

新型炉部会セッション

新型炉の国際協力の現状と今後の研究開発課題（イノベーションの創出）

Current status of international cooperation in advanced reactor development and future R&D issues
(Innovation creation)

(2) 高速炉の今後の研究開発課題

(2) Future R&D issues in fast reactor development

*守田 幸路¹

¹九州大学

1. はじめに

ウラン資源の利用を大幅に拡大できる高速炉サイクルは、長期に亘りエネルギーを安定供給し、「資源の有効利用」（ウラン資源の利用率の拡大）、「環境負荷低減」（放射性廃棄物の減容と潜在的有害度の低減）を達成できる可能性がある。2018年12月に原子力関係閣僚会議にて決定された高速炉開発に関する「戦略ロードマップ」では、ウラン需給の現状等の政策環境・社会情勢を勘案すれば、高速炉の本格的利用が期待されるタイミングは21世紀後半のいずれかとなる可能性があるとされ、将来の不確実性に関するリスク、技術や経験の段階的な蓄積・発展の必要性を勘案しつつ、21世紀半ば頃の適切なタイミングにおいて高速炉が運転開始されることが期待されるとされた。また、原子力を取り巻く社会環境が大きく変化していることを踏まえると、高い安全性を確保した上で、更なるコスト低減を志向した開発を行い、その際に、将来への不確実性にしなやかに対応できるアプローチが重要とされた。

また、日本原子力研究開発機構や大学の活動を中心とした原子力分野の研究開発・人材育成と、これらを支える研究開発基盤の維持・発展を図っていくことが必要とされた。また、原子力機構がこれまでに蓄積してきた高速炉開発を中心とする知見について、広く民間との共有を図るといった視点の下、民間が取り組む多様な技術開発に対応できるニーズ対応型の研究基盤を維持していくことが必要とされた。さらに、原子力機構は、国内外の最先端の技術を取り入れつつ設計手法や安全基準等の我が国の技術を国際標準化する取組を実施することも必要とされた。

高速炉の開発は中長期に及ぶが、今後十年程度の研究開発の進め方として、①競争を促し、様々なアイデアを試す、②絞込み、支援を重点化、③今後の開発課題及び工程について検討するという3ステップで行うとされている。開発に当たっては、国際協力を活用しつつ、実用化のための技術基盤の確立とイノベーションの促進に取り組んでいくとされた。

上述の「戦略ロードマップ」を踏まえて、高速炉開発のアプローチと今後の研究開発課題について述べる。

2. 高速炉開発のアプローチ

2-1. 多様な炉概念と燃料形態

高速炉にはナトリウム冷却高速炉の他に、重金属冷却高速炉、ガス冷却高速炉、熔融塩冷却高速炉、超臨界圧冷却高速炉などの様々な炉型と、使用する燃料も酸化物燃料、金属燃料など、様々な仕様・組合せが考えられ、それぞれに技術課題が存在する。その中でもナトリウム冷却高速炉と酸化物燃料の組合せが燃料サイクル分野を含めて国際的にも実績がある。我が国では、1999年から「FBR サイクル実用化戦略調査研究（FS）」が行われ、多様な炉概念と燃料形態に対する高速炉サイクルが検討された。2006年には、開発目標への適合性と技術実現性の2つの視点から比較検討され、ナトリウム冷却酸化物燃料高速炉が主概念、ナトリウム冷却金属燃料高速炉が副概念として選定された。昨今では、米国、カナダ等を中心に、民間の創意工夫の中で多様な炉型が検討されている。

高速炉は実用化されるまでの開発期間が長期に亘ることから、現時点で未成熟な概念の開発が進展する可能性がある。この不確実さに備えるためには、国内外の多様な研究開発動向を注視し、様々な炉概念及び革

新技術に関するイノベーション研究の状況を把握するとともに、それらの中から将来の高速炉サイクルに寄与する可能性の認められる技術を取り込んでいく柔軟性を持つことが重要である。特に、大学や研究機関においては、実用化開発における主概念や技術の制約に囚われず、より幅の広い多様な炉型や革新技术について研究し、原子力研究の裾野を拡大していくことが望まれる。その際、学会のみならず産業界との意見交流の場を設け、研究活動の活性化を図るとともに、高速炉サイクルの研究開発を担う人材育成も図っていくことが重要である。日本原子力研究開発機構は、ナトリウム冷却炉を中心とした試験施設及び設計評価手法を有しているが、他の炉型への応用も可能なものも存在しており、将来の社会環境の変化を踏まえたより柔軟なアプローチにも対応していく必要がある。

2-2. 技術の絞込みに必要な観点

21世紀半ば頃の適切なタイミングにおいて高速炉が運転開始されるためには、研究開発費の制約、技術成熟度、建設資金の調達等の観点から現実的なスケールの高速炉を想定する必要がある。そのとき、要求される高速炉は、第4世代炉の開発目標を満たす必要がある。すなわち、持続可能性、経済性、安全性及び信頼性、核不拡散抵抗性と核物質防護と整合性を考慮する必要がある。また、昨今の状況変化から、軽水炉との共生やエネルギー供給システムとの整合性の観点から機動性が求められている。このような観点で、今後の高速炉開発の技術の絞込みを行い、研究開発課題も整理していく必要がある。

3. 今後の研究開発課題

今後5年間は多様な炉概念を検討して技術間で競争していくことになる。しかしながら、多様な炉概念は設計検討中であり、研究開発課題が整理されていない状況である。5年後に絞り込む際には研究開発課題も合わせて整理しておくべきである。

現状、技術成熟度の高いナトリウム冷却高速炉は高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCT）において研究開発課題を整理している（JAEA-Evaluation 2011-003 参照）。そこで検討された高速炉概念は多数の革新技术を取り入れており、当時、既にイノベーションを創出していたとも言える。

ここでは、2011年に整理されたものをベースとして、昨今の研究開発状況等を考慮して、研究開発課題の一部を整理する。特に、日本が単独開発してきたループ型炉ではなく、世界の趨勢となっているタンク型炉における課題についても考慮した。

3-1. 安全関連技術

制御棒長寿命化、受動的炉停止系、自然循環崩壊熱除去系、格納容器、再臨界回避技術、コアキャッチャー、免震システムが挙げられる。

我が国では、受動的炉停止系として自己作動型炉停止系を数十年に亘り開発してきており、実験炉「常陽」で機能確認まで完了している。これまで温度感知合金までの温度応答遅れを熱流動解析コードで評価しており、その妥当性を確認するための試験が必要である。

再臨界回避技術については、カザフスタンとの共同研究 EAGLE プロジェクトにおいて燃料流出挙動データを蓄積しており、シビアアクシデント解析コードの検証も進められているところである。今後、炭化ホウ素とステンレス鋼との共晶反応や燃料ピンの破損挙動等に関する試験データ及びモデル開発が引き続き必要である。

コアキャッチャーに至るまでの燃料再配置挙動に関するデータは限られており、設計検討と合わせてタンク型炉特有の下部プレナムにおける燃料-冷却材相互作用等の熱流動現象を含む再配置挙動データとモデル化、デブリベッド臨界性及び冷却性の評価に必要な試験及び解析コードの検証を行う必要がある。また、酸化燃料とは異なる金属燃料についてもデータは限られており、今後精力的に取り組んでいく研究分野である。東京電力福島第一発電所事故を受けて、炉心熔融事故対策は極めて重要であり、着実に研究開発を進め、我が国で開発したイノベーション技術の国際展開を図るべきである。

原子炉容器径が大きくなるタンク型炉はより強固な免震システムを必要とする。水平免震技術が主流であ

るが、大型タンク型炉では上下動を抑制するため3次元免震システムを開発する必要があり、免震技術のイノベーションといえる。

安全評価上重要な課題としては、実用発電炉で規制要求されているリスク評価であり、高速炉の特徴に合わせて手法開発をする必要がある。また、放射性物質移行挙動についても試験技術の継承が懸念される分野であり、試験及び解析技術を維持し、設計及びリスク評価に活かしていく取組が必要である。

3-2. ナトリウム対策、運転保守技術

ナトリウム漏洩対策として漏洩検知の高度化、蒸気発生器におけるナトリウム-水反応対策として微小リーク検知性能向上、機構論的ナトリウム-水反応評価、ナトリウム中目視検査装置、運転・保全・補修技術などが挙げられる。

我が国では、1995年にナトリウム漏洩事故を経験しており、その社会的影響は大きい。ナトリウムのリスクを低減することは社会への安心感を与えることができる。ナトリウムの化学反応を抑制できるイノベーションとして、ナノテクノロジーを駆使したナノ粒子分散型ナトリウムが期待できる。実際のプラントで使用するためには比較的大規模な試験が必要であるが、実用化に近い革新技術である。

諸外国では、蒸気発生器に代えて、超臨界炭酸ガスによる動力変換システムを検討しているところもある。技術成熟度は高くないが、長期にわたる開発の中では期待できる技術である。

運転保守技術には、「常陽」「もんじゅ」の知見が活用される。廃止措置の決まった「もんじゅ」は十分に知識データベース整備に活用して役目を果たすようにしていく必要がある。また、現実のプラントでの運転保守経験は将来のプラント開発に役立つことから貴重である。

3-3. 炉心燃料

内部ダクト付き燃料集合体製造加工技術、安全性向上・高燃焼度燃料設計手法開発に大きな課題は顕在化しておらず、今後、一部未実施の試験によるデータ取得により解決できるとの見通しである。高燃焼度燃料、ODS鋼被覆管、マイナーアクチニド含有燃料、様々な設計手法の高度化については進展が期待できるものがあるが、照射試験が必要なものについて長期計画が必要になってくる。

仏ASTRIDでは、ナトリウムプレナム付き軸方向非均質燃料炉心であったが、今後の様々な炉心設計に対する設計手法を整備しておくべきである。

3-4. 原子炉構造

コンパクト原子炉容器、大口径冷却系配管、回転プラグ簡素化、新型炉上部機構、炉心下部構造（炉心耐震、流量配分等）、新型燃料交換機など、一部追加の開発が必要だが、システムとしての成立性は確認されている。耐震性を向上されたタンク型炉の設計検討とあわせて、その設計の妥当性を確認する試験や解析手法の高度化が必要とされる。

3-5. 冷却系、その他

FaCTでは、ポンプ組込み型中間熱交換器と高信頼性蒸気発生器（直管型二重伝熱管）をイノベーションと位置づけて開発を進めてきた。しかしながら、課題が顕在化したため開発リスクが高く、開発費が大きくなるとの判断から、今後の開発は継続しない方向である。このようにイノベーションにはリスクがあることを肝に銘じておくべきである。

ポンプ、中間熱交換器、蒸気発生器、燃料取扱設備、電気系装設備は、設計に応じて抽出される課題に対して取り組むものであり、現在は特に大きな課題は生じていない。我が国は、タンク型炉の炉内配管流動評価は経験がないことから、重要な課題である。

3-6. プラント全体を俯瞰した設計手法

今後の高速炉開発は、安全性や経済性等の要求が高くなり、設計成立範囲が小さくなるため、機器別に設

計していくのではなく、プラント全体を俯瞰した合理的な設計成立解を導く設計手法のイノベーションが必要である。多様な炉概念の性能評価をしていくためには、設計過程の大幅な合理化が求められる。マルチフィジックスシミュレーション技術を駆使して精緻なプラント設計により開発過程の合理化を図れば、モックアップ試験による総合試験等を削減して開発コストを低減できる。昨今の人工知能の技術を応用すれば、先行炉や海外炉などこれまでの知見を整備した知識ベースと有機的に連携することで、最適設計を探索できる。これをプラントの設計段階から廃止措置段階まで拡張すれば、運転や廃止計画においても役立てることが可能になる。

また、現在の原子力プラントのコスト増大の一因に、営業運転前に様々な問題が発覚していることが挙げられる。そこで、建設前の仮想プラントにおいて営業運転前に問題解決をしておくことが必要である。

原子力への信頼感を取り戻すためには安全性向上技術開発を継続的に取り組む必要がある。特に、高速炉特有技術課題である、再臨界事故防止、炉心熔融事故防止、冷却材の化学反応等の特有事故の抑止が将来の高速炉開発には必要であり、イノベーションが期待できる分野である。また、多様な概念に適用可能な技術開発も必要である。

3-7.安全設計方針、規格基準

高速炉の安全設計方針として、第4世代原子力フォーラムにおいて、ナトリウム冷却炉の安全設計クライテリアとガイドラインが整備されており、現在、IAEAや各国規制当局と議論がなされている状況である。他の炉概念においても、必要な設計要求をまとめる活動を実施中である。

高速炉の規格基準については、日本機械学会から設計・建設規格が発刊されているほか、維持規格等の体系整備が進められている状況であるが、今後は、リスク情報を用いた安全目標と技術規格のより密接な連携により、多様な高速炉概念に適用可能な規格・基準類の整備が必要である。

4. おわりに

2018年12月に決定された「戦略ロードマップ」を踏まえて、これまでの開発状況を勘案して、高速炉開発のアプローチと今後の研究開発課題を整理した。21世紀半ば頃の高速炉建設開始を考えれば、早期に研究開発課題を明確にして、課題解決に尽力するとともに、技術者の維持やサプライチェーンの維持を図る必要がある。そのためには、国、電気事業者、メーカー、研究機関が一体感をもって取り組む必要がある。特に、大学との共同研究を促進して、21世紀半ば頃に活躍が期待される学生や若手研究者に高速炉開発の魅力を訴えていく必要がある。欧米も同様の状況であり、国際協力を有効に活用するとともに、我が国が国際標準化に主導権を発揮することを期待する。

* Koji Morita¹

¹ Kyushu Univ.