

会議のトピックス(II)

CM on the Fission Product Yield Experimental Database

原子力機構

湊 太志

minato.futoshi@jaea.go.jp

5月27日～30日に東京工業大学・先端原子核工学研究所で開催された Consultancy Meeting on the FPY Experimental Database について報告する。会議の趣旨は、核分裂収率 (FPY) およびそれに関連する実験データの情報を集め、それを普及させるために EXFOR データベースに収録することである。また、参加者からデータベースに対する要求をとりまとめるとともに、各国で行われている実験・理論・評価研究について参加者で情報共有することである。本会合の出席者の発表スライドは

<https://www-nds.iaea.org/index-meeting-crp/CM-FPY-2019/>

から閲覧できるようになっている。

なお、この会議のプレ会議として、2018年8月にロスアラモスで FPY とそれに関連する実験データについて会合が行われているので、時間に余裕があれば報告書をご覧ください [1]。

1. 会議の内容

先ほど述べたように、この会議の趣旨は、FPY およびそれに関連する実験データをとりまとめ、現在および後世の研究者が活用できるよう EXFOR データベースに収録し、普及させることである。会議の参加者は中国から2名、フランスから2名、日本から6名、韓国から1名、アメリカから4名、IAEA から2名の計17名であった。

EXFOR といえば、説明するまでもなく、様々な核反応の実験データを収録し、評価研究のみならず核物理関係でも御用達のデータベースである。しかしながら、FPY に関しては、核反応ほどデータが網羅されているというわけではない。2018年8月にロスアラモスで行われた会合では、EXFOR における核分裂収率の実験データ収録数の問題について議論と報告がなされている [1]。私もその会議に参加したが、そこで初めて、以下に述べる実験データ収録数の問題について知った。

評価済みの FPY データは、現在大きく分けて二つある。一つは、ロスアラモス国立研究所の England & Rider による評価データ [2] であり、ENDF/B-VI に採用されているもの

である。JENDL/FPY-2011 は、彼らの評価データを基礎にして作られている。もう一つは、UK のグループがとりまとめてきたもので、R. Mills 氏が作成した JEFF-3.1 の評価データである [3]。両者とも、もちろん、実験データを基に評価が行われている。しかし、ENDF/V-VI と JEFF-3.1 で使われた実験データの数と種類は 1 対 1 ではない（本会合の奥村氏のスライドで詳細を知ることができる）。特に関心が高いと思われることは、両者の FPY 評価に使われた実験データには、EXFOR に収録されていないものが多数あることである。つまり、EXFOR には FPY データの「抜け」が存在するということである。

しかしながら、EXFOR は実験データの情報を得るための有用なツールであることは変わらないであろう。そのため、England & Rider と Mills の実験データリストを改めて精査し、EXFOR に収録されていないものがあれば、その文献を調査し収録することが、新たに FPY 評価を行うためには重要になってくる。

一方で、EXFOR とは別に、FPY 評価には様々な問題が存在する。崩壊熱や遅発中性子収率は、評価済 FPY データと崩壊データを用いた総和計算によって求めることができるが、その計算結果は実験データを必ずしも再現しない。崩壊熱に関する問題は、核データニュースの吉田氏の報告 [4] にあったように、Total Absorption Gamma-ray Spectroscopy (TAGS) によって既に解決を得ている。一方で、遅発中性子収率には問題が残ったままである。2016 年に片倉氏らによって、England & Rider の Ge-86 の収率の評価値 [2] にミスアサインがつけられた [5]。このミスアサインによって、遅発中性子を放出する Ge-86 (Pn=45%) の核分裂収率が、実際よりも高く見積もられていた。現行の JENDL/FPY-2011 は、Ge-86 の収率を Wahl の核分裂収率モデルを用いて修正したものである。修正された JENDL/FPY-2011 による総和計算は、遅発中性子収率に一定の改善を与えることができている。しかし、実験データと総和計算にはまだ差が残されたままである。他にも、即発中性子分布や入射エネルギー依存性など、FPY 評価には、解決すべき数多くの課題が残されている。どの評価ライブラリも最後に FPY 評価が行われてから時間が経ち、評価を行った当時の専門家は引退してしまっている。そのため、技術の継承も FPY 評価研究の課題の一つである。

このような状況から、国際的な団結が現在の FPY 評価研究には必要であり、今回の会合が IAEA の Consultancy Meeting として開催されることになったと私は考えている。

2. 初日 (5/27)

最初の講演者の IAEA/NDS の大塚氏は、本会合の趣旨と目的について説明を行った。また、IAEA での過去の FPY 評価に関する活動と、新しい CRP の立ち上げ計画について紹介がなされた。OECD/NEA の M. Fleming 氏からは、NEA Data Bank における EXFOR データベースに対する活動と、評価済みデータや EXFOR のデータを可視化する JAvA-based Nuclear Data Information System (JANIS) 等、NEA が開発している核データ専用シス

テム、および WPEC の活動について紹介があった。実際に JANIS を使ってみたが、EXFOR に収録されているデータを描画するうえで便利な機能があり、ビジュアルも綺麗であった。私は今後頻繁に使うことになりそうである。

IAEA/NDS の奥村氏は、EXFOR に収録されている FPY とそれに関連する実験データについて講演をした。氏は最初に、EXFOR に収録されている核分裂収率の物理量の識別子 (ELEM/MASS, IND, FY 等のこと) について、正確な情報が与えられていない場合があることについて議論をし、参加者へ問題提起をした。さらに、England & Rider と Mills の FPY 評価に使用された実験データリストに収録されている核分裂反応の種類を、事細やかに調査し、その成果について発表を行った。奥村氏の資料は、表やグラフを使って分かりやすくまとめられており、とても分かり易かった。また、FPY 評価研究のこれまでの歴史についてもまとめてあり、氏の作成した発表資料は、たいへん有用なものであると感じた。氏はさらに、EXFOR を用いた FPY データの検索に関する注意点と、現在の EXFOR のデータ収録方式が FPY や FPY と関連する実験データに対応できていないこと (この点については他の参加者からも指摘があった) を説明し、EXFOR のユーザーインターフェースの性能向上の必要性についても議論をした。



図 1 : 会議の様子

午後からは、CEA で行われている FPY 測定実験について G. Belier 氏から紹介があった。CEA では Cadarache と Bruyères le Châtel のグループで、核分裂の実験が行われている。Cadarache のグループは、Grenoble の Institut Laue-Langevin (ILL) において、原子炉内

に設置した核分裂性サンプルから出てくる核分裂生成物を、質量分析器に輸送して粒子弁別し、その分布を調べる研究が行われている。また ILL では、核分裂生成物の Isomer 状態の研究が行われていることも報告された。Bruyères le Châtel のグループは、CALIBAN という装置を用いて、高速中性子による Pu-239 の積算核分裂収率の実験をしている。新しい研究手法として、有機液体シンチレータを用いた自発核分裂の崩壊分岐比の測定や、同様の手法を用いた核分裂生成物の粒子弁別の取組みについて紹介がなされた。Darmstadt の GSI における SOFIA の実験では、U-238 をビームとして用いて標的に衝突させ、その核分裂生成物を測定するという実験が行われていることが紹介された。

A. Tonchev 氏と J.A. Silano 氏は、LLNL で行われている核分裂収率の入射中性子エネルギー依存性の実験について講演をした。入射中性子のエネルギーは、25 keV~9 MeV までの比較的低いエネルギー領域と 14.8 MeV の高い領域に着目している。実験では、単色エネルギーの中性子を作ることが必要であり、それらは陽子または重陽子を Li-7 や水素同位体に照射することによって得ている。Pu-239(n,f)Nd-147 の測定で得られた結果は、核分裂収率は 4 MeV までは単調増加であり、それ以上のエネルギーになると単調減少になるというものであった。他の核分裂生成物についても同様の傾向が得られている。このようなエネルギー依存性を示す理由を、Tonchev 氏は定性的なモデルを用いて議論した。また、Pu-239(n,f)Nd-147 の核分裂収率の 15 MeV 近傍の過去の実験データには、大きなばらつきが見られているが、今回の測定で得られた結果は、それらのおおよそ中央にデータ点を与えていることを紹介した。Silano 氏は、新しい実験装置である Rapid Belt-driven Irradiated Target Transfer System (RABITTS) とその成果の一部についても紹介を行った。Tonchev 氏は元々ブルガリア出身とのことだが、原子核の分野で米国は東欧からの研究者が多い印象を受ける。今後はどうなっていくだろう？日本は、外国から優秀な研究者をリーダーとして受け入れたいはしないのだろうか？私の所属するセンターに、外国人リーダーが来たら・・・なかなか面白いのではなかろうか。

Brookhaven 国立研究所の A. Sonzogni 氏は、NNDC における活動と原子炉反ニュートリノの研究について講演をした。現在の評価済 FPY データには共分散が与えられていないことから、K.-H. Schmidt 氏が開発した GEF コードを用いて独立核分裂収率の共分散を求め、そこから ENDF/B-VIII.0 decay data を用いて積算核分裂収率の共分散を求めるアプローチについて紹介をした。また、原子炉反ニュートリノスペクトルを計算する際に、原子炉内で熱エネルギーになる部分を、総和計算を用いて計算する必要があるが、これまでの研究では FPY の共分散を考慮していないため、反ニュートリノスペクトルの誤差が低く見積もられている可能性について指摘した。

3. 2 日目 (5/28)

午前は、ロスアラモス国立研究所の河野氏より、氏のグループが行っている FPY と核

分裂に伴う様々な物理量の入射中性子エネルギー依存性の理論研究について報告がなされた。核分裂のエネルギー依存性を考えるうえで、重要になるのが **Multi-Chance** 核分裂の寄与である。氏は **Hauser-Feshbach** モデルを用いて、**Multi-Chance** 核分裂の断面積を求め、核分裂前に放出される中性子 (**pre-fission neutron**) のエネルギースペクトルの計算結果について紹介をした。また、理論計算を用いて核分裂生成物の核種を特定する際に、粒子射影法を用いた場合に得られる質量分布や荷電分布について議論を行った。

東工大の椿原氏は、FPY の評価研究について講演を行った。前半は、評価のために必要な FPY データを EXFOR から取り出す手法について説明し、それによって得られた FPY データの分類結果について講演した。初日に奥村氏が指摘したように、現在の EXFOR データベースにおける FPY の収録方式の問題についても指摘された。また、FPY とその共分散の導出を含めた評価研究について発表し、得られた FPY データを用いて計算したマクロな物理量 (遅発中性子収率、崩壊熱、PIE など) を、実験データと比較した結果について紹介した。

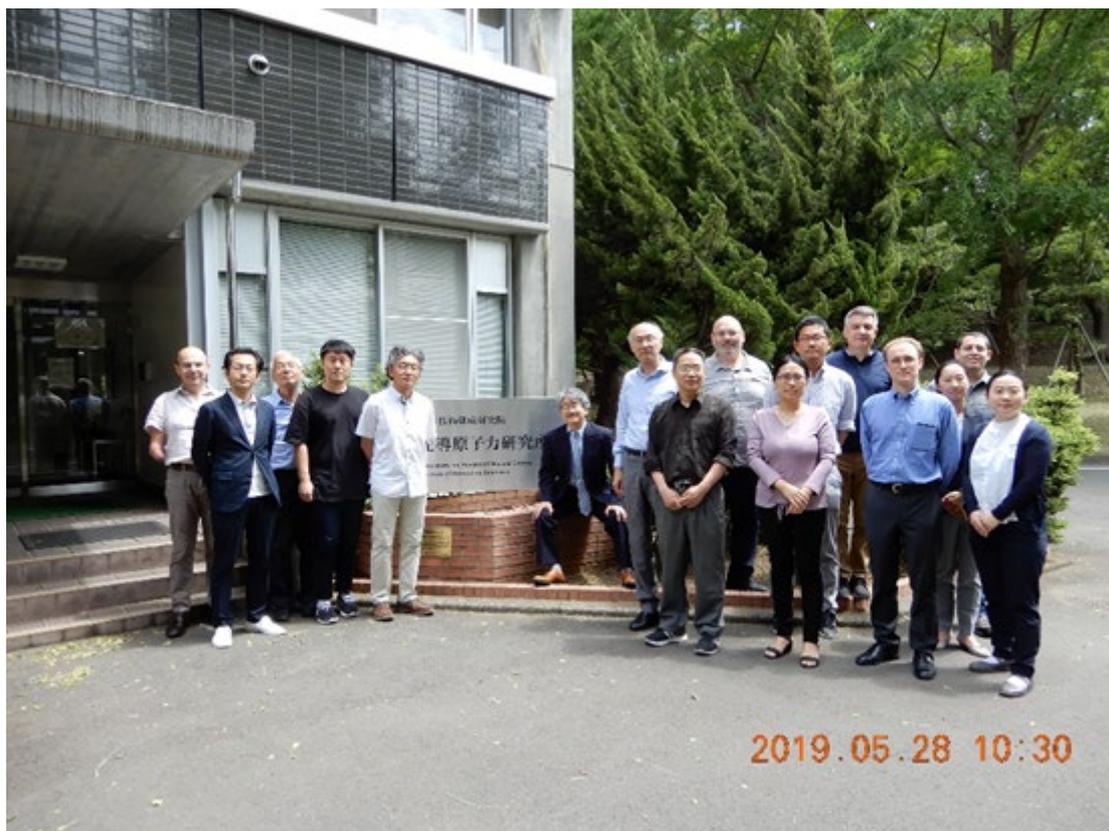


図 2 : 会場である東京工業大学・先端原子核工学研究所の前で集合写真

N.C. Shu 氏は、China Nuclear Data Center (CNDC)における FPY 評価の現状について報告

をした。CNDC では、他のグループと同様に、Wahl 氏の Z_p モデルを用いた独立核分裂収率の計算を行っている。また、FPY の入射中性子エネルギー依存性についても独自の手法で評価を行っており、エネルギーに対する相関が正から負に転換するポイントになる核種があることを議論した。また、EXFOR の C4 フォーマットから FPY データを取得し、評価を行うシステム「Yield Evaluation System (YES)」の紹介も行われた。

湊は、拘束条件付きハートリーフォック (CHF) を用いて、核分裂片の質量と荷電分布の関係を調べ、England & Rider の評価値と比較した結果を紹介した。CHF は核分裂軌道の平均値のみしかたどらず、また四重極と八重極変形しか考慮していないのだが、その計算結果は England & Rider の評価値と、荷電分布にして $\Delta Z \leq 0.6$ の範囲内で、一致していることを紹介した。もし二つの核分裂片が励起状態にあり、即発中性子を放出する場合は、CHF の計算結果はより評価値に合う可能性があることも指摘された。

IAEA/NDS の奥村氏は、再び登壇し、核分裂によって観測できる物理量の理論計算結果について発表した。氏の理論モデルは、即発核分裂収率は実験データを採用し、荷電分布は Wahl の系統式を用いて FPY を導出している。核分裂片の励起エネルギーは、核分裂に伴う質量差エネルギーと核分裂片の全運動エネルギー (実験値を採用) から求められている。そして、Hauser-Feshbach 模型を用いて、高い励起状態にある核分裂片からの粒子放出が数値的に導かれる。キーポイントは、Hauser-Feshbach 模型の数値計算に、モンテカルロ法ではなく、決定論法を採用していることである。そうすることで、低頻度に発生する核分裂生成物を余すことなく数値的に導出できるようになる。この計算手法の枠組みを用いて、即発中性子量や独立核分裂収率、崩壊熱や遅発中性子収率の計算結果について発表をし、積算核分裂収率に対する入射中性子エネルギー依存性についても議論をした。

4. 3 日目 (5/29)

午前は、東工大の千葉氏より、核分裂に対する核データ編集の必要性とそのリクエストを、理論と評価の観点から講演した。最初は、東工大で行われている核分裂研究の概要について紹介し、4次元 Langevin 計算を用いて複合核の質量と核分裂片の質量の相関が理論計算でよく再現できていることを紹介した。また、U-235 (n,f) の FPY (A=132) に表れる特異なピークに着目し、このような構造がなぜ生まれるのか議論を行った。FPY の荷電偏極や核分裂片ごとの即発中性子分布、核分裂片のスピ分布などに表れるシーソー構造に着目をして、議論を行った。他にも 10 MeV 以上の即発中性子スペクトルをなぜうまく再現できないことや、核分裂に関わるデータと EXFOR の役割について講演をした。B-11 を用いた逆運動学によって、10 MeV 近傍の単色エネルギー中性子を生成する手法についても紹介した。

KAERI の J. Lee 氏は、半経験的手法を用いた核分裂収率の質量分布の計算について講演を行った。半経験的手法の利点について取り上げ、その理論的枠組みについて説明をし

た。ポテンシャル平面は巨視的モデルと半経験的な殻エネルギーの式から求め、核分裂鞍部における準位密度と内部エネルギーの関係から核分裂収率が求められている。核分裂バリアと巨視的ポテンシャル、殻エネルギーに使われている 10 個のパラメータは実験データを基に χ^2 Fitting から求め、得られた FPY の結果を TALYS、GEF のデータと比較した。また、即発中性子分布の計算結果についても紹介した。このような半経験的手法は、核分裂のようなメカニズムがまだよく理解されていない物理現象において、強みになる。いかにうまくモデル化し、そのパラメータを決めるかが重要であろう。



図 3 : 懇親会の様子

CNDC の Y.J. Chen 氏は、理論モデルを使った FPY の計算手法について発表を行った。中国では、核データのための核分裂研究として 5 年間の研究プロジェクトがあり、N.C. Shu 氏が発表した FPY の評価方法もそのプロジェクトの一部であるらしい。Chen 氏の講演では、Covariant DFT からポテンシャルエネルギーと質量テンソルを求め、時間依存する座標生成法を使って FPY を求めることを紹介した。Th-226 の計算結果について紹介し、実験データに合わせるところまでは達していないが、おおよその傾向は再現していることを紹介した。また、実験データに計算結果を近づけるためには、対相関の効果が非常に重要であることも議論された。私が核分裂の研究をやっているころは、このような計算は

そう簡単にできるものではないと思っていたので、恐ろしい進展である。世界の研究の進展の速さはめまぐるしい。また Chen 氏は、中国で行われている 3 次元 Langevin 計算の研究についても紹介した。

午後は、これまでの議論の議事録作成と今後の計画について参加者でとりまとめが行われた。議事録作成は、Rapporteur である M. Fleming 氏の手腕により、非常にスムーズに進んだ。

5. 4 日目 (5/30)

午前は引き続き、会議の議事録作成を行った。IAEA/NDS では、FPY 評価に関する CRP を発足させること予定している。この会合の趣旨となっている活動は、CRP の目的を補助する役割を果たすと思われ、今後も活動を継続していく必要があることを参加者で確認した。

6. 会合の所感

他の Consultancy Meeting や CRP でも言えることかもしれないが、小人数で 4 日間みっちりこなしたということで、内容が充実した会合であったと思う。個人的にも、世界の核分裂研究の最新の情報と意外な発展を知ることができ、刺激であった。

今回の会合では Chairman を河野氏、Rapporteur を Fleming 氏が務めた。いうまでもなく河野氏の議事進行力は頼もしいものであったが、議事録作成の時の Rapporteur としての Fleming 氏の手腕には目を見張るものがあった。会合では、PC 画面をスクリーンに投影しながら議事録を作成していったのだが、彼の理解力とイニシアティブのおかげで、会合の成果がみるみるうちに形になっていった。やはり誰かが先陣を切らなければ、群れた集団は前に進めないのである。今回その先陣を Fleming 氏が担ってくれた。間違えがあれば後続が指摘し、迷った時はみんなで相談すればよい。僕が 2017 年度に米国に留学している時も同じように会議が進行していた。日本では、みんながみんなの空気を読みながら会議を進行させていくので、遅いし議論も発散し、何が決まったのか釈然としないことがある。一方で、今回の会議の終了後は、爽快感と達成感に満ちていた。このような精神的にプラスに働く成果は、全体の仕事にも影響するのではないかと思う。

IAEA の Consultancy Meeting を東京で開催するという、めったにない機会にも関わることができた。私としても、出張に伴う移動の疲れが少なく、「外国出張報告書」¹の作成もなかったのも、何もかもがスムーズに進行したように感じた。また日本開催の機会があればうれしく思う。

¹ 原子力機構職員が、外国出張した際に提出する報告用書類

7. おわりに

会議の内容をありのままに書いていってしまったら非常に長くなってしまった。このような書きっぷりで良いのかどうか悩んだ。読者を飽きさせないように、私の所感を随所に挟む試みもしたが、逆にさらに長くなってしまってもいる。電子版の長い文章は読まれない風潮もあるので、非専門の方には特に、冗長に感じたかもしれない。また執筆の機会があれば、これまでとは違った角度からシンプルにまとめられるようにしたい。

以上、雑文にお付き合いいただきありがとうございました。

参考文献

- [1] “Summary Report on Workshop on Fission Product Yield Experimental Data,” LA-UR-18-28309, Los Alamos National Laboratory (2018).
- [2] T.R. England and B.F. Rider, “Evaluation and Compilation of Fission Product Yields,” LA-UR-94-3106, ENDF-349, Los Alamos National Laboratory (1994).
- [3] R. Mills, “Fission product yield evaluation,” A thesis submitted to the Faculty of Science of the University of Birmingham for the degree of Doctor of Philosophy (1995).
- [4] 吉田正、「原子炉崩壊熱における pandemonium 問題の発見からその解決へ」核データニュース No.99 (2011).
- [5] J. Katakura, F. Minato, K. Ohgama, “Revision of the JENDL FP Fission Yield Data,” EPJ Web of Conference Vol. 111, 08004 (2016).