

会議のトピックス (II)

原子力学会「2024年秋の大会」

企画セッション（「シグマ」調査専門委員会主催、核データ部会共催）

将来の核データ – 次世代 JENDL に向けて –

2024年9月12日 13:00～14:30 東北大学 川内北キャンパス

(1) 核分裂核データ評価手法の高度化

International Atomic Energy Agency

奥村 森

s.okumura@iaea.org

東京工業大学

石塚 知香子

ishizuka.c.aa@m.titech.ac.jp

株式会社 NAT

千葉 敏

chiba.satoshi@nat-web.com

1. はじめに

原子力で必要とされる核分裂核データは、核分裂生成物収率のみならず、即発中性子・ガンマ線スペクトル、崩壊熱、遅発中性子数など多岐にわたる。これら全てのデータは原子炉の運転、放射性廃棄物の処理・処分、マイナーアクチノイド (MA) の核変換、宇宙における元素合成の起源の解明、核セキュリティや核不拡散分野への技術応用の面でも重要性が増している重要な基幹データである。

本稿では、原子力学会「2024年秋の大会」企画セッションで紹介した「核分裂核データ評価手法の高度化」についての議論を紹介する。背景については、JAEA 西尾さんが執筆された核データニュース No.135[1] が詳しいのでそちらをご参照されたい。

2. 核分裂過程と核分裂核データ

図 1 に核分裂の時間発展の様相を示す。核分裂過程には、(1) 原子核が断裂し分裂片ができるまで、(2) 核分裂片が即発中性子・ガンマ線を放出して脱励起するまで、(3) それ

らがベータ崩壊し安定核に向かうまでの少なくとも3つの物理過程がある。(2)、(3)の過程で観測される物理量や収率は全て断裂時点の(1)で形成された核分裂片の励起エネルギーやスピン等の状態によって決定される。

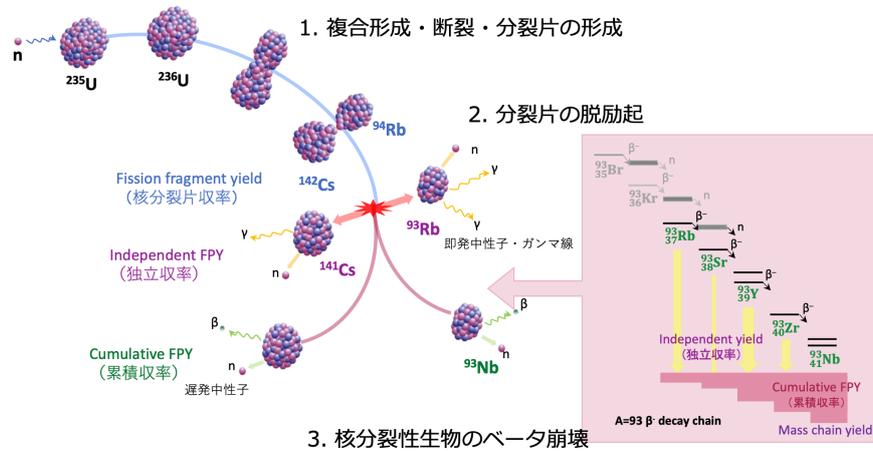


図1 核分裂過程

しかし、(1)の実験的観測は困難を伴うため、実験値は主に(2)及び(3)の過程におけるもので、核分裂生成物の収率がよく測定されているのは(3)に至ってからである。図2に原子核反応実験データベース EXFOR[2]に登録されている核分裂収率(一次・独立・累積収率全て)のターゲット核種ごとのエントリ数を示した。この図からもわかるように、実験値は主に原子力応用分野で古くから求められてきた核種に集中している。さらに、例えば ^{235}U の熱中性子入射による核分裂では、500を超える核種が生成されると言われているが、全核分裂生成物の収率が精度良く測定されているわけではない。

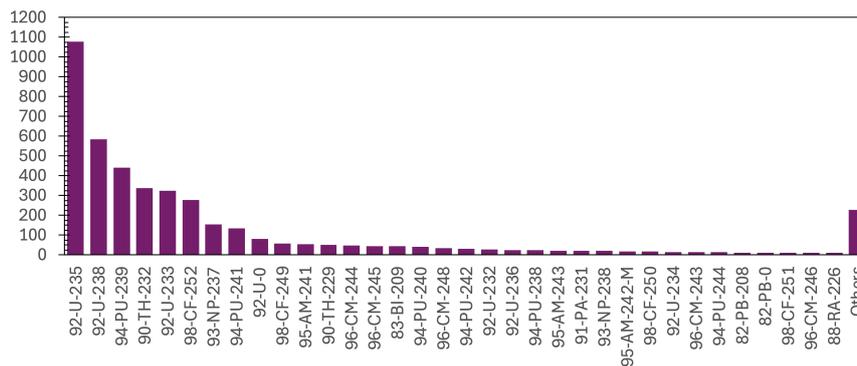


図2 核分裂収率実験データ数 (EXFOR エントリ数より集計。全ての入射粒子の合算。エントリ数が10件以下の核種は省略。)

JENDL-5.0で更新された核分裂収率データでは、新たな実験データの評価及び従来用いられてきた現象論的モデルを物理理論に基づいたデータへの置き換えなどの工夫を取り入れた新たな評価手法が採用された[3]。しかし、核分裂に関わる核データは核分裂収率だけではない。表1に、ENDF-6フォーマット[4]に定義される核分裂核データの代表例を挙げた。詳細

は省くが、これらの実験値も核分裂収率と同様の状況で、評価に十分な実験値が揃っていないとは言えない。また、これらの物理量は全て、核分裂発生直後の分裂片の情報を起源として相互に関係しており、本来なら同時に整合性を持った方法で評価することが望ましいが、個別に評価されている現状がある。

表1 ENDF-6 フォーマットに含まれる核分裂核データの例

物理量		MF	MT
核分裂収率	独立収率	8	454
	累積収率	8	459
中性子放出	核分裂あたり即発中性子数	1	456
	核分裂あたり遅発中性子数	1	455
	核分裂あたり総中性子数	1	452
	即発中性子スペクトル	5	18
ガンマ線放出	ガンマ線スペクトル	15	18
	ガンマ線放出数	12	18

実験手法の高度化や理論研究の進展により核分裂現象の理解が進んでいるが [5]、今後、実験値の存在しない核種・エネルギー領域に対して核分裂に伴う物理量を統一的に核データとして評価するのに十分な実験値が揃っていない状況がある。このため、次の世代の核分裂核データの評価に向けては、実験値の充実のみならず、現象論的手法や核分裂理論を組み合わせた評価手法の高度化が求められている。

3. 核分裂片ジェネレータの必要性

核分裂現象の理論的シミュレーション (1) については、Langevin モデル [6, 7] をはじめとした理論計算モデルの開発が活発に行われている [8]。また、核分裂片が即発中性子・ガンマ線放出して脱励起する (2) の過程については、Hauser-Feshbach 統計崩壊理論 [9] を適用することにより独立収率や即発中性子数などの実験値を再現する手法の開発が進んでいる [10, 11, 12]。特に、近年ではマルチチャンス核分裂も考慮し中性子入射エネルギーが 20 MeV 程度までの計算も行われている [13]。この手法には (1) の段階の情報がインプットとして不可欠である。また、理論モデルが出力する (1) の確からしさを (2) の脱励起過程に繋いで実験値と比較することで検証する研究 [14, 15] も盛んに行われている。しかし、理論モデルの多くは計算コストが高く、評価に迅速に使うには時間がかかるという弱点がある。

そこで着目されているのが (1) の情報を理論モデルや現象論と組合せて“ジェネレート”する手法だ。例えば、本来は核分裂物理量を現象論的に幅広い核種・エネルギー領域で出力するために開発された GEF (GEneral description of Fission observables) コード [16] に内包される Event-by-Event モード機能を使い、Monte Carlo サンプリングにより核分裂片の TKE (Total Kinetic Energy)、励起エネルギーなどを取り出し Hauser-Feshbach 統計崩壊コードの入力として利用する手法の有用さが注目されている [17, 18]。一例として、東工大が開発した 4 次元 Langevin モデルを元にした核分裂片情報 [19] が Hauser-Feshbach 統計崩壊コードである TALYS [20, 14] にデータベースとして内包されている。

このように、(1) 核分裂初期の分布を生成する「核分裂片ジェネレータ」となるモデル、(2) 分裂片の脱励起及び、(3) ベータ崩壊過程を一貫して計算できるフレームワークを国産で開発することができれば、次世代の JENDL 核分裂核データの開発にとっての大きなアドバンテージとなる。

当日の発表では、これらの状況を紹介し、「核分裂片ジェネレータ」の開発に向けて各応用分野における重要な核種やエネルギー領域に関する情報収集・議論の必要性を提議した。その中で、マルチチャンス核分裂の考慮が必要な高いエネルギー領域においてはチャンス核分裂の割合を正しく検証する必要があるさらなる実験による確認が求められることや、「核分裂片ジェネレータ」に内包されるであろう既存の現象論的モデル [21] の最適化も求められること、炉物理の観点からは不確かさも求められるなどの意見が上がった。また、想定しているモデルでは二体核分裂を前提としていることから三体核分裂による軽元素の生成についての評価の必要性についても発表後に意見を頂いた。

4. まとめ

核分裂に伴い発生する核分裂片を起源として、脱励起やベータ崩壊を経る過程で発生する核分裂核データについて紹介した。核分裂は現在でも重要なデータで、さらなる応用を見越して実験値が乏しい核種・エネルギー領域へも評価値を拡張するための評価手法の高度化の一助となるだろう「核分裂片ジェネレータ」と核分裂核データを一貫して計算することができるフレームワークの開発の必要性について議論した。日本発でこのようなフレームワークの開発ができ、核分裂核データの評価が一層進展することを期待したい。

参考文献

- [1] K. Nishio. 核データニュース, 135:26 – 31, 2023.
- [2] N. Otuka et al. *Nuclear Data Sheets*, 120:272–276, 2014.
- [3] O. Iwamoto et al. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 60(1):1–60, 2023.
- [4] A. Trkov et al. Technical Report CSEWG Document ENDF-102, BNL-203218-2018-INRE, Brookhaven National Laboratory, 2018.
- [5] K.-H. Schmidt and B. Jurado. *Reports on Progress in Physics*, 81(10):106301, sep 2018.
- [6] Y. Aritomo and S. Chiba. *Phys. Rev. C*, 88:044614, Oct 2013.
- [7] C. Ishizuka et al. *Phys. Rev. C*, 96:064616, 2017.
- [8] N. Schunck and L. M. Robledo. *Reports on Progress in Physics*, 79(11):116301, oct 2016.
- [9] W. Hauser and H. Feshbach. *Phys. Rev.*, 87:366–373, Jul 1952.
- [10] J. Randrup and R. Vogt. *Phys. Rev. C*, 80:024601, Aug 2009.

- [11] P. Talou et al. *Phys. Rev. C*, 83:064612, Jun 2011.
- [12] O. Litaize et al. *The European Physical Journal A*, 51(12):177, Dec 2015.
- [13] A. E. Lovell et al. *Phys. Rev. C*, 103:014615, Jan 2021.
- [14] C. I. S. C. Kazuki Fujio, Shin Okumura and T. Katabuchi. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 61(1):84–97, 2024.
- [15] S. Tanaka et al. *Phys. Rev. C*, 108:054607, Nov 2023.
- [16] K.-H. Schmidt et al. *Nuclear Data Sheets*, 131:107 – 221, 2016.
- [17] K. Fujio et al. *The European Physical Journal A*, 59(8):178, 2023.
- [18] K. Fujio et al. *EPJ Web Conf.*, 292:08004, 2024.
- [19] C. Ishizuka. <https://github.com/chikako-ishizuka/4DLangevin>.
- [20] A. Koning et al. *The European Physical Journal A*, 59(6):131, 2023.
- [21] A. C. Wahl. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 39(1):1 – 156, 1988.