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1回 多様化する原子核工学と核データのニーズ

日本原子力研究開発機構 須山 賢也, 国枝 賢, 深堀 智生
北海道大学 千葉 豪

核データとは狭義には原子核と中性子の反応の確率であるが、一般的に言えば、原子核の物理的变化や反応の様子を表現するデータの事である。我が国が原子力開発に着手して以来、核データの開発は重要な技術開発のテーマであり、現在我が国の核データライブラリ JENDL は世界で最も高い精度と完備性を兼ね備えた核データファイルの一つとして国際的に認知されている。本連載講座では、原子力開発に関係している方々を対象とし、シグマ特別専門委員会の監修を経て、核データ開発の意義、核データの開発の最新の状況、国際的な動向、そして今後の開発の方向性を解説する。

KEYWORDS: Nuclear Data, JENDL, Needs, Diversifying Applications

I. 「核データ」ってなに？

一般に原子力分野で核データと言えば、中性子が原子核にぶつかって核反応を起こす確率を表すデータの事を言うことが多い。これは、核反応の確率の単位が面積の単位になるために「中性子反応断面積」と呼ばれる。

一方で広義の核データもある。原子核の反応に関するデータだけではなく、放射性壊変の半減期、その際に放出される放射線のエネルギーや強度等も原子核に固有の物理的事象に関係したデータであり、それらを含めた総称を「核データ」と言う場合がある。したがって、核データを論じる場合には極めて幅広い原子力の応用先と物理量をカバーしなければならないし、分野によって核データに対するイメージが異なることも認識しなければならない。すなわち、核データはあらゆる原子力関係の技術開発の基盤となっている。

本連載講座では、「核データ」と呼ばれる、「計測もしくは評価」によって得られた、ぱっと見ただけでは無味乾燥な数字の羅列、しかし長年にわたって世界中の関係者が情熱を注いで育ててきたデータ群についての現状と課題を、今回を含め8トピックスでお届けする予定である。

Cutting-edge studies on Nuclear Data for Continuous and Emerging Need (1) ; Diversifying Nuclear Applications and Need for the Nuclear Data : Kenya Suyama, Satoshi Kunieda, Go Chiba, Tokio Fukahori.

(2017年7月26日 受理)

II. 「核データ」は何に使われるの？

核データは、原子核の主として中性子との反応やその放射性崩壊に関わる全てのデータを含んだ概念であるため、原子核が主役となるあらゆる分野で使われるデータであると言って過言ではない(図1)。

核データ開発の第一の動機はエネルギー分野での利用であり、原子力開発の初期から精力的にその改良が続けられてきた。中性子と原子核があり、その反応が二つを結びつけるものであれば、当然のように「核データ」が登場する。原子炉内での中性子の吸収、散乱、核分裂等に伴う生成消滅や飛行の挙動はボルツマン方程式で表されるが、核データはボルツマン方程式に入力することが必須のデータであるため、その精度向上は、原子力開発の

図1 核データ利用の広がり

初期段階から、原子炉の様々な特性の評価精度向上に直結する重要な技術開発項目である。

また、エネルギー分野とは異なる放射線利用でも核データは利用される。放射能が発見された当時から放射線の医療分野への応用は試みられていたが、現在ではさらに先端的な手法として加速器や原子炉を用いたがん治療が研究されており、最近は特に荷電粒子を使った治療も注目を浴びている。このような施設の設計において第一にすべきは、検討している体系において照射したい部位における粒子のエネルギー分布やどの程度の粒子数が得られるかをシミュレーションすることである。その際、入射粒子に対する核データが必要なのはもちろんであるが、核反応で生成する二次粒子まで含めた核反応の核データも必要となる。放射線はがんも殺すが、浴びすぎると健康被害がある。がん細胞の照射量予測精度の向上が患者の利益になるため、患者の治療計画や被ばく管理のための放射線輸送計算が必須となり、核データは不可欠なデータとして用いられる。

その他、福島第一原子力発電所事故対応においても、核データは重要な基礎データを与えている。格納容器内の放射線分布の評価計算や燃料デブリの臨界安全性を評価するには原子炉の臨界を評価するのと同様な計算手法がそれぞれ適用されているし、半減期や放射線の放出確率といった「広義の核データ」も広く使用されている。さらに、燃料デブリの発生する放射線のうち中性子は、アクチノイド元素の自発核分裂のみならず^{17, 18}O(α , n)反応等によっても発生するため、反応閾エネルギーが低い幾つかの軽い原子核に対する α 粒子入射の断面積も重要な基礎データとなる。

また、宇宙における元素合成の研究でも核データが必要とされるなど、核データは理学から工学までの、原子核が主役となる様々な最先端科学分野において、必要不可欠なデータとしての役割を果たしている。

Ⅲ. 核データライブラリの概要

上に述べた様に、核データを利用する目的は様々である。今やその利用目的は原子力や放射線工学のみならず、基礎科学や医療分野等々と多岐にわたっている。よって必要とされる断面積はもちろん核分裂断面積だけでは無い。また、反応する中性子のエネルギーは数 GeV の高エネルギー領域から熱中性子領域を含む非常に広範な範囲に及んでおり、非常に多様なデータが核データには含まれている。

現在、核データと呼ばれるファイルには、「中性子汎用データライブラリ」と呼ばれるものと「特殊目的ファイル」と呼ばれるものがある。

中性子汎用核データライブラリとは、ほぼ全ての安定な核種および半減期の長い主要な不安定核種に対して、

表1 主な JENDL 特殊目的ファイル

ライブラリ名(略称)	概要
JENDL-4.0/HE	中性子及び陽子入射反応断面積を格納した高エネルギーライブラリ(< 200MeV)
JENDL/DDF-2015	中性子から原子番号 Z=1-104 の同位体(約 3200 核種)を網羅した崩壊データ
JENDL/AN-2005	α 粒子入射核反応による中性子生成断面積
JENDL/PD-2004	140MeV までの光子入射反応データ

広範なエネルギー領域における中性子核反応断面積データ全てが収録された応用範囲の広いライブラリの事を指す。我が国では JENDL¹⁾、米国では ENDF²⁾、欧州諸国では JEFF³⁾と呼ばれるライブラリがそれにあたる。それぞれの国や組織でその品質や完備性を高める研究が進められているが、これらは、データの品質や規模、そしてこれまでの利用実績により「世界 3 大核データライブラリ」と称されている。ロシアや中国においても開発が継続されているが、近年は特に中国の躍進が見られる。

特殊目的ファイルとは、放射性廃棄物の処分のための放射化計算とか核融合のための中性子輸送計算といった特定の応用分野で必要となるデータに着目してまとめられたものである。日本では多様なニーズに極力応えるために、中性子汎用核データライブラリの開発と並行して、特殊目的ファイルの開発も進められてきた。表1に主な JENDL 特殊目的ファイルを示す。

特殊目的ファイルは、核反応断面積だけではなく不安定核の崩壊データや核分裂による核種生成割合も含んでおり、原子炉の計算を行う場合には、中性子汎用データライブラリと組み合わせて使用される事が多い。

Ⅳ. 核データの作り方

現在、原子核の性質である核データを純粋な理論計算のみで導くことは世界最先端の原子核物理を持ってしても不可能である。これは原子核が、中性子と陽子が核力と呼ばれる強く複雑な力で結合した有限量子多体系であることと、核力そのものが未解明であるためである。ゆえに、核データの作成におけるキーワードは、断面積等の「測定」、種々のパラメータを含む「核反応モデルあるいは経験式」と「評価」ということになる。核データは実験によって得られた膨大なデータの中から、評価をする人たちが、「このデータが物理的に正しいだろう」「これらのデータの方が臨界実験や遮蔽実験の解析結果との一致が良い」「核モデル計算との一致はこちらの方が良い」といった情報を総合的に整理して作成する。さらに必要なすべての核データが実験で求められるはずもなく、実験データの存在する他の反応との整合性も考えながら、モデル計算により補ってゆく作業も加わる。このような、実験値と計算値の比較や評価担当者の経験に基づく「専

門家による判断」を取り入れながら核データをまとめるのが「評価」と呼ばれるプロセスである。

我が国では、主に原子力機構の核データ研究グループがその作業を実施している。この評価作業は非常に地道なものであり、多くの知見・経験・ノウハウによって支えられるプロセスである。また、評価を行うべきデータは核データの利用分野が多岐に亘っていることから、国内の多くの専門家の意見を集約するためのシステムとして、原子力機構に「JENDL 委員会」を、日本原子力学会に「シグマ特別専門委員会」を設置し、核データ評価に直結するニーズを幅広く集約して核データ評価に反映させる体制が構築されている。

評価された核データが、前述した「中性子汎用データライブラリ」や「特殊目的ファイル」と呼ばれるファイルであり、それらは、国際的な標準形式となった ENDF-6 フォーマットで記録保存されている。そのため、我が国の JENDL も諸外国でも参照されることとなり、核データの作り方、すなわち「核データ評価」は当然のように国際的活動である。

核データを利用する目的は様々であるが、それに対応するために、究極的には全ての反応粒子やエネルギー領域を網羅する、すなわち完璧な完備性を備えた真の意味での汎用核データライブラリの開発・整備も考えられる。これは欧州のグループが取り組んでいるライブラリ TENDL⁴⁾によって、計算コードによる評価値を全面的に採用することで実現されている。これは未来志向の手法であり、核モデルのみによる計算に頼る部分が非常に多いため現状では信頼性を疑問視している利用者が少なくない。しかし、今後問題になっている点の解決を図っていくことで、核データ評価の可能性をさらに広げることにつながるだろう。

V. 核データ開発を進める体制

我が国の JENDL、米国の ENDF、欧州の JEFF、それぞれが独自の目的によって開発を進めており、お互いが国際協力を進めながらライバルとして切磋琢磨することによって精度や完備性を高めてきている。ここで読者は不思議に思われるかもしれない。「なぜ各国は独自のライブラリ開発を堅持しているのか？」と。

その第一の理由は、核データの測定には多くの不確定要素が伴い、核反応モデル計算においても不確定さを避けることはできないため、数%以上の誤差を含む核データの実験データを元に 0.1% 程度の精度で決まっている炉物理量(典型的には実効増倍係数)を正確に再現できるデータセットを構築する必要があることによる。

当然、そのやり方は一通りではなく、多くの専門家が知識を提供しながら行っているが、各国における原子力や核物理教育及び研究には独特の手法があり、それに

よって最適評価の方法も異なる。すなわち核データは、応用する対象や条件が何であろうと普遍的な、謂わば“物理定数”として位置付けられる数値データであるものの、世界共通に使えるほど(光の速さやボルツマン定数のように)正確に核データを導くことのできる評価手法は確立されていないのが現状であって、国際協力が行われている研究が一部あるものの、基本的には各国が独自で研究開発を進め、知見の共有や切磋琢磨を繰り返すことによってお互いの進展が促進されている。

もう一つの理由は、原子力開発の方向性が国によって異なることである。多くの場合、エネルギー源の獲得が原子力開発の出発点である。軽水炉なのかガス炉なのか、あるいは高速炉や核変換技術開発まで視野に入れるか否かで必要な核データの種類や要求精度は異なる。少なくとも数年～5年単位の時間軸で見た場合は、各国の原子力開発における方向性は必ずしも一致しないため、その目的に資する核データを自らの力で生産することは必要不可欠である。よって、理学と工学の接合領域に位置する核データは、国毎に限られた人材や予算を考え、そして国の需要や事情とも照らし合わせつつ、合理的な体制と方針の下で開発がなされる。

例えば 2010 年に公開されたわが国の核データライブラリの最新版 JENDL-4.0 は、必要性が謳われていた原子燃料の高燃焼度化のための、核分裂生成核種やマイナーアクチノイド核種に対する断面積の評価の成果であった。その後、近年我が国でも大きな課題となりつつある原子炉施設の廃止措置でのプラントの特性評価に必要とされる放射化解析用の断面積の整備が進行している。

もちろん、加速器駆動未臨界システム(ADS)のようにイノベーションに夢を膨らませるような研究で核データが必要になった場合、オーダーメード的な核データが欲しくなることもある。このような国別の事情や要求に応えるためにも、各国における核データ関連活動の活性化は、今後の原子力開発を進める上で重要な課題と言える。

VI. 絶え間なく多様化するニーズへの対応

核データは自国のニーズと国際協力(競争)によって育まれるものである。そのため核データ開発の歴史を見れば、核データがその当時の原子力開発の方向を反映し、時々必要とされる分野をターゲットとして発展してきた事がわかる。

我が国独自の核データライブラリである JENDL の第一版は 1977 年に JENDL-1 として公開された。この JENDL-1 は高速炉関係者の強い要望により開発されたもので、主な適用先は当然高速炉の炉心設計であった。当時は国産高速炉開発の機運が高まっていた頃であり、

数多くの技術・研究開発分野の一つとして、核データが重要な位置付けにあったことが分かる。

その後、高速炉の開発が遅れ軽水炉の利用が長期間に渉中で、軽水炉技術のさらなる成熟が求められ、軽水炉での最新核データの適用が強く求められるようになり、核データ研究の目的の一つに軽水炉側からのニーズに応える事が加えられた。そして、JENDL は版を重ねていくに従いその応用先に核融合炉、軽水炉(JENDL-3 から)が加えられるだけでなく、放射線遮蔽や廃棄物管理(崩壊熱評価)のための核データも整備されていった。

また、近年の計算機シミュレーションの世界では、Verification and Validation(V&V)の考え方が導入され、シミュレーション結果の持つ不確かさを正しく評価することの重要性がクローズアップされている。他分野に先んじて核データの世界では中性子と原子核の反応断面積そのものに加えて、評価値が有する「不確かさ」の情報が重要とされ精力的な検討が行われてきた。これは、応用分野において核データが実用上十分な精度を有するであろうことが広く認識されるようになり、核データを用いて得た予測値と共に、それがどの程度信頼できるかという、より高度な段階に関心が移ったことによるものと言える。核データの信頼性の進展とそれを利用する解析コードの信頼性の向上は車の両輪の如くであり、両者が共に前進して初めて V&V が高度化してゆくものである。実際、ADS などの次世代原子力エネルギーシステムを含む核データの応用分野では、この不確かさの定量化が非常に大きな話題となっている。

さらに、2004 年には核データファイルが扱うエネルギー上限を従来の 20MeV から 3GeV まで拡張した JENDL 高エネルギーファイル(JENDL/HE-2004)が開発、公開され、高エネルギー領域、また陽子入射の核データの整備が行われるようになった。これは原子力エネルギーシステムのみならず、物質科学や医療応用に利用され始めた加速器の遮蔽設計からの強いニーズによるものである。

これらの例が示すように、核データに対するニーズは絶え間なく変化し、また途切れることは無かった。それに対して我が国の関係者は、その時その時のニーズをキャッチして活動の広がりや深化を求めて来た。核データニーズは核計算手法の進展と同期して初めて意味のあるニーズとなるが、それは今後も変わることなく続いていくだろう。

VII. 我が国の核データの未来

核データとは、原子核や原子に関する科学的探究による成果を人類が利用可能にする、つまり、原子核・原子分野において理学と工学の橋渡しをする重要な技術であると言っても過言ではない。このような技術は社会に

にとって重要な資産と言える。一方で、無制限に研究を行って良いという話は今の時代には成立しない。

核データは物理量であり真値と言える値が存在する。従って、全ての核データについて真値が明らかになった時点で、原子核物理的な探求は別として、原子力利用に資するための核データの研究は終わりを迎える。また、応用という観点からは、実際の適用対象(例えば原子炉の臨界量の予測や放射線施設の遮蔽設計)において本当に十分に必要な精度が達成されているのであれば、もしくは核データに起因する不確かさがその他の不確かさ要因と比べて十分に無視できる程度であることが示されれば、やはり核データ研究は終わりということになる。

我が国の核データ JENDL は数回の改訂を重ね、2010 年には JENDL-4.0 の開発が完了し、公開された。当時の海外の他の核データファイルと比較しても優れた性能が示されており、「世界最高」といっても過言ではなかった。予算と人的資源が限られた状況下で、「JENDL 開発の今後はどうあるべきか」という問いが発生するのは自然なことであり、それに対する回答を明らかにするため、2013 年に「JENDL 開発検討小委員会」が原子力機構の JENDL 委員会の下に組織された。この小委員会は研究機関、メーカー、大学のさまざまな分野の専門家で構成され、1 年の活動を経て、一冊の報告書に答申をまとめている⁵⁾。

この報告書では「終わり」はまだ先の話であることが述べられている。すなわち今後も核分裂エネルギー応用を主要な柱としながらも、医療におけるビーム応用など核データ応用の裾野を広げる努力が必要であること、そして種々の応用分野に提供される核データを開発する技術は重要な国家資産として位置づけられるべきで、これまでに培われてきた技術体系を失うことなく、福島第一原発の廃炉作業や設計パラメータの不確かさの定量化を重視するという原子力規制の方向性に対処するため、継続した核データ研究が必要であると述べられている。

また今後、評価手法の観点から核データ研究に大きな影響を与える可能性があるのは、ビッグデータを使った深層学習(DL)や人工知能(AI)である。核データ評価は大量のデータから最適値を得る活動であるため DL や AI との親和性が高く、それらの技術が核データ評価に劇的かつ前向きな変化をもたらす可能性がある。しかし仮に AI で核データを評価するようになったとしても、核データを作り使う者として、核データに関する正しく深い知見は、国家資産と言える基盤技術として必須である。

国産エネルギーの獲得が我が国における原子力開発の出発点であるなら、その開発をもっとも底辺で支える核データを自らの力で生産出来る能力の維持発展は必要不可欠である。核データ分野に情熱を注いで来られた多くの先輩方の気持はそこにあったのではないかと思う。福

島事故後、原子力開発の目的を見失いがちになる今こそ、原子力技術の根幹と言える核データにかかわる活動の存在価値が問われているとも言える。

未知なものを探し出してそれを明らかにしようとする理学のベクトルと、実現したいものを可能な限り合理的に実現しようとする工学のベクトル、これら2つの、一見、全く異なる方向を向いているようなベクトルで構成される空間は、限らない広がりをもっている筈である。我々は新しい原子力の自主開発を支える新しい世代の参入を強く期待している。

VIII. まとめと本連載講座の全体像

既に述べたように、一口に核データ研究と云ってもその対象とする範囲は極めて広範である。本連載講座は、シグマ特別専門委員会の協力を得て、核データ研究の中でも幾つかの話題性のあるテーマに絞り、下記の通り本稿を含め計8回を予定している。

- 第2回：「共鳴領域における核データ測定と理論解析」
- 第3回：「核分裂データの最前線：実験と理論」
- 第4回：「核図表一壮大なる原子核の地形図一」
- 第5回：「高エネルギー領域への挑戦」
- 第6回：「IAEAの核データ事業」
- 第7回：「核データの利用のために一ミクロからマクロへの橋渡し一」
- 第8回：「核データライブラリ JENDL の進化」

研究の意義、現状と課題、そして最近の研究における進展や今後の展望を可能な限り分かり易く解説できるように努めたい。

－ 参考資料 －

- 1) K. Shibata et al., *Nucl. Sci. Technol.*, 48(1) 1-30 (2011).
- 2) M. B. Chadwick et al., *Nucl. Data Sheets*, 112, 2887-2996 (2011).
- 3) A. Santamarina et al., (Eds.), *JEFF Report 22* (2009).
- 4) A. J. Koning and D. Rochman, *Nuclear Data Sheets* 113, 2841-2934 (2012).
- 5) JENDL 委員会 JENDL 開発検討小委員会, *JAEA-Review* 2014-046, 日本原子力研究開発機構 (2015).

著者紹介

須山賢也 (すやま・けんや)

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) 原子炉物理, 計算コード開発, 核データ, 国際協力

国枝 賢 (くにえだ・さとし)

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, 原子炉物理, 放射線工学

千葉 豪 (ちば・こう)

北海道大学 工学研究院
(専門分野/関心分野) 原子炉物理, 核データ, 放射線輸送計算

深堀智生 (ふかほり・ときお)

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, 原子力科学, 国際協力, 人材育成

From Editors 編集委員会からのお知らせ

－ 最近の編集委員会の話題より －

(9月5日第2回論文誌編集幹事会, 第3回学会誌編集幹事会)

【論文誌関係】

- ・平成29年6月16日～7月15日に英文誌へ29論文, 7月16日～8月15日に英文誌へ26論文, 29年6月16日～8月15日に和文誌へ3論文の投稿があった。
- ・投稿ガイドラインおよび審査・査読に関する留意点(担当編集委員)の微修正と, 審査査読要領の一部変更を了承した。
- ・特許として公開された内容を論文としてまとめた原稿は受理可能であることを確認した。
- ・東電福島第一事故関連論文及び学会誌掲載解説記事の英訳出版WGの進捗状況が報告された。内容, 経費見積, 段取り, 補助員人件費, 作業スケジュール等に関して整理して, 次回の幹事会で検討後に総務財務委員会に正式に諮ることとした。
- ・学会賞論文賞の編集委員会からの推薦に関して, 各分野からの推薦一覧

が示された。編集委員の採点が欠落していて総合点が悪い数編の論文に関して, 至急担当した編集委員に点数を付けてもらい, その結果も含めて推薦候補を再検討することとした。

- ・編集委員の遅延による審査遅滞が発生している事に関して, 対応策を検討した。

【学会誌関係】

- ・木下委員長より, 10月号・12月号の記事企画および60周年記念号企画について, 理事会へ報告した結果について説明があった。
- ・8月号アンケート結果の報告があった。掲載記事や今後の記事企画に対して前向きな要望が多かった。
- ・2017年秋の大会・企画セッションの記事企画化の進捗状況の報告があった。
- ・巻頭言, 時論, 各記事の企画の進捗状況について検討した。

編集委員会連絡先 <hensyu@aesj.or.jp>