

高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズⅡ最終報告書
に関する原子力委員会の対応について（その2）（案）

平成18年5月30日
原子力委員会

1. 本委員会は、平成18年5月9日付け「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究フェーズⅡ最終報告書に関する原子力委員会の対応について」において、本報告書に対する文部科学省の評価において留意されるべき点についての意見を述べたところである。
2. 本委員会は、その後も引き続き議論を行い、その結果を、別添の通りとりまとめたので、文部科学省の評価においては、本意見にも留意されることを期待する。

以 上

1. 報告書の全体に係ること

1.1 開発目標について

- (1) 報告書には、将来において高速増殖炉とその燃料サイクルシステムが備えるべき特性が開発目標として提示され、それぞれについて具体的な設計要求指標が定量的に示されている。この指標は、原子力システムの性能とその実現に要するコストあるいはそのシステムの経済性等との兼ね合いの中で適切な目標として設定されなければならない。したがって、設計要求指標の評価においては、その意義及び性格とその設定根拠となる政策分析の結果が明確であることが国としての研究開発方針を定める上で重要であることに配慮がなされるべきである。
- (2) 経済性について「軽水炉に比肩する・・・」という目標は、現在の軽水炉に基づく原子力エネルギー供給体系に新たに高速増殖炉を導入していくことによって、ウラン価格が上昇しても原子力エネルギー供給体系が他の技術によるエネルギー供給体系に対してコスト優位性を失う事態に至らぬようにできるという条件の簡約な表現と理解する。しかしながら、原子力システムのあり方に係る政策分析においては、高速増殖炉と軽水炉が並立している燃料リサイクルシステムと使用済燃料を直接処分するシステムの発電コストの比較も経済性の観点からの重要な論点になる。そこで、この事項の評価においては、この論点から議論に対しても耐えることができるよう検討がなされるべきである。
- (3) 将来の世界においては、国際的な燃料供給保証システムのもとで多くの国が軽水炉により原子力利用を進め、限定された国が高速増殖炉と再処理技術を活用してこのシステムを担うのが核不拡散の観点から適切とする考え方もある。将来の国際政治・経済体制がこの考え方を受け入れるかどうかについて今予断をもつべきではないが、その成否を支配する一つの要素は、このシステムを構成する高速増殖炉とその燃料サイクルが資源有効利用性に優れ、しかも核分裂性物質の倍增時間が短いものであることである。そこで、我が国が世界各国と力を合わせて高速増殖炉の開発を推進していく場合にはこの倍增時間を短くできることが重視される可能性が高い。したがって、この事項の評価においては、この観点からの柔軟性が確保されていることについても検討がなされるべきである。
- (4) 将来の燃料サイクル技術として、核不拡散の観点からプルトニウムを単体で扱うプロセスが含まれないようにするためにプルトニウムをマイナーアクチナイドと共抽出してリサイクルすることや、高レベル放射性廃棄物の発生量低減を目指す観点からマイナーアクチナイドを回収してリサイクル利用することは適切である。しかしながら、これらに関して定量的指標を定めてこれを要求性能とするべきか否かについては、核拡散抵抗性の観点からの妥当性の評価基準は時代環

境に依存すること、廃棄物処分に関してはしばしばその時利用可能な最善の技術の採用が義務づけられることを踏まえて、政策的な判断を要することである。したがって、これらの指標に係る評価においては、その値の選択の背景にあるシステム分析の結果やその性格についての検討におけるこうした点についての配慮のあり方についても検討がなされるべきである。

- (5) 高速増殖炉の使用済燃料の再処理、燃料加工技術の今後の研究開発対象として「先進湿式法+簡素化ペレット (MOX 燃料)」が主概念に、「金属電解法+射出鋳造法」がその補完概念に選択されている。今後の研究開発活動を効果的かつ効率的に進めるためには、経済性に限らず、その他の評価項目に関しても、これらの技術の選択過程において判断を決した主要因がより明確にされていることが、研究開発者の創造力を刺激する観点から望ましいという意見がある。また、「国内における開発インフラの有無」や「国際協力による研究開発の可能性の有無」といった判断理由は、創造力の発露を制限する可能性もあり、現段階における選択過程においてこのような判断理由は大きな位置を占めるべきではないという意見がある。これらは検討に値する視点と判断するので、技術選択過程の評価にはこうした視点も配慮されるべきである。

1.2 実用化までの大きな投資を要する活動のスケジュールのあり方

- (1) 革新的概念を取り込んだ原子炉システムの実用化像を2015年頃に確定するためには、実用化過程において避けて通ることができない実証炉の建設に向けてその概念設計がとりまとめられている必要がある。この場合、この概念設計がいくつかの革新的概念を採用しているときには、ある規模の要素試験研究を通じてその成立性が実証されている必要があるとする考え方、あるいはそうした試験は、当該概念設計の評価を十分に行って建設を目指すべき実証炉設計であると認知した後に、これの実現に向けた活動の一環として行うのが合理的とする意見がある。どちらが適切であるかは、実証すべき技術内容、その実証試験の規模や内容によっても異なると考えられるが、研究開発資源の配分に関わる重要な事項であるから、時間的な目標を守ることの重要性と利用可能な研究開発資源量を踏まえた政策論議の中で議論されなくてはならないことである。この観点から、今後の活動計画案の評価にあたっては、2015年に至る中間の段階で国がこうしたことに意見を述べる機会があるべきことが配慮されるべきである。
- (2) 高速増殖炉の実用化目標である2050年前後には、ウラン資源の需給動向や価格予測を踏まえて原子力発電設備を多数有する国々から高速増殖炉技術が実用技術として採用されていくことになる可能性が高いが、この可能性は他のエネルギー生産技術の進捗に加えて人口増加、残存ウラン資源量、地球温暖化などの動向や、各国の国内事情、国際核燃料供給保証システムの稼働状況、そして、2

030年代には稼働している高速増殖炉の実証炉とその燃料サイクルシステムの性能によることになると考える。そこで、今後の計画の評価においては、実証炉のあり方は、その性能がこうした議論を左右するものであることを踏まえて、熟慮の上に決定されるべきものであることを念頭におくべきである。

(3) すでに述べたように、高速増殖炉とその燃料サイクル技術の研究開発にあたっては国際協力を効果的に活用するべきであるが、これは国家の研究開発資源の効果的活用の観点から、上に述べた原子力利用のあり方を巡る国際動向や内外の政治情勢をも踏まえて我が国の状況全般について俯瞰することができる高いレベルで定める基本方針に従って行われるべきものである。計画の評価では、このことにも留意するべきである。

(4) 2010年頃から開始される第二再処理工場のあり方の議論においては、その生産物は高速増殖炉の燃料に加工されるべきものであることや、21世紀後半期における原子力利用に対する国際社会の期待と我が国がこれに関して果たすべき役割、放射性廃棄物の管理・処分のあり方等を踏まえて、その技術と設置のあり方、それを実現する方策等が検討されることになろう。今後の高速増殖炉の実用化戦略調査研究は自ずとこの検討に役立つ成果を生み出すであろうが、評価に当たっては、この検討に必要な技術情報のうちどの部分の生成を今後の研究開発計画における研究開発課題の一部とするのが合理的かについて関係者との協議を踏まえ検討していただきたい。

1.3 研究開発の評価のあり方について

原子力政策大綱の基本理念の記述を指摘するまでもなく、施策は適切に評価されるべきである。国の研究開発活動については、国はこの評価活動の一部として、受託者との間に「trust but verify」*という緊張関係を整備することがあってよい。公募研究ではそうした考え方に基づく制度も整備される方向にある。この高速増殖炉に係る研究開発活動についても、その重要性に鑑み、原子力研究開発機構を中心とする研究主体とは異なる者に、一定の研究開発及びそれに基づく評価を行わしめることで、それぞれの成果についてクロスチェックできる体制を整備することも検討すべきである。この場合、国際社会と共有するべき技術を開発するのであるから、この体制に外国人を加えることや、これに加えて、国際レビューを受けることも検討すべきである。

1.4 国民との相互理解

2050年に高速増殖炉の実用化を目指す原子力研究開発利用は、国民からの支援と期待の中で進めることが大切と考える。エネルギー・セキュリティー、地球環境保全、平和利用の堅持という大きな目標を持ってこの研究開発活動を進めている実態を

国民に示すことにより、次世代の人々と分かち合える展望と夢が国民の常識として醸成されることを期待して、様々な方策を採っていくべきである。その一つとして、今の子供たちへの教育の中にこうした取組の存在を織り込むことは必須と考える。このことは評価の視点のみならず、評価結果をいかに国民に説明するかも含め、評価活動全体を通して、常に意識すべき事柄である。

* : 参考(Statement of Paul M. Golan, Acting Director for the Office of Civilian Radioactive Waste Management, U.S. Department of Energy, before the Committee on Energy and Natural Resources, U.S. Senate, May 16, 2006 より抜粋)

To further ensure the highest quality and objectivity of the science and technology supporting the Yucca Mountain Project, we are working to instill a culture of “trust but verify.” As part of this effort, we will use a University-based consortium to independently review key aspects of the Project to ensure we stay objective and without bias. In April, the Department selected the Oak Ridge Institute for Science and Education to perform this work. Additionally, we are in the process of implementing the Safety Conscious Work Environment across the entire Yucca Mountain Project.

2. 要素技術の技術的成立性等について

以下に示す諸点は、評価の視点というよりは、評価作業の場において発せられるべき意見の色彩が強い。評価作業においては当然にこのような問題提起を巡ってのやりとりを通じて研究成果の深い理解が共有されていると思料し、参考までに記すものである。

2.1 各燃料サイクルシステム概念の要素技術の技術的成立性等について

2.1.1 先進湿式法

先進湿式法を構成する「Uの粗取り→共抽出及びMA回収」の流れは妥当であり、当該報告書の「総合的な目標適合度の最も高い概念」と考えられる。しかしながら、先進湿式法に採用される技術で革新的な技術（晶析、抽出クロマトグラフィーによるMA分離）は、以下に示すように共抽出工程のベースとなっている PUREX 法との技術的成熟度の差が大きく、技術開発の進め方についてさらに慎重な検討を必要とする。

(1) 晶析工程

- U粗取りを行う工程は、それ以降の処理量をかなり小さくできるので、再処理経済性向上の鍵を握る工程と考える。FS では、温和な条件で操作可能な晶析法はその第一候補とされている。しかし、溶液から固体を析出する非均質プロセスとして TRU, FP 挙動にかかわる基礎的なデータの充実とともに U回収率の安定性(変動の範囲)、制御性にわたった詳細な検討が行われることが必要であり、今後の研究開発計画を立案するにあたってこれらの点に十分留意されることが必要である。現段階で、「ウランの粗分離工程に適用できる見通しを得た」とするのは、楽観的すぎるのではないか。
- なお、同プロセスを軽水炉燃料に用いる場合は低除染となる可能性が高いことから、回収ウランの取扱について別途国及び事業者における検討が必要となる。

(2) U・Pu・Np 共抽出工程

- Np を U・Pu とともに抽出する試験において、98%の Np を抽出した成果を得ているが、この Np 回収の成果はこれで十分なのか、また、最重要 FP の 1 つの Tc の工程中の制御についてはどのように考えているのか。
- この工程に対する導入を想定した遠心抽出器の開発が進められている。ウランを用いたスケールアップ試験等行われているが、溶解工程から生じる不溶解性スラッジの影響評価及び対策検討が必要ではないか。
- 検討やデータ取得の蓄積が必要な部分は残っているが、フランスにおける同種の技術開発成果とも併せれば、PUREX 法に基づいた技術である共抽出工程の技術的成立性は概ね見通せるのではないか。

(3) MA 回収（抽出クロマトグラフィー法）

- 抽出クロマトグラフィー技術は、分析レベルの分離以上の経験は乏しい。クロマ

トグラフィーに坦持されている抽出剤の長時間安定操作性等、検討すべき課題は多い。FSにおける実験的研究も基礎的な段階にある。このため、MA抽出剤に関する検討と抽出剤を保持する高分子体剤などの材料の検討等が必須となるが、報告書では抽出剤溶出対策の検討結果が示されていないため、これを明らかにすべきである。

- FSフェーズIで対象とされたSETFICS法は、溶媒抽出法による技術で、実廃液を用いたホット試験まで実施されており、既に研究開発の蓄積がある技術としてこれまでの研究開発成果は評価できる。かつ、フェーズIで課題とされたSETFICS法からの廃棄物量の問題は、その溶媒洗浄に用いる試薬をソルトフリー化することで解決できるとされた。これと比較して、抽出クロマトグラフィーは実用化されれば経済性や廃棄物発生量に優れると考えられるものの、その開発段階は模擬廃液によるコールド試験レベルである。このため、報告書の記述だけでは溶媒抽出法に対する優位性は確定困難である。抽出クロマトグラフィーを優位としたとしても、溶媒抽出法を選択肢として破棄したわけではないと考えられ、今後の試験計画はこの点での柔軟性を組み込むことが求められる。
- なお、MA回収については、達成した回収率や目標とする回収率について最終報告書の記述に混乱が見られるため、整理すべきである。

(4) 代替概念（超臨界直接抽出）

- 超臨界直接抽出法は、実用化すれば先進湿式法よりもさらに単純なプロセスでの再処理が可能で、経済性向上や発生廃棄物量の低減が期待できるとして採択されたものである。しかしながら、これまで連続プロセスが確立されたことがない野心的な技術であり、実用化されているのはカフェイン抽出等、再処理との比較が妥当とは言い難い分野である。このため、実用化には相当の技術開発が必要であると考えられるが、報告書では先進湿式法の代替となり得ると判断できる技術成立性を判断するための十分なデータは示されていない。したがって、代替概念とすることが妥当との結論に至った根拠を示すべきである。

2.1.2 金属電解法

- 金属燃料FBRの平衡サイクル時においては最善の方法であり、これまでの米国や欧州での研究開発成果を考えると、補完概念として開発することは妥当ではないかと考える。また、ほぼ類似の方法がガス冷却高速炉用に想定されている窒化物燃料サイクルにおいても適用可能であるが、被覆管付き燃料溶解に対する実現可能な効率的溶解技術やU/Pu/MAの回収速度の向上、計量管理の見通し、ソーダライト固化体製造等に検討すべき点があるのではないかと考える。

2.1.3 窒化物燃料

- ガス冷却高速増殖炉(GFR)で想定されている窒化物燃料の技術レベルは、酸化物

燃料に比べると基礎段階にある。しかし、湿式、乾式いずれの再処理概念にも適合性があることから、GFR 用として補完的な位置づけを与えることは妥当ではないかと考える。

- 窒化物燃料は、C-14 の生成を抑制する目的で N-15 を用いる必要があるため、N-15 の濃縮は重要な技術である。少量分離プロセスとしては実績のある方法がいくつかあるにもかかわらず、当該報告書では分離法として新規技術である圧カスイング法のみが取り上げられているが、現段階で絞り込みを行うことだけのデータは示されていない。その根拠となるデータを明示すべきではないか。

2.1.4 MA 含有燃料

- MA 回収と関連して、MA を数パーセント以上含有する燃料については、特に Cm を添加したものは世界的にみてもほとんど研究実績がない。
- MA として Cm まで添加する場合、Cm-242 ($t_{1/2}=0.45$ 年) の崩壊後でないと、燃料製造はほぼ不可能であり、これがシステム・インベントリーに影響を及ぼす。Cm-242 崩壊後も Cm-244 ($t_{1/2}=18$ 年) の発熱と中性子放出が燃料加工や輸送までを含めたサイクル全体の技術構成を支配することになる。
- 以上を踏まえると、現段階では MA を数パーセントを超えて含有する燃料の実現性を判断することは困難ではないか。
- Np のみを U, Pu とリサイクルする場合についても燃料への影響評価は必要ではないか。この場合、扱いの困難な発熱性の Pu-238 が生成する効果を評価すべきではないか。

2.2 各燃料サイクルシステム概念の 2015 年までの研究開発計画について

2.2.1 先進湿式法

研究開発にあたっては、U 粗取りや MA 回収などについて共抽出工程と比べ技術的成立性を正確に判定するには未だ基礎的な段階にある要素技術があることについて認識すべきである。具体的には、晶析法や抽出クロマトグラフィーによる MA 回収操作に対し、課題の十分な把握とこれらを代替する技術を用意しつつ研究開発を進めるべきではないか。以下に各要素技術に対する議論の結果を示す。

- 十分なデータ蓄積が必要であることから、試験規模拡大を構想するのと並行して、CPF 等を用いた小規模ホット試験は 2010 年以降を継続して基礎データを充実させ、枢要プロセスの技術開発と併せて行うことが現実的ではないか。
- 晶析工程については、Cs の除染性など FP の除染係数の目標とその根拠、U 分離の際の Np の処理に関する方針や Pu 混入量の許容範囲を明らかにして研究開発を行うべきではないか。研究開発上の課題を十分検討するとともに、晶析法を代替しうる U 粗取りを行う技術の選択肢も準備する必要がある。また、晶析工程は液

- 体と固体の共存する非均質プロセスであることから、スケールアップの各段階で除染性能等の確認が必要となる可能性に留意すべきではないか。
- 共抽出工程については、今後、主工程における Np の抽出率をさらに上昇させるための検討を行うのか、抽出率をこれで十分とし抽出残液側に存在する Np について MA 回収工程での回収も想定するのか、MA 回収工程と関連づけた検討がなされるべきではないか。このような Np 回収についての基本的な考え方を提示し研究開発を進めるべき。また、U-Pu-Np 製品への Tc 混入の許容度を明らかにし、それを達成するためのプロセス条件を明らかにすべきではないか。
 - 抽出クロマトグラフィーによる MA 回収については、MA 回収の研究開発の進んでいる仏国等で採用している溶媒抽出法への取組み方も併せて検討すべきではないか。
 - MA 回収は、世界的に見てもまだ基礎的、概念的な検討の段階であることを認識しつつ、分離目標値を定めた上で SETFICS 法等の溶媒抽出法や C, H, O, N で構成されている化合物を用いる MA 回収法も選択肢に残し、比較検討を行っていくことが必要と考える。また、MA 回収による追加コストや二次廃棄物発生量などについて、開発段階ごとに判断基準を設け研究開発を実施すべきではないか。
 - 平行して、主工程での U・Pu・Np 共抽出後もこれらの元素は、主工程から発生する MA 回収の対象である、抽出残液中に残るため、MA 回収工程におけるこれらの元素の挙動の把握と制御に関する検討も重要ではないか。
 - 先進湿式法の代替概念である超臨界抽出法については、現段階で主に以下の検討が必要であると考えます。
 - 超臨界流体を用いるため、非密封物質を工学的に 12～26 MPa という高圧容器を遮へいセル内に擁する装置が、再処理設備として最も重要な安全性の観点から、問題なく許容されうるのか、についての検討が必要ではないか。
 - また、超臨界直接抽出では溶解速度を上げる観点から使用済燃料を粉体化し被覆管と分離する必要がある、その方法として熱脱被覆法が挙げられているが、複雑な工程のため、超臨界直接抽出を用いることで得られる後工程の簡素化効果が相殺されてしまう可能性があり、燃料の前処理工程から検討する必要があるのではないか。
 - 超臨界直接抽出においては、U-Pu 回収率と FP 除染率が相反する結果となるが、前者が優先されるはずであり、このときの後者の値としてどの程度が許容されるのか明らかにした上で今後の研究開発を進めるべきではないか。
 - 超臨界直接抽出技術については、現在の研究開発レベルならば、他にも先進湿式法を代替できる技術があるのではないか。したがって、代替技術については、超臨界抽出法以外にも対象たり得る技術があるか留意して研究開発を進めるべきではないか。ただし、粉体状の使用済燃料を超臨界抽出技術で分離するのは学術的には興味深く波及効果も考えられる技術であるため、若手育成も含めた研究開発課題とすることも考えられる。

2.2.2 金属電解法

金属電解法は、金属燃料や窒化物燃料の他、酸化物燃料の両方に対応できる点で、他の方法にない優れた特徴を有する。しかし、この方法を構成する各プロセスの基礎及び工学データの集積は未だ不十分であり、まずは主概念の先進湿式と定量的比較ができるレベルに高める必要があるのではないかと考える。

- 最大の課題は、バッチ処理に伴う電極交換等々のマテリアルハンドリング、遠隔自動操作の様な工学的問題と考えられるので、コールドでのモックアップ試験設備により開発を行うべき。報告書にも指摘されているように計量管理技術の開発が実用化のためには重要である。このほか、以下の検討も重要である。
 - Cd陰極へのU/Pu/MA回収速度の再現性の高い測定法の取得。
 - ある程度の大きさの均質なソーダライト固化体製造を可能にする手法の開発。
- 報告書の表-II-9では機器設計が中心であるが、2010年頃までは、現在の研究設備（JAEA 東海/大洗の設備、電中研/EU共同研究等）での電解精製を中心とした工程毎のホット試験データ充実が、物質収支の評価や機器設計を行う上でも最も重要ではないかと考える。
- 電解精製工程におけるU処理速度を向上させる技術が開発されつつあるが、被覆管付きの場合、陽極溶解速度が遅くなる現象に対する対応技術を含め実現可能な効率的な溶解法を検討する必要があるのではないかと考える。
- 各プロセスのプラントシミュレーションのためのソフトウェア開発やデータベースの整備も必要ではないかと考える。
- 並行して2015年までに、マテリアルハンドリングを含めたエンジニアリング技術（コールドで可）の検討、実証あるいは実用機器設計を行いつつ、2015年以降の工学規模実証試験の可能性を探るべきではないかと考える。
- 米国（アイダホ）に工学規模の実験設備がある。乾式分離については韓国がすでに密接に米国との協力を始めているように、湿式再処理よりは国際協力を進めやすい技術である。米国と共同研究できれば、限られた研究開発資源のなかで効率的な技術開発を行える可能性があると考えられる。

2.2.3 MA含有燃料

軽水炉からのMAまでを引き受けることを想定して、MAを数パーセント以上含有する燃料をリサイクルする概念については、長期的に重要なオプションと置き、当面は基礎研究を進めるべきではないかと考える。

2.3 軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行の観点からの評価

以下は、1.2に述べたところを前提として今後の計画のあり方について見解の整理がなされることを期待しつつ、関連する所見を取りまとめたものである。

2.3.1 回収ウラン

これまでの FBR/FS においては、高速増殖炉が導入され平衡に達している状態での検討が行われ、回収ウランはブランケット材として使用することとされていたが、フェーズⅡで検討されている軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行期では、回収ウランが余剰となるばかりか、この回収ウランは U-235 を 1%ほど含むことになる。この回収ウランの利用方法を踏まえた仕様や要件についての検討が、今後必要である。

2.3.2 移行期の燃料サイクルシステムについて

移行期には、軽水炉、MOX、FBR の使用済燃料の再処理が必要となるが、燃料形態に変更がないとすれば、先進湿式法や金属電解法に関しては以下のことが指摘できる。

- 先進湿式法は、金属燃料を除くどの燃料にも基本的に対応可能と考えられる。移行期において、晶析工程が「軽水炉燃料も合わせて処理する場合に～軽水炉燃料の低い Pu 富化度に対応する第二晶析設備を新たに設けることで対応しうると考えられた」との記述があるが、1 回目と 2 回目の晶析工程の間に濃縮+酸回収の操作が必要になり複雑になること、2 回目は FP 濃度が高まるため除染係数はますます低下すること、これらに対する検討が示されていないため、明らかにする必要があるのではないか。
- 移行期の再処理においても、U をまず粗取りする考えは合理的であるが、軽水炉燃料から回収ウランを将来の資源として確保するとの方針であれば、晶析法を軽水炉燃料に適用するには DF が低すぎる。もし、晶析法並みの DF でよいということになれば、他の粗取り法（フッ化物揮発法、NCP 選択沈殿法等）も検討対象となるし、U を高除染で回収できる可能性がある別の方法の検討も必要となるのではないか。
- 金属電解法は、酸化物燃料を Li 還元する必要があるが、燃料性状によっては対応できない可能性ありとする意見がある一方で、明らかなデメリットがなければ金属電解法も検討に値するという意見もある。しかし、現段階の技術的成熟度を考えれば移行期の技術選択肢としては優先度が落ちるのではないか。
- 超臨界抽出法では、使用済燃料を粉体化し被覆管と分離する必要があるが、その前処理技術として開発されている熱脱被覆技術が十分確立されない現状では移行期の再処理法としては適切でないのではないか。

以上