

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

2006年3月

(独) 日本原子力研究開発機構
日本原子力発電株式会社

本報告書の構成

政府は、原子力委員会の「原子力政策大綱」（2005年10月11日原子力委員会決定）を原子力政策に関する基本方針として尊重し、原子力の研究、開発及び利用を推進することを2005年10月に閣議決定した。

本報告書は、序論「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究のあらまし」に続き、原子力政策大綱において実用化戦略調査研究フェーズⅡ（2001～2005年度）の成果として示すべきとされた「研究開発の重点化の考え方」（第Ⅰ部）及び「2015年頃までの研究開発計画とそれ以降の課題」（第Ⅱ部）により構成する。

第Ⅰ部では、高速増殖炉システム及び燃料サイクル（再処理と燃料製造）システムの主としてフェーズⅡの5年間の研究開発成果を総括し、それらを踏まえた研究開発の重点化の方針を示す。第Ⅱ部ではその重点化方針に基づき、高速増殖炉サイクルの実用化に向けた今後の研究開発計画について、多国間協力の一つである第4世代原子力システム国際フォーラム（GIF）プロジェクトなどとの連携も考慮し、技術体系整備に向けた2015年頃までの研究開発計画とそれ以降の進め方に関する課題を示す。

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－

(独) 日本原子力研究開発機構
日本原子力発電株式会社

(2006年3月)

日本原子力研究開発機構と電気事業者は、電力中央研究所やメーカー各社の協力を得て、1999年7月から安全性の確保を大前提として、軽水炉サイクル及びその他の基幹電源と比肩する経済性を達成し得る高速増殖炉サイクルの実用化像を構築するとともに、将来の主要なエネルギー供給源とするための技術体系を確立することを目的とした「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究」を実施している。

フェーズⅡ研究(2001～2005年度)では、フェーズⅠ研究(1999～2000年度)で抽出した高速増殖炉、再処理法及び燃料製造法の各候補概念について、成立性にかかわる要素試験研究や解析を実施するとともに、それらの成果を踏まえたシステムの設計検討を行い、各概念が有する能力を最大限に引き出すことが可能な高速増殖炉システム及び燃料サイクルシステム概念を構築した。高速増殖炉サイクルの技術体系整備に向けた2015年頃までの研究開発計画と、それ以降の進め方に関する課題についてとりまとめた。

技術総括の結果から、酸化物燃料を用いた「ナトリウム冷却炉、先進湿式法再処理及び簡素化ペレット法燃料製造の組合せ概念」は、開発目標への適合可能性が最も高く、これまでの開発実績及び今後の国際協力の可能性から技術的実現性も高く、総合的に最も優れた概念であると考えられる。したがって、高速増殖炉サイクルの実用化に向けた今後の研究開発においては、限られた研究開発資源の効率的な活用の観点から、この組合せを今後重点的に開発していく主概念として選定することが望ましい。主概念については、革新技術の開発で期待通りの成果が得られない場合を想定し、開発目標への適合度はやや低下するが研究開発リスクの小さい代替技術を用意することとする。

本報告書は日本原子力研究開発機構と日本原子力発電株式会社との実用化戦略調査研究に関する協力協定により実施した研究成果に関するものである。

日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門
〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

Feasibility Study on Commercialized Fast Reactor Cycle Systems - Phase II Final Report -

Japan Atomic Energy Agency
The Japan Atomic Power Company

(March, 2006)

Abstract

A joint project team of Japan Atomic Energy Agency and the Japan Atomic Power Company (as the representative of the electric utilities) started the feasibility study on commercialized fast reactor cycle systems (F/S) in July 1999 in cooperation with Central Research Institute of Electric Power Industry and vendors. On the major premise of safety assurance, F/S aims to present an appropriate picture of commercialization of fast reactor (FR) cycle system which has economic competitiveness with light water reactor cycle systems and other electricity base load systems, and to establish FR cycle technologies for the future major energy supply.

In the period from Japanese fiscal year (JFY) 1999 to 2000, the phase-I of F/S was carried out to screen out representative FR, reprocessing and fuel fabrication technologies. In the phase-II (JFY 2001-2005), the design study of FR cycle concepts, the development of significant technologies necessary for the feasibility evaluation, and the confirmation of key technical issues were performed to clarify the promising candidate concepts toward the commercialization. In this final phase-II report clarified the most promising concept, the R&D plan until around 2015, and the key issues for the commercialization.

Based on the comprehensive evaluation in F/S, the combination of the sodium-cooled FR with MOX fuel core, the advanced-aqueous reprocessing process and the simplified-pelletizing fuel fabrication process was recommended as the mainline choice for the most promising concept. The concept exceeds in technical advancement, and the conformity to the development targets was higher compared with that of the others. Alternative technologies are prepared to decrease the development risk of innovative technologies in the mainline choice.

This work has been performed in Japan Atomic Energy Agency as a joint project with the Japan Atomic Power Company under contract of the feasibility study on commercialized FR cycle systems.

Advanced Nuclear System Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency
4002, Narita, O-arai, Ibaraki, 311-1393, Japan

概 要

1. 実用化戦略調査研究の経緯

1997年12月の原子力委員会「高速増殖炉懇談会」の報告などを踏まえ、日本原子力研究開発機構と電気事業者は、これまでに蓄積された実証炉設計に関する知見や、「常陽」、「もんじゅ」の建設・運転経験などの有効活用を図るべく、電力中央研究所、メーカーなどの協力を得て1999年7月から「実用化戦略調査研究」を開始した。本研究の目的は『高速増殖炉サイクルの適切な実用化像とそこに至るまでの研究開発計画を2015年頃に提示する』ことにあり、1999年からのフェーズⅠにおいては、幅広い技術選択肢の評価を行ない、実用化候補概念として有望な複数の概念を抽出した。2001年からのフェーズⅡでは『高速増殖炉サイクルとして開発していく実用化候補概念の明確化と今後の研究開発計画を立案する』ことを目標に検討を開始した。これまでの進捗状況などを基に、2005年の原子力政策大綱では『フェーズⅡの成果として研究開発の重点化の考え方、2015年頃までの研究開発計画とそれ以降の課題』を示すことが求められている。

本研究では、5つの開発目標（①安全性、②経済性、③環境負荷低減性、④資源有効利用性及び⑤核拡散抵抗性）と、それらを具体化した設計要求を設定し、これに適合するよう高速増殖炉システム及び燃料サイクルシステムの概念検討を進めた。

2. 有望な候補概念の検討と重点化の方針

高速増殖炉システム及び燃料サイクルシステムの概念の創出にあたっては、経済性などを向上させる目的で新材料や革新技术を積極的に採用し、各概念が有する能力を最大限に引き出すことが可能な設計概念を構築した。この設計概念に対して、5つの開発目標に対する設計要求への適合可能性と、新材料や革新技术に対する国際協力の可能性を含めた現状での技術的実現性の二つの観点から技術総括を行い、有望な候補概念の選定と重点化の方針を検討した。なお、採用した新材料や革新技术の中には、技術的難易度が高いものが幾つか含まれるが、ここではこれらの新材料や革新技术が期待通りに適用できるものとして検討を行った。このため、今後それぞれについての要素試験研究を実施した上で、それらの実現性を見極めていく必要がある。

（1）高速増殖炉システムの技術総括

① ナトリウム冷却炉

経済性を向上させるために、ODS（酸化物分散強化型）鋼や高クロム鋼などの新材料の採用や、原子炉容器のコンパクト化、ポンプ組込型中間熱交換器、冷却ループ数の削減（150万kWe級で2ループ構成）などの革新技术を採用するとともに、機器の大出力化を図り、従来概念を大幅にコンパクト化したプラントシステム概念を構築し、プラント物量や建屋容積を大幅に低減した。また、炉心燃料の高燃焼度化（炉心平均で15万Mwd/t）による燃料費の低減、連続運転期間の長期化（18ヶ月～26ヶ月）による運転費の低減により、発電コストの目標を達成できる可能性を見出すことができた。資源有効利用性や環境負荷低減性などの設計要求については、酸化物（MOX）燃料で高いレベルの適合可能性を有することが分かった。さらに、安全性・信頼性向上の観点から、

受動的炉停止機能の付加、自然循環による炉心冷却機能の確保、蒸気発生器伝熱管の二重化、配管二重化の徹底などの一層の強化を図った。

一方、ナトリウムが不透明で化学的に活性であることから、プラント信頼性を確保するための保守・補修性について設計段階から十分に注意する必要がある。このため、軽水炉での保守・補修性に対する取り組みと動向を参考に、構造材料との共存性に優れるナトリウムの特長も考慮しながら、実用炉に求められる保守・補修方針を検討した。この方針に適合するよう設計検討を進めるとともに必要な検査機器の開発に着手した。「常陽」の運転・保守実績に加え、「もんじゅ」や実証炉研究における検査装置の開発経験、フェーズⅡで実施した検査機器の試験結果などを考慮すると、引き続き検査及び補修技術の開発を行う必要があるが、将来的には軽水炉と同程度の保守・補修性の確保を目指していくことができると考えられる。

技術的実現性にかかわる課題は主に経済性目標を達成するための技術開発に限られるが、技術的難易度の高い革新技術については、経済性は低下するものの開発リスクが少なく既存技術の延長である代替技術の適用が可能である。このため、「もんじゅ」、実証炉までの開発実績も考慮すると、他の概念に比べて高い確度で技術的実現性を見通すことができる。また、多国間協力として活発に進められている第4世代原子力システム国際フォーラム(GIF)ではナトリウム冷却炉が候補炉型の一つに選定されているが、本研究で進めている設計概念は、その炉型の代表的な概念候補となっている。このため、本研究の設計概念は、国際標準の概念へ発展していく可能性があるうえ、その実現に向けた研究課題を国際的に分担することにより技術的実現性の向上が期待できる。

さらに、ナトリウム冷却炉は金属燃料を利用することで高燃焼度化による経済性の向上に加え、高増殖炉心、低Pu燃料インベントリでの炉心設計が可能となる。例えば、将来の軽水炉と同程度の燃焼度(5.5万Mwd/t)などを維持した条件で、酸化物燃料炉心では増殖比1.20程度であるところを、金属燃料では1.26程度を確保でき、また、酸化物燃料炉心よりも約11%少ない燃料インベントリを実現できる。これらのことから、高速増殖炉の導入が急がれる場合や原子力発電容量の増加など、将来のウラン需給が予想以上に逼迫した場合にも柔軟に対応できる能力が期待できる。

② ヘリウムガス冷却炉

設計要求への適合可能性については、窒化物燃料を用いることで、すべてに適合できる可能性があるが、ナトリウム冷却炉に比べ燃焼度が低く燃料サイクルコストが高くなる。一方、原子炉出口温度を850℃程度にでき、高温熱源としてナトリウム冷却炉にはない魅力を有する。

技術的実現性については、その概念成立性を左右する重要な技術課題として窒化物被覆粒子燃料開発がある。具体的には、高温耐性を有する粒子燃料用被覆材料やブロック型燃料集合体の開発など、基礎的な研究開発から着手していく必要があり、これに代わりうる代替技術の準備は困難な段階である。その一方でGIFでの候補炉型の一つに選定され、国際協力の活用によってこれらの基礎的課題をブレイクスルーできる可能性がある。

③ 鉛ビスマス冷却炉

窒化物燃料を用いることでナトリウム冷却炉と同等の炉心性能を達成し、設計要求へ適合する可能性がある。

技術的実現性については、窒化物燃料の開発に加え、重要な課題として燃料被覆管などの鋼材の腐食問題があり、防食技術や耐食性材料の開発など、概念成立性を左右する基礎的な研究開発が必要であり、これに代わりうる代替技術の準備は困難な段階である。

GIFでの候補炉型の1つに選定されているものの、現状ではその開発を主導する国が無く、国際協力によって基礎的な課題をブレイクスルーできる可能性は低い。

④ 水冷却炉

設計要求への適合可能性のうち資源有効利用の点で、増殖比が低く、炉心燃料インベントリが大きいため高速増殖炉への移行に長期を要し、天然ウラン資源の節約の観点から高速増殖炉としての導入効果に乏しい。また、軽水炉の使用済燃料から回収されるマイナーアクチニド(MA)を受け入れ、燃焼させる能力は他の概念と比べて低い。その他の設計要求である安全性、経済性、核拡散抵抗性については適合する可能性がある。

技術的実現性については、これを見通すための課題が炉心燃料関連に限定されるが、被覆管材料の開発や炉心損傷時の影響緩和対策の検討が必要である。また、本研究で評価した沸騰水型軽水炉(BWR)型高速増殖炉は、GIFでの候補炉型に選定されておらず、現状、国際協力は基盤的な研究内容に限定されている。

⑤ 高速増殖炉システムの有望概念

高速増殖炉システム候補概念の技術総括結果をもとに有望な概念を抽出した。ナトリウム冷却炉は、設計要求に対する適合可能性と技術的実現性の両者ともに、他炉に比較して優れている。さらに国際標準の概念となり得る可能性があり、国際協力により技術的実現性の向上も期待でき、最も有望な高速増殖炉システム概念である。ヘリウムガス冷却炉は、すべての設計要求に適合する可能性があり、他の炉型と異なり高温の熱源として多様なニーズに対応できる可能性がある。概念成立性に関わる基礎的な課題を有するものの、米仏を始め各国の開発意欲も高く国際協力によりこれを解決できる可能性がある。

その他の概念は、設計要求への適合可能性や技術的実現性の観点から、上述した有望な概念を上回るものとはならない。

(2) 燃料サイクルシステムの技術総括

① 先進湿式法と簡素化ペレット法の組合せ

高速増殖炉サイクルでは、リサイクル燃料へのFP混入(低除染)を許容できることから、先進湿式法では従来技術(ピューレックス法)の主要工程の一つである「U製品及びPu製品の精製工程」を削除できる。また、使用済燃料の溶解液中の重金属量の大部分(約8割)を占めるUの約7割を予め粗取りする晶析技術の導入により、後工程での処理量を大幅に削減し、設備合理化を可能としている。さらに、再処理システムと燃料製造システムを同一施設内に設置し、UとPuの

硝酸溶液段階での混合による Pu 富化度調整を可能としたことで、従来のペレット製造工程の多くを占める粉末混合工程を削除できる。一方、従来法に比べ、再処理については MA 回収工程が付加されること、燃料製造では他の燃料サイクル技術と同様に低除染の燃料を扱うためホットセルが必要となることなど、コスト増の要因もある。

以上のように経済性に対する効果は一長一短があるが、先進湿式法再処理施設では低除染化にともなう工程削除や設備合理化などによって従来技術と比べ建設費が半減するなど、合理化に寄与する部分の効果が大きい。そのため、経済性についての設計要求に対して適合する可能性がある。資源有効利用性、環境負荷低減性及び核拡散抵抗性の設計要求に対しても適合する可能性がある。

また、先進湿式法では、新しい技術である晶析法や MA 回収などのシステム・機器開発が必要であるが、東海再処理工場や六ヶ所再処理工場における多くの技術的知見を活用できることから、高い確度で技術的実現性を見通すことができる。また仏国でも湿式再処理概念を開発の中心としていることから、国際協力により技術的実現性の向上が期待できる。ホットセル内での燃料製造となるため、遠隔保守・補修性を考慮した機器の開発などが必要であるが、簡素化ペレット法の基本的なプロセスは従来のペレット製造と共通しているため、高い確度で実現性を見通すことができる。なお、使用済燃料の溶解と U・Pu の抽出を同時に行うことができる超臨界直接抽出法については、現状では未だ基盤的な研究段階ではあるものの、先進湿式法のシステム構成をさらに簡素化でき、経済性、廃棄物発生量の面で先進湿式法をより合理化できる可能性がある。

② 金属電解法と射出鋳造法の組合せ

使用済金属燃料から電解精製の原理によって U 及び TRU を回収する金属電解法再処理、並びに回収した U 及び TRU を熔融して燃料体に成型する射出鋳造法燃料製造は、他の燃料サイクルシステムに比べて工程が簡素なものとなっている。これまでの検討の結果、すべての設計要求に適合する可能性が示され、特に、小型サイクル施設の経済性については、他のシステムと比べて適合可能性が高くなる見通しとなった。ただし、大型施設の経済性については、再処理と燃料製造のいずれもバッチ処理方式であることからスケール効果が期待できず、「先進湿式法と簡素化ペレット法の組合せ」には及ばない見通しである。また、金属電解法再処理から発生する放射性廃棄物には人工鉱物（ゼオライトを原料としたもの）を用いた高レベル廃棄物固化体を適用するが、この固化体に混合できる FP の量が限られているため、他のサイクルシステム概念と比べて単位発電量あたりの高レベル廃棄物固化体（体積）が多くなる。

米国での開発実績などを踏まえれば主要プロセスの成立性はほぼ確認されていると考えられるため、技術的実現性を見通すことが可能である。課題として、使用済燃料を用いたプロセス成立性確認、高レベル廃棄物固化体発生量の削減、遠隔保守・補修性を考慮した機器開発などがある。これらの技術的難度は高くないが、国内に開発インフラが少ないため、開発には長期を要する見込みである。このため、開発実績を有する米国などとの国際協力が重要である。

③ 先進湿式法と振動充填法の組合せ

先進湿式法と組み合わせる場合の振動充填法燃料製造では、高温ガス炉（HTTR など）用の燃料製造で実績のある「ゲル化法」によって、球形の燃料粒子を製造し、これらを被覆管内に充填する。そのため、従来のペレット法の多くを占める粉末混合工程が不要となるうえ、微粉末の発生がなく、簡素化ペレット法に比べ遠隔保守・補修性に優れるという特長がある。この特長を活かした高い経済性の達成が期待されたが、必要な燃料充填率を達成するために大小2種類の粒子製造ラインを設けることが必須となることから、簡素化ペレット法に比べて経済性が劣る見通しとなった。設計要求に対してはすべてに適合する可能性はあるが、簡素化ペレットを上回るものとはならない見通しである。

課題として、遠隔保守・補修性を考慮した機器開発、燃料充填率の軸方向分布の検査技術の開発などがある。技術的知見は簡素化ペレット法に比べて少ないが、MA含有燃料の製造実績などによりプロセスの成立性は確認されており、実現性を見通すことができる。

ヘリウムガス冷却炉に適合する「窒化物被覆粒子燃料」については、脱被覆、窒化、被覆など適切な工程を付加することによって、再処理では先進湿式法、燃料製造では本振動充填法の一部である「ゲル化法」が適用可能である。このように、窒化物被覆粒子燃料に対応する燃料サイクルシステムは、「先進湿式法と振動充填法の組合せ」との技術的共通点が多いため、その技術開発には、窒化物燃料集合体の開発など高速増殖炉システム開発の進捗状況を踏まえて、着手することが効率的である。窒化物被覆粒子燃料に関する課題としては、先に述べた被覆材料や集合体の開発のほか、再処理における脱被覆技術や燃料製造における被覆技術などの開発がある。なお、半減期が長いC-14の燃料内部での発生を抑える目的で、窒化物燃料には天然存在量が少ないN-15（0.37%）を濃縮（99.9%目標）して用いる必要がある。そのため、安価なN-15濃縮技術の開発やN-15リサイクル技術の開発も必要となる。

④ 酸化物電解法と振動充填法の組合せ

使用済酸化物燃料から電気分解の原理によってUO₂及びMOXを回収する酸化物電解法再処理、及び回収物を粉砕して得られる燃料顆粒を被覆管内に充填する振動充填法燃料製造は、金属電解法と同様に工程が簡素である。検討の結果、経済性をはじめ、すべての設計要求に適合する可能性が示された。しかしながら、MOX回収やMA回収などについては原理確認の途上にあり、塩素ガスや酸素ガスを使用することに起因する材料腐食への対策、遠隔保守・補修技術の開発、燃料顆粒の品質管理など、多くの技術的課題がある。このため、技術的実現性は他の概念に比べて低い。また、国内開発インフラの整備の必要もあり、開発には長期を要する見込みである。

⑤ 燃料サイクルシステムの有望概念

燃料サイクルシステム候補概念の技術総括結果をもとに有望な概念を抽出した。酸化物及び窒化物燃料に対応可能な「先進湿式法と簡素化ペレット法の組合せ」は、設計要求に対する適合可能性があり、既存技術の延長線上にあることから技術的実現性も高い。また国際協力の可能性もあることから、最も有望な燃料サイクル概念である。

炉心の性能向上が期待できる金属燃料に適用される「金属電解法と射出鋳造法の組合せ」は、

設計要求に適合する可能性があり、特に、小型サイクル施設の経済性が他と比べて高くなる可能性がある。技術的実現性については、比較的長期の開発を要する見込みであるが、米国などとの国際協力を期待することが可能である。そのため、有望な概念と考えられる。

その他の概念は、設計要求への適合可能性や技術的実現性の観点から、上述した有望な概念を上回るものとはならない。

(3) 重点化の方針の検討

①高速増殖炉サイクルの評価

高速増殖炉サイクルの有望概念選定にあたっては、高速増殖炉システム、燃料サイクルシステムの個別評価に加えて、これらを組み合わせた高速増殖炉サイクルとして、開発目標への適合可能性、技術的実現性などを評価することが適切である。

前述の技術総括では、高速増殖炉システムとしては、「ナトリウム冷却炉」を最も有望な概念とし、「ヘリウムガス冷却炉」を有望な概念とした。一方、燃料サイクルシステムでは、「先進湿式法と簡素化ペレット法の組合せ」を最も有望な概念とし、「金属電解法と射出鑄造法の組合せ」を有望な概念とした。

高速増殖炉サイクルとしての評価にあたっては、高速増殖炉システムと燃料サイクルシステムの個別の有望な概念の検討結果を踏まえて、高速増殖炉サイクルシステムとしての有望な概念を構築した。それらの評価結果を以下に示す。

(a) 「ナトリウム冷却炉、先進湿式法再処理及び簡素化ペレット法燃料製造の組合せ」(MOX燃料)
経済性(発電原価)などの開発目標に適合する可能性が高く、技術的実現性を見通すことも可能な概念であり、総合的に最も優れた概念と判断される。

(b) 「ナトリウム冷却炉、金属電解法再処理及び射出鑄造法燃料製造の組合せ」(金属燃料)
開発目標への適合可能性や技術的実現性などに関する総合的な評価では(a)を上回るものではないが、金属燃料の採用により炉心性能の向上が期待でき、将来のウラン需給が予想以上に逼迫した場合に柔軟に対応できる能力を有するという点で、(a)を超える魅力を有する概念と判断される。

(c) 「ヘリウムガス冷却炉、先進湿式法再処理及び被覆粒子燃料製造の組合せ」(窒化物燃料)
開発目標への適合可能性や技術的実現性などに関する総合的な評価では(a)を上回るものではないが、原子炉出口温度が高く、高温熱源として多様なニーズに対応できるという点で、(a)を超える魅力を有する概念と判断される。

②重点化の方針

研究開発の重点化については、「主として開発を進めていく概念(主概念)」として、技術総括の結果、総合的に最も優れた概念と評価された上記(a)を選定する。また、「補完的に開発を進めていく選択肢(補完概念)」としては、将来のニーズなどの不確実性を考慮し選択肢に多様性を持たせる観点から、主概念を超える魅力を有する概念を選定することとし、上記(b)、(c)を選定する。

今後の研究開発については、限られた研究資源の効率的な活用の観点から、主概念に重点的に投資していくとともに、補完概念に関しては技術的実現性などの観点から重要と判断される課題を中心に研究開発を進めることとする。

3. フェーズⅢ以降の研究開発の進め方

(1) 2015年頃までの研究開発の展開

フェーズⅡにおいては、有望な実用化候補概念の選定と研究開発の重点化の方針、及び2015年頃までの研究開発計画の策定などを行った。また、重点化概念については、革新技術に対する要素試験研究などにより、基本的な成立性の見通しを得た。

フェーズⅢ以降においては、2015年頃を目途に、『実用化像とそこに至るまでの研究開発計画の提示』を目的に、要素試験結果などに基づく実用施設の成立性にかかわるデータの整備、実用施設の技術仕様の提示などの技術体系整備を行う。ここでは、中間取り纏め時(2-3年毎)及び各フェーズ毎に、研究成果のチェック&レビューを実施しながら効率的に研究開発を進めていく。また、各フェーズ毎に、国際的な開発動向、エネルギー需給状況などの諸情勢を踏まえて、主概念及び補完概念の進め方について検討する。

フェーズⅢにおいては、革新技術の成立性を評価するため要素試験研究を実施するとともに、革新的プラント全体の概念設計研究を実施する。これらに基づき、採用する革新技術を決定し、成立性が懸念されるものについては、より実現性の高い技術(代替技術など)への変更を行う。

フェーズⅣにおいては、採用された革新技術に対する要素試験研究を実施するとともに、フェーズⅢで実施した革新的プラント概念設計の最適化研究を行い、実用化像とそこに至るまでの研究開発計画を提示する。

(2) 高速増殖炉システムの研究開発計画

① ナトリウム冷却炉

フェーズⅢ末の2010年頃には、ODS鋼や高クロム鋼などの新材料やポンプ組込型中間熱交換器、コンパクト化原子炉容器、二重伝熱管蒸気発生器などの革新的機器の成立性、ナトリウム中機器や二重伝熱管の検査技術、ISI・維持基準などの保守技術の見通しを判断して、高速増殖炉システムに採用する革新技術を決定し、経済性、保守・補修性に優れた実用炉の概念を構築する。酸化物燃料に対しては、ODS被覆管による燃料ピンとTRU燃料ピンの照射を継続して目標照射量の40-60%まで到達させ、その健全性を確認する。他方金属燃料に対しては、TRU燃料ピンの高温条件(650℃)照射を行い、照射初期の健全性を確認する。

フェーズⅣでは、フェーズⅢで構築した実用炉の概念に基づき、採用した革新技術(保守・補修技術含む)について要素試験により成立性を確認するとともに、その成果を反映して概念設計の最適化を行う。酸化物燃料については、ODS鋼ピン及びTRU燃料ピンの照射を継続して、目標照射量での健全性を確認して実用化に必要な試験データとして整備する。金属燃料については、高燃焼度まで照射健全性を確認するとともに、再臨界回避方策の有効性を試験研究によって確認する。

GIFプロジェクトのナトリウム冷却炉（SFR）の研究開発では、2010年頃に概念設計を終了し、その後開発すべきSFR概念を選定する予定である。これに向け、本研究で検討を進めているナトリウム冷却炉が国際標準へ発展していけるよう設計研究と要素試験研究とを着実に進めるとともに、同プロジェクトとの一層の連携を図る。

② ガス冷却炉

ガス冷却炉は補完概念であることから、概念成立性の鍵となる窒化物被覆粒子燃料について検討する。このため、フェーズⅢでは、GIFなどの国際協力を通じた情報交換を活用して、セラミック材料で構成する革新的な炉心燃料概念の研究を進め、その成果を踏まえて研究開発の進め方について検討する。なお、フェーズⅣ以降の進め方については、フェーズⅢ末に判断する。

（3） 燃料サイクルシステムの研究開発計画

① 先進湿式法と簡素化ペレット法の組合せ

フェーズⅢでは晶析法技術やMA回収技術などについて、小規模のホット試験などによって成立性を判断して、採用する革新技術を決定する。また主要工程の遠隔保守・補修性を考慮した実用機器概念を提示する。これらの要素試験研究の成果を踏まえて、実用燃料サイクル概念を構築する。また、先進湿式法のオプション技術である超臨界直接抽出法の成立性を見極め、その採否を判断する。

フェーズⅣでは、革新技術に関するプロセス試験や機器開発など要素試験研究を進めて技術的成立性（遠隔保守・補修性を含む）に関わるデータを整備する。これらの成果により実用燃料サイクル施設概念の最適化研究を行い、2015年頃の技術体系の整備までに、技術仕様を提示する。さらに、技術実証試験施設概念と試験内容を具体化して、実用化までの研究開発計画を提示する。

② 金属電解法と射出鋳造法の組合せ

「金属電解法と射出鋳造法の組合せ」は補完概念であることから、米国などとの協力関係の構築を図りつつ、適切な規模で研究開発を進める。フェーズⅢでは、主要工程の機器概念の構築、小規模ホット試験計画の検討、実用燃料サイクル施設概念の構築などを実施する。また、高レベル廃棄物固化体発生量の削減など設計要求への適合可能性が低い課題については、優先的に研究開発を進める。

フェーズⅣでは、主要工程機器の開発、小規模ホット試験の準備などに取り組み、研究開発目標への適合性を確認して、フェーズⅣ末に主概念との比較評価を行う計画としている。ただし、フェーズⅣ以降の研究開発の進め方については、米国などとの協力関係の構築を含む国内外の状況を考慮して、フェーズⅢ末までに再検討する。

（4） 高速増殖炉サイクルへの移行に関する検討

高速増殖炉の商業ベースでの導入が想定される2050年頃以降における軽水炉から高速増殖炉への円滑な移行を確認するため、燃料供給の観点からUやPuの物質収支に関する諸量解析を行い、必要再処理量や使用済燃料蓄積量などを算出した。また、移行を合理的に行うための方策を検討

するため、高速増殖炉再処理技術の軽水炉再処理への適用性を検討するとともに今後の課題を抽出した。

諸量解析では、原子力発電設備容量は2030年以降58GWe一定、高速増殖炉を2050年から本格導入とした場合、ほぼ60年で軽水炉から高速増殖炉に移行できること、移行にあたっては高速増殖炉へのPu (TRU燃料) 供給のため、高速増殖炉燃料の再処理に加えて軽水炉再処理が必要であること、などの結果を得た。この軽水炉燃料の再処理においては、軽水炉再処理の合理化が期待できる高速増殖炉燃料用の再処理技術(先進湿式法)を適用することが効果的である。

高速増殖炉燃料用の再処理技術の研究開発を進めることで、軽水炉再処理に関しても基本的に対応が可能であるため、当面、(3)で述べた研究開発計画を見直す必要はないが、六ヶ所再処理工場に続く再処理工場についての検討が2010年頃から開始される予定であるため、それまでに高速増殖炉サイクル技術の軽水炉再処理への適用性などについてより具体的に検討することが有効と考えられる。

4. 2015年頃以降の進め方に関する課題

2015年頃までに技術体系の整備を計画通り行うことが、2050年頃の高速増殖炉の本格導入につながるの見通しを得るために、2015年頃以降の研究開発の進め方についてケーススタディを実施した。あわせて2015年頃以降の研究開発に関する課題の抽出を行った。

(1) 2015年頃以降の高速増殖炉サイクルの段階的研究開発

高速増殖炉サイクルの商業ベースでの本格導入にむけて、多くの革新技术を含んだ中・大型の商用施設の建設・運転に直ちに進むことはリスクが大きく困難なため、施設・機器の規模を段階的にスケールアップさせ、開発目標への適合性や革新技术の実現性・信頼性を検証していく必要がある。このため全体の開発ステップとしては、2015年頃までの高速増殖炉サイクルの技術体系整備を行う第1段階、技術実証試験施設を用いて高速増殖炉サイクル技術の実証を行うことにより実用化を見通す第2段階、商業ベースでの本格導入を目指して実用化推進施設を用いて経済性、信頼性を確認するとともに運転経験を蓄積する第3段階とすることが考えられる。

(2) 2015年頃以降の課題

国は、2050年頃からの商業ベースでの導入に至るまでの段階的な研究開発計画について2015年頃から検討を行うとしているため、今後、下記の事項について、より具体化を図るための検討が必要である。このうち第2段階の進め方については、これが議論されると予想される原子力政策大綱の次期見直しまでに検討を行っていく必要があると考えられる。

- i) 各ステップにおける研究開発(高速増殖炉システム、燃料サイクルシステム)のあり方
第2段階(革新技术実証)及び第3段階(実用化推進)における研究開発の内容、実施時期、規模、必要資金、国際的な開発分担など。
- ii) 実証段階以降の開発の役割分担、技術維持
第2段階、第3段階における官民役割分担(文部科学省、経済産業省、民間)及び技術維

持などを考慮した開発体制。

目次

| | |
|---------------------------------|----|
| 序論 高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究のあらまし | 1 |
| 1. 実用化戦略調査研究の意義と展開 | 1 |
| 1.1 実用化戦略調査研究の経緯 | 1 |
| 1.2 高速増殖炉サイクル導入の必要性 | 1 |
| 1.3 実用化戦略調査研究の目的 | 2 |
| 1.4 実用化戦略調査研究の展開 | 3 |
| 2. 実用化戦略調査研究における協力体制及び国際協力 | 4 |
| 2.1 研究協力体制 | 4 |
| 2.2 国際協力の活用 | 4 |
| 2.3 実用化戦略調査研究の費用推移 | 5 |
| 3. 実用化戦略調査研究の実施方針 | 5 |
| 3.1 開発目標 | 5 |
| 3.2 設計要求への展開 | 5 |
| 3.2.1 高速増殖炉システム | 5 |
| 3.2.2 燃料サイクルシステム | 7 |
| 3.3 高速増殖炉サイクルシステムの整合性 | 7 |
| 3.4 フェーズⅡの検討対象 | 8 |
| 第Ⅰ部 研究開発の重点化の考え方 | 10 |
| 1. 研究開発の重点化に向けたフェーズⅡの進め方 | 10 |
| 1.1 設計研究と要素技術開発 | 10 |
| 1.2 研究開発の重点化にかかわる評価及び判断 | 10 |
| 1.2.1 主概念及び補完概念の位置付け | 10 |
| 1.2.2 評価及び判断の手順 | 10 |
| 2. 設計候補概念のシステムの特徴と技術総括 | 12 |
| 2.1 高速増殖炉システム | 12 |
| 2.1.1 ナトリウム冷却炉 | 12 |
| 2.1.2 ヘリウムガス冷却炉 | 16 |
| 2.1.3 鉛ビスマス冷却炉 | 19 |
| 2.1.4 水冷却炉 | 21 |
| 2.1.5 有望な高速増殖炉システム概念の抽出 | 23 |
| 2.1.6 小型炉 | 25 |
| 2.2 燃料サイクルシステム | 26 |
| 2.2.1 先進湿式法再処理と簡素化ペレット法燃料製造の組合せ | 27 |

| | | |
|-----------------------------|--|----|
| 2.2.2 | 金属電解法再処理と射出鑄造法燃料製造の組合せ | 31 |
| 2.2.3 | 先進湿式法再処理と振動充填法燃料製造（スフェアパック燃料）の組合せ | 33 |
| 2.2.4 | 酸化物電解法再処理と振動充填法燃料製造（バイパック燃料）の組合せ | 35 |
| 2.2.5 | 窒化物燃料サイクル | 37 |
| 2.2.6 | 有望な燃料サイクルシステム概念の抽出 | 39 |
| 2.3 | 高速増殖炉サイクルシステムの技術総括 | 41 |
| 2.3.1 | ナトリウム冷却炉、先進湿式法再処理及び簡素化ペレット法燃料製造の組合せ （MOX燃料） | 42 |
| 2.3.2 | ナトリウム冷却炉、金属電解法再処理及び射出鑄造法燃料製造の組合せ （金属燃料） | 43 |
| 2.3.3 | ヘリウムガス冷却炉、先進湿式法再処理及び被覆粒子燃料製造の組合せ （窒化物燃料） | 43 |
| 3. | 多面的評価 | 43 |
| 3.1 | 多面的評価の目的 | 43 |
| 3.2 | 多面的評価の方法 | 43 |
| 3.3 | 多面的評価の結果 | 44 |
| 3.4 | 多面的評価と高速増殖炉サイクルの技術総括との関係 | 45 |
| 4. | 研究開発の重点化の方針 | 45 |
| 4.1 | 主概念の選択 | 45 |
| 4.2 | 補完概念の選択 | 45 |
| 4.3 | 研究開発資源の投資配分 | 46 |
| 第Ⅱ部 2015年頃までの研究開発計画とそれ以降の課題 | | 47 |
| 1. | 高速増殖炉サイクルに関する研究開発の進め方 | 47 |
| 1.1 | 高速増殖炉サイクルの実用化に向けた研究開発の基本方針 | 47 |
| 1.2 | 高速増殖炉サイクル技術の段階的研究開発 | 47 |
| 1.3 | 開発目標及び設計要求の見直し | 48 |
| 2. | 技術体系の整備に向けた2015年頃までの研究開発計画 | 48 |
| 2.1 | 高速増殖炉サイクルの技術体系整備 | 49 |
| 2.2 | 研究開発体制 | 49 |
| 2.2.1 | 国内推進体制 | 49 |
| 2.2.2 | 国際協力の考え方 | 50 |
| 2.3 | 高速増殖炉システム | 50 |
| 2.3.1 | 主概念 | 50 |
| 2.3.2 | 補完概念の技術課題及び研究開発計画 | 55 |
| 2.3.3 | 期待する成果 | 55 |
| 2.4 | 燃料サイクルシステム | 56 |

| | |
|--|--------|
| 2.4.1 主概念 | 56 |
| 2.4.2 補完概念の技術課題及び研究開発計画 | 58 |
| 2.4.3 期待する成果 | 58 |
| 2.5 高速増殖炉サイクルへの移行に関する検討 | 59 |
| 2.5.1 高速増殖炉への移行時期の燃料サイクル | 59 |
| 2.5.2 先進湿式法再処理の軽水炉再処理への適用 | 61 |
| 2.6 2015年頃までの研究開発の留意事項 | 63 |
| 3. 2015年頃以降の進め方に関する課題 | 63 |
| 3.1 2015年頃以降の高速増殖炉サイクルの段階的研究開発 | 63 |
| 3.1.1 実用化を見通せる規模での革新技术実証段階（第2段階） | 64 |
| 3.1.2 実用規模で開発目標の達成確認を行う実用化推進段階（第3段階） | 64 |
| 3.1.3 研究開発方策 | 64 |
| 3.2 研究開発課題の整理 | 66 |
| 謝辞 | 68 |
| 参考文献 | 69 |
| 用語解説 | 用語解説 1 |

表リスト

| | | |
|--------|--|-----|
| 表-序-1 | 実用化戦略調査研究にかかわる機構予算の推移 | 75 |
| 表-序-2 | 実用化戦略調査研究フェーズⅡの開発目標 | 75 |
| 表-序-3 | 高速増殖炉サイクルの設計要求 | 76 |
| 表-序-4 | フェーズⅡで主たる検討対象とした再処理技術 －燃料製造技術の組合せに対応する高速増殖炉システムと燃料形態－ | 77 |
| 表-I-1 | ナトリウム冷却炉の仕様比較 | 78 |
| 表-I-2 | 各高速増殖炉システムの設計要求への適合可能性 | 79 |
| 表-I-3 | 金属燃料の利用によるナトリウム冷却炉の炉心性能の向上 | 80 |
| 表-I-4 | ナトリウム冷却高速増殖炉の研究開発計画 | 81 |
| 表-I-5 | ガス冷却炉の仕様比較 | 82 |
| 表-I-6 | ヘリウムガス冷却高速増殖炉の研究開発計画 | 83 |
| 表-I-7 | 鉛ビスマス冷却炉の仕様比較 | 84 |
| 表-I-8 | 鉛ビスマス冷却高速増殖炉の研究開発計画 | 85 |
| 表-I-9 | 水冷却炉（BWR型）の仕様比較 | 86 |
| 表-I-10 | 水冷却高速増殖炉（BWR型）の研究開発計画 | 87 |
| 表-I-11 | 高速増殖炉システム候補概念の技術総括結果 | 88 |
| 表-I-12 | 小型炉概念の基本仕様 | 89 |
| 表-I-13 | 先進湿式法再処理と簡素化ペレット法燃料製造の一体化プラントの仕様 | 90 |
| 表-I-14 | 超臨界直接抽出法再処理の仕様 | 91 |
| 表-I-15 | 各燃料サイクルシステムの設計要求への適合可能性 | 92 |
| 表-I-16 | 先進湿式法再処理システムの研究開発計画 | 93 |
| 表-I-17 | 簡素化ペレット法燃料製造システムの研究開発計画 | 94 |
| 表-I-18 | 金属電解法再処理と射出鑄造燃料製造の一体化プラントの仕様 | 95 |
| 表-I-19 | 金属電解法再処理システムの研究開発計画 | 96 |
| 表-I-20 | 射出鑄造法燃料製造システムの研究開発計画 | 97 |
| 表-I-21 | 先進湿式法再処理と振動充填法燃料製造（スフェアパック）の 一体化プラントの仕様 | 98 |
| 表-I-22 | 振動充填法燃料製造（スフェアパック）システムの研究開発計画 | 99 |
| 表-I-23 | 酸化物電解法再処理と振動充填法燃料製造（バイパック）の 一体化プラントの仕様 | 100 |
| 表-I-24 | 酸化物電解法再処理システムの研究開発計画 | 101 |
| 表-I-25 | 振動充填法燃料製造（バイパック）システムの研究開発計画 | 102 |
| 表-I-26 | 先進湿式法再処理と被覆粒子燃料製造の一体化プラントの仕様 | 103 |
| 表-I-27 | 燃料サイクルシステム候補概念の技術総括結果 | 104 |
| 表-I-28 | 高速増殖炉サイクルの技術総括結果 | 105 |

| | | |
|---------|-------------------------------|-----|
| 表-II-1 | 開発目標の見直し | 106 |
| 表-II-2 | 設計要求の見直し | 107 |
| 表-II-3 | 高速増殖炉システム主概念の技術課題 | 108 |
| 表-II-4 | 高速増殖炉システム主概念の研究開発計画(ナトリウム冷却炉) | 109 |
| 表-II-5 | 高速増殖炉システム主概念の研究開発計画(MOX燃料) | 110 |
| 表-II-6 | 高速増殖炉システム補完概念の技術課題及び研究開発計画 | 111 |
| 表-II-7 | 燃料サイクルシステム主概念の技術課題 | 112 |
| 表-II-8 | 燃料サイクルシステム主概念の研究開発計画 | 113 |
| 表-II-9 | 燃料サイクルシステム補完概念の技術課題及び研究開発計画 | 114 |
| 表-II-10 | 高速増殖炉導入の諸量解析における主な想定条件 | 115 |
| 表-II-11 | 軽水炉使用済燃料と高速増殖炉使用済燃料の組成比較 | 116 |
| 表-II-12 | 原子炉プラントを建設・運転する方策 | 117 |
| 表-II-13 | 大型試験施設(コールド施設)による方策 | 118 |
| 表-II-14 | 「もんじゅ」を大幅に改造する方策 | 119 |
| 表-II-15 | 革新技術実証の方策 | 120 |

図リスト

| | | |
|--------|---|-----|
| 図-序-1 | 実用化戦略調査研究の経緯 | 121 |
| 図-序-2 | 世界及び日本における天然ウラン累積需要量の予測 | 122 |
| 図-序-3 | 高レベル放射性廃棄物の削減と放射能による潜在的影響の低減 | 123 |
| 図-序-4 | 実用化戦略調査研究の展開 | 124 |
| 図-序-5 | 実用化戦略調査研究における協力体制 | 125 |
| 図-序-6 | 高速増殖炉サイクルを進める国との協力の現状 | 126 |
| 図-序-7 | 高速増殖炉の特長を活かした燃料サイクル | 127 |
| 図-序-8 | 高速増殖炉システムのフェーズ I (1999~2000 年度) の成果 | 128 |
| 図-序-9 | 燃料サイクルシステムのフェーズ I (1999~2000 年度) の成果 | 129 |
| | | |
| 図-I-1 | フェーズ II における検討の流れ | 130 |
| 図-I-2 | ナトリウム冷却高速増殖炉概念 | 131 |
| 図-I-3 | ナトリウム冷却大型炉の「資源重視型」酸化物燃料炉心の炉心配置 | 132 |
| 図-I-4 | ナトリウム冷却高速増殖炉の要素技術開発成果 (例) | 133 |
| 図-I-5 | ガス冷却高速増殖炉の検討の流れ | 134 |
| 図-I-6 | 被覆粒子燃料ヘリウムガス冷却高速増殖炉概念 | 135 |
| 図-I-7 | 被覆粒子燃料の要素技術開発成果 (例) | 136 |
| 図-I-8 | 鉛ビスマス冷却高速増殖炉の検討の流れと要素技術開発 (例) | 137 |
| 図-I-9 | 鉛ビスマス冷却高速増殖炉概念 | 138 |
| 図-I-10 | 水冷却高速増殖炉 (BWR 型) 概念 | 139 |
| 図-I-11 | 水冷却高速増殖炉 (BWR 型) の要素技術開発成果 (例) | 140 |
| 図-I-12 | 各高速増殖炉システムの技術的実現性 | 141 |
| 図-I-13 | 遠隔地立地向け小型炉系統概念図 | 142 |
| 図-I-14 | 先進湿式法再処理及び簡素化ペレット法燃料製造の組合せ概念 | 143 |
| 図-I-15 | 超臨界直接抽出法を用いた先進湿式法再処理の概念 | 144 |
| 図-I-16 | 先進湿式法再処理及び簡素化ペレット法燃料製造の要素技術開発成果 (例) | 145 |
| 図-I-17 | 金属電解法再処理及び射出鑄造法燃料製造の組合せ概念 | 146 |
| 図-I-18 | 金属電解法再処理及び射出鑄造法燃料製造の要素技術開発成果 (例) | 147 |
| 図-I-19 | 先進湿式法再処理及び振動充填法燃料製造 (スフェアパック燃料) の 組合せ概念 | 148 |
| 図-I-20 | 先進湿式法再処理及び振動充填法燃料製造 (スフェアパック燃料) の 要素技術開発成果 (例) | 149 |
| 図-I-21 | 酸化物電解法再処理及び振動充填法燃料製造 (バイバック燃料) の 組合せ概念 | 150 |
| 図-I-22 | 酸化物電解法再処理及び振動充填法燃料製造 (バイバック燃料) の 要素技術開発成果 (例) | 151 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 図-I-23 | 窒化物燃料サイクル概念（先進湿式法再処理と被覆粒子燃料製造の場合） | 152 |
| 図-I-24 | 各燃料サイクルシステムの技術的実現性 | 153 |
| 図-I-25 | 従来型湿式法と先進湿式法の建設費の比較 | 154 |
| 図-I-26 | 総合的な目標達成度の炉型別及び燃料サイクル別比較 | 155 |
| 図-I-27 | 社会的な属性による重みとそれを考慮した総合的な目標適合度の比較 | 156 |
| | | |
| 図-II-1 | 高速増殖炉サイクル技術の段階的研究開発 | 157 |
| 図-II-2 | 高速増殖炉サイクル技術の技術体系整備 | 158 |
| 図-II-3 | 軽水炉の廃止措置設備容量の推移 | 159 |
| 図-II-4 | 高速増殖炉シナリオの原子力発電構成及び使用済燃料の再処理量 | 160 |
| 図-II-5 | 高速増殖炉シナリオの天然ウランの年間需要量及び累積需要量 | 161 |
| 図-II-6 | 高速増殖炉シナリオの使用済燃料貯蔵量と使用済燃料中の MA 蓄積量 | 162 |
| 図-II-7 | 高速増殖炉燃料の組成 | 163 |
| 図-II-8 | 高速増殖炉燃料の組成（炉心燃料とブランケット燃料全体の平均） | 163 |
| 図-II-9 | 軽水炉燃料の組成（PWR） | 164 |
| 図-II-10 | 軽水炉プルサーマル燃料の組成（PWR） | 164 |
| 図-II-11 | 従来の再処理法と比較した先進湿式法再処理の特徴 | 165 |
| 図-II-12 | 従来型湿式法から精製工程を排除した軽水炉再処理と先進湿式法を適用した 軽水炉再処理の比較 | 166 |
| 図-II-13 | 先進湿式法再処理を適用した将来の再処理施設 | 167 |
| 図-II-14 | 2050年頃までの開発ステップイメージ | 168 |
| 図-II-15 | 再処理の技術実証試験施設イメージ | 169 |
| 図-II-16 | 実用化推進サイクル施設のイメージ | 170 |