

(2) 奨励賞

— keV 領域の ^{235}U 捕獲断面積の再評価のための ウラン燃料を用いた ナトリウムボイド反応度に関する FCA 実験及び解析 —

日本原子力研究開発機構

原子力基礎工学研究部門

炉物理研究グループ

福島 昌宏

fukushima.masahiro@jaea.go.jp

1. はじめに

^{235}U は原子力エネルギーの利用にとって最も重要な核種であり、その断面積の正確な評価が求められる。近年、ロシアの臨界実験装置 BFS 実験により取得されたウラン燃料を用いた高速炉心におけるナトリウムボイド反応度の積分データに対して、JENDL-3.3 の予測精度が JENDL-3.2 に比べて大幅に悪化することが報告された[1]。これは、JENDL-3.3 において、ENDF/B-VI.5 の ^{235}U 分離共鳴パラメータが採用されており、1 keV 付近の捕獲断面積の増加が原因であり、この共鳴パラメータが採用されている米国の ENDF/B-VII.0 や欧州の JEFF-3.1 といった世界の主要な核データライブラリーでも同様な問題が起こることが指摘された。そこで、この問題を国際協力によって解決するために、核データ評価国際協力ワーキングパーティ (WPEC: Working Party on International Nuclear Data Evaluation Cooperation) におけるサブグループ 29 (SG29) が提案され[2]、keV 領域の ^{235}U 捕獲断面積を再評価する活動が開始された。再評価活動の一環として、 ^{235}U 捕獲断面積を検証するための独立した新たな積分データを取得することが要請された。そこで、この要請に応えるために、日本原子力研究開発機構の高速炉臨界実験装置 (FCA) を用いて、keV 領域の ^{235}U 捕獲断面積に大きな感度を有するナトリウムボイド反応度特性実験を実施し、同検証に効果的な積分データを新たに取得した。また、同積分実験をベンチマーク計算問題として整理し、主要な核データライブラリーによる解析比較を行うと共に、断面積に対する感度解析を実施し、keV 領域の ^{235}U 捕獲断面積の評価に問題があることを明らかにした[3]。本結果について紹介させて頂く。

2. 実験

本実験計画の立案にあたっては、試験対象であるナトリウムボイド反応度に対して keV 領域の ^{235}U 捕獲断面積が大きな感度を有するように炉心組成、形状及び試験領域の範囲等をサーベイし、実験体系を決定した。実験体系の炉心断面図を図 1 及び 2 に示す。炉心領域 (CORE) は濃縮ウラン金属及びグラファイトから構成され、炉心高さは 60.96 cm となっている。また、炉心の平均濃縮度は約 30% となっている。その中央部に濃縮ウラン金属及びナトリウムから構成される試験領域 (Test) を設けた。試験領域のナトリウムをボイド化 (ナトリウムが充填されているステンレス缶から空のステンレス缶へ置換) することによりナトリウムボイド反応度測定を行った。試験領域の等価半径は 9.34 cm と固定して、炉心高さ ($Z_1 \times 2$) を 10.16 cm (Case-1)、30.48 cm (Case-2) 及び 30.48 cm (Case-3) と変化させた 3 ケースについて試験を実施した。このとき、各ケースにおいて、臨界調整のため炉心等価半径 (r_c) は 31.30~31.45 cm と変化させた。Case-1 及び Case-2 のナトリウムボイド反応度は、校正済みの制御棒を用いて摂動前後の臨界位置から評価した。一方、比較的反応度の絶対値が大きい Case-3 に対しては、中性子源増倍法により測定を実施した。これらの測定方法によるナトリウムボイド反応度に対する実験誤差はいずれも数%であり、核データ間の違いによる計算結果の差異に比べて十分に小さい。

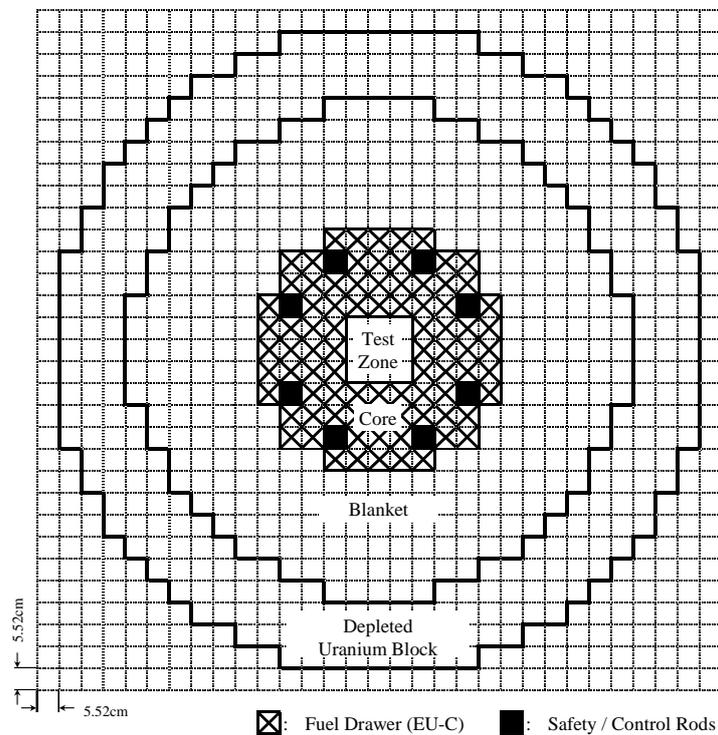


図 1 実験体系の XY 断面図

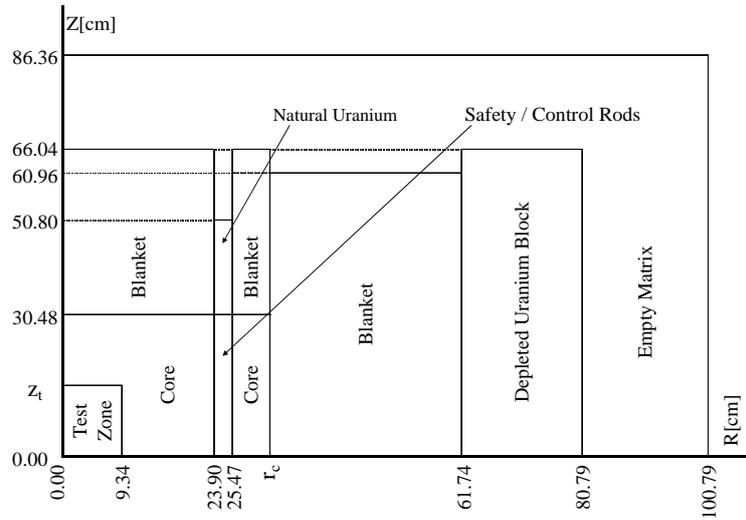


図2 実験体系のRZ断面図

3. 実験解析

実験解析は、連続エネルギーモンテカルロコードMVP[4]を用いて、実験条件を詳細にモデル化して行った。ナトリウムを装荷した体系（摂動前）及びボイド化した体系（摂動後）に対して、それぞれ実効増倍率を計算し、その差からナトリウムボイド反応度を評価した。各実効増倍率において、20億ヒストリーとして計算を行った。また、核データとして、JENDL-3.2、-3.3、-4.0、ENDF/B-VII.0及びJEFF-3.1を用いた。解析値と実験値の比（C/E値）を図3に示す。図により、いずれのケースにおいてもJENDL-3.3、

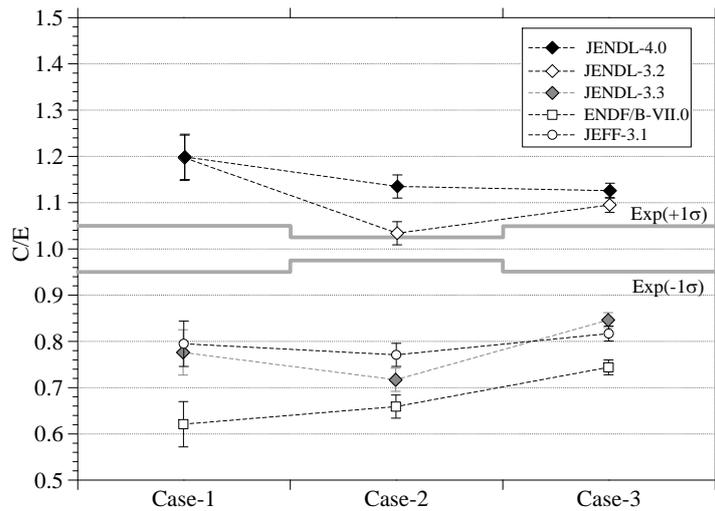


図3 解析値と実験値の比較（C/E値）

ENDF/B-VII.0 及び JEFF-3.1 の C/E 値は、JENDL-3.2、-4.0 に比べて小さいことが確認された。本結果は、BFS で行われたウラン燃料を用いた高速炉心におけるナトリウムボイド反応度の予測と共通の傾向を示す。なお、決定論的手法を用いたベンチマーク計算も併せて実施しており、モンテカルロ計算と同様な傾向を示すことを確認した。その詳細については、文献[3]を参考されたい。

4. 感度解析

主要核データ間の C/E 値の差異の原因について感度解析により調査を行った。感度係数は、JENDL-4.0 をベースにして、一般化摂動理論に基づく感度解析コード SAGEP コード[5]により求めた。ナトリウムボイド反応度に対する ^{235}U 捕獲断面積の感度係数を図 4 に示す。同図により、いずれのケースにおいて、数 keV 付近の ^{235}U 捕獲断面積に高い感度があることが分かる。図 5 は、Case-2 において、核データを JENDL-4.0 から JENDL-3.2、-3.3、ENDF/B-VII.0 及び JEFF-3.1 へ変更した際の ^{235}U 捕獲断面積の差に対して、 ^{235}U 捕獲断面積の感度係数に乗じて算出した反応度変化量のエネルギー毎の寄与を示す。同図により、JENDL-3.3、ENDF/B-VII.0 及び JEFF-3.1 では、反応度変化量が、keV 領域の断面積の差異に起因していることが確認された。また、反応度変化に対する主要核種・反応毎の寄与を図 6 に示す。同図により、本積分データは ^{235}U 捕獲断面積の寄与が大きく、同断面積の検証に有効であることが分かる。

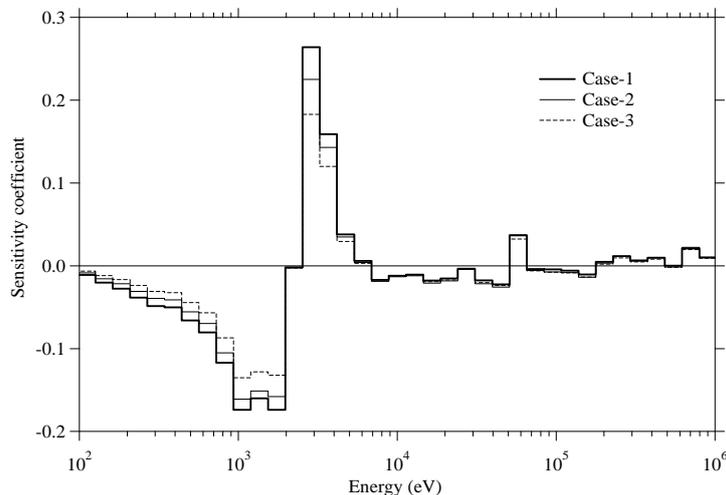


図 4 ナトリウムボイド反応度に対する ^{235}U 捕獲断面積の感度係数

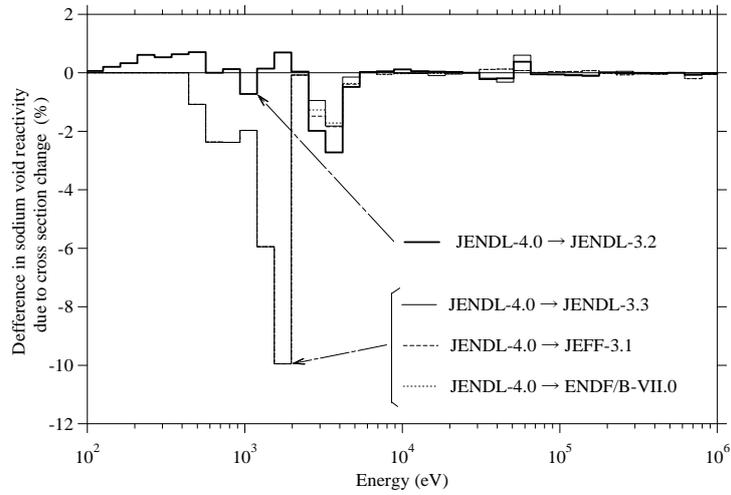


図5 ^{235}U 捕獲断面積の核データを JENDL-4.0 から変更した際の反応度変化量

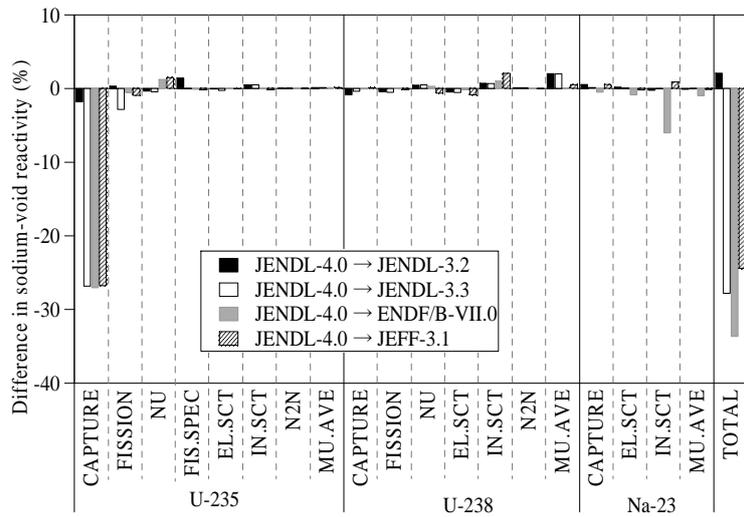


図6 主要核種・反応毎の反応度変化に対する寄与

5. まとめ

以上により、keV 領域の ^{235}U 捕獲断面積の評価に問題があることが国際的に認知され、今回 FCA での新規に実施した試験及び過去の BFS での試験で得られた積分データに対する信頼性を向上させるとともに、 ^{235}U 捕獲断面積の keV 領域の再評価の検証データとしても活用できることを示した。今回 JENDL-4.0 におけるベンチマーク結果が、若干過大評価になっているが、これについては今後の核データ評価において検討されることを期待したい。

謝辞

本報告を作成するにあたり、数多くの貴重な助言及びご協力を頂いた日本原子力研究開発機構の炉物理研究グループのメンバーに深く感謝いたします。また、実験データを取得するにあたり、FCA スタッフの皆様には、実験に伴う運転及び日々のメンテナンスに対して、この場にて深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 羽様 平、核データニュース No.81,24(2005)
- [2] 岩本 修、核データニュース No.97,24(2010)
- [3] M. Fukushima, Y. Kitamura, T. Kugo, T. Yamane, M. Andoh, G. Chiba, M. Ishikawa and S. Okajima, “Benchmark Calculations of Sodium-Void Experiments with Uranium Fuels at the Fast Critical Assembly FCA,” Progress in Nuclear Science and Technology, (2011) accepted
- [4] Y. Nagaya, K. Okumura, T. Mori et al., “MVP/GMVP II: General purpose Monte Carlo codes for neutron and photon transport calculations based on continuous energy and multigroup methods,” JAERI 1348, Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) (2005).
- [5] A. Hara, T. Takeda, Y. Kikuchi, SAGEP: Two-dimensional sensitivity analysis code based on generalized perturbation theory, JAERI-M 84-027, Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) (1984), [in Japanese].