

「シグマ」調査専門委員会・核データ部会合同セッション
「核データ研究へのオールジャパンでの取り組み」

(2) 核データ部会と今後の期待

日本原子力研究開発機構
先端基礎研究センター
西尾 勝久
nishio.katsuhisa@jaea.go.jp

1. はじめに

日本原子力学会核データ部会は、核データ研究会の開催や核データニュースの発信、部会賞の選考、国際交流や国際会議の運営などを通じて、日本の核データに関する情報発信の中心的な役割を担うとともに、核データの将来を議論する上で重要な役割を担っている。任期2年ごとに運営委員が交代する形で受け継がれ、令和5年度から新たに12期がスタートした。

核データ活動には、①基礎となる核データの取得やデータを記述する理論の構築、②ライブラリーや計算コードの構築、③原子炉や加速器システムへの適用と計算といった流れがある。この仕組みは、核物理の基礎から実機の運用に至るまで、研究や開発のステップが階層を持って構築されている点でユニークである。さらには、基礎から応用に向かって、一方通行の流れで完結するものではなく、③の経験を踏まえて、再度、①に向かって課題が与えられるという循環がある。核データ部会や「シグマ」調査専門委員会は、日ごろ自分の専門領域に集中した研究開発を行う中であって、これら会合を通じて自らの役割を改めて認識するよい場となっている。

核データ研究開発の歴史は、中性子入射反応から始まり、ライブラリーとして取り扱う領域は、中性子エネルギー20MeVまでが対象だった。一方、加速器の設計など、用途の拡大に応じて取り扱うエネルギー範囲は広がり、また入射粒子についてもいくつかの荷電粒子を取り扱うなど、核データ範囲において広がりを見せている。対象とする核データの種類を増やすことは、社会の需要によるものであり、当分野としても取り組むべきものである。一方、①の核データ測定の領域で活動してきた立場からすると、現状、核データを取得するための研究者や施設を維持する技術者の数において、多様化するデータを全てにわたって取得できる状況とは言えない。加速器・原子炉で利用できるビームタイムの限度もある。これらを改善していくことは重要であるが、あわせて、戦略的な対応も必要である。その一つとして、基本原理からスタートする予測精度の高い理論を構築し、こ

こからデータを評価していくしくみが考えられる。実験は、理論を記述する上で、特に本質的に重要なデータを最優先で取得する。

その例として、以下、核分裂データを取り上げる。核分裂に関わるデータは即発中性子の数、中性子エネルギースペクトル、核分裂片の収率分布、遅発中性子、3体核分裂としてのトリチウム発生など、多岐にわたる。しかし、これらのデータが生みだされるスタート地点は、複合核に与えられる条件だけであり、核種、励起エネルギー (E^* ; 入射中性子エネルギーに依存)、スピン・パリティ (J^π) 分布となる。例えば、入射する中性子のエネルギーが高くなった場合、核分裂生成物の収率分布が変わり、即発中性子の数も変化する。測定の立場から見ると、中性子入射エネルギーに対するこれらすべてのデータを高エネルギー領域にわたって細かく測定するのは時間と様々なリソースが必要となる。一方、高精度の核分裂理論を構築すれば、1つのインプットからすべてのデータが出力される。また、多くの核分裂データをすべて紐づけて記述することになるので、断片的な特定の実験データであっても、他の核分裂データをほぼ直接的に検証することができる。

2. 核分裂データ

2.1 核分裂過程と核データ

核分裂は、複合核の形状からスタートし、時間とともに変形が成長し、最後に切断することで2つの核分裂片が生まれる過程である。最も重要なカギであり、理論の精度向上が求められるのは、切断した状態（これを *scission* という）における大小2つの核分裂片の核種 (A, Z) の生成確率分布と、それぞれの核分裂片の変形度、内部励起エネルギー、および J^π 分布である。これらがもとになって、その後の核分裂データ（即発中性子や γ 線の数、エネルギースペクトル、遅発中性子数など）と結びつく。一方、実験は、これらの核データを取得することで *scission* に関する情報を与える。例えば ^{235}U の熱中性子核分裂で放出される中性子の数は、平均 2.4 個であるが、これは2つの核分裂片から放出され、その起源は切断した瞬間 (*scission*) における核分裂片の変形度にある。*scission* の状態から加速された核分裂片は、十分加速された後に基底形状に変化するが、この際、変形エネルギーが励起エネルギーに変化するため、このエネルギーに比例して中性子が放出される。 $n_{\text{th}}+^{235}\text{U}$ の核分裂では、軽い核分裂片から平均 1.4 個、重い核分裂片から 1.0 個出るので、合計 2.4 個となる[1]。平均的には軽い核分裂片の方が変形しているが、実際は核分裂片ごとに出てくる中性子の数が大きく変化し、核分裂片の質量数に対して鋸歯状の分布となる。このような数字は核分裂中性子スペクトルの評価にも影響する。また、核分裂片は、*scission* で2つの核分裂片が持っているクーロンエネルギーを起源として加速され、運動エネルギーが与えられる。ここで、運動エネルギーの和（全運動エネルギー、TKE）は、*scission* における2つの核分裂片の変形度と結びついており、核分裂片の質量数 A_1, A_2 （陽子数 Z_1, Z_2 にほぼ比例）に加え、*scission* の形に制限が与えられる。

整理すると、scission の状態を精度よく決める核分裂理論を構築するため、実験データとして重要なのが (1) 核分裂片の質量数収率 (及び電荷) の分布、(2) 核分裂片の質量数に対する運動エネルギーの変化、および (3) それぞれの核分裂片から放出される中性子の数、となる。私が学生時代を過ごした 1990 年代後半は、これらを記述できる、精度の上で満足のゆく理論計算は無かった。計算機の能力に限界があったとも言える。しかし、ここ 10 年の理論研究の進展はめざましく、複合核からスタートし、実験データと比較できる観測量を与える理論が構築されてきており、理論と実験のタイアップがますます加速されると思われる。特に、動力学モデルにおける日本の貢献は大きい[2,3]。

実験では、2000 年ごろからドイツ GSI で始まった逆運動学手法において、初めてオンラインで核分裂片の電荷 (Z) を決定することができるようになった[4]。核子あたり 1 GeV の ^{238}U を加速して標的と反応させ、多くのアクチノイド原子核を生成してインフライト分離し、これら原子核をクーロン励起させることで核分裂を起こす。核分裂片の速度が速い利点を生かして、原子核の電荷 (Z_1, Z_2) が測定できる。従来の放射化法では、核分裂片が持っている運動エネルギーの情報が失われるのに対し、GSI の手法は、(Z_1, Z_2) と TKE の関係を与える点で画期的である。また、これまで未到達であった中性子数の少ないトリウムやラジウムなど、中性子欠損領域の核分裂データの供給を可能にした点で画期的である。逆運動学手法による核分裂データの取得はフランス GANIL でも行われている[5]。JAEA のタンデム加速器では、多核子移行反応を利用して様々な種類の複合核を生成し、質量数分布など核分裂データを取得できる技術を開発した[6]。1 度の実験で 20 核種ものデータを取得でき、中性子数の多いアクチノイド核種のデータを初めて提供した。また、励起エネルギー依存性も詳細に調べられるようになっており、入射中性子エネルギー換算で 50 MeV まで取得された。この開発は、以下に示す高エネルギー核分裂を理解する上で重要な技術開発と言える。

高エネルギー核分裂データを評価するために必要なデータについて考える。核分裂過程そのものの記述においては、励起エネルギーが上がると原子核の殻構造が薄れ、質量数分布のふた山構造が失われ、原子核の液滴モデルが示すような質量対称な核分裂が成長していく。このふるまいは、核分裂理論の中で多く取り入れられている。しかし、一方、物事を複雑にしている現象として、マルチチャンス核分裂がある。 ^{235}U や ^{239}Pu などが熱中性子を吸収するとそのまま核分裂するのに対し、入射中性子のエネルギーが 6 MeV 程度に上がると、中性子が蒸発してから核分裂する、いわゆるセカンドチャンス核分裂が競合する。例えば、評価によれば[7]、 $n+^{235}\text{U}$ の反応で、中性子エネルギーが 10 MeV になると、複合核 $^{236}\text{U}^*$ が直接核分裂するものは 25%、1 つ中性子を出した $^{235}\text{U}^*$ が核分裂するものは 75% に達する。20 MeV 中性子だと ($^{236}\text{U}^* : ^{235}\text{U}^* : ^{234}\text{U}^* : ^{233}\text{U}^* = 13\% : 33\% : 41\% : 13\%$) となる。このように、中性子が放出されると、原子核の励起エネルギーが下がり、殻構造が回復することになるので、核分裂片の質量数分布もふた山構造を回復すること

になる。実際に、この効果を明確に示した成果がある [8,9]。これに対し、これまでの核分裂研究では、マルチチャンス核分裂が考慮されていない考察がほとんどであった。一般に、それぞれのチャンス核分裂がどの割合で起こるかは、評価の仕方によって大きくことなる。文献[8,9]では GEF コード[10]によって評価され、実験データとの比較からおおよそ正しい値を出していると考えられるが、核分裂断面積や核分裂片の質量数分布のデータだけでは、励起エネルギーが高くなると、それぞれのチャンス核分裂の割合を正しく検証できなくなるため、別の実験が必要である。これを解決する実験として、蒸発残留核、すなわち中性子を吸収した後、核分裂を起こすことなく中性子や γ 線の放出によって生き残ったもの、を測定する必要がある。方法としては、脱励起過程で放出され、核種に固有の γ 線を Ge 検出で測定する方法がある。しかし、中性子入射反応でこれを実現するのはバググランド γ 線の多さから難しいと思われる。他の手法として、例えば、核子移行反応(代理反応)で複合核を生成する方法なら、実績もあり、実現できると思われる [11]。あるいは多核子移行反応で生成され、反跳によって標的から放出されて出てきた蒸発残留核をインフライトで質量分離することも考えられる。

複合核の励起エネルギーが増加する場合を考える。この励起エネルギーの増加量は、大小の核分裂片に均等に分配されるわけではなく、主に重い核分裂片に与えられることが、核分裂片から放出される即発中性子の測定からわかっている[12]。ここでは、核分裂片ごとに中性子数が測定されたが、このような詳細なデータは、中性子入射反応としては他に例がない。この重要性から、新たな測定が望まれる。

もう 1 点、入射中性子エネルギーが増加する場合に考慮すべき内容として前平衡過程の取り扱いがある。上で述べた内容は、純粋に複合核からスタートする核分裂の記述である。例えばクーロン障壁近傍の入射反応エネルギーを用いた重イオン入射核反応であれば、前平衡過程を考慮する必要はない。しかし、例えば 10MeV を超える中性子がアクチノイドに照射されると前平衡過程による中性子の蒸発が起こり、この過程でいくつかの高励起原子核が生成され、核分裂に関与することになる。すなわち、励起エネルギー分布を持つ複数の複合核を考慮する必要がある。これに対し、重イオン反応を用いた多核子移行反応(代理反応)では、前平衡過程を考慮する必要がない。中性子入射反応と重イオン反応との比較により、前平衡過程の理解にもつながると期待できる。

以上から、高エネルギー核分裂データの高度化のためには、マルチチャンス核分裂の割合を詳細に測定すること、および複合核の励起エネルギーの大小核分裂片への配分を決める測定を行うことが重要である。特に後者は、理論にとっても大きなチャレンジと言える。さらに、前平衡過程を正しく取り入れるため、重イオン入射反応との比較は有用であると考えられる。

2.2 核分裂データの評価に必要な他のデータ

核分裂片からの即発中性子や γ 線スペクトルを評価するにあたり、残された課題として、核分裂におけるスピンの発生がある。核分裂片のスピンの分布は、励起エネルギー分布と合わせて、即発中性子や γ 線にの放出に影響を与える。核分裂片から放出される γ 線の数から、核分裂片はおよそトータルで $6\sim 8h$ のスピンを持つと考えられるが、その発生のメカニズムははっきりしていない。また、厳密に γ 線のスペクトルを評価するためには、中性子過剰核である核分裂片の準位構造が必要となる。この効果を示す例として、近年、 $n_{th} + {}^{235}\text{U}$ において 20 MeV までの高エネルギーの即発 γ 線が出ていることがわかったが[13]、このような γ 線が放出されるためには、低い励起エネルギーに高スピンの準位が存在する必要がある、またこのような核分裂片の核種はある程度限定された領域にあることが示唆された。これら核分裂片の構造に関するデータを取得するためには、不安定核を生成してビームを取り出す実験が必要となる。不安定核実験施設として、国内では理研がある。ここで得られるデータは、原子力工学と原子核物理学の双方にとって重要であり、両分野は、日本では異なる分野として考えられてきた側面があるが、今後の協力関係に期待したい。

2.3 核分裂コード

複合核からスタートし、scission における初期の核分裂片を発生させて、その後の中性子や γ 線（即発および遅発過程）の放出などにつなげる理論は、これまで独立に評価されてきた核分裂核データを統一的に理解することにつながる。特に、測定が難しい核データを評価するために道筋を与えるものとなる。核分裂イベントを発生させ、すべての諸量を矛盾なく一貫して記述するコードの開発は欧米で進んでおり、CGMF [14], FREYA [15], GEF [10], FIFRELIN [16] といったコードがある。コードにもよるが、核分裂収率や TKE 分布などの入力が必要となるものもある。最初の試みとしては理解できる一方、適用性と汎用性を持たせるには、最終的には複合核の初期条件だけを入力し、基礎理論によって核分裂を記述するのが理想である。日本では、上で述べた動力学モデルを用いた計算で、いくつかのデータをよい精度で記述できている。日本が汎用性の高い核分裂片の発生コードを開発し、関連する核分裂データの統一的な評価を行うことを期待したい。

3. まとめ

ここでは、核分裂核データについて述べた。核分裂は、古いテーマであるが、現在においても、実験および理論研究において、新たな成果とアイデアが生まれている。2010 年には、中性子欠損核である水銀 180 が質量非対称分裂することが発見され[17]、非対称核分裂が起こるのはアクチノイド原子核だけである、という思い込みを覆した。現在は、アクチノイドから ${}^{180}\text{Hg}$ までを統一的に理解する理論チャレンジが進んでいる。新しい発見

は、核分裂モデルの高度化をもたらし、この知見は核データ評価にもフィードバックされる。天体での r プロセス元素合成でも核分裂の重要性が指摘されている。核分裂は、原子力工学、核物理、天体など、分野をまたいでオールジャパンとして取り組むテーマの 1 つと言える。同様に、他の核データ評価についても、様々な連携によって発展していくことを期待したい。

参考文献

- [1] K. Nishio et al., Nucl. Phys. A **632**, 540 (1998).
- [2] Y. Aritomo et al., Phys. Rev. C **88**, 044614 (2013).
- [3] C. Ishizuka et al., Phys. Rev. C **96**, 064616 (2017).
- [4] K.-H. Schmidt et al., Nucl. Phys. A **665**, 221 (2000).
- [5] M. Caamano et al., Phys. Rev. C **92**, 034606 (2015).
- [6] R. Légouillon et al., Phys. Lett. B **761**, 125 (2016).
- [7] A.E. Lovell, Phys. Rev. C **103**, 014615 (2021).
- [8] K. Hirose et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 222501 (2017).
- [9] S. Tanaka et al., Phys. Rev. C **100**, 064605 (2019).
- [10] K.-H. Schmidt et al., Nucl. Data Sheets **131**, 107 (2016).
- [11] R. Orlandi et al., Phys. Rev. C **106**, 064301 (2022).
- [12] A.A. Naqvi et al., Phys. Rev. C **34**, 218 (1986).
- [13] H. Makii et al., Phys. Rev. C **100**, 044610 (2019).
- [14] B. Becker et al., Phys. Rev. C **87**, 014617 (2013).
- [15] J. Verbeke et al., Comput. Phys. Commun. **222**, 263 (2018).
- [16] O. Litaize et al., Eur. Phys. J. A **51**, 177 (2015).
- [17] A.N. Andreyev et al., Phys. Rev. Lett. **105**, 252502 (2010).