

(3) 評価・理論

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター

核データ研究グループ

中山 梓介

nakayama.shinsuke@jaea.go.jp

岩本 修

iwamoto.osamu@jaea.go.jp

岩本 信之

iwamoto.nobuyuki@jaea.go.jp

放射線挙動解析研究グループ

橋本 慎太郎

hashimoto.shintaro@jaea.go.jp

1. はじめに

本稿では、ND2019 での会議内容のうち、基調講演中の評価・理論研究に関する発表ならびにパラレルセッション中の”Evaluation”および”Nuclear theory, model and codes”のトピックに分類された発表について報告する。なお、これら二つ以外のトピック（特に”Fission physics and observables”）でも評価・理論研究に関する発表があったことにご留意いただきたい。以下では、筆者各人が印象に残った発表、及び読者にとって有益になると考えたものについて、その概要を記す。

2. 核データ評価・ライブラリ開発関連

BNL（米国）の Brown 氏から米国の核データライブラリの ENDF/B-VIII.0 について発表があった。ENDF/B-VIII.0 は米国の最新の核データライブラリで 2018 年 2 月に公開された。OECD/NEA の核データ評価に関する国際協力の枠組み（WPEC）におけるプロジェクト（SG-40）として実施された CIELO の成果を多く採用している。原子炉の臨界性に関わるベンチマークテストの予測精度が大幅に向上したこと等が強調されていた。今後は LANL（米国）で実施されている荷電粒子の飛跡を検出できる Time Projection Chamber (TPC) を用いた核分裂断面積比の測定結果を基にした断面積の改訂や、新たな核分裂収率の評価等が実施されていくようである。

EC-JRC (欧州) の Plompen 氏は、欧州等の NEA データバンク加盟国が開発に参加している JEFF ライブラリについて報告した。2017 年 11 月に公開された JEFF-3.3 について、銅の共鳴データや ^{235}U 、 ^{239}Pu の核分裂断面積等の改訂点に加えて、崩壊データや熱中性子散乱則、8 群遅発中性子データ構造の採用等が紹介された。また、増大する核データニーズに応えることのできるライブラリを目指して JEFF-4 の開発が進められており、2018-2020 年は評価や解析手法の検討、2021-2024 年はライブラリの開発期間とし、2024 年に公開予定であるとの説明があった。完備性を高めるために、TENDL の採用も視野に入れているようであった。

CIELO プロジェクトについては、SG-40 の主査であった LANL (米国) の Chadwick 氏が参加しておらず、代わりに OECD/NEA の Fleming 氏が発表を行った。CIELO は世界の統一ライブラリを目指すものではないとのことで、実際、新しい ENDF/B-VIII.0 や JEFF-3.3 に対応した CIELO-1 と CIELO-2 と呼ばれる 2 種類のファイルが存在する。CIELO の枠組みでは、世界中から多くの機関が参加して評価が行われた。特に目を引いたのは IAEA の核データセクションの研究者が非常に強く関わったことであった。CIELO の後継として IAEA が主導して、INDEN という枠組みを立ち上げており、この流れが継続されているように見える。なお、CIELO の詳細については Nuclear Data Sheets 誌に論文が掲載されている [1] ので、そちらを参照していただきたい。

CIAE (中国) の Ge 氏は、中国で開発が進められている核データライブラリ CENDL-3.2 の進捗を報告した。CENDL-3.2 の中性子ライブラリには 270 核種の核データが収録予定であり、中国国内ユーザーのニーズを満たすように開発が続けられ、2019 年中の公開を目指しているとの説明があった。CENDL-3.2 は 3.1 と比較するとベンチマーク結果も良好になっており、性能が向上していることが示された。また、今回の公開では、中性子ライブラリ以外に核構造・崩壊データ、核分裂収率データ、光核データや放射化評価用データ等も公開予定であるとの紹介があった。

岩本修は日本の核データライブラリである JENDL の現状について発表した。最近の JENDL の開発状況としては、二つの特殊目的ファイル JENDL/AD-2017 と JENDL/PD-2016 の公開があげられる。JENDL/AD-2017 は原子炉施設の廃止措置に必要な放射化量評価のために必要な 311 核種の断面積を収録した核データファイルである。一方、JENDL/PD-2016 は電子線加速器等で生じる光子との光核反応に関するデータを収録したものである。また、現在、長寿命核分裂生成物に対する中性子と陽子による核反応のデータを収録した JENDL/ImPACT-2018 を公開に向けて準備しており、その概要を紹介した。現在、バックエンド分野を中心としたイノベーション創出に資するため、次期の汎用核データライブラリとして JENDL-5 を開発しており、2021 年度の完成を目指している。本発表では、JENDL-5 の開発状況と予定について説明した。

CIAE (中国) の Zhang 氏は CENDL-3.2 に収録予定の ^{40}Ca に対する中性子核データ評

価について説明した。Caには6核種の安定同位体があるが、CENDL-3.2には存在比の大きな ^{40}Ca のみを収録するようであった。評価は測定値の多い(n,tot)と(n,p)反応をベースに他の反応断面積を計算しているとのことであった。質疑では、 $^{40}\text{Ca}(n,2n)$ 反応断面積が他の評価済断面積より50倍近く大きかったことについて質問があったが、測定データ [2]にただ合わせたという回答に留まった。ちなみに、JENDL-4.0の $^{40}\text{Ca}(n,2n)$ 反応断面積評価では、測定値の信頼性に疑問があるため、評価に利用しなかったとの記載があった。こちらの方がもっともらしそうである。



バンケットでの催しの様子

CIAE(中国)のWu氏から ^{56}Fe の中性子非弾性散乱断面積の評価についての発表があった。CENDL-3.2のβ版であるCENDL-3.2b1の改良を進めており、中性子の遮蔽実験に対するベンチマークテスト結果の改善を目指しているとのことである。一般に非弾性散乱断面積の測定は困難であり、 ^{56}Fe のような重要な核種においても測定値間に差異があり、評価値間のばらつきも大きい。この評価では非弾性散乱によって放出される γ 線の角度分布等を考慮する等、測定データの詳細な検討を行っている。得られた断面積の評価結果を用いると、ベンチマークテスト結果が改善されたとのことである。

CEA(フランス)のDiakaki氏はCONRADコードを用いて、 ^{56}Fe の共鳴領域から連続

領域に至る中性子核データに対する評価結果を報告した。共鳴領域評価では、 ^{56}Fe 試料に不純物として含まれる ^{59}Co や ^{55}Mn 等も考慮した共鳴解析が実施されていた。連続領域の評価には CONRAD 上での計算を可能にした TALYS コードを用い、中性子全断面積や非弾性散乱断面積の測定結果を再現していた。共鳴領域と連続領域を別々に評価しているので、二つの領域を評価するコードを統合する必要性もなさそうであるが、共鳴領域と連続領域それぞれの評価で用いられるモデルパラメータを使い全領域の中性子核データ共分散評価が可能となっている点等、CONRAD には他のコードにはないメリットがある。

岩本信之は、ガンマ線波高スペクトル測定値との比較が可能なスペクトル導出手法に関する研究成果を発表した。一般的に、ガンマ線波高スペクトル測定値は検出器のガンマ線応答に由来する物理効果を取り除き、核反応モデルによる計算値と比較可能なデータとして提供される。しかしながら、本研究では、計算値を検出器応答関数でフォールディングする手法を開発し、捕獲断面積の高精度化に重要なガンマ線強度関数の情報取得に成功したことを報告した。これまで共鳴捕獲断面積の測定実験からガンマ線強度関数の情報を得る研究はあまり行われてこなかった。しかしながら、本会議の発表には（残念ながら聴講できなかったのだが）、n_TOF 施設の測定値を使って似たような研究発表があったようである。今後、このような測定値の活用が広がっていくと期待される。

また、“Evaluation”のトピック中で“Thermal scattering data”というセッションが生まれ、実験的研究も含めて 11 件の熱中性子散乱則に関する発表が行われた。その中で、CNEA（アルゼンチン）の Damian 氏は、ENDF/B-VIII.0 で更新された軽水の熱中性子散乱データには ENDF/B-VII.1 等の以前のデータよりも全断面積の温度依存性が強く出ており、この依存性を検証するために行った 10°C 及び 80°C での測定結果を発表した。ENDF/B-VIII.0 はこの温度範囲において測定値を良く再現していた。質疑応答時にこれはベンチマークテストの結果にどの程度影響を与えるのか、と質問したところ、まだ詳細な検証はしていないとの回答があった。

3. 核データ理論・コード開発関連

CEA（フランス）の De Saint Jean 氏から CONRAD コードに関する発表があった。CONRAD はオブジェクト指向の C++ 言語を用いて開発されているため拡張性が高く、異なる理論モデルを組み合わせたり新たな理論モデルを追加したりすることが容易になっている。そのため、例えば、共鳴理論、統計モデル、ベイジアンモンテカルロ法を組み合わせると共鳴領域と連続領域の断面積及びその不確かさを同時に評価することが可能である。なお、前述の Diakaki 氏の発表を含め、本会議では CONRAD を用いた核データ評価に関する発表が数件見られた。

IAEA の Koning 氏は TALYS コードに関する発表を行った。最近では、コード中の理論モデルに関する進展はあまり無いものの、トータルモンテカルロ法のためのランダムファ

イルの自動作成機能やマニュアルの刷新等、ユーザーの利便性向上を図っているようである。また、こうした努力の結果、医療や天体物理等の非エネルギー分野も含めて TALYS のユーザー数が着実に増加しているとのことであった。なお、TALYS を用いて開発されている核データライブラリ TENDL の新論文が最近公開された [3] ので、興味のある方はこちらをご参照いただきたい。

中山は、重陽子核反応データベースの作成に向け開発中の計算コード DEURACS の進展に関する発表を行った。近年、重陽子加速器を用いた中性子源だけでなく、重陽子ビームを用いた LLFP の核変換処理応用等も提案されており、中性子放出スペクトルのデータ以外にも様々な重陽子核データが必要とされている。このため、残留核生成や複合粒子放出についても精度の良い予測ができるよう、DEURACS を改良したことを報告した。



天安門広場

ウィーン工科大学（オーストリア）の Leeb 氏は Faddeev 方程式に基づいた R 行列理論 [4] を用いた、分解反応チャネルを考慮できる 3 体の共鳴解析手法について発表した。現在はコードの開発中らしく、本会議では計算結果は示されなかったものの、今後の展開が楽しみな発表であった。また、その後に行われた LANL（米国）の Paris 氏による共鳴解析コード EDA に関する発表の中でも、将来計画として分解反応の考慮が挙げられてい

た。なお、同じく共鳴解析コードである SAMMY の進展に関する発表も予定されていたものの、ビザの都合か、こちらは残念ながらキャンセルとなってしまった。

CERN (スイス) の Ferrari 氏により、彼が中心となって開発が進められている粒子輸送計算コード FLUKA の最近の開発状況について発表がなされた。FLUKA は、核子や中間子といったハドロンの他、イオンやレプトンといった様々な入射粒子の反応を考慮できる汎用コードである。発表では、各種ベンチマーク結果が示されたが、特にミューオンとニュートリノの入射反応について詳しく報告がなされた。これらは多数の反応チャンネルを引き起こす粒子であるが、彼らのモデルは各チャンネルを丁寧に取り扱い十分な再現性をもつことが示された。

橋本は、輸送計算コード PHITS のための不確かさをもつ全断面積モデルについて発表した。PHITS 等の輸送計算では、核反応はコードに組み込まれたモデル等で模擬される。しかし、モデル等には一定の不確かさがあるため、これに起因する不確かさの伝播を系統的な不確かさとして評価することが輸送計算の信頼性評価のために求められている。発表では、全断面積モデルのパラメータがもつ不確かさを最小自乗法に基づいた KALMAN コードを利用して決定し、その不確かさの範囲でパラメータを変えて表現される断面積の幅が測定値の誤差や分散と一致することを報告した。質疑応答では、モデルパラメータの共分散について質問があった。現在は非対角項を取り扱っていないが、今後は考慮できるようモデルの高度化を行う予定である。

JINR-FLNR (ロシア) の Denikin 氏からは、原子核に関する知見をインターネットにより容易に入手できるサービス”NRV web knowledge base on low-energy nuclear physics”(URL: <http://nrw.jinr.ru/nrv/>)について報告がなされた。原子核研究の成果は、測定値に関しては EXFOR や ENSDF 等で丁寧にまとめられている。しかし、理論的な成果の 1 つである計算コードについては、その結果を知るためにコードの使用方法に習熟する必要があり、大きな負担が求められる。本発表で紹介されたサービスは、コード固有の複雑な入力方式を理解することなく、ウェブブラウザで核種等の条件を入力することで、核構造や核反応、崩壊に関する計算コードの結果を簡便に得ることができる。

LLNL (米国) の Escher 氏により代理反応法(surrogate reaction method)についての発表が行われた。この手法は不安定核等、実験で用意するのが難しい核種を標的とする反応の断面積を、安定核を標的とした実験から決定する間接測定法の 1 つである。間接測定法として非弾性散乱や核子移行反応が利用され、ウラン系列に対する中性子入射核分裂反応等数多くの断面積が決定されている。発表では最近の進展として、アイソマーを標的とした $^{87m}\text{Y}(n,\gamma)$ 反応や、陽子入射の $^{87}\text{Sr}(p,\gamma)$ 反応の断面積の決定について紹介がされた。また、代理反応法の課題として挙げられるスピン・パリティ分布の問題については、2段階過程の寄与を考慮する等、十分な理論解析が必要であることが強調された。

光学模型に関する発表も 7 件ほどあった。JIPNR (ベラルーシ) の Martyanov 氏は特に

奇核アクチノイドに対する軟回転体模型を用いたチャンネル結合光学模型計算の進展について、山西大同大学（中国）の Xu 氏は Li, Be, B 同位体入射の現象論的光学ポテンシャルの導出について、それぞれ発表した。また、IFIN-HH（ルーマニア）の V. Avrigeanu 氏は”dark side of alpha-particle potential”と称して、現象論的な α 粒子の光学ポテンシャルを導出する際に α 入射だけでなく α 放出チャンネルも考慮することの重要性を述べた。なお、 α 粒子については CIAE（中国）の Zhang 氏による微視的ポテンシャルに関する発表もあった。

4. おわりに

本会議の運営自体は大きな問題もなく、良く組織化されていたように感じた。しかしながら、発表のキャンセルが多かったため、多少の混乱があったことが残念である。混乱の代表例は発表時間の変更である。すなわち、キャンセルがあれば、それを飛ばして先にごんごん進めてしまう座長と、スケジュール通り進めるために空いた時間を休憩にしたり、前の発表の議論に充てたりする座長等、対応がまちまちであった。そのため、危うく発表時間に間に合わないという発表者も見られた。予定発表数 517 件のうちの 20%近いキャンセル率はやはり間延び感が否めなかった。また、ポスター発表についてはコアタイムが無かったため、ランチタイムやセッションの間の休憩時間に説明を行うというスタイルが取られていた。きちんとスケジュールに組み込まれたポスター発表時間がないと、ポスター発表の説明を聞いたり、説明したりすることがなかなか難しく、聞く方も説明する方も気の毒に感じた。

改めて本会議のプログラムを確認すると、“Evaluation”トピックの発表件数が約 60 件、“Nuclear theory, model and codes”トピックは約 40 件であった。冒頭で述べたように他のトピックとの関係もあるため一概には比較できないが、前回の ND2016 ではそれぞれ、“Evaluation”が約 80 件、“Model and codes”が約 40 件だったようで、若干少なくなったことになる。また、会議当日も両トピックの発表は、実験や応用関係の発表が行われた部屋よりも一回り小さい部屋で行われ、聴衆の数も他のトピックと比較して少なかったようである（午前中最初の発表では 10 人程度のこともあった）。本分野のアクティビティを高めていくためにも、より一層の努力をしなければと感じた。

参考文献

- [1] M.B. Chadwick et al., Nucl. Data Sheets, **148**, 189 (2018).
- [2] D.M. Arnold, L.A. Rayburn, Dissertation Abstracts, **26**, 3425 (1965).
- [3] A.J. Koning et al., Nucl. Data Sheets, **155**, 1 (2019).
- [4] W. Glöckle, Z. Phys. **271**, 31 (1974).