

核不拡散・保障措置・核セキュリティ連絡会セッション

試験研究炉の高濃縮ウラン低減と核不拡散

Reduction of Highly Enriched Uranium and Nuclear Nonproliferation for Research Reactors

(2) 試験研究炉の低濃縮化に関する取り組みと国際動向

(2) Recent Efforts and International Trends in Reduction of Uranium Enrichment for Research Reactors

*宇根崎 博信¹¹ 京都大学

1. はじめに

民間部門における核不拡散／核セキュリティ措置の強化としては、規制対応を通じた保障措置や核物質防護措置の強化が継続して進められており、関連した技術開発も活発化している。その一方で、核不拡散や核セキュリティ上のリスクそのものを低減するための措置として、試験研究炉の高濃縮ウラン燃料の撤去と、低濃縮化が実施されている。試験研究炉の高濃縮ウラン燃料の撤去は、我が国の核不拡散／核セキュリティにとっても定量的かつ具体的な国際的な貢献であり、また、試験研究炉の低濃縮化という炉工学的な観点との繋がりも強い。この発表では、試験研究炉の低濃縮化に関する取り組みと国際動向について、試験研究炉と高濃縮ウラン燃料のつながり、低濃縮化にかかる技術的な論点と、近年における国際動向について概説する。

2. 試験研究炉の低濃縮化：技術的側面

2-1. 試験研究炉と高濃縮ウラン燃料

試験研究炉は文字通り「試験、研究のための原子炉」であり、炉心の特性として、「如何に大量の中性子を安定的に供給できるか」を主眼とした設計が行われている、というのが特徴である。このために、極めて高い出力密度を持った、可能な限り小型の炉心を実現し、炉心の内外で高中性子束場を提供する、という設計が行われている。このような extreme な炉心設計要求を満足するために、高濃縮ウラン（以下「HEU」：大多数は濃縮度 93%）が利用されてきた。

試験研究用原子炉向け HEU は 1960 年代から米国、ソ連が各国に供給し、原子力平和利用と学術研究に供せられていたところ、1980 年代に入り、世界各国に分散された HEU のセキュリティ上の懸念が問題となってきた。HEU は、燃焼した後（U-235 で 25%～70%程度まで）の使用済燃料も「高濃縮ウラン」のままであることから、新燃料のみならず、各国で蓄積された HEU 使用済燃料も核セキュリティ上のリスクが大きい。また、HEU を燃料として用いる試験研究炉を運転するためには、継続した HEU 燃料の供給が必要であり、燃料製造工程を含むサプライチェーン全体で HEU が存在することになる。2017 年のレポートによると、民間部門における世界の HEU 存在量はおよそ 61 トンであり、軍事部門における在庫量と比べると少ないものの、核不拡散、核セキュリティの面で大きなリスクが存在することになる。このことから、米国は、まずは世界中に拡散された試験研究炉用 HEU 燃料を回収し、それと共に、試験研究炉の燃料を濃縮度 20%未満の低濃縮ウラン（以下「LEU」という。）に転換していきたい、という方針を定め、米国 DOE が Foreign Research Reactor Spent Nuclear Fuel (FRR SNF) Acceptance Program というプログラムのもと、条件付きで海外からの HEU 回収を実施してきた。このプログラムは、当初は 1996 年～2006 年の 10 年間（正確には 2006 年 5 月までに照射された使用済燃料を 2009 年 5 月まで引き取り）であったところ、2004 年に期限が延長されて 2016 年まで（引き取り期限は 2019 年）となった（注：我が国は例外的措置としてさらに 10 年間の延長が認められている）。なお、このプログラムに沿った場合、運転継続のためには低濃縮化と HEU 撤去の双方が必要であるが、LEU 化のための運転ライセンス取得が困難な場合、HEU 撤去により運転を休止せざるを得ないケースが生じ、国際的に大きな問題としてユーザー側から米国 DOE 側へ問題提起がなされたという事実もある。

2-2. 試験研究炉の低濃縮化

HEU 燃料の使用を前提として設計された試験研究炉を低濃縮化する際には、炉心設計上様々な制約が生じ

る。LEU 燃料内に (HEU 燃料と) 同じ量の U-235 を装荷したとしても、U-238 量も増えるため、臨界性は劣化する (U-238 増による中性子吸収増を相殺するために U-235 量を追加する必要あり)。このため、同じ出力の場合は炉心の中性子束が一般的に低下する。また、U-235 と U-238 が増加するため、中性子スペクトルも変化する。一般論として、低濃縮化によって炉心の中性子利用特性が変化 (劣化) することになるが、これは特に高中性子束試験研究炉にとっては致命的なインパクトであり、炉心設計の変更、出力上昇、試験研究設備の設計変更等が必要となる場合がある。このため、LEU 燃料そのものの設計が極めて重要なポイントとなり、試験研究炉の低濃縮化に関する技術開発、国際協力の推進とステークホルダー間の調整を目的として、1978 年に DOE により RERTR (Reduced Enrichment of Research and Test Reactor) プログラムが立ち上げられている。この RERTR プログラムを通じて、現在主流となっているウランシリサイド燃料の実用化と、ウランモリブデン燃料の開発をはじめとした低濃縮化に関する様々な技術開発が進められている。

3. 国際動向

試験研究炉の低濃縮化は先述した FRRSNF Acceptance と RERTR の両プログラムの政策的な流れと同調しており、90 年代後半から 2010 年代の半ばにかけて世界各国の中小型試験研究炉の低濃縮化と HEU 燃料の撤去が進められた。また、2014 年ごろからは、従前の試験研究炉に加えて、臨界集合体や実験用核燃料物質なども HEU 撤去の対象となり、世界的な核セキュリティリスクの軽減に対して一定の成果を挙げたものと考えられる。我が国としても、RERTR プログラムに沿った活動として JRR-3, JRR-4, JMTR, KUR の HEU 使用済燃料、FCA の HEU 及び Pu 燃料、KUCA の HEU 燃料の米国への撤去が成功裡に実現しており、国際的にも高い評価を得ているところである。また、2022 年 9 月には近畿大学研究用原子炉 UTR-KINKI の HEU 撤去と低濃縮化が日米政府間で合意されている。

一方で、超高中性子束の供給や中性子高度利用のための特別な設計を持つハイパフォーマンス炉が米国に 5 基 (ATR, NIST 炉, MITR, MURR, HIFR)、欧州に 2 基 (BR-2, FRM-II) 存在するが、これらの炉については、実用化されている LEU 燃料の主流であるウランシリサイド燃料では炉心のパフォーマンスが劣化し、存在意義がなくなる、という点から低濃縮化が未了である。これらの炉には高出力炉も含まれており、燃料の消費量も多いため、米国にある ATR, HIFR, MURR の 3 基で世界の年間 HEU 供給量の約半分を占めている。これらハイパフォーマンス試験研究炉が低濃縮化されない限り、民間部門において相当量の HEU のサプライチェーンを維持する必要があることから、現在、ウランモリブデン合金を用いた高ウラン密度燃料の開発が継続されているところ、残念ながらその実用化の目処は明確には立っていない。

この点を含めて、試験研究炉の低濃縮化については、米国と欧州ハイパフォーマンス試験研究炉の低濃縮化の状況に加えて、米国 DOE の PRO-X プロジェクトとの関連性、RI 製造 (特に医療用 RI) 及びサプライチェーンの確保、SMR をはじめとする次世代型発電炉における HALEU 利用との技術的つながりなど、様々な観点から引き続き注視していく必要がある。

*Hironobu Uneski¹

¹Kyoto University