連載
講座

核データ研究の最前線

～たゆまざる真値の追及, そして新たなニーズへ応える為に～

第8回(最終回) 核データライブラリ JENDL の進化

日本原子力研究開発機構 岩本 修, 柴田 恵一, 岩本 信之
北海道大学 千葉 豪

核データライブラリは核データ研究の集大成となる成果物である。すなわち核データは利用されて初めて価値があり、核データ研究の最終的な出口が核データライブラリとなる。日本の核データライブラリである JENDL の変遷や現状を紹介し、国際的状況にも触れつつ今後の展望を示し、8 回にわたる連載講座の最後とする。

KEYWORDS: *Nuclear Data, JENDL, Past, Present, Future, Evolution*

I. 汎用ライブラリの変遷と JENDL-4.0

中性子汎用核データライブラリは歴史的には 1960 年代の英国 UKNDL (UK Nuclear Data Library) とドイツ KEDAK (KErnDATen Karlsruhe) にその端を発する。但し、それらの活動は 1980 年代初めに終了し、1981 年に OECD/NEA データバンクの下でスタートした JEF (現在は JEFF) プロジェクトが欧州での核データ整備を引き継ぐことになった。米国では UKNDL 及び KEDAK から若干遅れて 1960 年代後半から独自のライブラリである ENDF の開発が始まり、現在に至っている。一方、日本ではやはり 1960 年代から旧日本原子力研究所のシグマ研究委員会及び日本原子力学会シグマ特別専門委員会(両委員会を総称してシグマ委員会と呼ぶ)の下で核データ評価活動が開始された。日本独自の汎用ライブラリ JENDL¹⁾を持つことに至った背景には、1)「もんじゅ」開発のための臨界実験の詳細解析をする上で、素性の知れた独自の核データライブラリの存在が不可欠である。2)原子力の自主開発を進めるのに基本的なデータベースを外国産に頼るのは危険である。等の認識が当時のシグマ委員会メンバーにあったことによる。結果的にこの認識は的を射たものであり、現在、わが国が核データ大国として原子力の様々な分野で独自の展開を可能と

することにつながる英断であった。

1977 年に完成した JENDL (Japanese Evaluated Nuclear Data Library) 汎用ライブラリの第 1 版 JENDL-1 は、前述の経緯から高速炉開発を主目的とするものであった。この開発を行うに当たり、核反応モデルコード、データ編集コード、データ可視化コード等の開発研究を事前に行って来た。収納核種数 72、上限エネルギー 15MeV で、現在の汎用ライブラリに比べると極めて小ぶりのものであったが、高速炉の諸特性を当時としては十分な精度で予測できた。これを弾みとして、高速炉のみならず熱中性子炉、遮蔽、核融合中性子工学への応用も考慮した汎用ライブラリ JENDL-2 の開発が直ちに進められた。収納核種数は 181 に増え、上限エネルギーも核融合を考慮して 20MeV とされた。JENDL-2 は 1982 年に公開され、その予測精度は核分裂炉に対しては高いものであったが、残念ながら 14MeV 中性子を扱う核融合中性子工学では不十分な結果となってしまった。これは、評価に使用した核反応モデルが 10MeV 以上のエネルギー領域の物理現象を適切に記述できるものではなかったことに起因する。この問題の解決には次版である JENDL-3 の登場を待つことになる。

1980 年代は ITER 開発計画と相まって核融合中性子工学が世界的に注目を浴びた。日本では、旧日本原子力研究所、大阪大学、東北大学等の D-T 中性子源を持つ施設で、実験的研究が盛んに行われた。上述の様に JENDL-2 は核融合中性子工学への適用に問題があったので、シグマ委員会は真の汎用ライブラリを目指して JENDL-3 の開発に着手した。1989 年に JENDL-3.0 (171 核種)、1990 年に JENDL-3.1 (324 核種)、1994 年に JENDL-3.2 (340 核種)そして 2002 年に JENDL-3.3 (337 核種)を公開した。それぞれの版の詳細説明は省くが、

Cutting-edge studies on Nuclear Data for Continuous and Emerging Need (8) ; Evolution of the nuclear data library JENDL : Osamu Iwamoto, Keiichi Shibata, Nobuyuki Iwamoto, Go Chiba.

(2018 年 1 月 16 日 受理)

■前回タイトル

第 7 回 高エネルギー領域への挑戦

3.1 は 3.0 に FP 核種を追加, そして 3.2 および 3.3 はその時々での問題点を解消した改訂版である。JENDL-3 シリーズでの幾つかのトピックを挙げてみる。軽核では, 核融合でのトリチウム増殖に関係する ${}^7\text{Li}(n,n't){}^4\text{He}$ 反応断面積が当時の ENDF/B-IV に比べ 14MeV で約 10% 小さくなった。この結果は核融合炉ブランケットの設計に大きな影響を与えることになった。中重核の評価では, 高エネルギー中性子入射による核反応をより正確に記述する理論モデル(直接反応, 前平衡反応)を採用したことにより, 14MeV 中性子入射に伴う放出中性子スペクトルを高精度で予測可能になり, JENDL-2 での問題点を解決することができた。また, 重要な U 及び Pu 同位体の核分裂断面積に関して, それぞれの反応の測定値に加えて, 比測定値(例えば, ${}^{239}\text{Pu}(n,f)/{}^{235}\text{U}(n,f)$ 等)も考慮した一般化最小自乗法に基づく同時評価を数 10keV 以上のエネルギー領域で実施した。これにより, 全体としてバランスのとれた最適な核分裂断面積の評価が可能となった。さらに JENDL-3 シリーズで特筆すべき点として, ガンマ線生成断面積, 放出中性子二重微分断面積及び共分散データがあげられる。ガンマ線生成は核発熱の計算, 二重微分断面積は核融合炉の設計計算で必要とされていた。一方, 共分散は評価済みデータの不確かさを示す量として, 特に, 高速炉開発で強く求められていた。JENDL-3 シリーズの最終改訂版となる JENDL-3.3 ではガンマ線生成が 114 核種, 二重微分断面積が 60 核種そして共分散が 20 核種に与えられた。

現時点での最新版である 2010 年に公開された JENDL-4.0(406 核種収納)では, 重要核種データの見直しとともに, 革新的原子炉開発, 軽水炉の高燃焼度化・MOX 燃料利用などを考慮してマイナーアクチノイド(MA)及び核分裂生成物(FP)データの信頼度向上に重点を置いた²⁾。測定値の少ない MA 及び FP の評価では理論計算が多用される。そのために, 新たに最新の核物理的知見を反映した核反応モデルコードを開発した³⁾。前版 JENDL-3 では主に外国産のモデルコードを使っていたが, JENDL の開発経緯を鑑み独自のコードを作成した。これにより, 核データ評価における理論的予測のポテンシャルが向上した。更に, 核反応計算で重要な核子のチャネル結合光学モデルパラメータを新たに導出し⁴⁾, 上記のコードとともに高速中性子エネルギーでの評価に使用して, 断面積の精度を高めることができた。一方, アクチノイド核種の熱中性子捕獲及び核分裂断面積は, 測定データがある場合は標準断面積で再規格化して測定年代, 実験誤差及び評価者の判断による重みを考慮した平均から算出した。測定値がない場合は, 近傍核の系統性及び理論計算値を加味して求めた。図 1 に熱中性子断面積のライブラリ間の変化を示す。 ${}^{235,238}\text{U}$ と比べて MA の変化が著しく不確かさが大きいことがわかる。

図 1 熱中性子断面積のライブラリ間の変化
 ${}^{237}\text{Np}$ 及び ${}^{245}\text{Cm}$ は JENDL-1 には収納されていない

通常, 核データライブラリはその公開に先立って, 種々の臨界集合体や放射線遮蔽模擬体系などで取得された実験データ群に予め適用され, その性能が確認される。このようなときに用いられる実験データは, 中性子エネルギーや多くの核種からの寄与の積分値として決まることから, 断面積などの測定データである「微分データ」に対して「積分データ」と呼ばれる。積分データを用いた核データライブラリの検証作業は核データライブラリ開発の重要な一つの過程と言える。

核データライブラリの検証に用いられる積分データとしては, 高速および熱中性子系の臨界データや核融合中性子の遮蔽データなどからなる特定のデータセットが一般的に用いられてきたが, 近年, これまでに世界各国の実験施設で取得された臨界・遮蔽実験データを見直し, データベース化するという複数のプロジェクトが始動した。その結果, 膨大な数の積分データが整備・公開された。例えば, 「国際臨界安全ベンチマーク評価プロジェクト」で整備されたデータベースには, 2015 年時点で 5,000 弱もの臨界データが含まれている。近年の核データライブラリの積分検証にはこれらのデータベースが積極的に活用されている。

核データライブラリの検証の過程で積分データの再現性に問題があった場合には, それを核データ評価にフィードバックすることになる。そのため, 検出された問題の原因となっている核データを特定する必要がある, そこでは積分データの個々の核データに対する感度を定量化することが求められる。中性子の輸送計算や原子核の生成・消滅計算の結果得られる積分データの核データに対する感度の計算手法は, 原子炉物理学の分野

図2 高速中性子炉の臨界パラメータに対する予測精度 (JENDLを用いる計算値(C)を実験値(E)で割った値) 縦棒は実験値の誤差を表す

で精力的に開発が進められ、JENDL-4.0の開発ではこの技術が極めて効果的に活用された。原子核理論、原子核実験の専門家が主となって作られてきた核データライブラリであるが、今やユーザー側も一体となった開発が世界的な潮流となっている。その先鞭をつけたのがJENDL-4.0と言えるかもしれない。

図2にJENDL-4.0の積分検証の結果⁵⁾を、古いバージョンであるJENDL-3.3の結果とともに示すが、予測精度の劇的な向上が図られていることが明らかであろう。また、近年は核データに対して、その最も確からしい値とともに、その「不確かさ」を与えることがユーザー側からの要求により必須となってきている。積分検証の情報を核データ評価に反映させた場合、個々の核データの不確かさもその影響を必然的に受けることになる。高い予測精度に加えて、高い信頼性を兼ね備えた核データライブラリの開発を目指して、現在も世界で精力的な研究活動が行われている。

II. 特殊目的ファイルの最近の進展

汎用評価済ライブラリとは別に、核データ利用の広がりや新たなニーズを受けて、崩壊データや放射化、高エネルギー・光核反応等に対する特殊目的ファイルが開発されている。ここでは、特殊目的ファイルに関する最近の進展⁶⁾について紹介する。

原子炉ではUやPuの核分裂反応で生じたエネルギーを利用して、発電を行っている。では、それらが核分裂を起こした後は、どのような核種が残るのだろうか。核分裂生成物の核種分布(核分裂収率)を知ることは、特に核廃棄物処理の観点から、長寿命核分裂生成物の生成量や崩壊熱の評価に極めて重要となる。これに応える核データが、36核種の核分裂収率を収納したJENDL/FPY-2011である。このファイルには中性子誘起核分裂収率(31核種)、並びに自発核分裂収率(9核種)に関するデータがそれぞれ収納されている。一方で、生成された核分裂生成物はそのほとんどが不安定であるため、安定な核

種に向けて放射性崩壊を起こす。この過程で放出されるガンマ線やベータ線が使用済み核燃料における崩壊熱の原因となる。このガンマ線やベータ線の平均エネルギーや生成された核種の崩壊様式に関する核データを収納しているのが、JENDL/DDF-2015である。このファイルには1,284核種に及ぶ核分裂生成物のみならず、中性子やHからRf(原子番号104)までの3,237核種の崩壊データが収納されている。これらのデータのうち、核分裂直後に生成された核種の多くは短寿命であるため、崩壊様式や発生するエネルギーさえ、あまり分かっていない。これらの崩壊データの評価に理論計算⁷⁾を採用することでこの困難を克服し、さらに崩壊で発生するガンマ線を捉える全吸収ガンマ線分光(TAGS)法による測定データを取り入れることで、崩壊データの精度向上が図られている。

さて、原子炉施設の廃止措置を行う上で、施設の放射化量を推定するための放射能インベントリ評価は欠かすことができない。この評価を実施するのに必要な核データは、中性子輸送計算用の汎用ライブラリと放射化量推定用の放射化断面ファイルになる。後者の用途のために開発されたJENDL/A-96(1996年公開)には、233核種が収納されている。しかしながら、線量限度等を定めた告示に示されている原子炉施設で放射能評価を行う必要のある半減期30日以上、もしくは超長寿命の核種の生成に関与する親核種は311種あり、JENDL/A-96のデータだけでは不十分である。そこで、特に軽水炉施設の廃止措置への利用に向けたJENDL/AD-2017が開発され、上記311核種が収納された。この放射化断面ファイルには各核種の生成断面が収納されているが、原子核の基底状態とは別に、エネルギーが高く寿命の長い準安定状態にある原子核(アイソマー)の生成断面を含むことに大きな特徴がある。これにより精度の高い放射能評価が可能となる。それでは、なぜインベントリ評価を行うのに二つのファイルが必要になるのか不思議に思うかもしれない。応用面から考えれば、輸送計算に必要な汎用ライブラリに放射化断面が収納されていれば、すっきりする。残念ながら、このようなデータの収納はJENDL-4.0においてさえ、3核種のみであり、また多くの核種に対して両データを整合させるのは大変な作業になるため、統合が進んでいない。しかしながら、今日の原子炉施設の高経年化を考慮すると、放射化断面の重要性は益々高まるものと考えられるため、今後の汎用ライブラリ開発においては放射化断面も統合して収納し、この問題を解消していく必要がある。

核データは原子炉施設のみならず、陽子加速器施設の遮蔽設計などにも利用される。このような分野への利用に対応した核データとして、高エネルギー核データファイルJENDL-4.0/HE(2015年公開)がある。このファイルには、最大200MeVまでの中性子及び陽子入射に対してそれぞれ130及び133核種の核データが収納されてい

図3 ${}^7\text{Li}$ 標的への陽子入射により0度方向へ発生した中性子のエネルギースペクトルに対する実験値と評価値との比較

る。中性子入射核データは20MeV以下のデータを収納したJENDL-4.0を基に拡張されており、ユーザーの利便性と核データの整合性を確保している。また、陽子入射核データには、ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)などにおける中性子発生ターゲットとして注目される ${}^6,7\text{Li}$ や ${}^9\text{Be}$ が新たに収納され、これらを用いた装置開発などへの利用が見込まれる。図3に、 ${}^7\text{Li}$ 標的への陽子入射により、0度方向へ発生した中性子のエネルギースペクトルを示す。TENDL-2015ライブラリ(オランダ)と比較すると、JENDL-4.0/HEの実験値への再現性が高いことが分かる。なお、ピークエネルギーのずれは、標的中における陽子の減速が考慮されていないためであると考えられる。

電子線加速器を用いた放射線治療が多くの医療施設で行われている。加速器の高加速電圧化に伴い、電子と物質との相互作用で発生する光子のエネルギーが10MeVを超えるものがある。この高エネルギーの光子が人体や装置、遮蔽材中の原子核と反応し中性子を発生することがある。この中性子は遮蔽材の放射化により従事者への被ばくの可能性を高める一因となるなど、人体に悪影響をもたらす。これらの影響評価や放射化量推定などへ利用されるのが、光子入射に対する核反応データファイルJENDL/PD-2016である。このファイルは、人体や加速器遮蔽材などを構成する主要な181核種を収納した標準版と2,681核種を収納した拡大版で構成され、世界最大級のファイルとなっている。光子のエネルギー範囲は最大140MeVまでをカバーしており、高エネルギー光子による核分裂反応を利用した非破壊検知システムの構築など幅広い分野への利用が可能である。

Ⅲ. 核データライブラリの国際的状況

核データの分野では、多国間の国際協力として2つの大きな枠組みがある。一つは本連載講座第5回で紹介されたIAEA核データセクションの活動であり、もう一つ

はOECD原子力機関の下で実施されている国際核データ評価協力ワーキングパーティ(WPEC)⁸⁾である。WPECでは年一回の会合が開かれ、開発状況等が報告され、国際的に情報が共有されている。現在、開発が活発な代表的な核データライブラリとして、JENDL, ENDF, JEFF, CENDL, TENDLがある。以下にこれらのライブラリ開発の状況(2017年11月現在)を簡単に紹介する。

ENDFは米国を中心として開発されている核データライブラリである。最新版は2011年公開のENDF/B-VII.1であり、423核種に対する中性子反応データを含む。この版ではJENDL-4.0から多くのMAデータが採用された。現在、次期ライブラリENDF/B-VIIIのベータ版が公開されており、近々正式版も公開される予定である。開発にあたり、WPECの枠組みで実施された国際評価ライブラリを作るパイロットプロジェクト(CIELO)の成果が全面的に取り込まれた。CIELOでは世界の核データの研究グループを多く巻き込んでウランや水素、酸素、鉄の主要同位体について、実験や評価、積分テストの広い観点から協力が進められ、その結果得られた多くの知見がENDFに反映された。

JEFFは欧州を中心の開発されている核データライブラリであり、最新版であるJEFF-3.2が2014年に公開された。JENDL, ENDF, JEFFの主要ライブラリ中で最も新しいものであり、472核種に対する中性子反応データを収納している。JEFFには他の核データライブラリからデータが積極的に取り込まれている。次期バージョンJEFF-3.3は550核種を超える中性子反応データを含み、ENDFと同様に近日公開される予定である。

ENDFとJEFFは比較的多くの機関が参加して開発されており、良いものがあれば他の核データライブラリのデータから採用する方針であるが、一方、CENDLはほとんど中国の一研究機関である中国原子能科学研究院で開発されており、対極的である。現在、2009年に公開されたCENDL-3.1が最新版であり、240核種を収納している。次期CENDL-3.2の開発が着実に進められている。

TENDLは通常の評価済核データライブラリとは大きく異なる考え方で開発されている。核データを一つ一つ評価するのではなく、単一の原子核反応計算コードTALYSを全面的に使用して、非常に多くの核種の核データを系統的に評価している。このため、非常に多くの核種に対してデータを作成可能である。現在の最新版はTENDL-2015で、2,809核種の中性子反応データを収納している。また、陽子やアルファ粒子等の核反応データにも、2,800を超える核種のデータが含まれている。

IV. JENDL の展望と核データ研究 (連載講座の結びに代えて)

JENDL は日本国内の原子力開発の基盤を与えるものとして、開発されてきた。現在の JENDL-4.0 は軽水炉や高速炉、核融合炉等へ広く利用でき、これらの応用に対する様々なベンチマークテストでも良い結果が得られている。世界的に見ても、JENDL の信頼性は高く、ENDF, JEFF はいうに及ばず、IAEA が取りまとめた核融合炉のための核データファイル FENDL 等でも JENDL から多くのデータが採用されている。これらの成果はひとえに開発に携わった先人たちがこれまで積み上げてきた努力の賜物である。

しかしながら、本連載講座第 1 回で述べられているように現在の核データライブラリでニーズを満たしているわけではない。原子炉の臨界性などでは非常に高精度(典型的には実効増倍率で 0.1% のオーダー)の予測が求められているが、標準とされる一部の断面積を除くと通常の断面積の精度はせいぜい 1% 程度である。幅広い利用に対して、近い将来この精度を満足する核データの提供は難しいだろう。今できることは、現在の核データの不確かさを示し、その不確かさに基づいて合理的な核データの利用を促すことである。JENDL-4.0 で核データの不確かさを示す共分散データはアクチノイドを中心にかなり充実した。しかし、まだ十分とは言えない。加えて、妥当な共分散データを得るにはどのようにすれば良いか、また、その確からしさをどう担保するかは現在の課題であり、国際的にも盛んに議論や研究が進められている。

現在の科学技術開発において数値計算の果たす役割が非常に大きくなっており、これを支える核データも多様なものになる。対応するには核反応や核構造に関する理論的な理解が欠かせない。また、連載講座第 2 回で述べられたように実験データに理論的な解析を加えることで、核データの精度向上につながる。

現在の核データライブラリ開発において、WPEC や IAEA 核データセクションの存在感が増している。最近の核データライブラリの進展は、これらの国際協力なしには語れず、これからもこの傾向は続くであろう。その一方で、それぞれの国や地域における技術開発の方向性に応じて優先度が異なるため、核データの独自開発を続けていくことが必須であり、国際協力は独自の技術力を有することが大前提となる。それぞれの核データプロジェクトが、それぞれの優先度に従い開発を進めつつ、国際協力により共通の課題に取り組むことが相互の利益

につながるといえる。

JENDL は次期版として JENDL-5 の開発を進めている。アクチノイド以外の核種についても共分散データを充実させ、すべての安定核種のデータを含めたライブラリを 2021 年度に公開することを目指している。JENDL の開発では、日本国内の核データへの要望を満たすため、国際協力を活用しつつ、分野間の連携を深めて JENDL をさらに進化させていくことが必要である。そのためには、今後も核データ研究を魅力あるものとして、特に若い世代の研究者を含む多くの人を引き付けて行くことが重要であろう。この 8 回にわたる連載講座が、そのきっかけになれば幸いである。

(余談)副題にある「真値の追及」は「真値の追求」と書かれるべきであるが、これは核データの値について核データの研究者が常に追及されていることの表れともいえ、ご容赦願いたい。

－ 参考資料 －

- 1) K. Shibata, J. Nucl. Sci. Technol. 50, 449 (2013).
- 2) K. Shibata et al., J. Nucl. Sci. Technol. 48, 1 (2011).
- 3) O. Iwamoto, J. Nucl. Sci. Technol. 44, 687 (2011).
- 4) S. Kunieda et al., J. Nucl. Sci. Technol. 44, 838 (2007).
- 5) G. Chiba et al., J. Nucl. Sci. Technol., 48, 172 (2011).
- 6) O. Iwamoto et al., EPJ Web of Conf. 146, 02005 (2017).
- 7) K. Takahashi et al., Atom. Data and Nucl. Data Tables, 12, 101 (1973).
- 8) E. Dupont et al., Nucl. Data Sheets 120, 264-267 (2014).

著者紹介

岩本 修 (いわもと・おさむ)

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター
(専門分野/関心分野)核データ, 核物理, 原子炉物理, 放射線工学

柴田恵一 (しばた・けいいち)

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター
(専門分野/関心分野)核データ評価, 原子核物理

岩本信之 (いわもと・のぶゆき)

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター
(専門分野/関心分野)核データ, 原子核物理, 宇宙核物理

千葉 豪 (ちば・ごう)

本誌, 59[10], p.48(2017)参照。