

<原子力学会賞受賞記念寄稿>

純国産次世代核データ処理コード FREN DY の開発

日本原子力研究開発機構 (JAEA)

多田 健一

1. はじめに

この度は、第 50 回日本原子力学会賞特賞技術賞を受賞し、炉物理部会報に記念寄稿する機会をいただきましたことを大変光栄に感じています。過去の寄稿文を読みましたところ、受賞した研究概要について記載している方が多いのですが、部会報担当者の方から自由に書いてよいとお許しを頂きましたので、次世代核データ処理コード FREN DY^[1]開発の経緯について、小説風に書きたいと思います。なお、本資料は核データ処理や FREN DYに興味をもってもらうことを重視しているため、技術的な話はほとんど書いていません。核データ処理の参考資料については Appendix にまとめましたので、核データ処理について興味を持った方はそちらをご参照下さい。

2. 核データ処理とは？

さて、読者の皆さんは核データ処理と聞いてピンと来るでしょうか？ 恥ずかしながら私は JAEA に来るまでほとんど知りませんでした。私は学生時代から主に炉心解析コードの高度化^[2-5]に携わっており、“核データ”と言えば 10 群程度に多群化された断面積ライブラリ³という認識で、処理後の断面積ライブラリが用意されているのが当たり前であり、核データ処理前の評価済み核データライブラリに意識を向けることはありませんでした。炉物理夏期セミナーテキスト^[6-7]で核データ処理や実効断面積の作り方などの説明を読んでもこういうことをしているんだというような漠然とした認識しかありませんでした。

ただ、実は私が学部 4 年生で研究室に入ってすぐに指導教官の先生からデータ読み取りツールの作成を頼まれて、それが JENDL⁴から核データ処理に必要なデータを入手するツールであったので、本人が認識していないだけで核データ処理にはかなり早い段階か

1 「次世代」に共通した認識がある訳ではありませんが、ここでは核データフォーマットの変更に対応できるなど、拡張性を考慮し、オブジェクト指向言語で記述された核データ処理コードを次世代核データ処理コードと呼んでいます。

2 FFrom Evaluated Nuclear Data libraryY to any application

3 JENDL や ENDF の公式 HP からダウンロードできる各核種の核データを評価済み核データファイル(または核データファイル)、それらを一つにまとめたものを評価済み核データライブラリ(または核データライブラリ)と呼んでいます。ここでは、断面積ライブラリは MVP や MCNP が計算に利用できる形に変換したものを指し、評価済み核データファイル、評価済み核データライブラリとは明確に区別します。

4 Japanese Evaluated Nuclear Data Library

ら関わってはいました。ただし、それに気づいたのは本当につい最近のことですが…。

炉物理夏期セミナーのテキストなどでは、炉心計算は一般的に図 1 のように実効断面積を計算するピンセル計算、集合体体系において炉心計算用の核定数を計算する集合体計算、全炉心計算の三段階で記述されることが多いです[8]。では核データ処理とは図 1 の中のどの過程を言うのでしょうか？答えは『ここには描かれていない』です。MVP⁵[9]やMCNP⁶[10]など、近年臨界性評価などで広く利用されている連続エネルギーモンテカルロ粒子輸送計算コードでは、コードのパッケージに断面積ライブラリが付属していることが多いです。粒子輸送計算コードの利用者の皆さんは研究発表などで当たり前のように「評価済み核データライブラリとして JENDL を使いました」とか、「JENDL と ENDF/B⁷の差が〇〇で」といったように仰っているかと思いますが、MVP や MCNP は JENDL や ENDF/B を直接読んでいる訳ではありません。

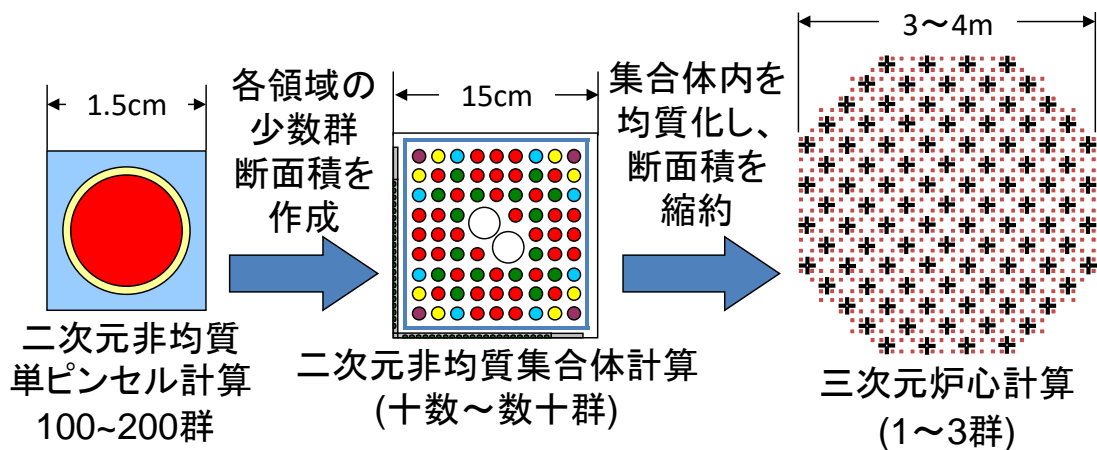


図 1 一般的な炉心計算の流れ

炉心計算でも、MVP や MCNP の計算でも、利用しているのは評価済み核データライブラリから粒子輸送計算コードが読むことができる形に変換した、断面積ライブラリです。核データ処理とは、この評価済み核データライブラリから断面積ライブラリに変換することを言います。データ変換と言えば zip ファイルに圧縮したり、画像ファイルのサイズを変えたり、画像形式を JPEG から PNG に変換したり、CD-R から MP3 にデータを取り込んだりとその変換が可逆的か不可逆的かはともかく、どのコードを使っても同じ処理を行う

⁵ Monte carlo code for Vector Processors

⁶ Monte Carlo N-Particle transport code

⁷ Evaluated Nuclear Data File version B の略。また、ややこしいのですが、ENDF/B は米国の評価済み核データライブラリの名前で、ENDF-6(Evaluated Nuclear Data File Version 6)という評価済み核データファイルのフォーマットを意味します。単に ENDF とだけ書かれた場合、文脈から評価済み核データライブラリなのかフォーマットなのかを判断する必要があります。なお、炉物理分野においては ENDF と言えば ENDF/B のことを指すことが一般的です。

ことが一般的です。核データ処理も決められた手順で決められた処理を行って評価済み核データライブラリから断面積ライブラリを作成していると想像している方が多いと思いますが、実際には違います。核データ処理は主に

1. 共鳴パラメータから断面積計算
2. 断面積の線形化
3. 温度依存の断面積の計算（ドップラー拡がりの処理）
4. 非分離共鳴領域の自己遮蔽効果の評価
5. 熱中性子散乱則から断面積を計算
6. 断面積ライブラリの形に合わせて評価済み核データファイルを変換

の6つのステップで構成されます[11-13]。この処理の流れはどの核データ処理コードでもほぼ同じですが、それぞれの処理で用いられている手法は異なります。

例えば1.では、共鳴パラメータから断面積を計算しますが、核データ処理コードでは、図2に示すように線形内挿で十分な精度で計算できるように細かくエネルギー点を取ります。この線形化においても、核データ処理コードによって「十分な精度」の解釈が異なります。共鳴パラメータから得られる断面積は主に全断面積、弾性散乱断面積、核分裂断面積、放射捕獲断面積の四種類ですが、これら全てを「十分な精度」になるまでエネルギー点を追加すると非常に多くのエネルギー点が必要になります。例えばエネルギーと断面積の一時配列のデータを粒子輸送計算コードで利用することを考えます。粒子輸送計算コードでは何度もあるエネルギーの断面積を読み取る必要がありますが、エネルギー点数が多くなればなるほど、データの検索時間も長くなります。このようにエネルギー点数は粒子輸送計算の計算時間に影響を与えます。そのため、粒子輸送計算の側からすれば、予測精度に影響を与えない範囲内でできるだけエネルギー点数を少なくすることが求められます。そこで核データ処理コードでは、全断面積に比べて十分に小さい断面積については「ある程度の精度」で打ち切るなど、様々な対策を行うことで、エネルギー点数の削減を図っています。このような対策は核データ処理コード開発者のノウハウや粒子輸送計算コードのニーズに依存する部分が大きく、核データ処理コードによって異なります。そのため、核データ処理コードによって線形化後のエネルギー点数は異なります。

このように核データライブラリから断面積ライブラリを作成する手法は厳密には決まっていません。そのため、核データ処理コードが異なればその処理結果である断面積ライブラリも変わってきますし、同じ核データ処理コードを使ったとしても、その入力によって断面積ライブラリは変わります。そのため、皆さんが当たり前のように「JENDLはこうでENDF/Bはこうだ」と仰っているその断面積ライブラリの違いは、もしかしたら評価済み核データライブラリの違いではなく、核データ処理コードや入力の違いが原因となっているかもしれないのです。

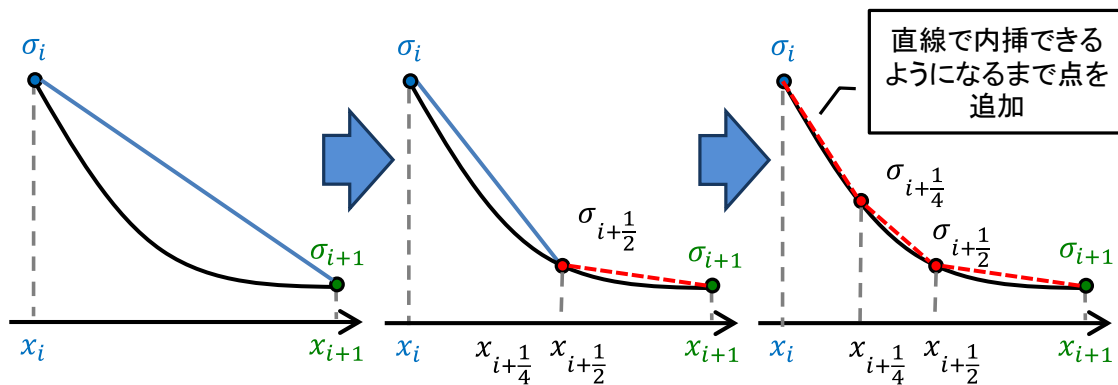


図2 断面積の線形化の例

3. 核データ処理コードのV&V

前章では、核データ処理コードや入力によって断面積ライブラリが変わる可能性があると述べました。では、核データ処理コードの妥当性検証(Verification & Validation, V&V)はどのようにやっているのでしょうか？

基本的には大元の評価済み核データファイルとの比較です。作成した断面積ライブラリから断面積や二次エネルギー分布、角度分布などを取り出し、評価済み核データファイルと比較することでその妥当性を確認します。しかし、核データ処理コードは評価済み核データファイルから単にフォーマットの変換を行っている訳ではないため、全てのデータを比較することはできません。そのため、評価済み核データファイルとの比較で見えてこない問題については、たとえ核データ処理コードが間違っていたとしても、見過ごされている可能性があるのです。もちろん、従来の核データ処理コードは世界的に広く利用されており、様々な解析に利用されていることから、致命的な問題については修正されていると考えられています。しかし、小さな問題については今でも多く見つかっています[14,15]。

では評価済み核データファイルとの比較以外の核データ処理コードの検証はどうやっているのでしょうか？残念ながら核データ処理コードの検証に関する資料はほとんどありません。何故なら最近まで一般的に利用できる核データ処理コードはロスアラモス国立研究所のNJOY⁸[16]とIAEAのPREPRO⁹[17]しかなかったからです。しかもMCNPで利用している断面積ライブラリの形式であるACE¹⁰ファイルはNJOYでしか処理できないなど、NJOYとPREPROでは作成できる断面積ライブラリの形式が異なっており、両者の処理結果を比較することもできませんでした。そのため、核データ処理コードのユーザーは長年に亘ってNJOYやPREPROは本当に正しく処理できているのだろうかという疑問を抱きつつ、半ばブラックボックスとして利用してきました。

もちろん、炉心解析コードのV&Vは重要であり、評価済み核データライブラリを核デー

⁸ 先代の核データ処理コードMINX (Multi-group Interpretation of Nuclear X-sections from ENDF/B)の頭文字を一文字ずつずらして命名したもので、略称ではありません。

⁹ The ENDF/B PRE-PROcessing codes

¹⁰ A Compact ENDF

タ処理した結果である断面積ライブラリについてはしっかりと V&V を実施してきています。そのため、核データ処理の検証も間接的には実施されてきました。従来は評価済み核データライブラリの持つ誤差が大きかったことから、核データ処理に問題があったとしても、それが明らかになることはありませんでした。しかし、近年の評価済み核データライブラリの高精度化に伴って、個々の誤差要因が詳細に分類されるようになり、核データ処理が要因の誤差についても注目が集まるようになってきました。例えば IAEA では、核データ処理コードの検証を目的として、各国の核データ処理コード間の比較を行っており、核データ処理コードの違いが臨界性に与える影響についての検討が進められています[18, 19]。

4. 核データ処理コードの国産化の問題点

それなら自分達で独自の核データ処理コードを作ればいいのではと考える方もいらっしゃると思います。実際、日本においても過去に独自の核データ処理コードを開発したこともありましたが[20]。また、近年になっても開発を希望する声はあったものの[21]、なかなか軌道に乗ることはありませんでした。それは核データ処理コード開発には高度な専門知識を必要とするにも関わらず、目に見える成果が少ないことにあります。

核データ処理コードを開発するためには、上流側である評価済み核データライブラリと下流側である粒子輸送計算コードの双方の知識が必要になります。例えば原子力学会では上流側は核データ部会が、下流側は炉物理部会や放射線工学部会が管轄しています。大学で言えば、二つの研究室に分かれているようなものです。評価済み核データライブラリと粒子輸送計算コードの双方に精通した研究者や技術者は少なく、核データ処理コードの開発を行うことができる組織や人材は限られています¹¹。

近年では複数の学問分野の研究者が共同で研究に当たる学際的研究がもてはやされています。しかし、核データ処理は基礎的な物理データである評価済み核データライブラリを用いて臨界計算や遮蔽計算などの応用計算を行うことをサポートするものです。そのため、核データ処理コードの開発は新しい手法を開発するとか、大規模計算に拡張するといった研究的な要素はほとんどありませんし、他の研究分野と融合して大きな研究に繋がるものでもありません¹²。実際、NJOY や PREPRO は長年にわたって世界的に広く利用されていますし、間接的には言え多くの実験や測定結果と比較されており、大きな問題点や技術的な課題があるとは思えません。また、多くのユーザーにとって核データ処理はブラックボックスではあるものの、世界的に広く利用されており、実績十分な NJOY や PREPRO が既にあるにもかかわらず、民間企業が多くの予算をかけて新たに核データ処理コードを

¹¹ 核データ評価と粒子輸送計算コードの双方の研究者がいて、かつ今後も核データ処理コードを維持・管理できると期待される組織は実質的に JAEA しかありません。

¹² 6章で例を示しますが、核データ処理コードを利用して新しい研究に繋げることはできません。

開発することは現実的ではありません。

大学や JAEA のような研究機関はどうでしょうか？核データ処理コードは広く利用されていることから、核データ処理コードの開発自体には新規性は認められず、単に核データ処理コードを開発しただけではほとんど論文を書くことができません。また核データ処理に大きな問題点や技術的な課題がないことから、仮に論文が書けたとしても、その数は多くありません。このように期待される論文執筆数が少ない研究テーマというのは、大学や研究機関にとっても取り組みにくいテーマになりがちです。大学や研究機関では研究論文の数がその組織や研究者の評価基準となっていることが多いようです。例えば JAEA の研究部門では副主任研究員(企業での課長代理、大学での准教授に相当)と主任研究員(企業での課長、大学での教授に相当)に昇進する際に昇進試験があり、その昇進試験ではある程度の論文執筆数が必要となっています。そのため、核データ処理コードを開発し、長年にわたってコードを維持・管理ができると期待できる若手職員を核データ処理コードの開発に当てるのは、将来的に昇進試験を受けることを考えるとリスクが大きいと見なされてきました。

このように、核データ処理コードの開発は、その重要性は多くの人々が認めるものの、労力に見合うだけの価値を見出すことができず、実現には至りませんでした。

5. 核データ処理コード国産化の契機

そのような状況下で、米国で大きな動きがありました。2012年に公開された NJOY2012 について、米国外でのソースファイルの提供が制限されることが決まったのです。NJOY は米国の評価済み核データライブラリである ENDF/B を処理することを目的に開発されており、日本の JENDL や欧州(OECD/NEA)の JEFF¹³など、ENDF/B 以外の評価済み核データライブラリが処理できるかどうかは NJOY にとってあまり重要ではありません。評価済み核データライブラリでは、様々な表記形式でのデータの格納が可能となっています。例えば、共鳴断面積を計算する共鳴パラメータは 7 種類の表記形式が用意されています。そのため、ENDF/B で採用されていない表記形式を JENDL が採用した場合、NJOY が適切に処理できない事が多く、JENDL を処理するためには NJOY の修正を待つか、自分達で NJOY を修正する必要がありました¹⁴。

以前は NJOY のソースファイルが提供されており、自由に改変することが許されてきました。そのため、NJOY の利用に問題があるとはいえ、零から核データ処理コードを自主開発するよりも NJOY を修正した方が効率的と考え、NJOY が利用され続けてきました。しかし、NJOY2012 ではソースファイルの入手に制限がかかり、また NJOY2012 の規約ではたとえソースファイルの提供を受けたとしても、そのソースファイルを改変することが

¹³ Joint Evaluated Fission and Fusion

¹⁴ 今までは JENDL が処理できない場合は JAEA で NJOY の修正パッチを公開していました。(<https://www.ndc.jaea.go.jp/FAQ/FAQ/a301.html>)

許されなくなり¹⁵、状況が大きく変わりました。ソースファイルが入手できないということは、NJOY の処理に問題があった場合に自分達で修正することができなくなります。仮に我々が NJOY の開発陣に問題点を指摘したとしても、ENDF/B の処理に問題が無ければ彼らの優先順位は低くなり、JENDL は公開できても肝心の断面積ライブラリがいつまでも公開できないという事態に陥りかねません。

そこでこの状態を打破するため、JAEA にて核データ処理コード FREN DY の開発がスタートしました。前述した通り、FREN DY の開発は論文数などの目に見える成果が少なく、取り組みにくいテーマです。FREN DY の開発を開始することができたのは、この状況に強い危機感を持ち、国策として核データ処理コードの国産化を行う必要があることを JAEA 内外に強く主張し、認めてもらったからです。核データ・炉物理関係者の尽力が無ければ FREN DY の開発に着手することはできませんでした。今までもそして現在も FREN DY の開発は多くの方々のご支援の上に成り立っています。本資料の中で FREN DY の開発前夜の話も書きたいのですが、その話だけでプロジェクト X 的なドキュメンタリー番組¹⁶ができそうなので、ここでは省略させていただきます。ちなみに私が核データ処理コード開発の担当に任命されたのは、コード開発に精通していたこと、炉物理分野の JAEA 職員としては珍しく博士号を持っていたこと、博士論文作成にあたってある程度の論文数を稼いでおり、副主任研究員までのハードルが低いことが理由の一つです¹⁷。ちなみに私自身は核データ処理コードの開発をやりたいと頼まれた時は戸惑いましたが、評価済み核データという知らない知識を学べますし、核データ処理という我が国の原子力開発の核となる技術を任される(牛耳れる)ことになるので、やりがいのある研究テーマをもらったというのが第一印象です。今でも、やりがいのある研究テーマだと思っておりますし、取り組んでみたら意外に研究テーマが転がっていて楽しく開発を進めています¹⁸。

6. 国産核データ処理コード FREN DY の開発

FREN DY の開発が軌道に乗るまでは海外に一切情報を流さないという方針でスタートしました。これは FREN DY の開発が海外の研究機関に知られると、共同開発を持ち掛けられる可能性が高いと判断したからです。FREN DY の開発は国策として進めているものであり、海外の研究機関との共同研究になってしまうと、共同研究先の事情で FREN DY の改変や開発スケジュールに制約が加えられたり、労力だけ出して成果を取られたりしてしまう

¹⁵ 正確には、ソースファイルを修正した NJOY2012 で処理した断面積ライブラリを外部に配布することが禁止されました。

¹⁶ 中島みゆきの地上の星と田口トモロヲのナレーションが自動的に脳内再生されない方は NHK のプロフェッショナルとかテレビ東京のガイアの夜明けを想像して下さい。

¹⁷ もちろん、上記の項目に該当する人なら誰でも開発できる訳ではない…とも、思っていますが。

¹⁸ 研究テーマはあるのですが、核データ処理コードの完成を優先せざるを得ず、じっくりと腰を据えてそれらのテーマに取り組めないのが悩ましいところです。

可能性があることが懸念されました。特に NJOY や PREPRO という既に完成された核データ処理コードがあることから、FRENDY の開発が NJOY や PERPRO の改良に巻き込まれてしまうとせっかくの国産化が台無しになります。そのため、海外へ FRENDY 開発の情報が流れないように注意を払う必要があり、海外の知人から近況を尋ねられた時は回答に苦慮しました。

FRENDY が海外デビューを果たしたのは意外に早く、FRENDY の開発から 2 年後の 2015 年です。元々は ACE ファイル作成機能までを実装した上で、国際会議でデビューする計画でしたが、IAEA から核データ処理コードに関する技術者会合への招致があり、さすがに黙っている訳にはいかないだろうということで、FRENDY の開発について各国の核データ処理関係者に報告することになりました。会議の詳しい内容は参考文献 22 に記載していますので、興味のある方はそちらをご確認下さい。

NJOY2012 のソースファイルの入手制限とソースファイルの変更不可の衝撃は世界的にも大きかったようで、図 3 に示すように多くの国と機関が核データ処理コードの開発を行っていることが明らかになりました。FRENDY は各国で開発中の核データ処理コードの中でも最も開発が進んでいる核データ処理コードの一つであり、国内はもちろんのこと、海外からも注目を集めています。

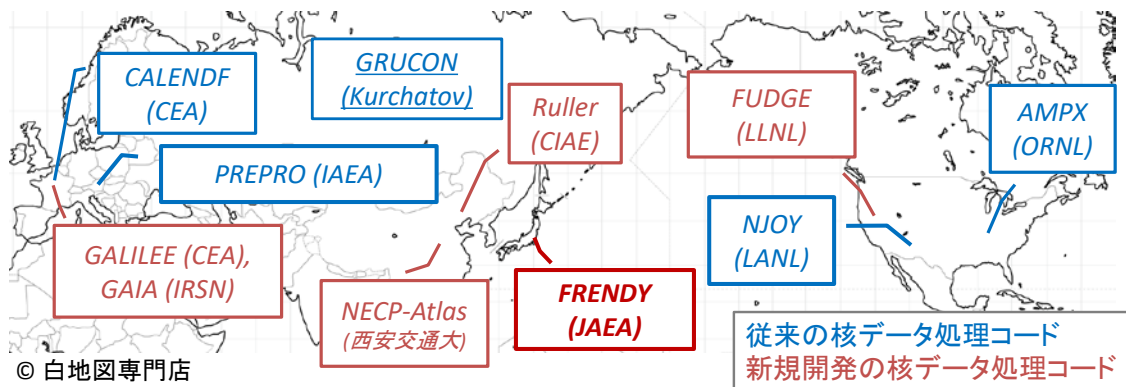


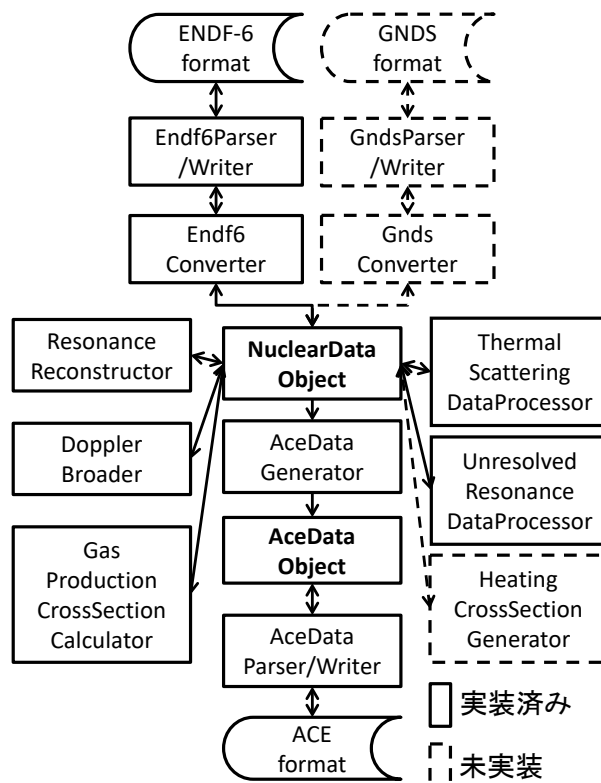
図 3 各国の核データ処理コードの開発状況

FRENDY では今後のメンテナンスと改良のしやすさを考慮し、各クラスのカプセル化(ブラックボックス化)に力をいれています。図 4 に FRENDY の構造を示します。FRENDY ではクラスのカプセル化を活用し、各処理機能を容易に他のコードへ導入できるようにモジュール化しています。そのため、核データ処理機能を自分のコードに実装したい場合には、核データ処理コードの中身を知らなくても、FRENDY の各モジュールを組み込むだけで核データ処理を行うことが可能となります。

また、図 4 に示すように FRENDY では、ENDF-6 形式[23]の評価済み核データファイルや ACE ファイルを読み書きする機能(Parser/Writer モジュール)を実装しています。断面積

や二重微分断面積を変更して臨界試験などの積分実験の解析にどの程度の影響があるのか評価したいというのは炉物理分野の研究者の長年の願いでした。しかし、評価済み核データファイルや ACE ファイルのフォーマットは非常に複雑で、これらのファイルに精通していなければデータを変更することは困難でした。特に ACE フォーマットはフォーマットマニュアルが公開されておらず、ACE フォーマットの中身を知るためには、NJOY や MCNP のソースファイルから自分で読み解く必要がありました¹⁹。FRENDY では、これらのファイルを自動で読み取り、ユーザーが理解しやすいデータ名で格納します。またデータの変更に伴い、配列数などが変更になったとしても、その変更を自動的に書き出すファイルに反映させることができます。そのため、FRENDY を使えばフォーマットを知らなくても誰でも簡単に評価済み核データファイルや ACE ファイルを修正することができます。FRENDY の ACE ファイルの読み書き機能を使って ACE ファイルの断面積を変えた場合に実効増倍率に与える影響を評価するなど、FRENDY を利用した研究が既に進められており [24]、FRENDY は核データ処理以外でも活躍しています。

FRENDY のもう一つの大きな特徴として、NJOY 形式と FRENDY 形式の二つの入力形式に対応していることです²⁰。従来から NJOY を用いて断面積ライブラリを作成してきた場合、シェルや簡易プログラムを用いて自動的に NJOY を動かして断面積ライブラリを作成していることが多いです。新たな入力形式の断面積処理コードを使うためには、それらのシェルや簡易プログラムを書き換える必要があり、多くの労力が必要となります。そのため、NJOY に致命的な問題が見つからない限りは、既存の NJOY ユーザーが新しい核データ処理コードに置き換えるとは思えません。FRENDY では NJOY と同じ入力で核データ処理を行うことができますし、NJOY と同じように中



¹⁹ MCNP のパッケージに付属している MCNP の開発者マニュアルに ACE ファイルのマニュアルが Appendix に記載されています。しかし、現在は米国外の利用者には提供されていません。現在、LANL では Github 上で ACE フォーマットのマニュアルを公開しています。最新版は <https://github.com/nucleardata/ACEFormat> からダウンロード可能です。

²⁰ NJOY は NJOY99 と NJOY2012 で THERMR の入りに違いがあります。FRENDY では NJOY99、NJOY2012 のどちらの入力も読み取れるようになっています。

間ファイルである PENDING²¹ファイルを読み書きすることができます。そのため、実行ファイルだけを NJOY から FRENLY に置き換えるだけで FRENLY を用いた核データ処理を行うことが可能になり、FRENLY へ置き換えるのに必要な労力はほとんどありません。現在は MCNP や PHITS²²[25]で利用されている ACE ファイルしか作成することはできませんが、NJOY の GROUPT と組み合わせることで、多群断面積を作成することができます。このように FRENLY は既存の NJOY ユーザーの利便性を考慮し、NJOY との親和性が高くなっています。

しかし、NJOY 形式の入力は、評価済み核データファイルや核データ処理についての知識がないと作ることができないため、新たに核データ処理を行おうとする方が NJOY 形式の入力を独力で作るのは困難です。そこで FRENLY では、誰でも簡単に断面積ライブラリが作成できるように、FRENLY 形式の入力を用意しました。FRENLY 形式の入力を用いれば、作成する断面積ライブラリの形式と評価済み核データファイル名を入れるだけで断面積ライブラリを作成することができます。このように FRENLY は既存の核データ処理コードユーザーと、新しい核データ処理コードユーザーの双方にとって利用しやすい核データ処理コードを目指して開発を進めています。

7. おわりに

現在、ACE ファイル作成機能までを FRENLY Version 1 として公開すべく、公開手続きを進めています。FRENLY Version 1 のマニュアル[26]は既に完成しており、2018 年度中に公開される予定です。FRENLY のソースファイルも 2018 年度末、もしくは 2019 年度初頭に公開できるように努力していますので、もしこの寄稿文を読んで FRENLY に興味を持っていただけましたら、FRENLY を使ってみて頂ければ幸いです。

多群断面積作成機能の実装や共分散データ処理機能の実装、KERMA²³係数計算機能の実装など、FRENLY は NJOY に比べると足りない機能が多く、FRENLY に実装すべき機能はまだまだ多岐に渡っています。FRENLY の開発は今後も続けていきますので、今後ともどうぞよろしく願いいたします。

参考文献

- 1) K. Tada, Y. Nagaya, S. Kunieda, K. Suyama, T. Fukahori, “Development and verification of a new nuclear data processing system FRENLY”, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **54**, pp.806-817 (2017).
- 2) K. Tada, A. Yamamoto, Y. Yamane, Y. Kitamura, “Applicability of the Diffusion and

²¹ Point-wise ENDF

²² Particle and Heavy Ion Transport code System

²³ Kinematic Energy Release in MAterials の略で、放射線が人体や物質に与える影響の指標となる物理量です。KERMA は炉物理分野ではなく、遮蔽分野や照射損傷などの分野でよく使われています。

- Simplified P3 Theories for Pin-by-Pin Geometry of BWR,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **45**, pp.997-1008 (2008).
- 3) K. Tada, A. Yamamoto, Y. Yamane, “Treatment of Staggered Mesh for BWR Pin-by-Pin Core Analysis,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **46**, pp.163-174 (2009).
 - 4) K. Tada, A. Yamamoto, Y. Yamane, S. Kosaka, G. Hirano, “Validation of Neutron Current Formulations for the Response Matrix Method based on the SP3 Theory,” *Ann. Nucl. Energy*, **37**, pp.22-27 (2010).
 - 5) K. Tada, T. Fujita, T. Endo, A. Yamamoto, S. Kosaka, G. Hirano, K. Nozaki, "Application of Quick Sub-Channel Analysis Method for Three-dimensional Pin-by-Pin BWR Core Calculations," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **48**, pp.1437-1452 (2011).
 - 6) 山野直樹、「断面積ファイルおよびその処理方法の基礎」、第 36 回炉物理夏期セミナー (2004).
 - 7) 宇根崎博信、「実効断面積計算手法の基礎(超入門)」、第 36 回炉物理夏期セミナー (2004).
 - 8) 山本章夫、「軽水炉と高速炉の比較～原子炉物理の観点から～」、第 42 回炉物理夏期セミナー (2010).
 - 9) 長家康展、奥村啓介、櫻井健、森貴正、「MVP/GMVP 第 3 版：連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード」、JAEA-Data/Code2016-019 (2017).
 - 10) X-5 Monte Carlo Team, “MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5”, LA-UR-03-1987, Los Alamos National Laboratory (2003).
 - 11) 多田健一、小迫和明、横山賢治、今野力、「第 6 回 核データの利用のために —マイクロからマクロへの橋渡し—」、日本原子力学会学会誌、60、3、pp.168-172 (2018).
 - 12) 多田健一、「評価済み核データライブラリの処理」、第 49 回炉物理夏期セミナー (2017).
 - 13) 長家康展、「核データ処理：評価済み核データから断面積ライブラリへ」、第 45 回炉物理夏期セミナー (2013).
 - 14) 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).
 - 15) W. Haeck, A. Trkov, “Nuclear Data Processing Summary Report of the Technical Meeting,” INDC(NDS)-0748, International Atomic Energy Agency (2018).
 - 16) A. C. Kahler, Ed., “The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 2016”, LA-UR-17-20093, Los Alamos National Laboratory (2016).
 - 17) D. E. Cullen, “PREPRO 2017, 2017 ENDF/B Pre-processing Codes (ENDF/B-VII of proposed VIII Tested)”, IAEA-NDS-39, Rev.17, International Atomic Energy Agency (2017).

- 18) J. L. Conlin, A. Trkov, "Nuclear Data Processing Summary Report of the Technical Meeting," INDC(NDS)-0766 (2018).
- 19) 多田健一、「IAEA Technical Meeting “Nuclear Data Processing”に関する会合報告」、核データニュース No.122 (2019).
- 20) N. Yamano, K. Minami, K. Koyama, Y. Naito, "RADHEAT-V4; A code system to generate multigroup constants and analyze radiation transport for shielding safety evaluation," JAERI 1316 (1989).
- 21) 炉物理ロードマップ策定委員会、「原子炉分野の研究・開発ロードマップ策定」、炉物理の研究 第64号 (2012).
- 22) 多田健一、「IAEA Consultants' Meeting “The New Evaluated Nuclear Data File Processing Capabilities”に関する会合報告」、核データニュース No.113 (2016).
- 23) A. Trkov, M. Herman, D. A. Brown, "ENDF-6 Formats Manual", Report BNL-203218-2018-INRE, Brookhaven National Laboratory (2018).
- 24) R. Kondo, T. Endo, A. Yamamoto, K. Tada, "Implementation of Random Sampling for ACE-format Cross Sections Using FRENDY and Application to Uncertainty Reduction," *Proc. M&C2019*, Aug. 25-29, Portland, USA (2019).
- 25) T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, P. Tsai, N. Matsuda, H. Iwase, N. Shigyo, L. Sihver, K. Niita, "Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02", *J. Nucl. Sci. Technol.*, **55**, pp.684-690 (2018).
- 26) K. Tada, S. Kunieda, Y. Nagaya, "Nuclear Data Processing Code FRENDY Version 1," JAEA-Data/Code 2018-014, Japan Atomic Energy Agency (2019).

Appendix 核データ処理に関する参考資料

全般

- ① 多田健一、「核データ処理システム FRENDY」、核データ研究会 チュートリアル (2018).
- ② 多田健一、小迫和明、横山賢治、今野力、「第6回 核データの利用のために —ミクロからマクロへの橋渡し—」、日本原子力学会学会誌、**60**、**3**、pp.168-172 (2018).
- ③ 多田健一、「評価済み核データライブラリの処理」、第49回炉物理夏期セミナー (2017).
- ④ 長家康展、「核データ処理：評価済み核データから断面積ライブラリへ」、第45回炉物理夏期セミナー (2013).
- ⑤ 山野直樹、「断面積ファイルおよびその処理方法の基礎」、第36回炉物理夏期セミナー (2004).
- ⑥ D. E. Cullen, "4 Nuclear Data Preparation," Handbook of Nuclear Engineering,

Springer (2010).

- ⑦ R. E. MacFarlane and A. C. Kahler, “Methods for Processing ENDF/B-VII with NJOY,” *Nuclear Data Sheets*, **111**, pp.2739-2890 (2010).

共鳴公式

- ⑧ 小林啓介、原子炉物理 第一章 (1996).
- ⑨ M. E. Dunn and N. M. Greene, “POLIDENT: A Module for Generating Continuous- Energy Cross Sections from ENDF Resonance Data,” NUREG/CR-ORNL/TM-2000/ 035 (2000).

熱中性子散乱則

- ⑩ 鬼柳善明、「熱中性子散乱則の表式と現状の断面積の問題点」、核データニュース、108 (2014).
- ⑪ 池原正、東條匡志、「熱中性子散乱則が軽水炉核特性に与える影響」、核データニュース、108 (2014).

NJOY 利用方法

- ⑫ 小迫和明、「炉定数の作成方法 ～NJOY コードの利用方法の初心者講習として～」、核データ・チュートリアル
(https://www.ndc.jaea.go.jp/nds/tutorial/tutorial2003_2.pdf)

断面積プロット

Evaluated Nuclear Data File (ENDF)

<https://www.nds.iaea.org/exfor/endl.htm>

Sigma Periodic Table Browse

<https://www.nndc.bnl.gov/sigma/>

核図表

Web 版 (JAEA 提供)

<https://www.ndc.jaea.go.jp/CN14/index.html>

iOS、Google アプリ版 (IAEA 提供)

Isotope Browser