



## 会議のトピックス

# ( $\alpha,n$ )核データ評価とデータニーズに関する

## IAEA 技術会合に参加して

日本原子力研究開発機構  
核不拡散・核セキュリティ総合支援センター  
芝 知宙  
[shiba.tomooki@jaea.go.jp](mailto:shiba.tomooki@jaea.go.jp)

日本原子力研究開発機構  
原子力基礎工学研究センター  
国枝 賢  
[kunieda.satoshi@jaea.go.jp](mailto:kunieda.satoshi@jaea.go.jp)

電力中央研究所  
名内 泰志  
[nauchi@criepi.denken.or.jp](mailto:nauchi@criepi.denken.or.jp)

### 1. はじめに

IAEA 主催の Technical Meeting on ( $\alpha,n$ ) Nuclear Data Evaluations and Data Needs (( $\alpha,n$ ) 核データ評価とデータニーズに関する IAEA 技術会合) が、2021 年 11 月 8 日～12 日の日程でオンラインにて開催された。( $\alpha,n$ )反応断面積は以下に記す通り、バックエンド、核不拡散、基礎科学等で共通する基盤データである。このため( $\alpha,n$ )データの測定、物理モデルや計算コードの整備状況、評価済みライブラリの現状をレビューし、この分野におけるニーズとの間の差異を特定し、ニーズに対処すべく信頼できる( $\alpha,n$ )データを整備するアクションプランを提案することで工学と基礎科学の両分野にてメリットやインパクトを与えることが本会合開催の動機となったと考えられる。本会合は主に  $\alpha$  崩壊を意識して 10 MeV 程度までの低エネルギー( $\alpha,n$ )反応のデータに主眼を置いた。応用先として挙げられた分野は、(I) 核燃料サイクル、(II) 使用済燃料の管理および核不拡散、(III) 低バックグラウンド物理実験、(IV) 核・天体物理学、であった。

会合では、世界中から( $\alpha,n$ )反応に関する研究を行っている研究者ら約 60 人が集まり、

活発な議論が行われた。今回日本からは国枝が発表者として参加し、名内と芝がオブザーバーとして参加した。

## 2. 会議の概要

セクション1では以下の発表があった。なお、題名は筆者らの意識である。

- Best 氏 (フェデリコ2世・ナポリ大学) :  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  反応の低エネルギー領域での断面積測定、
- Lozza 氏 (LIP リスボン) : 低バックグラウンドのニュートリノ実験における $(\alpha,n)$ 反応
- Santorelli 氏 (CIEMAT) :  $(\alpha,n)$ 反応がダークマターの直接探索に与える影響
- Villano 氏 (コロラド大学) : ダークマターに関する $(\alpha,n)$ 反応の実験的検証・測定・実験施設
- Reichenbacher 氏 (サウスダコタ鉱業大学) : 次世代の低バックグラウンドニュートリノおよびダークマター実験のための $(\alpha,n)$ 反応断面積データ改善の必要性

セクション2では以下の発表があった。

- Tarifeno-Saldivia 氏 (INTE) : MANY プロジェクト スペインにおける  $(\alpha,n)$  反応の中性子収量とスペクトルの測定
- Adsley 氏 (テキサス A&M 大学) : 間接測定による  $(\alpha,n)$  反応断面積への制約
- Romano 氏 (IB3 Global Solutions) :  $(\alpha,n)$ 反応に関する核データスコーピングレビューからの提言
- Westerdale 氏 (プリンストン大学) : TALYS に基づく中性子計算コード NeuCBOT を用いた  $(\alpha,n)$  中性子収量の計算
- Koning 氏 (IAEA) : TENDL2021 の $(\alpha,n)$ 反応断面積ライブラリ
- Gilbert 氏 (CCFE) : 核融合のための $(\alpha,n)$ 反応断面積の必要性

セクション3では以下の発表があった。

- 国枝 (JAEA) : R-matrix 解析における弾性チャンネルの非共鳴プロセスの修正
- Bouland 氏 (CEA Cadarache) : 4MeV 未満での  $^9\text{Be}(\alpha,n)^{12}\text{C}$  微分散乱断面積データの予備分析
- Cano-Ott 氏 (CIEMAT) :  $(\alpha,n)$ 反応の応用と検出器シミュレーションコード
- Kudryavtsev 氏 (シェフィールド大学) : SOURCES4 コードによる $(\alpha,n)$ 反応における中性子生成計算
- Meisel 氏 (オハイオ大学) : HeBGB オハイオ大学中性子ロングカウンター

セクション4では以下の発表があった。

- Chen 氏 (清華大学) :  $^{17}\text{O}$  システムの新しい評価 (暫定報告)
- Urllass 氏 (HZDR) : Frisch グリッド電離箱による新しい TOF 測定に基づく  $^{16}\text{O}(n, \alpha_0)^{13}\text{C}$  断面積の正規化
- Prusachenko 氏 (IPPE) :  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  反応断面積の測定と  $^{16}\text{O}(n, \alpha)^{13}\text{C}$  反応断面積の決定
- Lee 氏 (LANL) : LANSCE における  $^{16}\text{O}(n, \alpha)$  反応微分断面積測定的第一報
- deBoer 氏 (ノートルダム大学) : ノートルダム大学における  $(\alpha, n)$  反応実験と AZURE2 による R-matrix 解析
- Paris 氏 (LANL) :  $(\alpha, n)$  の R-matrix 評価

### 3. 核燃料サイクル、使用済燃料の管理および核不拡散に関する事項 (芝、名内)

核燃料による放射線場の特徴として、中性子を媒介とした核分裂連鎖反応が挙げられる。未臨界状態では自発核分裂もしくは  $(\alpha, n)$  反応によって発生した中性子により連鎖反応が開始される。中性子発生数の実効増倍率を  $k_{eff}$  とし、核燃料の物質質量に比例した自発核分裂もしくは  $(\alpha, n)$  中性子発生数を  $S$  とすると、測定される中性子束  $\phi$  が概算  $\phi \propto S/(1 - k_{eff})$  となる。核燃料サイクルや使用済燃料の管理の場合では  $k_{eff}$  が 1 より十分低いこと、また  $S$  が申告されている核物質質量と整合していること等の確認が求められる。核物質の崩壊による中性子発生に占める  $(\alpha, n)$  中性子発生数の割合は、実験炉等で高  $^{235}\text{U}$  濃縮度燃料が  $(\alpha, n)$  標的核種と混在している場合、核物質がフッ化物となっている場合、あるいは軽水炉低燃焼度燃料、MOX 新燃料等で高まる。こうした場合において、 $(\alpha, n)$  中性子発生数とスペクトルの適切な評価が重要となる。

筆者ら (芝と名内) は、核不拡散分野の非破壊測定 (NDA) 技術開発に携わっているため、Romano 氏 (IB3 Global Solutions) の発表に興味を持った。本発表のモチベーションとしては、 $(\alpha, n)$  反応から放出される中性子とガンマ線は、核燃料サイクルに存在する濃縮ウランやその他のアクチニドの在庫を測定するための保障措置に用いられる NDA 技術の重要な要素であり、これらの反応による反応断面積、全中性子収量、中性子エネルギースペクトル、ガンマ線エネルギースペクトルの (核データ由来の) 不確かさは、対象となるアクチニドの重量の評価に悪影響を及ぼし、有意量<sup>1</sup>を優に超える量に相当する可能性があるとのことであった。最近、US DOE/NNSA/国防核不拡散局は、米国の行う核不拡散ミッションに関連する  $(\alpha, n)$  反応データの影響を把握するため、スコーピング研究に資金を提供した。Romano 氏の発表では、 $(\alpha, n)$  反応の核データの現状と、 $(\alpha, n)$  中性子とガンマ線ソース強度を予測するために現在使用されているの計算コードの限界について言及が

<sup>1</sup> 有意量 (SQ) : 1 個の核爆発装置の製造の可能性を排除し得ない核物質のおおよその量

あった。特に、UF<sub>6</sub>シリンダーの検認に必要な核データに焦点を当てていた。そして、核不拡散分野に重要である核データに優先順位を付け、新たな測定、評価及びコード開発のための提言としてまとめた。

筆者（芝）の質問として、「そもそもなぜ UF<sub>6</sub>シリンダーの検認を(α,n)測定で行おうとしているのか？例えば、U新燃料の検認には <sup>235</sup>U の α 崩壊に伴う 186 keV の γ 線があり、それを保障措置検認の手法として用いることが良く知られている。これとも関連させてコメントして欲しい。」と聞いたところ、Romano 氏から「シリンダーの厚い遮へいを考えると 186 keV の γ 線は適当ではない。また、中性子は透過力が高いので、シリンダー内部の情報も良く反映できるので (α,n)反応が適している。」との回答があった。また、会合に参加していた IAEA 核データセクションからの参加者から「IAEA 保障措置局から <sup>19</sup>F(α,n)反応のより良いデータと評価の要望が来ている」との追加コメントがあった。

筆者（芝）がもう一つの興味を持ったのは、(α,n)中性子の計算コードについての発表である。筆者ら（芝と名内）は 2021 年原子力学会秋の大会において「燃料デブリ中の核燃料物質量の定量のための非破壊測定試験」と題したシリーズ発表を行っており、その中でプルトニウム酸化物試料の γ 線測定をしたところ、<sup>19</sup>F(α,n) に起因する γ 線ピークが多数観測された[1]。筆者はこの実験をシミュレーションで再現したいと現在取り組んでいるところである。これに関連して、本会合で Cano-Ott 氏 (CIEMAT) が、GEANT4 をベースにした SaG4n コードの紹介をしており、興味を持った。筆者の理解では、現状(α,n)の実験値をベースにした評価済みデータのライブラリは JENDL/AN-2005 のみであるが、SaG4n コードは JENDL/AN-2005 を ENDF-6 フォーマットのまま読み込み、計算に供する。加えて、SaG4n コードが ENDF-6 フォーマットを直接読み込めるという特徴を活かし、JENDL/AN-2005 に収録されていない核種に関しては TENDL を読み込んで使うことが可能であるとのことであった。加えて、Cano-Ott 氏らの SaG4n コードを応用する大きなモチベーションが核不拡散・セキュリティにあるとのこと、この点も筆者の興味を引いた。ところで、(α,n)反応中性子発生は①α線の発生数と発生スペクトル、②α線の減速過程、③(α,n)反応で決まる。①は Table of Isotopes 等に信頼できるデータがあり、また③については 4 節で述べるよう改善の途上なるものの、軽水炉燃料に関わる <sup>17,18</sup>O、燃料濃縮にかかわる <sup>19</sup>F(α,n)反応の分析が本会合で報告されている。しかし②のイオンの輸送モデルへの言及がなかった。例えば福島第一原子力発電所等で生成している燃料デブリを扱う場合、α線を発生する核燃料の粒が金属やコンクリートに非均質混合している蓋然性もある。中性子発生数で核物質量を評価しようという試みでは非均質系での α線の減速過程が重要となる。このため今後、計算コードやモデリングが、この方面への検討に拡がることを期待したい。

#### 4. 低バックグラウンド物理実験、核・天体物理学を意識した検討（国枝）

ニュートリノやダークマター（？）の検出・・・、言わずと知れたノーベル賞級の成果を今後も出し得る壮大な研究プロジェクトである。筆者はこのような宇宙・物質の起源を探る試みは大好きで、よくブルーバックス本などを読みあさっている一人である。読者の方々は核データとは縁のない分野と思われるかもしれないが、実は大きく関係している。その理由は、ニュートリノ等の検出イベントが超レアな事による。即ち、検出したいイベントが自然界に存在する放射線バックグラウンドにより埋もれてしまうという、根本的な問題があるからだ。その主要因の一つである宇宙線から逃れるために、日本のスーパーカミオカンデをはじめとする各国の実験施設は地下に設けられているのであるが、周囲の岩石等に含まれる放射性原子核によるイベントは依然としてバックグラウンドの要因となる。如何ともし難いのは、もちろん中性子-ウランやトリウム系列の崩壊過程で生じる $\alpha$ 線と炭素や酸素等の軽元素との $(\alpha, n)$ 反応による天然の中性子である。筆者がこの問題を知ったのは10年以上前のこと。当時、東北大のチームが中心となって、カムランド（旧カミオカンデ）で地球内部由来のニュートリノの測定が行われていた。その結果、地熱の由来の約半分が天然に存在する放射性核種の崩壊熱であることを突き止め、ネイチャー誌論文にも掲載されている。その測定の際にバックグラウンドの要因の一つであったのが、シンチレーター内で起こる $(\alpha, n)$ 反応である。実際に、 $^{13}\text{C}(\alpha, n)$ 断面積の測定も同時並行で進められていた。逆反応である $^{16}\text{O}(n, \alpha)$ 反応は軽水炉の臨界計算に少なからず影響を与えることもあり、筆者は核データ評価者として当時からこの研究に注目していた。また、宇宙における元素合成過程の一つである s-process（中性子捕獲反応による元素合成過程の一つ）では $^{13}\text{C}(\alpha, n)$ 反応などが主要な中性子源になるため、 $(\alpha, n)$ 断面積は宇宙物理学においても重要な基礎データである。

前置きが長くなったが、本会議では欧米のニュートリノやダークマター関係、天文関係の研究者が多く参加していた。理由は上述の背景に加えて、評価済み核データが十分に整備されていないことにある。ニーズとしては予想通り $^{13}\text{C}(\alpha, n)$ 断面積へのリクエストが多く、10%以内程度の精度が欲しいとのことであった。エネルギー領域にもよるが、測定データ間の差異を考えると現状はおそらくそれ以上に不確かさがあると考えられる。特にエネルギーが高くなると反応チャンネル数が多くなるため核データの評価計算も容易ではない。非共鳴領域では、TENDL や Talys コードの計算結果についていくつかのレビュー報告があった。また、光学ポテンシャル等の核反応モデルパラメーターについて調査報告があった。しかし、統計モデルの計算では共鳴領域は如何ともし難く、そこは現状では事実上 R 行列理論を使うしかないと思われる。米国の LANL やノートルダム大学、フランスの CEA、中国の研究者からそれぞれ共鳴解析についての現状の報告があった。しかし、共鳴解析の対象となる測定値間には数十%以上の差があることはザラにあり、どの研究者も苦労している様子であった（筆者も同じである）。筆者が特に注目しているの

はノートルダム大の研究者らである。彼らは独自にタンデム等の加速器を持っており、また同時に AZURE2 という R 行列コードを開発している。共鳴解析では測定条件や環境を模擬することが重要になることが多いので、核データ測定と共鳴解析を一体的に行えることは大変魅力的であると感じている。会議では、これまで十分になかった高エネルギーの  $^{13}\text{C}(\alpha, n_{1,2}, \dots)$  断面積の測定結果が示されると同時に暫定の評価結果も示されていた。そのほか、スペインや米国等の研究者から新たな断面積の測定結果や測定計画が報告された。その中には逆反応過程に注目した測定もあるなど、やや活動が活発? になっているような印象を受けた。その中で、筆者は R 行列理論において非共鳴過程に対する補正項が必要である可能性を議論し、簡便な新しい手法を提案した。参加者の反応は悪くなかったと感じた。内容は反応物理過程に則したものであるが、マニアックすぎるので本項では割愛する (R 行列理論の祖である故 Wigner 氏や Eisenbud 氏のご存命であればどう思われたであろうか、)。忘れずにこの期に乗じて JENDL-5 (2021 年 12 月公開) の宣伝も行った。JENDL-5 にはサブライブラリの一つとして  $\alpha$  線入射のファイルを格納している。基本的には JENDL/AN-2005 を改定したものであるが、米国の研究者の成果が発端となり、また IAEA の関係者から提案頂いた事がきっかけで、放出中性子の DDX を新たなモデル計算値で更新した。また、 $\gamma$  線放出データを追加するなどデータファイルとしての完備性をより高めた。それにより、応用上の品質が大幅に向上しさせた。会議参加者は、JENDL/AN-2005 を多用しているようだったので、JENDL-5 も使ってくれることを期待する。

## 5. おわりに (所感)

核データの会議に参加するのは初めてであったが、これも web 会議のおかげである。普段であれば海外出張というハードルに阻まれたであろう会議に、情報収集のためだけでも参加できるのは、web 会議の利点である。また、多くの参加者が  $(\alpha, n)$  反応の核不拡散への応用に言及していたのには驚いた。実験値の不足、評価の不足、コードの不足と課題が多く挙がったので、ユーザーとしては早期に解決されることを期待したい。最後に、本会議にお誘いくださった IAEA の奥村さんに感謝申し上げます。

(芝 知宙)

筆者は四半世紀前に  $(n, \alpha)$  反応での  $\alpha$  線スペクトルや中性子のスペクトル測定をしていたが、当時の知識でも割と話についていけるものだ、と思うとともに、脱励起等で生じる  $\gamma$  線も含めた測定で反応過程をより詳細にみていく必要があるだろうと感じた。他方、芝さんに誘われて何の準備も心構えもなく気楽に Web 参加し、メモもとっていなかったため、本原稿の執筆依頼でとても困った。(名内 泰志)

原子力工学の研究者と基礎物理学の研究者が一同に会したことは過去に何度もあったと思う。しかし、 $(\alpha, n)$  反応というピンポイントのテーマを設定し、ベクトルを揃えて情報交流や議論がなされたことはあまりなかったのではないだろうか。異分

野交流という意味でも大変興味深い会議であった。核データの研究に携わっている方々は、大袈裟かもしれませんが、、、直接的では無いにせよ、ノーベル賞級の研究テーマに少なからず関わりを持っている（と考えて良いと思います）（国枝 賢）。

#### 参考文献

[1] 鈴木 梨沙、他：「燃料デブリ中の核燃料物質量の定量のための非破壊測定試験 (3)ガンマ線非破壊測定技術を用いた核燃料物質中の不純物の特定」、日本原子力学会 2021 年秋の大会、講演番号 1H11