

原子力委員会研究開発専門部会 分離変換技術検討会報告書骨子案

第1章 はじめに

第2章 分離変換技術の効果及び意義

2－1 分離変換の導入効果

- (1) 処分場性能に対する効果
- (2) 潜在的な有害度
- (3) 実効線量率
- (4) その他の効果

2－2 分離変換の導入シナリオ

2－3 分離変換の導入意義

第3章 分離変換技術に関する研究開発の現状

3－1 分離プロセスに関する研究開発の現状

- (1) 湿式分離
- (2) 金属燃料乾式処理

3－2 核変換サイクルに関する研究開発の現状

- (1) 発電用高速炉利用型(酸化物燃料)
- (2) 発電用高速炉利用型(金属燃料)
- (3) 階層型
- (4) FP核変換
- (5) 共通基盤技術

3－3 各概念の特徴比較

3－4 分離変換のコストに関する検討

第4章 海外における分離変換技術に関する研究開発等の現状

4－1 フランス

4－2 米国

4－3 欧州

第5章 研究開発の評価と今後の取組

5－1 研究開発の評価

5－2 研究開発課題の整理

5－3 今後の研究開発の進め方

第6章 おわりに

第1章 はじめに

これまでの経緯

- 分離変換技術は、高レベル放射性廃棄物に含まれる元素や放射性核種を、その半減期や利用目的に応じて分離するとともに、長寿命核種を短寿命核種あるいは安定な核種に変換する技術であり、放射性廃棄物処理処分の負担軽減及び資源の有効利用を目的としている。
- 原子力委員会においては、高レベル放射性廃棄物の資源化とその処分の効率的化の観点から極めて重要な研究課題として、昭和 63 年には原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会において「群分離・消滅処理技術研究開発長期計画」(通称、「オメガ計画」)を取りまとめた。
- 平成 11 年には、原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会に核種分離・消滅処理技術分科会を設置して長寿命核種等の分離変換技術に関する調査審議を行い、平成 12 年 3 月 31 日に報告書「長寿命核種の分離変換技術に関する研究開発の現状と今後の進め方」を取りまとめた。
- 同報告書においては、研究開発スケジュールについて、「2005 年頃が分離変換技術について、発電用高速炉利用型・階層型をはじめとする研究開発シナリオ全体の再検討を実施する機会と考える。」とした。

評価の趣旨

- 平成 12 年のチェックアンドレビューから 8 年が経過し、2005 年度には「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究」が終了し、2006 年度より「高速増殖炉サイクルの実用化研究開発」が実施されている。
- また、この間に評価対象の3機関のうち原研とサイクル機構が統合し日本原子力研究開発機構が発足した。
- こうした状況を踏まえて、分離変換技術に関する研究開発の現状について整理するとともに、本技術の効果及び意義を分析し、それらを踏まえた今後の研究開発の進め方等について検討するために、本検討会において必要な調査審議を実施することとした。

第2章 分離変換技術の効果及び意義

2-1 分離変換の導入効果

(1) 処分場性能に対する効果

① 廃棄体発生量

- ・ MA 核変換の効果は UOX-LWR では限定的だが、プルサーマルでは廃棄体発熱に大きく寄与する ^{241}Am の核変換により、半減が可能。
- ・ FBR では、廃棄体発生量は廃棄体発熱ではなく酸化物含有量(FP が支配的)の制限で決まるため、MA 核変換の効果は小さい。
- ・ FP 分離により新たな廃棄物が発生(Sr-Cs 焼成体、その他の元素群のガラス固化体、低レベル廃棄物)。Sr-Cs 焼成体は高発熱だが半減期約 30 年で減衰。その他の元素群ガラス固化体は低発熱なので集中的な処分が可能。

② 単位電力量あたりの廃棄体定置面積

- ・ 固化体の占有面積には ^{241}Am の発熱の寄与が大きいため、MA 核変換による占有面積の低減では Pu 利用時(MOX-LWR、FBR)にその効果が大きく現れる。
- ・ MA 核変換の効果は地層処分の岩種や定置方法により差があるが、いずれの場合においても効果が期待できる。
- ・ FP 分離だけでは、MA の発熱により、廃棄体定置面積低減の効果は小さい。
- ・ MA 核変換により FP 分離をしなくても長期貯蔵(約 230 年)により集積定置が可能となる。しかし、ガラス固化体は貯蔵時の温度制限が厳しいために含有量を上げられず発生本数が多くなり、貯蔵に必要なピット数は増えることになる。
- ・ MA 核変換と発熱性 FP の分離・長期貯蔵の組合せにより、ガラス固化体の処分に必要な期間を大幅に短縮しつつ定置面積を低減できる可能性がある。

③ 処分前貯蔵期間

- ・ 発熱性 FP(Sr, Cs)を分離し、かつ MA 核変換をすることにより、ガラス固化体の処分までの貯蔵期間を短縮でき集積的な定置ができる可能性がある。

④ 処分場性能に影響する主なパラメータ

<核データ>

- ・ ^{241}Am 等の MA 核種の核データは処分場性能だけでなく、MA 核変換システム評価においても非常に重要。微分測定だけでなく臨界集合体等による積分実験による検証が不可欠。

<MA 回収率>

- ・ 集積定置を狙う場合のガラス固化体への元素移行率の目標は、MA で 0.3~1%、Sr-Cs で 0.3%。
- ・ 集積定置以外ならば、MA で 10%、Sr-Cs で 1%。但し、MA 元素の移行率は廃棄体の潜在的有害度の低減に影響が大きい。

検討会での主な意見等

- Sr-Cs を分離して貯蔵することについては、地上での長期保管に対するコスト面での負担や社会受容性も考慮すべき。

(2) 潜在的な有害度

① 潜在的有害度の減少

- ・ MA リサイクルにより、潜在的な有害度は $1/10 \sim 1/1000$ に減少する。特に炉取り出し後 100 年以降では、その効果が大きい
- ・ Np のみをリサイクルしても潜在的な有害度の低減効果はほとんど無く、Am・Cm をリサイクルする効果が大きい。

② 潜在的有害度の減少時間の短縮

- ・ LWR 燃料の原料として必要な天然ウランとその娘核種による潜在的な有害度と比較した場合に、MA リサイクルにより天然ウランのレベルを下回るまでに要する期間を 1 万年から数百年に短縮できる。

(3) 実効線量率

- ・ 高レベル廃棄物の地層処分において地下水移行シナリオにおける被ばく線量評価は、諸外国で提案されている安全基準($0.1 \sim 0.3 \text{ mSv/年}$)を十分に下回っている。
- ・ 被ばく線量のピーク(約 100 万年後)は ^{135}Cs が支配的であり、MA 核変換はピーク値には影響しない。

検討会での主な意見等

- PT は元々は長期毒性の低減を目標としていた。処分場性能だけでなく、この面での意義も検討すべきでは。
- 被ばく線量評価では Cs-135 や I-129 が重要だが、すでに十分安全基準よりも低く抑えられる見込み。処分場面積の低減には MA 核変換が効果的。

(4) その他の効果

2-2 分離変換の導入シナリオ

① FBR(MA 均質サイクル)

- ・ 軽水炉から FBR への移行期には、FBR 燃料の MA 装荷率を最大 5% に制限することで、対処が可能。

- ・ MA 装荷率 5%の場合、FBR 新燃料集合体の発熱量は最大約 2.3kW/体、LWR 及び FBR 使用済み燃料から回収された分離 MA 貯蔵量は最大 30トン程度。
- ・ MA 装荷率の最大値を 3%程度まで制限しても、FBR 新燃料発熱量は後年に増加することとなり、一方で MA 貯蔵量は最大 70トンに増加するため、効果は低い。
- ・ Am、Cm を別途冷却してから装荷する方法(例えば 30 年遅延)は、FBR 新燃料発熱量抑制の観点からは効果があるが冷却時に 140トンの MA の貯蔵方法を別途検討する必要がある。

②FBR(MA 非均質サイクル)

- ・ MA を FBR サイクルから切り離すことで、通常の炉心燃料の発熱等が抑制できる。
- ・ 平衡期には全体の 1/4 程度の基数の FBR が Am+Cm の非均質装荷。
- ・ 移行期には MA の発生が増えるので、MA 蓄積を抑制するには非均質高速炉を先行して投入する必要がある。
- ・ 上記議論は非均質装荷高速炉の設計に大きく依存するが、非均質装荷 FBR の設計検討は不十分。
- ・ ターゲット燃料は MA 含有量が高いために、発熱・放射線遮蔽等の観点からの検討が必要。

③ADS

- ・ 発電用燃料サイクル(軽水炉、FBR、及びそれらの移行期)から MA を切り離して核変換できる。
- ・ 58GWe の発電設備容量に対して、MA の分離状況に応じて最大 8 基程度(出力 800MWth)の施設を順次投入することで多様な炉型に柔軟に対応可能。
- ・ ADS サイクル規模は、軽水炉サイクルの 1/100 程度、高速炉サイクルの 1/20 程度。ADS サイクルからの発生廃棄物量は相対的に少量。
- ・ 非均質装荷 FBR 同様に MA 高含有燃料の検討が必要。また、未開発の要素技術が多い。

検討会での主な意見等

- シナリオ検討には、コスト等の具体的な数値を提示する必要がある。
- シナリオ検討には最低限の技術的フィージビリティが必要。
- 例えば Cm に関しては研究インフラがまったく存在せず評価しようがない。こうしたインフラの欠如が今後ネックになる可能性がある。
- シナリオ検討には、FBR での均質・非均質の対比は必要。

2-3 分離変換の導入意義

検討会での主な意見等

- 原子力を長期に使っていくためには、地層処分の問題は重要であり、1つ処分場を確保できたら、これを長く使っていくことが望ましい。Pu 利用時代になれば、分離変換技術が重要になる可能性がある。
- PT の実現時期に対する明確な答えはないが、原子力の持続的利用のための技術開発はあるべきで、選択肢からはずすべきではない。
- PT を実用化するのは研究機関ではないが、研究開発を行っている人が処分場の開設時期や高速炉の実現時期を横目でみながら実用化時期を提言してほしい。

<論点>

- ・「地層処分の合理化」に対する評価結果は妥当なものか？
- ・処分場性能だけでなく、元々目指していた長期毒性の低減の意義も検討すべきではない。「地層処分の合理化」と「長期毒性の低減」の意義が考えられるが、両者のバランスについての共通見解が必要ではないか？
- ・地層処分に対するオプションの提示という「社会的な意義」があるか？
- ・より現実的なシナリオ検討について議論が必要ではないか。
- ・LLFP 核変換の意義、特に TRU 廃棄物に含まれる I-129 の核変換の意義（長期毒性の低減等）に対する議論が必要ではないか？

第3章 分離変換技術に関する研究開発の現状

3-1 分離プロセスに関する研究開発の現状

(1) 湿式分離

検討会での主な意見等

- 現在の取組みは、FaCTの研究開発が中心になっており、前回 C&R から境界条件やクライテリアが大きく変化している。
- 4群群分離プロセスについては、実廃液を使用した小規模試験による基礎的なプロセス確認試験を行い、メインプロセスについては実用化にむけた大きな障害はないと判断し、現在は FaCT で進めている NEXT 法を中心に研究を行っている。
- 新抽出剤については、非常に高性能なものを開発しており、技術開発が進んでいると評価できる。

(2) 金属燃料乾式処理

検討会での主な意見等

- 小規模ながら実廃液を使用した基礎的な研究を実施して、基礎的な化学反応プロセスの検証はできたと考えられる。
- プロセス実証に向けては、基礎化学的取組みの拡充と安全性や計量管理手法等の工学的な課題の解決等のより実用性を探究する努力が望まれるのではないかと。
- 工学試験を行うのに必要な施設(不活性雰囲気ホットセル等)は、国内では未整備。また実廃液の入手も困難。

3-2 核変換サイクルに関する研究開発の現状

(1) 発電用高速炉利用型(酸化物燃料)

検討会での主な意見等

- MA-MOX について系統的にデータを取得している点は評価できる。
- 燃料製造プロセスの実用化には、簡素化ペレット法の実現と MA 含有 MOX 燃料の製造という2つのハードルがある。2つを同時に目指すのではなく、まずは U、Pu を用いて簡素化ペレット法を確立し、並行して MA 燃料については基礎的な R&D を充足していく取組みが必要ではないかと。
- 照射試験は時間がかかる。GACID のような国際協力を活用するなど、うまく開発を進めていただきたい。
- 簡素化ペレット法等のキーテクノロジーがうまくいかなかったときのリスクマネジメントが必要では。
- 今後の研究開発にあたって、MA の調達、施設整備や施設の機動的な運用等の解決すべき課題がある。

(2) 発電用高速炉利用型(金属燃料)

検討会での主な意見等

- 今後は、燃料の照射挙動や被覆管との相互作用等の金属燃料照射効果の研究開発がのぞまれる。
- FaCT の副概念のような発電用高速炉での MA 核変換以外に、金属燃料専焼炉概念検討も必要ではないか。
- 金属燃料を用いた場合の処分場性能に対する効果について、金属燃料サイクルを考慮した検討が必要ではないか。

(3) 階層型

検討会での主な意見等

- 未臨界体系の出力分布等の核設計精度の検証は非常に重要な課題ではないか。
- 階層型を新たに導入することにより、MA を非常にコンパクトに扱うことができ、発電用サイクルの負担を軽減できるメリットがある。
- 研究開発においては関連分野とのコミュニケーションが重要。

(4) 共通基盤技術

検討会での主な意見等

- 核データの精度向上は必要だが、そのためには核設計の目標精度をはっきりとさせる必要がある。
- 核データの精度向上には、微分測定だけでなく積分実験による検証が不可欠ではないか。MA を使った炉物理実験が必要か否か議論すべき。
- 積分データを取っても目的とする核種がはいっていないと意味がない。日本だけでやる必要はないが、国際協力も活用して研究開発を進めるべき。
- 研究施設は欧州等の施設と比べても遜色はないが、運営面での課題があるのではないか。
- アクチノイドネットワークのような取組みは、施設の有効活用や人材育成という面で有効な取組みである。
- 既存の施設の現状を踏まえて、研究開発を進めていく上で今後どういった施設が必要になるのかシステマティックな議論が必要である。

第6回検討会における議論を基に記載。

<論点>

- ・各技術の「達成度」と「実現性見通し」をなんらかの形で評価する必要があるのではないか？
- ・ADS については、加速器の成立性について、現状での認識を明示する必要があると思われるが、十分な議論がなされていないのではないか？

3-3 各概念の特徴比較

第6回検討会における学会委員会での検討結果を基に記載。

3-4 分離変換のコストに関する検討

OECD/NEAにおけるコスト評価試算例

- ・2006 年に実施された OECD/NEA「Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management」(先進的核燃料サイクルと放射性廃棄物管理)におけるコスト評価試算結果。
- ・様々な核燃料サイクルオプションを設定し、それぞれで生じる放射性廃棄物のための処分場性能等を評価。
- ・解析結果は、コスト要因とそれらの不確かさの影響を、感度解析を通して示すことを目指したもので、結果は「指標的」なものであり、多様な核燃料サイクルのコストへの影響は、ワンスルーの 120%以内。コストの大部分は原子炉のコストが占める。また、評価に用いた単価の上限と下限を考慮すると、上記のコスト上昇は信頼性幅の範囲内。

第4章 海外における分離変換技術に関する研究開発等の現状

4-1 フランス

- 放射性廃棄物管理研究法(1991 年)
- 議会科学技術評価局(OPECST)による報告書
- 国家評価委員会(CNE)による総括評価報告書
- 分離変換についての国際ピアレビュー
- 放射性廃棄物等管理計画法(2006 年)
- 分離変換に関する研究開発の現状

4-2 米国

- AFCI プログラム
- GNEP
- 全米科学アカデミーによる原子力研究開発計画のレビュー
- GAO(米国会計検査院)による GNEP の評価
- 分離変換に関する研究開発の現状

4-3 欧州

- 持続可能な原子力エネルギー技術開発プラットフォーム構想
- 欧州 EUROTRANS プロジェクト
- 欧州枠組みプログラム(Framework Programme: FP)

第5章 今後の研究開発の進め方

第6回検討会における議論を基に記載。

<論点>

- ・各概念(発電用高速炉利用型、階層型)の関係、関連性をどのように整理するか。
- ・各技術の今後の進め方、基礎データの拡充の仕方、実用性を評価するに足る試験の進め方について議論が必要ではないか？
- ・基礎的な段階ではかなりの進捗があったが、次の段階に進むには「施設整備の問題」と「試験物質の問題」がある。施設、インフラ、材料の問題については何らかの指摘をする必要があるのではないか？
- ・既存の施設の現状を踏まえて、研究開発を進めていく上で今後どういった施設が必要になるのか議論が必要ではないか。