

2015年日本原子力学会秋の大会

「シグマ」特別専門委員会活動報告と核データ研究の将来展望

(3) 核データ分野の人材育成

日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究センター
深堀 智生

fukahori.tokio@jaea.go.jp

1. はじめに

評価済み核データファイルの現状は、我が国の JENDL-4.0 (2010 年公開)、米国の ENDF/B-VII.1 (2011 年公開)、欧州の JEFF-3.2 (2015 年公開) 等最新の核データファイルが出そろい、次の改訂版までは、その特徴をどのように示していくか検討している状況にあるといえる。このため、国際的には次期核データフォーマット、共分散と炉定数調整、共同での評価手法の検討、核データ処理コードの更新等いくつかの新たな方向性を模索し始めている。一方、評価済み核構造データファイル (ENSDF) の国際分担に係わる担当者の高齢化が進み、新たな評価者を確保できない国では、それこそ評価自体が絶滅 (extinct) しかかっている。核反応データにおける評価についても、JENDL-3 シリーズが終了後、JENDL の作成自体は「原子力機構が主体的に行うべし」という意見もあり、原子力機構以外では一部の大学や研究機関を除いて、ほとんど評価者が育っていない状況となっている。炉物理研究者に関しては、大学にまだ講座として炉物理の看板を上げているところは存在するが、核データに関しては元々「核データ学」という学問は存在せず、原子核物理からのスピノフや、原子核工学科の測定研究を行っている研究室からの人材供給に頼ってきた部分がある。このため、原子力研究開発の最も基礎・基盤的部分に位置する核データの供給に関し、現状はその技術継承及び人材育成に「赤信号」が灯っていると言える。このため、シグマ委員会では、生き残り (extant) をかけてこの状況を打開するための人材育成の一つの方策として、核データチュートリアルを提唱し、現在核データ部会が主催する「核データ研究会」に引き継がれている。しかし、ここでも網羅的、俯瞰的な「核データ学」というようなものではなく、その時々の特ピックス的なものであるため、系統的な人材育成に繋がっていない。そこで、シグマ委員会では、「核データ学」を標榜できるような教科書を作成し、戦略的な人材育成を検討してきた。

本稿では、個人的な見解に偏ってしまうことになるかもしれないが、これを恐れず、シグマ委員会における検討の中間的な報告として見解を述べさせていただきたい。また、人材育成に当たり、ベースとなる教科書についてでもできる限りその意図に言及したい。さらに、核データはその利用分野の広さから多くの分野との関連を持つが、ユーザとして最も近く、古くから協力関係にある炉物理分野、並びに、人材供給源としての核物理分野との連携についても検討したい。

2. 戦略的人材育成

核データが共通基盤的なデータベースであるためには、評価済み核データファイルをその時点でもっとも確からしい核データとして提供することにとどまらず、近い将来に必要なとされるであろう核データニーズをある程度先取りした戦略が必要である。一方、今後を担う次世代のリーダを育成し、国内的な活動戦略や国際的な発言力を含む方向性の検討を行うためには、核データ分野のみならず、関連する核物理及び炉物理分野との連携を考慮しつつ、バランスの取れた人材育成を戦略的に進める必要がある。図 1 に核データを取りまく核物理及び炉物理分野との連携を俯瞰してみた。

核データ整備と核物理及び炉物理分野は、それぞれ微分データ及び積分データで結ばれている。核データの精度は、最終的には測定により取得される実験データによってしか担保されない。ここで、測定データを生産する実験施設及び装置の整備が必要となるが、

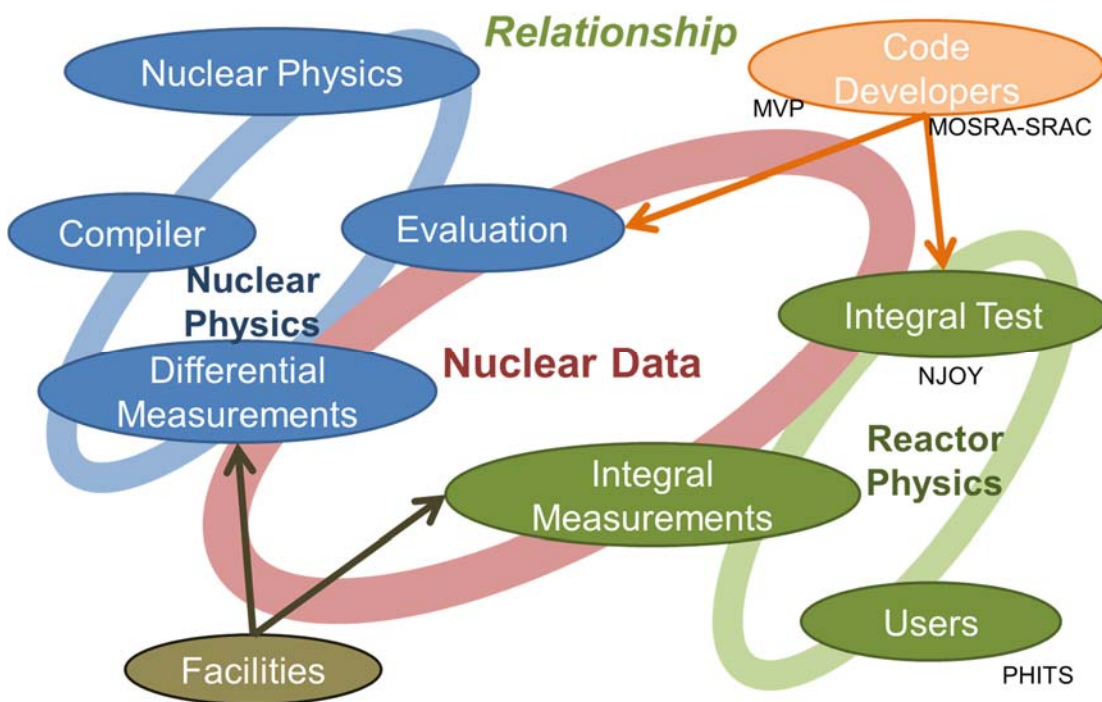


図 1 核データと周辺分野との連携

筆者には荷が重すぎるので、ここでは割愛させていただく。微分データは、核データファイルを整備する上で必要な評価の礎となるものであり、利用可能なデータで核物理モデルのパラメータを決め、それをを用いたモデル計算により実験データの無い物理量を推定する。積分データは、個々の核種だけでなく利用される形の総体としてのバランス（妥当性）を検証するために不可欠であり、今後ますます重要となる「不確かさ」を定量的に示すために実施されるベンチマーク計算に用いられる。とは言え、データだけのつながりではなく、そこには微分的（核物理）及び積分的（炉物理）コードに内包されるモデルに関連する計算手法を通じたフィードバック及び相互のニーズ共有が必要である。また、核データ利用に関しては炉定数を作成するための核データ処理コードが連携には重要であるが、この国産化は業界の悲願である。

3. 「核データ教科書」概要案

戦略的人材育成のための、教科書の検討をシグマ委員会で開始し、ある程度の中間案が策定されつつある。以下に、その案を示したい。上記の観点から核データの教科書について概要及び目次案を検討した（図2）。章の構成としては、第1章で「核データの一般論」、第2章で「核データの測定」、第3章で「核データ評価のための原子核反応理論」、第4章で「核データ評価」、第5章で「評価済み核データファイルと炉定数」を考えている。以下、各章の概要を検討してみた。

第1章：核データの一般論では、全体の構成に係わる紹介または序論に当たる部分を記載する。ここでは、核データ活動全体をできる限り俯瞰するために、第2章以下の相互の関係も記載できるとよい。そのものではないが、検討のたたき台として、核データの測定者（微分または積分データ）、評価者及び炉物理研究者やベンチマーク実施者を含む利用者の関連を図3に例示してみた。上述したように核データの精度は、実験データによってしか担保されないが、どのような実験をどの程度の要求精度で実施すればよいかを測定者が直接知ることは難しい。また、核データの利用者は、ニーズ及び目標精度を提示できるが、それが到達可能なものであるかどうかを判断することは同様に利用者だけでは困難であると思われる。このため、大きく分けてこの三者（評価者、測定者、利用者）は、相互に密に連携し、核データの整備方策を検討する必要がある。現状では、これらを原子力学会の核データ部会及びシグマ委員会、原子力機構のJENDL委員会が相補的に検討し、協力・連携することによって、実現している。

第2章：核データの測定では、度々記載するが、評価済み核データの精度を決めるのは最終的に実験であることから、種々の測定についてのエッセンスを記載したい。例えば、共鳴領域における透過実験、全断面積及び散乱断面積を測定するための飛行時間法(TOF)、捕獲断面積の測定法（特に J-PARC/ANNRI 等による最新の実験方法等）である。核分裂断面積測定においては複数の測定法があり、日進月歩であるので、すべてを記載するのは

困難であるが、例えば、鉛スローイングダウンスペクトロメータ、電離箱を用いたもの（アバランシェ・カウンター（AC）、複数のターゲット盤を内包する MPAC）等がある。反応断面積については、放射化法、放出粒子測定法、He 集積法等は押さえておきたい。この他、種々の検出器（カウンターテレスコープ、シンチレーション検出器、半導体検出器、GIC 等）による放出粒子スペクトル測定、核分裂収率測定、及び最新測定法（代理反応を用いたもの）を紹介する。ただし、すべての測定法を網羅することは困難なので、標準的なものに対する利点及び欠点、誤差の発生要因を説明できるとよい。

第 3 章：核データ評価のための原子核反応理論では、核データの評価に用いる標準的な理論を、第 2 章の実験と同様に利点及び欠点、各理論に関連するパラメータの決定法及びその誤差の発生要因を網羅したい。全断面積、弾性散乱断面積、弾性散乱外断面積の評価に必要な光学模型には、そのパラメータである光学ポテンシャル（グローバル、ローカル、フォールディング）が必要である。非弾性散乱を記述するのに必要な直接過程反応理論については、結合チャンネル模型（CC）、歪曲波ボルン近似（DWBA）、準古典歪曲波近似（SCDW）、軽核に用いる CDCC、Pick-up 反応、Knock-out 反応等を紹介する。統計模型（Houser-Feshbach 模型、蒸発模型等）に必要なパラメータとして、準位密度パラメータや γ 線強度関数（巨大共鳴公式）が挙げられる。前平衡過程に関しては、古典的な模型（核子に対する励起子模型、ハイブリッドモデル、GDH や複合粒子に対する岩本-原田-佐藤モデル等）から量子論的な模型（FKK、NWY、TUL 等）まで特徴を網羅できるとよい。共鳴公式については、分離共鳴領域、非分離共鳴領域、軽核について威力を発揮する R 行列模型等を紹介する。核分裂反応に関しては、核分裂障壁、核分裂当たりの放出中性子数 ν 、核分裂中性子スペクトル χ 、核分裂収率 FPY（Brosa モデル、森山-大西の式、片倉の式）を含む。この他、多体理論（核内カスケードモデル INC、QMD）、break-up 反応、熱中性子散乱則等について、取り上げたい。

第 4 章：核データ評価では、「なぜ核データ評価が必要か」に始まり、熱中性子断面積と共鳴データ、最小二乗法（GMA、Base 推定法）、誤差評価を含む共分散等統計理論関連のものを取り扱う。原子核反応理論のパラメータの推定や利用できるデータベース（EXFOR、ENSDF、RIPL、質量表と質量公式、その他）及び利用できる核反応コード（CCONE、R 行列、SAMMY、REFIT 等）についても記述できるとよい。

第 5 章：評価済み核データファイルと炉定数では、評価されたデータがどのようにまとめられ、ユーザに届けられるのかを記載する。評価済核データに関しては、各国のファイル及びフォーマット等について、簡単に紹介する。炉定数に関しては、簡単な炉定数またはライブラリー及びそれを利用するコードの紹介炉定数作成法（処理コード）について、FRENDY や NJOY の概要を紹介できるとよい。さらに、核データ及び核特性コードの信頼性検証のためのベンチマーク問題について、臨界（ICSBEP）、反応度等（IRPhE）、照射後試験（SFCOMP）、遮蔽（SIMBAD）等についても紹介したい。

第1章 核データの一般論

紹介または序論、以下の章の相関図

第2章 核データの測定

核データ評価の参考になるようにそれぞれ標準的な方法及び長所・短所、誤差の要因を含む)を記載。

共鳴領域:透過実験

散乱断面積: TOF

捕獲断面積: ANNRI

核分裂断面積: 鉛スローイングダウンスペクトロメータ、電離箱 (AC, MPAC 等)

反応断面積: 放射化法、放出粒子測定、HE 集積法等

スペクトル: カウンターテレスコープ、シンチレーション検出器、半導体検出器、GIC 等

その他: 核分裂収率 (FPY) 等

第3章 核データ評価のための原子核反応理論

光学模型: 光学ポテンシャル (グローバル、ローカル、フォールディング)

直接過程: 非弾性散乱 (CC, DWBA, SCDW, CDCC, Pick-up 反応, Knock-out 反応)

統計模型: H-F モデル、蒸発モデル、準位密度、 γ 線強度関数 (巨大共鳴)

前平衡過程: Exciton 模型、その他 (GDH, FKK, NWY, TUL, SCDW, 岩本-原田-佐藤等)

核分裂断面積: 核分裂障壁、 ν , χ , FPY (Brosa モデル, 森山-大西の式, 片倉の式)

その他: 共鳴 (分離、非分離、R 行列)、熱中性子散乱則、多体理論 (INC, QMD)、break-up

第4章 核データ評価

序論: なぜ核データ評価が必要か

評価方法: 熱中性子断面積と共鳴データ、GMA、Base 推定法、共分散等

原子核反応理論のパラメータの推定

利用できるデータベース: EXFOR, ENSDF, RIPL、質量表と質量公式、他

利用できるコード: CCONE, R 行列, SAMMY, REFIT 等

第5章 評価済み核データファイルと炉定数

評価済み核データ: 各国のファイル及び ENDF フォーマット

炉定数: 簡単な炉定数またはライブラリーの紹介、処理コード (FRENDY)

ベンチマーク: 臨界 (ICSBEP)、反応度等 (IRPhE)、照射後試験 (SFCOMP)、遮蔽 (SIMBAD)

図 2 教科書目次 (案)

4. おわりに

かなり雑駁になってしまったが、シグマ委員会で検討していた事項に筆者の私見を交えた人材育成について述べさせていただいた。上でも言及したが、「核データ学」の講座は大学には存在しない。できればこれを表に出せるようになることを期待した。これを通じて、単純な人材育成に留まらず、国内的にも国際的にもリーダーシップを取り、発言力を増していけるような「戦略的」人材育成につながれば望外である。関係各位のご指導、ご鞭撻をお願いしたい。

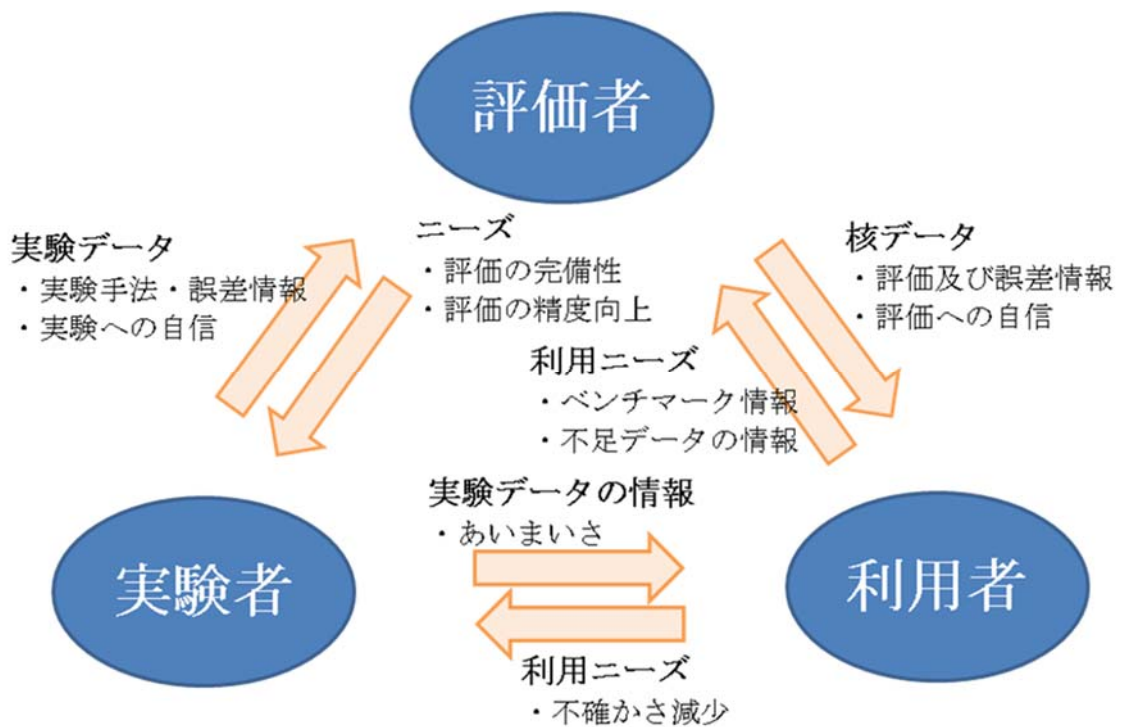


図3 各章の相関図 (例)