

## 会議のトピックス(I)

# 核データ処理に関する IAEA 技術者会合に関する報告

日本原子力研究開発機構  
炉物理・熱流動研究グループ

多田 健一

[tada.kenichi@jaea.go.jp](mailto:tada.kenichi@jaea.go.jp)

## 1. はじめに

国際原子力機関(IAEA)が主催する核データ処理に関する技術者会合(Technical Meeting on Nuclear Data Processing)が、2022年11月29日～12月2日の日程で、ウィーンのIAEA本部での対面形式と、オンライン形式でのハイブリッド形式によって開催された。日本からは筆者の多田のみがオンラインにて出席した。会合では、筆者が中心となって開発している核データ処理コード FRENDY<sup>1)</sup>の開発状況など、各国の核データ処理コードの開発状況が報告された。本会合の発表資料及び報告書<sup>2)</sup>はIAEAのホームページ<sup>3)</sup>に公開されているので、興味のある方はそちらもご参照頂きたい。

## 2. 本技術者会合の概要

IAEA主催の核データ処理に関する技術者会合は2015年から不定期に開催されており、今回で6回目の開催となる。参加機関は主催者のIAEA、OECD/NEA、米国のBNL、LANL、LLNL、ORNL、ANL、Rensselaer工科大、仏国のCEA、IRSN、マドリード工科大(西)、IJS(スロベニア)、KIT(独)、VTT(フィンランド)、CNL(カナダ)、NRC(露)、西安交通大学(中)、KAERI(韓)、そしてJAEAの19機関であり、約30名の専門家が出席した。KITやCNLなど、本会合に新たに参加した機関もあり、核データ処理に対する関心の高まりが感じられた。なお、対面形式の参加はIAEAから4名とLANLから2名、KAERI、IJSからそれぞれ1名ずつの計7名であった。

各参加者の発表内容の概要については次章で述べるが、本技術者会合では、各機関での核データ処理コード開発の現状と、核データ処理コードによる断面積処理結果の比較が報告された。開発状況が報告された核データ処理コードはFRENDY(JAEA)、NJOY<sup>3)</sup>(LANL)、FUDGE<sup>4)</sup>(LLNL)、AMPX<sup>5)</sup>(ORNL)、GAIA<sup>6)</sup>(IRSN)、GRUCON<sup>7)</sup>(NRC)、

<sup>1)</sup> Technical Meeting on Nuclear Data Processing  
[https://www-nds.iaea.org/index-meeting-crp/TM\\_ND\\_Processing/](https://www-nds.iaea.org/index-meeting-crp/TM_ND_Processing/)

ACEMAKER<sup>8)</sup>(IAEA)の7コードであった。

### 3. 各参加者の発表内容の概要

#### 3.1 Nuclear data processing and validation at KNDC

KAERI の D. H. Kim 氏より、ENDF/B-VIII.0<sup>9)</sup>の熱中性子散乱則 (H in ZrH) について、NJOY2016 の処理条件の違いが核計算に与える影響についての調査結果の説明があった。計算に用いた NJOY2016 のバージョンは NJOY2016.67 で、変更したパラメータは角度分割数 NBIN (THERMR/ACER で必要)、内挿精度 TOL (THERMR で必要)、上限エネルギー EMAX(THERMR/ACER で必要)、データ格納形式 IFENG<sup>b</sup> (ACER で必要) の四つである。これらの四つの入力パラメータを変えて MCNP<sup>10)</sup>や Serpent<sup>11)</sup>、PHITS<sup>12)</sup>等の連続エネルギーモンテカルロ計算コードで用いる ACE ファイル<sup>13)</sup>を生成し、臨界実験ベンチマーク集である ICSBEP ベンチマーク<sup>14)</sup>に登録されている H in ZrH を含む 10 の臨界実験に対して実効増倍率を比較した。なお、H in ZrH 以外は全て同じ ACE ファイルを利用している。また、参照解とした H in ZrH の処理条件は NBIN=32、TOL=0.3%、EMAX=10 eV、IFENG=2 である。

まず、IFENG=2 から IFENG=1 に変えた場合、最大で 296pcm と実効増倍率に非常に大きな差異が見られることが分かった。IFENG=2 は MCNP6 以降で実装された比較的新しいオプションである。IFENG の違いは角度分布に影響を与える<sup>c</sup>ことから、今後は IFENG=2 を使うことが望ましい<sup>d</sup>。

NBIN、TOL、EMAX については、それぞれ最大で 40pcm 程度の差異が見られた。また、EMAX については比較の結果、8 eV 以上が望ましいことが分かった。しかし、NBIN、TOL については今回の検討で変更した値では不十分であり、更なる検討が必要とのことである。

その他の検討内容として、IAEA が公開した光核反応ライブラリ IAEA/PD-2019<sup>16)</sup>と他のライブラリとの比較について報告があった。検証には、1950 年代に実施された Barber

<sup>b</sup> ACER の入力では IFENG ではなく、IWT (weighting option)となっている。IFENG は ACE ファイル上での名称である。発表資料中では IFENG と記載されていることから、本稿では発表資料に合わせ、IFENG と記載する。なお、IFENG と IWT では一部で数値が異なっていることに注意する必要がある。IFENG と IWT の関係は次の通りである。IFENG=0(discrete)→IWT=1 (constant)、IFENG=1 (skewed)→IWT=0 (variable)、IFENG=2 (continuous)→IWT=2 (tabulated)

<sup>c</sup> IFENG=1(IWT=0)を用いると、角度中性子束分布がギザギザな分布となるなど、物理的におかしな分布となる場合がある<sup>15)</sup>。そのため、角度中性子束分布などのマイクロな物理量を計算したい場合には IFENG=0 の利用は避けるべきである。IFENG=2(IWT=2)はこの問題を解決するために作られた新しいデータ格納形式であり、最新のモンテカルロ計算コードで広く採用されている。なお、本発表では記載がないが、IFENG=0(IWT=1)は実効増倍率などのマクロな物理量でも IFENG=2 と有意な差異が見られるなど、非常に問題のあるデータ格納形式である。そのため、IFENG=2 に対応していないモンテカルロコードを用いる場合でも IFENG=0 の利用は避け、IFENG=1 とするべきである。

<sup>d</sup> NJOY2016 や FRENDDY Ver.2.00 では、デフォルトオプションは IFENG=1(IWT=0)としている。しかし、このように IFENG の違いが核計算に影響を与えることから、FRENDDY Ver.2.01 からはデフォルトオプションを IFENG=2(IWT=2)に変更した。

氏と George 氏による実験<sup>17)</sup>と、1970 年代に実施された Swanson 氏の実験<sup>18,19)</sup>を用いた。その結果、IAEA/PD-2019 を用いることで Fe ターゲットの実験で大幅な改善がみられることが分かった。

### 3.2 Impact (or Not) on k calc for Selected TSLs with an Enhanced NJOY/THERMR egrid

NJOY2012 の開発者であり、元 LANL の A. C. Kahler 氏から熱中性子散乱則の処理において、入射エネルギー点数の違いが核計算に与える影響について報告があった。NJOY では、データ容量の削減の観点から、熱中性子散乱則の処理の際に入射エネルギー点を固定して計算を行っている。例えば、NJOY2016 では 118 点の入射エネルギー点において、断面積と二次エネルギー・角度分布を計算し、その間の断面積を 5 次のラグランジュ補間で計算している。

この NJOY の固定入射エネルギー点数については、以前から批判があり、計算精度を向上させるためにはより多くの入射エネルギー点が必要であるとの指摘があった<sup>20,21)</sup>。FRENDY でも、入射エネルギー点数を増やしており、この入射エネルギー点の違いにより、NJOY と FRENDY で H in ZrH の断面積分布に差異があることを筆者が以前の IAEA の技術者会合にて報告した<sup>22)</sup>。LANL でもこの入射エネルギー点数が十分ではないとの認識を持っており、本発表では、ENDF/B-VIII.0 の H in ZrH と H in H<sub>2</sub>O において、従来の 118 点と、従来の 118 点から各エネルギー点の間に等エネルギー間隔にエネルギー点を 3 点増やした 469 点の二つのケースで ACE ファイルを生成し、核計算に与える影響を調査した。その結果、H in ZrH で最大で 40pcm 程度の差異が、H in H<sub>2</sub>O で最大で 15pcm 程度の差異があることが分かった。

また、前節の D. H. Kim 氏の発表と同じく、H in ZrH の処理において、EMAX を変えた際の、核計算に与える影響についても調査した。その結果、EMAX を 1.855 eV から 10 eV に変えることで、最大で 70pcm 程度の差異があることが分かった。ここで、1.855 eV は LANL が公開している ENDF/B-VIII.0 の TSL ライブラリである LANL ENDF80SaB2 ライブラリ<sup>6)</sup>の上限エネルギーである。

なお、今回の計算はあくまで試算であり、NJOY の修正については現在検討中との説明があった。

### 3.3 Recent development of FRENDY

筆者から、2022 年 11 月に公開した FRENDY Ver.2.01 での変更点について報告した。本発表では、FRENDY Ver.2.01 で新たに実装した共鳴上方散乱<sup>23, 24)</sup>を考慮した多群断面積ファイル作成機能<sup>25)</sup>や二次ガンマ線の多群処理機能などについて紹介した。本発表に対

<sup>6)</sup> ENDF80SaB2 ライブラリは下記の URL からダウンロードすることができる。  
<https://nuclcardata.lanl.gov/ace/endf80sab2/>

し、共鳴上方散乱を考慮した多群断面積ファイル作成機能の具体的な処理方法や、本機能を発展させ、共鳴上方散乱を考慮した ACE ファイル作成が出来ないかといった質問があり、今後本機能の実装について検討したいと回答した。また、FRENDY の入力形式は簡易で使いやすいとのコメントがあるなど、FRENDY の利用が広がっていることを実感した。

### 3.4 ACEMAKER recent development and future work

IAEA の D. L. Aldama 氏より、PREPRO<sup>26)</sup>と繋げて評価済み核データファイルから ACE ファイルを生成する ACEMAKER の最近の進捗について報告があった。ACEMAKER は MIT ライセンス準拠のオープンソースソフトウェアで、IAEA/NDS(Nuclear Data Section) の Github<sup>f</sup>からダウンロードすることが出来る。ACEMAKER は中性子入射だけでなく、Dosimetry、熱中性子散乱則及び光核反応の処理に対応している。

本発表では、ACEMAKER 上の各処理の最近の修正点について紹介があった。最近は特に光核反応の処理機能の改良に力を入れているとの報告があった。光核反応の様々な処理を修正しており、いくつかの NJOY の処理上の問題点を解決したとの紹介があった。

### 3.5 Medical radioisotope uses of IAEA PD2019

Rensselaer 工科大の D. Fritz 氏より、IAEA/PD2019 を用いて医療用放射性同位元素である Ac-225、Cu-67、Tc-99m の生成実験の解析について紹介があった。光核反応で Ta-181 ターゲットから出てくる二次中性子束分布の解析結果と実験結果を比較すると、3.5 MeV 以上で中性子束に差異が見られることが分かった。この差異を低減させるため、IAEA/PD2019 の二次粒子の角度分布の非等方性を正確に取り扱うための MCNP の修正を行っているとの説明があった。

### 3.6 Serpent and nuclear & atomic data

VTT の V. Valtavirta 氏より、Serpent の特徴と感度解析及び TALYS<sup>27)</sup>と組み合わせたランダムサンプリングを用いた不確かさ解析など、連続エネルギーモンテカルロ計算コード Serpent の最近の開発状況について紹介があった。なお、特に新しい機能の説明などは無かったことから、本発表の詳細については省略する。本発表の詳細については、発表資料をご確認頂きたい。

また、2023 年から 2028 年までの 6 年の SAFER2028 と呼ばれる核廃棄物管理に関する中長期計画が開始しており、SAFER2028 における Serpent の研究内容について紹介があった。SAFER2028 での Serpent の研究内容としては、核データの不確実性の伝播と VTT で

---

<sup>f</sup> <https://github.com/IAEA-NDS/ACEMAKER>

の核データの処理、検証、および簡素化がある。この内、核データの不確実性の伝播は主に使用済み核燃料の地層処分時の崩壊熱を取り扱うことを計画している。また、VTTでの核データの処理、検証および簡素化については SYNTY Project として、VTT で整備している炉心解析フレームワーク Kraken<sup>28)</sup>を利用する予定であるとの説明があった。

### 3.7 New functions of GRUCON 2022 and the results of verification

NRC クルチャトフ研究所の V. V. Sinita 氏より、核データ処理コード GRUCON-2022 で実装された新しい機能とその検証結果について紹介があった。GRUCON は NRC で長年に渡って開発されている核データ処理コードであり、2021 年から IAEA/NDS の HP より公開されている<sup>‡</sup>。なお、発表資料中には GRUCON-2022 は 2022 年中に公開予定との記載があるが、2023 年 3 月の時点でも公開されていない。

GRUCON-2022 では、(1) 干渉性弾性散乱と非干渉性弾性散乱が混合した新しい熱中性子散乱則データの取り扱い、(2) 共鳴上方散乱を考慮した ACE ファイルの生成<sup>29)</sup>、(3) 核発熱断面積計算の三点が主に追加されている。(1)、(3)の検証のため、GRUCON-2022 と NJOY の処理結果の比較を行い、NJOY とよく一致することを確認した。また、(2)の検証として、Mosteller によって提案された燃料ピンセル体系におけるドップラー反応度係数ベンチマーク問題<sup>30)</sup>の解析を行い、共鳴上方散乱モデルの有無で有意な差異が得られることを確認した。

### 3.8 Status and prospects of NJOY2016 and the NJOY modernisation

LANL の W. Haack 氏より、NJOY2016 の改訂状況について報告があった。まず、NJOY2016 と NJOY21 の LANL での扱いの変更について報告があった。以前の報告では、NJOY2016 は近い内に開発を終了し、NJOY21 に移行する予定との説明を行ってきた。しかし、今後は NJOY2016 を製品版として扱うとの報告があった。なお、発表の後半では、NJOY21 による共鳴パラメータの処理などの説明があったことから、NJOY21 の開発が完全に停止したわけではないようである。

2022 年 12 月の段階での NJOY2016 の最新版は 2022 年 9 月に公開された NJOY2016.68 となっている。また、今後は三カ月おきに改訂版を公開していく予定である。現在の主な開発目的は、2024 年に公開予定の ENDF/B-VIII.1 の処理である。ENDF/B-VIII.1 では、前節の GRUCON の開発でも紹介のあった干渉性弾性散乱と非干渉性弾性散乱が混合した新しい熱中性子散乱則データ、光核反応データの改善、新しい R 行列形式の共鳴パラメータの採用などが予定されており、これらの新しい核データを取り扱うための修正が行われている。

---

<sup>‡</sup> GRUCON のパッケージ及びマニュアルは下記の HP からダウンロードできる。  
<https://www-nds.iaea.org/grucon/>

また、発表では、ENDF形式のデータを取り扱う ENDFtk や ACE 形式のデータを取り扱う ACEtk の開発状況についても報告があった。特に特筆するような更新は無いが、興味がある方は発表資料を確認して頂きたい。

### 3.9 Processing files with LRF 7 option for the reconstruction of the MF 4, pros and cons

マドリード工科大の O. Cabellos 氏から、共鳴パラメータから計算した角度分布と、核データの MF=4 に収録されている角度分布を比較した結果について報告があった。

共鳴パラメータは通常、断面積しか計算することが出来ないが、LRF=7 で与えられる R-matrix Limited 形式の共鳴パラメータでは、断面積だけでなく、角度分布を生成することができる。NJOY2016 では、デフォルトでは角度分布の計算を行わないようになっているが、reconr.f90 の Want\_SAMRML\_RM=false. を Want\_SAMRML\_RM=true. とすることで、角度分布を計算することができる。

本発表では、FENDL-3.2 の Fe-56 を対象に、EXFOR<sup>31)</sup>の実験データと、共鳴パラメータから計算した角度分布、評価済み核データの MF=4、MF=6 に記載されている角度分布を比較した。その結果、共鳴パラメータから計算した角度分布では、一部のエネルギー・角度で物理的におかしな結果となることが分かった。また、EXFOR の実験データと比較すると、核データに収録されている角度分布の方がおかしな分布となっている場合もあり、常に核データに収録されている角度分布が正しいとは言えないことが分かった。

なお、質疑応答では、発表内容ではなく、そもそも共鳴パラメータを使って角度分布を生成することが適切なかどうかについて議論が白熱した。核データ評価者としては、共鳴パラメータを使って角度分布を計算することを想定していないため、共鳴パラメータを用いて角度分布を計算することは不適切であるという意見と、共鳴パラメータから角度分布を計算することで、断面積の評価と一貫した角度分布が得られるのではないかという意見に分かれ、結論が得られなかった。

仮に核データ評価者が意図していなかったとしても、ユーザーが簡単に角度分布を計算することができるので、今後も同様の検討が行われていくことが予想される。そのため、著者としては、共鳴パラメータから計算された角度分布をどう取り扱うか、については議論を深める必要があると考えている。

### 3.10 Fe-56 doppler broadening

元 LLNL の D. E. Cullen 氏から、ENDF/B-VIII.0 の Fe-56 では高エネルギー領域において、非常に細かい共鳴パラメータが見られるが、このような細かな共鳴はおかしいのではないかと指摘があった。発表資料では、0.7 MeV~1.0 MeV の範囲の共鳴について示しているが、特に 0.9 MeV~1.0 MeV の範囲内において、各共鳴の間に非常に細かな振動が見られる。これらの非常に細かな振動が核計算等に与える影響はほとんどないものの、

核データとしては適切ではないため、修正が必要なのではないかとのことである。

### 3.11 Doppler broadening overview

元 LLNL の D. E. Cullen 氏から、各国の核データ処理コードの処理結果の比較について報告があった。今回対象としたのは、0K の Cu-63 と 293.6K 及び 600K の U-235 と U-238 で、いずれも ENDF/B-VIII.0 のデータを用いた。なお、Cu-63 は ENDF/B-VIII.0 の Cu-63 から共鳴パラメータを一部修正したものとなっており、この修正した影響をちゃんと考慮できるかが、一つの注目点となっている。

D. E. Cullen 氏が開発している PREPRO と各機関の核データ処理コードの処理結果を比較した。本発表では具体的な核データ処理コードの名前の説明はなかったものの、一部の処理コードで処理上の問題点があることが明らかになった。なお、FRENDY については PREPRO とよく一致しており、処理上の問題点がないことを確認している。

### 3.12 その他の発表

発表資料は公開されていないものの、その他の発表として、GAIA-2、AMPX 及び FUDGE の開発状況についての報告があった。

IRSN では NJOY2016.35 のラッパーである GAIA1.3 を主に用いており、GAIA2 の開発は複数の博士論文の研究テーマとなっている。例えば、共鳴再構成とドップラー拡がりの処理機能の開発を G. Ferran 氏の博士論文のテーマ<sup>32)</sup>に、確率テーブルの作成を C. Jeannesson 氏の博士研究テーマ<sup>33)</sup>としている。また、関連した研究内容として、TSL の評価に関する研究を V. Jaiswal 氏の博士研究テーマ<sup>34)</sup>として実施した。GAIA2 の開発は今後も進めていく予定で、ACE ファイルの生成機能や核発熱計算機能の開発を進めていく予定とのことである。

AMPX は開発チームの人員が変更となり、AMPX の開発者が D. Wiarda 氏から J. McDonnell 氏に変更になったとの報告があった。D. Wiarda 氏は今後は SAMMY<sup>35)</sup>の開発を主導するとのことである。また、AMPX が Github から公開になった<sup>h)</sup>との報告があった。ただし、公開されている AMPX は β 版であり、安定版については引き続き SCALE と一緒に公開するとのことである。AMPX の開発状況として、新しい核データフォーマットである GNDS<sup>36)</sup>への対応状況と、干渉性弾性散乱と非干渉性弾性散乱が混合した新しい熱中性子散乱則データへの対応について報告があった。GNDS への対応として、現在は JSON ファイル形式の GNDS データに対応するための Python プログラムを開発中とのことである。

---

<sup>h)</sup> AMPX は下記の URL から入手可能である。  
<https://code.ornl.gov/scale/code/scale-public/>

#### 4. 終わりに

前回はコロナ禍であったこともあり、欧州からの参加者以外は対面形式での参加が認められていませんでした。今回は欧州がウィズコロナの体制に移行したこともあり、欧州以外からの参加者も対面形式での参加が可能となりました。私も対面形式での参加を打診されたものの、現地の状況が分からなかったため、オンライン形式での参加としました。そのため、どのくらいの参加者が対面形式を選択するのか、非常に興味を持っていました。1章に記載しました通り、欧州以外からも対面形式で参加している方がおり、徐々にコロナ禍以前の状況に戻りつつあることが実感できました。オンライン形式での会議は気軽に参加できるという良い面があるのは確かですが、発表に関する深い議論をしたり、個人的な相談をしたりするには対面形式での会議の方が優れている部分もあると考えています。そのような深い議論を行うためにも、今後は対面形式での会議が増えてくれることを期待しております。

また、今回の核データ処理コード間の比較では、線形化処理やドップラー拡がりの処理といった非常に基本的な処理結果の比較にも関わらず、核データ処理コード間で差異が見られることが分かりました。このことは一つの核データ処理コードに依存することの危険性を示すものだと思います。そのため、核データ処理コードの妥当性や信頼性を向上させるためには、複数の独立した核データ処理コードが必要になります。本会合での処理結果の比較を通じ、独立検証のための FRENDY の重要性を再認識することができました。核データ処理の妥当性や信頼性向上に寄与するため、今後も FRENDY の開発を進めていきたいと考えておりますので、引き続きご支援のほど、よろしくお願いいたします。

#### 5. 参考文献

- [1] K. Tada, Y. Nagaya, S. Kunieda, et al., "Development and verification of a new nuclear data processing system FRENDY," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **54**, pp.806-817 (2017).
- [2] INDC(NDS)-0870 で発行予定
- [3] A. C. Kahler, "The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 2016," *LA-UR-17-20093*, LANL (2017).
- [4] B.R. Beck, "Fudge: A Program for Performing Nuclear Data Testing and Sensitivity Studies", *AIP Conf. Proc.*, **769**, p.503 (2004).
- [5] N.M. Greene, "The AMPX-2000 Operating System for Producing Continuous Energy and Multi-Group Cross Sections from Basic Data Libraries Using the ENDF/B-6 Formats", *Proc. ND2001*, (2001).
- [6] R. Ichou, C. Jeannesson, W. Haeck, "Feedback on JEFF-3.3 Processing with GAIA 1.1," *JEFFDOC 1930*, OECD, Paris, France (2018).
- [7] V. V. Sinitisa, A. A. Rineiskij, "GRUKON - A Package of Applied Computer Programs System



- Input and Operating Procedures of Functional Modules," *INDC-CCP-344*, IAEA (1993).
- [8] D. L. Aldama, "ACEMAKER-2.0 A code package to produce ACE-formatted files for MCNP calculations," *IAEA-NDS-223 Rev.4*, IAEA (2021).
- [9] D. A. Brown, M. B. Chadwick, R. Capote, et al., "ENDF/B-VIII.0: The 8th major release of the nuclear reaction data library with CIELO-project cross sections, new standards and thermal scattering data", *Nucl. Data Sheets*, **148**, pp.1-142 (2018).
- [10] Jr., S. Swaminarayan, J. E. Sweezy, S. C. Wilson, et al., "MCNP Code Version 6.3.0 Release Notes," *LA-UR-22-33103, Rev. 1.* (2023).
- [11] J. Leppänen, M. Pusa, T. Viitanen, et al., "The Serpent Monte Carlo Code: Status, Development and Applications in 2013," *Ann. Nucl. Energy*, **82**, pp.142-150 (2015).
- [12] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, et al., "Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.0," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **55**, pp.684-690 (2018).
- [13] J. L. Conlin, "A Compact ENDF (ACE) Format Specification," *LA-UR-19-29016*, LANL (2019).
- [14] International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, *NEA/NSC/DOC(95)/03*, OECD-NEA, Paris, France (2018).
- [15] J. L. Conlin, D. K. Parsons, F. B. Brown, et al., "Continuous-S( $\alpha$ ,  $\beta$ ) Capability in MCNP," *LA-UR-12-00155*, LANL (2012).
- [16] T. Kawano, Y. S. Cho, P. Dimitriou, et al., "IAEA Photonuclear Data Library 2019," *Nucl. Data Sheets*, **163**, pp.109-162 (2020).
- [17] W. C. Barber and W. D. George, "Neutron Yields from Targets Bombarded by Electrons," *Physical Review*, **116** pp.1551-1559 (1959).
- [18] W. P. Swanson, "Calculation of Neutron Yields Released By Electrons Incident On Selected Materials," *Health Physics.*, **35**, pp.353-367 (1978).
- [19] W. P. Swanson, "Improved Calculation of Photo-Neutron Yields Released By Incident Electrons," *Health Physics.*, **37**, pp.347-358 (1979).
- [20] A. Yamamoto, N. Sugimura, "Improvement on multi-group scattering matrix in thermal energy range generated by NJOY," *Ann. Nucl. Energy*, **33**, pp. 555-559 (2006).
- [21] J. L. Wormald, J. T. Thompson, T. H. Trumbull, "Implementation of an adaptive energy grid routine in NDEX for the processing of thermal neutron scattering cross sections," *Ann. Nucl. Energy*, **149**, p. 107773 (2020).
- [22] [https://www-nds.iaea.org/index-meeting-crp/TM-NDP-2021/doc/Tada\\_IAEA\\_TM\\_20211018-21\\_ver2.0.pdf](https://www-nds.iaea.org/index-meeting-crp/TM-NDP-2021/doc/Tada_IAEA_TM_20211018-21_ver2.0.pdf)
- [23] D. Lee, K. Smith, J. Rhodes, "The impact of 238U resonance elastic scattering approximations on thermal reactor Doppler reactivity," *Proc.PHYSOR-2008*, Interlaken, Switzerland (2008).

- [24] T. Mori, Y. Nagaya, "Comparison of Resonance Elastic Scattering Models Newly Implemented in MVP Continuous-Energy Monte Carlo Code," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **46**, pp.793-798 (2009).
- [25] A. Yamamoto, T. Endo, G. Chiba, et al., "Implementation of Resonance Upscattering Treatment in FRENDY Nuclear Data Processing Systems," *Nucl. Sci. Eng.*, **196**, pp. 1267-1279 (2022).
- [26] D. E. Cullen, "PREPRO 2021 2021 ENDF/B Pre-processing Codes," *IAEA-NDS-0238*, IAEA (2021).
- [27] A. J. Koning, S. Hilaire, M. C. Duijvestijn, "TALYS-1.0," *Proc. ND2007* (2007).
- [28] V. Valtavirta, V. Hovi, H. Loukusa, et al., "KRAKEN – An Upcoming Finnish Reactor Analysis Framework," *Proc. M&C 2019*, Portland, USA, 2019.
- [29] A.S.Listov, M.R.Malkov, V.V.Sinitsa, et al., "The influence of resonance scattering to Doppler reactivity coefficient," *Proc. AtomFuture-2017* (2017).
- [30] R. D. Mosteller, "Computational Benchmarks for the Doppler Reactivity Defect," *LA-UR-06-2968*, LANL (2006).
- [31] N. Otsuka, E. Dupont, V. Semkova, et al., "Towards a More Complete and Accurate Experimental Nuclear Reaction Data Library (EXFOR): International Collaboration Between Nuclear Reaction Data Centres (NRDC)," *Nucl. Data Sheets*, **120**, pp.272-276 (2014).
- [32] G. Ferran, "Advanced methods for processing nuclear data," *PhD. Theses*, IRSN (2014).
- [33] C. Jeannesson C, L. Leal, C. Jouanne, et al., "Unresolved resonance range processing and probability tables generation in the GAIA2 system," *EPJ Web Conf.*, 2020;239:10001. (2020)
- [34] V. Jaiswal, "Theoretical and Experimental Approach Towards Generation of Thermal Scattering Law for Light Water," *PhD. Theses*, IRSN (2018).
- [35] N. M. Larson, "Updated Users' Guide for SAMMY: Multilevel R-Matrix Fits to Neutron Data Using Bayes' Equations," *ORNL/TM-9179/R8*, ORNL (2008).
- [36] C. M. Mattoon, B. R. Beck, N. R. Patel, et al., "Generalized Nuclear Data: A New Structure (with Supporting Infrastructure) for Handling Nuclear Data," *Nucl. Data Sheets*, **113**, pp.3145-3171 (2021).