



シグマ委員会 60 周年にあたって

ーシグマ委員会 60 周年に寄せてー

ロスアラモス国立研究所

河野 俊彦

kawano@lanl.gov

40 周年に寄せた不惑記事を執筆した 2003 年は丁度日本を出国した年で、今年で在米 20 年、拙稿は知命記事を通り越して耳順記事となります。私が JENDL に直接関与したのは 1990 年代の JENDL-3 のみで、その後の JENDL の大きな飛躍はもっぱら海外から眺めてきました。過去の周年記念号には名だたる面々が執筆者に連なっており、本来私はこのような記事を執筆する立場には無く、率直に言って「外野の声」ですので、現場を分かってない等にご容赦願います。

この 20 年間、核データ開発を取り巻く環境は大きく変化したところもありますが、その根幹は比較的ゆっくりな進展を続けているように見えます。20 年以上前のこと、現状の核データライブラリのクオリティは十分高く実用上問題ない、これ以上何もすることは無いという声は既に聞こえていました。限定された応用範囲であれば、あながち極端な意見とも言えなくありませんし、実際ライブラリの利用範囲を広げることを次世代核データライブラリの目標の一つに据える傾向は当時からありました。しかしながらライブラリの性能を決定づける主要重核ですら未だに世界で改良が続けられており、応用計算の予測精度向上が原子核エネルギー利用のコストを下げることに繋がるので、この状況はもうしばらく続くと思います。

変化の一つに開発体制の集中化があると思います。私自身渡米前に提言したことで、かつての大学・企業・研究所からのボランティアによる共同開発体制から核データセンターを中心としたプロジェクトへの移行が、技術と資産の継承や海外との競争力維持において大きな役割を果たしているようです。自分がまだ博士課程を修了したばかりの頃、JENDL の強みは梁山泊的な多様さにあると聞かされてきましたが、これはプロダクトの品質を短期間で上げる足かせにもなってきます。そもそも大学人であった自分がこのようなことを言うのは甚だ差し出がましいのですが、実際に重核評価グループを担当した者としての率直な感想です。私が評価に用いたツールやデータは、ライブラリ完

成後全て JAERI(当時)に残して来ましたが、必ずしも全員がそうしているとは限らないし、そもそもそれを請わなかったということもあります。過去の数値だけは残るものの、それを誰にも再現できないケースは当然出てきます。全評価ツールを残したところで、各人それぞれ全く別の方法で作業していれば、これも次世代へ技術を伝えるのは困難です。労力やコストの分散の利益を差し引いても、評価体制の集中化は時代の趨勢として自然な流れだと思えます。

それからもうひとつ、JENDL のみならず世界の核データライブラリの共通の傾向として、全面的に計算を採用した評価が主流となっています。核反応モデル計算によるデータ評価の利点は、測定データの無い領域への内外挿、現実的な模型パラメータを用いての未知の反応断面積推定、測定の困難な粒子散乱角度分布やエネルギー分布など多岐にわたります。JENDL-3 時代も GNASH 計算が広く活用されていましたが、最大の問題は核分裂で、当時日本で用いられていたのは核分裂計算ができない版でした。核分裂断面積だけなら実験データのみを用いた独立の評価が可能です。しかし統一的に全チャンネルを評価するには、どのみち核分裂も同時に計算しておく必要があります。この状況は JENDL-3.3 公開以後劇的に改善されたようで、岩本修氏の CCONE コード計算を全面的に採用した JENDL Actinoid File は大きな衝撃でした。その後の JENDL-4 の多くの重核データが ENDF へ取り込まれていることから、この手法で評価されたデータの質の高さを知ることができます。

評価に特別な技術が必要とする共鳴領域は別として、20 MeV までの完全な評価データファイルを作成することができるコードは、90 年代既に幾つか存在していました。後発の TALYS も 2010 年頃には ver.1.0 としてリリースされています。2000 年以後 LANL でも新しい GNASH の開発計画がありましたが、遅々として進まないのに業を煮やし、九大時代の自作コード CoH を刷新して CoH₃ とした経緯もあります。若手研究者からは FORTRAN は読めないという声も出てくる時代です。過去のコードの大半は古い FORTRAN で書かれているのに対し、CCONE と CoH₃ は C++ で書かれています。同じような機能を持つコードを作成するのは車輪の再発明のようにも見えますが、決して無駄なことではなく、自分が何を計算しているのか、どの情報をデータユーザに提供しているのか、何が足りないのか、そして如何に新しい物理を取り込むのかを知る最短距離となります。そしてもう一つ重要なのが、データの再現性にあります。

かつて細かな数値の調整が手作業で行われていた時期もありました。ある断面積を少し減らして他を少し増やす作業を簡単なプログラムを書いたり表計算を用いたり、評価と言えば評価らしい作業ではあります。しかしこのような手続きを反復することは本人ですら煩わしく、ましてや他人の手ではほぼ不可能です。一步進めて GNASH を使った断面積計算でも、捕獲断面積だけは CASTHY や CoH で計算したりと、やはり同じ作業を簡単には再現できません。全てを模型計算に頼る最大の利点は、何度でも同じ結果を

出せる再現性にあります。コードと入力データさえあれば、誰が計算しても全く同じ結果が得られます。勿論コードそのものも改良されていくので常時完全に一致する結果になることはないでしょうが、入力データとポストプロセスさえ記録されていれば、ほぼ元通りのファイルが再現されます。この結果を逐次改善していくのは造作ないしミスも起こりにくいので、効率並びに品質保証の観点から、このような手法が主流になっています。TALYS 計算によって作成された TENDL はある意味この路線の究極な形とも言えますが、実用的なライブラリとして JENDL Actinoid は先鞭をつけたと言えるでしょう。模型計算コードの開発と評価への全面的な採用は通常の中性子入射データのみならず、さらに広い範囲で主流となっています。実験データの少ない光核反応データ評価や、複数の過程が混在する重陽子反応など、現代の核データでは模型計算が不可欠です。軽核のデータ評価や中重核の低エネルギー領域では共鳴解析が必要で、歴史的に JENDL はこの領域に弱いことが指摘されていましたが、國枝氏が開発した R 行列解析コード AMUR はこの技術の欠落を埋めました。

少々手前味噌ではありますが、統計理論の核分裂収率データへの応用にも触れておきたいと思います。核分裂収率計算には実験データの系統性に基づく経験モデルが長らく用いられてきましたが、この方法の最大の弱点は実験値の無い領域への外挿性にあります。特に収率のエネルギー変化の推定はかなり心許ないものです。そんな状況のなかで、近年原子核反応コードの核分裂後の物理量計算への応用が盛んになってきました。Monte Carlo を用いるグループと決定論的に計算するグループがありますが、収率評価に向いているのは乱数を必要としない決定論グループで、CoH₃ (BeoH)、CCONE、TALYS がこのような計算を可能にしています。こういったモデル計算では核分裂収率のみならず、即発並びに遅発中性子数、中性子と γ 線のエネルギースペクトルなど、過去には独立したモデルで計算評価されていた物理量が全て同時に計算される利点があり、近年の核データ研究で注目すべき大きな成果の一つと言えるでしょう。現在核データライブラリは核分裂収率データを熱領域、高速領域、そして 14 MeV の 3 領域のみで与えています。評価に利用できる実験データがその領域に偏っているためですが、それらエネルギー点間を直線補間して値を得ることは推奨されません。統計理論計算を応用すれば、収率データや遅発中性子数を入射中性子エネルギーの関数として表すことも可能で、重核データ評価に対する強力なツールとなり得ます。

コード開発を伴うデータ評価方針には目的達成の作業だけではなく、先端科学の発展に自ら関与する「おもしろさ」が常にあり、若手研究者をこの分野に惹き付けるのに必要不可欠です。原子核を核子の多体型とみなす微視的理論も、核データ評価応用に実用的なレベルになりつつあります。近年の大きな成果の一つとして、中性子捕獲断面積や非弾性散乱計算への QRPA (Quasi-particle Random Phase Approximation) の適用があります。例えば中性子捕獲断面積計算は、そのままでは実験値を再現しないと経験的に知られて

いましたが、原子核の変形を考慮した微視的模型計算はこの困難を克服しそうです。特に嘗てはまるで計算が合わなかった重核での中性子捕獲断面積が、今ではかなりの精度で予測できるようになっています。長年の謎であった 14 MeV DDX データと模型計算の齟齬も、QRPA によって原子核の変形が前平衡過程を増やす効果として解釈されています。さらに β 崩壊への応用により、遅発中性子や γ 線のエネルギースペクトル計算など、崩壊データライブラリの高精度化も期待できます。原子核構造の微視的理論と反応計算の融合は、近年の刺激的なトピックスとなっています。勿論「おもしろさ」だけを追求しては高品質なデータをユーザに提供するという最大の目的が疎かになるので、その匙加減が重要なのは言うまでもありません。

アメリカでの仕事環境にどっぷりと浸かっていると、**capability** という英単語がしばしば聞こえてきます。渡米以前は全く使うことは無かったか、あるいは **ability** と同義程度に感じていましたが、**maintaining capability** はこちらでは非常に重要視されています。計算コードを作成しそれを保守すること、過去の作業を再現できること、新しい問題に対応できる能力を保持すること。核データ開発の学際的な側面と相まって、この単語の意味を改めて考えさせられます。**capability** は一旦失われてしまうと、再度確立するには多くの労力が必要となります。核データライブラリが核技術開発の礎として存在する以上、技術の継承は最重要課題と捉えるべきでしょう。忍術が記述された昔の巻物は、現代のソースコードに他なりません。他人が意見するまでもなく、現代の核データ開発は理論計算にさらに軸足を移した流れとして続くでしょうから、きっとあちこちに「おもしろさ」が隠れているはずで