

インドにおける高速炉計画の状況

インディラガンジー原子力研究センター(インド カルパッカム)

P. チェラパンディ、S. C. チェタル、バルデブ・ラジ

化石燃料の燃焼による環境への影響や石油価格の高騰の影響の激しさの観点から、インドにおいては、原子力の導入を精力的に追い求めている。いわゆる 3 段階の原子力計画は、第 1 段階においては限られたウラン資源(約 10 万トン)を利用する加圧水型重水炉(PHWR)、第 2 段階においてはウラン資源の利用率を 80%に拡大する高速増殖炉(FBR)、そして、第 3 段階においては莫大なトリウム資源(世界第 2 位)の利用との 3 段階で構成される。PHWR は、技術的に成熟しており、大部分を国産化している。2012 年 2 月現在、20 基の原子炉が 478 万 kW の容量を有している。2020 年までには 2000 万 kW を保有し、2032 年までには最大で 4000 万 kW の軽水炉を輸入することに加え 6300 万 kW を保有することが予想されている。

第 2 段階は、熱出力 4 万 kW/電気出力 1 万 3500kW の高速増殖実験炉(FBTR)を建設することにより開始され、FBTR は、カルパッカムにあるインディラガンジー原子力研究センター(IGCAR)において 1985 年から運転されている。大型の発電所の建設や運転に関する技術的・経済的な実現性を実証するため、電気出力 50 万 kW の高速増殖原型炉(PFBR)が 2003 年 10 月からに計画が開始され、現在建設中である。政府系の会社であるバービニ社が、インドの高速炉プロジェクトを実施するために PFBR の開始とともに設立された。バービニ社は、PFBR と同様の原子炉を、さらに 6 基建設し、2023 年までに運転開始することを計画している。続いて、原子力比率の目標(2050 年までに約 25%)を実現するため、電気出力 100 万 kW の金属燃料高速炉を順次建設していく。閉じた核燃料サイクルを実現するため、燃料の加工・組立、再処理、及び廃棄物管理を含めて PFBR からの使用済燃料をリサイクルする高速炉燃料サイクル施設(FRFCF)が併設される。FRFCF は、カルパッカムの敷地内に電気出力 50 万 kW の高速増殖炉をさらに 2 基を増設した場合にも将来拡張できるように計画されている。IGCAR は、1971 年から、高速増殖炉と関連する核燃料サイクルに関する科学技術の開発に邁進しており、設計・研究開発・製造技術・及び規制当局から許可を受ける責任を負っている。

FBTR は、プルトニウムを多く含んだ炭化物燃料という独自の燃料を国産化し、16 万 5000MW 日/トンを超えて燃焼度を達成した。15 万 5000MW 日/トンの燃焼度で取り出した燃料の再処理を成功した。プルトニウムを多く含んだ高燃焼度の炭化物燃料の再処理は、世界で初めて行われたものである。FBTR はループ型の原子炉であったが、PFBR は、1 次系が 2 系統、1 系統毎に 4 基の蒸気発生器(SG)を有する 2 次系 2 系統を有するプール型(タンク型)の原子炉である。炉心において発生した核反応の熱は、670K の原子炉容器低温プールから 820K の原子炉容器高温プールへのナトリウムの循環によって除去される。高温プールから 4 基の中間熱交換器(IHX)へ熱を移送したナトリウムは、低温プールのナトリウムと混合される。IHX の熱は、2 次系を流れるナトリウムによって 8 基の SG に移送される。SG において発生する蒸気は、タービン発電機に供給される。最近では、原子炉構成機器が製造されて据付に成功し、残るシステムが据付の段階にある。PFBR は、2012 年末か 2013 年の早期に運転開始する予定である。

PFBR の設計は、以下の多くの課題に挑戦している。

- 高い照射量による材料の損傷、
- ナトリウム漏えいや蒸気発生器におけるナトリウム-水反応、
- 40 年間に及ぶ長期の信頼性ある運転のための高温構造設計、
- ナトリウムとカバーガス(アルゴンガス)中の動的機器や回転機器の設計、
- サーマルストライピングや温度成層化の問題を解決するための原子炉容器内の複合的な熱流動解析、
- 冷却材や炉心におけるガスの混入、
- 上部遮へい体貫通部でのナトリウムエアロゾルの析出、
- 種々の流体振動のメカニズム
- 同じ地盤に建てられた連結している建物の地震に対する挙動、
- 随伴する不安定メカニズムを含む薄肉容器の耐震設計
- ポンプ・制御棒駆動機構及びナトリウム中における炉内構造物の供用期間中検査、
- シビアアクシデント時における 1 次系の閉じ込めに関する構造健全性。

これらの他に、

- 2 次系のコールドトラップの再生技術、

● 1次系機器、ナトリウム検出器、その他の機器の除染に関する技術開発、
といった課題もある。これらに対して必要な研究開発活動が、IGCAR やインド国内のその他の研究開発機関・大学において実施されている。

PFBR に関する規制当局の許可は、三段階(組織内安全委員会、プロジェクト設計安全委員会、プラント設計安全審査のための最高委員会)の審査を経て得られた。審査を支援するため、いくつかの専門家グループが設置された。PFBR の安全基準は、関連する IAEA の水炉に関する安全指針(NS-R1)に照らして確認された。他の高速増殖炉と熱中性子炉で発生した影響のある事象や事故が厳しく分析され、そのフィードバックが取り入れられた。安全性とは別に、この種類の最初のプロジェクトであるとの観点から、製造や据付も含められた。審査の経験に基づき、将来の高速増殖炉の安全基準が改訂され、現在、規制者によって審査中である。

PFBR に続く将来の高速炉のために、研究開発の体系化されたロードマップが実施されている。経済性の向上のためには、

- ツインユニット概念の採用、
- 遮蔽の最適化、
- 原子炉容器低温プール側の1次系機器や配管の材料としてSUS316LN材に代えてSUS304LNステンレス鋼材の使用、
- 伝熱管の長さを30mに伸長することにより、1系統あたり3基のSGとすること(PBFRにおいては、伝熱管の長さが23mであり、1系統あたり4基のSGとなっている。)
- 85%の設備利用率、
- 60年の設計寿命、
- 建設期間(5年間)の短縮、
- 燃焼度の向上(段階的に20万MW日/トン以上を達成)

といった枢要事項がある。

大幅な改良が原子炉構造の設計に導入される。

安全性の分野においては、

- 受動的な原子炉停止機構、
- 炉心崩壊事故を防止するための崩壊熱除去に関する能動的システムと受動的システムの組み合わせ、
- ナトリウム火災に効果的に対応するための革新的・画期的な技術の適用

が研究されている。

以上総括すると、インドは、高速炉及び核燃料サイクルの技術において世界の先導国になっていく構想を有している。FBTR の運転の経験、PFBR の設計・建設の経験、そして、将来の原子炉が競争力のある経済性能と安全性の強化を達成するために実施されている十分に計画された活動に基づく研究開発成果が、この構想の達成を確信させる。インドの状況を考えると少なくとも2050年までは高速炉が必要であることを強調する。2050年以降は、再生可能エネルギー、特に、分散型エネルギー資源、トリウムを基軸とした技術、核融合技術、経済的で持続可能な水素を基軸としたシステム等のような潜在的な可能性を有する選択肢が台頭してくるかもしれない。高速炉による長期的なエネルギーの持続性に関する課題への挑戦に対応するための、関連する科学的なブレークスルー、有能な人材の成長、国内的・国際的な協力、そして、革新的技術の採用が、成功への道である。