



JAEA-Review

2024-009

DOI:10.11484/jaea-review-2024-009

核データロードマップ 2023 報告書

Report of Nuclear Data Roadmap 2023

中山 梓介

Shinsuke NAKAYAMA

原子力科学研究部門

原子力科学研究所

原子力基礎工学研究センター

核工学・炉工学ディビジョン

Nuclear Science and Reactor Engineering Division

Nuclear Science and Engineering Center

Nuclear Science Research Institute

Sector of Nuclear Science Research

May 2024

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section, Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

核データロードマップ 2023 報告書

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力科学研究所
原子力基礎工学研究センター 核工学・炉工学ディビジョン

中山 梓介

(2024年3月13日受理)

核データは原子力の研究開発を根底から支える基礎データであり、その重要性は広く認識されてきた。その一方で、今後の「核データ研究」を考えた場合には、その種類（標的核種やエネルギー、物理量など）に関して、開発を優先すべきものの整理をすることが必要であると考えられる。こうした状況の下、日本原子力学会「シグマ」調査専門委員会内に「核データロードマップ作成タスクフォース (TF)」が設置され、今後の核データ研究開発に関するロードマップの検討が行われた。本書は核データロードマップ作成 TF で行われた検討の結果を報告するものである。

Report of Nuclear Data Roadmap 2023

Shinsuke NAKAYAMA

Nuclear Science and Reactor Engineering Division
Nuclear Science and Engineering Center
Nuclear Science Research Institute
Sector of Nuclear Science Research
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 13, 2024)

Nuclear data is fundamental data for nuclear energy research and development, and its importance has been widely recognized. On the other hand, for future nuclear data research, it is necessary to sort out which types of data (target nuclides, energies, physical quantities, etc.) should be prioritized. Therefore, a "Task Force (TF) for Nuclear Data Roadmap" was established within Investigation Committee on Nuclear Data in the Atomic Energy Society of Japan to discuss a roadmap for future nuclear data research and development. This document reports the results of the discussion in the TF.

Keywords: Nuclear Data, Nuclear Theory, Nuclear Data Measurement, Nuclear Data Evaluation, Nuclear Data Application

目 次

1. 序論	1
2. 核データに対するニーズ	2
2.1 歴史的変遷	2
2.2 多様化するニーズと世界の現状	2
3. 各分野におけるロードマップ	3
3.1 原子核理論分野	3
3.2 核データ測定分野	5
3.3 核データ評価分野	6
3.4 原子炉物理学分野	7
3.5 核融合中性子工学、遮蔽分野	8
3.6 医療分野	9
3.7 放射線工学分野	10
3.8 核データ分野における人材育成	11
4. 結論	12
謝辞	12
参考文献	13

Contents

1. Introduction1

2. Needs for nuclear data2

 2.1 Historical transition2

 2.2 Diversified needs and global status2

3. Roadmap in each field3

 3.1 Nuclear theory3

 3.2 Nuclear data measurement5

 3.3 Nuclear data evaluation6

 3.4 Reactor physics7

 3.5 Fusion neutronics, shielding8

 3.6 Medical applications9

 3.7 Radiation engineering10

 3.8 Human resource development in nuclear data field11

4. Conclusion12

Acknowledgements12

References13

1. 序論

1950年代に原子力開発が本格的に開始されて以来、1970年代から90年代にかけて原子力開発は大きな躍進を遂げ、我が国のみならず世界の経済成長を支えてきた。その一方で、21世紀はどうであろうか。少なくとも21世紀半ばまでは「原子力固有の課題の解決」と「持続可能な社会の実現への貢献」を目指していくことになると考えられる。

現在、原子力分野で取り組むべき課題として第一に挙げられるのは、東京電力福島第一原子力発電所廃炉計画への貢献であろう。加えて、運転を終了した原子力施設について、安全を最優先としつつ合理的な廃止措置を実施していく必要がある。さらに、これまでのエネルギー生産に伴って発生した使用済み燃料の処理・処分に関する検討も進めていく必要がある。

また、課題への取り組みとも一部重なるが、高速炉や加速器ならびにそれらを組み合わせた加速器駆動未臨界炉(ADS)による核変換システムの実現は、持続可能な社会の実現に向けた大きな貢献である。さらに、エネルギー源としての原子力は地球規模の気候変動に対する有効な選択肢であるが、社会からこの選択肢が十分に受容されるためには、安全性を第一に、持続性・経済性をこれまで以上に高めた原子炉(核融合炉も含む)を実現する必要があるだろう。これらの一方で、原子力分野は医療や宇宙理工学などにも裾野を広げつつある。例えば、医療分野においては粒子線を用いたがん治療ならびに診断・治療用の医療用放射性同位体に関わる研究開発が活発に推進されている。また、宇宙分野においては宇宙探索時の動力源となる宇宙用原子炉や、原子力電池用の放射性同位体に関わる研究開発が行われている。

核反応の起こりやすさを示す反応断面積に代表される核データは、原子力の研究開発における基礎データに位置付けられる。このため、これまで我が国では大学や研究機関、企業において、核データの測定や核データを評価するための核反応モデルの構築、評価済み核データの検証などが着実に行われてきた。この成果が、今日の原子力の研究開発の基礎を支えていると言っても過言ではない。

原子力の研究開発を根底から支える核データそのものは近い将来においても重要であり続けるであろう。しかし、今後の「核データ研究」という意味では、その種類(標的核種やエネルギー、物理量など)に関して、整備を優先すべきものの整理が必要な時期に来ているものと考えられる。これを受け、日本原子力学会「シグマ」調査専門委員会内に「核データロードマップ作成タスクフォース(TF)」が設置され、今後の核データ研究開発に関するロードマップの検討が行われた。本書は核データロードマップ作成TFで行われた検討の結果を報告するものであり、以下の三点を主な目的としている。

- ・ 現在および近い将来に予想される核データに対するニーズの整理
- ・ 今後の研究開発のおおよその方向性の整理・共有
- ・ 若い世代(主に大学生や大学院生)に向けた核データ分野の意義や魅力の提示

二点目について、具体的な方針ではなくおおよその方向性としているのは、本書が各研究者個人個人の自由な発想から生まれ得る研究方針を制限することは意図していないためである。ま

た、対象の如何を問わず将来予測には不確かさが付きものであるため、本書で示した核データロードマップは今後数年おきに適宜、見直し・更新されていくことを前提としている。

2. 核データに対するニーズ

2.1 歴史的変遷

核データの重要性は今も昔も変わらないものの、整備を優先すべき核データの種類は時代とともに多様になり得る。ここで、我が国の評価済み核データライブラリ JENDL シリーズを例に、核データに対するニーズの変遷を眺めてみたい。

図 1 には JENDL シリーズの根幹をなす汎用ファイルの開発の歴史を示している。汎用ファイルとは主として中性子核反応断面積について、安定核種および半減期の長い主要な不安定核種に対する広範なエネルギー領域におけるデータが収録された、完備性の高いデータファイルのことである。なお、JENDL シリーズではこの汎用ファイルとは別に、荷電粒子反応ファイルや光核反応ファイルといった利用分野を限定して必要なデータのみを整備した特殊目的ファイルも開発している。このような特殊目的ファイルはもちろんのこと、「汎用」ファイルであっても、その時々々のニーズに応じてその開発方針が変わっていることが図 1 から読み取れる。

初期の JENDL 汎用ファイルでは高速炉設計への応用を主眼としていたが、JENDL-3.2²⁾からは高速炉だけではなく、熱中性子炉、遮蔽、核融合炉などの設計への適用が可能となった。また、JENDL-3.3³⁾では核融合炉や遮蔽設計分野からのニーズに対応して二重微分断面積データ（放出中性子のエネルギーおよび角度分布データ）が追加された。続く JENDL-4.0⁴⁾では革新炉や高燃焼度炉心の設計に向け、マイナーアクチニドや核分裂生成物に対する断面積データおよびそれらのデータの不確かさを示す共分散データの充実が図られた。そして、最新の JENDL-5⁵⁾では放射線利用も含めた幅広い応用分野に貢献するため、中性子反応データのエネルギー範囲を 200MeV まで拡張するとともに、JENDL-5 以前の汎用ファイルには含まれていなかった、中性子放射化断面積や荷電粒子・光核反応などに関するデータが統合されている。

2.2 多様化するニーズと世界の現状

このように、核データの研究開発は、応用分野からのニーズを把握・先取りし、それに合わせた優先度をつけて実施していくことが肝要である。第 1 章で述べた通り、今後は福島第一原子力発電所を含めた廃炉・廃止措置を着実に進めていく必要がある。その一方で、小型炉や高速炉、溶融塩炉などの次世代炉の研究開発や、医療や宇宙利用等の非エネルギー分野での放射線応用が盛んになっていくことが考えられる。そのため、核データの利用分野はこれまで以上に多様化していくことが予想される（図 2）。

核データライブラリは我が国の JENDL だけでなく、米国では ENDF/B、欧州では JEFF がそれぞれ開発されている。これら三つは、データの品質や規模、これまでの利用実績により「世界三大核データライブラリ」と評されている⁶⁾。また、ロシアや中国においても核データライブラリ BROND、CENDL がそれぞれ開発されている。さらに、国際原子力機関（IAEA）でも

独自の核データライブラリ TENDL が開発されている。反応断面積等のいわば「物理定数」として位置付けられる核データについて、なぜ各国は独自のライブラリを開発しているのだろうか。この問いへの答えは大きく二つあると考えられる。

一つには、核データの精度がまだ発展途上にあることが挙げられる。例えば、最先端の測定施設や装置を使用したとしても、最終的に導出される核データの実験値には数%程度の系統誤差が付随することがほとんどである。また、実験値が無い条件での核データを評価する際には核反応モデル等による予測が必要となる。上記のように実験値自体が誤差を持つ以上、これらを基にした予測値も必然的に同程度以上の誤差を持つことになる。よって、将来的には一つの値に収束していく方向に進んでいくとは考えられるが、現状では世界各国の核データは全世界共通で使えるほどの精度には達していないと言えるのである。

また、もう一つの理由であり本書において重要となるのが、世界各国で原子力開発の方向性は必ずしも一致していないということである。例えば、原子炉と言っても、軽水炉なのか、あるいは高温ガス炉や高速炉、熔融塩炉までを視野に入れるかでは必要となる核データとそれらに対する要求精度は必然的に異なる。少なくとも数年～十年単位で見た場合には、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であろう。そのため、整備を優先する核データも異なり、それが各国独自のライブラリ開発につながっている。我が国が指向する原子力開発用の核データを諸外国が整備してくれるわけではない。このため、自国の原子力開発の方針や国内事情を鑑みた上で、核データ整備の方針を我が国の核データコミュニティ自らが選択していく必要がある。また、当然ながらこのことは、自国で核データライブラリを開発できる能力を維持していくことが今後も不可欠であることを意味している。

3. 各分野におけるロードマップ

本章では今後の課題や望まれる将来像を基にした核データ分野におけるロードマップを示す。核データは応用分野での利用を指向した原子核物理に関する知見とも言える。そのため、核データ分野は学際的な分野であり、基礎から応用まで大きな広がりを持つ。そこで、以下では、核データに関連する研究開発分野の多くをカバーできるよう、核データ基盤分野（原子核理論、核データ評価、核データ測定）および核データ応用分野（原子炉物理、核融合炉中性子工学・遮蔽、医療、放射線工学）について、各分野の位置づけやロードマップを示す。なお、ロードマップ中の時間軸はそれぞれ、2030・2035・2050年とした。また、上記分野とは別に、今後の核データ分野を担う人材の育成についても、本章の最後に述べる。

3.1 原子核理論分野

3.1.1 核データ研究開発における当該分野の位置づけ

原子核は陽子と中性子から成る集合体であり、その物理を解き明かすためには、多体問題をミクロの世界で考える必要がある。原子核理論の発展は、核データ評価にも大きな影響を与えている。例えば、崩壊熱におけるパンデモニウム問題⁷⁾では、大局的理論が大きな役割を演じ

た。また最近では、ImPACT プロジェクトにおける核データ評価に最新の知見を投入することで、長寿命核分裂生成物に対する核反応断面積の精度向上が達成された⁸⁾。これは、不安定核に対する理論（および実験）の発展により実現されたものである。原子核理論の研究を進展させることは、それを基にして実施する核データ評価にも大きな進歩を与える。そのため、核データ評価者は評価の知見においてスペシャリストであると同時に、原子核理論においても高い知見を有していることが望まれると言える。

3.1.2 今後取り組むべき課題（2030, 2035, 2050 年）

現在の原子核理論は、安定線近傍の原子核においてはある程度のモデルが確立されている。しかしながら、核分裂反応など、応用上重要な反応においても、いまだ決定的な理論解明に達していない点が多く存在する。また、ここ十数年の原子核理論研究における関心は、安定な原子核から不安定核・エキゾチックな原子核へシフトしており、二陽子放出など通常の原子核では見られなかった新しい現象が観測されている。そのため、安定核における従来までの課題とともに、不安定核・エキゾチック核の現象も説明できる理論を構築していくことが今後の原子核理論の進む道であると思われる。以下に各時間軸において取り組むべき課題について記す。

- 2030 年 — 核分裂収率の理論モデルの改良、 β 崩壊の理論モデルの改良・誤差の導入、機械学習を用いた核反応計算手法の確立
- 2035 年 — 微視的光学ポテンシャルの完備、中性子・陽子だけでなく様々な粒子による核反応を予測するための準備
- 2050 年 — 核図表上の全ての原子核を標的とした、いかなる核反応チャンネルや終状態の情報（残留核、核分裂収率、 γ 線スペクトル）も導出できる理論モデルとその計算コードの完成

応用を考える上では、核分裂反応をより正確に理解できるようになることが非常に重要である。また、共分散解析を原子核理論に導入し、理論計算にも誤差を付けられるようになれば、その信頼性を定量的に評価することが可能になる。さらに、高精度な微視的光学ポテンシャルがいかなる標的核種・エネルギーでも利用できるようになれば、不安定核の評価や超重元素の生き残り確率なども、信頼性のある値を提供できるようになるだろう。

3.1.3 まとめ

核データ評価研究に原子核理論の最新の知見を取り入れられているのは、まだほんの一部である。従来の現象論的手法と合わせて評価手法の選択肢を増やし、将来の核データ評価に柔軟に対応できるように準備しておくことは重要である。そのためには、最新の原子核理論研究と核データ評価研究に幅広いネットワークを広げ、両者で情報交換していくことも重要であると考えられる。

究極の核データ評価は、陽子数と中性子数のみのインプットで全ての断面積を再現することであろう。これは、究極の原子核理論でも同じである。つまり、両者の終着点は同じはずであ

る。しかし、究極点においてのみ両者が交わるわけではないはずである。

3.2 核データ測定分野

3.2.1 核データ研究開発における当該分野の位置づけ

近年、核データに対するニーズが原子力分野だけでなく、医療などの幅広い分野に急激に広がっており、核データ測定においても幅広い反応に対する実験データが求められている。また、応用分野からのニーズに応じた測定を進めることが重要であることはもちろんのこと、核データの品質（精度）向上の面からは、不確かさの評価のために、一つの実験結果だけでなく複数の実験装置での独立した測定が強く求められている。そのため、核データ測定分野においては、既存の実験装置の測定精度の向上を図るだけでなく、多くの核種に対する測定を実施し、高精度かつ系統的な実験値を核データ評価者に提供する必要がある。

3.2.2 今後取り組むべき課題（2030, 2035, 2050年）

核データ測定には加速器や原子炉等の大型施設が必要であるが、このような施設を新規に建設することは容易ではない。そのため、近い将来では、既存施設を用いた新たな実験体系の開発を進める必要があるだろう。以下に各時間軸において取り組むべき課題について記載する。

- 2030年 — マイナーアクチニド・長寿命核分裂生成物等の難測定核種の測定の充実、理論計算との協働による測定困難核種や反応に対する断面積の間接的測定（代理反応法⁹⁾など）の充実
- 2035年 — 諸外国も含めた試料データベースの共有、海外を含む複数施設での系統的かつ独立した測定の実施、放射性試料の作成手法の確立
- 2050年 — 核燃料物質を利用可能な新規パルス中性子源実験装置での測定の実現

核データ測定においては、試料そのものや、実験施設、測定手法、実験値の解析手法、など様々な要因に起因する不確かさの分別が非常に困難であり、このことが測定値の真値への収束を妨げている。これに対し、諸外国も含めて試料データベースを共有し、同一施設における異なる試料、もしくは異なる施設における同一試料に対する測定結果を相互比較することができれば、測定値に含まれる不確かさの要因や妥当性をより深く議論することが可能となり、真値への収束がより速やかに進められると考えられる。

また、放射化学分野との協働が進み、日本国内で使用済み燃料から放射性核種を分離回収し、それらを試料とした実験ができる体制が確立されれば、核分裂生成物等も含めた放射性核種の測定は飛躍的に進むと考えられる。

さらに、2050年までには現在中性子核データ測定が盛んに行われている J-PARC センター中性子核反応測定装置 ANNRI¹⁰⁾の後継となる大強度のパルス中性子源を用いた実験装置の運用が始まっていることを期待する。ANNRI では現状、非密封線源 や核燃料物質を使用することができず、応用上重要となる核分裂断面積や、U や Pu 等に対する反応断面積を測定することができない。2050年までにこの状況が打開されていることを期待したい。

3.2.3 まとめ

核データ測定のための加速器や原子炉等の大型施設は世界的に見ても数が限られており、海外との共同研究は重要なものとなっている。また、当然ながら、2050年の予測における大型施設を核データ分野単独で建設するのは困難であるため、J-PARC同様、他分野の動きを把握しておく必要がある。このように、核データ測定分野では国内外の様々な分野・研究者との協働が必須となる。

3.3 核データ評価分野

3.3.1 核データ研究開発における当該分野の位置づけ

核データ評価とは、核データの「最も確からしい値」を導出することである。通常、この値を導出する上で拠り所とするのは実験値であろう。しかし、核データの実験値には程度の差こそあれ有意な系統誤差および統計誤差が含まれる上、必要とされるすべての条件で測定が行われているわけではない。また、各実験値に対して評価された誤差範囲を超えて実験値同士が乖離している等、実験値間に不整合が見られることも決して珍しくない¹¹⁾。そのため、核データ評価は、実験値を吟味し必要に応じて補正などを加えた上で、原子核理論に基づく計算値やフィッティングにより実験値を補完して行っていく。このため、核データ評価は原子核理論とも核データ測定とも深い関わりがある。

また、どのような核データを評価し、評価済み核データベースを開発していくかは多くの場合、応用分野からのニーズにより選択される。このため、核データ評価は種々の応用分野とも密接に関連しており、核データ研究開発の軸をなす分野とも言えるであろう。

3.3.2 今後取り組むべき課題（2030, 2035, 2050年）

核データ評価分野においては、応用上の重要性の高いデータの精度向上や現在整備されていないデータの整備と言った観点で優先度をつけた研究開発を行っていくことが肝要である。以下に各時間軸において取り組むべき課題について記載する。

- 2030年 — アクチノイド核種の継続的な核データ精度向上、熱中性子散乱則データの充実、共分散データの拡充、負ミューオン核反応データ評価、核データ評価へのAI活用の本格化
- 2035年 — 核データ評価における微視的核反応理論の活用の本格化
- 2050年 — 新規核データ評価（重イオン入射反応、不安定核標的）

アクチノイド核種の核データや熱中性子散乱則データ等、応用上重要なデータの精度向上・充実とともに、種々の放射線輸送シミュレーションにおける核データ起因の不確かさを定量するための共分散データの拡充が急務である。また、最近では負ミューオン捕獲反応の応用が盛んになっており^{12),13)}、この反応に対する核データの整備も必要とされている。

核データに対する多種多様なニーズに応える上で核データ評価プロセスの省力化は今後必須

であろう。核データ評価へのAIの利用は既に始まっている^{14),15)}ものの、2030年までには本格的に導入されていることを期待する。また、将来的には実験データが困難な不安定核種に対する核反応データ評価手法として、原子核理論分野と協働した微視的核反応理論の本格的な活用を期待したい。

3.3.3 まとめ

核データ評価は、理論や実験分野における成果を、それらの成果の結晶とも言える評価済み核データベースという形で応用につないでいく、「ミクロからマクロに貢献する」分野である。また、核データは原子力開発における基礎データであるために、核データ評価手法の高度化や新規核データ評価により、既存の応用分野の更なる発展や新規の応用分野の発掘といった多くの波及効果が期待される。このように、核データ評価分野は原子力研究の中でもインパクトも大きく、やりがいのある分野と言えるだろう。今後の原子力開発における発展やイノベーションのためには、本分野の更なる進化が不可欠である。

3.4 原子炉物理学分野

3.4.1 核データ研究開発における当該分野の位置づけ

中性子の運動や原子核との相互作用といった微視的な挙動を基にして原子炉などの巨視的なシステムの振る舞いを記述するための学術体系が原子炉物理学である。原子炉物理学は原子力エネルギーシステム工学における基盤分野の一つとしてその重要な役割は広く認められている。核データ分野は原子炉物理学を通して原子力エネルギーシステム工学に寄与する学術分野とも言えるであろう。

3.4.2 今後取り組むべき課題（2030, 2035, 2050年）

軽水炉は我が国の基幹エネルギー源の一つとして重要な役割を果たしてきたが、軽水炉はそもそも海外から輸入されたものであったことから、核データに関しても海外で開発されたものがその設計に利用されてきたのが実情である。しかしながら、高速炉などの軽水炉とは異なるエネルギーシステムの研究開発においては、国産技術の採用が志向され核データとしてJENDLが利用されてきた。また、現在は、高速炉を含む新型炉のみならず、軽水炉においても積極的に国産の核データを活用しようとする試みがなされている。以上を踏まえ、原子炉物理学分野への応用に関連した各時間軸における核データに対するニーズを以下に記載する。

- 2030年 — MOX燃料炉心・高燃焼度化炉心・小型軽水炉の設計のための核データ、共分散データの拡充
- 2035年 — 放射性廃棄物の合理的処分のための革新的システム設計に資する核データ
- 2050年 — 深宇宙探査のためのエネルギー利用に関連した核データ

プルトニウムが混合された燃料（MOX燃料）の活用促進や、核燃料の長期利用（高燃焼度化）、安全性を革新的に高めた小型軽水炉の開発といったことが今後想定されており、これらを

実現可能とするための核データ技術を継承・発展させていくことが重要である。また、軽水炉の安定運転に対する説明責任をより強固にするという観点から、設計における種々の不確かさを定量化しようという動きが高まっており、共分散データの拡充も必要である。

また、放射性廃棄物の管理・処分の方向性が明確に定まっていない中、廃棄物中の有用物質を極力利用することによって、廃棄物の分量自体を減らそうとする試みが提案されている¹⁶⁾。このような試みは、軽水炉とは異なる新型の原子力エネルギーシステムで行われるべきものであり、そのような革新的システムの設計に用いられる核データについて、長期的な研究開発が必要と考えられる。さらには、深宇宙探査のためのエネルギー源としての活用¹⁵⁾など、原子力エネルギーが有する将来的な可能性は決して小さいものではなく、それを支える核データの可能性も決して小さいものではない。

3.4.3 まとめ

これまでに実現した、また近い未来に実現可能と考えられている原子力エネルギーシステムは基本的には核分裂反応を利用したものである。持続的にエネルギーを取り出すための核分裂連鎖反応を実現するためには、核分裂反応を引き起こす中性子と原子核との相互作用（反応）を理解・把握する必要がある。中性子と原子核による反応を定量的に記述する核データが重要な役割を果たす。巨大なエネルギーシステムである原子力エネルギーシステムは、いくつもの枢要技術が複雑に関係し合いながら成立しているものである。核データは、その寄与が目に見えるにくいところもあるが、その枢要技術の一つとして位置づけられるべきものであると言える。

3.5 核融合中性子工学、遮蔽分野

3.5.1 核データ研究開発における当該分野の位置づけ

遮蔽分野においては、近年の計算機の飛躍的な性能向上により詳細な計算が現実的な時間で実施可能になるとともに、質の高い核データ検証用のベンチマーク実験が増えてきている。核融合中性子工学、遮蔽分野のベンチマーク実験解析では、以前は計算値と実験値がファクターで合うのが漸くであったのが、数十%程度の差を議論できるまで核データの精度は向上している。また、ベンチマーク実験解析も計算結果を出すだけでなく、実験値との差の原因を特定できるようになっている。さらに、20MeV以下の中性子核データだけでなく、20MeV以上の中性子核データや荷電粒子データも利用するようになってきた¹⁸⁾。

3.5.2 今後取り組むべき課題（2030, 2035, 2050年）

以前と比較すると、核融合中性子工学や遮蔽分野への応用に関連する核データは質、量ともに格段に良くなっているが、以下の点で更なる充実化が必要とされている。当分野への応用に関連した、各時間軸における核データに対するニーズを以下に記載する。

- 2030年 — 20 MeV以下の中性子核データの高精度化、荷電粒子核データの拡充、共分散データの拡充、新たな中性子源の整備
- 2035年 — 3 GeV程度までの高精度核データライブラリの整備、核解析者と核データ評

価者のコミュニケーションの容易化、新たな中性子源を用いたベンチマーク実験の蓄積

● 2050年 – 50 GeV 程度までのあらゆる粒子に対する核データの整備

短期的には 20 MeV 以下の中性子核データの高精度化や、荷電粒子核データや共分散データの拡充が必要である。また、FRENDY¹⁹⁾等の核データ処理コードの普及や核データフォーマットの視認性向上により、核解析者が核データ評価者と同じ土俵で議論できるようになることが望ましい。これによって核解析者が核データの問題を指摘できるようになる上、核解析者が抱えている問題を核データ評価者も理解し、核データ評価へのフィードバックが容易になり、核データの精度が更に向上することが期待される。

さらに長期的には、核データ評価が AI でほぼ 100% できるようになり、核解析者でも核データの評価や更新を容易にできるようになることを期待する。核計算にも AI が導入されて簡単に結果を得ることができるようになれば、人間は最終チェックをするだけになるかもしれない。

3.5.3 まとめ

核融合中性子工学、遮蔽における検証・応用分野の将来について希望的観測を述べたが、本分野においては十分な人材育成ができていないとは言えず、核データに関わる人材は不足しているのが実情である。実際、核融合炉や加速器施設等の遮蔽設計の従事者には、核データは正しいデータと信じこんでブラックボックスとして使うだけの者も多い。本分野では核データの検証に関心を持って研究をしている者は少ないように見受けられるため、本章で述べた将来ビジョンを実現するためにも、本分野における核データに関わる人材、予算の確保は急務であると言える。

3.6 医療分野

3.6.1 核データ研究開発における位置づけ

放射線の医療応用について考えると、1895 年にレントゲンによって X 線が発見されたその時から医療分野への応用は始まっており、その歴史はすでに 100 年を超える。現状の医療分野における核データの利用は大きく分けて二つある。一つは、核医学で使用される診断・治療用放射性同位体 (RI) の製造である。もう一つは、粒子線治療であり、この応用に関しては、加速器から得られる電子線、陽子線、重粒子線を腫瘍部に直接照射する治療や、中性子を用いたホウ素中性子捕捉療法による治療の利用も進んでいる。

3.6.2 今後取り組むべき課題 (2030, 2035, 2050 年)

現在も医療診断には欠かせない放射線である X 線については、基礎的なデータは非常に充実している。その精度も極めて高く、医療現場ではユーザーはそのデータをブラックボックスとして用いてもほとんど問題が起こることは無い。一方で、その他の応用分野については技術ごとに幅こそあるものの、基礎データとなる核データが不十分である例が散見される。以下に、各時間軸における当分野への応用に関連した核データに対するニーズを記載する。

- 2030年 - 医療用 RI 製造に関する軽イオン核反応データ
- 2035年 - 数百 MeV 領域の軽イオン核反応データ
- 2050年 - 数百 MeV～数 GeV 領域の重イオン核反応データ

医療用 RI の製造については、原子炉や加速器中性子源から発生させた中性子の他に陽子、重陽子、 α 粒子等の様々な入射粒子と標的核種の組み合わせによる最適な生成方法が、生成したい RI ごとに検討されている^{20), 21)}。現状は限られた実験値を基にこの検討がなされているが、特に荷電粒子に対する残留核生成断面積の核データが整備されることで、様々な検討が可能になると考えられる。また、粒子線治療の分野では数百 MeV を超えるエネルギー領域の荷電粒子と生体構成元素 (H, C, N, O 等) の間で生じる核反応において、現状では二次粒子 (デルタ線も含む) に関する基礎的な核データが質および量ともに不足している。現状のデータのみに基づいて治療部位以外に照射が与える影響を正確に見積もることが可能とは言い難いため、整備が必要である。

3.6.3 まとめ

医学分野においては、汎用的な核データのニーズは当然のこと、応用技術ごとに特化した特殊ライブラリも重要だと考える。例えば、重陽子加速器中性子源による医療用 RI 製造においては、50MeV 程度までの重陽子エネルギー領域での中性子放出二重微分断面積の精度が充実していればよく、入射エネルギーや放出粒子が網羅的である必要はない。網羅的データが公開されるまで研究開発が進まないのでは本末転倒であるため、適宜「小さなライブラリ」を公開していくことが最先端の研究と足並みを揃える上で必要と考えられる。

3.7 放射線工学分野

3.7.1 核データ研究開発における位置づけ

放射線工学は、放射線の物質中での挙動を測定・解析することによって、原子力をはじめ医学・産業・宇宙開発などに貢献することを目的としている。測定では、検出器を用いて直接もしくは間接的に放射線フラックスやエネルギー付与量などの物理量を観測する。解析では、放射線輸送計算コードを用いて放射線の物質中での挙動を模擬して物理量を算出する。物質中の放射線挙動は、輸送過程と衝突過程に大別されるが、核データは衝突過程の計算で利用される。原子力機構が中心となって開発を進めている放射線輸送計算コード PHITS²²⁾では、核データライブラリとして JENDL を利用している。PHITS の利用者の増加に伴い計算目的も多岐に亘っており、核データに対しても様々な分野から要望が寄せられているところである。

3.7.2 今後取り組むべき課題 (2030, 2035, 2050 年)

放射線工学は放射線の測定・解析技術を様々な分野へ応用することを目的としているため、測定・解析技術の開発・高度化を通して、新たな放射線応用分野の創出への貢献が期待できる。以下に、放射線工学分野への応用に関連した各時間軸における核データに対するニーズを記載

する。

- 2030年 - JENDL-5に未収録の中性子核データの整備、ミューオン核反応データの整備
- 2035年 - 中性子核データにおける荷電粒子放出二重微分断面積の高精度化
- 2050年 - ニュートリノ核反応データの整備

はじめに、現在の JENDL-5 の中性子核データに関して、核データの格納形式の都合で解析において考慮されない反応チャンネルが存在する。例としては、 ^{12}C に対する非弾性散乱後に ^{12}C が 3 つの α 粒子に分解する $^{12}\text{C}(n,n3\alpha)$ 反応からの α 粒子放出スペクトルが挙げられる。このような反応チャンネルが必要な分野に関しては、要望に応じて別途ファイルを整備することが一つの方策として考えられる。また、負ミューオン捕獲反応の応用に関連したミューオン核反応データの整備も必要である。

次に、中性子核データにおける荷電粒子の二重微分断面積の高精度化が必要である。これらのデータが整備されることで、カーマ係数の高度化が期待される。また、ニュートリノを用いて遠隔地の原子炉の稼働状況を観測する手法なども研究されているため、これらのデータについても整備が期待される。

3.7.3 まとめ

放射線工学の研究開発は前述の通り、原子力分野に限らず様々な分野に貢献するという意義がある。放射線輸送計算コードを用いた解析は、検出器や試験体を実際に作成する必要がないため、時間とコストを削減できる。また解析は測定では分からない物理を解明できるため、得られた知見を研究開発に反映することにも役立つ。この解析の際に、核データを利用することで、放射線輸送計算コードに組み込まれた核反応モデルが不得手とする低エネルギー領域の反応を精度よく記述できる他、計算時間の短縮も期待できる。このため、核データは放射線工学においても重要な役割を果たしている。

3.8 核データ分野における人材育成

核データは原子核物理学の理学的知見を工学分野へと導入する入口であり、核データ分野の研究者・技術者には理学と工学の橋渡しの役割が求められる。核データ分野における人材育成を考える際には、このことを念頭に置く必要がある。具体的に求められる素養としては、原子力全体の一般的知識、特にかかわりの深い原子炉物理学、そして理学的な側面である原子核物理学が挙げられる。また、理論的・実験的研究のどちらを行うにせよ、核データの測定技術に関する知識も望まれる。

これらの人材育成を推進する上では、大学がその中核を担うことになるであろう。各研究室は核データ研究の魅力を伝え、より多くの優秀な人材が核データ関連の研究室に興味を持つよう努める必要がある。この際、核データのみを語ると、地味もしくは狭い印象を与える傾向があるため、核データ研究の社会に対する貢献を強調することが強いアピールとなるだろう。多くの場合、核データ関連の研究室は、純粋に核データ研究だけではなく、原子力、放射線利用、

医学などの関連分野にまたがった研究をしており、社会との関わりを述べることは十分に可能であると考えられる。

また、研究室外での研究活動も学生自身の視野と能力を広げるのに役立つ。夏期休暇時などに原子力機構等の研究機関が行っているインターンシップ制度はこの点から大変有益なものである。このような制度は所属研究室以外での研究スキルを得る機会を与えており、今後もこういった制度の継続・活用が期待される。

知識は体系的に教授されることが効率的である。その観点から、標準的な教科書があることが望ましい。また、自学自習は知識を深める上で不可欠だが、教科書はこの点からも重要である。原子核物理や原子炉物理に関しては多くの教科書が書かれてきたものの、核データを中心に据えたものはこれまでにはなかった。この状況を受け、「シグマ」調査専門委員会の核データ人材育成 TF 内で現在、核データ分野の教科書が作成されている²³⁾。本教科書は特に初学者に対して有益なものとなるだろう。

最後に、大学院を修了した学生が活躍できる受け皿がなければならない。優秀な核データ研究者が育った後には、彼らが活躍できる場所が必要である。そのためには、まず、現役研究者が各自の所属機関で核データ研究を活発に続け、核データ研究の重要性を強く訴えていく必要があることを付け加えたい。

4. 結論

核データに対するニーズの整理、今後の研究開発の方向性の共有化、核データ分野の意義や魅力、を示すことを目的として、核データに関連する種々の研究開発分野におけるロードマップをまとめた。序論に述べた通り、将来の予測に不確かさは付きものであり、今後の原子力研究開発の方向性を見据えることは容易ではないものの、本書が今後、核データ関係者にとって研究開発の方向性を決める際の何らかの拠り所となれば、幸甚である。

謝辞

本書は、日本原子力学会「シグマ」調査専門委員会核データロードマップ作成タスクフォースでの議論・検討の結果を基にしたものです。議論に参加して頂きました、日本原子力研究開発機構の国枝賢氏、木村敦氏、今野力氏、安部晋一郎氏、九州大学の湊太志氏、北海道大学の千葉豪氏、九州大学の金政浩氏、東京工業大学の片渕竜也氏、また「シグマ」調査専門委員会の委員各氏に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本原子力研究開発機構, 核データ研究グループ, JENDL, https://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/Jendl_J.html (accessed 2024-03-05).
- 2) T. Nakagawa et al., Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version 3 Revision-2; JENDL-3.2, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **32**, pp.1259-1271 (1995).
- 3) K. Shibata et al., Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3; JENDL-3.3, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **39**, pp.1125-1136 (2002).
- 4) K. Shibata et al., JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **48**, pp.1-30 (2011).
- 5) O. Iwamoto et al., Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 5: JENDL-5, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **60**, pp.1-60 (2023).
- 6) 須山賢也ほか, 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, *日本原子力学会誌 ATOMO Σ*, **59**, pp.598-602 (2017).
- 7) J.C. Hardy et al., The Essential Decay of Pandemonium: A Demonstration of Errors in Complex Beta-decay Schemes, *Phys. Lett. B*, **71**, pp.307-310 (1977).
- 8) S. Kunieda et al., JENDL/ImPACT-2018: A New Nuclear Data Library for Innovative Studies on Transmutation of Long-lived Fission Products, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **56**, pp. 1073-1091 (2019).
- 9) J.E. Escher et al., Compound-nuclear Reaction Cross Sections from Surrogate Measurements, *Rev. Mod. Phys.*, **84**, pp.353-397 (2012).
- 10) J-PARC MLF (物質・生命科学実験施設), BL04 ANNRI, <https://mlfinfo.jp/ja/bl04/> (accessed 2024-03-05).
- 11) R. Capote et al., Unrecognized Sources of Uncertainties (USU) in Experimental Nuclear Data, *Nucl. Data Sheets*, **163**, pp.191-227 (2020).
- 12) Y. Mori et al., Intense Negative Muon Facility with MERIT Ring for Nuclear Transmutation, *JPS Conf. Proc.*, **21**, 011063 (2018).
- 13) I. Hashim et al., Nuclear Isotope Production by Ordinary Muon Capture Reaction, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, **963**, 163749 (2020).
- 14) H. Iwamoto et al., G-HyND: a Hybrid Nuclear Data Estimator with Gaussian Processes, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **59**, pp.334-344 (2022).
- 15) S. Watanabe et al., Nuclear Data Generation by Machine Learning (I) Application to Angular Distributions for Nucleon-Nucleus Scattering, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **59**, pp.1399-1406 (2022).
- 16) K. Tsujimoto et al., Research and Development Program on Accelerator Driven Subcritical System in JAEA, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **44**, pp.483-490 (2007).
- 17) M.S. El-Genk, Deployment History and Design Considerations for Space Reactor Power

- Systems, *Acta Astronaut.*, **64**, pp.833-849 (2009).
- 18) C. Konno et al., JENDL-5 Benchmark Test for Shielding Applications, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **60**, pp.1046-1069 (2023).
 - 19) K. Tada et al., Development and Verification of a New Nuclear Data Processing System FRENDY, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **54**, pp.806-817 (2017).
 - 20) A. Harmanne et al., Evaluated and Recommended Cross-section Data for Production of Radionuclides with Emerging Interest in Nuclear Medicine Imaging. Part 1: Positron Emission Tomography (PET), *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B*, **535**, pp.149-192 (2023).
 - 21) A. Harmanne et al., Evaluated and Recommended Cross Section Data for Production of Radionuclides with Emerging Interest in Nuclear Medicine Imaging. Part 2: Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT), *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B*, **544**, 165119 (2023).
 - 22) T. Sato et al., Recent Improvements of the Particle and Heavy Ion Transport Code System - PHITS Version 3.33, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **61**, pp.127-135 (2024).
 - 23) 日本原子力学会 「シグマ」 調査専門委員会, 核データの教科書,
<https://sigma.aesj.or.jp/index.php/textbook> (accessed 2024-03-05).

名称	特徴	公開	核種数
JENDL-1	日本初の評価済核データライブラリ 主に高速増殖炉の研究にとって重要な核種のデータを作成 中性子エネルギーは 10^{-5} eV ~ 15 MeV	1977 年	72 核種
JENDL-2	中性子エネルギーの上限を 20 MeV に拡張 構造材核種や重核のデータを中心に改訂 高速炉や遮蔽計算に適用可能	1982 年 12 月 1984 年 3 月 改訂	84 核種
	核分裂生成物核種のデータを追加	1985 年 12 月	181 核種 個別ファイル
JENDL-3	中性子エネルギー MeV 領域のデータを大幅に改良 主要重核データの同時評価 主要核種にガンマ線生成データを付与	1989 年 12 月	171 核種
JENDL-3.1	核分裂生成物核種のデータを追加	1990 年 12 月	324 核種 個別ファイル
JENDL-3.2	主要データを大幅に改訂 高速炉、熱中性子炉、遮蔽、核融合炉などへの適用が可能	1994 年 6 月	340 核種 個別ファイル 一括ダウンロード
	JENDL-3.3	2002 年 5 月	337 核種 個別ファイル 一括ダウンロード
JENDL-4.0	中重核、アクチノイド核種データを改訂 一部核種に2重微分断面積 (DDX) 及び共分散データを収納	2010 年 5 月	406 核種 個別ファイル 個別ファイル(修正版) 一括ダウンロード 修正データサイト Banner click JENDL-4.0u
	JENDL-5	2021 年 12 月	n: 795 核種 p: 239 核種 d: 9 核種 α: 18 核種 γ: 2684 核種

図 1 JENDL 汎用ファイルの開発の歴史

(日本原子力研究開発機構 核データ研究グループホームページ¹⁾ より抜粋)

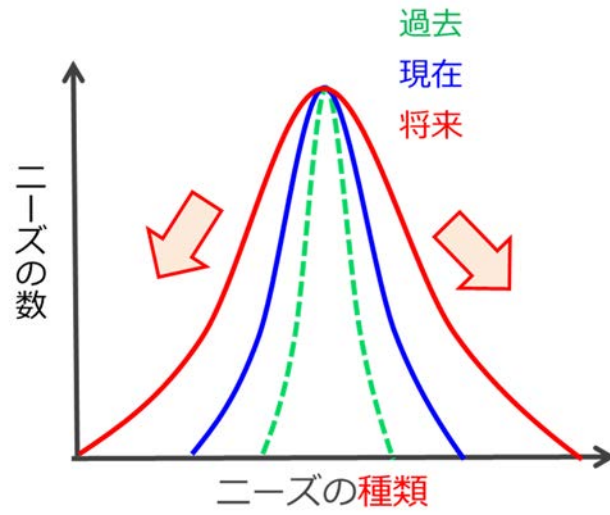


図2 核データに対するニーズの多様化のイメージ

