

会議のトピックス(III)

科学と技術のための核データ国際会議 (ND2025)

2025年6月22日～27日 NH Collection Madrid Eurobuilding Hotel

日本原子力研究開発機構

岩本 修*)、小浦 寛之、遠藤 駿典、木村 敦、中山 梓介、荒木 祥平、西尾 勝久

国際原子力機関

大塚 直彦

九州大学

湊 太志、渡辺 幸信

近畿大学

佐野 忠史

東芝エネルギーシステムズ

木村 礼

*) iwamoto.osamu@jcaa.og.jp

1. 概要

大塚 直彦、小浦 寛之

本会議は2001年以降、米・欧・亜の持ち回りで3年毎に開催されている。3年前の会議(ND2022)はアメリカの担当で本来サクラメントで開催されるはずのものがコロナの影響であいにくオンライン開催となった。したがって対面開催としては6年前に北京で開催されたND2019以来ということになる。6月のマドリッドということで、予想していた通り日中の気温は連日40度を上回った。そのため徒歩での移動に際しては自ずと通りの左右のうち日陰の恩恵にあずかれる方を探すこととなった。本会議の主催機関はマドリッドのCIEMAT(The Centre for Energy, Environmental and Technological Research)で、現地委員にはこのCIEMATの9人が名前を連ねておられたが、特にDaniel Cano-Ott氏が会議の準備で常に忙しくされていたようにみえた。

表1に今回と前々回の国別参加者数を比較してみた。開催国を除いて参加者の多かった国を順に並べると前回の上位5か国はアメリカ、日本、フランス、スイス、韓国となるが、今回はアメリカ、フランス、日本、中国、イギリスとなる。前回よりも遠方での開催となったにも関わらず、日本の参加者が前回よりも増えているのが目をひく。今回、オンライン講演の選択肢がなかったにも関わらず、筆者の一人(大塚)が講演したセッション

でウクライナからの唯一の参加者がオンラインで講演を行った。ウクライナ侵略の影響が特に配慮されたものであろう。プログラムが公開されるまでは核データニュースに参加報告が集まるほどに日本人参加者がいるのかどうか定かではなかったが、ポスター講演も含むプログラムが公開された時点で結構な数の日本からの参加者が判明した。おかげさまで岩本編集委員のとりまとめのもと、測定、評価・ライブラリ、積分検証、核分裂、ミューオンの各分野それぞれについて専門家に報告を執筆いただくことができた。

表1 ND2025（マドリッド）とND2019（北京）の参加者数の比較

	ND2025	ND2019		ND2025	ND2019
アメリカ	94	34	スロベニア	3	2
フランス	63	24	フィンランド	2	1
スペイン	54	5	ハンガリー	2	0
日本	38	28	インド	2	1
中国	37	294	ボスニア・ヘルツェゴビナ	1	0
イギリス	36	6	ブラジル	1	0
ドイツ	17	8	クロアチア	1	0
韓国	16	14	モンゴル	1	1
ベルギー	14	6	モロッコ	1	0
イタリア	14	9	ロシア	1	6
スウェーデン	12	8	サウジアラビア	1	0
チェコ	11	10	スロバキア	1	0
スイス	10	15	ウクライナ	1	1
オーストリア	9	7	ベラルーシ	0	2
ギリシャ	8	4	イラン	0	1
カナダ	5	2	オーストラリア	0	1
オランダ	5	0	南アフリカ	0	4
ノルウェー	5	0	アルゼンチン	0	2
ルーマニア	5	8	トルコ	0	1
ポーランド	3	2	マレーシア	0	1
			計	456	484

会議は日曜夕刻のレセプションではじまり、月曜から核データ分野を広く網羅したプログラムに沿って発表がなされた。具体的には原子核反応測定、原子核構造、原子核崩壊データ、施設と装置、サンプル準備、核分裂と核破砕、原子炉のための核データ、核融合、天体核物理と宇宙応用、医療応用、核廃棄物管理、臨界安全、同位体生成、原子核理論、モンテカルロシミュレーション、機械学習、原子核データ評価、標準化、積分実験と妥当性、普及活動、教育・トレーニング・アウトリーチ、であった。

月曜は終日基調講演で、午前のプレナリーセッションでは NEA (M. Fleming データバンク課長) と IAEA (T. Kokalova-Wheldon 理化学部長) の組織活動の紹介の後、核データセッションで 1) スペイン原子核業界について (J. Díes)、2) 欧州核データ JEFF (A. Plompen)、3) 日本核データ JENDL (岩本修)、4) 中国核データ CENDL (Xiaofei Wu)、5) 米国核データ ENDF (G. Nobre) の状況について報告があった。大きなトピックとなったのは JEFF がバージョン 3.3 から 4.0 へメジャーアップグレードされたことである。会議開催前日の 6 月 20 日 (金) 公開ということで、まさに ND2025 に合わせた公開となった。JENDL はバージョン 5.0 から 2028 年 (ND2028 開催予定)での 5.1 へのアップデートを、CENDL では 2025 年中のバージョン 3.2 から 4.0 のメジャーアップグレードをそれぞれ目指す、など核データライブラリの競争の一旦を垣間見た。

午後も基調講演で、1) INDEN (International Nuclear Data Evaluation Network)プロジェクト (R. Capote Noy)、2) 米国核データプログラム (D. Brown)、3) APRENDE (Addressing PRIorities of the Evaluated Nuclear Data in Europe) (D. Cano-Ott) の 3 つの発表のあと、測定系として 4) n_TOF (M. Bacak)、5) GELINA facility (C.P. Dobarro)、6) NFS Facility (X. Ledoux)、そして最後に IFMIF (A. Ibarra)の発表があった。

火曜～木曜は終日パラレルセッションであった。最大で 7 つの分科会が同時並行で進んだこともあり、聞きたい講演を目指して部屋から部屋へと走り回った方も多かったのではないかと。筆者の一人 (小浦) は反ニュートリノ (核分裂生成物からのベータ崩壊でその同定および性質を図る。A. Sonzogni ほか)、ベータ崩壊遅発中性子測定 (A. Tolosa-Delgado 他)、核分裂生成物 (G. Kessedjian ほか)、核構造理論 (小浦、湊ほか)、原子核反応測定 (片渕、西尾ほか)、そして別々のセッションでのミュオン (発表者の一人の新倉さんによると発表者が意識的に分散して申し込んだとのこと) などと走り回っていた。座長が掲げる残り講演時間の札 (写真 1) が本会議オリジナルというのが目をひいた。

多くの参加者に口頭発表の機会を設けるためにいくつもの分科会が並行するのは避けがたく、またそれぞれの講演の配置先となる分科会が一意に決まることは珍しいので、参加者が部屋間を動き回らなくて済むようなプログラムを編成するのは容易ではないと想像する。(印刷されたプログラムは、どの講演が同時進行するのを読み取るのが難しく、講演を効率的に回るのに少々苦労した。)



写真1 残り時間1分（裏は3分）

パラレルセッション終了後の木曜の夜はバンケット（晩餐会）が同ホテルで催され、フレンチのフルコースの後、フラメンコが披露された。ギター1人、歌手1人、そして男女1名ずつのダンサー（計4人）によるフラメンコはなかなか激しいダンスで、その迫力に魅了された（写真2）。



写真2 バンケットでのフラメンコの舞台

最終日の金曜午前には再び基調講演に戻り、核反応コード (A. Koning)、核分裂データ (M. Kerveno)、天体核物理 (A. Mengoni)、医療利用 (S. Qaim)、核融合 (M. Gilbert) のレビュー講演、核分裂生成物の核崩壊全般 (A. Algora)、中性子 TOF 測定 (C. Guerrero-Sánchez)、の測定系の講演のあと、最後に M. Chadwick による講演 (彼のこれまでの道のを自身で紹介。核反応の動画や、道のを紹介する白樺 (風) の木々の「風景画」を紹介) で締められた。

最後に、次回の会議となる ND2028 は日本の島根県松江市で開催されることが発表された。会議全体のチェアとなる堀順一氏 (京都大学複合原子力科学研究所) が数枚のスライドで当地の説明をした (写真3)。期間は2028年6月4日-9日で、主催は原子力機構および原子力学会に設置する ND2028 組織委員会である。日本での開催は1988年(水戸市)、2001年(つくば市)に続いて3回目となり、これは米国に次ぐ多さである。

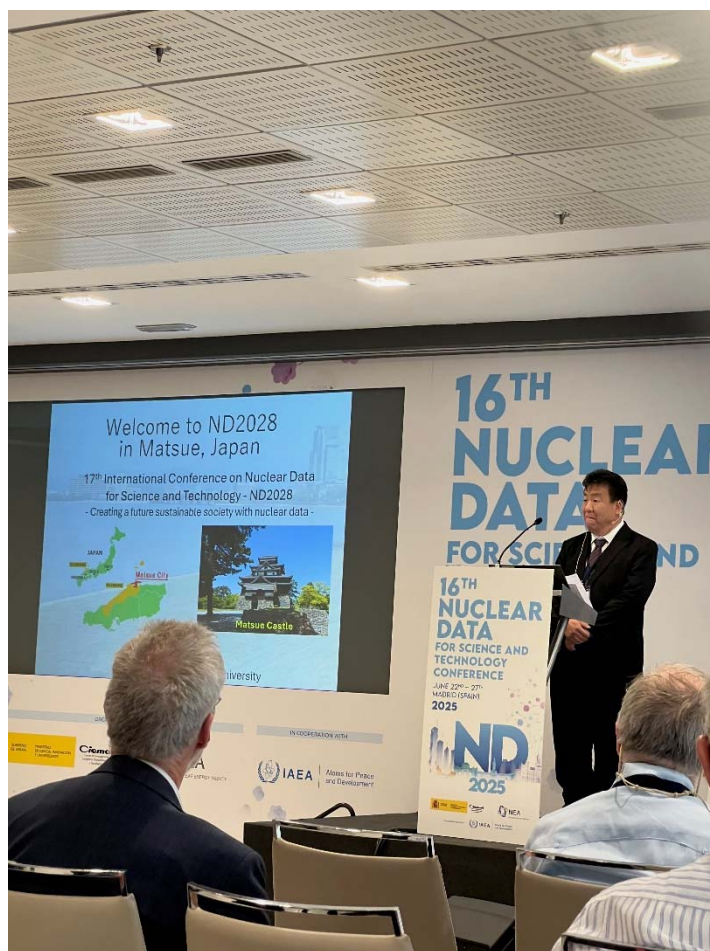


写真3 会議最終日の堀氏による ND2028 の開催通知

2. 測定

遠藤 駿典、木村 敦

測定に関連する報告は、Nuclear Reactors、Medical Applications、Astrophysics 等の応用分野別のセッションに加えて、Facilities、Detector Techniques 等の実験関連のセッションで幅広く行われていた。またポスターセッションにおいても多数の報告がなされていた。以下、筆者らが興味を持った発表を紹介する。

2.1. n_TOF での測定研究

開催場所が欧州だったこともあり、CERN の n_TOF 実験施設での測定研究の発表は多くのセッションにわたり多数あった。

^{239}Pu の捕獲断面積及び核分裂断面積の測定結果について A. Caballero 氏より報告があった。実験は EAR1 で、核分裂片検出器と全吸収カロリメータを組み合わせた同時測定により行われた。現在解析を進めており、今後カスケードシミュレーションとの比較も行う予定とのことである。

^{50}Cr 、 ^{52}Cr の(n, γ)反応断面積測定の報告が P. Pérez-Maroto 氏よりあった。測定は EAR1 で行い、過去の測定で問題になっていた自己遮蔽、多重散乱の影響を低減するため、過去の測定の 1/10 くらいの厚みの試料を用いて測定を実施したとのことである。また比較のため ^{52}Cr の熱中性子捕獲断面積を HiSPANoS で放射化法により測定を行っており、その結果も併せて報告された。

^{209}Bi (n, γ)反応断面積測定の結果について G. de la Fuente Rosales 氏より報告があった。測定は大強度の中性子が得られる EAR2 を用いて行われた。GEANT4 を用いたモンテカルロベースのバックグラウンド補正を検討中であり、今後最終的な断面積の導出を行う予定との事である。

装置開発や測定体系関連としては、K. Kaperoni 氏による核破砕中性子源付近に新たに設置した NEAR Station に関する報告や、M. Bacak 氏による非弾性散乱断面積の測定体系の開発についての報告等があった。

2.2. LANSCE での測定研究

筆者らが特に興味を持った測定施設としては LANSCE に設置された DICER64 実験装置がある。本装置については Facilities のセッションで T. Stamatopoulos 氏から紹介があった。本装置は 2 つの直径 1 mm のコリメータを持つ体系であり、これによって微量な試料での測定が可能となるだけでなく、試料なしとありの同時測定を行いビーム強度の変動の影響を最小化する事が可能となる。本装置を用いた ^{239}Pu の全断面積の測定結果についても同氏より Nuclear Reactors のセッションで報告された。

また、DANCE スペクトロメータを用いた ^{151}Sm の(n, γ)反応断面積の暫定値について E.

Leal-Cidoncha 氏より報告があった。今後 DICEBOX を用いた検出効率の補正を行い、最終的な断面積を導出する予定との事である。

2.3. その他の施設での TOF 測定研究

これらの実験施設だけでなく、中国の CSNS、ベルギーの電子加速器 GELINA や日本の J-PARC MLF などでの測定研究についても多数報告があった。

例えば、上述した ^{209}Bi 関連としては $^{209}\text{Bi}(n,\gamma)$ 反応測定を CSNS の Back-n で C_6D_6 検出器を用いて行った結果について、J. Liu 氏より報告があった。また、 ^{209}Bi の全断面積を GELINA で測定した結果について P. Romojaro 氏より発表があった。発表では 800 eV 付近の共鳴は JENDL-4.0 よりも ENDF/B-VIII.0 の方が良いが、高いエネルギー領域では JENDL-4.0 の方が測定結果を良く再現することが指摘された。

上述の発表の他にも測定関連の内容は非常に多くの発表があった。セッションが重複していたため、全てを聴講することができなかったのが残念である。Proceeding 集が出るのを楽しみにしている。

3. 評価・ライブラリ

中山 梓介、湊 太志、岩本 修

初日のプレナリーセッションで、主要な核データライブラリである JEFF、JENDL、CENDL、ENDF についての発表があった。また、IAEA による国際的な核データ評価ネットワークの INDEN プロジェクト及び中性子標準核データに関する紹介も行われた。JEFF については、EC-JRC の A. Plompen 氏が、公開されたばかりの JEFF-4.0 に関して紹介した。主要アクチノイドの改訂に加え、INDEN や TENDL から多くのデータが採用されている。CENDL は中国原子能研究院の X. Wu 氏が発表を行い、次期 CENDL-4.0 への取り組みについて紹介した。中性子反応データの改訂を進めると共に、光核反応や核分裂収率、熱中性子散乱則など幅広く開発を進めているとの印象を持った。JENDL については岩本が最新版の JENDL-5 の概要及び次期バージョンの JENDL-5.1 に向けた新しい評価について述べると共に、最近国内で始まったミュオン核データや基礎的な核力の性質から応用へと発展させる試みである ERATO 関口三体核力プロジェクトについても簡単に紹介した。

BNL (米国) の Nobre 氏は、ENDF/B-VIII.1 の概要を述べた。中性子データは全部で 60 核種程度の更新、その内大幅な改訂は 30 核種程度とのことである。なお、Pu-239 や主要構造材 (Fe, Cu 等) のデータは IAEA 主導の国際プロジェクト INDEN から取得している。これらの更新の結果、臨界性、燃焼反応度変化、遮蔽、といったベンチマーク結果が大きく向上した。次バージョンは ENDF/B-XI になる予定で、主な更新は中性子標準データ、Pu および新型炉設計のための Cl, Zr 同位体の中性子データになる予定とのことであった。

SCK CEN (ベルギー) の A. Stankovskiy 氏は JEFF-4.0 の陽子サブライブラリの概要を述べた。これまで JEFF の陽子サブライブラリは TENDL から全て取得していたが、今回、ADS の遮蔽や放射化評価用に JEFF 独自の評価を行った。粒子 (特に中性子) 放出スペクトルに関しては、核種ごとに TENDL-2023 および JENDL-5 のデータを実験値と比較して再現性の良い方を採用するという方法を取った。ただし、Th-232 のみ、重要核種であるにも関わらず TENDL は実験値と乖離しており、JENDL には収録がないため、INCL 等の核反応モデルを使用して新規評価を行った。放射化断面積は PADF-2 からデータを取得した。

ESS (スウェーデン) の G. I. M. Damian 氏は、ENDF/B-VIII.1 における軽水の熱中性子散乱則 (TSL) の評価について述べた。TSL データは温度に強く依存する上に複雑な温度依存性を持つが、評価ファイルは離散的な温度点でしか作成できない。この課題を解決するため、TSL 評価の基となる周波数分布関数をいくつかのガウス分布でフィットし、各ガウス分布のパラメータに温度依存性を持たせることにより、利用者が任意温度の TSL を構築可能な枠組みを提供したことを示した。なお、この軽水の TSL は JEFF-4.0 にも採用されている。

その一方、NCSU (米国) の J. P. W. Crozier 氏からは、離散的な温度点における TSL データから機械学習によって任意温度での TSL を再構築する NeTS というシステムの紹介があった。発表によれば、本システムは高い学習データ再現性を持っているようである。分子動力学等に基づいた元の評価の再現性という意味では、上述の ENDF/B-VIII.1 でのガウス分布フィットによる手法よりも NeTS の方が優れているだろうという印象を持った。

また、米国および欧州の機関からそれぞれ、結晶物質の消衰効果 (多重散乱により実効的な Bragg 散乱断面積が減少する効果) に関する発表があった。消衰効果は材料中の粒径に依存するため、消衰効果を TSL 評価ファイル中で考慮しようとするれば、粒径に依存した多数のファイルができることになる。また、上述の温度依存性と同様の、評価ファイルがない条件での利用といった問題も生じる。これらの問題に関して、TSL 評価ファイルは消衰効果を考慮しないもの 1 つだけにして、消衰効果は核データ処理コードないし輸送計算コード内で粒径を指定することで考慮できるようにすればよいのではないか、という議論もあった。

中山は、高温条件下での TSL の評価・実験計画について述べた。通常、原子炉は高温で運転されるため、高温の TSL は応用上最重要であると言える。しかし、高温 (かつ高圧) 条件下での実験の困難さから、これまでの TSL 測定は室温付近で行われることが多かった。これに対し、高温の黒鉛および軽水の TSL について、J-PARC で測定を実施するとともに、第一原理分子動力学等の温度変化に対する外挿性が高いと考えられる手法で評価する計画を述べた。また、進捗の 1 つとして、既存の実験値が存在する常温付近での中性子二重微分断面積について、本計画で採用予定である計算手法の予測精度が十分

に高いことを示した。

中性子核反応における多段階直接反応に関しては、ITA (ブラジル) の B. V. Carlson 氏および CEA (フランス) の M. Dupuis 氏より、最近の理論研究の成果が発表された。Carlson 氏は、従来の多段階直接反応に関する理論モデルを概説するとともに、定量的手法としての半古典的アプローチの利点について議論した。一方、Dupuis 氏は、フランスの研究グループを中心に進められている微視的モデルに基づく非弾性散乱断面積の計算結果を紹介した。これに類似した手法として、有限振幅法 (Finite Amplitude Method) によって導出された標的核の遷移密度に基づいて、非弾性散乱を解析した最新の成果が、LANL (米国) の H. Sasaki 氏により報告された。また、LLNL (米国) の N. Schunk 氏は、開発中の微視的核分裂計算コードについて紹介した。このコードは、核分裂計算のみならず、様々な核構造計算にも対応可能な汎用性を備えており、従来から培われてきた核構造理論の特性を含有するものである。今後の発展が極めて期待される内容であった。

核分裂の理論に関する発表は、LANL (米国) の A. Lovell 氏や I. Stetcu 氏、LLNL の R. Vogt 氏らによっても行われており、実験を含む多方面からの研究報告が目立った。これらの研究では、目的に応じて BeoH、CGMF、FRAYA などの計算コードが開発されており、米国における核分裂研究の活発さが印象的であった。前述の Schunk 氏は、世界的に広く用いられている核構造計算コード“HFBTHO”の開発者としても知られている。同コードは、2017年に公開された version 3 において大幅な改良が加えられ、既存の他の計算コードと比肩する性能を示した。しかし、これに類似した新たな計算コード“HFB3”が CEA (フランス) において開発・公開されており、その成果は D. Noël 氏によって報告された。これら一連の理論的・計算的研究の進展に対して、日本の現状は若干遅れをとっている印象を受けた。

4. 積分テスト

佐野 忠史、木村 礼、荒木 祥平

積分テスト又はこれに関する報告は、主に Criticality safety、Uncertainties & validation、Thermal scattering にて行われていた。また、poster session においても 10 件の報告がなされていた。更に今回の ND2025 に合わせて JEFF-4.0 が公開されており、欧州勢は JEFF-4.0 を用いた積分テストの結果を発表していたことも印象的である。以下、筆者らが興味を持った発表を紹介する。

4.1. 「Lilith」の計画について

LANL の G. McKenzie 氏より、新たな積分実験施設「Lilith」の計画について報告があった。Lilith は Pu 系の臨界集合体であり、既存の Jezebel と同系統に位置づけられるが、「A new Enduring」な Pu 臨界集合体として、よりシンプルで不確かさの少ない体系を目指し

て設計されているとのことである。体系の構成としては、異なる大きさの円筒形 Pu 燃料体を組み合わせたもので、全体の寸法は 13 cm × 13 cm、Pu の総重量は約 23 kg とされている。体系の感度は、裸の Pu 集合体と同等のものになる見込みである。質疑応答では、予算措置が順調に進めば 2030 年頃にはデータ提供が可能になるとの見通しが示された。これは、JAEA の STACY が申請から運転開始までに約 13 年を要したことを踏まえると、非常に迅速かつ意欲的な計画であり、そのスピード感到強い印象を受けた。

4.2. TRISO 燃料に関する積分実験について

LANL が TRISO 燃料に関する積分実験結果を発表した。本発表では黒鉛のモノリス中に TRISO 燃料のコンパクトを装荷した臨界実験装置「Deimos」を用いており HALEU に対するベンチマーク試験の拡充が行われた。TRISO 燃料の Packing Fraction は 62.2%、濃縮度は 19.9% であり、高温ガス炉燃料とほぼ同等の燃料である。本発表によると燃料のカーネルの化学組成は 89% が UO₂、1% が UC、10% が UC₂ であり、UO₂ と UC の TSL を入れ替えた際の影響は 14 pcm 程度と報告された。セッション終了後、発表者に UC₂ の TSL について質問したところ、UC₂ の TSL は無く、今後の測定や評価が望まれるとのことであった。

4.3. 崩壊熱の不確かさについて

Decay Heat の共分散データに基づく崩壊熱の不確かさ評価についての報告も行われ、JEFF-4.0（実際は TENDL）にて提供される FPY の共分散データを用いた評価結果が示された。原子炉停止後 10 年時点において最大で 6% 程度の崩壊熱の不確かさが存在する事が示唆された。私見ではあるが、ガス炉などの燃焼度が高い燃料や、MOX 燃料では MA の燃焼も無視できない量になるものの、多くの燃焼計算コードは FPY を少数の核種に代表させており、今後は MA を含めた FPY の精度向上が求められるものと考えられる。更に、スペクトルで重みづけしたスペクトル依存の FPY を生成できるようなツールがあれば、より正確な崩壊熱評価に結びつくのではないかと思う。

4.4. TSL の積分実験について

TSL については近年 Pulsed-Neutron Die-away 法による積分実験が行われている。これはパルス中性子をポリエチレンや軽水体系内（非増倍系）に入射させ、時間依存の一群拡散方程式から導出される減衰定数を測定する手法である。パルス中性子を利用することから周期的に減衰定数を測定でき、実験誤差を低減できるとのことである。本手法を用いたポリエチレンに対する最新の測定結果及び実験値の不確かさ評価方法について発表があった。また、STACY 更新炉を用いた軽水 TSL の積分実験について提案があった。この提案では燃料棒を非均質に配置することで、軽水 TSL の感度を高めた臨界実験を実施で

きるとのことである。

5. 核分裂

西尾 勝久

中性子入射反応による核分裂核データとして、核分裂断面積、即発中性子数やスペクトル、核分裂片収率などがある。会議では、陽子ビームによるスパレーション中性子源の代表的な施設である CERN n_TOF やロスアラモスの LANSCE 施設、さらには、仏・グルノーブルの High-flux reactor に設置されている Lohengrin spectrometer での測定が多く報告された。また、かつての勢いはないものの、ベルギーの電子加速器 GELINA での中性子 TOF 施設からの報告があった。日本の J-PARC MLF においても、核分裂片を検出する核データ取得の実現が期待される。

核分裂片収率に関連し、本会議では、特にアイソマーの生成に関する報告が注目される。この測定は、Lohengrin での実験のほか、フィンランド・ユバスキュラ大学の IGISOL での測定がある。近年、核分裂過程におけるスピンの発生メカニズムが着目されており、核分裂理論でも議論の一つになっている。核分裂片の質量数分布については、これまで運動学的に測定することが主であり、このため質量数分布だけを取り扱う測定が多かったが、近年は逆運動学を利用し、核分裂片の (A,Z) を同定しながら収率分布を決定する実験が精力的に行われている。つまり、ウラン 238 などを加速して軽い標的に照射する。核分裂片の速度は順運動学に比べて速くなるため、 ΔE -E 手法によって原子核の Z を同定することが可能となる。これは、それまでの放射化学的な方法に替わるものとなった。代表的な装置として、フランス GANIL の VAMOS++ 分離装置、およびドイツ GSI の SOFIA がある。本会議では、特に VAMOS++ から多くの報告があった。

高エネルギー核分裂での話題の一つに、マルチチャンス核分裂の核分裂データへの影響がある。LANSCE において、ロスアラモスとフランス CEA のチームが即発中性子スペクトルを測定し、中性子の平均エネルギーを見たところ、2nd チャンス核分裂が起こる中性子エネルギーでステップ状の構造が見られた。チャンス核分裂しきい値における核分裂データの変化は、核分裂断面積はもとより、核分裂片の運動エネルギーや核分裂片の角度分布にも現れることがわかっており、本報告で、ほぼすべての核分裂データに影響を与えることが示された。一方、チャンス核分裂の割合を高精度に評価するのは容易ではなく、今後の課題と言える。原子力機構では、JAEA タンデム加速器を使った多核子移行反応実験を行い、多くの核種と広い励起エネルギー範囲にわたって核分裂片の質量数分布を測定し、高次までのチャンス核分裂の割合を報告した。

核分裂では、原子核がのびて切断し、2つの初期の核分裂片ができる (scission)。核分裂核データは、基本、すべてこの状態と生成確率に支配されている。近年、核分裂片のイベントジェネレータを構築し、核分裂片の収率はもとより、即発中性子の数やエネルギー

分布などを統一的に記述する試みが進んでいる。これによれば、例えばデータの取得が難しい高エネルギーのデータ評価において、特定の核データの測定を行えば、他の核データの評価にも結びつけることができる。代表的なコードとして、GEF、FIFRELIN（欧州）、FREYA、CGMF（米国）等がある。一方、これらのコードは既存のデータを入力として求めることや、何らかのパラメータの設定を必要とすることがある。これに対し、日本では、動力学模型（ランジュバン計算）による核分裂の記述が進展しており、東京科学大、近畿大、関西大が取り組んでいる。原子力機構では、原子核の形を6つのパラメータで表す6次元のランジュバン計算を世界で初めて報告した。動力学計算の高度化により、核種依存のパラメータを必要としない、汎用性の高いイベントジェネレータを構築できる可能性がある。

施設での新しい潮流があった。大規模な重イオン加速器施設が世界的に新設されているが、重水素ビームを運用して中性子を発生させ、中性子核データを測定することが重要なプログラムになっている。これに取り組んでいる新施設の代表格としてフランスGANILのSpiral2（NFS施設）、および韓国のRAON（NDPS施設）があり、会議でも報告された。近年、稼働が始まったばかりである。今後、新たなデータが生産されるものと期待される。

6. ミューオン

渡辺 幸信

近年、負ミューオン捕獲反応は、自然科学および応用科学の多くの分野において注目を集めている。たとえば、原子核物理、放射性廃棄物の核変換、半導体デバイスにおける宇宙線ミューオン起因のソフトエラー、ミューオン実験施設での放射線安全管理、さらにはミューオン誘起X線分光を用いた非破壊元素分析などがある。

負ミューオンの応用を推進する上では、原子力・放射線応用分野で用いられている中性子・陽子核データと同様に、信頼性の高い核データベースの整備が不可欠である。しかしながら、これまで包括的な標準データベースは国内外を問わず構築されておらず、国際実験データベースEXFORにも関連実験データの収録は皆無というのが現状である。

このような背景のもと、2023年度、原子力学会シグマ調査専門委員会内に「将来の核データ」ワークショップが新設され、その1テーマとして「ミューオン核データ」が選定された。その後、関連した研究会が開催され、また学会や核データ研究会における依頼講演を通じて、ミューオン核データ・核物理に関心を有する研究者間の連携が進展し、有志による本格的な研究活動を開始した。この有志連合により、以下の4つのサブライブラリで構成される「ミューオン核データ」の整備が進行中である。

- (1) ミューオン X 線のエネルギーと強度
- (2) ミューオン原子の寿命（捕獲率）

(3) 放出粒子（中性子及び軽荷電粒子）のエネルギースペクトル

(4) 残留核生成の分岐比

さらに、今年度、JENDL 委員会内に「ミュオン核データ」のワーキンググループが設置された。本ワーキンググループでは、負ミュオン捕獲反応に関する研究成果を体系的に整理し、標準核データベースとして整備・公開することで、ミュオン科学分野の更なる発展に貢献することを目指している。

こうした国内の動向を国際的に発信すべく、ND2025 においては、上記 4 サブライブラリに関連する進捗報告として、以下の 6 件の口頭発表が複数のセッションで行われた。

発表者	所属	セッション分類	発表題目
渡辺幸信	九大総理工	Astrophysics & Space	Muon Nuclear Data Development Project
新倉潤	理研	Nuclear structure	Measurement of lifetimes of the muonic atom for $^{28,29,30}\text{Si}$
水野るり恵	TRIUMF	Nuclear structure	Production branching ratio measurement of muon nuclear capture of Si isotopes
川瀬頌一郎	九大総理工	Astrophysics & Space	Measurement of charged particle spectra emitted following muon nuclear capture on $^{\text{nat}}\text{Si}$
湊太志	九大理	Nuclear structure	Theoretical Calculation of Muon-Nuclear Capture Reactions Toward Muon Nuclear Data
岩元大樹	JAEA	Machine learning	Evaluating nuclear data with Bayesian machine learning

残念ながら、これら 6 件を除き、諸外国の研究者によるミュオン関連の発表は皆無だったが、各講演では活発な質疑が行われ、ミュオン核データに対する一定の関心を喚起できたものと考えている。次回の ND2028 は日本開催が予定されており、可能であれば、ミュオン核データに関するセッションの設置を目指したい。それまでに、主要核種に対するミュオン核データの整備・公開を着実に進め、国内外に成果をアピールする必要がある。