

## 総合講演・報告3 「シグマ」特別専門委員会 [核データ部会共催]

## 「シグマ」特別専門委員会の平成 27, 28 年度活動報告

Activity report of Special Committee for Nuclear Data in the period of 2015 and 2016

## (2) 産業界から見た核データ活動のあるべき姿

## (2) Desirable Situation of Nuclear Data Activities Viewed from Industrial Domain

\*池原 正<sup>1,2</sup><sup>1</sup>GNF-J, <sup>2</sup>ImPACT/JST

## 1. はじめに

今や核データは、世界的に広く認知された書式の下に評価済み核データファイルという電子データライブラリとして、国境を越えた利用が可能になっている。その適用領域は、原子力技術の基盤技術から核融合や加速器技術開発、そして医学・ライフサイエンス、宇宙核物理、有用同位体製造、などの分野に拡大しつつある。本来、核データとは原子核の反応や崩壊といった物理現象を数値テーブル化したものと考えれば、それはユニークに決定されるべきものである。しかしながら、測定値の欠如や不確かさ、それを補完または補正する核反応理論の強化が待たれる現状において、核データの決定には作業者の専門家としてのノウハウ・経験・知識に依る評価プロセスを避けて通ることが難しい。つまり評価プロセスには合理的な自由度が介在する。そのため評価済み核データファイルに複数のライブラリが存在するのも理解できる。米国の ENDF, NEA データバンク加盟国による JEFF, 我が国の JENDL などがその代表例として挙げられる。歴史的には、その背景に各国の原子力施策や、核兵器利用（我が国を除く）のための力が働いていたこともあった。そして核データの重要性は、今日における広い分野での平和利用において、その重要性を増しつつある。報告者の目には、しかしながら最近の核データ活動状況を見ていると、その信頼性や完備性には驚くほどの躍進が認められる反面、核データ開発者\*1と利用者の乖離、つまり開発者は開発者として、利用者はより利用者側の活動に徹するという状況が鮮明になってきたように映っている。確かにこれは効率化社会の目指す自然な成行きではあるが、果たして“核データ活動のあるべき姿”なのかを考えてみた。そこで本稿では、この乖離に対し両者の歩み寄りに資する話題提供を試みると同時に、新たな核データ活動の方向性を示唆するプラクティスの紹介を、主に軽水炉燃料炉心解析手法開発に従事してきた報告者の視座から試みたい。

## 2. 核データ活動

核データ活動の構造を我が国の場合を例に模式的に描いてみた(図1)。中心に評価済み核データライブラリを配置すると、これを挟み二つ活動領域が描ける。核データ開発領域と核データ利用領域である。この二つの領域の差し渡し機能を担うのがシグマ委員会や JENDL 委員会である。なお、ここでは OECD/NEA など海外との国際協力関係は除外した。

‘90年代以前の状況でこれを描くと、当時は大口利用者である事業者・メーカー内にも核データ評価に直接係る研究者・技術者が活動していたので、図中の二領域間に実質的な重なり領域が今より大きかった筈である。

このように時代と共に核データ活動の構造は徐々に変化を遂げてきたが、社会との係わりという根幹の部分において変わりはないと思われる。即ち、核データは、

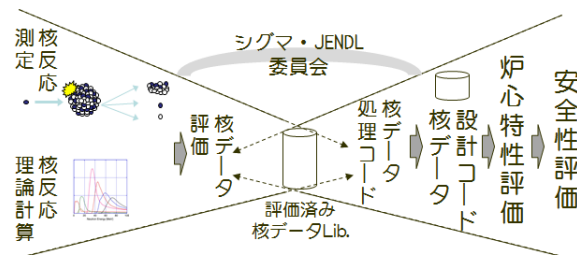


図1. 核データ活動模式図

\*1 評価者、生産者とも表現できるが本稿では開発者と記す

1) 原子力エネルギーの持続的利用と安全確保に係る責任 (responsibility)

2) 原子力を基盤とする未来に向けた社会変革を進める役割 (role/contribution)

を担っている。これらに昨今のキーワードを当てはめると、1)には説明責任、2)には科学技術立国の基盤、が当てはめられよう。以下では、この2つをキーワードに据える。

## 2-1. あるべき姿—説明責任を果たす

図1で示すように評価済み核データライブラリを挟む二領域間の乖離により、核データ活動に参加する両領域の人々が本来協調してその責任を果たしてゆく、という極当たり前のことが機能し辛くなっているように思える。または元々国内活動は高速炉分野に偏在していたとも言える。それ故 JENDL の場合、その開発者にとっては成果物である評価済み核データライブラリの利用促進を訴えては来ているものの、商用軽水炉の安全規制の場での適用が遅々として進まない状況が生じていると思われる。文献[1]\*2によれば、格子計算 12 コードのライブラリの内訳は JENDL3.2 と 3.2 がそれぞれ 1 コード、それ以外は ENDF-B/IV/V/VI である (なお、JENDL3.3 と ENDF-B/VI or VII beta の共用コードが1)。利用者側に立つ者として言い訳をするならば、運用中の米国起源の設計コードやその後継コードにおいて使用している核データは、基本 ENDF/B を採用している。したがって、それ以外のライブラリに切り替えるには相当なコスト発生を覚悟しなければならないし、その際のメリットが明確でなければならない。実際、切り替えによる影響は下流コードにも波及するため、設計コードシステム全体の特性変化を把握しなければならない。加えて、ENDF/B から JENDL への切替を試みようとした場合、NJOY を核とする専用ライブラリ処理システムを JENDL に適用し、果たして設計コード用核データライブラリ一式を作成できるかというリスクも負わねばならない。

こうした事情はあるにせよ、民主・自主・公開の三原則に立ち返れば、オープンな核データ活動を放棄する選択肢はあり得ない。こう考えると今更ながらではあるが、説明責任を果たすための核データ活動とは、1)核データ評価、2)炉物理手法、3)原子炉・燃料設計の各活動を有機的に結び付けることから始めるしかない。その際、説明責任を果たすための処方として、近年求められるシミュレーションの信頼性確保のための不確かさ評価 (以下、「V&V 標準」と呼ぶ) [2]を考察の基盤に据えてみたい。

### 2-1-1. 核データと炉物理手法に内在する不確かさの大小関係

核データまたは炉物理手法に内在する不確かさは、シミュレーションプロセス中を伝播してゆき、評価対象とする原子炉特性の不確かさに総括される (ここで炉物理手法とは、炉心設計コード中の手法を指し、設計計算には不向きな詳細参照コードは対象とはしない)。仮に核データ不確かさが炉物理手法の不確かさに対し過大ということが分かれば、総括不確かさ低減のために優先すべき活動は、核データの改良ということになる。その逆も真であるが、こうした意味で、核データと炉物理手法間の不確かさ量のバランスを軽水炉条件に限らず幅広く調査・確認するような活動があつて然るべきかと思う。先ずは、両者の実力を天秤にかけるということで、あるべき活動の方向性を見極めるということである。

参考として、BWR9×9 ウラン燃料集合体ベンチマーク [3]を対象に、参加コードの結果のバラツキと、同問題に対し報告者が行った共分散データから生成した多数個のライブラリセットを用いた単一コードによる計算結果のバラツキを比較した [4] (図2)。

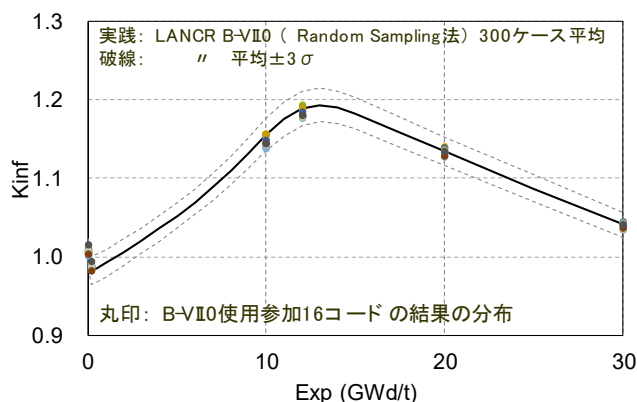


図2. 核データと炉物理手法に起因する不確かさの大小関係評価例

\*2 文献[1]の発行が ENDF/B-VII.0 や JENDL4.0 のリリース以前であるが、ENDF vs JENDL という観点では現状を反映している。

ベンチマーク参加コードの結果は、同一核データライブラリ(B7.0)を使用している16コードだけを選別した。報告者の使用したコードLANCR(旧称LANCER)も核データライブラリはB7.0であるが、B7.0の共分散データは完備性に問題があり、アクチノイドはJ4.0、FPはB7.1の共分散データで代用している[5]。前者は手法の違いに起因するバラツキ、後者は核データの不確かさを起源とするバラツキをもっている。本例のBWR燃料集合体に対する無限増倍率の総括不確かさを要因分解すると、核データ共分散の寄与が炉物理手法の違いによる不確かさの寄与を上回っていることになる。この種の見極めを核データ活動と炉物理活動の協調の下に進め、共に説明責任を果たしてゆくことを提案したい。

最後に補足すると、こうした不確かさ評価を通して、例えば $S(\alpha, \beta)$ の共分散データを取り込むべきことその他、JENDL4においてFP共分散データの早期の拡充が必要、といった要望が具体化する[6]。

### 2-1-2. シミュレーションの信頼性向上に役立てる処方

先に述べたように一旦開発を完了した設計コードでは、核データライブラリを切り替えること自体容易ではない。それでは最新知見を反映した核データを安全審査の場に登場させる道はないのであろうか。ここでV&V標準の要求事項について振り返る。その中の重要なものにシミュレーションの予測性能の妥当性確認がある。これは妥当性確認を、実測データの存在する領域からシミュレーションが対象とする適用範囲全体にわたり実施することを求めるものであり、今後NRAにより運用が予想される設計コードのトピカルレポート審査においても要求される可能性が高い。

この要求に応えるには、新たに実測値を取得し補強する自明な策がある。その他としては、実測値を代替する仮想数値実験値をもって妥当性確認を行う、という新たな方法も考えられる。後者の場合、測定を数値計算で代替するため、用いるべき数学的モデルの実現象に対する近似が無視できる程度に小さいことが必須である。核現象のシミュレーションでは、そうした手法として連続エネルギーモンテカルロ(以下、「MC」と呼ぶ)コードが挙げられる。つまりMC法による計算結果を参照解として設計コードを確認する方法であるが、従来この方法は検証(Verification)の範囲に留まると考えられてきた。つまり妥当性確認(Validation)のグレードには到達できないという判断である。その要因を挙げると、1)適用範囲の対象になる実炉心サイズの大規模計算がMC法ソフトウェア上の制限などから容易には実行できないこと、2)MC法コードの数学的モデルに欠陥がないことの証明が難しいこと、3)核データ起因の不確かさの定量化が難しいこと、などが挙げられる。一方で1)や2)の克服を目指した研究[7]や、3)に関してはバイアス因子法を適用することで核データ起因の不確かさを除去する研究[8]に成果が得られつつある。このような研究を精力的に進展されるには、当然核データには最新の知見が反映されていなければならない。そのための周辺環境整備として、1)共分散データやTENDLのランダムファイル的データの整備・拡充、2)バイアス因子の分母となる臨界試験データの精査・拡充(例えば[9])、3)感度係数や代表性因子などの分析ツール整備(例えば、VACANCE[10])、4)MC法コード強化、5)数値実験参照解作成、といった活動に相互関連性をもたせること、そのために核データと炉物理の二陣営が協調体制をもって取り組むことが必要である。こうした活動に口火が切られることに期待したい。こうした事が実現すれば、最新知見を反映した核データは、それが直接設計コードライブラリに採用されなくとも、安全審査の場で活用されることになる。

### 2-1-3. 評価済み核データをバウンダリーとする思考停止

再度図1を眺めると評価済み核データライブラリというバウンダリーを超えた左右領域間での情報伝達はJENDL委員会またはシグマ委員会が担い、実質の領域間相互乗り入れの活動が乏しいことに気付く。実際、利用者である報告者が例えば核計算上の問題を核データに帰着させようと検討を思い立ったとしても、実質このバウンダリー突破は難しく、ここで思考は停止してしまう。精々手の及ぶことは、当該データを他のライブラリやバージョンに切り替えるといった程度に留まる。ところで、国内の核データ評価の現場では、CCONEコードシステム[11]の整備が進むと共に、JENDL Actinide File 2008やJENDL4.0からはCCONEによる評価が本格化し、その適用範囲も低エネルギー中性子(<20MeV)から、高エネルギー中性子、陽子、光子反応に加え、遅発中性子放出などと幅広い。核データ利用者にとっても、CCONEや

TALYS などのシステムを通じ核データ評価プロセスについて理解することは、それ以前の核データ評価プロセスと比べ論理性や一貫性が向上したこと等から俄然容易になるのではないかと想像される。そうであれば利用者は思考停止のバウンダリーを超え、核データの信頼性や不確かさについて、開発者（評価者）側と協調して核データ活動に取り組めるようになるのではないかと想像する。例えば、JENDL4 ユーザ会などを企画し、CCONE とセットで核データの現状やその評価プロセスを解説することで利用者の理解の底上げを狙うと同時に、利用者側からは核データ利用に関する事例紹介を行うなど、JENDL 委員会やシグマ委員などの委員会活動とは違った位置づけの活動があってもよいように思える。

## 2-2. あるべき姿—科学技術立国の基盤として

核データ開発者と核データ利用者が一体となることで、社会変革を起こすための新技術概念提案に挑戦している事例を紹介する。2014年6月に始まった内閣府 ImPACT プログラムにて採択された「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」研究プログラムである[12]。HLW より分離回収した長寿命核分裂生成物 (LLFP) を加速器ビームにて短半減期核種や安定核種に変換し、有用なものはクリアランスレベルを評価しその下に再利用するプロセス概念提案を目的としている。本稿で着眼したいのは、LLFP 核変換のコアとなる研究を 1)核反応データ取得のための測定実験、2)測定データ補完のため核構造及び核反応理論研究、3)LLFP 核変換に関するシミュレーションの信頼性向上、4)その成果を用いた核変換プロセスシミュレーションの実施、の分野間で緊密な連携体制を構築している点である。ここで図1の左を理学領域、右を工学領域と見なせば、理学と工学の融合により、オーダーメイド核データを J-PARC や理研 RIBF といった世界的にも最先端の装置を使用し取得し、それに基づき工学的見地から LLFP 核変換技術の社会実装というコンセプト提案作業が進行しているのである。こうした社会変革を推進するプラクティスに習い、リスクを恐れることなく第二、第三の理学・工学一体型の先進的活動が芽生えることを期待したい。

## 3. まとめ

“核データ活動”というタイトルを冠した講演は、これまでの原子力学会の企画セッションにおいても幾度か行われてきた。今回、シグマ委員会主査である東工大千葉先生よりお話があり、頂戴したタイトルに正直困惑したが、日頃より核データのお世話になっている人間として核データを中心とした活動のあるべき姿について、1)原子力エネルギーの持続的利用と安全確保に係る責任 (responsibility)、2)原子力を基盤とする未来に向けた社会変革を進める役割 (role/contribution) という切り口で考えてみたことを私見として述べさせていただいた。核データ利用者の一人として、今後の核データ活動の持続的発展に期待したい。

## 参考文献

- [1] G. Hirano and S. Kosaka, “Nuclear Data Library in Design Calculation”, Proceedings of the 2005 Symposium on Nuclear Data, February 2-3, 2006, JAEA, Tokai, Japan
- [2] 日本原子力学会, “シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン”, AESJ-SC-A008:2015(2015)
- [3] NEA, “Burn-up Credit Criticality Safety Benchmark Phase III-C”, Nuclear Science EA/NSC/R/(2015)6 March 2016, www.oecd-nea.org
- [4] 池原, “BWR 集合体燃焼計算における共分散データ起源の核種生成及び崩壊熱不確かさに関する検討”, 炉物理計算における核データに起因する不確かさに関する研究会, Nagoya Univ. April (2017)
- [5] 池原, 他, 日本原子力学会年秋の大会, 2H01 (2016)
- [6] JENDL 委員会 “JENDL 開発検討小委員会報告—JENDL 開発の今後の方向性—” JAEA-Review 2014-046 (2015)
- [7] S. Takano, et. al., “Validations of BWR Nuclear Design Code using ABWR MOX Numerical Benchmark Problems,” Proc. 2017 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, Fukui and Kyoto, Japan, April 24-28 (2017)

- [8] 池原, 他, 日本原子力学会 2015 年春の年会, J39(2015)
- [9] JENDL 委員会 リアクタ積分テスト WG “JENDL 開発のための軽水炉ベンチマークに関するデータ集の整備; 公開データベース ICSBEP 及び IRPhEP における実効増倍率データの活用”, JAEA-Data/Code 2017-006 (2017)
- [10] 多田, 他, “(4)核データ検証自動実行システム VACANCE の開発”, 核データニュース, No. 117 (2017)
- [11] O. Iwamoto, et. al., “The CCONE Code System and its Application to Nuclear Data Evaluation for Fission and Other Reactions”, Nuclear Data Sheets, 131, 259-288 (2016)
- [12] R. Fujita, “Reduction and Resource Recycling of High-level Radioactive Wastes through Nuclear Transmutation - Program overview”, Asian Nuclear Prospects 2016 (ANUP2016) (2016)
- 

\*Tadashi Ikehara<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>GNF-J, <sup>2</sup>ImPACT / Japan Science and Technology Agency