

科学と技術のための核データ国際会議：ND2016

理論・評価関連

日本原子力研究開発機構

核データ研究グループ

岩本 修 iwamoto.osamu@jaea.go.jp

岩本 信之 iwamoto.nobuyuki@jaea.go.jp

国枝 賢 kunieda.satoshi@jaea.go.jp

湊 太志 minato.futoshi@jaea.go.jp

中山 梓介 nakayama.shinsuke@jaea.go.jp

1. はじめに

本稿では、ND2016の会議内容の内、特に理論・評価関連のものについて報告する。核データ研究分野の中で最も規模の大きい国際会議ということもあり、本会議では理論・評価関連に限っても、基礎的な理論研究から原子炉や核融合炉のための核データ評価研究、さらには医療や天体分野等の非エネルギー領域の研究に至るまで、発表内容は多岐にわたっていた。以下では、各発表の中で筆者各人が印象に残ったもの、および筆者達の発表内容について、その概要を記す。

2. 核データライブラリ開発（岩本修）

米国では次期核データライブラリとして ENDF/B-VIII を開発している。ただし、主要な核種については OECD/NEA 国際核データ評価協力（WPEC）の世界的統一核データ評価ライブラリのパイロットプロジェクト CIELO において整備がなされている。CIELO は前回の ND2013 のオープニングでの米国ロスアラモス国立研究所（LANL）の Chadwick 氏の講演から始まり、今回の最終日の全体セッションでの同氏の発表で閉めた形となった。CIELO 関連の発表のみからなるセッションも企画されるなど、対象核種の ^{16}O や ^{56}Fe , ^{235}U 等で多くの検討がなされ成果が発表されている。CIELO の詳細については Nuclear Data Sheets 誌の特別号で出版される予定である。なお、次期 JENDL 汎用ファイルでも

CIELO の成果の一部を反映することになると考えられる。

また、核反応計算コード TALYS をもとに網羅的な計算によって開発されている TENDL について、大局的に測定データとの一致が良いことが示されるなど、印象的であった。実際、TENDL のデータは JEFF 等にも多く採用されている。これら CIELO や TENDL 等の発表から核データ評価の省力化および効率化の流れを感じた。

筆者は、JENDL-4.0 公開以降の核データライブラリの開発状況について発表した。汎用ファイルに関しては、JENDL-4.0 にあった瑕疵を修正した 38 の JENDL-4.0 アップデートファイルを公開して品質を向上させていること、次期汎用ファイル JENDL-5 の開発のため軽核、構造材、核分裂生成物に対する核データの評価を進めていることを示した。また、特殊目的ファイルとして、JENDL-4.0 を高エネルギーへ拡張した JENDL-4.0 高エネルギーファイル (JENDL-4.0/HE) と 3,237 核種の崩壊データを含む JENDL 崩壊データファイル (JENDL/DDF-2015) を 2015 年に公開したこと等を発表し、現在、原子炉施設の廃止措置のための放射化断面積データファイルと核種を充実させた光核反応ファイルを開発中で、近日公開予定であることを示した。

3. 中性子核データ評価 (岩本信之)

一般化 SPRT 法を用いた核データ評価について、フランス CEA の G. Noguere 氏が講演した。SPRT とはそれぞれ、s 波及び p 波中性子強度関数、有効散乱半径、全断面積を表し、共鳴領域と連続領域との間の上記物理量の整合性を考慮した評価手法である。一般化 SPRT 法では、高次軌道角運動量の中性子強度関数に対する評価まで拡張されている。この手法と励起レベルの結合を考慮したチャンネル結合光学モデルを $^{238}\text{U}+n$ 反応に適用することで、経験則として知られていた s 波と d 波の中性子強度関数の等価性が成立することが示された。d 波等の高次共鳴を持つ核種への一般化 SPRT 法の適用は核データの信頼性向上に繋がるものと期待される。

また、LANL の河野氏が Hauser-Feshbach モデルコード間の比較について発表した。Hauser-Feshbach モデルは低エネルギー核反応における複合核過程を記述するために核反応モデルコードにおいて広く実装されているが、本モデルで計算した断面積にはコーディングの違いなどによりコード間で大きな差異の生じる可能性が指摘されていた。これを調査するために、計算条件を合わせた比較が行われ、反応チャンネル数が少なく、比較の容易な 5 MeV 以下においては断面積間の差は小さいことが示された。この比較では、現在当グループで分離共鳴以上の領域の核データ評価に使用している CCONE コードも対象となっていたが、上記の使用にあたり問題がないことが確認できた。

筆者は、累積核分裂収率が比較的大きい長寿命核分裂生成物の ^{99}Tc に対して、非分離共鳴領域の中性子全断面積及び捕獲断面積の評価を共鳴パラメータの統計解析及び MeV 領域の測定値を基に行い、分離共鳴領域から MeV 領域に亘り整合した評価結果を報告し

た。光学モデル計算の議論から、基底状態バンドのレベル間だけではなく他のバンド間にも広げてチャンネル結合を行うことで断面積の信頼性向上につながるとの知見を得た。

4. 共鳴解析関連（国枝）

共鳴解析コードに関しては、米国オークリッジ研究所で SAMMY コードの改良が進められている。例えば近年、中性子断面積と荷電粒子反応断面積の解析が同時に行えるようになり、共鳴パラメータの決定に更なる拘束条件を課すことができるようになった。 $^{18}\text{O}(\alpha,n)$ 反応等、核廃棄物の管理において重要になる反応断面積の評価にも応用することができ、ポスターセッションにおいてその実用例が示されていた。さらに、MCNP コード等と連携することにより、積分計算結果（原子炉臨界性等）を断面積評価に反映させるシステムを開発しており、共鳴パラメータの誤差低減に役立てようとしている。

また、フランスでは CONRAD と呼ばれる汎用性・拡張性の高い解析コードを開発しており、異なるモデルや手法の組み合わせにより測定データを解析することができる。例えば、共鳴理論と平均場理論や統計モデルを組み合わせた評価手法を構築することにより、分離共鳴および非分離共鳴領域の断面積を同時に評価することが可能となる。無論、共鳴核データの評価は断面積が測定されていることが大前提である。しかし上記のように、積分計算や模型計算と連携することにより核データ評価手法の進展を図ろうとする姿勢に核データ研究の更なる将来を感じた。

筆者は、現在開発中の R 行列理論に基づく共鳴解析コード AMUR の概要を報告すると共に、共鳴パラメータに対する断面積の感度解析や共分散解析を通じて、R 行列理論が持つ物理的性質を可視化できることを示した。また、非共鳴項の扱い方について、剛体球散乱に対してバックグラウンド補正項を加える簡便な手法を提案し、 $n+^{16}\text{O}$ および $\alpha+^{13}\text{C}$ 断面積の同時解析を例に挙げて手法の実用性を示した。質疑応答では非共鳴項に対する補正手法や測定データの補正に関する質問があり、その中には光学模型の導入等、今後の進展に向けた提案が幾つか含まれていた。測定研究者からもエネルギー分解能の計算について質問があり、共鳴核データの評価は、まさに理論と測定のシナジー的立ち位置にあることを再認識した。

5. 核分裂反応関連（湊）

核分裂セッションは最も広い講演ホールにて 3 日間に亘り編成され、この分野の世界的な関心の高さを感じた。核分裂の中でも、即発核分裂中性子スペクトルと即発核分裂ガンマ線スペクトルに関する研究報告が特に多かった。これらは使用済み核燃料の保管施設の設計や核セキュリティ応用に対して重要な物理量であるが、核物理的な視点では理論的な理解がまだ不十分なところでもある。しかしながら、本会議では様々な理論的考察が報告され、即発核分裂中性子スペクトル、即発核分裂ガンマ線スペクトルともに、今後

改善に向けた大きな発展が見られる兆候を感じた。

また、初日の基調講演では、IAEA の Aldo Malavasi 氏が現在の世界における原子力利用の現状と IAEA の活動について紹介した。その中で、原子力技術が医療、環境改善、疫病対策など幅広い分野に応用されていることが紹介され、エネルギー利用が主だった原子力技術の学術的な位置付けが変化しつつあるように感じた。また、IAEA のウェブページの閲覧数において、核データに関連する情報アクセスが全体の約 80 % を占めていることを紹介し、核データの需要の意外なほどの高さを感じた。

筆者は、微視的な中性子・原子核光学ポテンシャルを利用した核データ評価の検証について発表を行った。微視的な光学ポテンシャルの最大の利点は、高い予測精度をもって、実験データの存在しない核種の弾性散乱断面積を計算できることである。これにより、実験データが極めて乏しい長寿命核分裂生成物の反応断面積を求めることができる。ただし、現在のところ微視的光学ポテンシャルは高い入射エネルギーでしか有効ではない。そのため、これまで広く使われてきた現象論的な光学ポテンシャルで得られた弾性散乱断面積と比較することで、具体的に微視的ポテンシャルがどのエネルギーから有効であるかを議論した。

6. 重陽子入射反応関連（中山）

重陽子核データに関する発表は前回の ND2013 では数件しかなかったが、本会議では 10 件以上の発表があった。さらにそれぞれの発表を見ていくと、これまで通り、重陽子ビームを用いた大強度中性子源である国際核融合材料照射施設 (IFMIF) の設計に関連した研究 (構造材の放射化断面積評価など) がヨーロッパを中心に着実に進められていた。その一方で、医療用放射性物質の製造や放射性廃棄物の核変換処理への重陽子ビームの応用を目指した研究も多く見られた。なお、この研究に関しては九州大学を中心とした日本のグループが大きな貢献をしている。これらの発表から、今後も様々な応用分野で重陽子核データへの需要が高まっていくであろうという印象を持った。

また、ブラジルの Carlson 氏から、代理反応に関連した重陽子の分解反応に関する基礎的な理論研究の発表があった。この中では、弾性分解反応は連続状態離散化チャネル結合法 (CDCC 法) で、非弾性分解反応は歪曲波ボルン近似 (DWBA) を拡張したものでそれぞれ記述しており、両成分の和が様々な標的や入射エネルギーの条件において (d, xp) 反応スペクトルの実験値を良く再現していた。こうした発表もあり、重陽子核反応に対する、応用・基礎両面からの関心の高まりを感じた。

筆者は、重陽子核データライブラリの作成に向けた計算システム DEURACS の開発およびその中で採用した理論モデルの検証に関する発表を行った。DEURACS の特長は直接過程から複合核過程まで、重陽子による核反応の全体を計算できることにある。これは、重陽子が引き起こす様々な反応に対し、それぞれの反応の計算に特化したいくつかの

理論モデルを組み合わせることによって実現されている。上述のように、本会議でも重陽子による核反応の内、注目する一部の反応について精度良く計算できるという発表はいくつかあったものの、このように全体を記述できる計算システムは他になかった。汎用的な重陽子核データライブラリの作成に当たっては、応用上重要な反応全てに対して精度の良い計算を行う必要があるため、上記の特長は大きな強みになると再認識した。

7. おわりに

ヨーロッパでは、核データ測定施設の共同利用および核反応計算コード TALYS の利用拡大により、全体として核データ研究のアクティビティが維持されていた。また、原子核理論の地道な基礎研究がバックボーン的役割を果たしているようであった。米国は、基礎理論研究において際立った研究者が多くおり、測定と理論研究の相乗効果を狙った研究が進められている。しかし、ライブラリの開発に関しては以前と比べてやや低迷している印象を持った。事実、核データライブラリの開発では CIELO 等の国際協力に力が注がれている。一方、今後の勢いを感じたのは中国である。本稿では触れなかったが、原子核理論の基礎研究や計算コードの開発が着実に進められている。現在のレベルは欧米諸国や日本と肩を並べているとは言い難い状況であるが、断面積や共分散評価で重要となるポイントをしっかりと捉えている印象があった。また、会議参加者の殆どは若手であり、会話の節々に生き生きとしたものを感じた。

日本では所謂核物理の研究者が核データ分野に新たな知見をもたらしつつあり、今後、難測定核種に対する断面積推定等において活躍が期待されている。また、核データ評価コードやライブラリの開発、評価手法に関する研究において継続的に着実な成果があげられている。さらに今後、国内測定施設による実験と理論の相乗効果を狙った研究が推進されようとしている。日本の核データ研究全体のアクティビティの規模は大きいとは言えないが、国際会議参加国の中では欧米諸国と肩を並べる成果が報告されており、依然として高い水準が保たれていると言えるであろう。