

**シグマ委員会設立 60 周年記念**  
**－核データ研究へのオールジャパンでの取り組み－**  
60th Anniversary of Investigation Committee for Nuclear Data  
- All Japan Endeavor for Nuclear Data Activities-

**(2) 核データ部会と今後の期待**

(2) Activities in nuclear data division and expectations for the future

\*西尾 勝久

日本原子力研究開発機構

### 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の発信の中心的な役割りを担うとともに、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 年ごとに交代する形で受け継がれ、今年度で 11 期運営委員が終了し、令和 5 年度から新たに 12 期がスタートする。

核データ活動は、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り、専門家はこれら 3 つの部門のいずれかを担当している。この流れは、基礎的なデータ取得から実用に至るまで、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においてユニークである。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せず、③の結果を踏まえて、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ている中であって、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でもある。

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が増えることは、社会の需要に求めるものであり、当分野でも取り組むべき必要がある。一方、①の核データ測定の世界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、多様化する実験データを十分に取得できる状況とは言えない。また、加速器・原子炉で利用できるビームタイムにも制限がある。これを改善していくことは重要であるが、あわせて、戦略的な対応策が必要である。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である。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優先する。

その例として、核分裂データを取り上げる。核分裂に関わるデータは沢山ある。しかし、スタート地点は複合核に与えられる条件だけで、核種、励起エネルギー ( $E^*$ )、スピン・パリティ ( $J^\pi$ ) の分布である。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や即発中性子の数とエネルギースペクトルが変化する。核分裂片の収率の変化は、遅発中性子の数に変化を与える。複合核からスタートする核分裂の理論を高度化すれば、実験的に取得が困難なデータを評価する状況にあっても外挿に道筋が与えられ、評価方法に根拠を与えることができる。測定が困難なデータは一般に誤差も多くつくが、この不確定性程度まで理論を高度化するのが目標となる。

### 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。核データを評価するうえで、最もカギとなる部分であり、かつ理論の信頼度が評価されるのは、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 ( $A, Z$ ) の確率分布と、それぞれの核分裂片の変形度、励起エネルギー、および  $J^\pi$  分布である。実験の役割は、これらの情報を得るための諸量を取得することである。例えば  $^{235}\text{U}$  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 1.0 個、重い核分裂片から 1.4 個出るので、合計 2.4 個となる [1]。このような数字は核分裂スペクトルの評価にも影響する。また、核分裂片が持つ運動エネルギーの和 (全運動エネルギー-TKE) 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にほぼ等しい。TKE は *scission* における2つの核分裂片の変形度と結びついているため、核分裂片の電荷 (陽子数)  $Z_1, Z_2$  に加え、TKE を測定することで *scission* の形に制限が与えられる。ただし、大・小2つの核分裂片はそれぞれ異なる変形度を持っていることがわかっており、TKE だけでは *scission* の配置は決まらない。

核分裂理論を構築するため、まず第1に重要なのが (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、今後実験と理論のタイアップが期待できる。特に、動力学モデルにおける日本の役割は大きい [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]。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]。

次に重要な課題は、入射中性子エネルギーに対する核分裂データを記述するため、複合核の励起エネルギーと核分裂の関係を見ることである。励起エネルギーを上げると原子核の殻構造が薄れ、ふた山構造を示す質量数に対する収率分布の谷間がうまり、対称核分裂成分が増加する。 $^{235}\text{U}$  や  $^{239}\text{Pu}$  は核分裂性核種であり、熱中性子を吸収して容易に核分裂する。入射中性子が 10MeV や 20MeV に上がり、複合核からの中性子放出のしきい値が上がると、核分裂は中性子蒸発と競合するようになる。評価によれば [6]、 $n+^{235}\text{U}$  の反応で、中性子エネルギーが 10MeV になると、複合核  $^{236}\text{U}^*$  が直接核分裂するものは 25%、1 つ中性子を出して  $^{235}\text{U}^*$  が核分裂するものは 75% に達する。20MeV 中性子だと ( $^{236}\text{U}^* : ^{235}\text{U}^* : ^{234}\text{U}^* : ^{233}\text{U}^* = 13\% : 33\% : 41\% : 13\%$ ) となり、核データ評価には  $^{233}\text{U}^*$  の核分裂の記述も必要となる。この“マルチチャンス核分裂”の効果により、核分裂する原子核の励起エネルギーをかなり下げることになる。それゆえ、原子核の殻構造が回復し、これと並行して、ふた山構造をもつ質量非対称な質量数分布を回復させることになる。実際に、マルチチャンス核分裂の核分裂収率に与える影響は明確に示されている [7]。また、複合核の励起エネルギーが増加した場合、その増加分は、主に重い核分裂片に追加されることが、核分裂片から放出される中性子の測定からわかっている [8] が、データは限定的と言える。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り、実験と理論にとって大きなチャンレンジといえる。前者についての実験では、例えば蒸発残留核を同定しながら直接検出する、といった新たな実験手法を考える必要がある。

さらに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。核分裂片のスピンド分布は、励起エネルギー分布と合わせて、即発中性子やガンマ線を発生させる始条件となる。核分裂片から放出されるガンマ線の数から、核分裂片はおおよそトータルで 6~8  $\hbar$  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、 $n_{\text{th}}+^{235}\text{U}$  において 20MeV までの高エネルギーの即発ガンマ線が出ていることがわかったが [9]、このような  $\gamma$  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。このように評価を高度化するには、不安定核を生成してビームを取り出す施設での実験が必要となる。大型の不安定核実験施設は、

国内では理研があり、また世界的にみても多くの国で運営・計画されている。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おいて重要であり、今後、協力のもとで進んでいくことを期待したい。

## 2-2. 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、その後の中性子やガンマ線（即発および遅発過程）の放出などにつなげる仕組みは、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 [10], FREYA [11], GEF [12], FIFRELIN [13] 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分布などを予め求めるものもある。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するコード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において、上の（1）～（3）の諸量をかなりよい精度で記述できている。日本発信で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に期待したい。

## 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[14]、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<sup>180</sup>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。他の核データ評価についても、同様に連携が構築されるものとする。

### 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] A.E. Lovell, Phys. Rev. C **103**, 014615 (2021).
- [7] K. Hirose et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 222501 (2017).
- [8] A.A. Naqvi et al., Phys. Rev. C **34**, 218 (1986).
- [9] H. Makii et al., Phys. Rev. C **100**, 044610 (2019).
- [10] B. Becker et al., Phys. Rev. C **87**, 014617 (2013).
- [11] J. Verbeke et al., Comput. Phys. Commun. **222**, 263 (2018).
- [12] K.-H. Schmidt et al., Nucl. Data Sheets **131**, 107 (2016).
- [13] O. Litaize et al., Eur. Phys. J. A **51**, 177 (2015).
- [14] A.N. Andreyev et al., Phys. Rev. Lett. **105**, 252502 (2010).

---

\*Katsuhisa Nishio

Japan Atomic Energy Agency