

会議のトピックス(I)

第 36 回 NEA 核データ評価国際協力ワーキングパーティ (WPEC) 会合報告

日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究センター
岩本 修

iwamoto.osamu@jaea.go.jp

岩本 信之

iwamoto.nobuyuki@jaea.go.jp

多田 健一

tada.kenichi@jaea.go.jp

東京工業大学
ゼロカーボンエネルギー研究所
片渕 竜也

buchi@zc.iir.titech.ac.jp

1. はじめに

OECD/NEA/NSCが主催するWPEC(Working Party on International Nuclear Data Evaluation Co-operation)の第36回会合、傘下の専門家グループ(EG)及びサブグループ(SG)会合が2024年5月13日から18日にNEA本部とオンラインのハイブリッド形式で開催された。日本からは岩本(修)が現地で参加し、岩本(信之)、多田、片渕がオンラインで参加した。核データの測定や評価及びEGやSGの活動報告、新SGの提案がなされた。これらの概要については以下のセクションで報告する。

上記以外に、来年スペインのマドリードで開催される科学と技術のための核データ国際会議ND2025の準備状況についてCIEMATのCano-Ott氏から報告があった。6月22日から27日に開催する方向で調整を進めているとのことであった(後日、公式アナウンスあり<https://nd2025madrid.com/>)。また、その次のND2028について日本での開催を岩本(修)が提案し承認された。

来年度のWPEC会合については、会場の手配が難しいこと、また6月以降の開催となるとホテル代の高騰などが予想されるため、パリ以外での開催も視野に入れつつ、調整

がされることになった。

2. 核データ測定活動の現状

核データ測定の現状について日本、中国、欧州、米国から総括的に報告があった。

中国からは中国原子能科学研究院（CIAE）の X. Ruan 氏より核破砕中性子源（CSNS）を用いた断面積測定実験を中心に、中性子捕獲、核分裂、(n,a)、(n,2n)反応断面積、半減期、全断面積、核分裂収率等の測定結果が報告された。CSNS の現在の陽子ビーム出力は 140 kW である（陽子ビームエネルギー：1.6 GeV、繰り返し：25 Hz）。中性子核データ測定用にビームライン Back-n が設置されている。Back-n を用いた測定として、 ^{181}Ta 、 ^{141}Pr の中性子捕獲断面積、 ^{209}Bi の全断面積、 ^{232}Th 、 ^{235}U 、 ^{238}U の核分裂収率についての測定結果が紹介された。核分裂即発中性子エネルギースペクトルの測定も計画しており、測定系のコミッショニング実験の結果が示された。また、CIAE や中国工程物理研究院（CAEP）において行われた MeV 領域の中性子核データ測定の結果も紹介された。具体的には $^{12}\text{C}(n,n+3a)$ 、 $^{12}\text{C}(n,a_0)^9\text{Be}$ 、 $^{14}\text{N}(n,a_0,1)^{11}\text{B}$ 、 $^{169}\text{Tm}(n,2n)^{168}\text{Tm}$ 、 $^{134}\text{Xe}(n,2n)^{133m,g}\text{Xe}$ 、 $^{136}\text{Xe}(n,2n)^{135m,g}\text{Xe}$ の断面積、 ^{235}U 、 ^{238}U の核分裂収率、 $^{184m,g}\text{Re}$ の半減期の測定結果が示された。その他、Institute of Modern Physics（IMP）で行われた、炭素ビームを標的 Be, C, W, Pb に入射した場合に発生する中性子の thick target yield の測定結果が紹介された。

欧州からは A. Plompen 氏より CERN の n_TOF、ベルギーの JRC-Geel、ドイツの nELBE 等での実験活動状況が報告された。まず、CERN の核破砕中性子源 n_TOF については 2023 年の実績と 2024 年の計画が示された。現在、n_TOF では飛行距離の異なる 3 つの測定ステーション EAR1, EAR2, NEAR が稼働している。2023 年は、最も飛行距離の長い EAR1 において ^{181}Ta 、 $^{\text{nat}}\text{Er}$ 、 ^{30}Si の中性子捕獲反応、 ^{12}C の荷電粒子放出反応、 ^{243}Am の核分裂の核データ測定が行われた。加えて EAR2、NEAR においても ^{30}Si 、 ^{64}Ni 、 ^{140}Ce 、 ^{94}Zr 等の中性子捕獲反応の測定が行われた。また、EAR1 で Ar の中性子透過測定が行われた。これは、n_TOF で行われた初めての透過測定実験である。JRC-Geel からはタンデム加速器による中性子源 MONNET と電子線形加速器による中性子源 GELINA を用いた測定が紹介された。MONNET では核分裂の即発 g 線測定が進められている。一方、GELINA では、 $^{182,184,186}\text{W}(n,n'g)$ 、 $^{233}\text{U}(n,n'g)$ の断面積測定が行われた。また、nELBE では、天然 Zr の透過測定が行われ、結果について紹介された。

米国からはレンセラー工科大学（RPI）の Y. Danon 氏より昨年 11 月開催の CSEWG 会合における発表内容を引用する形で、LANL、LBNL、ORNL の各国立研究所、ケンタッキー大学、RPI 等における測定活動が報告された。LANL での測定として熱中性子捕獲断面積が大きい EXFOR 実験データベースへのエントリが少ない ^{149}Sm の捕獲断面積測定の進捗が示された。また、LANL の核破砕中性子源施設 LANSCE で行われた ^{35}Cl 等の荷電粒子放出反応や核分裂即発中性子スペクトルの測定結果も紹介された。RPI での測定と

しては ^{54}Fe の中性子捕獲及び透過測定の結果が示された。LBNL の最近の測定結果として中性子非弾性散乱測定のための検出器アレイ GENESIS を用いた ^{12}C や ^{93}Nb の非弾性散乱測定の結果が示された。また、ORNL で行われたグラファイトの熱中性子散乱に関する測定結果が紹介された。

日本からは片渕が原子力機構 (J-PARC 及びタンデム加速器)、京都大学 (KUR)、大阪大学 (OKTAVIAN)、兵庫県立大学 (ニュースバル放射光施設) 等での核データ測定状況を報告した。J-PARC での測定としては ^{139}La と ^{241}Am の中性子捕獲断面積、水素、メタン等の減速材物質やグラファイトの熱中性子散乱則の測定結果を示した。また、J-PARC で行われているミューオン誘起核反応を紹介した。その他、JAEA タンデムの測定として代理反応を用いた核分裂片質量分布の測定結果を紹介した。また、KUR での測定として放射化法による ^{93}Nb の中性子捕獲断面積および ^{94}Nb の半減期の測定結果を示した。ニュースバルからは、偏光したガンマ線入射による ^{181}Ta , $^{\text{nat}}\text{W}$, ^{209}Bi の(g,xn)反応の測定結果を紹介した。OKTAVIAN からは、後方散乱断面積を検証するためのベンチマーク実験の結果を紹介した。QST の HIMAC での測定として、 α 入射のアルミからの荷電粒子放出反応の測定結果を示した。

3. 核データ評価活動の現状

3.1. ENDF

BNL の G. Nobre 氏より米国の ENDF/B について報告があった。ENDF は 2018 年公開の ENDF/B-VIII.0 の改訂版 ENDF/B-VIII.1 の開発を進めている。ウランやプルトニウムのなどの主要アクチニドや Fe, Cr, Cu などの構造材核種の改訂に加え、70 を超える物質に対して熱中性子散乱則の改訂や追加が行われるなど、大幅な改訂になるようである。ベンチマークテストで問題のある Pb, ^{95}Mo , $^{63,65}\text{Cu}$ 等の中性子核データや MgO, YH₂ 等の熱中性子散乱則を改訂していることが説明された。これらの改訂データを収録した ENDF/B-VIII.1β4 を 5 月末に公開し (実際は 6 月末公開)、このファイルを ENDF/B-VIII.1 として 6 月末に公開する (実際は 8 月末公開) ことを目指していることが報告された。熱中性子エネルギー領域の溶液系プルトニウムベンチマークテスト 158 種において前版の ENDF/B-VIII.0 より臨界性に対する C/E 値が全体的に高めとなり、また分散が大きくなったことが示され、現状ではこれを改善できないため今後の課題とすることが説明された。

3.2. JEFF

JRC の A. Plompen 氏より欧州を中心とする JEFF について報告があった。現在 2017 年公開の JEFF-3.3 の次期バージョンである JEFF-4.0 の開発を進めている。2024 年 2 月に公開されたテストバージョンである JEFF-4T3 について説明がなされた。IAEA の国際核デー

タ評価ネットワーク INDEN から F, Si, ^{56}Fe 等のファイルが採用され、TENDL-2021 から TENDL-2023 への更新及び $^{103,105}\text{Rh}$ 等のデータ改訂がなされた。JENDL からの採用ファイルも JENDL-5 へ更新された。U や Pu などの主要アクチノイドについては、共鳴パラメータの改訂や核分裂スペクトルの改訂を行ったとのことである。また、データフォーマットや処理で見つかった多くの問題点を訂正したことが示された。JEFF-4T4 を 7 月までに公開することを目指し整備を進めているとの説明があった。

3.3. CENDL

中国原子能科学研究院 (CIAE) の N. Shu 氏より中国の CENDL について整備状況が報告された。放射化や崩壊、核分裂収率、光核反応データの各サブライブラリに関する進捗が報告され、中性子放射化ファイル (CENDL-CNAF) については 818 核種に対して 20 MeV までのデータを整備したことが説明された。また、U や Pu 同位体の核分裂収率の新しい評価が行われた。今後、さらに評価を進め 2025 年に CENDL-4.0 を公開する予定である。

3.4. JENDL

JENDL については、岩本 (修) が JENDL-5 のベンチマーク結果の論文や応用ライブラリ (ACE、MVP、放射化、MATXS、SCALE ライブラリなど) 論文及びアップデートファイルの公開情報について説明した。また、次期バージョンに向けて行っている Mg や Mo などの核データ評価や、Th や Pu 同位体の核分裂断面積評価、機械学習の手法を用いた核種生成断面積のグローバルな評価に関して紹介した。加えて、JENDL-5 の軽水の熱中性子散乱則について、評価に利用したシミュレーション計算の統計精度を向上させ、温度点ごとの揺らぎを抑えた新しい評価データを作成したことを報告した。

4. サブグループ活動の現状

4.1. 新サブグループの提案

新しい SG の提案が 3 件あった。

1 件目は、応用に特化した核データライブラリ作成のための手法開発に関する SG がスイス PSI の M. Hursin 氏より提案され、微分と積分データに基づく核データ調整技術開発や実験間相関が核データ調整へ与える影響の調査等を行うことが説明された。反対意見は特に無く、SG-52 として承認された。

2 件目は、Zr 同位体の核データ評価に関する SG が BNL の G. Nobre 氏より提案された。Zr は原子炉で広く使われる元素であり、またベンチマークテストでは大きな感度があることが知られている。米国の ENDF/B や欧州の JEFF には最近の測定や理論的な知見が反映されていないため、SG で協力して評価を進めることを目指している。片渕氏より

J-PARC/MLFでZr同位体の共鳴断面積測定を行っており、協力できる旨のコメントがあった。本提案は、SG-53として承認された。

3件目は、IAEAで整備されている実験データベースEXFORの拡張版となるデータベースの開発を目的としていたSG-50が終了するため、この後継となるSGをBNLのD. Brown氏が提案した。本SGでは、SG-50では時間が足りずに実施できなかった新しいJSON形式のデータフォーマットの策定と、フォーマットを継続的に更新するための枠組みの整備を進める予定である。

4.2. EG-HPRL 会合

5月13日に会合が開催され、リストに掲載されている ^{209}Bi に関する測定の現状報告と銅($^{63,65}\text{Cu}$)のリストへの追加提案があった。 ^{209}Bi の中性子捕獲反応で生成される $^{210}\text{g}\text{Bi}$ はPb-Bi冷却材を利用するMYRRHAでの ^{210}Po 生成に関して問題となるため、 $^{210}\text{g,m}\text{Bi}$ 生成に対する分岐比の精度向上が要求されていた。2018年にリストへ掲載されて以降、JRC-Geel/GELINAで透過と捕獲実験が行われるとともに、J-PARC/ANNRIで捕獲実験による $^{210}\text{g,m}\text{Bi}$ の分岐比測定が行われた。更に、CERN/n_TOFでは捕獲実験が計画されていることが説明された。また、 $^{63,65}\text{Cu}$ の高速中性子エネルギー領域における弾性散乱、非弾性散乱、捕獲断面積の精度向上が提案された。銅は原子炉のあらゆる場所で利用される重要な元素であるが、天然銅に対しては多くの実験データがあるので、これらを基に評価された最新のENDF/B-VIII.1を用いてベンチマークを実施し、その結果を使って再検討することが提案者に要請された。また、断面積の要求精度を5%以下としていたが、特に非弾性散乱断面積に対する要求精度は高すぎるとの意見があり、要求精度を再考して提案するよう要請された。最後に、まだ公開されていない新HPRLホームページの状況が質問され、技術的な問題のため公開に至っていないとの回答があり、早く公開するよう要望された。

4.3. EG-GNDS 会合

本EGは新しい核データフォーマットであるGNDS (Generalized Nuclear Data Structure) フォーマットの策定と普及を目的としている。5月14日に会合が開催され、GNDSフォーマットの現状と、今後のフォーマット改訂の予定、各処理コードでのGNDS対応状況について報告があった。GNDSフォーマットの最新版であるGNDS-2.0のフォーマットマニュアルが2023年9月に公開された。今後はMF=6/MT=18への対応やENDF-6フォーマットで新しく採用された熱中性子散乱則ターゲットの同位体存在度(MF=7/MT=451)の対応などを行う予定とのことである。また、XML形式だけでなく、JSON形式にも対応するためにGNDSフォーマットの修正を行っているとの報告があった。

GNDSへの対応を進めている核データ処理コードとして、ORNLのAMPX、LANLの

NJOY、LLNL の FUDGE と、中国・西安交通大学の Atlas があり、これら 4 つの処理コードの開発者から発表があった。AMPX と FUDGE は最新の GNDS-2.0 に対応しており、Atlas は GNDS-1.9 に対応しているとのことであった。なお、NJOY については NJOY 及びその関連ツールに関する紹介のみで、GNDS に関する進捗説明は無かった。

また、その他の発表として、LLNL の V. Cheung 氏より、ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File) を NNDC において JSON 形式に変換する作業を行っており、更に LLNL にて GNDS フォーマットに対応させることを検討しているとの報告があった。ENSDF を GNDS に格納するにあたって、追加の必要があるデータ形式を、GNDS-3.0 へ組み込むことを提案する予定との説明があった。

4.4. SG-50 会合

本 SG は IAEA が中心となって収集・管理している実験データベース EXFOR の発展や活用を目的としている。5 月 13 日に会合が開催され、本 SG の活動実績の紹介と、最終レポートについて議論を行った。本 SG で整備したデータフォーマットや API については、NEA の Gitlab リポジトリに登録・公開する予定とのことである。また、最終レポートについては既に関係者の多くからドラフト案を受けており、現在までに 189 ページのレポートが完成しているとのことである。最終レポートのドラフト案を 6 月 1 日までにまとめ、関係者のチェックと修正を受けた上で 7 月 1 日までに完成させる予定とのことである。

本 SG に関連した活動として、IAEA の V. Zerkin 氏より、実験データベース EXFOR に関連した変換ツール等を Github (<https://github.com/vzerkin>) から公開したとの連絡があった。これらのツールを用いることで、EXFOR にあるデータの変換などが可能になるとのことである。また、ORNL の J. Brown 氏より、非分離共鳴領域の共分散データの形式として、MEDUSAL データベースの紹介があった。本データベースは SAMMY コードや AGS コードで用いられており、本 SG で利用している JSON 形式に比べて利便性が高いとのことである。また、J. Brown 氏からは、将来的には大規模言語モデルを用いて自動的に EXFOR のデータを生成する機能が必要との指摘があった。J. Brown 氏が Meta 社の Llama3-8B モデルを用いて論文からの実験データの取り込みを試したところ、論文によってはかなりの精度で EXFOR に必要な実験データを取り込めるとのことである。LANL の D. Neudecker 氏からは、実験データと機械学習を用いた ^{252}Cf の核分裂スペクトル評価に関する検討について紹介があった。ただし、いくつかの実験データを手動で教師データから除外するなどの対応を行っており、完全な自動化には至っていないようである。

4.5. SG-51 会合

本 SG は非分離共鳴領域における核データの高精度化を目的としている。5 月 15 日に会合が開催され、関連する SG-32 の概要と SG-32 で提言された非分離共鳴領域の課題、

非分離共鳴領域の各処理コードでの確率テーブルの計算結果比較やデータフォーマットの拡張、非分離共鳴領域の測定などについての発表があった。SG-32 では ^{235}U 及び ^{238}U の非分離共鳴領域における共鳴パラメータの評価と、既存の共鳴公式の再調査を行った。その結果、より厳密な共鳴公式を用いる必要があるとの結論に至ったとのことである。確率テーブルの生成では、D. Brown 氏より、新たな確率テーブルの生成方法の提案があった。データフォーマットの拡張では、従来の Single Level Breit-Wigner だけでなく、分離共鳴領域で採用されている Multilevel Breit-Wigner や Reich-Moore、R-Matrix Limited も利用可能にすべきとの提案があった。また、Y. Danon 氏や D. Neudecker 氏より、最近の非分離共鳴領域における断面積の測定実験についての紹介があった。本 SG は今回が初会合であり、今後は SG-32 で提言された課題への取り組みや確率テーブルの高度化などに取り組んでいくことになった。

5. おわりに（所感）

今回、日本から現地での参加者は一名であった。一方、米国からの参加が非常に多く、対照的であった。現在は、円安や物価の高騰などで、日本からの参加が難しくなっているが、日本の核データのアクティビティを示す上で、少し寂しい感じがした。核データ部会に招致小委員会などを組織して準備を進めてきた ND2028 について、日本開催の承認が得られたことは喜ばしいことであった。実際の開催に向けてこれからが大変になるが、日本の核データコミュニティで協力して開催できればと思う。（岩本修）

コロナ禍以降、日本からの現地参加が特段推奨されなくなったため、今回もオンライン参加となった。昨年とは異なり、今年は会合に恙無く参加できたので、やはり経験は宝なのだと改めて感じた。400 人規模の国際会議を開催したことの無い我々が中心となる ND2028 の準備では思慮を巡らすことが肝要であると感じている。（岩本信之）

今回はオンラインでの参加となった。オンライン参加は非常に気軽にできる一方で、対面で行われている議論に参加することや、休憩中の相談などができないため、他国の参加者と交流を深めることが難しいのが欠点である。全員が対面参加というのは難しいと思うが、日本の存在感を示すためにも、今後の国際交流の活発化のためにも、複数名が対面形式で参加することが望ましいと感じた。（多田）

日本の活発な核データ測定を紹介できたことはよかった。ただし、オンラインでの参加となってしまったために現地での議論の雰囲気を感じづらいという難点があった。次回はぜひ現地参加を目指したい。（片渕）