

会議のトピックス(II)

核構造・崩壊データ評価者ネットワーク会議

核データ研究所

飯村 秀紀

iimura.hideki1@gmail.com

1. はじめに

標記会議 (Meeting of the International Network of Nuclear Structure and Decay Data Evaluators) が、2024 年 4 月 15 日～19 日に IAEA で開催された。この会議は IAEA の主催で、ほぼ隔年で開催されており、今回で 25 回目である。12 カ国と IAEA から 43 名が参加した (内、対面での参加者は 29 名)。日本からの参加者は、対面で参加した筆者と、オンラインで参加した小浦寛之氏 (原子力機構) の二名であった。他に、日本人としては、米国立核データセンター(NNDC)の太田周也氏がオンラインで参加した。

会議の目的は、Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF) を更新するための評価作業を、より高度で迅速なものにすることである。この目的のために、会議では、評価の方法や評価者ネットワークの運営などについて多くの項目が協議された。そのうち幾つかについて以下にまとめる。会議の詳しい内容は、IAEA から INDC(NDS)-0901 [1]として最近刊行された。

2. 会議の内容

2.1 50 周年記念セッション

核構造・崩壊データ評価者 (NSDD) ネットワークが設立されてから 50 年になるので、会議の最初に記念セッションが設けられた。Tuli (元 NNDC)、Nichols (元 IAEA 核データセクション長)、Oblozinsky (元 NNDC センター長)、Dimitriou (IAEA) が、それぞれが関わったネットワークの歴史について発表した。

Tuli は、ネットワーク設立当初から現在までずっと ENSDF の更新と普及に取り組んでおり、数年前まで NNDC の ENSDF グループのリーダーであった。ネットワーク設立以前の 1960 年代の核構造・崩壊データについて、米国ペンシルベニア大 ($A=1-20$)、オランダのユトレヒト大 ($A=21-44$)、米国オークリッジ研究所 ($A>44$)、米国バークレー研究所 (Table of Isotopes) の 4 カ所にセンターが在ったと振り返った。1970 年代に入り、核構造・崩壊データの必要性が、基礎科学に加えて、医療、原子力など応用分野でも高く

なったことにより、1974 年に IAEA での専門家会合で、データと文献の計算機化されたファイル (ENSDF と NSR) を国際協力で作ることが結論された。これを受けて、1976 年の IAEA の専門家会合で、ENSDF を作るための評価作業を国際的に行う NSDD ネットワークが設立された。Nichols は、この時の会議に参加しており、会議の思い出を語った。なお、この時の会議には、日本からも田村務氏（原子力研究所）と大沼甫氏（東工大）が参加している。日本では、1977 年に田村氏を中心として ENSDF グループが整い、A=118-129 を受け持つことになった。NSDD ネットワーク設立後の最初の会議は、1977 年にオークリッジ研究所 (ORNL) で開催された。この時点で ENSDF の評価作業を割り当てられた国は、米国、ソ連、オランダ、英国、ドイツ、日本、スウェーデン、クウェートである。Tuli は、この時の会議から参加している。ネットワーク会議は、それ以降、ほぼ隔年で開催されている。Tuli によると、1980 年代の会議では、評価作業の方針をめぐる Martin (ORNL) と Endt (ユトレヒト大) の対立があったそうである。

Oblozinsky は、1990 年代前半に IAEA 核データセクション長として経験した核データセクションの危機について述べた。当時は、IAEA 上層部は核データに理解が無く、予算を取り上げて安全関係部門に移そうと考えていた。1995 年に有馬朗人先生が主導した委員会によるレビューが行われ、核データセクションでは ENSDF を使った実演を行なって有用性を訴えた。その結果、委員会は高い評価を IAEA 上層部に答申し、核データセクションは生き残ることが出来た。もしあの時に評価が低ければ NSDD ネットワークも無くなっていたらと言って、Oblozinsky は有馬先生に感謝していた [2]。その他、NNDC で編集している Nuclear Data Sheets を、2000 年代中頃に、それまでの ENSDF 専用から核反応データ (ENDF) に部分的に開放した経緯についても話した。NSDD ネットワークの現コーディネータである Dimitriou は、ENSDF の新しい評価者を増やすために IAEA が 2010 年代からトリエステで続けている、核構造・崩壊データの評価手法を教えるワークショップなどについて発表した。

2.2 各評価センターの現状

米国の NNDC、ORNL、バークレー研究所 (LBNL)、アルゴンヌ研究所 (ANL)、ミシガン州立大、テキサス A&M 大、デューク大 (TUNL) から、それぞれの評価センターの状況が報告された。NNDC によると、Web で公開している各データベースの 2023 年の検索数は、NuDat が約 700 万件、NSR が約 200 万件、ENSDF が約 100 万件、Wallet が 50 万件で、その他はずっと少ない。NuDat は ENSDF を基に作られた核図表であり、利用者は NuDat を入口として ENSDF を利用することが多い。また、Wallet は、基底状態と比較的寿命の長い準安定状態の基本的特性をまとめて印刷された冊子の Web 版で、アンドロイドのアプリもある。Wallet も ENSDF を基に作られている。したがって、文献データベースである NSR を除くと、ENSDF 関連の検索数は 900 万件近く、非常によく利用されてい

る。国別では、米国内からの検索が約 1/4 を占めて多いが、日本からの利用も 4%程度あり、比較的多く利用する国の一つである。

米国以外では、オーストラリア、ルーマニア、ブルガリア、ハンガリー、インド、中国（北京の原子能科学研究所と吉林大）から報告があった。この中で、筆者は日本の状況を説明した。日本では、現在、筆者が A=120、小浦氏が A=124 の評価作業を行なっている。筆者は、原子力機構の安全研究部門から少しの資金を得て続けているが、2025 年度は得られるか分らない。資金が得られない場合は、日本はネットワークから脱落する。この報告に対して、会議では、例えば日本物理学会で IAEA が ENSDF を宣伝するなどして、資金が得られるように助力するという発言があった。

2.3 ENSDF に関連するデータベース

フランスのベクレル研究所から Decay Data Evaluation Project (DDEP) の現状報告があった。DDEP は、半減期や放射線のエネルギー・強度など崩壊に関わるデータだけを集めている。核種数も ENSDF に比べるとはるかに少ないが、利用度の高い核種はほとんど全て含まれている。ENSDF は、準位データ中心にまとめられていることと、核構造・崩壊に関わるあらゆるデータが詰め込まれていることから、どちらかという核物理の専門家向きになっている。それに対して、DDEP は、核医学、核工学、計量など応用分野の利用者を想定して作られている。DDEP と ENSDF とは独立に評価作業を行なっている。DDEP の報告によると、データを更新する核種は最近では年に 3 核種程度ということで、以前に比べると評価作業の進捗が遅くなっているようである。なお、NNDC でも、崩壊データのデータベース (Adopted Decay Data Library) を新しく作る予定とのことである。

ENSDF では、原子核質量は AME2020 の値を採用することになっている。原子核質量を評価しているグループから、次回の改訂は 2026 年を目標にしていると報告があった。また、原子核の電磁気モーメントの評価を行なっている Nick Stone (オックスフォード大) から、最近の状況の発表があった。短寿命同位体のモーメントは、安定同位体のモーメントを基準として決められているが、最近になって安定同位体のモーメントが変わることがあり、それにより全体が変わる。安定同位体のモーメントが変わる理由は、モーメントを決める際に用いた原子核外の電磁場の強さの評価が、最近の物性理論計算で変わるためであるという説明であった。Nick Stone の奥さんの Jirina Stone は原子核理論の研究者である。筆者は以前、実験データの解釈で Jirina にお世話になったが、今回の会議で久しぶりに会うことが出来た。

2.4 ENSDF エディターと 3D NuDat

NNDC から ENSDF の新しい書式について紹介があった。現在の ENSDF は、80 カラムの 1 レコードを最小単位として、各準位や各 γ 線などは、1 ないし数個のレコードで記

述される。レコードの種類毎に、どのカラムに何の物理量が入るかが決まっている。しかし、この書式は、ENSDF をプログラムで処理したい一般のユーザーにとっては何が書いてあるのか分かりづらい。そこで、ENSDF を新しい書式で書き直すことになり、XML も候補だったが、結局 JSON に書き直すことになった。JSON は何が書いてあるのか分かりやすく、Python や Java で容易に扱うことが出来る。NNDC は、現在、評価者が JSON ファイルを簡単に書けるように、ENSDF エディターを作成しているとのことであった。会議では、試作された ENSDF エディターのデモも行われた。JSON ファイルは JSON Schema を使って、書式に間違いがないかチェック出来るとのことであった。

また、NuDat の改良についても、NNDC から紹介があった。NuDat の最新版 (NuDat 3.0) は、特定の物理量 (例えば $T_{1/2}$ 、 Q_β 、 E_{2+} 等) を陽子数や中性子数の変化に共なって表示することや、特定の物理量が指定した範囲にある核種を選び出して核図表上に表示する、ユーザーが画像処理できるように SVG ファイルを出力するなどの機能を備えている。さらに、図 1 に示したように、立体的な表示も出来るよう改良中とのことであった。これらの機能は、研究目的以外にも、一般向けの公演や学生の教育にも有用なのではないかと感じた。

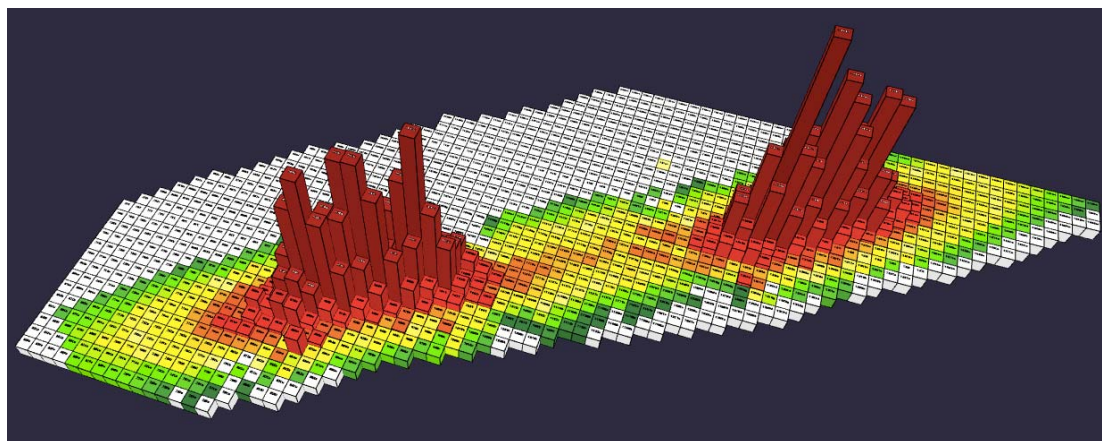


図 1 3D NuDat (試作中) で表示した ^{235}U の熱中性子核分裂収率

2.5 計算コード

評価作業では、そのための計算コードが大きな役割を果たす。そうした計算コードの一つである BetaShape について、Mougeot (バクレル研究所) がコードの改良を報告した。BetaShape は、 β 崩壊の分岐比から $\log ft$ 値を計算するコードである。筆者が使った範囲では、同じ目的で以前使っていた計算コードである LOGFT と、計算結果はほとんど変わらないようである。しかし、LOGFT と違い BetaShape は β 線スペクトルも計算できるの

で、応用分野の人にも有用であると思う。BetaShape は IAEA の GitHub 所蔵庫 [3] からダウンロード出来る。

また、Kibedi (オーストラリア国立大) が、開発中の NS_RADLIST コードについて報告した。NS_RADLIST は、昔の RADLIST コードの現代版で、X 線やオージェ電子のエネルギー、強度といった原子データを計算する。また、医療や放射線防護で特に必要とされる、放射性核種の崩壊にともなう X 線とオージェ電子のスペクトルや線量も計算できる。最近、X 線のエネルギーが、新型のカロリメータを用いて従来の Ge 検出器に比べてはるかに高精度で測定されるようになった。こうした状況から、放射性核種の崩壊に関連する原子データを ENSDF に加えていくことが会議で議論された。

2.6 誤差の評価

評価作業において、複数の文献の値を加重平均する時に、平均値の誤差をどう見積もるかを議論した。多くの場合、文献で与えられている誤差を、統計誤差とみなして、平均値の誤差を計算している。しかし、実験で得られた値は、統計誤差以外に系統誤差を含んでいるので、単純な計算は出来ないはずである。統計誤差と異なり、系統誤差は平均しても小さくならないのである。文献で、統計誤差と系統誤差がそれぞれ与えられていれば、より適切に平均値の誤差を見積もることも出来るが、ほとんどの文献では、両方の誤差を含んだ値が誤差として与えられている。ENSDF の評価作業の指針では、各文献の誤差を統計誤差とみなして加重平均の誤差 σ_{cal} を計算し、そうして計算した誤差が各文献の誤差の中で最も小さい誤差 σ_{min} よりも小さい場合は、その文献の誤差を平均値の誤差とすることになっている ($\sigma = \text{MAX}(\sigma_{\text{cal}}, \sigma_{\text{min}})$)。これは妥協した取扱ではあるが、会議ではこの指針を守ることを確認した。筆者の経験では、系統誤差を過少に見積もっている文献もあるので、評価者は、各文献の誤差が適切かどうかをしっかりと評価することが大切であると思う。

また、Kibedi が、モンテカルロ法を用いた誤差の伝搬の評価について発表した。例えば、 γ 遷移の強度 $B(E2)$ は、準位の半減期、エネルギー、M1/E2 混合比、内部転換係数から計算するが、これらの物理量の値はそれぞれ誤差を持っている。それらの誤差が値に比して大きかったり、誤差が非対称であったり、値の範囲しか与えられていないような場合には、各物理量の誤差から、伝搬の公式を用いて $B(E2)$ の誤差を決められるのか問題である。モンテカルロ法は、各物理量の値の分布から $B(E2)$ の分布を生成することで、 $B(E2)$ の誤差を得ることが出来る。この方法は有効なので、将来の採用に向けて、物理量の値の分布などを検討していくことになった。

2.7 追悼

NSDD ネットワークで長く活動し、ENSDF に大きな貢献をした Balraj Singh が、一昨年

に亡くなられた。会議では Singh を追悼するセッションが設けられた。Singh は、1941 年にインドで生まれ、1971 年にカナダのトロント大で学位を取得した。その後、クウェートの研究所を経て、1985 年からはカナダのマックマスター大で核データ活動を行なった。Singh は多くの質量数で評価作業を行なって、それらの ENSDF を改訂した。評価作業のための計算コードも開発した。また、経験の少ない評価者と共同で評価作業をすることなどで、多くの評価者を教育した。Singh は、核構造・崩壊データの編集だけをして評価はしない XUNDL データベースの創始者でもある。これら mass chain evaluation 以外にも、特定の物理量を全ての核種について評価する horizontal evaluation を、log ft、B(E2)、 β 崩壊遅発中性子、超変形回転バンド、M1 回転バンドなどについて行なった。少し変わった研究では、Nature 誌の放射能を測った研究があり、その結果は Nature 誌に発表された [4]。

筆者と Singh の最初の関わりは、筆者が大学院生の時に行なった実験のデータを、Singh が論文を読んで ENSDF に取り入れたことである。筆者が核データ活動を初めてからは、筆者が評価作業をした ENSDF を査読してもらったこともある。NSDD ネットワークの会合で会うと、いつも親しく接してくれた。Singh はサンスクリット（梵語）の研究者でもあった。ネットワーク会合の折に、日本語にサンスクリットが残っていることについて Singh と話したことがある。最後にメールでやりとりしたのは、亡くなる 1 ヶ月ほど前であった。筆者が評価作業している核種について文献を問い合わせたところ、すぐに親切な返事が返ってきた。突然の訃報を聞いた時は信じられなかった。

会議の報告ではないが、会議後の昨年九月に、Table of Isotopes 第 8 版の著者である Rick Firestone (LBNL) が亡くなられた。Firestone は ENSDF にも大きな貢献をした。また、中性子捕獲即発 γ 線の実験やデータベースの作成も行なった。NSDD ネットワークの会合には、2017 年が最後の参加であった。サンフランシスコ湾がよく見える山の斜面に建つ自宅に招待してくれるなど、気さくな人だった。

3. その他

次回の会合は、2026 年に ANL で開催することが予定されている。

今回の会議が始まる前日の日曜日に時間があつたので、ウィーン市街の西方の森に散歩に行った。その時の写真を図 2 に示す。老若男女たくさんの人が歩いていた。ウィーンの人は森の中を歩くのが好きなのかもしれない。

参考文献

[1] <https://doi.org/10.61092/iaea.b9qq-snv3>

[2] P. Oblozinsky, “Akito Arima and nuclear data”, 核データニュース 128, 63 (2021).

[3] <https://github.com/IAEA-NSDDNetwork>

[4] B. Singh, H. Taylor, “Measuring shelf afterlife”, Nature 356, 293 (1992).



図2 ウィーン西方の山から市街を望む