

第Ⅱ部 2015年頃までの研究開発計画とそれ以降の課題

1. 高速増殖炉サイクルに関する研究開発の進め方

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

高速増殖炉サイクルは、CO₂削減による地球温暖化防止に加え、高速増殖炉の特長を活かした放射性廃棄物低減（MAの燃焼など）による環境への適合を図りながら、UやPuなどの核燃料をリサイクルして原子力エネルギーの長期に亘る持続的な利用を可能とする。したがって、高速増殖炉サイクルは我が国のエネルギー自給率を確保する将来の基幹電源として最も有望な技術であり、その実用化はエネルギーセキュリティ上重要である。高速増殖炉サイクルの研究開発は、2050年頃からの商業ベースでの本格導入に必要なリードタイムを考慮し、今後のエネルギー需給に関する国際的な動向に柔軟に対応しつつ、安全かつ安定にエネルギー供給できる技術の確立を目指して、以下の基本方針に基づいて進めることとする。

[研究開発の基本方針]

- ・安全性の確保を前提として、経済性及び信頼性の高い核燃料物質の供給及びリサイクルの姿を実証するため、高速増殖炉、再処理及び燃料製造の研究開発は密接な連携の下に一体的に推進する。
- ・高速増殖炉サイクルの導入については、その時期の核燃料サイクルの状況（種々の使用済燃料の蓄積、次世代の軽水炉再処理、核燃料物質の需給バランスなど）を考慮して、軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの柔軟かつ合理的な移行を目指す。
- ・研究資源の有効活用を図る観点から、資金の適切な重点配分、定期的なチェック&レビューなど、効率的な研究開発計画を策定する。
- ・GIFや二国間協力などの国際協力を最大限に活用し、我が国で研究開発を進めていく概念を国際標準にすることを旨とする。

1.2 高速増殖炉サイクル技術の段階的研究開発

原子力エネルギーの利用においては、科学技術として高い安全性及び信頼性が求められる。その研究開発についても同様に、実績をベースとして可能な限りリスクを低減し、着実なステップアップを図ることが重要である。一方、商用の高速増殖炉及び燃料サイクル施設については、経済性向上のために、革新技術を導入した上でスケール効果を活かすことが不可欠である。

上記の状況を踏まえ、研究開発リスクの低減を図りつつ、高速増殖炉サイクルの商業ベースでの本格導入に向けて、多くの革新技術を含む中・大型の商用施設の建設・運転を実現していくには、施設規模や機器の段階的なスケールアップを図り、開発目標への適合性や革新技術の実現性・信頼性を着実に検証していく必要がある。軽水炉の開発実績を事例にすると、このスケールアップ比は2倍程度であり、新たな革新技術の導入も必要であるため、出力28万kWeの「もんじゅ」までの技術で、商用の中・大型炉（75～150万kWe規模）を設計・建設することは困難と考えられる。一方、燃料サイクル施設については、臨界制限によりプロセス機器の

形状や規模には制約があるが、化学プラントにおける実績をみると、10倍程度のスケールアップ比は可能である。したがって、段階的なステップアップ手順を踏めば、処理規模については高速増殖炉への燃料供給量に合わせて柔軟に設定することが可能である。

これらのことから、実用化に向けた高速増殖炉サイクルの研究開発は、その進捗に応じて図-II-1に示す3つの段階（第1段階：技術体系整備、第2段階：革新技術実証、及び第3段階：実用化推進）を踏んで、徐々にステップアップを図りながら進めることが適切と考えられる。

第1段階（技術体系整備）は、2015年頃までの高速増殖炉サイクルの技術体系整備の段階であり、要素技術規模で革新技術に関する研究開発の実施により、実用施設の成立性にかかわるデータを整備する。また、その研究開発成果を反映した設計研究を実施し、実用施設の概念及び技術仕様を提示する。さらに、第2段階の実証試験施設の設計研究を実施することにより、実用化に至るまでの研究開発計画とその具体的な試験内容を提示する。

第2段階（革新技術実証）は、実用化を見通すための高速増殖炉サイクル技術の実証段階であり、第1段階で体系化した革新技術を対象として、実用化を見通せる規模での実証試験施設を用いた試験・運転により、同技術の成立性を実証して、開発目標達成の見通しを取得する。また、実証試験の成果を反映した実用施設の設計概念を提示する。

第3段階（実用化推進）は、商業ベースでの本格導入を目指して実用化を推進する段階であり、実用規模の施設の建設・運転を通して、高速増殖炉サイクルの経済性、信頼性などの開発目標の達成を確認する。

以上の段階的な研究開発においては、各段階の成果を評価し、所定の技術レベルに達していることを確認した上で次の段階へ進むこととする。また、各段階の適切な時期に中間評価を行い、研究開発の進捗状況と方向性の確認を行う。高速増殖炉サイクルは、高速増殖炉、再処理及び燃料製造の研究開発を一体的に進めることにより、核燃料のリサイクルによる持続的なエネルギー供給と地球環境保持の機能が実現するシステムである。このため、実用化を推進する第3段階までには、各技術の達成レベルの整合性を確保する必要がある。

1.3 開発目標及び設計要求の見直し

今後の研究開発計画を策定するに当たり、フェーズIIまでの成果を踏まえて開発目標の見直しの要否を検討した。表-II-1に見直した開発目標を示す。開発目標に関する基本的な変更はないが、環境負荷低減性にかかわる目標の一つである「LLFPの分離変換による地層処分への負荷軽減」については、LLFPの分離変換に関する基礎的課題が多く、研究開発に長期間を要することから将来の目標とした。

設計要求に対する同様な見直しを表-II-2に示す。表中に注記したように、経済性の設計要求については国際標準としての目標の検討が必要である。資源有効利用性については、エネルギー需給の不確かさに柔軟に対応する観点から、1.2程度までの増殖比を要求している。

これらの開発目標及び設計要求については、適宜、見直しを行うこととしている。

2. 技術体系の整備に向けた2015年頃までの研究開発計画

2.1 高速増殖炉サイクルの技術体系整備

図-II-2に2015年頃までの技術体系整備(第1段階)の展開を示す。2005年度末までのフェーズIIでは、高速増殖炉サイクルシステムの複数の実用化候補概念を明確にするため、開発目標に適合する高速増殖炉及び燃料サイクルシステム概念の創出を行い、それらの中から第I部の重点化の方針に従い、2015年頃までの研究開発計画の作成を行った。候補概念の検討においては、革新技術についての要素試験研究などにより、概念の基本的な成立性を見通すとともに、実用化のための課題を抽出した。また、経済性向上などの目標達成のために採用した革新技術の研究開発において、期待通りの成果が得られない場合を想定し、経済性は低下するものの研究開発リスクの小さい代替技術を用意し、目標の達成度に対する影響の度合を確認した。

2006年度以降においては、フェーズIIでの重点化の方針を受け、主概念に重点的な資源投資を行い、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を提示」することを目的に、5年間程度を区切りの目安として技術体系の整備を進める。具体的には、革新技術の要素試験結果などに基づき、実用施設の成立性にかかわるデータの整備を行うとともに、高速増殖炉及び燃料サイクルシステムの実用化像を提示する。なお、研究開発を進めるにあたっては、2~3年で中間取りまとめを行い、研究成果のチェック&レビューを実施し、目標達成の見直しを確認しながら、必要に応じて、見直しを加えた上で次の段階へ進むこととする。

主概念については、2006~2010年の5年間のフェーズで、革新技術の成立性を評価するための要素試験研究を実施するとともに、その要素試験結果などに基づき革新技術を取り込んだプラントシステム概念設計研究を実施する。これらの成果により、採用する革新技術を決定するとともに、経済性、保守・補修性などに優れた高速増殖炉及び燃料サイクルシステムの実用施設概念を構築する。その中で技術的な成立性が懸念される場合については、より実現性の高い技術・設計への修正、あるいは代替技術を採用して、設計概念の見直しを図ることとする。

2011~2015年頃までの5年間のフェーズでは、採用された革新技術に関する要素試験研究を実施し、その成果を反映したプラントシステム概念設計の最適化検討を行う。これにより2015年頃の技術体系整備までに、実用施設の成立性にかかわるデータを整備するとともに、実用化像を提示する。また、これらの成果に基づき、実用化までの研究開発計画を提示する。なお、実用化までの研究開発計画の明確化に伴い、必要に応じて2015年以降の革新技術実証段階に円滑に移行できるよう研究計画を見直すこととする。

補完概念については、研究開発の効率性を考慮し、技術的実現性の観点から重要と判断される課題を中心に、外的競争資金や国際協力の活用を視野に入れて研究開発を進める。

主概念及び補完概念の進め方については、各フェーズにおいて、研究開発成果、国際的な研究開発動向、エネルギー需給状況などを踏まえて見直しを行うこととする。また、主概念及び補完概念に含まれない基盤技術についても、適宜、その成果を踏まえて実用化戦略調査研究への反映の要否を判断していくこととする。

2.2 研究開発体制

2.2.1 国内推進体制

高速増殖炉サイクルはそれを実用化すれば、エネルギーセキュリティ確保の観点から大き

な貢献が期待できる。実用化までには安全性や経済性にかかわる目標達成に向けて解決すべき技術課題は多く、そのための研究開発には多額の投資と長期間を要する。したがって、効率的かつ着実な研究開発推進の観点から、国内の関係者が有する知見や技術情報などの集約・共有化が必要であり、それぞれの特徴を活かした協力体制の下で研究開発を進めることが重要である。

このためフェーズⅡと同様に、日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という。）と将来のユーザーである電気事業者を中核とし、設計・製造技術の継承者としてのメーカー、革新技術の提案が期待される研究機関や大学などの協力を得た体制を継続することが適切である。この中で、国は研究成果や開発計画について定期的な評価を行い、研究開発を着実に進める役割を担う。原子力機構は、「常陽」、「もんじゅ」、ホット施設などでの試験や、設計研究及び要素試験研究を通して、高速増殖炉サイクルの技術体系を整備するとともに、成果を実用施設の設計に反映するプロジェクトの司令塔としての役割を果たす必要がある。産業界においては、電気事業者は軽水炉経験や実証炉開発知見の反映、プラントの設計・建設技術を有するメーカーは設計研究や革新的技術開発などを実施する。研究機関及び大学には、プラントの性能向上に資する革新的なアイデアの提案や人材育成を期待する。

2.2.2 国際協力の考え方

高速増殖炉サイクルに関する国際協力としては、GIF に代表される多国間協力、協定ベースの日仏米などの3カ国協力や2カ国協力、共同研究や委託研究などの契約ベースの国際協力、協定や契約関係のない情報交換レベルの協力など種々の形態がある。

高速増殖炉システムにかかわる国際協力については、国際標準に成り得る概念の構築を目指して、研究開発上のリスク低減や革新技術の実現性をより確かなものとしていくため、GIFの多国間協力の活用を中心に、国際共同開発や研究開発分担を積極的に進める。このような観点から、GIF プロジェクトのナトリウム冷却炉に関しては、日本がリード国となってその開発を進めている。ただし、機微情報を含む分野や基礎的で新規性を含む分野などについては、従来の2国間あるいは3国間に限定した枠組みの中で研究協力を行うこととする。

燃料サイクルシステムについては、機微情報を扱う分野であるため、主に2国間あるいは3国間に限定した枠組みで研究協力を行う。これについては核拡散抵抗性を担保する技術などの開発を進め、国際的にそれらの成果を提示し、普及を図ることにより高速増殖炉サイクル技術の定着を図る。

2.3 高速増殖炉システム

2.3.1 主概念

(a) 技術課題

高速増殖炉システムの主概念であるナトリウム冷却炉及びMOX燃料の主な技術課題を表-II-3に示す。ナトリウム冷却炉については、プラントの成立性にかかわる課題として、安全性の確保に関する項目（仮想的炉心損傷事故時の再臨界回避方策）、経済性の向上に関する項目（切込型炉上部機構の開発、ポンプ組込型中間熱交換器の開発、冷却系2ルー

プ化とこれにともなう大口径・高流速配管の開発)、信頼性の向上に関する項目(二重伝熱管直管型蒸気発生器の開発、ナトリウム中検査・補修技術の開発)、及び長期を要する課題(高クロム鋼材料の開発)などが挙げられる。

MOX 燃料については、ODS 被覆管、TRU 酸化物燃料及びショートプロセスペレット燃料の照射試験による高燃焼度の達成及び健全性の確認、再臨界回避集合体の開発については、炉外試験と試作による構造概念の成立性及び照射試験による健全性の確認が課題となる。

(b) 研究開発計画

a) プラントシステム

ナトリウム冷却炉のプラントシステムにかかわる研究開発計画を表-II-4 に示す。図には各課題の主要なチェックポイント及び革新技術の採否判断の時期を示している。主要なチェックポイントは、研究開発の区切りまたは終了時期に、次のステップに進めるかどうかをチェックするポイントであり、研究開発の進捗に対応して設定している。革新技術の採否判断については2010年度末としている。これは、2015年度末頃に高速増殖炉サイクルの技術体系を整備し、実用プラントの仕様を確定するには、革新技術の採否について少なくともその5年程度前には決めて、関連する要素試験研究を実施する必要があること、またGIFの次世代炉の仕様選定が2010年頃に予定されており、国際的な標準仕様を議論する時期と対応していることなどが、時期的に望ましい理由として挙げられる。

主概念であるナトリウム冷却炉の研究開発では、プラントの成立性に大きな影響を与える革新技術に関する研究成果に対して2~3年毎にチェック&レビューを行い、その工学的成立性を見極めた上で次段階へ進むこととしている。成立すると判断された研究成果については、逐次、概念設計研究に反映する。一方、成立性が見込めないと判断された技術課題については、開発対象を代替技術に切り替えるなど、プラントシステムとして確実に成立するように、柔軟性のある技術開発を行う。

安全要求への適合を目指した革新技術、経済性向上にかかわる革新技術、信頼性向上にかかわる革新技術、酸化物燃料にかかわる課題に対して、実験的及び解析的な要素技術開発を行うとともに、構造設計、安全設計を中心に実用炉概念の設計研究を行い、要素技術開発成果を反映して実用化プラント概念を構築する。個別の研究開発項目の概要については以下に述べる。なお、下記の各項目の番号は表-II-4の「技術開発」欄の番号を示している。

①高クロム鋼開発

- ・ 靱性を向上させた材料の製作、設計に必要な強度基準データ整備が課題である。
- ・ 2010年までに成分調整を行った上で材料を試作して、各種強度試験、溶接手法の開発試験を実施し、物性・強度などのデータを取得する。これらのデータにより高クロム鋼材料を冷却系機器の構造材料及び伝熱管に適用可能であることを確認する。
- ・ 2015年までに長時間クリープに関するデータを取得し、強度基準の整備を完了させて、機器設計に反映する。

②冷却系 2 ループ化

- ・配管内の流力振動の評価及びエロージョン評価が課題である。
- ・2010年までに水を作動流体とする 1/3 スケール試験体を用いた流動試験を継続し、流力振動による振動応答評価手法を検証する。検証された手法を用いて実機の流力振動を評価し、実機配管の技術的成立性を確認する。
- ・2015年までにナトリウムを用いた配管のエロージョン試験を実施し、エロージョンが発生する条件を明らかとする。これにより、寿命中の長期運転に対する配管の構造健全性を確認する。

③ポンプ組込型中間熱交換器 (IHx)

- ・ポンプから IHx への振動伝達による伝熱管の摺動摩耗防止、高クロム鋼伝熱管の摩耗耐性データ取得、機器内流動適正化及び柔構造の長軸ポンプ開発が課題である。
- ・2010年までに水を作動流体とする 1/4 スケール試験体による振動伝達試験を実施し、振動伝達評価モデルを検証する。また、高クロム鋼伝熱管の摩耗量を測定する試験を実施しデータを取得する。これらにより、機器の基本的な成立性を確認する。
- ・2015年までに、プレナム内の水流動試験及び長軸ポンプの要素試験を実施して、機器設計に必要なデータ・技術を取得し、機器設計に反映する。

④原子炉容器コンパクト化

- ・上部プレナム内の流体温度揺らぎ現象、液面からのガス巻き込み防止、高温構造評価、及びそれらに対する設計基準の整備が課題である。
- ・2010年までに水及びナトリウムを作動流体とする温度揺らぎ試験及びガス巻き込み試験により、それぞれ構造物の熱疲労への影響評価及び自由液面におけるガス巻き込み現象の制限条件を把握する。また、炉容器液面近傍における熱的境界条件を把握する基礎試験データなどを用いて非弾性解析手法の検証を実施する。これらにより、コンパクトな原子炉容器の成立性を確認する。
- ・2015年までに高温構造設計方針などを策定し、原子炉構造の設計に反映する。

⑤燃料取扱システムの開発

- ・炉上部構造と整合するスリム型燃料交換機開発、効率の良い燃料移送が可能な移送系開発、燃料洗浄システム開発、及び高発熱の新燃料輸送方法の開発が課題である。
- ・2010年までにスリム型燃料交換機の開発試験、燃料移送システムの除熱試験、ナトリウムが付着した模擬燃料体の洗浄試験、新燃料キャスクを模擬した除熱試験を実施し、燃料取扱いシステムの主要部分の概念成立性を確認する。
- ・2015年までに、燃料出し入れ機とコンパクトな燃料貯蔵槽の除熱試験を実施して、設計データを取得し、燃料取扱いシステムの設計に反映する。

⑥鋼板コンクリート構造（SC 構造）格納容器

- ・格納容器 SC 構造、建設方法の開発及び設計基準の整備が課題である。
- ・2010 年までに SC 構造の試作及び開発試験を行い、強度・漏えい率などのデータを取得し、構造に対する基本的な成立性を確認する。
- ・2015 年までに設計基準を整備し、SC 構造格納容器の設計に反映する。

⑧配管二重化

- ・不活性ガス雰囲気の内管ギャップにおける微量ナトリウム漏えいを検出可能な、高性能リーク検出器の開発が課題である。
- ・2010 年までにセンサー部の開発を完了し、システム成立性を確認する。
- ・2015 年までに漏えい検出システムの性能を確認する試験、二重管の補修方法の開発試験を実施し、二重配管の設計に反映する。

⑨直管二重伝熱管蒸気発生器

- ・高クロム鋼の密着二重伝熱管製作、管の溶接方法開発、大型球形管板の製作性・健全性確認、安全性評価に必要な水リーク挙動データ取得、及び検出速度の速い水リーク検出器開発が課題である。
- ・2010 年までに、実寸長の伝熱管試作試験、管-管板溶接方法開発と健全性評価のための試験、球形管板試作と健全性評価のための試験、安全性評価のための試験による伝熱管破損モデル構築、及びナトリウム中固体電解質水素計開発試験を実施して機器の成立性を確認する。
- ・2015 年までに、「常陽」2 次系に付設する蒸気発生器伝熱流動試験装置を製作し、機器の総合的な伝熱流動試験を実施し、機器設計に必要な伝熱特性、流動安定性などのデータを取得する。

⑩保守・補修技術

- ・ナトリウム中に浸漬して使用する構造物の自動検査システムの開発、及び蒸気発生器の二重伝熱管の検査装置開発が課題である。
- ・2010 年までにナトリウム中目視検査装置の開発試験により、分解能や応答性などの基本的な性能把握、及び二重伝熱管を検査する超音波検査装置のセンサー開発を実施し、保守・補修技術への適用性を確認する。
- ・2015 年までにナトリウム中体積検査装置を開発し、必要とする保守・補修技術を確立する。

⑪受動的炉停止と自然循環崩壊熱除去

- ・炉心の温度上昇時に受動的に原子炉を停止させる受動的炉停止装置開発、及び自然循環崩壊熱除去の評価技術開発が課題である。
- ・2010 年までに受動的炉停止装置の要素照射試験を実施し、技術的成立性を確認する。

自然循環崩壊熱除去の評価技術については、水及びナトリウムを作動流体とする縮尺・部分モデル試験のデータを取得し、評価手法の検証に反映する。

- ・2015年までに実用炉仕様の受動的炉停止装置を開発し、機能確認試験を実施する。自然循環崩壊熱除去評価手法については、「もんじゅ」の自然循環試験データを用いて、実炉を対象とした検証を行い、自然循環による炉心冷却システムの特性評価に反映する。

⑫炉心損傷時の再臨界回避技術

- ・炉心損傷時の熔融燃料の炉心外への流出を促進できる、内部ダクト付き燃料集合体の開発が課題である。
- ・2010年までに燃料集合体の基本構造及び熱流動設計を実施するとともに、熔融燃料の流出を促進する内部ダクトの有効性（2005年度までに実施した熔融燃料を下方へ流出する能力に加えて、上方への流出能力）を、カザフスタンの研究炉（IGR 炉）での炉内試験を含めた試験研究により確認する。
- ・2015年までに、炉心外に流出した熔融燃料（デブリ）の冷却性を確認する試験により、炉心損傷の影響を炉内終息できることを確認する。

⑬建屋の3次元免震技術

- ・耐震上のサイト条件に依存しないプラント設計概念に基づき、プラント標準化による経済性向上を実現する上で、3次元免震要素などに対する技術的成立性を見通すことや設計基準類を整備することが課題である。
- ・2010年までに3次元免震要素に対する要素試験・特性試験を行い、3次元免震にかかわる評価手法の整備を行う。
- ・2015年までに実規模模型を用いた3次元振動試験により技術の確証を行い、プラント設計に反映する。

b) 炉心燃料

MOX燃料の研究開発計画を表-II-5に示す。前述のプラントシステムと同様に、表には各課題の主要なチェックポイント及び革新技術の採否判断の時期を示している。MOX燃料については、炉内試験を中心に、2009～2010年度末までにそれぞれの技術課題について取得する試験データに基づき、目標達成見通しを評価する。また、2015年頃までに主要な成立性確認データを取得して成立性を評価し、以後の実証を中心とした開発を進める。

実用化燃料の使用期間は10年程度の長期間であり、照射試験による目標燃焼度までの性能確認も同程度以上の期間を要するので、着実に到達燃焼度を延ばすように照射試験を進め、適宜、目標燃焼度達成の見通しを外挿評価する必要がある。また、低除染TRU-MOX燃料の供給可能時期を考慮し、当面はODS被覆管、低除染TRU-MOX燃料、再臨界回避集合体の開発などの個別の技術課題に焦点を当てた研究開発を進め、最終的にはそれらを統合した照射試験への展開を図る。以下に個別の研究開発項目の概要を示す

①高燃焼度燃料・材料開発

- ・ ODS 被覆管燃料について、燃焼度を優先した燃料ピンの加速照射試験と材料照射試験を行い、目標達成度見通しを確認する。
- ・ ODS 被覆管材料及び燃料ピンの実用化目標までの燃料照射（高燃焼度など）を行い、材料照射特性データを整備する。

②低除染 TRU-MOX 燃料の照射健全性

- ・ TRU-MOX 燃料について、TRU-MOX 燃料ピン及び簡素化ペレット法で製造した中空燃料ピンの照射試験により、燃料ピンの照射挙動及び健全性確認を行う。
- ・ 低除染 TRU-MOX 燃料ピン及び簡素化ペレット法で製造した中空燃料ピンの実用化目標までの照射データを取得し、燃料ピンの総合的な照射健全性の確認を行う。
- ・ 低除染 TRU-MOX 燃料のピンバンドル集合体の照射試験に着手する。

③再臨界回避集合体開発

- ・ 再臨界回避集合体の構造を決定し、炉外試験による構造成立性の確認を行う。
- ・ 再臨界回避集合体の照射試験を実施し、照射における健全性評価を行う。

2.3.2 補完概念の技術課題及び研究開発計画

補完概念については、成立性を左右する重要な課題を中心に研究開発を進め、研究成果に対しては2～3年毎にチェック&レビューを行い、その工学的成立性を見極めた上で次の段階へ進むこととする。

高速増殖炉システムの補完概念の技術課題及び研究開発計画を表-II-6に示す。ナトリウム冷却炉の性能向上が期待できる金属燃料については、金属燃料ピンの照射挙動評価、健全性確認及び過渡時の被覆管破損限界評価を実施し、金属燃料ピンの被覆管最高温度 650℃の成立性（液相形成の回避）を見極めるとともに、被覆管内面腐食などに対する TRU 燃料の照射健全性を確認する。また、概念の成立性を左右する炉心損傷時の再臨界回避方策の有効性を試験及び解析によって把握する。金属燃料については、米国との国際協力による開発スケジュール促進・効率化の可能性も追求する。

ヘリウムガス冷却炉については、成立性判断の基本となる高温耐性に優れる窒化物被覆粒子燃料の研究開発として、被覆粒子燃料を SiC 母材に埋め込んだ六角ブロック型燃料集合体の設計概念の具体化を進める。ヘリウムガス冷却炉については、GIF などの国際協力を通じて、仏国の燃料概念との調整を図り、「常陽」を用いた照射試験計画を策定する。炉心燃料の概念成立性、ヘリウムガス炉の適合性評価を見直し、その後の進め方について 2010 年を目途に判断する。

2.3.3 期待する成果

(a) 主概念

a) プラントシステム

2015年頃までには、技術体系整備に必要なすべての要素試験研究を行い、革新技術の成立性を確かなものとする。要素試験研究で得られた知見をプラント設計研究に反映して、概念設計の最適化を行い、実用化プラント像とその技術仕様を提示する。また、試験規模、試験内容、施設設計などの検討を通して、革新技術実証の方策について具体化するとともに、実用化までの試験計画を提示する。

b) 炉心燃料

MOX燃料の研究開発で2010年まで期待する成果としては、ODS被覆管燃料ピンの15万MWd/t(実用化目標の40~60%)までの健全性確認及び性能評価、簡素化ペレット法で製造した中空燃料ピンの5万MWd/tまでの健全性確認などが挙げられる。また、低除染TRU-MOX燃料の照射に関しては、TRU-MOX燃料ピンの10万MWd/t(実用化目標の40%)までの健全性確認及び性能評価、再臨界回避集合体開発については炉外試験による再臨界回避集合体の成立性見通しの取得が挙げられる。

2015年頃までの研究開発では、ODS被覆管燃料ピンの実用化目標(ピーク燃焼度25万MWd/t程度)までの健全性確認及び性能評価、ODS燃料被覆管の燃料集合体の15万MWd/t程度までの健全性確認及び25万MWd/tまでの健全性に対する外挿評価が挙げられる。低除染TRU-MOX燃料の照射に関しては、25万MWd/tまでの燃料ピンの健全性確認及び性能評価、再臨界回避集合体開発に関しては、再臨界回避集合体の7万MWd/t程度までの健全性確認及び25万MWd/tまでの健全性外挿評価が挙げられる。

(b) 補完概念

2010年までに期待する金属燃料の研究開発成果としては、金属燃料の照射試験及び炉外・炉内過渡試験の実施により、照射初期における被覆管温度650℃の成立性及びMA含有金属燃料の照射健全性を見通しを得る。また、2015年頃までの照射試験に関連する成果としては、高燃焼度までの被覆管温度650℃の成立性及び過渡時健全性を見通しを得ることを期待する。炉外及び炉内試験では溶融燃料の流出挙動の確認、溶融燃料のデブリの安定冷却能力の確認ができる試験データの取得などを行う。

2010年までのヘリウムガス冷却炉の研究開発成果としては、窒化物被覆粒子燃料の設計概念の提示及び「常陽」を用いた燃料照射計画などについての検討を行う。なお、2015年頃以降の窒化物被覆粒子燃料の照射試験については、2010年段階でその実施を判断する。

2.4 燃料サイクルシステム

2.4.1 主概念

(a) 技術課題

表-II-7に燃料サイクルシステムの主概念の技術課題を示す。先進湿式法再処理技術の解体・せん断工程については、設備のコンパクト化を目指し、これまで開発してきた要素技術(高性能機械式切断治具など)を基に、解体・せん断にかかわる小型一体化機器を開

発して前処理設備の経済性向上を図る必要がある。さらに、高濃度で効率的な溶解に最適なせん断条件（短尺せん断など）を検討する必要がある。

溶解工程については、プロセス機器に大きな負荷を与えない溶解条件やコンパクトな溶解システムを構築することにより、設備寿命延長などによる経済性向上を図るとともに、材料腐食などを緩和する溶解条件で比較的高濃度の溶解液を得て、U 晶析工程に供する高濃度溶解液調整工程の効率化を図る必要がある。また、遠隔保守・補修性や溶解速度などの機器性能の確認が課題である。

晶析工程については、晶析装置内の温度勾配などの条件を考慮した回収率、除染性能の評価を行うとともに、工学規模での実燃料を用いた試験により、U 回収率のスケールアップの影響の確認を行う必要がある。また、晶析で得た U 結晶の洗浄方法の開発、遠隔操作性、臨界安全性を考慮した晶析装置の開発を行い、機器性能の確認を行う必要がある。

共除染・逆抽出（U-Pu-Np 混合抽出）工程については、U-Pu-Np 混合抽出（特に Np）挙動及び FP の除染挙動の把握により、単サイクル共抽出技術の成立性を確認するとともに、除染性能のスケールアップの影響の確認を行うことが重要である。また、軸受など駆動部の安定性・耐久性向上に向けた遠心抽出器システムの開発を行い、遠隔保守・補修性、除染性能、耐久性などの機器性能を確認する必要がある。

MA 回収工程の抽出クロマトグラフィについては、新抽出剤を用いた使用済燃料からの MA 回収の確認を行うとともに、運転温度、抽出液分離切り替えなどの操作条件及び機器仕様概念を構築し、遠隔保守・補修性、分離・回収など機器性能の確認を行う必要がある。

簡素化ペレット法では、溶液混合による Pu 富化度調整技術の開発による粉末混合工程削除を図ったプロセス概念を構築している。そのため、マイクロ波脱硝法を用いた転換、粉末流動性改良技術及びダイ潤滑成型プロセスなどの再現性確認を行うとともに、焼結工程におけるペレットの焼結性や O/M 調整の再現性確認、低除染 MA 含有簡素化ペレットの製造性評価を行う必要がある。また、遠隔自動化技術を基本とした量産機器の開発を行うことが課題である。

(b) 研究開発計画

燃料サイクルシステム主概念の研究開発計画を表-II-8 に示す。先進湿式法のプロセス開発については、2010 年頃までに再処理に関する小規模ホット試験や燃料製造に関する小規模 MOX 試験によって、最適な操業条件を把握する。また、再処理の枢要プロセス（晶析、共除染・逆抽出、MA 回収）については、ホットセル試験施設を新設して、2015 年頃までにスケールアップの効果を確認する。機器開発については、2015 年頃までに、実用化が見通せる規模の遠隔操作機器を用いたコールド試験によって、処理速度や遠隔保守性などの機器性能を確認する。

簡素化ペレット法については、2010 年ころまでにプルトニウムなどを用いた小規模製造試験を実施して、MA や FP の影響評価を含めプロセスを確証する。その後、照射燃料製造を通じて 2015 年までにプロセスの最適化を図る。また、機器性能を含む技術確証のために、脱硝転換、造粒、ダイ潤滑成型、焼結など、主要工程の試験用機器の設計を実施する。さ

らに、脱硝転換、造粒、ダイ潤滑成型、焼結など主要工程機器の試作やコールド試験を実施し、処理速度、量産性、遠隔保守・補修性などの機器性能を確認する。

2.4.2 補完概念の技術課題及び研究開発計画

燃料サイクルシステムの補完概念（金属電解法再処理及び射出鑄造法燃料製造の組合せ）の技術課題及び研究開発計画を表-II-9に示す。金属電解法については小規模ホット試験のための設備検討及び遠隔操作性を考慮した再処理機器開発、計量管理技術開発、廃棄物固化体の最適化などが課題である。燃料製造については、U-Pu-Zr合金燃料の製造試験を実施し、製造性の確認を行う必要がある。

金属電解法の研究開発においては、枢要技術の課題解決のために電解精製、陰極処理、TRU回収、塩廃棄物処理、燃料スラグ分析などの主要工程に用いられる機器を試作し、コールド試験によってプロセス性能を確認する。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。また、プロセス成立性確認のための使用済燃料を用いた小規模ホット試験計画を立案する。計画の立案においては、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する。2015年頃までには、主要工程機器の開発、小規模ホット試験の具体化などに取り組み、研究開発目標への適合性を確認して、主概念との比較評価を行う。

2.4.3 期待する成果

(a) 主概念（先進湿式法と簡素化ペレット法の組合せ）

先進湿式法に関する2010年までに期待する研究開発成果は、使用済燃料などを用いた溶解、晶析、抽出などの各再処理工程の小規模ホット試験のデータに基づいた最適なプロセス条件を決定、遠隔保守・補修性を考慮した溶解、晶析などの実用機器概念の提示、プロセス試験結果に基づく実用燃料サイクル施設概念の構築などが挙げられる。

2015年頃までの研究開発成果としては、実用化に必要な革新的な要素及び枢要システム技術に関するプロセス試験及び機器開発による技術的実現性にかかわるデータの整備（一体型解体・せん断機、晶析・結晶洗浄装置、高性能遠心抽出器、MA回収用抽出クロマトグラフィなど）が期待される。

簡素化ペレット法について、2010年までに期待する研究開発成果は、MA及びFPの影響を考慮した簡素化ペレット製造試験のデータに基づいた最適なプロセス条件の決定、遠隔保守・補修性を考慮した成型装置などの実用機器概念を提示、燃料製造試験結果に基づく実用燃料サイクル施設概念の構築などが挙げられる。2015年頃までの研究開発成果としては、簡素化ペレット法プロセスの最適化及び、マイクロ波脱硝転換造粒装置、ダイ潤滑成型機、集合体組立装置の強制冷却機構などの主要機器の開発により、それらの技術的実現性にかかわるデータの整備が期待される。

再処理及び燃料製造に関する共通的な研究開発成果としては、遠隔自動運転システム及び遠隔保守・補修システムの具体化を図り、これらのシステム実証のための総合実証試験を立案、プロセス設計、機器設計、配置設計、安全評価などに関する試験データを蓄積す

るとともに、許認可関連情報を体系的に整理、実用燃料サイクル施設概念を最適化し、建設に必要な許認可データを準備できる技術レベルを達成、再処理及び燃料製造の一体化施設概念の構築が期待される。

(b) 補完概念（金属電解法と射出鋳造法の組合せ）

2010年までに期待する成果としては、使用済燃料を用いた金属電解法小規模プロセス試験計画の立案、操作性や物質移送などを考慮した主工程機器概念の提示、機器開発成果に基づく実用施設概念の構築、U-Pu-Zr合金燃料製造性の確認などが挙げられる。また、2015年頃までの成果としては、工学規模（4～5tHM/y程度）の再処理・燃料製造一体化試験設備の概念設計、金属電解法小規模プロセス試験の具体化などが期待される。

2.5 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。

2.5.1 高速増殖炉への移行時期の燃料サイクル

(a) 高速増殖炉への移行時期の状況の想定

高速増殖炉の商用ベースの導入が2050年頃とすると、軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行開始時期は数10年先になる。これには多くの不確定要素があり正確な予測は困難であるが、ケーススタディとして、高速増殖炉サイクルを開発し、着実に社会に定着させていく観点から以下のような移行時期の状況を想定し、それに基づいて移行時期におけるUやPu需給などの諸量解析を行った。

なお、ここでいう移行時期とは、炉寿命（60年と仮定）に達した軽水炉のリプレースとして、商用の高速増殖炉の導入を開始する2050年頃から、ほぼ炉寿命に相当する期間でリプレースが完了する時期（2110年頃）までを指すこととする。

- ・原子力発電の設備容量は、現在の約46GWeから2030年頃までに約58GWeまで増加し、2030年頃から原子力発電設備容量を58GWe一定（「2030年のエネルギー需給展望（中間とりまとめ）」⁷²⁾のリファレンスケースを適用）とする。
- ・プラント寿命を60年と仮定して⁷³⁾、2030年頃から順次寿命を迎える既存軽水炉が廃止され、その軽水炉のリプレースとして2030年から2050年までは改良型軽水炉を導入する（図-II-3）。
- ・高速増殖炉サイクルが商業ベースで導入される2050年頃からは、既存軽水炉のリプレースとして高速増殖炉を順次導入する。
- ・高速増殖炉導入開始までは、六ヶ所軽水炉再処理によって得られるPuはプルサーマルに利用する。

- ・プルサーマル使用済燃料はPu含有割合が高く、効率的な燃料供給が可能なことから、その再処理によって得られるPuは高速増殖炉に利用する。
- ・六ヶ所再処理施設の操業終了以降、それに続く再処理施設が遅滞なく操業開始し、そのMOX製品は2050年頃から導入が始まる高速増殖炉のTRU燃料として供給される。軽水炉再処理設備容量は、原子力委員会新計画策定会議での想定に合わせて、年間最大1200tHMとする（「基本シナリオの核燃料サイクルコスト比較に関する報告書」⁷⁴⁾）。
- ・高速増殖炉の導入量に応じて高速増殖炉用燃料サイクル施設（再処理、燃料製造）を増設する。

(b) 想定した高速増殖炉移行時期にかかわる諸量解析の結果

前項の移行時期の想定を基に、表-II-10に示す主な想定条件で高速増殖炉導入の諸量解析を行った。諸量解析結果として、図-II-4～図-II-6に、原子力発電構成、使用済燃料の再処理量、天然Uの年間及び累積需要量、使用済燃料貯蔵量、及び使用済燃料中のMA蓄積量を示す。高速増殖炉サイクルへの移行時期や将来の軽水炉再処理施設などに関連して、本想定条件の下で得られた結果は以下の通りである。

- ・原子力発電設備容量58GWeで、2050年から軽水炉のリプレイスに合わせて高速増殖炉サイクルを導入した場合、六ヶ所再処理工場に続く再処理工場の処理能力を適切に設定すれば、軽水炉から高速増殖炉へのリプレイスに要する期間はほぼ60年である。
- ・高速増殖炉へのリプレイスが完了した時点では、高速増殖炉使用済燃料の再処理施設の規模としては、年間約400tHMの処理容量となる。
- ・使用済燃料の最大貯蔵量は導入される軽水炉再処理設備容量に応じて変化するが、本検討条件では、約2.2万tHMである。
- ・天然U累積需要量については、約71万トン（在来型資源の5%程度）となる。

以上のことから、寿命を迎える軽水炉のリプレイスとして商業用の高速増殖炉導入が開始される2050年頃から、リプレイスが完了するまでの約60年程度が高速増殖炉サイクルへの移行時期となること、移行時期には軽水炉、プルサーマル、高速増殖炉（炉心及びブランケット）の使用済燃料が存在し、これらの使用済燃料を再処理して高速増殖炉へ燃料を供給する必要があることが示された。

(c) 移行時期における燃料サイクル

軽水炉の再処理は、高速増殖炉へのプルトニウム供給源として重要な役割を果たす。そこで、将来の核燃料サイクルプラント概念の検討とそれを採用する再処理技術の開発に当たって留意する事項を以下に示す。

- ・将来の再処理施設では、軽水炉、プルサーマル及び高速増殖炉の使用済燃料を処理でき、燃焼度、使用済燃料中のPu含有量、Pu同位体組成、MA含有量などの使用済燃料の特徴、発生量、貯蔵量、再処理技術の実績と成熟度などを踏まえて合理的な処理が可能なプラントを目指すことが重要である。

- ・再処理製品を高速増殖炉の燃料として供給するために、再処理施設については、高速増殖炉燃料製造施設との連携による一体的な運営を図る必要がある。
- ・将来の軽水炉再処理への適用技術としては、先進湿式法、金属電解法、フッ化物揮発法などに加えて、従来の PUREX 法の高度化や米国で開発が進んでいる UREX 法などが考えられる。
- ・将来の軽水炉再処理にこれらの技術を適用する場合には、高速増殖炉再処理に比べて処理容量が増大することなどの技術的な特徴を踏まえる必要がある。

2.5.2 先進湿式法再処理の軽水炉再処理への適用

、実用化戦略調査研究において主概念として選択した先進湿式法は、軽水炉再処理で採用されている湿式溶媒抽出技術を基本とした方法であり、将来の軽水炉再処理に対しても有力な選択肢と考えられる。以下に、軽水炉再処理に先進湿式法を適用した場合についての検討結果を示す。

(a) 使用済燃料の組成

高速増殖炉の使用済燃料を対象とした先進湿式法再処理技術を、将来の軽水炉再処理技術として適用するには、それぞれの使用済燃料の組成の相違を把握しておく必要がある。表-II-11 に代表的な軽水炉使用済燃料と高速増殖炉使用済燃料の組成比較を示す。比較データの詳細については、図-II-7～図-II-10 に示す。高速増殖炉の使用済燃料は、燃焼度が高く、Pu、MA 及び FP の含有量が、軽水炉の使用済燃料より多く、放射線量及び発熱量が大きい基本的な組成に大差はない。U の含有量については、軽水炉燃料の方が相対的に多いので、溶解液から U を粗分離する晶析工程の適用においては、燃料組成の違いを考慮する必要がある。それ以外は、先進湿式法再処理技術を適用するに当たって、組成の違いによる大きな課題はないと考えられる。また、軽水炉のプルサーマル燃料については、その組成は高速増殖炉燃料に近いと、特段の課題はないと考えられる。

なお、表中の高速増殖炉の燃料集合体から分かるように、ハンドリングヘッド、ラップ管、ワイヤースペーサ及びエントランスノズルは、高速増殖炉に特有な構造であるので、集合体の解体・せん断の前処理工程についてもその違いを考慮する必要がある。

(b) 軽水炉再処理の合理化可能性

軽水炉使用済燃料の従来の再処理法と比較した先進湿式法再処理技術の特徴を図-II-11 に示す。先進湿式法は、従来の軽水炉再処理法であるせん断、溶解及び溶媒抽出に関する技術をベースに、将来の再処理技術の開発目標に対する高い適合可能性の実現を目指して、種々の革新技术（高効率溶解、晶析、遠心抽出器、単サイクル共抽出、MA 回収など）を取り入れた再処理技術である。軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの移行時期における燃料サイクル施設で回収した再処理製品は、低除染燃料の燃焼が可能な高速増殖炉でリサイクルすることになると考えられるため、前述の使用済燃料の組成上の相違点などに配慮すれば、先進湿式再処理技術は軽水炉再処理の合理化を図れる技術として適用が期待で

きる。

図-Ⅱ-12 に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との比較を示す。プロセス工程を接続する線の太さは、処理規模の相対的な大きさをイメージとして示しており、晶析工程以降はUの70%程度が分離・回収される。

これにより、主工程の処理量が大幅に低減するため、経済性及び環境負荷低減性の改善が期待できる。また、単サイクル共抽出工程の導入により、Puは常にU、MAなどとの混合物となり単体では存在しないこと、低除染TRU燃料による接近の困難性が増すことによる核拡散抵抗性の向上が期待できる。

(c) 軽水炉再処理と高速増殖炉再処理の共用化の可能性

以上のように、先進湿式法再処理技術を軽水炉使用済燃料、プルサーマル使用済燃料及び高速増殖炉使用済燃料などの種々の燃料の再処理技術として適用することは可能であると考えられる。

適用に際しては、図-Ⅱ-13 に示すように、軽水炉及び高速増殖炉に対してそれぞれの専用処理ラインを設ける場合と種々の使用済燃料が処理可能な共用処理ラインを設ける場合が考えられる。また、専用ライン及び共用ラインのハイブリッドの場合についても、一つのオプションとして考えることができる。それぞれに利害得失が考えられるので、その選択にあたっては、燃料サイクル施設の合理的なあり方について、経済性、Pu需給バランス、処理規模など総合的に検討することが必要である。

(d) 先進湿式法を再処理プロセスに適用するに当たっての課題

上述の検討結果から、高速増殖炉サイクルへの移行時期のサイクル技術については、先進湿式再処理技術を適用して、軽水炉再処理技術の合理化を図ることが期待できると考えられる。

軽水炉サイクルから高速増殖炉サイクルへの合理的な移行の実現を図るには、将来における各種の使用済燃料の発生量を踏まえたうえで、再処理施設の規模と稼働率、Puバランスなどを考慮した移行シナリオの検討に基づいて、シナリオに対応した適切な施設概念(軽水炉使用済燃料の再処理プロセス、ライン構成、高速増殖炉の燃料製造施設など)を示すことが課題になる。また、施設概念の成立性を確認するために必要な研究開発項目の洗い出し及び研究開発計画の策定が課題として挙げられる。

研究開発課題の一例としては、軽水炉再処理のための溶解槽、晶析装置、遠心抽出器などの大容量機器の開発、MAを含めた計量管理システムの開発などが挙げられる。

また、軽水炉再処理の回収ウランの取り扱いも課題となる。即ち、高速増殖炉の再処理では、回収したU、Pu及びMAは、すべて新燃料の製造にリサイクル利用され、FPとして処分される量に相当するUを補充することによりサイクルが維持される。軽水炉再処理から回収されるUは、高速増殖炉の燃料として利用することが考えられるが、当面は将来資源として保管することになる。

一方、軽水炉との共存期間においては、ウラン資源の需給状況によっては、天然Uより

U-235 の含有率が多い回収 U を再濃縮し軽水炉で利用することも考えられる。先進湿式法での晶析による U の除染係数は従来の軽水炉再処理（除染係数； $10^6 \sim 10^8$ ）に比べて 100 程度と低く、作業員が近接して作業できる放射線レベルにはならない。このため再濃縮する場合には、濃縮の再転換工程で除染するケース、U 精製工程を付加するケース、高除染の U 粗分離技術を導入するケースなどが考えられ、回収 U の取り扱いについても課題となる。

以上より、軽水炉再処理への適用に際しての課題は有するものの、当面は高速増殖炉再処理技術の研究開発を着実に進めることで、軽水炉再処理技術の高度化にも対応可能と考えられる。なお、六ヶ所再処理施設に続く、将来の再処理施設については、国レベルの議論が 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。

2.6 2015 年頃までの研究開発の留意事項

2015 年頃までの研究開発計画を進めるにあたっては、以下のような留意事項があり、これらの点への対応を図りつつ研究開発を進めることとする。

- ・高速増殖炉サイクルへの移行時に軽水炉、プルサーマル及び高速増殖炉の使用済燃料を効率的にリサイクルする将来の再処理施設への先進湿式法再処理技術などの適用性提示
- ・国のリードの下、国内の総力を結集した研究開発体制の構築
- ・核不拡散性に優れた国際標準概念の構築を目指した国際協力と、国際的な研究開発の分担
- ・多角的な検討による必要資金の確保と、限られた資金を有効活用して研究開発を推進する仕組みの構築

3. 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こ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。

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

高速増殖炉サイクルの研究開発は、2015 年頃までの技術体系整備（第 1 段階）における実用化プラント仕様の明確化を受けて、多くの革新技術を含むプラントの商用化を、研究開発リスクにかかわる不確かさの低減を図りながら実現することが求められる。これには図-II-14 に示すように、2050 年頃からの商用プラント本格導入に至るまで第 2 段階（革新技術実証）から第 3 段階（実用化推進）と、着実に研究開発をステップアップしていくことが適切と考えられる。

高速増殖炉の実用化に向けては、実用化までに必要となる個々の要素技術開発とともに、原子炉プラントの運転を通じた燃料の高燃焼度化、炉心燃料材料の改良・開発を行うとともに、燃料交換の実績、プラントの保守・補修経験などを蓄積していくことが重要である。したがって、照射試験や運転経験蓄積のため、研究開発の場として「もんじゅ」などの実プラントの活用配慮することが重要と考えられる。

3.1.1 実用化を見通せる規模で革新技术を実証する段階（第2段階）

第2段階では、2015年頃までに整備する技術体系を基に、実用プラントに採用する革新技术を一定の規模で実証し、次の第3段階での実用化推進炉及び実用化推進サイクル施設*の建設・運転に向けた準備を行う。この段階における主要な実施項目としては以下が抽出される。

* 革新技术を実証した後、商用炉の導入前までに、商用規模の大型施設を見通せる出力（あるいは処理量）の原子炉（あるいは燃料サイクル施設）を設計・建設し、それらの運転経験を商用施設の設計に反映し、実用化を推進する役割を担う施設を実用化推進炉（あるいは実用化推進サイクル施設）と呼ぶ。

- ・燃料集合体規模の照射による燃料健全性の実証
- ・実用化段階の炉心性能（高燃焼度、長期サイクルなど）の実証
- ・革新的なプラント機器の技術について、実用化を見通せる規模での製作・試験による実証
- ・再処理及び燃料製造に関する主要な革新技术について、使用済燃料や低除染燃料を用いた工学規模での試験による実証
- ・高速増殖炉への燃料供給を通じた燃料製造にかかわる量産製造技術の実証

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）

第3段階においては、2050年頃からの商用プラントの本格導入に備え、商用規模の大型施設を見通せる規模の実用化推進炉及び同サイクル施設の設計・建設・運転を行い、高速増殖炉サイクルの経済性及び信頼性の実証と運転経験の蓄積による実用化推進を進める。この段階における主要な実施項目としては以下が抽出される。

- ・経済性、信頼性及び保守・補修性などについて、実用化推進炉及び同サイクル施設の運転データによる実証
- ・商用炉（～150万kWe）の建設判断ができる規模の実用化推進炉の運転経験の蓄積
- ・実用化推進サイクル施設の再処理及び燃料製造では、高速増殖炉などの使用済燃料を処理し、回収した再処理製品から実用化推進炉などへ低除染TRU燃料を供給することにより、商用化を見通せる規模で燃料のリサイクルを実証

3.1.3 研究開発方策

2015年頃以降の研究開発方策については、以下のようなステップアップの前提条件やそれにとまなう施設規模の設定などによりいくつかの方策が考えられる。

- ・第2段階の研究開発における高速増殖炉のプラント機器の熱出力規模は、革新技术実証に必要な規模として、少なくとも商用炉プラント機器の熱出力の数分の1程度とする。
- ・商用炉の電気出力は、既存の軽水炉のリプレースが主体となることから、リプレース対象となる軽水炉の出力規模（135～170万kWe程度）に相当する150万kWe程度とす

る。

- ・ 上記の 150 万 kWe 規模の大型商用炉の導入を可能とするには、それまでに 75～100 万 kWe 規模の実用化推進炉の設計・建設・運転の経験の蓄積を必須とする。
- ・ 商用炉の運転開始は 2050 年頃とし、商用燃料サイクル施設は商用炉への燃料供給のために、その数年前（3～4 年程度）には運転開始する。
- ・ 第 2 段階の研究開発における燃料サイクルシステムについては、革新技術の実証のために、少なくとも商用施設で用いる機器容量の数分の 1 程度（10kgHM/h 程度；年間 200 日稼動で 50tHM/y 規模相当）の試験機を用いることとする。ただし、プロセスを連結して総合システムとして性能を実証する観点からの施設試験容量としては 1tHM/y 程度とする。
- ・ 商用燃料サイクル施設の導入を可能とするため、実用化を見通せる規模（50～100tHM/y 程度）の実用化推進サイクル施設による設計・建設・運転経験の蓄積を必須とする。ただし、施設の規模は、この段階で存在する高速増殖炉の使用済燃料などの再処理や高速増殖炉への低除染燃料の供給などを考慮する必要がある。

(a) 高速増殖炉システム

第 2 段階以降における研究開発方策の例としては、出力 30～50 万 kWe 程度の革新技術実証のための試験炉を建設する「原子炉プラントを建設・運転する方策」、既存火力発電所などの外部熱源を用い、冷却システムを模擬した試験施設を建設する「大型試験施設（コールド施設）による方策」、及び「もんじゅ」を改造して冷却システムに革新技術を採用した機器を設置する「もんじゅを大幅に改造する方策」が考えられる。

a) 原子炉を建設・運転する方策（表-II-12）

この方策では、第 2 段階において、商用炉に採用するすべての革新技術から構成される出力 30～50 万 kWe 程度の革新技術実証のための原子炉を建設・運転し、炉心・燃料及びプラント機器の技術を総合的に実証する。これに続く第 3 段階では、出力 75～100 万 kWe 程度にスケールアップした実用化推進炉の建設・運転により、炉心及びプラント機器の大型化に対する技術を実証する。

b) 大型試験施設（コールド施設）による方策（表-II-13）

この方策では、第 2 段階において放射性物質を取り扱わない炉外の熱出力 30 万 kWt 程度の熱源を用いた大型試験施設（コールド施設）により、商用炉に採用する主なプラント機器の革新技術実証のための試験を実施する。炉心・燃料の性能実証は「もんじゅ」の燃料集合体サイズの照射試験により行う。これに続く第 3 段階では、出力 75 万 kWe 程度の実用化推進炉の建設・運転により、炉心・燃料及びプラント機器の技術を総合的に実証する。

c) 「もんじゅ」を大幅に改造する方策（表-II-14）

この方策では、第2段階において「もんじゅ」の1次及び2次系を改造して、商用炉に採用する主な革新技术を組み込んだ主要なプラント機器を設置し、これらの性能確認を行う。炉心・燃料の性能確認は「もんじゅ」の燃料集合体サイズの照射試験により行う。これに続く第3段階では、「大型試験施設（コールド施設）による方策」と同様に、出力75万kWe程度の実用化推進炉の建設・運転により、炉心・燃料及びプラント機器の技術を総合的に実証する。

各方策の実証スケールの設定については、前述のように商用炉に必要な革新技术の成立性を見通せる規模（数分の1）で実証を行うことを条件としている。上記の3つの方策の実証スケールを、商用炉との熱出力及び配管径の比で整理した結果を表-II-15に示す。革新技术実証のための試験装置の規模としては、より大きい方が望ましいが、プラント機器熱出力の商用炉比で1/3～1/6程度であり、スケールアップとしてはほぼ適切な範囲内にあると考えられる。

(b) 燃料サイクルシステム

第2段階における再処理の主要な革新技术の実証としては、第1段階におけるホット工学規模試験施設を用いた枢要プロセス試験などの結果を踏まえて、図-II-15に示すような実用化が見通せる規模の技術実証試験施設（ホット工学規模試験施設を改造）を用いて試験することが考えられる。この試験施設では、「もんじゅ」や「常陽」の使用済燃料を用いたホット工学規模試験を実施して、プロセスを連結した総合システムとしての性能を実証する。

燃料製造の主要な革新技术の実証試験施設では、再処理の技術実証試験施設から供給される低除染TRU燃料を用いたホット工学規模試験を実施して、年間数体の集合体を製造し、第2段階で運転する高速増殖炉を用いた照射試験に供する。

量産製造技術については、第2段階に運転されている高速増殖炉用の燃料を、六ヶ所再処理施設のMOX粉を原料に、既存設備を利用して製造することを通して実証することが考えられる。

第3段階においては、図-II-16に示すような実用化推進サイクル施設により、この段階で運転されている高速増殖炉の使用済燃料などを処理し、回収した再処理製品から実用化推進炉などへ低除染TRU燃料を供給することが考えられる。この施設の建設・運転により、燃料のリサイクルを実証する。

3.2 研究開発課題の整理

2015年頃以降の進め方に関する検討の結果、いずれのケースにおいても2015年頃までに技術体系の整備を計画通り行うことにより、2050年頃の高速増殖炉導入に繋げることは可能と考えられる。一方、2050年頃からの商業ベースでの導入に至るまでの研究開発計画については、2015年頃の高速増殖炉サイクルの実用化像の提示（技術体系整備）に対応して、国としての検討が行われる。したがって、第2段階及び第3段階の進め方については、今後、より具体化を

図るための検討が必要である。

第2段階の進め方については、2015年頃以降の研究開発を遅滞なく計画的に進めるためにフェーズⅢの早期に検討を行っておくことが重要であると考えられる。これらの2015年頃以降の高速増殖炉サイクルの段階的な検討を進める上での主要な課題を以下に示す。

(a) 各ステップにおける研究開発（高速増殖炉システム及び燃料サイクルシステム）の在り方
第2段階（革新技術実証）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、国際的な研究開発分担などの検討

(b) 技術体系整備以降の研究開発の役割分担及び技術維持

第2段階及び第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研究開発体制

謝 辞

本報告書には、以下に述べるように本研究に協力していただいたメーカ各社、研究機関、大学などの研究成果が含まれている。

(財)電力中央研究所には、原子力機構との間に研究協力協定を締結し、特に金属燃料を用いた「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概念」の技術的検討において、技術情報の提供を含め多大なご協力を頂いた。また、プラント設計・建設や研究開発経験を有するメーカ各社には、各種候補概念の設計検討や要素技術開発においてご協力を頂いた。さらに、国内外の研究機関や大学には革新的なアイデアの提案、要素技術開発などにご協力を頂いた。

また、本研究の実施にあたっては、原子力機構内に外部の専門家、有識者を交えた「FBR システム技術検討会」、「燃料システム技術検討会」及び「FBR サイクル総合評価技術検討会」を適宜開催し、研究の進捗状況について報告し、専門的、客観的な立場からコメントなどを頂いた。

さらに、研究開発課題評価委員会の高速炉・燃料サイクル課題評価委員会の各委員においては、2001年5月にフェーズⅠの研究成果とフェーズⅡの研究開発計画などの評価を、2004年7月には、フェーズⅡの中間評価として、これまでの研究成果と今後2年間の計画、並びにフェーズⅡ終了以降の研究開発の展開の基本的考え方について評価を頂いた。

これらの本研究の円滑な遂行にご協力いただいた方々に、心から謝意を表したい。