

企画セッション（核データ部会主催、「シグマ」調査専門委員会共催）

「次世代革新炉の開発に向けた JENDL の現状と展望」

(2) JENDL-5 における核データ評価および今後の展望

日本原子力研究開発機構

岩本 修

iwamoto.osamu@jaea.go.jp

1. はじめに

核データライブラリは原子炉の核計算における基礎的な入力データであり、計算結果の信頼性を左右する重要な基盤である。日本では核データライブラリ JENDL の開発が進められてきた。JENDL の公開履歴を図 1 に示す。JENDL は高速炉のために開発が始まり、最初のバージョンである JENDL-1 が 1977 年に公開された。その後も評価データの改訂と拡充が継続され、最新版である JENDL-5 が 2021 年に公開された[1]。JENDL-5 ではこれまで特殊目的ファイルとして公開されてきた様々なデータを統合すると共に、最新の測定や核反応モデル計算を元に中性子反応データの更新と拡充を行った[2]。また、熱中性子散乱則や核分裂収率などのデータについて、独自の評価データを採用するなど、大きな改訂を行った。現在、統合ライブラリである JENDL-5 の完成度を高めるために、次期バージョンとして JENDL-5.1 の開発を行っている。

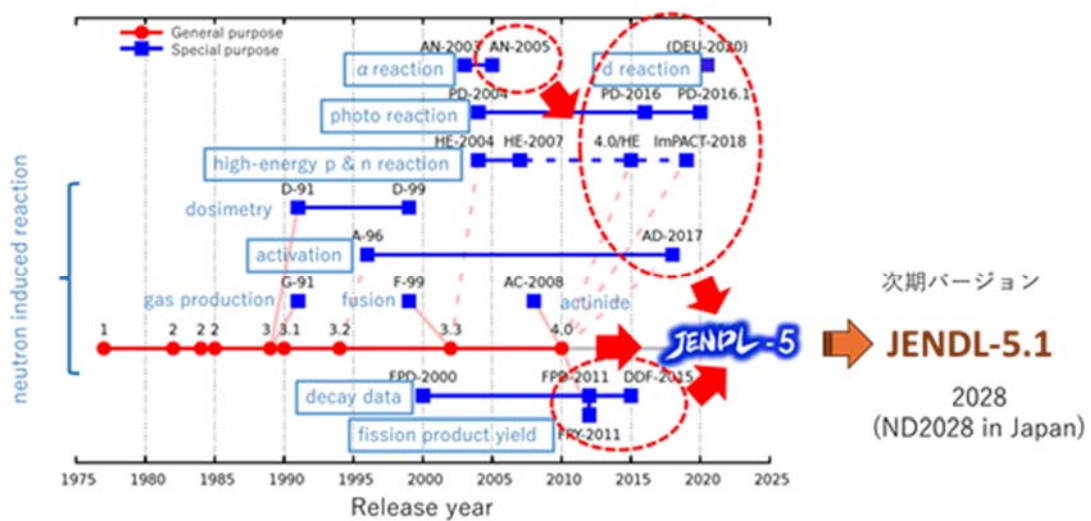


図 1 JENDL の公開履歴

核データライブラリの利用を広げ有用性を高めるためには、核データの利用者と意思疎通を図り、ニーズをくみ取っていくことが重要である。現在、次世代革新炉に向けた開発が活発になっており、核データ分野からもより貢献できればと考える。本企画セッションでは、JENDL-5 の核データ評価を振り返り、次世代革新炉の開発に関わる核データに関して炉物理を専門とする関係者と話し合う場が得られた。これを契機とし、次世代革新炉を含む原子力研究開発へ貢献する核データライブラリの開発につなげたい。

2. JENDL-5 の核データ評価

図2に示すようにJENDL-5 の中性子反応データはJENDL-4.0 のほぼ2倍となる795核種を収録しており、半減期1日以上核種をほぼ網羅したものとなっている。これらのデータは天然存在核種をすべて含んでおり、次世代革新炉で新たな材料を考慮する上で重要となる。JENDL-5 の主要アクチノイドデータの共鳴パラメータは基本的に国際的な核データ評価協力プロジェクトであるCIELO[3]で評価されたデータを採用した。主要なウランやプルトニウム同位体の高速中性子核分裂断面積も最新の測定データを用いて同時評価を実施した。主要アクチノイドの断面積については、最終的には高速炉系のベンチマーク結果を用いて若干の調整を行っている。マイナーアクチノイドの断面積についても、ANNRI等の最新の測定データを用いて改訂を行った。鉄、クロム、ニッケルなどの構造材や核分裂生成物、中性子吸収剤であるガドリニウム同位体に加え、炭素や窒素、酸素、ナトリウムといった軽核など、原子炉の核特性に影響する核種の断面積も多く改訂した。

これらの評価では独自に開発している核反応モデル計算コードCCONEやR行列理論共鳴解析コードAMURを活用している。CCONEは核データ評価に必要とされる核反応の直接過程、前平衡過程、複合核過程の物理モデルを統合しており、様々な核反応データについて一貫した計算が可能となっている[4]。JENDL-5では核反応断面積や中性子放出データに加え、図2に示すようにガンマ線放出やアイソマー生成などの放射化に関わるデータも充実している。

JENDL-5ではそれまで独自の評価が難しかった核データについて、新たな取り組みを行った。熱中性子散乱則の独自評価をJENDLとして初めて実施し、軽水や重水、メタンやベンゼンなどの有機分子に対するデータを収録した。これらのデータは分子動力学計算に基づく評価であり、ENDF/B-VIII.1等の他の最新ライブラリと同様の手法が採用されている。また、これまで他ライブラリの軽微な修正にとどまっていた核分裂収率についても、独立核分裂収率の測定データをもとに、他の評価値や収率に関する物理モデルを用いて、一般化最小二乗法により最確値を求めるなど独自の評価を実施した。

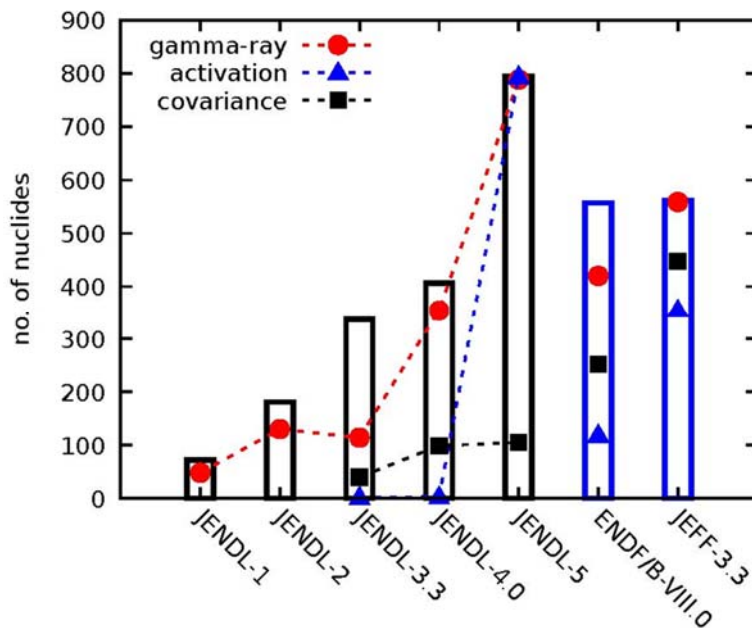


図2 JENDL 及び他ライブラリの収録核種数

JENDL-5 では原子炉のベンチマークテストを数多く実施し、核データ評価へのフィードバックを行った。Pu 系炉心の臨界性などについて、核計算の予測精度が向上しており、前バージョンの JENDL-4.0 と比較して同等以上の性能を有している。次世代革新炉の開発を含む様々な場面での利用を期待している。

3. 今後の展望

JENDL-5 では様々なデータが充実したが、図 2 に示す通り共分散データについては全核種数に対する割合が、他の核データライブラリと比較して、十分とは言えない状況にある。これまでと異なる新たな原子炉の開発では、核データに起因する核計算の不確かさを見積もる重要性が増すと考えられる。次期 JENDL では共分散データの充実を目指している。核反応モデル計算コード CCONE について、より柔軟な利用が可能ないように、ソースコードのモジュール性を高め、入力パラメータのクラス構造の一般化などの改良を行った。これにより様々な入力パラメータを変化させ、計算を並列に行うことで共分散の評価で必要とされる感度行列を効率的に得ることができるようになった。現在、実験データベース EXFOR をもとに、感度行列の計算結果から共分散を自動的に導出することで、共分散を充実させることを検討している。図 3 に $^{56}\text{Fe}(n,p)$ 反応断面積について得られた核データの不確かさを示す。図中ピンク色の影の部分が断面積の不確かさを表す。今のところ自動的な評価において、個々の測定データを吟味することは難しいが、利用可能な測定データとある程度整合した不確かさを与えることを目指している。

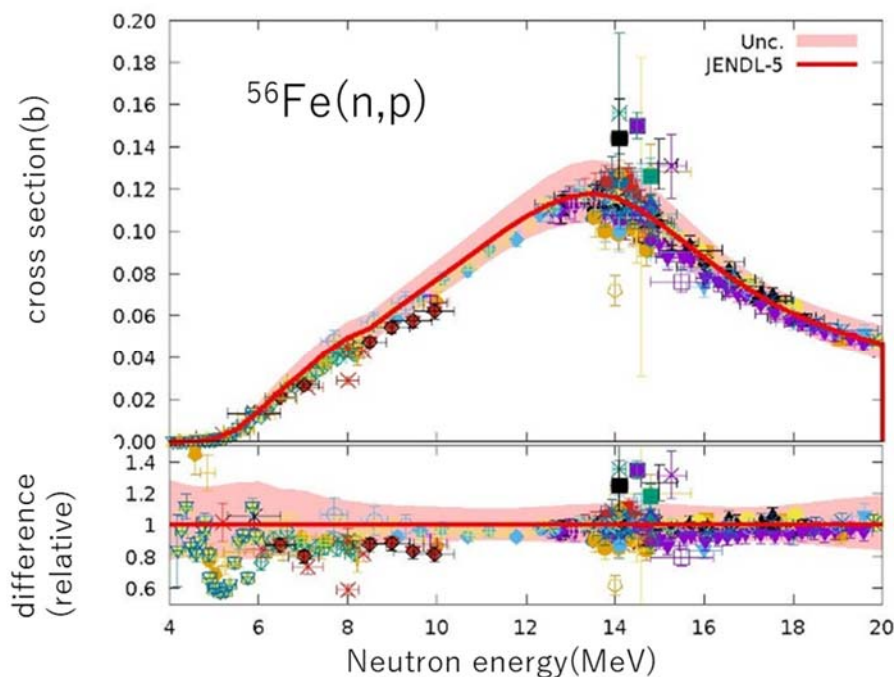


図3 共分散の自動評価例（実際の ^{56}Fe の共分散は評価者が実施）

ANNRIなどの核データ測定施設で、共鳴領域を中心として新たな測定が実施されている。共鳴領域の核データは測定データに強く依存するため、JENDL-5.1でも最新の測定データを反映させることで、信頼性の向上を行いたいと考えている。更に、軽核を中心にこれまで更新があまりなされていない古いデータや、特殊目的ファイルを統合した20 MeV以上のアクチノイドのデータについても、可能なかぎり更新したい。

一方、軽水炉臨界性の燃焼度依存性は一つの改善すべき課題である。JENDL-5ではENDF/B-VIII.0の空隙率に依存した黒鉛の熱中性子散乱則のデータを採用したが、適切な評価値となっていない可能性が指摘されている。現在、JAEAにおいて黒鉛に対する測定や評価を進めているが、JENDL-5で採用したデータとは異なる評価値が支持されている。黒鉛を始めとする結晶性物質の熱中性子散乱則は主にENDFから採用したが、測定や評価手法の開発を進めており、次期バージョンで新たな評価データを採用できればと考えている。

現在、ミューオンに関する核データや三体核力に基づく原子核理論計算の精密化などのプロジェクトも進行しており、JENDLの高度化につながる可能性がある。今回、次世代革新炉開発に関わるテーマで関係者と話し合える場が持てたことは、核データの開発を行う上で貴重な機会であった。今後も、多くの意見を取り入れ、必要な核データを効果的に整備することで、革新炉をはじめとする原子力の研究開発へ貢献していきたい。

参考文献

- [1] https://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/j5/j5_J.html、日本原子力研究開発機構（2025年9月16日アクセス）
- [2] O. Iwamoto et al., "Japanese evaluated nuclear data library version 5: JENDL-5", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 60(1), 1-60 (2023). DOI: 10.1080/00223131.2022.2141903
- [3] M.B. Chadwick et al., "CIELO Collaboration Summary Results: International Evaluations of Neutron Reactions on Uranium, Plutonium, Iron, Oxygen and Hydrogen", *Nucl. Data Sheets*, 148, 189-213 (2018). DOI: 10.1016/j.nds.2018.02.003
- [4] O. Iwamoto et al., "The CCONE Code System and its Application to Nuclear Data Evaluation for Fission and Other Reactions", *Nucl. Data Sheets*, 131, 259-288 (2016). DOI: 10.1016/j.nds.2015.12.004