにある。」とされました。2006年以降は、放射性廃棄物等管理計画法にもとづき3年毎に政府が策定する放射性物質及び放射性廃棄物の管理に関する国家計画（放射性廃棄物管理国家計画 PNGMDR）²⁵⁾にもとづいて、きめ細かい評価を行いながら研究が行われています。

放射性廃棄物等管理計画法および PNGMDR にもとづき、CEA はフランス電力（株）（EDF）、AREVA 社（現 ORANO 社）との協働と、ANDRA、

フランス国立科学センター（CNRS）の協力の下で分離変換の研究を進め、2012年に成果をとりまとめました。

7.2 2012年までの成果²⁶⁾

7.2.1 分離変換技術の研究開発

①長寿命核分裂生成物（LLFP）の分離変換

核種の選定は研究開始当時の EURATOM の共同研究（PAGIS（1985）、EVEREST（1997）、SPA（2000））における安全評価結果にもとづき、重要核種からヨウ素、テクネチウム、セシウムを選定して研究を実施した。

a. 研究成果

(a) 長寿命 FP の分離

- ・ヨウ素とテクネチウムの分離には PUREX プロセスを適用可。
- ・ヨウ素は分離され海洋放出されているが天然の希釈効果により安全確保。
- ・テクネチウムは可溶性成分と不溶性成分が共存。可溶性成分（50% から 85%）のみ回収可能。
- ・セシウムの分離には特別なプロセスの開発が必要。新抽出剤が開発された。

(b) 長寿命 FP の変換

- ・中性子バランスの観点から余剰中性子の多い高速炉を選択。
- ・テクネチウムはターゲットの耐照射性が良好で最も有望。しかし、変換効率が低いたため量を10分の1に減らすためには数百年にわたり数回のリサイクルが必要。
- ・ヨウ素は炉内での照射に対して安定なターゲット形態が得られず実行不可。
- ・セシウムは主に2つの同位体（LLFPであるセシウム135、安定なセシウム133）から構成。セシウム135は変換されるも、中性子捕獲反応によりセシウム133の大半がセシウム135に変換されるため、結果的に消滅する量よりも新たに生成する量が多い。このため照射前に同位体分離が必要であるため、極めて扱いにくく現実的ではない。

b. 結果

以上の研究成果を受けて CEA は以下のように結論した。この結論は2005年に ANDRA が実施した安全

25) 放射性物質及び放射性廃棄物の管理に関する国家計画（PNGMDR）。2006年法にもとづき、3年毎に政府が策定。PNGMDRは、フランスにおける全ての放射性廃棄物の管理の現状分析と管理方策の実現に向けた、研究開発を含む取組を取りまとめたもの。現在有効なものは2016年から2018年のPNGMDR（第4版）。取りまとめは、原子力安全機関（ASN）及び環境・エネルギー・海洋省のエネルギー・気候総局（DGEC）が担当。

26) a. CEA、Report on Sustainable Radioactive Waste Management（放射性廃棄物の持続可能な管理に関する報告書）、2012。

<http://www.cea.fr/english/Documents/corporate-publications/report-sustainable-radioactive-waste-management.pdf>

b. CEA、02 Séparation – Transmutation des Éléments Radioactifs à vie Longue（長寿命放射性核種の分離変換）、2012。

<http://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/rapports/rapport-gestion-durable-matieres-nucleaires/Tome%202.pdf>

評価の結果（図-12 参照）も踏まえたものとなっている。図-12 から、研究開発開始当時の安全評価で重要とされていたセシウム 135、テクネチウム 99 が塩素 36、セレン 79 に置き換わっていることが分かる。

- テクネチウムの分離変換のみが実現可能であるが、収率は低い。さらに、地層処分環境では溶解度が低く移動性が低いことが分かったため、その変換の関心が大幅に低減した。
- セシウムの核変換のパターンは非常に複雑で非現実的である。さらに、粘土中の収着現象により移動性が低いことを示す 1990 年代の研究により、さらなる研究に関心が払われなかった。
- ヨウ素については、照射下でターゲットとなる安定した化合物が存在しないことが、その核変換を考慮するための制約要件と考えられる。しかし、ガラス固化体内に存在する推定ヨウ素量にもとづいて ANDRA によって行われた評価結果では、放射線量が非常に低く、規制値をはるかに下回っている。
- ANDRA によって行われた処分の安全評価結果では、塩素 36 の放射線量が大きい。この放射性核種は、燃料マトリックス中及び燃料集合体構造材料中に存在する痕跡量の天然塩素から生成される長寿命核種であるため、ガラス固化体及び長寿命中レベル廃棄物中に極めて薄い濃度で存在し、その変換のための回収は事実上不可能である。この放射性核種の放射線影響を低減するためには、生成された塩素 36 の量を減らす方法の探索（照射される物質中に存在する痕跡量の天然塩素を減少させること）が、核変換よりも効果的な解決策となるだろう。

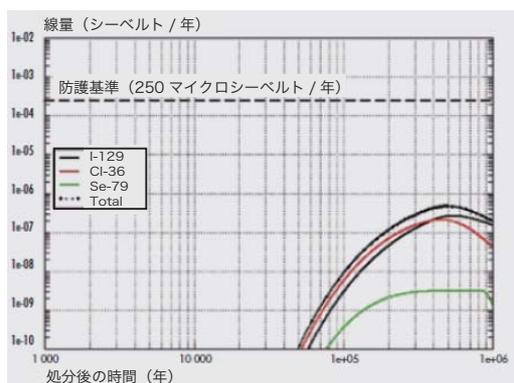


図-12 ANDRA により行われた核種移行解析の結果例（ガラス固化体、通常変遷シナリオ（地下水シナリオ））^{26) . 27)}

これらの結果により、CEA は 2006 年に LLFP の核変換の研究の中断を提案し、MA の核変換に集中することとした。

② MA の分離変換

マイナーアクチノイドは潜在的な放射性毒性が高く発熱量も大きく、各国でも研究していることから選択した。概要を以下に示す。

- アメリシウムの分離変換は、中長期的な発熱量を低減し処分場面積を縮小し最適化する可能性がある。
- キュリウムには、短寿命のキュリウム 242（半減期 163 日）とキュリウム 244（半減期 18 年）が含まれており、発熱量、放射線量、中性子（自発核分裂）放射線量が大きいこと、燃料加工や輸送においてハンドリング上の課題がある。
- ネプツニウムは長半減期であり潜在的毒性への寄与は小さい。

③ 2012 年以降の研究

これらの結果にもとづき、CEA は 2012 年以降の研究として以下を取り上げた。

- アメリシウムの分離変換の研究を第一に継続する。（理由は、MA の中ではアメリシウムが最も廃棄物管理に効果があり、また分離変換に伴う関連施設の操業における放射線防護と発熱の影響が小さいこと。）
- アメリシウムの分離変換技術は実験室規模では開発済みであり工業規模でも技術的成立性を確認中である。
- FR 実証炉 ASTRID での燃焼試験を計画している。

7.2.2 分離変換にともなう関連施設への技術的経済的影響の評価²⁸⁾

以上の分離変換の研究成果のとりまとめの他に、アメリシウムのみ、あるいは全てのマイナーアクチノイド (MA) の分離変換を行う場合について、関連施設への技術的経済的影響も評価された。

評価の前提条件を以下に示す。

前提条件：

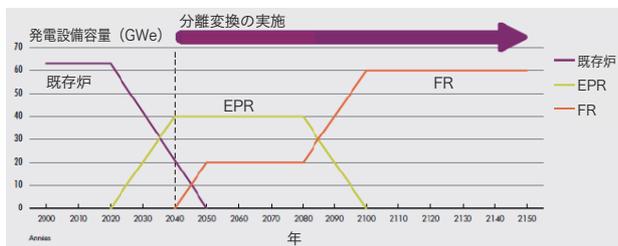
- 再処理 - プルトニウムリサイクル
- 高レベル廃棄物中の 1 万年間の崩壊アルファ制限²⁹⁾： 2×10^{19} 崩壊/g- ガラス
- 高レベル廃棄物中の (FP + MA) 酸化物含有量 < 17.5wt.%
- 原子炉型、発電規模、発電期間：図-13 参照

27) ANDRA, Dossier 2005 Argile - Tome Safety Evaluation of a Geological Repository, 2005.

28) 著者の専門外分野、特に原子炉への影響の詳細に関しては、原文を参照してください。

29) 高レベルガラス固化体にはアクチノイド等のアルファ放出核種が含まれるため、その長期間にわたるアルファ崩壊の結果、ヘリウムが蓄積し、ガラス固化体中にバブルを形成し、安全評価に影響を及ぼすこと等が懸念されていました。本制限は 1 万年間のヘリウムの許容蓄積量の上限值、すなわち MA の許容含有量を意味するものと思われます。（著者注）

- 2150年までの評価
- 変換は将来建設されるFRの規模及び適切な燃料サイクル施設によってのみ実現される。したがって、それまでに発生する廃棄物には分離変換は適用されない³⁰⁾。



(既存炉: 加圧水型軽水炉、EPR 欧州型 PWR、FR: 高速炉)

図-13 評価の前提とした原子炉の炉型、発電規模、発電期間²⁶⁾

①分離変換の処分への効果

a. 廃棄物の本数、体積

- ガラス中のFPとMAの酸化物含有量制限は17.5wt.%である。MA酸化物重量は通常FPよりも1桁以上小さいため、ガラス固化体の体積にはFPの酸化物重量の影響が大きい。したがって、検討中のMAの分離変換シナリオではほとんど影響なし。
- 1万年の間に容器中に蓄積する崩壊アルファ量の制限は、現在値は 1×10^{19} 個/g-ガラスであり、将来の科学的進展により 2×10^{19} 個になる可能性がある。前述と異なり、この制限はMAの量に影響される。
- 以上より、高レベルガラス固化体の総本数は、以下ようになる。

- 崩壊アルファ量制限が 1×10^{19} 崩壊/g-ガラス
 分離変換無し: 150,000本、26,000m³
 アメリシウムのみ分離変換: 96,000本、17,000m³
 MA分離変換: 89,000本、16,000m³
- 崩壊アルファ量制限が 2×10^{19} 崩壊/g-ガラス
 分離変換無し: 103,000本、18,000m³
 アメリシウムのみ分離変換: 96,000本、17,000m³
 MA分離変換: 89,000本、16,000m³

b. 潜在的放射性毒性

- 変換開始以降に発生する廃棄物の経口摂取毒性の2150年以降の経時変化
- 最初の100年間は主な毒性はFPのものでありシナリオ間の差は小さい。

- 100年以降は全てのMAを分離変換したシナリオの毒性が最も小さい。変換しないシナリオに比べて20分の1から100分の1に小さくなる。
- アメリシウムのみを分離変換した場合、最初の1000年間はMA変換と同様に減少するが、アメリシウムの変換において生成するキュリウム244の崩壊により生成するプルトニウム240の影響で、2分の1程度しか小さくならない。
- 分離変換を開始する2040年までに発生した廃棄物や原子力利用を終了した場合の残留アクチノイド(プルトニウム+MA)の影響により、放射性毒性の低減効果は限定的になる可能性がある。
- 原子力利用を終了するエンド・ポイント(2150年)以降のエンド・オブ・ライフシナリオ(後掲)により低減することは可能である。

c. 処分における放射線学的影響

CEAはANDRAの協力により、処分における放射線学的影響に関して以下の考察を行った(図-12参照)。

- 通常シナリオでは、放射線被ばくの主な核種は、FP、放射化生成物のうちヨウ素129、塩素36、セレン79である。線量は防護基準の250マイクロシーベルト/年よりも十分低い。
- アクチノイドは処分する地層(粘土層)の高い保持性能により、ニアフィールドにはほぼ完全に閉じ込められ、厳しい仮説の下でも拡散により母岩から移行する量は無視できる量である。
- また、変遷シナリオ(例えば、処分場への偶発的なボーリング)の場合も無視できる。
- 以上の結果、アクチノイドの有無は処分における放射性学的影響に目に見える影響を与えるものではない。
- 人と廃棄物の直接接触を導く人間侵入のみが、被ばく線量に対するアクチノイドの決定的な寄与につながる可能性が高いが、深い地層への処分とサイトに特別な資源がないことにより、このリスクを防止する。

d. 廃棄物の発熱量

- 高レベルガラス固化体の発熱により周辺環境温度が非常に高くなると、その環境で起こる現象の知見が少なく不確実性が増す、あるいは容器の変質が加速する可能性があり、一定の温度以下に制限する必要がある。また、処分場の熱設計ではガラス固化体の埋設間隔をあける必要がある。
- ANDRAは岩盤の最大温度を90℃に制限して

30) ASNは、1991年12月30日法律の枠内において実施された高レベル・長寿命放射性廃棄物の管理研究と放射性廃棄物管理国家計画に関するフランス原子力安全当局の意見(2006年2月1日)において、「すでに発生しておりコンディショニングされている廃棄物パッケージを分離変換による処理のため回収することは、安全面、放射線防護面、およびコスト面の理由で望ましくない。したがって、これらの廃棄物パッケージは最終的な放射性廃棄物管理方策の対象としなければならない。」としている。

いる。このため処分前に少なくとも60年間貯蔵する。

- 製造後100～120年の発熱量の主な寄与は、FPのうち、半減期30年程度のセシウム137及びストロンチウム90とMAのうち半減期18年のキュリウム244。
- 製造後100年から120年を超えると、発熱量は主にMAの半減期433年のアメリカシウム241。アメリカシウム241はゆっくりと減衰するため、埋設間隔を決める主要な核種になる。
- 処分前に十分な貯蔵期間を設けることにより、セシウム、ストロンチウム及びキュリウムの短期的な熱寄与が低減されるため、アメリカシウムの核変換は、中長期の発熱量を低減し、処分施設の専有面積を低減する可能性がある。

e. 処分場面積

地層処分対象の高レベル廃棄物、長寿命中レベル廃棄物の全体の処分場面積に関して2010年と2012年の2回研究を実施し、以下のように考察した。

(a) 2010年に実施した研究：

- 岩盤温度制限は90℃。
- 変換無し、アメリカシウムのみ変換、すべてのMAを変換の各シナリオにおける処分場面積等を比較。
- 処分前貯蔵期間は70年と120年。
- 50年間に製造される廃棄物を対象。
- ANDRAの設計(Dossier 2005)をベースに検討。
- 仮想事故あるいは人間侵入時の安全性を保つため処分モジュールあたりの放射性核種量(特にヨウ素129)を一定量に制限。したがって、モジュール数は一定。
- 結果として、モジュール間隔、アクセスインフラ施設、長寿命中レベル廃棄物処分エリア面積の影響で処分場総面積の低減は限定的だった。

(b) 2012年に実施した研究(図-14参照)：

- 岩盤温度制限は90℃。
- 変換無し、アメリカシウムのみ変換、すべてのMAを変換の各シナリオにおける処分場面積等を比較。
- 処分前貯蔵期間は120年。
- ANDRAの設計はDossier 2005から修正。
- 2040年から2150年に製造される廃棄物を対象(すなわち、全量分離変換可能)。
- ANDRAは、高レベル廃棄物処分エリア面積と長寿命中レベル廃棄物処分エリア面積のさらなる稠密化および長期安全性の観点から変換のメリット・デメリットの検討を実施。例えば、高レベル廃棄物処分エリアについて、セル長を40メートルから80メートルに延長、モジュールのレイアウトの最適化、長寿命中レベル廃棄物処分エリアの見直し等。
- 間隙水中の放射性核種濃度の上昇があっても人

間侵入シナリオ評価に影響はない。

- ガス蓄積挙動の変化はさらに調査が必要。
- 結果として、高レベル廃棄物処分エリア面積はアメリカシウム変換シナリオで約8分の1に、すべてのMA変換シナリオで10分の1に減少した。しかしながら、中レベル長寿命廃棄物処分場面積を含む全処分場面積では約3分の1の減少にとどまった。また、総掘削量は両シナリオでほぼ同等であり、約2分の1に減少した。

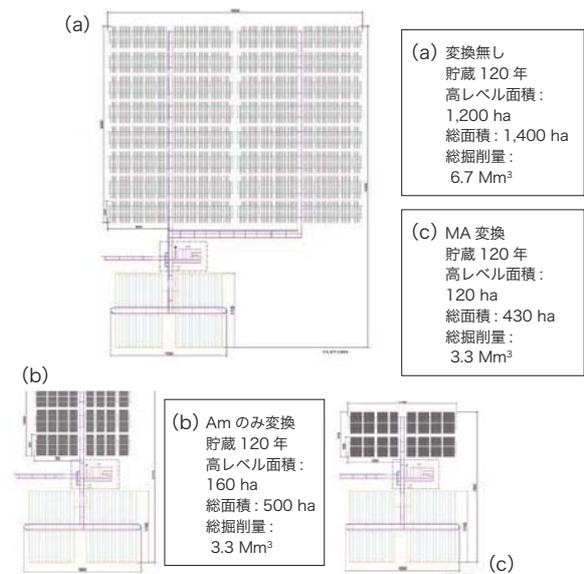


図-14 2012年に実施した研究にもとづく処分場面積等の比較²⁶⁾

②分離変換のサイクル施設への影響

アメリカシウム単独の分離変換、あるいはすべてのMAの分離変換に伴い、新燃料、使用済燃料及び分離した物質の発熱量、中性子線量、ガンマ線量が増加する。これらが、燃料加工、再処理、輸送、高速炉、ADSの各施設の設計と運転に及ぼす影響に関して、考察を行った。なお、評価の前提条件を以下に示す。

前提条件：

- 再処理量
- 図-13の原子力発電炉の導入(高速炉は2040年導入)シナリオにもとづく。
- 2040年から、PWR-UOX燃料に加えてすべてのPWR-MOX燃料を15年間以内に再処理し高速炉に必要なプルトニウムを回収する。再処理量は1,100トン/年(約2,200集合体/年)。
- 2110年以降は高速炉燃料のみ再処理。再処理量は450トン/年(約2,800集合体/年)。
- この中間の期間は、PWR-UOX燃料と高速炉燃料の両方を再処理。再処理量は1,000から1,100トン/年から高速炉燃料のみの450トン/年に減少する。
- 分離変換対象をアメリカシウムあるいはすべての

MA とする。

- 核種変換モードを均質モードあるいは非均質モードとする。
 - 核種変換は高速炉の炉心あるいはブランケットに装荷、あるいは、ADS に装荷して実施する。
- a. 燃料加工への影響 (表-2 参照)
- MELOX 工場 (MOX 燃料加工施設) と同様の燃料製造工程を検討。
 - 表-2 にシナリオ毎の燃料の酸化物粉末の発熱量と中性子線量を示す。
 - MA 含有の場合、中性子線とガンマ線照射に対する放射線防護の強化が必要。また、熱発生のため温度制御が必要。
 - 一方、臨界管理には困難さなし (プルトニウムよりもアメリカウムあるいは MA のほうが臨界管理が容易)。
 - ADS 燃料は他のシナリオに比べて MA 含有量が多い。
 - MA からの発熱量制限が厳しい。通常は数十 kg ハンドリングできるが、MA 含有ブランケット (CCMA) では数 kg、ADS 燃料では数百 g となる。
 - MA の分離変換シナリオではキュリウム、特にキュリウム 244 の存在により、燃料製造に遠隔操作が必要となる。
 - アメリカウムだけの分離変換シナリオでは製造プロセスがさほど困難ではないが、それでもプロセスと設備遮へいのための改造が必要となる。

表-2 燃料加工における発熱量と中性子放出量 (平衡時)²⁶⁾

シナリオ	変換無し	すべての MA の変換			アメリカウムのみの変換		
		均質モード	非均質モード	ADS	均質モード	非均質モード	
燃料	高速炉炉心	高速炉炉心	CCMA 20%	ADS 炉心	高速炉炉心	CPAm 2%	CCAm 10%
熱出力 W/kgML (相対値)	1.5 (1)	9 (5)	56 (38)	160 (140)	4 (2)	4.5 (2.5)	7 (6)
中性子放出量 (相対値)	(1)	(130)	(1,700)	(3,600)	(1.5)	(1.9)	(3.5)

CCMA : MA 含有ブランケット、CCAm : Am 含有ブランケット、CPAm : Am 含有燃料

b. 再処理への影響

- MA 含有燃料集合体の再処理は UOX、MOX、高速炉からのさまざまな使用済燃料を受け入れることができる施設で行われる。再処理プロセスはラ・アーク再処理工場の場合と同様に、湿式製錬プロセスに基づくと考えられるが、ADS 燃料の場合はこのプロセスの実現可能性は得られておらず、乾式製錬が代替法である。
- MA の核変換を伴うシナリオは、関係する元素の分離プロセスを必要とする。シナリオによっ

て、プルトニウムと MA を一緒に分離回収する群分離プロセス (GANEX)、アメリカウムとキュリウムを分離する逐次分離プロセス (DIAMEX-SANEX)、あるいはアメリカウムを選択分離するための分離プロセス (EXAm) である。これらすべてのプロセスはまだ開発段階である。その実現可能性は実験室規模で実証されているが、それらの工業的実装には依然として長い R & D プロセスが必要である。

- プルトニウムのリサイクルは安全な形状の装置の使用を必要としているため、MA 含有燃料集合体を再処理する際の臨界事故のリスクを制御することには特に困難はない。冷却システムおよび放射線防護の強化は、特に、MA の転換工程において必要とされる。
- c. 輸送への影響 (図-15 参照)
- MA 含有燃料の熱、中性子の放出特性は、標準 FR 燃料のものよりもかなり高い。最も不利な集合体は、新規であるか使用済であるかに関わらず、高濃度のキュリウムを含む燃料集合体 (CCMA および ADS 燃料) である。使用済みアメリカウム含有ブランケット (CCAm) の場合にも、アメリカウムの核変換が大量のキュリウムを生成することに起因して同様の問題が生じることに留意すべきである。
 - したがって、これらの燃料を輸送する問題は、それ自体が研究の対象となっている。各燃料について、熱応力および放射線防護を考慮した現在の概念に基づいて輸送容器の型式が提案されている。この作業により、各シナリオに必要な年間輸送回数を推定し、それを核変換の無いシナリオと比較することができた。
 - 大量の MA、特にキュリウムを大量に含む物質 (CCMA および ADS 燃料) の輸送は、非常に困難である。この段階で採用された前提では、燃料集合体全体を輸送することは不可能であり、輸送の回数が大幅に増加し、原子炉施設での組立および分解作業が必要になる。そのような管理はもちろん、技術的にも経済的にも非常に不利になる。

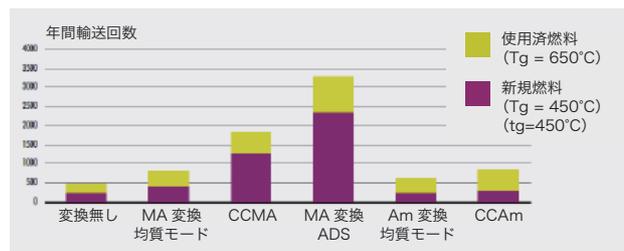


図-15 様々なシナリオにおける年間輸送回数 (燃料被覆材の温度制限は新規燃料: 450°C、使用済燃料: 650°C)²⁶⁾

d. 原子炉（ナトリウム冷却高速炉（Na-FR））への影響

(a) 炉心への影響

- MAの大量の装荷は、FR炉心の安全係数を悪くする（炉心ナトリウム損失時の反応度増、ドップラー効果の低下）。
- 均質モードの核変換は、安全係数を低下させることが知られており、MAの含有量が高くなるにつれてより重要になる。含有量の制限は事故時の過渡期におけるコアの挙動の研究によって検証されなければならない。他方、非均質モード核変換（特にCCMAまたはCCAmの場合）では、核変換されるMAは炉心周辺に導入され、高い含有率でさえ、それらの反応度に対する影響は限定的である。

(b) 燃料ハンドリングへの影響

- 変換無しのFRでは、特別な生体遮へいや冷却システムを設けなくても、新規の集合体のハンドリングが可能であるが、MAを含む集合体、特に高含有の集合体（CCMA）をハンドリングする場合は必要である。
- Na-FRにおいて、使用済燃料集合体は、水中に保存する前に、残留発熱量を大幅に減衰させる必要がある。
- 原子炉容器からの燃料集合体の搬出には、ナトリウムで運転する場合、最大許容発熱量は20kWである。後者を40kWに増加させる可能性についての研究が行われている。
- 燃料集合体の水中での保存のために微量のナトリウムを除去するため、それらを事前に洗浄する必要がある。洗浄の最大許容発熱量は2.5kWである。研究は7.5kWを目標にしている。
- ブランケットまたはADS燃料に大量のMAを含有すると、照射された集合体の残留発熱量の経時変化を大きく修正することになる。標準的なFR燃料や、残留発熱量が数日から数十日の間に大幅に減少する均質な核変換燃料とは対照的に、この発熱量のはるかに遅い減衰は、核変換生成物であるアメリカウムによるものである。
- 含有ブランケットの影響が明らかである。ナトリウム中の移送を考慮しても、約50日より前には原子炉容器からCCAmを搬出することはできなかった。したがって、炉心周辺のタンク内で貯蔵することが不可欠である。
- 同じように、CCMA集合体またはCCAm集合体をそれぞれ約15年、7年より前に洗浄することは不可能であろう。このため、ナトリウム環境

のもとで中間貯蔵（原子炉容器の外）が必要であり、それに応じて寸法を決めなければならない。これは、これらの集合体の再処理前の冷却時間の増加をもたらす、すべての燃料について5年間の冷却期間を仮定した曲線と比較して、サイクル中のMAの量を著しく増加させる。

- したがって、照射された含有ブランケットからの熱の放出により、ハンドリングの厳しい制約が伴う。これが、この困難を回避するためにいくつかの最適化方法が探索された理由である。最も興味深い方法の1つは、ブランケットの照射時間を半分に減らす（10ではなく5サイクル）ことであり、残留発熱量を同じ量だけ減少させる結果になる³¹⁾。ブランケットの残留発熱量は、常に40kWの制限より小さく、原子炉容器から遅滞なくこれらの集合体を取り外すことを可能にしている。さらに、7.5kWの制限に達するのに要する時間は約400日に短縮されることにより、大容量の中間貯蔵の必要性が大幅に軽減される。

(c) 原子炉容器への影響

MAの核変換は原子炉容器の設計に大きな影響を及ぼさない。しかしながら、いくつかの核変換オプションは、容器の直径にわずかな影響を与えながら炉心の大きさを増加させる可能性がある。これは、例えば、炉心の周辺に1列または2列のブランケットを追加する必要がある非均質モードの変換の場合である。これは、炉内の貯蔵容量を増やす必要があるオプションの場合にも当てはまる。いずれにしても、タンク直径に対する影響は非常に小さく、直径約20mのタンクに対して0.5m増である。

(d) 原子炉の稼働率への影響

MAの含有量が高い集合体のハンドリングは、原子炉の稼働率に悪影響を及ぼす可能性がある。今日定量的可能な唯一の事は、核変換集合体を管理するのに必要な追加時間または最も発熱量の大きい集合体を搬出するために必要な冷却期間に関連する運転ロスであり、核変換のシナリオに応じて0.3～2%の幅である。

③経済性への影響

CEAは、燃料サイクルオプションを経済的側面から評価し、様々な戦略（特に核変換）が「発電の平準化コスト（LCOE）」に与える影響を評価した。ウラン採鉱から最終的な廃棄物管理に至るまで、これらのオプションを実施するためのコストを可能な限り正確に評価するため、EDFとAREVAの協力を得て詳細な評価が行われた。この分析に使用されたコストベンチマークは、ウランとプルトニウムのマルチリサイクルを伴う60GWeの発電容量の高速炉

31) ただし、照射時間が半減すると、CCAmの装荷頻度が2倍になり、燃料加工および貯蔵の要件が倍増し、燃料サイクル中のインベントリを50%オーダー増加させる。

の発電電力量 1kWh 当たりの平準化コストである。結果は以下のとおりである（表-3、図-16 参照）。

- MAの核変換を含む燃料サイクルオプションは、5%未満（CCA mの核変換についての低い見積値）から 25%（ADSによる核変換の見積値）までの平準化コストの増加となった。
- 燃料サイクルと原子炉コストに対する追加見積もりコストは、廃棄物処分コストの低減された見積もりコストによっては相殺されない。これは経済的割引の効果が、長期的支出の重みを減少させるためである。
- 総コストにおいて原子炉の資本コストと運転コストが支配的な重さを持つことから、分析結果はこの原子炉コストに対する資本コストと稼働率の影響に特に敏感である。
- 特に燃料サイクルの場合、いくつかのコスト項目は不確実のままであるが、その影響は限られており、これは上記の結果のオーダーを変更するものではない。

表-3 平準化コストの相対比較（高速炉サイクル（変換無し）：100%）²⁶⁾

シナリオ	割引率 8% → 3%			割引率 4% → 2%		
	合計	原子炉	サイクル	合計	原子炉	サイクル
変換無し	100	94	6	100	91	9
非均質 (MA)	106	96	10	107	92	14
非均質 (Am)	104	95	9	105	92	13
均質 (MA)	108	95	12	109	92	17
均質 (Am)	105	95	10	106	92	13
ADS (MA)	126	116	10	124	110	14



図-16 分離変換無しの場合の発電容量 60GWe の高速中性子炉の発電電力量 kWh 当たりの平準化コストの構成（核変換無し、割引率：最初の 30 年間は 4%、その後は 2%）²⁶⁾

④ エンド・オブ・ライフ シナリオ

分離変換による潜在的毒性の低減効果を原子炉のライフサイクル全体で考えた場合、原子力利用のエンド・ポイントにおいて、その時点で残留している潜在的毒性を減少させていくシナリオが必要になる。CEAはこの点に関しても様々なシナリオを検討し、以下の結論を得た（図-17 参照）。

- 高速炉を 2150 年まで運転し、その間に MA の分離変換が実施された場合、アクチノイド（プルトニウム + MA）の総インベントリは約 1,200 トン（プルトニウム約 1,100 トン、MA 約 60~160 トン）に達する。
- MA を変換し、プルトニウムが燃焼される場合、約 2 世紀にわたる燃焼と核変換により、アクチノイド（プルトニウム + MA）の総インベントリの 90% 以上を低減できる。この場合、地層処分するアクチノイドのインベントリは 100t 未満となるので、分離変換の便益はほとんど低減されない。
- このように、分離変換が長期間（典型的には数世紀）にわたって実施された後に、地層処分されるアクチノイドの最終インベントリを十分に減らすために 1 から 2 世紀にわたると見積もられるエンド・オブ・ライフ戦略を伴う場合にのみ、分離変換が有効である。

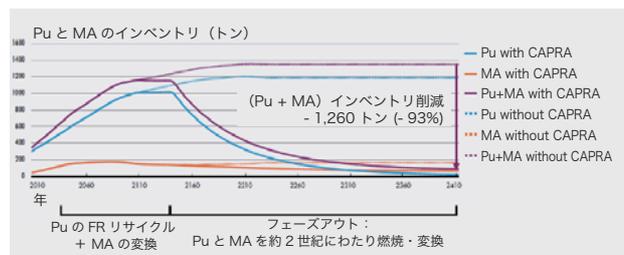


図-17 Na 冷却 FR (SFR CAPRA 炉心³²⁾ 有無) でのプルトニウム燃焼および MA 変換の場合のプルトニウムと MA のインベントリの変遷²⁶⁾

7.3 フランスの研究開発の特徴と教訓

以上のように、フランスでは、1991 年の放射性廃棄物管理研究法にもとづいて 15 年間の分離変換の研究が行われ、その結果の評価にもとづき、2006 年に新たな法律である放射性廃棄物等管理計画法が制定され、その方針にもとづき研究が継続されています。さらに、2006 年以降は、放射性廃棄物等管理計画法に規定された 3 年毎に政府が策定する放射性廃棄物管理国家計画 (PNGMDR) にもとづいて、きめ細かい評価を行いながら研究が行われています。このように、フランスでは法律にもとづき判断時期を予め定めて研究開発が行われ、その成果を国の様々な機関、委員会等が評価した結果を踏まえて、研究開発の対象が絞り込まれ、実用化に向けて進められているといえます。

また、研究体制については、主担当の CEA だけでなく、EDF、AREVA が協働し、ANDRA、CNRS の協力の下で、技術的、経済的検討が行われてきたことによって、実用化に向けた評価、判断を現実

32) SFR CAPRA 炉心：EFR（欧州型高速炉）用に開発したプルトニウム大量消費型の CAPRA 炉心をベースに、CEA が本研究用に検討した炉心を SFR CAPRA 炉心という。CAPRA 炉心よりも実質的に低いプルトニウム消費能力（約 45kg / TWh）を有する。

的、合理的に進められたのだと思われます。例えば、分離変換の処分への効果については、処分の安全評価で重要な核種については、処分実施主体である ANDRA の最新の安全評価の結果も取り入れて判断していること(研究開始当初とは重要核種が変わっている)、処分場面積や処分コスト低減の検討は処分実施主体である ANDRA の設計にもとづいて行われたこと、その他にも燃料加工、再処理、輸送、高速炉に関する技術的、経済的検討を各事業者との協業で行ったことがあげられます。このように実際の事業を行う事業者が研究開発段階から協働し、分離変換の導入にともなう技術的課題や経済性への影響を共有する体制を組むことは、実用化を円滑に進める上で、日本が学ぶべきことだろうと思います。

規制機関(ASN)が評価に加わっていることも興味深い点です。

分離変換に関して、処分コストの低減や潜在的有害度の低減(長期の被ばく)などのメリットが目が行きがちですが、そのために原子炉・燃料サイクルが負担する追加コストや作業の方々の方々の放射線被ばく(短期の被ばく)等のデメリットについても検討する必要があると思います。

8. 分離変換技術の実用化に向けて

分離変換技術の実用化に向けて、6. で述べましたロードマップの必要性とともに、7. でご紹介しましたフランスの事例とそこから得られる教訓を踏まえて、以下に検討すべき事項例を挙げました。

- ロードマップにもとづき判断ポイント毎に評価を行い、着実に推進。
- 安全性、資源論(持続可能性)、発電コスト(経済性)、核拡散抵抗性からの次世代炉サイクルの選択。
- MA、LLFP のうち変換対象の絞込み。
- 国、原子力発電事業者、再処理事業者、燃料加工事業者、処分事業者、輸送事業者、研究開発機関の連携と協業。
- 処分への効果に関する、評価の精緻化、評価結果、処分から見た目標や指標の共有。
- 高速炉サイクルの分離変換を含む技術的、経済的評価においては、分離変換の導入による、再処理、燃料加工、輸送、原子炉、廃棄物管理などの関連技術への影響や事業化可能性も評価。

経済性評価においては、他の電源との比較に用いる平準化発電コストとともに、原子炉、サイクル施設に対する追加コストと処分施設のコスト削減効果を割引しないで比較することも重要。

- エンド・オブ・ライフの議論。

9. おわりに

高レベル廃棄物に含まれるマイナーアクチノイド(MA)は人に摂取されると放射線学的な有害度が大きい物質ですが、地層処分においては、地層中で移動しにくく、地下水移行シナリオでは放射線被ばくの重要核種にはなりません。また、直接接触する人間侵入シナリオは、資源の無い深い地層を選択することにより、その確率を低減する考えです。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わけではありません。

一方、廃棄物管理においては、廃棄物を最小化し、処理処分を最適化する継続的な努力が求められており、分離変換も廃棄物管理の選択肢として評価する必要があります。その際、廃棄物処理技術の革新や分離変換技術の選択肢の評価においては、廃棄物を減容し、地層処分場を小さく(コンパクト化)して処分費用を低減できるメリットだけでなく、それらを導入した際の原子炉・燃料サイクルへの技術的経済的影響についても評価し、総合的な判断を行い、全体としての成立性、妥当性を評価していく必要があると思います。

また、分離変換の処分への効果に関して、分離変換分野の方々と処分分野の方々の理解には、少し違いも見られますので、両分野の方々が協働し、影響を理解し、得られた知見を共有することが必要だと思えます。

処分は、技術経済性だけでなく、社会科学的な観点からも評価を受けています。人々に受け入れられる処分を目指して、社会科学的な観点も含めて分離変換の果たせる役割をきちんと評価し、分離変換の実用化に向けたロードマップにもとづき、段階的に着実に進められることを期待しています。

(本稿は、平成30年3月2日に開催された平成29年度第4回原環センター講演会の講演内容をもとに編集したもので、「放射性廃棄物の処分と分離変換(その1)」は原環センターホームページのライブラリーに掲載されている原環センタートピックス No.126 からご覧いただけます。)

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/>