

会議のトピックス (III)

日本原子力学会 2008 年春の年会

核データ部会・「シグマ」特別専門委員会合同企画セッション

「我が国の核データ活動を展望する」 (1) 大学における核データ活動への期待

東北大学

サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター

馬場 護

babam@cyric.tohoku.ac.jp

1. はじめに

ご承知のように核データとは、中性子と原子の相互作用に関する核反応データや、原子、原子核の物理的諸特性を集大成したデータベースであり、放射線輸送コードとともに、原子炉や d-T 核融合炉、核燃料施設、加速器施設等の設計と運転に不可欠なものである。例えば、原子炉を設計する際に、臨界性はもとより受動的安全性を確保し、外部への放射線の漏洩を防止し、増殖炉の場合には適切な増殖比を達成するには、核分裂、捕獲、散乱、等の断面積と温度依存性、核分裂即発中性子数、同遅発中性子数、等多くのデータが高い精度で必要とされる。それを提供するものが核データであり、従って、核データは、原子力エネルギーはもとより核兵器等軍事面でも不可欠であるため、欧米各国、旧ソ連等において独自のデータファイルの整備が国家的施策として進められてきた。冷戦構造の崩壊とともに、軍事面での重要性は薄れたが、国家的エネルギーセキュリティの面での重要性は変わらず、各国は独自の核データファイルを整備し維持してきた。米国は一時、米国の核データファイル: ENDF を原則国外非公開にした時期もあった程度である。一方、核データは原子力平和利用の象徴的な存在でもあり、国際協力が IAEA を中心に早くから展開されてきた分野でもある。

必要な精度はデータの種類によって異なるが、最も高い精度が要求されるのが臨界性に直結する核分裂断面積と核分裂即発中性子数であり、後者の場合には要求精度は 1%以下と極めて高い。この高い精度や広範なデータをカバーするには組織的で高度な活動が不可欠であり、多くの人的資源と資金が投入されてきた。しかし、近年、各国とも核データファイルの開発維持にそれほどのマンパワーを割くことができなくなり、かつ取り

組むべきデータがマイナーアクチニドなど非常な努力や費用を必要とするものが多くなったなどの背景から国際協力がより積極的に進められるようになってきた。

このような従来の努力によって、在来型の原子炉や核融合炉に関しては、核データファイルの精度は基本的な要求を満たすようになってきたといえよう。しかし、さらにバランスのとれた設計や高燃焼度化への対応、マイナーアクチニドの利用、核変換などのためには、まだまだ多くの課題が残されている。また、近年、ADS（加速器駆動システム）、医療応用を含む加速器利用、中性子による電子デバイスの誤動作や損傷、等、中性子の関係する応用分野が拡大し、それらの解明と対策にも核データが必要となっている。

上に述べたことから核データ活動は優れて mission oriented なものといえるが、従来においても innovative な活動を使命とする大学が果たしてきた役割は大きく、それは今後も変わらないであろうと考えられる。本稿では、核データ活動における大学の果たすべき役割について私見を基に述べる。

2. 核データ活動と大学の役割

核データは、まず核種や同位体、エネルギー範囲、反応の種類、物理量等において必要な内容を網羅していること（ここでは完備性と呼ぶ）が必要であり、かつそれらのデータは要求精度を満たしていることが要求される。これには上に述べたように組織的な活動が継続的に行われる必要がある。そのためには人的資源と資金が必要であり、各国とも国立研究所がその中心的な役割を担ってきた。日本では日本原子力研究開発機構（旧、日本原子力研究所）が、米国では Brookhaven 研究所がそうである。

その意味では核データ活動の主役は国立研究所であり、大学の役割は脇役に過ぎないという言い方もできる。原子力のような巨大科学技術の場合には、どの分野においても多かれ少なかれこうした傾向はあるであろう。しかし実際には、日本の核データ：JENDL の開発整備において大学が果たしてきた役割には実に大きなものがあり、それなくして現在の内容と質を備えた核データファイルは不可能であったと言えよう。

具体的には、大学の果たしてきた役割として、1) 核データファイルの基礎となる新しい実験データの提供、2) 理論計算・評価手法の開発が挙げられる。核データファイル整備においては、実験データと理論計算を基礎に「正しい」データを推定する評価作業が中心となるが、必要精度は理論計算の精度を大幅に上回っているのが通常であり、実験データが重要な役割を演じる。

2.1 実験分野

原子力開発の初期から 70 年代まで、日本は catch up の時代であり、実験データも欧米とソ連に負うところが大きかったといえるが、80 年代に入って、大学、原研に加速器中性子源が相次いで設置され、「核融合特定研究」の科学研究費による後押しと相まって、

核データ測定が大学で非常に活発になり、国産核データファイル JENDL の高度化に大きく寄与した。

その例として、最初に阪大と東北大における中性子二重微分断面積の実験を挙げる。それまでは、熱中性子炉や高速炉を主な対象としたもので、中性子散乱については、離散的な散乱成分の角度分布と連続成分のスペクトルが分かればよいという考え方がとられてきたが、核融合炉で重要な 10MeV 以上の領域や ${}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, C 等の軽核の場合には、エネルギー分布が角度に強く依存するようになり、これを直接的に考慮したエネルギー角度二重微分断面積 (Double-differential cross section: DDX) が必要となってきた。

Fig.1 に ${}^7\text{Li}$ の例[1]を示すが、広い 2 次中性子エネルギー範囲にわたる測定が必要であり、中性子源や測定系の強化が必要であった。阪大と東北大でこれらの取り組みが行われ、世界をリードするデータが次々と生み出された。それ以前も DDX データが無かった訳ではないが、

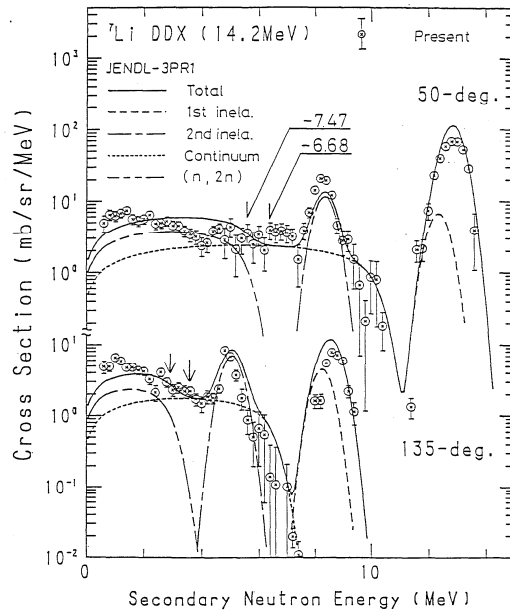


Fig.1: Double-differential neutron Emission Cross section of ${}^7\text{Li}$ at 14 MeV [1].

Fig.1 に ${}^7\text{Li}$ の例[1]を示すが、広い 2 次中性子エネルギー範囲にわたる測定が必要であり、中性子源や測定系の強化が必要であった。阪大と東北大でこれらの取り組みが行われ、世界をリードするデータが次々と生み出された。それ以前も DDX データが無かった訳ではないが、

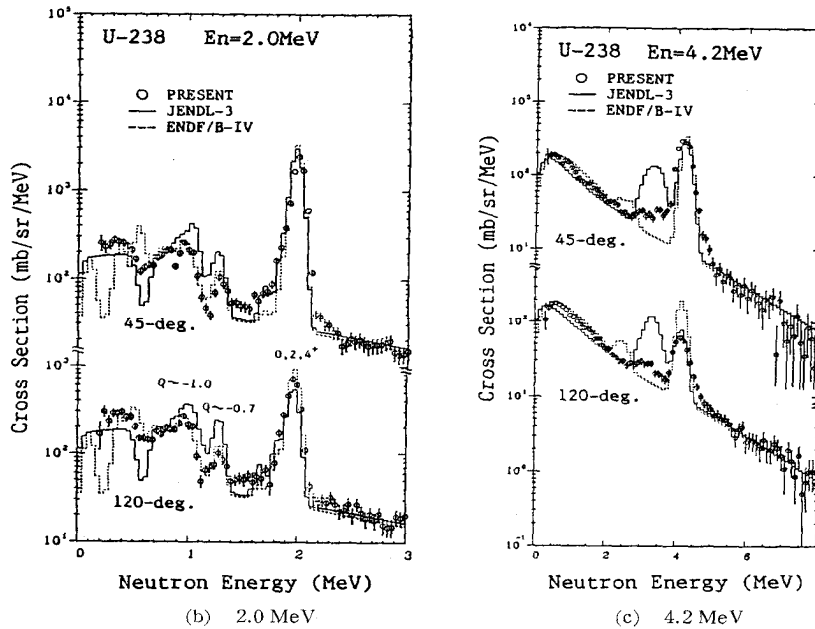


Fig.2: DDX of ${}^{238}\text{U}$ at 2 MeV and 4.2 MeV [2].

これらのデータは質的には明らかに一線を描くものであった。このようなデータはモデル開発や評価にも刺激を与え活発な時代が形成された。いくつかの幸運が重なってはいるが、大学における活動の典型としてあげることができる。これらの成果は核データ整備にも反映され、JENDL は、軽核の中性子散乱や中性子二重微分断面データに関して世界の先端を行くファイルとなった。Fig.2 に ^{238}U の例[2]を示すが、このデータも非弾性散乱断面積と中性子スペクトルデータの評価に大いに貢献した。中性子生成 DDX の測定は、GeV 及び数 10~100 MeV 領域における九大の系統的实验、数十 MeV 領域で東北大サイクロでの実験に引き継がれ、日本における特徴的な実験と位置づけてよいと思う。

もうひとつ、東北大でのグリッド電離箱を用いたヘリウム生成二重微分断面測定例[3]を挙げる。これは、検出器として Fig.3 に示す 4 π 型のグリッド電離箱を用い、20 MeV までの α 粒子を止める阻止能の達成、中性子照射に伴うバックグラウンドの抑制、 α 粒子と陽子の識別、などに工夫を凝らし、従来の測定法に比べて 2 桁近い高効率で α 粒子の DDX 測定を可能としたものであり、Fe, Ni, Cr, Cu などの主要構造材核種についてのヘリウム生成断面積データを与えた。

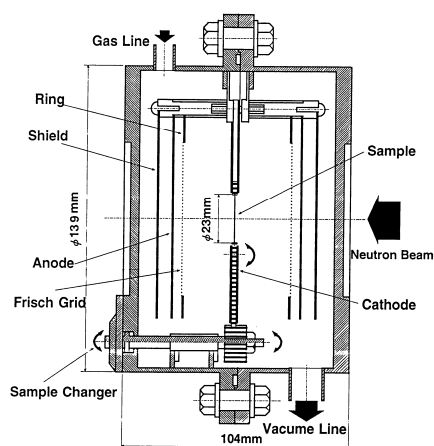


Fig.3(a): Gridded ionization chamber
Fr(n,x α) DDX measurement [3]

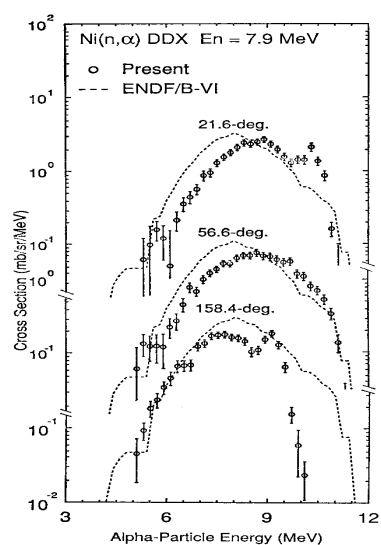


Fig.3(b): DDX of Ni(n,x α) reaction [3]

東工大においては捕獲断面積、捕獲 γ 線スペクトルに関する系統的实验が行われ、宇宙における元素合成に関連する軽核の捕獲断面積などについて、常識を書き換えるような成果が挙げられたが、これも中性子源から測定系までにわたって行われたさまざまな工夫によるところが大きいといえよう。また、京大原子炉実験所の電子ライナックと鉛スペクトロメータを用いて行われたマイナーアクチニドについての一連の实验も、不確かさの原因究明も含めて、日本に寄与が少なかったアクチニド核種に関して非常に重要な

成果を挙げた。これらの実験も大学の特色を生かした研究であり、JENDL を最も優れたデータファイルに押し上げることに貢献した。このほかにも、大学においては、荷電粒子生成、放射化、核分裂等に関しても一連の成果が挙げられてきた。

2.2 計算・評価手法の開発

過去の核データ評価は、主として実験値と計算値をにらみながら評価者の心眼によって評価を行うやり方で行われてきたようであるが、積分データからのフィードバックを可能にし、より客観性を高めるには、感度係数と数理科学的方法論による評価手法が必要となる。JENDL-3 の評価で重核に対して行われた同時評価は、このような advanced な評価の例として挙げられよう。核分裂や捕獲に関する共通の標準データを用いて得られたアクチニド核種データに対しては、個々に評価するよりは、複数をにらみながら同時に評価を行うのが効率的であり合理的である。この手法の基礎付けと道具の開発は九大が中心になって進められた[4,5,6]。このような、原理の整理や手法の開発はまさに大学が指向すべき活動の一つと考えられる。なお、共分散は、データのマージンの尺度として、また積分データを用いたフィードバックに際しても重要なものであり、JENDL-3.3 は共分散データが最も良く整備されたデータファイルとなっている。

また、大学が果たしてきた役割として、核反応モデルやモデルパラメータの検討がある。多段階統計モデルの開発、光学模型ポテンシャルの検討、簡易型歪曲波ボルン近似軽核 DDX のモデル化、などが九大、東北大、阪大等で行われ、JENDL の評価にも利用された。最近九大で行われている半導体のソフトウェア解析や検出器効率コードの開発も大学における研究として今後の発展が期待される。

3. 今後への期待

環境問題の深刻化とともに世界的に原子力の復調がすすみ、それに対応すべく核データの高度化も重要課題となっており、日本においては JENDL-4 計画が進められている。JENDL-4 においては、より高度化した原子力の利用や GEN-IV, ADS などの次世代型原子力システムが主な課題となり、さらに多面的な応用分野への対応等も要求されることになると思われる。

(1) JENDL-4 用データ

従来の核データがそうであったように JENDL-4 の最も重要な顧客はエネルギー分野であり、原子力エネルギーの高度化と拡大に必要なデータの充実、具体的には重要核種についてのさらなる精度向上と従来不確かさの大きかったマイナーアクチニド、及び高燃焼度化や核変換に伴って重要となる核種のデータが主な課題になると考えられる。

(2) 放射線利用分野への応用

放射線利用あるいは核データ利用分野では、宇宙核物理への寄与と連携、放射線治療

に関連した医学・ライフサイエンス関連分野、半導体ソフトウェア・材料損傷など放射線影響分野、有用アイソトープ製造に関連する分野、等が挙げられよう。これらへの対応を進めるには、実験及び計算・評価両面にわたって新たな開発的な取り組みが必要と考えられる。

3.1 実験面での取り組み

実験の面では、マイナーアクチニドなどの強放射能試料や微量試料に対する測定、不安定核に対する実験、重荷電粒子生成反応に関する実験、等が挙げられる。いずれも、強い中性子源と高度な測定手法を必要とするもので、まさに大学が開発課題として取り組むべき課題と考えられる。強力中性子源としては数年内に利用可能となる J-PARC の減速大強度ビームや東北大サイクロの ${}^7\text{Li}(p,n)$ 疑似中性子源等が利用できる。また、東工大、京大炉の中性子源を用いた実験においても、サンプルや実験手法の工夫によってこれらの課題への取り組みを期待したい。

大学の施設における実験は、落ち着いて工夫をしながら取り組める点で、教育あるいは人材育成の面でも重要と考えられる。このような環境は、下記に述べる大型施設におけるものと相補的なものとして、今後是非確保すべきものとする。

中高エネルギー領域では、中性子のみならず陽子に対するデータも重要で有効である。この面で、阪大核物理センター (RCNP) や理研サイクロトロンと実験装置を利用した実験の可能性が伝えられていることは幸いであり、その利用を積極的に考えるべき時期と思われる。RCNP については、九大グループが既に荷電粒子生成の実験の実績を有しており、これを例えば発展させて Fig.4 のようなフラグメント生成実験[7]なども含むような形に拡張することが 1 つの現実的なアプローチと思われる。また、理研の RI ビームファクトリでは不安定核に対する実験が期待され、宇宙核物理や核変換関連データに是非利用されることを期待したい。

また、J-PARC は中間エネルギー中性子ビームの供給源としても期待され[8]、核データや放射線工学への応用も大いに検討する価値があるものとする。

平成 14 年頃から進められている核データに関する電源特会事業は、大学と原子力機構の共同研究の形で進められてきた。今後予想される研究規模の大型化によってこの傾向が強まり、大学と原子力機構等々の境界が薄まることは考えられるが、教育や人材育成、innovative な研究という大学に期待される役割自体には変わりがないものと考えてよいであろう。

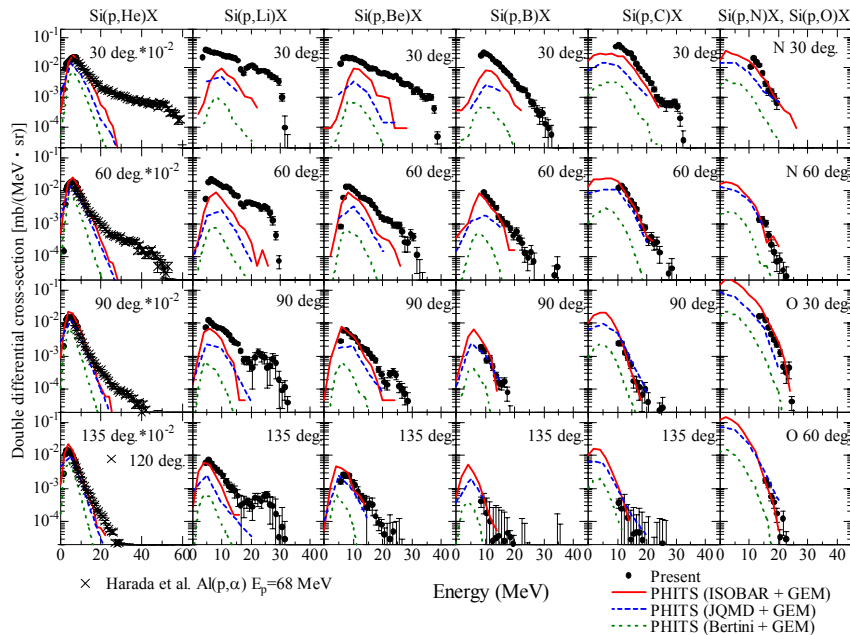


Fig.4: Si(p,x) fragment production data for 70 MeV protons [7].

3.2 計算・評価分野

計算・評価の分野においても、マイナーアクチノイド核種、不安定核種、中高エネルギー領域、核変換関連データ、放射線利用関連データ、等今後の重要課題の中で、大学に期待されるのはやはり新しい手法の開発とこれを通じた人材の育成であろうと考えられる。評価対象核種やエネルギー範囲の拡大には、新しいアプローチが必要であり、欧米で進められているような原子核物理グループとの協力が期待される。また、さらなる精度向上には、積分データを用いた断面積調整も不可避のように思われ、その手法の整備と感度解析、等の分野において大学の貢献が期待されるのではないだろうか。

このように、今後の核データ活動において大学が果たすべき役割には多くのものが挙げられるが、一方大学においては世代交代に伴う人材の減少、国立大学法人化に伴う成果主義の強化等、核データ分野にとって厳しい事態も進行している。成果主義はそれ自体否定されるべきではないが、現実には目先の成果のみが強調される傾向が見られることは近視眼的評価に結びつく点で問題と思う。こうした傾向は原子力や放射線利用における基盤的インフラである核データにとっては望ましくはないが、手をこまねている訳にもいかないため、基本的インフラとしての重要性を強調しつつ、具体的な応用にも取り組んでその重要性をPRする努力も必要であろうと思う。そのためには、医療、宇宙、原子力材料、遮蔽・放射線影響など放射線利用や放射線工学分野との協調を強め、具体的な成果を挙げ、それをPRすることも研究それ自体と同様に重要と思われる。

4. おわりに

以上、大学における核データ活動への期待を述べた。ここで述べたことは核データに限らず、広く原子力分野あるいは科学・工学全般について言えることのようにも思われるが、大学に期待される活動は、基礎的、基盤的観点からの手法開発、新しい実験手法の開発とデータの提供、解析、等の実施とそれを通じた人材の育成、とまとめられよう。

参考文献

1. S. Chiba, M. Baba, H. Nakashima, M. Ono, N. Yabuta, S. Yukinori and N. Hirakawa, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 22 (1985), 771-787
2. M. Baba, H. Wakabayashi, N. Ito, K. Maeda and N. Hirakawa, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 27 (7), (1990), 601-616
3. N. Ito, M. Baba, S. Matsuyama, I. Matsuyama and N. Hirakawa, *Nucl. Instrum. Methods*, A337, (1994), 474-485
4. Y. Kanda, et al., *Proc. Jot. Conf. Nuclear Data for Basic and Applied Science*, Santa Fe, 1985, p.1567 (1986).
5. T. Kawano, et al., *JAERI-Research 2000-004*, JAERI, (2000)
6. T. Kawano, et al., *Nucl. Sci. Technol.*, 37, 327 (2000)
7. M. Hagiwara et al., *Radiation protection Dosimetry*, doi:10.1093/rpd/ncm022
8. 鬼柳善明、他「大強度陽子加速器施設 (J-PARC) で期待される原子力科学」、日本原子力学会誌, 46 (3), (2004), 173-197