

## 2015 年度核データ部会賞 奨励賞

### － 国産核データ処理コード FRENDY の開発 －

日本原子力研究開発機構  
炉物理標準コード研究グループ  
多田 健一  
tada.kenichi@jaea.go.jp

#### 1. はじめに

著者は、日本原子力学会 2015 年秋の大会において「国産核データ処理コード FRENDY の開発」に対して 2015 年度核データ部会賞 奨励賞を受賞した。本稿では、核データ部会賞を受賞した当該研究の概要について紹介する。

#### 2. FRENDY 開発の背景

我が国では、国の総合研究機関として位置づけられる原子力機構において、評価済み核データライブラリ JENDL-4.0[1]、そして SRAC[2]や MARBLE2[3]、MVP[4]、PHITS[5]などの輸送計算コードを長年に渡って整備してきた。これらは国内の大学やメーカーにおいて広く利用されている。

しかし、核データライブラリと輸送計算コードを繋ぐ核データ処理については、NJOY[6]や PREPRO[7]など、外国産の核データ処理コードを利用してきた。NJOY は公開コードであり、それが完璧に動作するのであれば問題にはならない。しかし、NJOY による JENDL の処理は問題が生じる事が多く、その場合に必要となる NJOY に対する修正は、決してタイムリーに行われる事は無かった。そして、JENDL の新バージョンがリリースされる時には核データが処理できないという問題に直面し、処理できたとしても計算結果に問題があり、調べて見たらその根本原因が NJOY にあった、という事を繰り返してきた。

さらに、数年前に MCNP[10]のソースコードが非公開になり関係者に衝撃が走ったことは記憶に新しいが、諸外国の輸出規制によって、新しいコードが入手不可能になる、もしくは実行ファイルのみの配布になり、従来のような対応が出来なくなることが懸念され

ている。実際、NJOY の最新バージョンである NJOY2012[9]ではソースの改変が認められておらず、今後 JENDL が新しくリリースされた時に適切に処理出来ない恐れがある。

このように、核データ処理という核データと炉物理の境界にある重要製品の国産化は、まさに喫緊の課題として長きにわたって認知されてきた。

また現在、従来の ENDF フォーマット[10]から XML 形式の新しい核データフォーマット GND[11]へと核データフォーマットを一新することが検討されている。従来の核データ処理コードは ENDF フォーマットと強く結びついており、GND のような全く新しい核データフォーマットに対応するためには、根本的に作り直す必要がある。

このような状況下で、原子力機構では従来の ENDF フォーマットだけではなく、新しい GND フォーマットにも対応可能な、国産の核データ処理コード FRENDY (FRom Evaluated Nuclear Data librarY) の開発を進めている[12-15]。

### 3. FRENDY の概要及び特徴

FRENDY は核データ処理コードのデ・ファクトスタンダードと言える既存の NJOY の処理機能の多くを包含した上で、その処理の問題点を発見・解決し、さらに高精度な処理を可能とするために開発されつつある、純国産核データ処理コードである。

FRENDY は、オブジェクト指向プログラミングの手法に基づいて開発されており、従来の FORTRAN を使用した核データ処理コードでは非常に困難であった、核データフォーマットに依存しない核データ処理を実現している。また、Git を用いたバージョン管理や、テストケースを用いたソースコードの管理など、プログラムの保守性や品質を大幅に向上させている。このように FRENDY では将来の拡張性・保守性も見据えた開発を行っており、今後我が国の輸送計算コードの基礎をなすモジュールの一つとして利用される事が期待される。

また、国内でのユーザー数を増やす取り組みとして、JENDL 委員会核データ処理プログラム WG 経由でユーザーのニーズを聞き、FRENDY 開発に逐一反映している。例えば、ユーザーの既存のシステムを活用し、最小限の労力で FRENDY へ移行するために、NJOY と同一の入力で処理できるようにして欲しいという要望があった。そこで FRENDY では、NJOY と同一の入力で計算を実現すると同時に、FRENDY 独自の入力形式として、核データファイル名や温度など、必要最低限の情報のみを入力するだけで核データライブラリが作成できるようにしていく予定である。

図 1 に FRENDY の構造を示す。図中の青字で書かれた部分は開発済みの機能であり、赤字の部分は現在開発中の機能を示している。図 1 に示すように、FRENDY では NuclearDataObject という FRENDY 独自の内部用データ形式に変換した上で、処理を行う形を取っている。そのため、核データフォーマットの違いが FRENDY の核データ処理の機能に影響を与えることはなく、核データフォーマットが ENDF-6 フォーマットから GND フォーマットへと変化した場合でも、読み書き (Parser/Writer) の機能と

NuclearDataObject へのデータ変換 (Converter) の機能を追加するだけで従来の核データフォーマットと同様に核データを処理できる構造になっている。

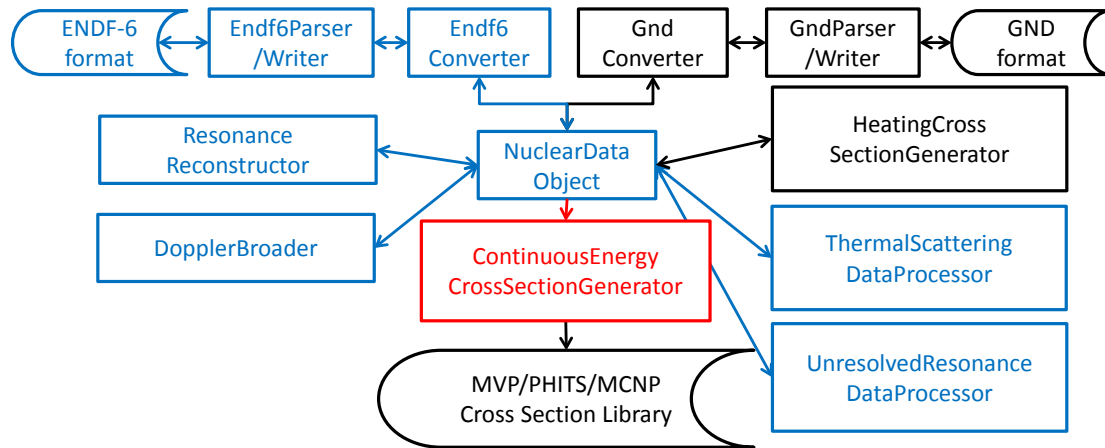


図 1 FRENDY の構造

#### 4. FRENDY の処理例

FRENDY の処理例として、ドップラー拡がりの処理について示す。

図 2 に JENDL-4.0 の  $^{238}\text{U}$  の弾性散乱断面積 (MT=2) を 0K から 300K に温度を変化させた場合の、FRENDY と NJOY99 の処理結果を示す。図中では、NJOY99 の線が見えないが、これは FRENDY と NJOY99 でほとんど差異がないため、FRENDY の線と重なっていることが要因である。図 2 に示すとおり、FRENDY の処理結果は NJOY99 の処理結果とほぼ一致していることが分かる。しかし、 $1.0 \times 10^{-3} \text{ eV}$  以下のエネルギー領域において、やや差異が見られることが分かった。

これは、FRENDY と NJOY99 での 0eV の断面積の取り扱いの違いが要因である。低エネルギー領域では、ドップラー拡がりの計算に 0 eV の断面積が必要になる。しかし、一般的な核データライブラリでは、最小エネルギーは  $1.0 \times 10^{-5} \text{ eV}$  となっており、0 eV の断面積は用意されていない。そのため、核データ処理コードの内部で、0 eV の断面積を計算する必要がある。NJOY では、全ての断面積が  $1/\nu$  則に従うと仮定して、0 eV の断面積を計算している。この仮定は吸収断面積のように  $1/\nu$  則に従う断面積では適切だが、弾性散乱断面積など  $1/\nu$  則に従わない断面積については物理的に不正確な仮定となっている。それに対し、FRENDY では断面積が一次関数状に変化すると仮定し、直線外挿で 0 eV の断面積を計算することとした。この 0 eV の取り扱いの違いが、図 2 のように低エネルギー領域の弾性散乱断面積で差異が見られる要因である。 $1/\nu$  則に従う吸収断面積においてドップラー拡がりの処理を行う時に、この直線外挿を用いる場合と  $1/\nu$  則に従うと仮定して処理を行う場合とで処理結果に差異が見られなかったことから、FRENDY の処理は適切であることを確認している。

このように、FRENDY では、NJOY と同様の処理が出来るだけでなく、NJOY の処理上の問題点を把握し解決することで、より高い精度での処理を行うことを目指し開発を進めている。

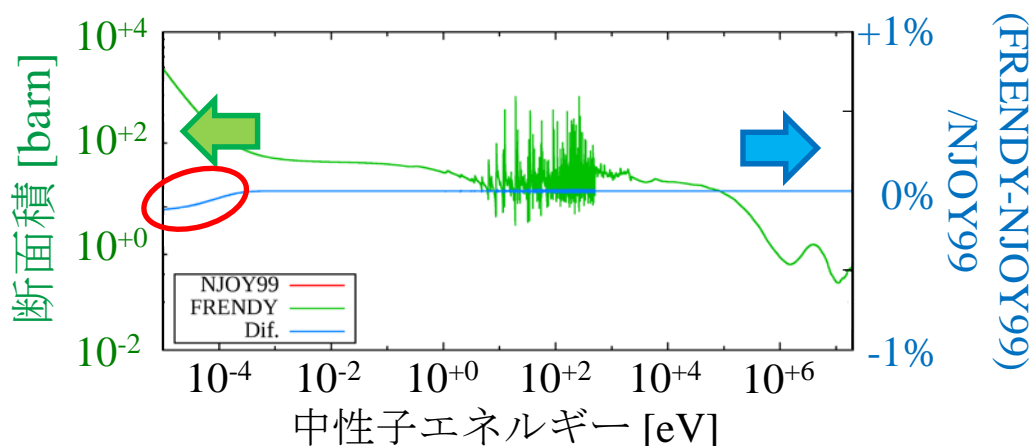


図2 FRENDY と NJOY99 でのドップラー拡がりの処理結果比較  
(JENDL-4.0 の  $^{238}\text{U}$  の弾性散乱断面積を 0K から 300K に変化させた場合の比較)

## 5. まとめ

原子力機構では、著者を中心として国産核データ処理コード FRENDY の開発を進めている。本資料では、FRENDY の開発背景及び概要について説明した。

今後は MVP、PHITS 及び MCNP などの連続エネルギーモンテカルロコード用の断面積ライブラリ作成機能を実装した上で、作成したライブラリを利用した核計算を通じた検証を実施する。また、FRENDY の公開に向けたマニュアル作成などを同時に進めていく予定である。

## 謝辞

著者は原子炉物理に関係するコードの開発を専門としていたものの、断面積ライブラリありきの世界にいたため、核データ処理については十分な知見を有していませんでした。そのような著者の初歩的な質問への対応を含め、本コードの開発を支援して下さい、日本原子力研究開発機構炉物理標準コード研究グループ及び核データ研究グループのメンバーの皆様に感謝いたします。

また、ユーザーの立場から貴重なご意見・ご指摘をして下さる JENDL 委員会核データ処理プログラム WG の関係者の皆様に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, N. Iwamoto, A. Ichihara, S.Chiba, K. Furutaka, N.

- Otuka, T. Ohsawa, T. Murata, H. Matsunobu, A. Zukeran, S. Kamada, J. Katakura, "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering," *J. Nucl. Sci. Technol*, **48**, [1], pp.1-30 (2011).
- [2] Keisuke Okumura, Teruhiko Kugo, Kunio Kaneko and Keichiro Tsuchihashi, "SRAC2006 : A Comprehensive Neutronics Calculation Code System, " *JAEA-Data/Code 2007-004* (2007).
- [3] K. Yokoyama, M. Tatsumi, Y. Hirai, H. Hyoudou, K. Numata, T. Iwai, T. Jin, T. Hazama, Y. Nagaya, G. Chiba, T. Kugo, M. Ishikawa, "Development of the Next Generation Reactor Analysis Codes System, MARBLE," *JAEA-Data/Code 2010-030* (2010).
- [4] Y. Nagaya, K. Okumura, T. Mori, M. Nakagawa, "MVP/GMVP II: General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods," *JAERI-1348* (2004).
- [5] H. Iwase, K. Nitta, T. Nakamura, "Development of general-purpose particle and heavy ion transport Monte Carlo code," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **39**, pp.1142-1151 (2002).
- [6] R. E. MacFarlane, D. W. Muir, "The NJOY Nuclear Data Processing System Version 91," *LA-12740-M* (1994).
- [7] D. E. Cullen, "PREPRO 2012, 2012 ENDF/B Pre-processing Codes (ENDF/B-VII Tested)," *IAEA-NDS-39*, Rev.15 (2012).
- [8] A. Trkov, M. Herman, D. A. Brown, "ENDF-6 Formats Manual," *BNL-90365 2009 Rev.2*, pp.323-354 (2011).
- [9] D. W. Muir, R. M. Boicourt, A. C. Kahler, "The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 2012," *LA-UR-12-27079*, (2012).
- [10] C. M. Mattoon, B. R. Beck, N. R. Patel, N. C. Summers, G. W. Hedstrom, Generalized Nuclear Data:A New Structure (with Supporting Infrastructure) for Handling Nuclear Data, *Nuclear Data Sheets*, **113**(12), pp. 3145–3171 (2012).
- [11] X-5 Monte Carlo Team, "MCNP –A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 Volume 1: Overview and Theory," *LA-UR-03-1987* (2003)
- [12] 須山賢也、「NJOY 代替コード開発の方向性」、日本原子力学会炉物理部会、炉物理の研究 第 66 号 (2014)
- [13] 多田健一、長家康展、「国産核データ処理システム FRENDY の開発(1) 断面積再構成及びドップラー拡がりの処理」、日本原子力学会 2014 年春の年会、O22 (2014)
- [14] 多田健一、長家康展、「国産核データ処理システム FRENDY の開発(2) 熱中性子散乱断面積の処理」、日本原子力学会 2015 年春の年会、J08 (2015)
- [15] 多田健一、長家康展、「国産核データ処理システム FRENDY の開発(3) 非分離共鳴領域の確率テーブル作成」、日本原子力学会 2016 年春の年会 (2016)