

## 会議のトピックス(I)

# 日本原子力学会「2022年春の年会」

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」

2022年3月16日(水) 13:00~14:30 オンライン開催

## (1) JENDL-5の概要

日本原子力研究開発機構  
原子力基礎工学研究センター  
岩本 修  
[iwamoto.osamu@jaea.go.jp](mailto:iwamoto.osamu@jaea.go.jp)

### 1. はじめに

前バージョンの JENDL-4.0 が公開された 3 年後の 2013 年に、今後の JENDL の開発のあり方を議論するため、JENDL 委員会に JENDL 開発検討小委員会が設置された。核データの測定、評価、利用に関わる専門家が集まり、様々な観点から JENDL の課題が出され、その対応方策と共に整理された。設置された小委員会の答申として、今後の JENDL の開発に関する指針が報告書[1]にまとめられた。その中で JENDL-5 のあるべき姿として、

- 「汎用」ライブラリから、「統合」ライブラリへの発展を図る。
- 各特殊目的ファイルを包含し、ユーザによる核データニーズに応える完備性を有する「オールインワン」ライブラリである。

という考えが示された。放射線利用の広がりを受けて公開されてきた多様な特殊目的ファイルを統合することによりユーザの利便性を高めると共に、データを整理して一貫性を持たせることで更なる展開を図ることを意図している。

JENDL-5 は基本的にはこの考えに沿って、開発が進められた。図 1 に示すように JENDL-4.0 の公開後も、JENDL/PFD-2011 及び JENDL/FPY-2011 の FP 崩壊・収率データファイル、また、崩壊データの対象核種を大きく広く広げた JENDL/DDF-2015 や、原子

炉施設廃止措置のための放射化断面積ファイル JENDL/AD-2017、高エネルギー核子反応データを収録した JENDL-4.0/HE や JENDL/ImPACT-2018、2,700 近い核種を収録した光核反応データファイル JENDL/PD-20116 とその改訂版 JENDL/PD-20116.1、更には加速値中性子源開発のための重陽子反応データファイル JENDL/DEU-2020 など、数多くのファイルを公開した。これらのファイルの一部は外部資金によるプロジェクトによって整備したものである。研究資金を獲得すると共に、その時々ニーズに柔軟に対応していくためには、競争的資金を含む外部資金の活用は今後の JENDL の開発においても、重要となっていくと考えられる。JENDL-5 では、上記の特殊目的ファイルのデータを改訂しつつ汎用ファイルに取り込んだ。また、中性子データの改訂にも力をいれており、大幅なデータ改訂と追加を行った。これらの成果を取りまとめて、日本の評価済核データライブラリの最新版である JENDL-5 を 2021 年 12 月に予定通り、無事に公開することができた。本記事では、中性子反応データを中心とする JENDL-5 の概要について紹介する。

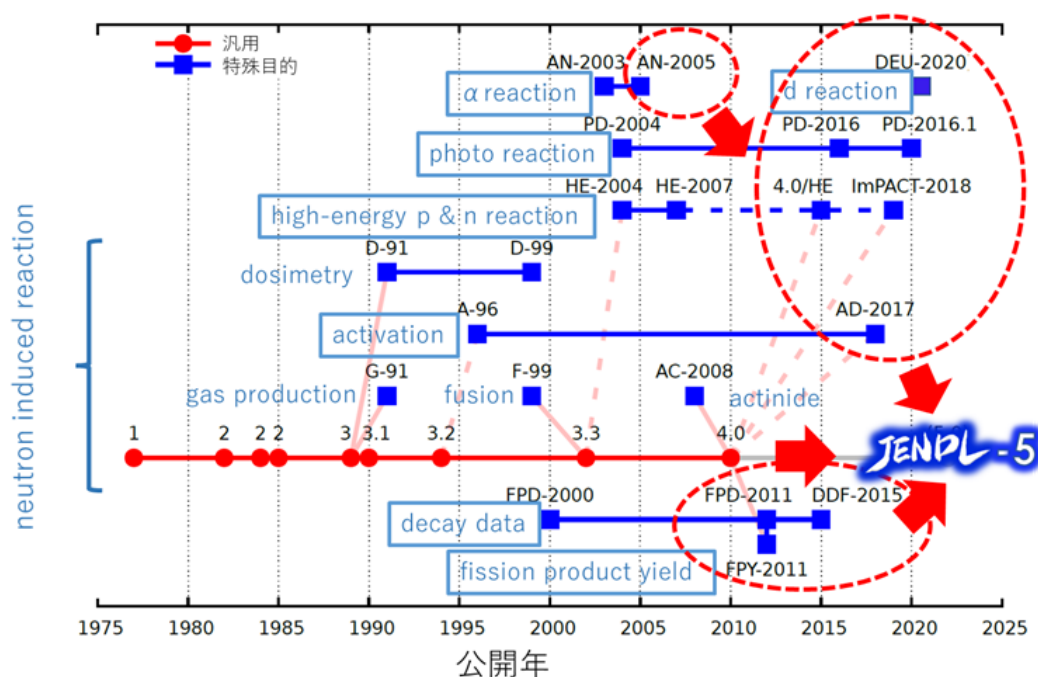


図1 JENDL の公開履歴

## 2. 中性子反応データ

### 2.1 概要

多様なニーズへの対応は核データの重要な課題であるが、JENDL-5 においても中心となるデータは、20 MeV 以下の中性子反応に係わるデータである。JENDL-4.0 の開発においては、新たな原子炉開発へ資するためマイナーアクチニド (MA) や核分裂生成物 (FP)

表 1 中性子反応データのライブラリごとの収録核種数

	JENDL-1	JENDL-2	JENDL-3.3	JENDL-4.0	JENDL-5	ENDF/B-VIII.0	JEFF-3.3
国・地域	日本	日本	日本	日本	日本	米国	欧州
公開年	1977	1985	2002	2010	2021	2018	2017
核種数							
総数(元素)	72 (6)	181 (8)	337 (2)	406 (1)	795 (0)	557 (0)	562 (1)
天然核種数 <sup>1)</sup>	48	130	228	260	287	286 <sup>1)</sup>	286 <sup>1)</sup>
2次ガンマ線	0	0	114	354	787 <sup>2)</sup> / 788	420	559
放射化	0	0	2	3	794 <sup>3)</sup>	119	355

- 1) 天然核種数は全部で 287 : Ta-180m (ENDF で不足)、C-12 (JEFF で不足)
- 2) 20 MeV 以下 : Ar-40 のガンマ線データは 20 MeV 以上のみ
- 3) He-4: 弾性散乱のみ

などのデータを中心として、中性子反応データの改訂に取り組んだ。主要アクチニドの改訂も行い、軽水炉や高速炉などに対するベンチマークテストの結果は JENDL-3.3 から大きく改善された。JENDL-5 の開発においては、ベンチマークテストに対して JENDL-4.0 と同等以上のパフォーマンスを出すことを目指した。JENDL-4.0 では改訂が不十分であった軽核や構造材などの改訂や、MA などに対する J-PARC の ANNRI による最新の測定を反映させつつ、主要アクチニドを含む多くの核種について最新知見を反映した改訂を行った。

原子炉以外の多様なニーズへの対応するため、収録核種についても大きく拡充した。JENDL-5 では JENDL-4.0 に未収録の安定核種を含む半減期が 1 日以上の核種をほぼすべて網羅した。表 1 にこれまでの JENDL や最新の ENDF 及び JEFF の収録核種数を示す。JENDL-1 は高速炉の開発のためのライブラリで 72 核種であったが、JENDL-4.0 時点では 406 核種まで増えている。JENDL-5 では JENDL-4.0 の 2 倍近く、JENDL-1 から考えると 10 倍以上の核種数となった。これは、ENDF や JEFF と比較しても、同等以上に充実したものとなっている。また、これまでと大きく異なるのは放射化に係わるデータを統合したことである。JENDL-4.0 までは放射化に係わる特殊目的ファイルとして別途公開してきたが、JENDL-5 ではこれらのデータを統合することで一貫性がある完備したデータを提供している。これまでのユーザの利便性を考えて、統合されたデータファイルとともに、放射化断面積ファイルに対応するデータのみを収録したファイルも別途公開している。

## 2.2 アクチニド

言うまでもなくアクチニドのデータは原子炉利用において中心となるものである。JENDL-4.0 では新たに開発した核反応モデル計算コード CCONE を利用して、ほぼすべてのアクチニド核種に対して評価計算を実施し、それまでの JENDL の収録データを大幅に

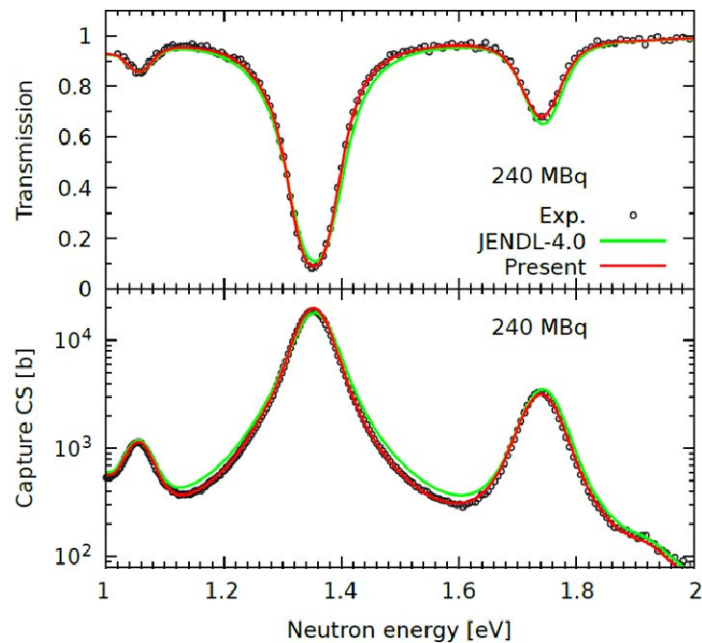


図2 Am-243 に対する ANNRI の測定データ[2]の共鳴解析の結果 (Present)。図中 240 MBq は実験に使用した試料の量。

改訂した。このデータは現在の知見に照らしても大きな不備はないと考えている。JENDL-5 では、基本的には JENDL-4.0 のデータを継承しつつ、JENDL-4.0 公開後の新たな測定データや CIELO などの国際プロジェクトの成果を取り入れた。核データの測定においては、J-PARC をはじめとする世界の加速器施設で多くのデータが取得されている。J-PARC の MLF では中性子核反応測定装置 ANNRI が設置されており、大強度のパルス中性子ビームの特性を生かして MA を中心とした中性子捕獲断面積や全断面積の測定が多くなされている。それらの測定データを用いて共鳴解析を行い、導出された共鳴パラメータを JENDL-5 に収録した。図2は Kimura 等による Am-243 の中性子透過及び中性子捕獲反応の測定データ[2]を用いた解析結果の例である。図中の 1.4 eV 付近の大きな共鳴では JENDL-4.0 の結果は裾が大きくなっているが、解析結果は実験データを良く再現している。このような共鳴解析では、実験条件を適切に考慮することが重要であるが、当然ながら ANNRI の測定については実験の情報を得ることが容易であり、JENDL の信頼性向上のための貴重なデータとなっている。

U-235, 238 及び Pu-239 の主要アクチニド3核種については、OECD/NEA の核データ評価国際協力の枠組みである WPEC において実施された CIELO プロジェクト[3]において、測定、評価、ベンチマークテストといった広い観点で検討され、ENDF/B-VIII.0 や JEFF-3.3 に取り込まれた。JENDL-5 でもこれらの3核種の共鳴パラメータについて CIELO の成果 (CIELO-1=ENDF/B-VIII.0) を採用した。当然のことながら、これらのデータは原子炉のベンチマークテストに大きく影響する。データの改訂によりベンチマークテストの悪化

も起こるため、原子炉の計算へ影響を与える他の核データについても検討が必要となる。JENDL-5 においても核分裂中性子数や核分裂中性子スペクトルの検討を行い、多くのベンチマークテストを経てデータを改訂した。

JENDL では U-233, 235, 238 及び Pu-239, 240, 241 の主要 6 核種の核分裂断面積について、断面積の絶対値と相互の断面積比の測定データを同時に取り入れて評価する同時評価という手法が採用されてきた。JENDL-5 においてもこの手法を踏襲し、新たな測定データを考慮しつつ評価を実施した [4]。これまでとの最も大きな違いは、エネルギー範囲が 200 MeV まで拡張されたことである。JENDL-5 で行った同時評価の詳細については論文[4]がすでに公開されており、参照いただきたい。これらの同時評価の結果は高速炉への影響が大きく、JENDL-5 の値はベンチマークテストの結果を考慮して修正が加わったものとなっている。

### 2.3 構造材、FP 核種、軽核

構造材については古くから引き継がれているデータが多かったが、Ti (Z=22) から Zn (Z=30) の多くの核種で改訂を行った。新しい共鳴パラメータの採用や CCONE を用いた核反応モデル計算が実施された。JENDL-5 では放射化断面積や高エネルギーへの拡張を行っており、CCONE による評価計算においてもこれらを考慮したものとなっている。JENDL-4.0/HE では、20 MeV 以下は JENDL-4.0 をそのまま採用し、20 MeV 以上のデータを加えたため、20 MeV のつなぎ目で段差が見られる傾向があったが、JENDL-5 では一貫した評価を多く実施しており、この傾向は構造材などにおいては緩和されている。

FP 核種については JENDL-4.0 で改訂が精力的に進められた。しかしながら、FP 核種は幅広い元素や質量数に渡って数多く存在するため、JENDL-4.0 において改訂されなかった核種もあり、JENDL-5 においてはそれらのデータも見直された。また、JENDL-4.0 の公開後も ANNRI を用いた FP 領域の核種の測定が実施されている。ANNRI のデータを用いて共鳴パラメータを改訂しているが、その中には原子炉において重要となる主要な長寿命 FP の一つである Tc や可燃性毒物の Gd のデータが含まれている。JENDL-4.0 では Gd の共鳴パラメータとして、その当時最新であった Leinweber 等の測定を元にしたデータが採用されたが、ベンチマークテストの結果が悪化したため、バックグラウンドの断面積が導入されていた。JENDL-5 では ANNRI のデータをもとにした共鳴解析により得られたパラメータが採用することで、信頼性の向上を図っている。

軽核では多様な反応チャンネルが開くため、共鳴解析にはそれらを考慮した R 行列理論による計算が必要である。JENDL-5 の開発にあたり、新たな R 行列理論解析コード AMUR[5]が開発された。AMUR を利用し、C, N, O, F, Na, Cl 同位体などの共鳴断面積が評価されている。これらは、軽水炉で重要な O-16 や高速炉で重要な Na-23、また ADS で利用が検討されている N-15 など、応用上も重要なデータを含むものである。また、C に関

しては、これまで天然同位体としてデータを与えていたが、JENDL-5 では C-12 と C-13 に分離したデータを与えた。これによって、C-13(n,g)反応による C-14 の生成の計算にも利用可能となった。

### 3. その他の核データ

核分裂収率については、東工大を中心とするグループによって評価が進められ、JENDL-4.0 に収録されていた核種のすべてについて、新たな評価データが得られている [7]。これまで FP 崩壊データについては JENDL 独自の評価データであったが、核分裂収率については ENDF などのデータを JENDL の崩壊データに合わせてマイナーな修正を行っただけであった。今回の新たな評価値は測定データと理論的なモデルを組み合わせることで統計的に尤もらしい値を導出したものであり、JENDL の独自性が高いデータとなっている。また、共分散についても導出されており、現在採用している ENDF-6 フォーマットには無いものの、JENDL-5 のウェブページから数値データをテーブル形式でダウンロード可能である。

軽水等の熱中性子散乱則も原子炉で重要なデータとなるが、近年京大で進められてきた分子動力学を基に評価したデータを JENDL-5 に収録した。熱中性子散乱則に関しても JENDL ではこれまで ENDF のデータを採用してきたが、今回初めて独自評価のデータを入れることができた。軽水の他にも重水、メタン、エタノール、ベンゼンなど 16 種の物質について、独自評価のデータを収録している。このほか ENDF や JEFF からもデータを採用し、熱中性子散乱則のデータが大幅に充実した。

崩壊データについても全面的な改訂を行った。崩壊データは基本的には IAEA が組織する国際協力により整備されている ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File) をベースとしている。しかし、ENSDF は実験データを評価して推奨データをまとめたものであり、シミュレーション計算という観点では必要なデータの整合性や完備性が不十分である。JENDL-5 では、新しい ENSDF のデータを基にしつつ、ENSDF では考慮されていない TAGS と呼ばれるガンマ線の全体的なエネルギー放出の測定や理論的な計算結果によって信頼性や完備性を高めたデータを収録している。

冒頭で示したように中性子以外の荷電粒子や光子による反応データは、特殊目的ファイルとして公開してきた。JENDL-5 では、これらのデータを採用しつつ改訂を行っている。例えば陽子反応データでは中性子源として利用されている Be について、中性子放出スペクトルの改訂を行い、信頼性を高めている。また、重陽子反応も中性子源として注目されており昨年特殊目的ファイルとして軽核に対するデータを公開したが、JENDL-5 では Al や Cu などの構造材に対するデータも追加した。 $\alpha$  粒子反応データは使用済み燃料の管理や処理において必要とされ、 $\alpha$  崩壊によって放出される  $\alpha$  線と軽核との反応により放出される中性子が重要となる。JENDL では放出中性子に注目したデータを特殊目的

ファイルとして公開していたが、データの不足のため MCNP などのシミュレーション計算には直接は利用できなかった。また、放出スペクトルの測定との不一致も指摘されていた。JENDL-5 では、不足データを理論計算によって補いつつ、スペクトルデータを改訂した。図3に JENDL-5 を使った PHITS によるシミュレーション結果を示すが、測定データを非常に良く再現していることが分かる。

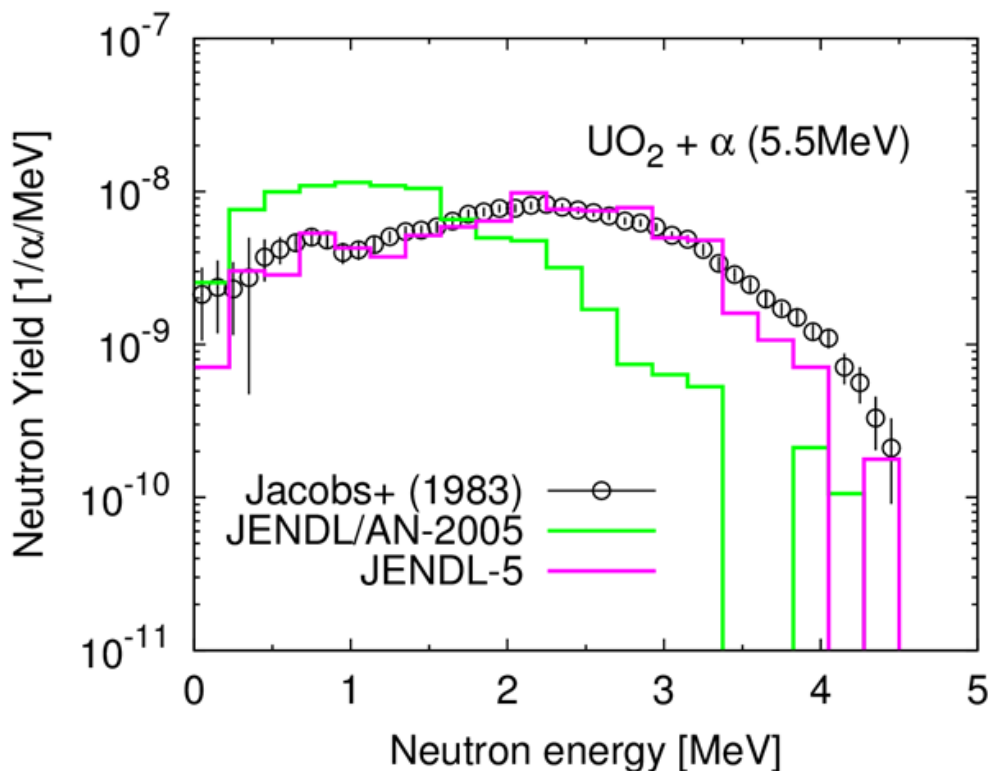


図3 二酸化ウラン (UO<sub>2</sub>) に 5.5MeV のアルファ線を入射した時の中性子発生数

#### 4. おわりに

JENDL-5 の概要として、実施した核データ評価の一部を紹介させていただいた。もっと具体的かつ包括的な内容については、現在準備している JENDL-5 の論文を参照いただきたい。(もちろん無事アクセプトされて公開されればの話ではあるが。) これまでの JENDL の論文と比較しても、ボリュームを大幅に増やして、なるべく詳細が分かるように記載したつもりである。

JENDL-5 はこれまでの JENDL と比較しても非常に大規模なデータとなっている。思わぬミスや不具合があるかもしれない。また、次の JENDL の開発を目指す場合、JENDL-5 の利用結果は重要な出発点となる。広く利用してフィードバックをいただければ幸いである。

余談ではあるが、最近、次のような JENDL のロゴを新たに作成した。



ウェブページや学会などの発表で使っているので、すでに目にされた方もいらっしゃると思う。JENDL を引用するときなど自由に使っていただきたい。

JENDL-5 の開発においては、核データ評価からベンチマークテストなど、JAEA 関連部署や JENDL 委員会 WG などを中心として、国内外の関係者から広く協力をいただいた。改めて感謝申し上げたい。

### 参考文献

- [1] JENDL 委員会 JENDL 開発検討小委員会：「JENDL 開発検討小委員会報告；—JENDL 開発の今後の方向性—」、JAEA-Review 2014-046 (2015).
- [2] A. Kimura et al., “Measurements of the  $^{243}\text{Am}$  neutron capture and total cross sections with ANNRI at J-PARC”, J. Nucl. Sci. Technol. **56** (6), 479-492 (2019).
- [3] M.B. Chadwick et al. “CIELO collaboration summary results: International evaluations of neutron reactions on uranium, plutonium, iron, oxygen and hydrogen,” Nuclear Data Sheets, **48**, 189-213 (2018).
- [4] N. Otuka, O. Iwamoto, “EXFOR-based simultaneous evaluation of neutron-induced uranium and plutonium fission cross sections for JENDL-5”, J. Nucl. Sci. Technol. (2022), DOI: [10.1080/00223131.2022.2030259](https://doi.org/10.1080/00223131.2022.2030259).
- [5] S. Kunieda et al., “R-matrix Analysis for n +16O cross-sections up to  $E_n=6.0$  MeV with covariances,” Nuclear Data Sheets, **118**, 250-253 (2014).
- [6] A. Kimura et al., “Measurements of the  $^{243}\text{Am}$  neutron capture and total cross sections with ANNRI at J-PARC”, J. Nucl. Sci. Technol., **56** (6), 479-492 (2019).
- [7] K. Tsubakihara et al., “Evaluation of fission product yields and associated covariance matrices,” J. Nucl. Sci. Technol., **58** (2), 151-165 (2021).