

「シグマ」特別専門委員会、核データ部会、炉物理部会合同セッション  
「ベンチマーク問題や積分実験を用いた JENDL 及び核計算コードの V&V の  
現状と今後の展望」

## (5) JENDL の開発状況と V&V への要望

日本原子力研究開発機構

核データ研究グループ

岩本 修

[iwamoto.osamu@jaea.go.jp](mailto:iwamoto.osamu@jaea.go.jp)

### 1. はじめに

我が国の汎用核データライブラリー JENDL の最新版である JENDL-4.0 は 2010 年に公開され、核分裂生成物 (FP) 及びマイナーアクチニド (MA) に重点が置かれると共に、共分散データの充実が図られた[1]。また、主要アクチニドの核データも改訂され、前バージョンの JENDL-3.3 から熱炉及び高速炉のベンチマークテストが改善された[2]。更に、JENDL-4.0 では新たな試みとして、ユーザの利便性を高めるため、ファイルの間違いについてはアップデートファイル JENDL-4.0u として修正したデータを適宜公開することとし、現在 40 近くのファイルが提供されている。

汎用核データファイルである JENDL-4.0 は軽水炉、高速炉、核融合炉などへの利用のため、原子炉中での中性子やガンマ線の挙動を計算するために必要なデータを供給することを想定している。しかしながら、原子炉以外の加速器等でも放射線利用が進んでおり、汎用核データファイルでは必ずしもカバーできないデータがある。これらのデータを提供するため、JENDL では特殊目的ファイルを開発している。JENDL-4.0 の公開後も、加速器や原子炉施設の廃止措置に焦点を当てた特殊目的ファイルの開発を進めている。

本稿では JENDL-4.0 の公開後の JENDL の開発状況を、JENDL-4.0u と次期汎用ファイル JENDL-5、特殊目的ファイルについてまとめると共に、JENDL の開発において期待する V&V への要望について述べる。

### 2. JENDL の開発状況

#### 2.1 JENDL-4.0u

JENDL-4.0 ではユーザの利便性を高めるため、ファイルの間違いを速やかに改訂して

JENDL アップデートファイル JENDL-4.0u をウェブで公開し、管理していく方針となった。2012 年 9 月に最初の修正データが公開され、2016 年 1 月までに 38 件の修正データがダウンロード可能となっている[3]。主なものは、ライブラリーの編集によって生じた非物理的な断面積の修正、カーマ係数に悪影響を与える反応の閾値付近のスペクトルの修正、共鳴パラメータの編集ミス等の修正、反応の Q 値に関する修正等である。共分散データについては修正に加え、Pb や Cr 同位体について新たに評価したデータを追加している場合もある。詳細はウェブページ[3]を参照して頂きたい。

JENDL-4.0u では、それぞれの核種ごとに管理がなされており、核種ごとに公開された順番に u1, u2, ... とバージョンを付けている。たとえば  $^{48}\text{Ti}$  の u2 公開後、 $^{156}\text{Eu}$  の u1 が公開されている。JENDL-4.0u 全体としてはアップデートファイルを公開するごとに、すべての改訂を集めたファイルに日付に対応したバージョンを付けており、一括ダウンロード可能となっている。現在は Ver. 20160106 である。しかしながら、このバージョン管理は分かりにくいとの声がある。また、JENDL-4.0u では見つかった不具合を速やかに修正して提供するという考えであるが、一方で積分的な検証を実施し、その情報を提供すべきだとの意見もある。現在のところ JENDL-4.0u の改訂は、共分散を除くとマイナーなものに限られるため、JENDL-4.0 で実施した積分テストに影響はほとんどない。しかしながら V&V という観点からは、積分テストが必要かもしれない。JENDL-4.0 では積分テストは個々人の研究者に依存していたが、積分テストはその研究者への負担が大きいため、ライブラリーの開発を優先できない場合がある。積分テストを速やかに実施するためには、自動化されたシステムを組織的に整備することが不可欠であるが、この点については JENDL 委員会リアクタ積分テスト WG のベンチマークデータ整備と JAEA で開発が進んでいる自動検証システム VACANCE の完成が待たれる。バージョンを分かりやすくし、積分テストを実施する案として、現時点での JENDL-4.0u を JENDL-4.0 と組み合わせたライブラリーを JENDL-4.0.1 として公開する案があり、現在検討中である。このような状況を受けて、アップデートファイルは JENDL-4.0 のみとし、次期汎用ファイルでは従来通りデータの更新時にバグフィックスを行い、JENDL-5, JENDL-5.1, ... として公開したいと考えている。ただし、同様のデータ更新方法をとった JENDL-3 の開発時と比較して、短い間隔でマイナーバージョンアップを行い、バグを比較的早く解消する考えである。

## 2.2 JENDL-4.0/HE

2015 年 11 月に公開した JENDL-4.0/HE は加速器利用のため JENDL-4.0 の中性子データを高エネルギーへ拡張すると共に、陽子入射反応のデータも合わせて収録した特殊目的ファイルである[4]。JENDL の高エネルギーファイルとしては、JENDL/HE-2004 と JENDL/HE-2007 が過去に公開されており、3 GeV までのデータを含むが、JENDL-4.0/HE では 200 MeV までのエネルギー領域に絞ったデータを収録している。これは

JENDL-4.0/HE は PHITS 等のシミュレーションコードで利用することを想定しており、これらのコードでは組み込まれている核反応モデルにより 200 MeV 以上の高エネルギーにおいて十分に良い精度で計算が可能であるためである。

JENDL-4.0 の核データ評価のため開発した核反応モデル計算コード CCONE について、前平衡過程からの多粒子放出を可能にするなどの改良を実施し、JENDL-4.0/HE で必要とされる 20 MeV 以上のエネルギーでの反応計算への適用性を高めた。JENDL-4.0 で開発したグローバルな光学ポテンシャルを組み合わせることにより、測定データの再現性が高まり、Si から Bi までの多くの核種に対して系統的な計算により、多くの核種で JENDL/HE-2007 より改善されたデータを提供することができている。軽核については新たな R 行列理論解析コード AMUR を開発し、加速器中性子源として重要となる Li や Be 同位体の陽子入射データを評価した。この評価においては、陽子に加え、中性子、アルファなどの様々な反応チャンネルを同時に解析することにより、信頼性を向上させたデータを提供している。

### 2.3 JENDL/PD-2016

光核反応データは電子線加速器やガンマ線の遮蔽等で重要であり、現行版として JENDL/PD-2004 が公開されている。しかしながら、核種数が 68 と少ないため、利用範囲が限られている。JAEA では収録核種数を大幅に増大させた JENDL/PD-2016 を開発し、近く公開予定である。JENDL/PD-2016 では主要 181 核種を収録した標準版と、2600 核種を網羅した拡大版を提供する予定である。JENDL/PD-2004 からは重水素を除くほとんどの核種のデータを改訂している。ENSDF や RIPL のデータを活用し、ALICE-F や CCONE 等の核反応モデル計算コードを使用して評価を行っており、140 MeV までの光子エネルギーに対するデータを提供する予定である[5]。

### 2.4 JENDL/AD-2017

原子炉施設の廃止措置では構造材等の微量元素を含む放射化量の評価が必要となる。JENDL/AD-2017 は原子炉で生成される可能性がある半減期 30 日以上、227 核種と超長寿命 12 核種を対象とし、これらを生成する 304 核種についての核反応の断面積を特殊目的ファイルとしてまとめたものである[6]。放射化断面積は 1996 年に 233 核種を収録した JENDL/A-96 を公開しているが、多くの捕獲反応断面積が 0 K に於いて 70 群構造で与えられている。JENDL/AD-2017 では、0 K と 293.6 K の 2 種類の温度に対して、ポイントワイズのデータを与える予定であり、より詳細な共鳴構造が考慮できるものとなっている。現在公開のための準備を行っており、近く公開予定である。

## 2.5 JENDL/FPD-2011 & JENDL/FPY-2011

JENDL/FPD-2011 は 1284 の核分裂生成核種についての崩壊データをまとめたものである。前バージョンの JENDL/FPD-2000 の公開後の TAGS (Total Absorption Gamma-ray Spectroscopy) の測定データ等の知見を反映させて改良したものである[7]。これらの崩壊データの収録核種に合わせて、核分裂収率データも JENDL/FPY-2011 として改訂している。さらに、公開後見つかった  $^{235}\text{U}$  の熱中性子核分裂の収率データの不自然なデータを修正するなどした改訂版を公開している。[8]

## 2.6 JENDL/DDF-2015

JENDL では従来、FP の崩壊データは提供していたが、原子炉や加速器で生成される放射化量の評価には FP 以外の崩壊データが必要となる。JENDL/FPD-2011 に ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File) の情報を加え、実用上生成しうる核種はすべて網羅した中性子、水素 ( $Z=1$ ) から Rf( $Z=104$ )までの 3,237 核種を含む崩壊データを特殊目的ファイルとしてまとめて、2015 年に JENDL/DDF-2015 として公開した[9]。

## 2.7 JENDL-5

JENDL-4.0 の開発時は軽水炉の高経年化・長寿命化等に焦点があてられたが、ファイルを公開してすでに公開して7年が経過し、原子力を取り巻く状況も大きく変化している。核データライブラリーの開発もニーズに合わせて対応していく必要がある。JAEA では JENDL の開発のために JENDL 委員会が組織されている。JENDL 開発の今後の方向性を検討するため、JENDL 委員会の下に、2013 年に「JENDL 開発検討小委員会」が設立され、JENDL の開発者、利用者、核データの測定者らが委員となり、JENDL の課題と対策について議論が行われた。詳細は JAEA のレポートとして、答申が出されている[10]。原子炉の廃止措置や放射性廃棄物処理・処分等のバックエンドを重視する必要があると共に、核分裂炉以外の様々な放射線の利用分野への対応についても言及されている。現在特殊目的ファイルとして整備されている様々なデータは本来一つの整合性がとれた核データライブラリーとなるべきものであるが、「JENDL 開発検討小委員会」の提言でも具体的に取り組むべき課題として示されている。また、原子炉の核計算で良好な結果を示すことは不可欠である。核データの最大の利用先であると共に最も精度を要求される原子炉の核計算に対して信頼性の高いデータを提供することは核データライブラリーの生命線とも言える。JENDL-5 の開発では、バックエンド等に関する新たな応用先へ対応しつつ、従来の利用先である核分裂炉関連分野へ信頼性の高いデータを提供するものでありたいと考える。

具体的な計画として、JENDL-5 は JAEA の中期計画の最終年度にあたる 2021 年度の公開を目指して開発を進めている。バックエンド利用への課題に対応しつつ、新たな知見

を反映させることは重要である。臨界性などの積分計算では、反応間の相殺効果が存在する。積分テストで問題が指摘されていない場合でも、微分的な観点で見直していくことが必要である。JENDL-4.0 では MA や FP に重点がおかれたため、軽核や構造材の見直しが進んでいなかった。OECD/NEA の核データ評価国際協力プロジェクト CIELO の対象でもある  $^{16}\text{O}$  のデータは議論の余地が示されており、改訂が必要である。また、Cu については FNS の DT 中性子源を用いた積分実験との不一致が指摘されるなど構造材についても問題がある可能性がある。ADS 核変換システム等のバックエンドに関わる技術開発でも核データの誤差は重要である。軽核や構造材では殆ど共分散データが整備されておらず、共分散データ評価のためにもこれらの核データの見直しが必要となる。JAEA ではこれらの核種の評価を進めており、成果は原子力学会や核データ研究会で報告している。JENDL-4.0 では MA や FP のデータを改訂の中心としたが、核変換システムの開発や精度良い燃料中のインベントリ評価のために、これらのデータの精度向上が望まれている。J-PARC では、現在 Am や Np などの主要な MA や FP の捕獲断面積のデータが最近測定されている。これらの実験の詳細が入手可能であり、JENDL-5 では MA や FP についてデータの精度向上が期待される。今後これらのデータについて共鳴解析を含む核データの評価を実施する予定である。JENDL-4.0 では Pu 溶液系の臨界性の予測が悪かったが、これは他の核データライブラリーでも同様であり、WPEC のサブグループの枠組みで国際的な研究協力がなされ、改善された結果を与えている[11]。また、国際的な核データ評価の枠組みである CIELO が近く終了する。CIELO では主要核種について新たな測定や評価値の改訂がなされており、これらの知見を検討していくことは、核計算の予測精度向上に直接つながる重要な課題である。

### 3. V&V への要望

核データライブラリーは世界で ENDF や JEFF を始めとする複数のプロジェクトが存在しており、常に比較の対象となる。JENDL-5 が魅力あるものであるためには、他のライブラリーと比較し、ベンチマークテストにおいて少なくとも同等以上の性能を示すことが必要である。臨界性などの積分データは非常に高精度で測定されており、微分データのみで改善するのは困難である。核データを改善していくためには感度解析を基に、微分データを検討していくことが必要となる。積分実験の質も重要である。質の高いデータからのフィードバックが望まれる。JENDL 委員会リアクタ積分テスト WG で整備されている積分テストのデータベースに期待する。

JENDL-4.0u でも改訂されているが、ENDF フォーマット上は問題ないが NJOY で処理できないという理由から核データファイルを修正することが、しばしば起こる。これはユーザの利便性を考えてのことであるが、現在 JAEA で新たに開発されている核データの処理コード FRENDRY により、JENDL-5 ではこのような修正は必要なくなることが期待

される。また、FRENDY にはデータの不具合についてのチェック機能があるとのことであり、この点でも期待が持てる。

JENDL の研究開発を活力あるものにするためには、多くの方々からのフィードバックが不可欠である。JENDL に関して何かあれば、私へ直接でも JENDL の窓口である jendl@jaea.go.jp へでもご意見をいただければ幸いである。

## 参考文献

- [1] K. Shibata et al., "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering," *J. Nucl. Sci. Technol.* **48**(1), 1-30 (2011)
- [2] G. Chiba et al., "JENDL-4.0 Benchmarking for Fission Reactor Applications," *J. Nucl. Sci. Technol.* **48**(2), 172-187 (2011)
- [3] JENDL-4.0 Updated Files, <http://wwwndc.jaea.go.jp/jendl/j40/update/>
- [4] JENDL-4.0 High Energy File, <http://wwwndc.jaea.go.jp/ftpnd/jendl/jendl40he.html>
- [5] N.Iwamoto, K.Kosako, T.Murata, "Photonuclear Data File," JAEA-Conf 2016-004, pp.53-58 (2016)
- [6] K.Shibata, N.Iwamoto, S.Kunieda, F.Minato, O.Iwamoto, "Activation Cross-section File for Decommissioning of LWRs," JAEA-Conf 2016-004, pp.47-52 (2016)
- [7] J. Katakura, "JENDL FP Decay Data File 2011 and Fission Yields Data File 2011," *JAEA-Data/Code 2011-025* (Mar 2012)
- [8] JENDL FP Fission Yields Data File 2011, <http://wwwndc.jaea.go.jp/ftpnd/jendl/jendl-fpy-2011.html>
- [9] J. Katakura and F. Minato "JENDL Decay Data File 2015," *JAEA-Data/Code 2015-030* (Mar 2016)
- [10] 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, 日本原子力研究開発機構(2015)
- [11] NEA/WPEC-34, International Evaluation Co-operation Volume 34, Co-ordinated Evaluation of Plutonium-239 in the Resonance Region, NEA/NSC/WPEC/DOC(2014)447, OECD 2014