核データニュース, No.132 (2022)

炉物理部会,核データ部会,「シグマ」調査専門委員会合同セッション 「JENDL-5 の完成と数値解析への適用の展望」

(4) 高速炉体系における JENDL-5の積分ベンチマーク解析

日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門 高速炉サイクル研究開発センター 横山 賢治 yokoyama.kenji09@jaea.go.jp 谷中 裕 <u>taninaka.hiroshi@jaea.go.jp</u>

1. はじめに

企画セッションの報告では、JENDL-4.0[1] と JENDL-5[2] の高速炉の積分実験ベンチマー クの結果(解析値と実験値の比:C/E 値)を示して、両者の C/E 値の違いがどのような核種・ 反応・エネルギーの違いによって生じたのかを感度解析の結果を使って紹介した。企画セッ ションでの主な報告内容は予稿[3]に記載したため、報告内容をそのまま紹介すると予稿とほ とんど同じになってしまう。ここでは JENDL-4.0 と JENDL-5 の C/E 値だけでなく、JENDL-5 の開発途中のバージョンの C/E 値とあわせて、高速炉の積分実験ベンチマークの結果を紹介 する。

JENDL-5の開発ではα版、β版と呼ばれる開発途中のバージョンが多数作成されており [4]、JENDL-5の公開に向けて段階的にベンチマーク解析を進めてきた。企画セッションで は、高速炉の積分実験ベンチマークの C/E 値は、JENDL-4.0 から JENDL-5 でそれほど大き く変わっていないものが多いが、核データ自体は大きく変更されており、いろいろな核種・ 反応・エネルギーの核データの変更による影響が打ち消しあった結果であることを報告した。 このように、特定の C/E 値を実現するための核種・反応・エネルギーの核データの改訂方法 は複数存在すること(積分ベンチマークの結果だけからでは核データの改訂方法を一意に決 定できないこと)は英語では Compensation Effect と呼ばれることが多い。直訳して補償効果 と呼ぶのが適切かもしれないが、ここでは簡単に相殺と呼ぶことにする。

実際に、開発途中のバージョンでは C/E 値は比較的大きく変化しており、この C/E 値の変 化の経緯を示すことで、積分実験ベンチマークの特徴を示せるのではないかと思い、このよ うな紹介方法を試みることにした。なお、開発途中のバージョンは結果を公表するために作 成されたバージョンではないので、ここでは単純に、核データライブラリの改訂によって高 速炉の積分実験ベンチマークの C/E 値がどのような変化をするかを示し、感度解析による結 果との関係を考えてみたい。

2. 積分実験データベースと解析手法

原子力機構では、高速炉の核特性解析システムの検証・妥当性確認や高速炉の核設計の予 測精度向上に資することを目的として、高速炉の積分実験データベース(以下、高速炉核設 計基本データベース)[5,6]の整備を進めており、基本的には、この高速炉核設計基本データ ベースを使って JENDL-5 のベンチマーク解析を行った。高速炉核設計基本データベースに は多くの積分実験データが含まれており、個別に数えると 600 核特性以上のデータが含まれ ている。核データライブラリのベンチマーク解析では、解析モデルに起因する不確かさを排 除したいので、解析モデルに起因する不確かさを無視できる連続エネルギーモンテカルロ法 を用いるのが望ましい。しかしながら、高速炉核設計基本データベースには、基本的には決 定論的手法で評価した結果が登録されている。一部の積分実験データはモンテカルロ法でも 評価されているものの、膨大な計算時間が必要となるものも多い。このため、JENDL-5 のベ ンチマーク解析では、高速炉核特性基本データベースの中から、代表的な 11 核特性を代表 ベンチマークとして選定し、高速炉体系のベンチマーク解析を行った。

一方で、高速炉核設計基本データベースには、核種・反応・エネルギーごとの単位当たり の核データの変化が、核特性の計算値に与える影響を評価した感度係数も格納されている。 この感度係数に、核データの変化量を乗じることで、核特性の計算値の変化量を予測するこ とができる。この感度解析には計算時間はほとんどかからない。そこで、JENDL-4.0 による 連続エネルギーモンテカルロコード MVP[7] の解析結果を基準として、中性子エネルギー 70 群の感度係数を使った感度解析により JENDL-5 の C/E 値を評価することで、ベンチマーク 解析を実施した。ただし、この感度解析では、核データの変化と核特性の変化の間に線形性 が成り立つという仮定を用いているため、核データが大きく改訂された場合等には精度が悪 化することが分かっている。このため、JENDL-5 の開発途中のバージョンにおいて、大きな 改訂が行われた際には、適宜、MVP による直接計算を行い、感度解析による結果と十分な 精度で一致することを確認しながら、ベンチマーク解析を進めた。

表1に選定した代表ベンチマークの概要を示す。これまでの高速炉核設計基本データベー

炉心名	核特性		炉心燃料	備考
ZPPR-9	臨界性(KEFF)			600~800MWe級 - 領域均質恒心の模擬実験
	Naボイド反応度 (NaVoid)	ボイド領域小(Step3)	混合酸化物燃料 (MOX : Pu+U)	(制御棒位置のないクリーン炉心)
		ボイド領域大(Step5)		600~800MWe級 二領域均質炉心の模擬実験 (制御棒位置を模擬した炉心)
ZPPR-10A	制御棒価値 (CR)	炉中心(Center)		
		第2リング(Ring2)		
BFS-62-3A	臨界性(KEFF)			
	Naボイド反応度 (NaVoid)	ボイド領域小 (LEZ:低濃縮U領域ボイド化)	濃縮ウラン燃料 (+ MOX リング領域)	600MWe級の解体核Puの装荷を 想定した炉心の模擬実験 (濃縮ウラン燃料を模擬した炉心で あるが、一部MOX燃料を装荷)
		ボイド領域中 (L+M:低+中濃縮U領域ボイド化)		
		ボイド領域大 (L+M+P+H:低濃縮U+中濃縮+ MOX+高濃縮U領域ボイド化)		
常陽MK-I	臨界性(KEFF)		混合酸化物燃料	50MWthブランケット付き炉心
常陽MK-II		臨界性(KEFF)	(MOX:Pu+濃縮ウラン)	100MWth反射体付き炉心

表1 代表ベンチマークの概要

スの整備の経験から、代表的な核特性として、臨界性、Na ボイド反応度、制御棒価値、炉心燃料として、MOX 炉心(ZPPR-9、10A)と濃縮ウラン炉心(BFS-62-3A)を選定した。後述するように、比較的小型の炉心である常陽 MK-I の臨界性は、ZPPR-9、ZPPR-10A、BFS-62-3A のような大型炉心を模擬した実験体系とは異なった感度を持っているため、途中から主要ベンチマークに追加した。なお、常陽 MK-I はブランケット付き炉心であるが、常陽 MK-I を 代表ベンチマークに追加する際に、反射体付き炉心の常陽 MK-II の臨界性も追加した。高速炉核設計基本データベースに含まれる炉心の中で ZPPR-9 や BFS-62-3A は大型炉心、常陽 MK-I、MK-II は小型炉心の代表にもなっており、GODIVA、JEZEBEL といった超小型炉心 を除けば、高速炉核設計基本データベースに含まれる実験体系の中性子スペクトルはほぼこの範囲に収まる。

3. 結果

3.1 代表核特性に対する積分ベンチマーク結果

図1に代表ベンチマークの臨界性に対する C/E 値を示す。なお、図中の誤差棒は実験に起 因する不確かさを表す。JENDL-5の開発途中のバージョンには、基本的には、α版、β版の update の何番目のような名前がついているが、ここでは単純に、C/E 値の変化の経緯が分か るように高速炉のベンチマーク解析を実施した主なバージョンに対して、古い方から順番に J5dev1、J5dev2、・・・ のように呼ぶことにする。この図から、臨界性については MOX 炉心、



図1 代表核特性の C/E 値(臨界性)

濃縮ウラン炉心、ブランケット付き炉心、反射体付き炉心のいずれに対しても、実験に起因 する不確かさを考慮すると C/E 値はそれほど大きく変わっておらず、JENDL-5 は JENDL-4.0 と同程度の性能と考えられる。しかしながら、感度解析により核種・反応毎の寄与を分析す ると、複数の核種・反応間の相殺の結果であることが分かった [3]。この感度解析の結果か ら、JENDL-4.0 から JENDL-5 での Pu-239 核分裂断面積の改訂の影響が大きく、ZPPR-9 の 臨界性に対して、Pu-239 核分裂断面積の改訂だけで約-0.25 %と大きい寄与があることが分 かった。その他、U-238 核分裂、Pu-239 捕獲、O-16 弾性散乱断面積等の改訂による寄与も大 きく、これらの改訂効果が相殺された結果、合計で約-0.25 %の改訂効果となっている。

図には、JENDL-5の開発途中のバージョンの C/E 値も示しているが、どの炉心の臨界性に ついても、0.3 %~0.5 %ぐらいの範囲で動いており、感度解析の結果と同程度の影響がある ことが分かる。臨界性はいろいろな核種・反応・エネルギーの核データが比較的大きな感度 を持っているが、この図から核データの改訂に対して敏感に C/E 値が変化していることが分 かる。

一方で、BFS-62-3A(濃縮ウラン炉心)の臨界性に対する感度解析結果からは、U-235 核 分裂、捕獲断面積、核分裂スペクトル等の改訂効果が相殺した結果、JENDL-4.0 と JENDL-5 の C/E 値の改訂効果は全体で+0.13 %となったことが分かった [3]。特に U-235 核分裂断面積 の改訂効果は+0.5 %以上と大きい。このように、MOX 炉心と濃縮ウラン炉心では感度係数 の特徴が異なっているが、開発途中のバージョンの C/E 値の変化も両者では異なっており、 この図からも、感度係数の違いがあることを読み取ることができる。

常陽 MK-I の臨界性については、途中から代表ベンチマークに追加したことを前述したが、 この図から一点だけ C/E 値が大きく1からずれて約0.992 にまで小さくなっていることが分 かる。常陽 MK-I は ZPPR-9 や BFS-62-3A に比べると炉心が小さいため、炉心からの中性子 の漏洩量の評価に影響を与える平均散乱角余弦等に比較的大きな感度があり、大型炉心とは 少し異なった感度を持つ。この結果から常陽の臨界性についても常に確認した方が良いと判 断し、途中から代表ベンチマークに追加した。



図 2 に、MOX 炉心(ZPPR-9、ZPPR-10A)の制御棒価値と Na ボイド反応度の C/E 値を示 す。この図から JENDL-5 の C/E 値は、JENDL-4.0 とほぼ同じ値であることが分かる。感度

図2 代表核特性の C/E 値(MOX 炉心の制御棒価値と Na ボイド反応度)

解析の結果から、制御棒価値については、改訂の効果自体が小さいこと、Na ボイド反応度に ついては、主に Pu-239 捕獲断面積、U-238 非弾性散乱断面積の改訂の効果が相殺した結果で あることが分かった [3]。しかしながら、開発途中のバージョンでは、制御棒価値、Na ボイ ド反応度ともに C/E 値が大きく変化しており、この図から核データの改訂の影響を大きく受 けていることが分かる。



図3に、濃縮ウラン炉心(BFS-62-3A)のNaボイド反応度のC/E値を示す。この図から

図3 代表核特性の C/E 値(濃縮ウラン炉心の Na ボイド反応度)

JENDL-5 の C/E 値は、JENDL-4.0 とほぼ同じ値であることが分かるが、感度解析の結果から は、U-235 核分裂断面積と捕獲断面積の改訂効果が相殺した結果であることが分かった [3]。 ボイド領域の小さい実験では、測定される反応度が小さいため、比率(C/E 値)で示すと少 し感度が誇張されてしまう面があるが、この図からも核データの改訂の影響を大きく受けて いることが分かる。

3.2 その他の積分ベンチマーク結果

次に、代表ベンチマークとして選定した 11 核特性以外の積分実験データに対して、特に JEDNL-5 の改訂効果が大きく見られた核特性のベンチマーク結果について紹介する。図4に Pu-239 に対する Pu 同位体の核分裂率比に対する C/E 値を示す。横軸には、複数の炉心で測定 された Pu-239 の核分裂率に対する Pu-238、Pu-240、Pu-241、Pu-242 の核分裂率の比の C/E 値を示した。この図から、JENDL-4.0 では二つの独立した実験体系(BFS、FCA)で測定さ れた Pu-242 の核分裂率比に対して過大評価傾向を示していたが、JENDL-5 ではこの過大評 価傾向が改善されたことが分かる。感度解析の結果から、この改善は Pu-242 の核分裂断面 積の改訂の効果であることが分かった [3]。

この図から、Pu-242の核分裂率比については、JENDL-5の開発の比較的早い段階で改善 されたことが分かる。一般的に核分裂率比は、分子と分母の核分裂断面積の感度が大きく、



図4 Puの核分裂率比の C/E 値

他の核データの影響はあまり受けない。臨界性や Na ボイド反応度に比べると核データの改 訂の影響の現れ方は単純である。特に、分母の Pu-239 核分裂断面積は分子の Pu-242 の核分 裂断面積と比べると感度のあるエネルギー領域の改訂量が小さいので、実質的には Pu-242 の 核分裂断面積の改訂量により C/E 値がほぼ決定される。このため、臨界性等に比べると単純 な C/E 値の変化の経緯になっていると考えられる。





図 5 Am、Cm の核分裂率比の C/E 値

ら、Cm-244の核分裂率比についても、Pu-242の核分裂率比と同様に、JENDL-4では二つの

独立した実験体系の結果が過大評価傾向を示していたが、JENDL-5 ではこの過大評価傾向が 改善されたことが分かる。なお、感度解析の結果から、この改善は Cm-244 の核分裂断面積 の改訂の効果であることが分かった [3]。

この図の開発途中のバージョンの C/E 値の経緯から、Cm-244 の核分裂率比の C/E 値につ いても開発の早い段階で改善されたことが分かる。また、一旦改善された後の C/E 値も安定 している。この C/E 値も核分裂率比の分子に対応する Cm-244 核分裂断面積の改訂量でほぼ 決定されるため、このような単純な経緯となっていると考えられる。しかしながら、これは 高速炉のスペクトルで Cm-244 核分裂断面積に大きな感度を持つ他の積分ベンチマークがな いということを示唆している。実際、高速炉核設計基本データベースには、Cm-244 核分裂 断面積に大きな感度を持つ核特性は他にはほとんどないため、一旦改善効果が確認できると Cm-244 核分裂断面積の更なる改訂を促すベンチマーク結果は出てこない。この核分裂率比 については、BFS と FCA の二つの独立した臨界実験装置で測定され、結果が整合している ため、このベンチマーク結果の信頼性は比較的高いと考えられるが、もし仮に、一つの実験 体系でしか測定されておらず、その実験に何か問題があった場合はミスリードしてしまう可 能性があるということを意味している。そのため、ベンチマーク結果の信頼性を上げるため には独立した実験体系でより多くの測定が行われていることが望ましい。

最後に、JENDL-5 で改善効果の見られたマイナーアクチノイド(MA)の捕獲断面積に対 して大きな感度を持つ MA 照射サンプルの燃焼後原子数密度比に対するベンチマーク結果を 紹介する。図 6 に Cm の燃焼後原子数密度比に着目した C/E 値の結果を示す。この図から、



図6 MA照射サンプルの燃焼後原子数密度比の C/E 値

Cm-246/Cm-245 燃焼後原子数密度比の C/E 値と Cm-247/Cm-246 燃焼後原子数密度比の C/E 値が改善していることが分かる。Cm-246 は Cm-245 の中性子捕獲反応、Cm-247 は Cm-246 の中性子捕獲反応により生成されるので、これらの燃焼後原子数密度比は、分母の核種の捕獲 断面積に大きな感度を持つ。感度解析の結果からも、それぞれ、Cm-245 捕獲断面積、Cm-246 捕獲断面積の改訂の効果であることが分かった[5]。

これらの燃焼後原子数密度比の C/E 値についても、JENDL-5 の開発途中のバージョンの 経緯を見ると、ある時点で大幅に改善し、その後は C/E 値の変化が安定していることが分 かる。Pu-242 や Cm-244 の核分裂率比と同様に、特定の反応断面積に大きな感度を持つ核 特性であるが、これらの積分実験データはいずれも、PFR 炉心のみ、すなわち、一つの実験 体系での測定データしかないことに注意が必要である。図に示されている Cm-243/Cm-242、 Cm-244/Am-243、Cm-245/Cm-244 の燃焼後原子数密度比については常陽と PFR の独立した 二つの実験体系で測定されており、両者の結果がほぼ整合していることから、間接的に、PFR の Cm-246/Cm-245、Cm-247/Cm-246 の燃焼後原子数密度比の結果も常陽の測定値と整合す るものであろうと推測できるが、一つの実験体系しかないため、これらのベンチマーク結果 の信頼性は、二つの独立した実験体系で測定された結果に比べると信頼性はやや低いと考え るべきであろう。Cm-245 捕獲断面積、Cm-246 捕獲断面積に大きな感度のある積分実験デー タを測定するのは難しいと考えられるが、これらのベンチマーク結果の信頼性を確認するた めには、このような積分実験データの取得が必要になると考えられる。

4. おわりに

企画セッションで報告した高速炉体系における JENDL-5 の積分ベンチマーク解析の結果 に、JENDL-5 の開発途中のバージョンの C/E 値の結果を追加して紹介した。高速炉の標準的 な体系における主要な核特性に対して、JENDL-5 の C/E 値は JENDL-4.0 とほぼ同じ値とな り、JENDL-4.0 と同程度の性能を維持している。また、MA に関連する一部の核特性におい ては、JENDL-4.0 に比べて C/E 値が改善されている。感度解析の結果から、これらの改善効 果は、Pu-242、Cm-244 の核分裂断面積の改訂、Cm-245、Cm-246 の捕獲断面積の改訂の効 果であることが分かっている。一方で、主要な核特性に関する C/E 値は JENDL-4.0 とほぼ同 じ値となっているものの、感度解析の結果から核種・反応毎の改訂の寄与が大きく相殺して いるケースが多いことが分かっている。ここでは、感度解析の結果から分かるベンチマーク 実験の特徴と開発途中のバージョンの C/E 値の変化との関係に着目して、高速炉体系におけ る JENDL-5 の積分ベンチマーク解析の結果を紹介した。

謝辞

本原稿のベンチマーク解析結果のとりまとめに関して、(株)NESIの神智之氏にご協力をい ただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, N. Iwamoto, A. Ichihara, S. Kunieda, S. Chiba, K. Furutaka, N. Otuka, T. Ohsawa, T. Murata, H. Matsunobu, A. Zukeran, S. Kamada, and J. Katakura, "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering," J. Nucl. Sci. Technol. 48(1), 1-30 (2011).

- [2] JENDL-5, https://wwwndc.jaea.go.jp/jendl/j5/j5_J.html (accessed on 2022-05-02)
- [3] 横山 賢治, 谷中 裕, "JENDL-5 の完成と数値解析への適用の展望 (4) 高速炉体系における JENDL-5 の積分ベンチマーク解析", 日本原子力学会 2022 年春の年会, 1A_PL00 (2022).
- [4] Y. Nagaya, K. Yokoyama, K. Tada and C. Konno, "Integral Tests of Preliminary JENDL-5 for Critical and Shielding Experiments," Proc. of the 2021 Symposium on Nuclear Data, November 18-19, 2021, held online (2020) [to be published].
- [5] 横山賢治, 杉野和輝, 石川 眞, 丸山修平, 長家康展, 沼田一幸, 神智之, 「高速炉用統合炉定数 ADJ2017 の作成」, JAEA-Research 2018-011 (2019).
- [6] 横山賢治,丸山修平,谷中裕,「高速炉用統合炉定数 ADJ2017R の作成」, JAEA-Data/Code 2021-019 (2022).
- [7] Y. Nagaya, K. Okumura, T. Sakurai, and T. Mori, "MVP/GMVP Version 3: General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations Based on Continuous Energy and Multigroup Methods" JAEA-Data/Code 2016-018 (2017).