原子力における核データ

その歴史と展望

(法政大学) 中嶋 龍三

核データを整備することは、原子力開発研究の最も基礎的な問題である。範囲が広くていろいろ多面的様相をもっている核データ研究の分野を、本稿では核データ評価者の立場から解説する。

まず、核データ研究者が歩んだ道を歴史的に概観し、次に核データ評価の際にぶつかるいくつかの問題点を中性子断面積の例によって概説する。

I. はじめに

原子力における核データの意義については、すでに「本誌」上でも何回か述べられているので^①、ここでは主として、いわゆる“核データ屋”にスポット・ライトをあてるようにしながら、核データの生い立ちと核データ評価の問題を概観することにしよう。

1940年に Fermi が Berkeley を訪問した機会に、彼は Oppenheimer の学生の 1 人がしゃべっていたセミナーに出席したが、しばらくすると旧友の Emilio Segrè のところに戻ってきて「Emilio、僕は歳をとったものだ。Oppenheimer の学生達が展開するあんな高級な理論にはとてもついていけないよ。」というので、不審に思って Segrè がセミナー室に行ってみると、件の学生が議論の終りに「これが Fermi の β 崩壊の理論です。」といったそうである^②。この逸話によって物理学者としての Fermi や Oppenheimer を評価しよう、などという大それた気持はさらさらしないのだが、かつて(あるいは現在でも若干?)わが国の核データ評価者と核物理の、とりわけ理論屋との間にあったと思われる好ましくない^{しんがい}関を見るような気がする。

そもそも核データという分野は核データの生産、収集・評価、利用という 3 部門に大別され、それぞれ核データの生産者、評価者、利用者が分担するわけであるが、1 人で 2 部門あるいは全部門にわたって仕事をすることもあり得る。これら 3 者の相互関係は第 1 図のように表わされる。ここで特徴的なことは、核データの要求と提供を通して 3 者が切っても切り離せない密接な関係にあるということであって、これは核データという分野の歴史的宿命であるといえよう。ごく大ざっぱにいうと核データの生産者は核物理実験屋、評価者は核物理理論屋、利用者は炉物理・炉工学屋だとして、そのそれぞれは独立した学問分野だと考えてよい

かも知れないのだが、それぞれは他と全く無関係に存在して進歩し得たであろうか?

第 1 図 核データ分野の機能

往々にして理論屋は、数値を扱うのは泥くさい仕事だと思いがちである。でも核データ屋は数値データを扱う。だから、核データ屋をもって自ら任ずるような人は多くない。数値データを扱う場合にも、これを収集する仕事と評価する仕事とがある。往々にして核データ評価者ですら、データ収集より評価の方がやり甲斐のある仕事だと思っていた時期が、かつてわが国にはあった。しかし、収集の方法がよくなかったり不十分だったりすると、それに基づいた評価結果は無意味なものであるということが現在では十分認識されている。それでもなお、データ収集に本腰を入れて打ち込もうとする人は奇人な人だといってもよさそうである。

以下の概観では、核データの分野すべてを網羅することはとてもできないので、主として最も泥くさいと思われる核データの収集・評価の部門に的を絞り、また中性子断面積評価に重点をおくことにする。

II. 核データの歴史

1. 核データの誕生とその揺籃期

1942年末に初めて核分裂連鎖反応を進行させた頃の Fermi は、すぐれた核データ評価者であったというこ

Review of Nuclear Data Evaluation, Ryuzo NAKA-SIMA.

(1981年 5月6日 受理)

とはよく知られている。彼は、長ったらしい理論計算をしてから使用すべき中性子断面積の値を決定したということであるが、しかし、実験の面でも数々の経験をもっていた彼は、当時いろいろな人が行なった断面積の測定結果すべてに目を通し、それらを十分によく検討していたのではないか、ということが当時の人達の回顧録⁽³⁾などによってうかがえる。もしこの推測が正しいとすれば、現在と比べて問題にならないくらい量が少ないとはいえ、すべての実験データを収集し、それらを検討し、さらにそれらを理論計算によって補うという核データ評価の基本的処方を、40年前にすでに確立していたのがFermi だということになる。

意識的ではないとしてもとにかく Fermi が核データ評価の分野を開拓できたのは、もちろん理論的にも実験的にもすぐれた洞察力をもった彼の才能に負うところが大きいが、しかし多くの当時の研究者達が、国家的プロジェクトである原子力の開発研究に打ち込み、そして密接に協力し合っていたという背景もまた見逃せない。アメリカにおけるプラグマティズムの影響だといってしまえばそれまでだが、Science と Technology とを別のものとして切り離して考えるのではなく、Science and Technology という一つの研究体系とする考え方が第2次世界大戦を契機にして出現したといってよかろう。そして核データの研究は、Fermi の核データ収集評価を中心としてこの体系の中で、一つの分野としての地位を確保したのである。

中性子断面積の評価を Fermi が行なった初期の頃には、適用すべき体系が簡単だったというせいもあって、要求された核データは質的にも量的にも今日よりは厳しくなかったと思われる。理論計算をするにしても当時としては、標的核の構造を全然考慮せずに、これを半径と深さだけをパラメータとした球対称井戸型ポテンシャルでおきかえる模型(原子核は透明)で散乱断面積を計算するか、あるいは複合核(原子核は不透明)の蒸発模型で散乱とか反応断面積を計算するか策はなかったであろう(共鳴に関しては、すでに Breit-Wigner の式が提出されていた)。したがって、当時の核データ評価者は結局は収集した測定データを基にして、実験値のないエネルギー点や核種についての断面積を求めるのに理論計算を行なったのである。

2. 核データの思春期

核データ利用者の要求に応じて、それまで測定されていなかった核データが徐々に生産され出すと、従来の計算法ではどうしても実験値を再現できないということが明らかになってきた。そして、原子核は半透明

であるとする光学模型(複素屈折率をもち込む)が高エネルギー中性子の散乱解析に適用された⁽⁴⁾。これは、当時の原子力開発に必要な核データよりもっと高エネルギー領域で主として適用されたのであるが、しかし光学模型の有用性を示したという意味で重要な踏台であるといえよう。その後 Barschall が ^{238}U までの数10核種に対して3 MeVまでの中性子全断面積を測定したが⁽⁵⁾、これは標的核の質量数とともにゆるやかに変化する系統的な断面積のエネルギー依存性を示しており、当時の核データ評価者に大きな衝撃を与えた有名な実験である。この Barschall の実験結果に挑戦したのが、上記の光学模型を改良した光学ポテンシャル模型⁽⁶⁾(複素ポテンシャルをもち込む)であって、今日では「光学ポテンシャル模型を知らずんば核物理屋に非ず」といわれるくらい、核物理研究の基本的手段の一つとなっている模型の誕生となったのである。

Barschall の実験が核データ分野に深刻な波紋を投じた1950年代の初期の頃は、実験技術もかなり進歩してきて、その他にもいろいろ問題になった核データが多数生産された。わが国でも1940年以前の菊池、伏見、青木(後の熊谷)氏の先駆的研究の伝統を受け継いで、若槻、杉本氏が中性子の全断面積や非弾性散乱および捕獲反応からの γ 線の測定を行なって、標的核の質量数に関するそれらの全体的傾向を論じたのはこの時期であった。核データ評価の理論面では、複合核が崩壊して残留核のある特定の状態に行く場合の解析法として、これも今日なお核データ評価の際によく使われている Hauser-Feshbach の理論⁽⁷⁾が現れて、特に非弾性散乱角度分布の評価にその威力を発揮した。

こうして、1940年代初期に発足した核データ評価研究は、10年後には、核データ生産の急速な進歩に対処するために新しい評価手段の基礎を整備したので、次の発展が大いに期待されるようになったのである。

3. 核データの成熟期

ところが、1950年代の初め頃から中頃にかけて、いわゆる直接反応過程が核物理屋の関心の的になり始めると、原子力開発研究を意識しない核物理の独り歩き傾向が強くなってきた。もちろん、学問進歩のためにはこれは必然的な成行でありむしろ喜ばしいことであって、批難したり慨嘆したりすべきことではない。事実核物理はこれからさき長足の進歩を遂げたのであるが、これはまた核データ分野の進歩でもあるといえよう。ただ核データ屋の立場からすると、核データの生産者、評価者、利用者の間のつながりが非常にうすれてきたような気がしないでもない。

しかし現実にはこの時期に、中性子核データの分野において重要な動きが芽生えていた。それは、とりわけ核データ収集の面で顕著であった。その1つは、今日では国際協力のもとに行われている中性子核データ文献索引CINDA(Computer Index of Neutron Data)の誕生である。これは、Goldsteinが彼の仲間達と個人的に収集していた文献目録であって、1956年にその第1輯が他の核データ屋にも利用できるようになった。もう1つは、Brookhavenの収集グループが営々としてまとめた断面積データ集BNL-325が世に出たことである。

1960年代に入ると、電子計算機利用の普及によって核データ評価は急速な進展をみせることになる。同時にまた核データ屋の国際的サロンが、OECDの核エネルギー機関のもとには欧米核データ委員会(現在のNEANDC)として、IAEAのもとには国際核データ委員会(現在のINDC)として設けられ、第1図に示した核データ分野における機能が国際的規模で維持されるようになった。わが国では、1963年に本学会に現在の「シグマ」特別専門委員会が設置されて核データ評価作業を開始し、現在に至っている。1960年代以降の核データ分野の動向については、大体2年ごとに「本誌」上に載った同委員会の報告に詳述されているし、また国際委員会や国際会議などの様子も「本誌」上で報告されているので、それらを参照して頂きたい。

4. 崩壊核データの略史

原子力における核データというときには中性子断面積以外にもいろいろな核データについて述べなければならない。その中で、1940年代から問題になったものとして核分裂生成物の崩壊熱評価がある。ここで必要になる核データは、崩壊定数(寿命)、崩壊当りに放出される β 線や γ 線の平均エネルギーおよび核分裂生成物の収率である。測定データの乏しかった1940年代に、Fermiが断面積データを理論計算で補ったと同じように、崩壊核データの系統性を調べ統計理論を適用した崩壊熱の計算が行われた⁽⁸⁾。そして、これを主な契機として崩壊核データの収集評価活動が開始され、SeaborgらのTable of Isotopes, SullivanのTrilinear Chart of Nuclides, WayのNuclear Data Sheetsから始まり、核構造研究の華々しい発展と相俟っていろいろな収集評価活動が今日まで活発に続けられている⁽⁹⁾。

Ⅲ. 核データの収集・評価

核データ評価者が実際に評価を行う際の手順は、実

験データ(関連のあるデータも含めた)の収集、収集した実験データの検討、実験データを基にしてシステムティクスや理論計算を駆使した核データの評価、評価済み核データの推奨、であるといえよう。しかし、これらの間に明確な境界があるわけではない。それぞれの段階での問題点をいくつか挙げてみよう。

1. 実験データの収集

最近では、例えばOECD核エネルギー機関の核データ・バンクなどのように国際的なデータ収集活動が行われ、利用者や評価者はそこから測定方法や測定条件の記述とともに数値データを入手することができるので、非常に便利になった。しかしこのことはまた、評価者が実験データの検討や数値データが物語る内容を汲みとることをおぼなりにする、という弊害を生むおそれなしとしない。国際的なこのような収集活動に貢献しているのは、各収集センターで作業している核データ評価者であるが、また個々の核データ生産者自身でもあるはずである。しかしもし分業化が進んで、評価者に収集したデータを提供する「収集屋」というものができたとすると、ちょっと首をひねらざるを得ない。

核データ収集の段階では、論文に記述がない実験条件とか、グラフ化された測定結果の実際の数値とかを直接生産者に提供依頼をするわけであるが、100%その依頼に応じて貰えない場合もある。また、学術雑誌の編集方針によっては数値データの表が削除されることもしばしばあるが、これは核データ屋泣かせの最近の風潮であるといえよう。

2. 実験データの検討

収集された実験データの中には、同一実験者によって測られた同じ核データの数値が2つも3つも含まれていることがしばしばある。以前のデータを改訂したことが明らかな場合には、それだけの評価のためのデータとして採用することは当然であるが、それが判然としない場合が多い。これらを独立の実験データとみなすか否かは非常に難しい問題である。例えば、異なる実験条件で測定した数値とそれらを平均した数値とを一つの論文にしている人もあれば、異なる実験条件で測定した結果を別の論文としている人も非常に多い。前者は1つのデータであり、後者は複数のデータであると即断してよいものだろうか？

また、検討すべきことの例として絶対測定と相対測定の問題がある。中性子断面積の相対測定の場合には、通常よく調べられている標準断面積の値が基準値として使われるのであるが、必ずしもそうだとはいえない。そうすると、生産者が基準として採用したある

反応の断面積までも評価して、これに実験値を規格化し直す必要があるということになりかねない。核データを検討する場合には、生産者が提供したデータの数値を変えてはならないということは当然であるが、基準値の変更に伴う再規格化は許されてもよからう。その他にも明白な理由によって数値を補正したくなる場合もあり得ようが、そのときには、うるさいことをいえば原著者の了解をとって補正を行うべきである。

3. 核データの評価

測定データが沢山ある場合には、それらの実験誤差を重みとした荷重平均とか最小自乗法によって評価値を決定するのが普通である。この際、他の多くのデータに比べて明らかに著しく外れたもの(第2図の点線で囲んだデータ)は除外すべきであろう。もちろん、原論文を十分検討して除外すべき理由を見出す努力を、評価者はしなければならない。また、比較的狭いエネルギー範囲に1人の測定者のデータが集中している(第2図の破線で囲んだデータ)ような場合に、重みつき最小自乗法を単純に実行してよいかどうかきわめて疑問である。さらに第2図をみると、中性子エネルギーが15 MeV以上で実験値は明らかに2つのグループに分かれている。もし破線で囲んだ問題の実験点を除いて単純な最小自乗法を適用すると、おそらく曲線は両グループの中間を通り、その上には実験点はほとんどないに違いない。このような曲線を評価結果として推奨したがる評価者は少なくない。

評価はあくまでも実験データに基づいてなされることが望ましいが、上の例のように実験値相互の間の大きな食い違いに直面することはしばしばある。このとき評価者は、補助手段として理論計算の結果を考慮する必要がある。ところが理論模型は通常、いくつかの

第3図 ^{27}Al の 2.211 MeV 準位に対する非弾性散乱断面積⁽¹⁰⁾

パラメータを含んでいる。したがって、最もよいパラメータを決めるためには、当面の反応以外の反応も同時にとり上げて、ある核種についてすべての中性子断面積が矛盾なく再現できるようにしなければならない。パラメータの決定は、利用者から要求されている、例えば断面積という核データを評価することと全く同じ、一つの評価作業である。第3図の実線は、他の反応断面積や角度分布の実験値に合うようなパラメータを使って計算したものである。十分なパラメータ評価の結果だとは思いますが、実験値とかなりずれている。あるエネルギー点での測定値に規格化すべきであろう。

個々の中性子断面積など、いわゆる微分(または微視)核データは炉定数化され、実際の体系に応用される。この実際の体系での実験(積分実験)を通して、評価済み微分核データの妥当性についての重要な情報が得られる場合が多い。“積分データによって評価済み微分核データを修正する”という問題が一時期大分議論されたことがある。現在でも、評価者の間で完全な意見の一致が得られていない、といってもよからう。積分実験データが重要な核データの一つであるということでは、意見はほぼ一致しているのだが、積分データを補助の情報と考える保守派と、微分核データと同格に扱うべきだとする進歩派とに、現在の核データ屋を色分けすることができそうである。

第2図 $^{63}\text{Cu}(n, 2n)$ 反応の励起関数⁽¹⁰⁾

4. 推奨する評価済み核データ

核データを評価する際にはまだいろいろな困難にぶつかるが、とにかく評価者は利用者の要求に応じて評価済み核データをつくり上げる。しかし人間である評価者が推奨する評価値は、神様だけが知っている本当の値、すなわち真値とは必ずしも一致しない。なぜならば、測定には必ず実験誤差があり、理論計算には近似やパラメータ等の不確定要素が必ず存在するからである。したがって、評価値は何パーセントかの不確かさをもっているということを、利用者は十分に認識すべきである。評価者としては、真値はこの不確かさの範囲内にあると胸を張っていいたいのだが、それとても断言できないところに、真値なるものを知るよしもない人間核データ屋の悲しさがある。

この不確か度をなるべく小さくして評価値をもっともらしいものにするためには、多くの核データ生産者にいろいろな方法で測定して貰う必要がある。第4図の破線は1970年代初期に推奨された評価曲線であって、当然のことながら当時利用できた唯一の測定データを忠実に追っている。ところが1975年以降に測定された実験点はすべて、この評価値より高く出ている。評価者はこの断面積を再評価して新しい評価済みデータを推奨すべきであるが、利用者がもし、評価値というものはあまり信用できないものだと思い込んだとしたら、評価者としては浮かばれない。

IV. おわりに

わが国において核データ評価活動を組織だてて開始して以来、20年近くの間核データ屋はいろいろな経験をし様々な苦勞をなめたが、その成果もまた特筆す

第4図 ^{151}Eu に対する中性子捕獲断面積⁽¹¹⁾

べきものがあつた。ところが、核データの評価には核実験、核理論および応用の面でのかなりの知識を必要とするにもかかわらず、それぞれの分野からみればその成果は非常に地味で、核データ評価で学位を取得することは容易なことではないらしい。したがって、若い人たちにとって核データ評価は魅力的な仕事とは思われていないようである。ここに、現在の核データ屋の最大の悩みがある。核データの歴史の中に“核データの老齡(衰?)期”をつけ加えることを是非とも避けたいのである。しかし将来の見通しに対して希望が全くないわけではない。それは、核データ生産者と利用者の中に、核データ評価にも積極的に取り組もうとする若い人たちが現れ始めていることである。

核データ分野は中性子核データや崩壊核データだけでなく、いまでは荷電粒子核データや高エネルギー反応核データをも包括している。また、核データの姉妹分野である原子・分子データ分野も着実な発展をみせている。このような情況の下で今までの核データ屋は、関心と能力とがあれば別だが、先取りしようなどという不純な気持ちでむやみに先輩づらしたり浮気したりすることは慎むべきであろう。現状では利用者の要求が十分に満たされているとは必ずしもいえないし、また、データの信頼度とか相関とかの問題で統計的処方をもっと勉強する必要も生じている。核データ分野の生い立ちを顧みて核データ屋本来の立場を自覚して、地道な研究を続けることが大切であろう。

—参考文献—

- (1) 例えば、百田光雄：原子力誌，21[1]，3 (1979)。
- (2) “A Random Walk in Science”，(Compiled by WEBER, R.L.)，p 169 (1973)，Crane, Russak Co.
- (3) 例えば、FRISCH, O.: “What little I remember”，(1979)，Cambridge Univ. Press.
- (4) FERNBACH, S., SERBER, R., TAYLOR, T.B.: *Phys. Rev.*, 75, 1352 (1949).
- (5) BARSCHALL, H.H.: *ibid.*, 86, 431 (1952).
- (6) FESHBACH, H., PORTER, C.E., WEISSKOPF, V.F.: *ibid.*, 96, 448 (1954).
- (7) HAUSER, W., FESHBACH, H.: *ibid.*, 87, 366 (1952).
- (8) WAY, K., WIGNER, E.P.: *ibid.*, 73, 1318 (1948).
- (9) 田村 務：原子力誌，22[12]，836 (1980)；松本純一郎：同上，23[5]，303 (1981)。
- (10) ASAMI, T., TANAKA, S. (ed.): *JAERI-M* 8136, (1979)。
- (11) YAMAMURO, N., ASAMI, A.: *Proc. Specialists' Meeting on Neutron Cross Sections of Fission Product Nuclei*, p 19 (1979)。