

▼ ▲ 会議のトピックス(III) ▼ ▲

## 第 28 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

深堀 智生 fukahori.tokio@jaea.go.jp

原田 秀郎 harada.hideo@jaea.go.jp

岩本 修 iwamoto.osamu@jaea.go.jp

横山 賢治 yokoyama.kenji09@jaea.go.jp

### 1. はじめに

経済協力開発機構原子力機関 (OECD/NEA) で行われている核データ評価に関する国際協力の枠組みである核データ評価国際協力ワーキングパーティ (WPEC) の年会とその中で活動しているサブグループ (SG) の会合が、5月9日～13日の日程でパリの OECD 本部で行われた。WPEC の年会は、JENDL を含む世界の主要な核データライブラリーのプ



写 1 : 会場となった OECD 本部の外観

プロジェクトである ENDF (米国)、JEFF (欧州等の NEA データバンク加盟国)、BROND/RUSFOND (ロシア)、CENDL (中国) 等から代表が参加し、毎年開催されている。昨年度までは NEA 本部で開催されていたが、今年は OECD 本部での開催となった。ここでは、各地域や国の核データに関する測定及び評価の進捗とサブグループの活動状況が報告される。今回日本から年会に 4 名参加した。サブグループ会合には、その他に 2 名の参加があった。

今回も前回と同様に前半の 3 日間に 5 つの会議室を使って SG-C と SG37~42 の 7 つのサブグループの会合が開催された。年会会合の資料は以下の URL から入手可能である。

<https://www.oecd-nea.org/science/wpec/meeting2016/>

## 2. 核データ測定活動の現状

核データ測定に関する総括的報告が、欧州、米国、日本、ロシア、中国から行われた。

欧州からは、JRC の Geel サイト、CERN の n\_TOF プロジェクト、ラウエ・ランジュバン研究炉 (ILL)、CEA カダラッシュ、ボルドー大学等における研究活動について報告があった。Geel サイトでは、第 4 世代原子炉設計から要望の高いガンマ線発熱の予測精度を高めるために、核分裂で発生する即発ガンマ線の測定研究が新たに開始されている。n\_TOF プロジェクトでは、 $^{235}\text{U}$  の核分裂断面積について、2 keV 以下の中性子エネルギー領域で 0.2% という高精度測定結果が得られている。本測定値は、ENDF/B-VII.1 の評価値より約 2% 大きく、注目すべき結果である。ILL では、崩壊熱測定に用いる全ガンマ線吸収分光法 (TAGS) を適用して、原子炉ニュートリノのエネルギースペクトル導出が行われている。基礎物理学と核データの新たな接点を与える研究として興味深い。CEA カダラッシュでは、研究炉 MINERVE を用いたパイルオシレーション法による  $^{241}\text{Am}$  の中性子捕獲断面積測定や高速中性子源 CALIBAN を用いた  $^{238}\text{U}$  の中性子透過スペクトル測定など、数少ない積分実験が進められている。欧州では、研究者の移動が頻繁に行われるためか、ボルドー大学を中心とする 3 大学 4 研究機関による代理反応研究チームの結成など、新たな連携による測定研究も始まっている。

米国からは、ロスアラモス (LANL)、オークリッジ (ORNL)、レンセラー工科大 (RPI)、国立標準・技術研究所 (NIST) での各研究活動について報告があった。注目すべき活動は、LANL で実施された  $^{63}\text{Ni}$  (半減期約百年) の中性子捕獲断面積測定であり、従来の理論予測よりも約 2 倍大きなことが報告されるとともに、CEA との共同研究により、半減期が数年と短い放射性核種  $^{173,174}\text{Lu}$  の測定が実施されたことも報告された。中性子捕獲断面積の測定対象が、従来よりも短い半減期の核種に拡張されつつあり、J-PARC/MLF/ANNRI や CERN/n\_TOF プロジェクトとの競争が激しくなっている。また、新たなハードウェアの整備として、現在データ間に 30-50% のばらつきが存在する  $^{16}\text{O}(n,\alpha)$ 断面積を、精度よく測定するための検出器の開発が進められている。ORNL の核破砕中性子源 SNS

を利用した研究では、低エネルギーの中性子輸送計算で重要な中性子散乱則  $S(\alpha, \beta)$  を測定データから導出するための解析法の開発状況が報告された。

原田は、我が国の現状として、JAEA の J-PARC/MLF/ANNRI、タンデム加速器、FNS 及び東京工業大学、京都大学、九州大学等における各研究活動を報告した。特に、FNS を用いた Cu 中性子捕獲断面積のベンチマーク計算結果について大きな関心が寄せられた。FNS は、ファーストビームから 34 年 6 か月運転され、核データに大きく貢献してきたが、本年 2 月 5 日に運転を完了した。取得されたデータの有効活用に今後期待したい。



写真 2 : FNS に関する発表資料から抜粋した写真

ロシアにおける核データ研究活動は、核データ評価の報告に含まれる形となったが、それほど活発ではないようである。

中国からは、2 大学（北京大学、蘭州大学）及び 5 研究所（中国原子能科学研究院、中国科学院上海応用物理研究所、中国散裂中子源、中国工程物理研究院、中国科学院近代物理研究所）における各研究活動が報告された。 $(n, 2n)$  反応に関連する研究成果が多く報告された。また、蘭州市に建設中の中国核破砕中性子源（CSNS）施設については、2017 年の秋に初ビームを受け入れ予定であり、中性子飛行時間測定法による中性子全断面積、中性子捕獲断面積、及び核分裂断面積の測定準備が進められているようである。

### 3. 核データ評価活動の現状

JENDL の核データ評価活動に関する進捗については岩本が報告した。昨年度公開した JENDL-4.0 高エネルギーファイル (JENDL-4.0/HE) や現在開発中である廃止措置のための放射化断面積ファイルについて、断面積や粒子放出スペクトルが改善されていること等について報告した。また、JENDL の核データ評価活動に関する進捗の一環として、ベンチマーク関連活動の進捗を横山が報告した。ベンチマーク関連活動としては、JENDL 委員会のリアクター積分テスト WG で検討を進めている軽水減速濃縮ウラン格子系および軽水減速 MOX 格子系における臨界性のベンチマークの進捗を報告した。なお、本報告の少し前に、ベンチマークの品質保証においてモンテカルロコードの入力ファイルが正しく作成されているかどうかは重要なポイントになるという議論があった。品質を保証するためには、独立して作成された 2 つの入力ファイルをクロスチェックする等の方法が有効であり、研究者間で入力ファイルを共有することの重要性が指摘されていた。

ENDF について米国での核データ評価活動の報告があった。次期ライブラリー ENDF/B-VIII.0 のベータ版が 4 月に完成し、Pu 溶液系の臨界性等の積分テストの結果が向上していることが示された。2018 年に公開の予定となっている。また、W 及び Cu 同位体の共鳴パラメータの評価、崩壊データ、核分裂収率、アクチノイドの核反応理論の進展等について報告があった。共鳴パラメータに基づく弾性散乱角度分布の計算結果を用い、ベンチマークテストへの影響度を評価するという新たな試みも報告され、注目された。

JEFF について 2015 年 3 月に公開された JEFF-3.2 について、アクチノイドや構造材核種等が改訂され、MOX のベンチマーク結果が改善されたとの報告があった。これは SG-41 の主要な課題である  $^{241}\text{Am}$  の中性子捕獲断面積の改訂が影響しており、興味深い結果である。今後、JEFF-3.3 を 2017~2018 年に公開し、共分散を充実させた JEFF-4 を 2021 年頃までに開発予定とのことある。

その他、ロシアからは新しい核データライブラリー BROND-3.1 が 2016 年 5 月に公開される予定で、140 個のファイルに共分散が含まれるとの報告があった。ただしロシアからの参加者は一人のみで、あまり活発に活動を行っていない印象を受けた。CENDL については Li、Ca、Fe などの同位体についての新しい評価結果が示されると共に、共鳴解析コードや評価手法について報告があった。また、核データの処理プログラムを開発しており、多群断面積の処理結果について NJOY と良く一致している事が示されていた。

### 4. サブグループ活動の現状

#### 1) SG-C 活動の概要

本 SG は優先度が高い核データの要求リスト (HPRL: High Priority Request List) を作成するサブグループである。本 SG は、後述の他の SG とは異なり活動期間を限定せずに長期的な活動を行っている。HPRL は、本来、核データ評価に対する要求であるが、評価の

精度向上のためには測定が不可欠であるので、実験計画のための根拠となっている。特に欧州では、これを基に多くの連携測定が実施されてきた。我が国では、もちろん参照はしているが、核データユーザからの独自のニーズにより測定を行うケースが多い。なお、今回、12年間に亘って主査を務めた本SGのA. Plompen 主査 (IRMM) が、JEFFの主査になるため、WPEC年會において主査の交代について議論が行われた。現在、新主査の候補者の推薦が行われている。

## 2) SG37 活動の概要

本SGは核分裂生成物収率評価に関するサブグループである。詳しい説明は無かったが、新しい測定や物理モデルを用いて評価が進んでいるようである。核分裂生成物収率の不確かさの評価について、モンテカルロ法を用いたベイズ推定のような新しい手法を取り入れた結果が示されていた。ただし、現在の核データフォーマットでは収録できない核分裂生成核種間の相関を取り入れる必要があるとの事である。正式なSG会合は今回で終了とのことで、今後レポートを作成し、2017年1月に最終的なものとする予定である。

## 3) SG38 活動の概要

本SGは、評価済み核データライブラリーの標準フォーマットとして現在利用されているENDF-6フォーマットに代わる新しい標準フォーマットについて検討している。本SGは、昨年度の年會で1年間の延長が認められたが、今年で活動終了となるため、現在、新フォーマットの仕様書の作成作業が佳境を迎えている。新フォーマットにはまだ正式な名前はないが、実質的には米国が開発を進めているGND (Generalized Nuclear Data structure) がベースとなっている。また、会合への参加者の内訳は、米国7名、仏国2名、カナダ、ロシア、日本各1名となっており、会合での発言も米国が圧倒的に多いが、仏国は積極的に関与しようとしている様子が伺える。今回の会合は月曜から火曜の午前中にかけて開催されたが、火曜の午後からの週の後半は「Writing session」と題して、仕様書の執筆担当者が一つの部屋に集まって作業を行ったようである。引き続き、TV會議などを活用して、2016年11月までに仕様書を完成させる予定とのことである。

SG38でやり残した課題としてはいくつかの作業項目が挙げられているが、この中で最も優先度の高い項目は、新フォーマットで格納された核データを読み書きするためのAPI (Application Programming Interface) の定義と認識されている。WPEC年會では、これらの課題を解決するために新しいSGの提案 (Code infrastructure to support a general nuclear database structure) が行われた。

また、SG38と新SGに関連して、活動を休止していた評価済み核データのフォーマットを検討する長期型のサブグループであるSG-Bについて、「新しい核データ格納形式(GND)のための国際標準」SGとして、再度編成するための提案がなされた。この提案について

は大筋で合意されたものの、当面各プロジェクトからのコメントを検討することとなった。

#### 4) SG39 活動の概要

本 SG は、核データや共分散の調整結果（積分実験データを利用した断面積調整結果）を核データファイルの改良に反映するための方法について検討するサブグループである。特に後述の SG40（CIELO）の核データ評価のパイロットプロジェクトに反映することが目的の一つになっている。これまでの活動の成果としては、「方法論」と「核データ共分散に対するコメント」が SG39 の中間報告書として近日中に発行される予定である。今回の会合では、核データ評価に反映するための積分実験データの整備や解析評価の進捗に関する報告が主に行われた。手法論に関する報告としては、連続エネルギーモンテカルロ法ベースの断面積調整法の可能性の観点から、XGPT（eXtended Generalized Perturbation Theory）と呼ばれる手法の紹介があった。また、TV 会議での参加であったものの、1 年前の会合に引き続き TerraPower から TWR（Traveling Wave Reactor）に対する感度解析と不確かさ評価に関する報告があった。いずれも前の週に米国で開催された炉物理国際会議 PHYSOR2016 で関連の発表が行われている。

水曜日の午後には、恒例の SG39 と CIELO の合同会合が開催された。各サブグループの進捗が報告された後、SG39 と CIELO の連携方法についての議論が行われたが、CIELO ではまだ共分散データが十分に整備されていないため、CIELO をベースに調整計算を行うのはまだもう少し時間がかかりそうである。一方で、CIELO 側から SG39 への要望として、新しく評価された  $^{235}\text{U}$  捕獲断面積を使った Na ボイド反応度のベンチマークへの協力要請があった。

今後の計画については WPEC の年会で改めて議論が行われた。SG39 は 2013 年から活動しており今年で終了の予定であるが、引き続き CIELO の活動と連携できるように、1 年延長し 2017 年まで活動することが提案された。

#### 5) SG40 活動の概要

本 SG は国際的に協力して従来の個別の物理量ではなくある核種の評価ファイル全体を共同で作成するパイロットプロジェクトであり、CIELO と命名され、米国 LANL が主導して活動を進めている。対象は  $^1\text{H}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  の主要 6 核種であり、進捗が報告された。CIELO では核データ評価だけでなく、新たな実験データの取得も行われており、対象核種の核データの信頼性向上が図られている。米国では次期 ENDF 開発の一部として CIELO の活動が行われており、米国の次期ライブラリー ENDF/B-VIII.0 のベータ版に SG 活動で作成されたテストファイルが取り込まれている。主な変更点として  $^{16}\text{O}(n,\alpha)$ 断面積が 40%程度大きくなり、 $^{235}\text{U}$  の 1 keV 近傍の中性子捕獲断面積が 10~30%

程度小さくなること等について説明された。ただし、共分散データについては未だ整備が進んでいないようである。来年まで活動を行い、2018年に報告書を出す計画が示された。

## 6) SG41 会合の概要

SG41「Improving nuclear data accuracy of  $^{241}\text{Am}$  and  $^{237}\text{Np}$  capture cross sections (INDA)」の第2回ワークショップが5月10日～11日にかけて行われた。本SGは、日本(JAEA)が主導して立ち上げた専門家会合である。当該核データに関する微分測定、積分測定、崩壊データ、評価という4分野より、それぞれ第一線で活躍する専門家が集まり、核データ精度向上のための討議が活発に行われた。我が国から4名(T. Sano, O. Iwamoto, A. Kimura, H. Harada)、欧州から9名(M. Rossbach, G. Noguere, C. Genreith, P. Leconte, G. Zerovnik, D. Cano Ott, P. Schillebeeckx, O. Cabellos, M. Kellett)、米国から1名(M. Jandel)の参加があるとともに、今回初めて中国から1名(L. Jiang)が討議に参加した。異なる測定手法の強みを組み合わせ、信頼性の高いデータを導出するために実施すべき事項を抽出し、今後のアクションプラン及びスケジュール、並びに報告書作成スケジュールについて検討された。中間的位置づけとなる概要報告をND2016で行うこと、また、最終報告書の完成期限を2017年3月とすることが合意された。詳細は、報告書にご期待頂きたい。



写真3：SG41 会合の様子

## 5. おわりに（所感）

次世代の評価済核データファイルの格納形式について議論が進められ、ENDF及びJEFFの次期版は従来のENDF-6形式とGND形式が併用されることになりそうである。ENDF-6形式を決められるのは米国であったが、これをWPEC/SG-Bのような国際的な枠組みに上げたのは一定の収穫かもしれない。ただし、GND形式の方が、ENDF-6形式よりも格納できる情報が多いので、一旦、GND形式にしたならENDF-6形式には戻せなくな

る。このため、利用者のためのユーザライブラリ作成ツール等についての継続的な戦略が今後重要となる。原子力機構で開発している核データ処理コード FRENDDY (NJOY に代る国産コードとして期待) に対するさらなるご支援が、ますます重要となるので、改めてお願いしたい。(深堀智生)

昨年も同様な主旨のことを書いたが、サブグループ会合は、世界で活躍する専門家が集い、特定の課題について詳細に議論できる、極めて有効な機会を与えてくれる。しかも、検討結果を OECD/NEA のレポートとして発行できる上、これには NEA 事務局のサポートまでである。解決すべき核データの重要課題お持ちの皆様、是非、新規サブグループの提案をご検討ください。(原田秀郎)

ENDF や JEFF は最近ライブラリーの更新頻度が高くなっている。どちらのライブラリーも、それぞれのプロジェクト以外の成果も積極的に取り入れて、完成度を高めようとしている印象である。CIELO 等の国際的な協力でライブラリーを開発していこうとしている。一方 JENDL は自前の評価活動を尊重しており、独自性が高いと感じた。(岩本修)

核データ共分散と感度係数を利用した不確かさ評価の手法が広く利用されるようになってきたことで、核データ評価と炉物理の関係がますます密接になってきていると感じている。WPEC は核データ評価に関する国際協力の枠組みであるが、感度解析、不確かさ評価、炉定数調整などのキーワードを通して、炉物理的な観点からの議論も多く行われている。炉物理の専門家の方の国際協力の場としてもご活用いただける可能性があるので、是非ご検討ください。(横山賢治)



写真4：WPEC 会合の集合写真