

企画セッション (核データ部会・「シグマ」調査専門委員会共催)

「核データ部会 20 年間の歩みとこれからの 20 年」

(3) 私の夢見る 20 年後の核データ研究 —測定研究を通して—

日本原子力研究開発機構  
原子力基礎工学研究センター  
木村 敦  
[kimura.atsushi04@jaea.go.jp](mailto:kimura.atsushi04@jaea.go.jp)

1. はじめに

20 年というのは長いような短いような微妙な時間である。これが 100 年先の未来を予想しろという話であれば、「核データの不確かさは工作精度に比べて十分に小さくなり、工学的に無視できるようになっている。」とか「実験ができない短寿命核や測定困難な反応でも原子核理論からの計算により実用上は問題のない精度が達成できている。」という感じで、大風呂敷を拵けておけばよい。(そもそもその時には私は死んでいるので、少々言い過ぎてしまっても何の問題もない。) 逆に 5 年先の未来予想であれば、現在の実験装置や計算機の能力、各研究グループが申請しているプロジェクトの内容から実現範囲が大きく制約されるため、予想の確度も高くなる。

一方、20 年という時間は、計画を立案し、予算を獲得し (これが最大の山であることは言うまでもない。)、それを実行できれば大きな進展がみられる長さである。また、何事もなければ私もまだ現役でいる可能性が高く、無責任に大風呂敷を拵げることもできない。とはいえ、現状の延長線上のことだけを述べても、それは夢でもなんでもない。そこで、筆者が考える 20 年後の核データ測定を楽観的に予想する。

なお、自分のこれまで研究の経歴から、話の内容が中性子核データに関する夢に偏っていることは御容赦いただきたい。

2. 20 年後の核データ測定の予想

- ① 「核データを利用する計算コード (モンテカルロ計算など) に核データの不確かさが取り込まれ、核データに起因する不確かさが広く認識されるようになる。」

近年、原子力分野以外の医療、加速器工学などの分野での核データの利用が急激に広がっている。しかしながら、モンテカルロ計算などの計算コードを介して核データを利

用しているユーザーの皆様が、核データの不確かさについてどれくらい理解しているかははなはだ不安である。原子力関係の研究者には核データには不確かさがつきものであり、それが工学的に無視できない場合もあるのは当然のことと理解しているが、原子力以外の多くの分野の研究者は「核データにも当然不確かさはあるがアボドガロ定数のように工学的には十分無視できるほど小さい」と誤解しているのが現状だと思われる。

表 1. アボガドロ定数の測定値抜粋[1,2]

太字：ノーベル物理学賞受賞者

年代	著者・機関	$N_A \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	不確かさ (%)
1865	Loschmidt	0.193	-----
1890	<b>Roentgen</b>	7.00	30
1890	<b>Rayleigh</b>	6.08	1
1901	<b>Planck</b>	6.16	1
1908	<b>Perrin</b>	6.70	30
1909	<b>Rutherford</b>	6.14	6
1911	<b>Einstein</b>	6.56	30
1917	<b>Millikan</b>	6.064	0.6
1941	Birge	6.02283	0.01
1974	NBS (米)	6.0220943	0.0006
1994	IRMM (EU)	6.0221365	0.00008
2017	国際 Project	6.022140526	0.0000012
2017	AIST (日本)	6.02214078	0.0000024

※アボドガロ定数は 2019 年の SI 単位の再定義で誤差を持たないアボドガロ数となった。

旧定義：モルは、0.012 kg の炭素 12 に含まれる原子と等しい数。

新定義：モルは、物質量の SI 単位であり、厳密に  $6.02214076 \times 10^{23}$  の要素粒子を含む

表 1 にアボガドロ定数の測定値の年代変化をその測定値の不確かさと併せて示す。表中の著者名が太字で示されているのがノーベル物理学賞の受賞者であり、レントゲンに始まり、アインシュタイン、ミリカンまでそうそうたるメンバーが名を連ねている。(こうして並べてみると、我々が高校で習ったミリカンの油滴実験は不確かさを一気に 50 分の 1 にしたエポックメイキングな実験であることがわかる。) 現状の核データの精度は反応にもよるが 1~数十%程度であり、アボガドロ定数で見た場合、第一次世界大戦 (1914 年~1918 年) 前の不確かさである。一方、世間の人たちの持っている

核データの不確かさのイメージは第二次世界大戦（1939年~1945年）後の0.01%以下のイメージではないだろうか。我々からすると、アボガドロ定数のような1個の値であらわされる物理量と、中性子エネルギーなどとの相関がある核データとでは測定の困難さの桁が異なるのは自明であるのだが、一般のユーザーにそのような感覚はなく、同じく物理量であるということもあり、アボガドロ定数程とは言わないが十分な精度はあるという感覚である。実際、筆者は大学院まで放射線計測の研究をしており、モンテカルロシミュレーションを始めた使ったのは修士課程時代、放射線検出器の設計のためであるが、その際、体系の入力に気を使った覚えはあるが、核データの不確かさを意識した記憶は全くない。

いったいなぜこのようなことが起きてしまうのであろうか。モンテカルロ計算などの計算機シミュレーションを行った際に検討すべき不確かさは、統計誤差、入力体系を記述した際に発生する不確かさ、核データに起因する不確かさの3つに分かれる。この内、統計誤差はシミュレーションコードの実行結果に示されるのでユーザーはその大きさを把握している（不足していれば計算時間を増やせばよい）し、入力体系に起因する不確かさはユーザー自身が計算体系を入力しているので近似による不確かさが発生しうることを理解している。しかしながら、核データに起因する不確かさはどこにも表されず、かつユーザー自身がその不確かさを十分に小さいと考えているため、核データに起因する不確かさを全く気にしないと考えられる。

この結果、核データに起因する不確かさが無視できず問題になる場合でも、ユーザーがその存在を認識できず、我々に核データに関する要望や問題点がフィードバックされない状況となっている。

よって、筆者の第一の予言かつ夢として「20年後には計算結果に核データ起因の不確かさが表記され、利用者がその大きさを認識し、我々にフィードバックが戻ってくるようになる。」というのを挙げる。

もちろんこうなるためには、計算コードの開発者の多大な協力が必要だが、核データ側でも、

- ほとんどすべての核種（特に安定核）・反応に対する不確かさの評価
- 中性子だけでなく、陽子や重陽子に対するデータの整備
- 不確かさ評価のため実験データの少ない核種・反応に対する測定

が必要になると考えられる。

## ② 「希少な放射性試料が国内で生産されるようになるでしょう。」

核データの測定実験では希少な放射性試料の入手が大きな課題となっている。現状では国内で放射性試料を作成するルートはほとんどなく、試料のほとんどを海外から購入している。このため、放射性核種の測定研究を立ち上げようとしても、測定しよう

とする核種が購入できるか否かで大きな制限がかかる。一方で、海外を見た場合、核データの測定研究プロジェクトの中に試料作製のための放射化学のグループ（PSI や JRC-Geel 等）が参画しており、供給される試料にある程度の制限があるもののプロジェクトの中で放射性試料を製作する体制が整っている。

よって、筆者の第二の予言かつ夢として「**20 年後には放射化学のグループとの協働が進み、日本国内で放射性核種を使用済み燃料から分取し、実験ができる体制が確立されている。**」というのを上げたい。

実現のためには、放射化学の研究者とメリットを共有出来る体制を構築した上で、核燃料を取り扱える施設と（業務として放射化学を担当する）人材の確保が重要である。これが実現できれば LLFP 等の放射性核種の測定は飛躍的に進むと予想される。

③ 「**理論と実験の融合が進み、理論に制約を与える実験が多く実施されることであろう。**」

測定が可能な反応に対する実験は年々着実に進められる一方で、実験による直接測定が困難な核種・反応に対する核データの要求は年々強くなっている。そのような反応に対しては代理反応や逆反応の測定を行い、理論計算を介した断面積の導出が行われている。

20 年後に対する明らかな予想として「**理論計算に制約を与えるための実験が多く行われるようになる**」を挙げる。理論計算による導出だけでなく、代理反応を利用した測定も今まで以上に活発に進められていく事になる。20 年ではたどり着かないかもしれないが、最終的には「**実験⇒理論**」から「**理論⇒実験**」へと転換していく事になるであろう。

④ 「**複数の試料を複数の施設で測定する体制が整備されることで、不確かさの議論が可能となり、真値への収束が進む。**」

測定データには各実験者が妥当と思う不確かさを評価して付けている。つけられた不確かさには測定試料に起因するものと実験施設や解析法などに起因するものが主にある。現状では実験に用いる試料はその実験に合わせて各実験者が個別に準備し、異なる実験施設を用いて、個別に解析を行っている。そのため、測定試料に起因する不確かさや実験施設、解析法などに起因する不確かさの切り分けが非常に困難であり、それが真値への収束を妨げていると感じている。

よって、筆者の第四の予言かつ夢として、「**20 年後には国際的な試料データベースの構築と海外の実験施設との連携の強化が行われ、試料を交換して複数の施設で測定する体制が整う**」というのを挙げる。試料データベースの構築により、同一の施設での異なる試料の測定結果、若しくは同一の試料の異なる施設での実験結果を比較すること

が可能となる。これにより、試料起因の不確かさと測定手法に関する不確かさの切り分けに基づく不確かさの妥当性をより深く議論することが可能となり、より早く真値への収束が進む事となる。

これを達成するためには、「国際的な試料データベースの構築」、「海外の実験施設との連携の強化」、「実験施設の相互利用」をすすめ、国際協力により、「試料を交換して複数の施設で測定する体制の構築」を行う必要がある。

#### ⑤「新しい核データ測定のための施設が建設され、測定が開始される。」

筆者は現在、J-PARC センターに設置した中性子核反応測定装置(ANNRI)で実験を行っている。ANNRI は 2009 年に完成した大強度のパルス中性子源を用いた実験装置だが、非密封 RI や核燃料物質を使用することができず、核分裂断面積の測定、U や Pu の断面積測定ができない状況にある。(20 年後には ANNRI も 30 年経過した施設になり、陳腐化も予想される。) 核燃料物質の利用が可能なパルス中性子源としては京都大学に電子線加速器があるが、1965 年に完成した加速器である。

そこで、最後の予言を「20 年後には、予算を獲得して核燃料物質が利用可能な新たなパルス中性子源を用いた実験装置の運用が開始され、日本国内で中性子を用いた実験が盛んに行われている」とする。我田引水で自分の分野に引っ張ったが、核データ部会として「20 年後に必要とされる実験装置は何か(主戦場はどこか)」ということを見据え、次期の実験装置建設・既存施設の改良のチャンスを虎視眈々と狙っていかなくてはならない。もちろん、核データ分野だけで大型施設を建設するのは困難であり、他分野の動きをしっかりと把握し、協働する必要がある。

### 3. おわりに

核データ部会創立 20 周年にあたり、20 年後の夢を語らせていただく機会を頂いた。安易な気持ちで引き受けたが、自分で考えると 20 年後というと(リタイア間近だが)現役で部会に在籍している可能性が高い。もしかすると、(当然開催される)創立 40 周年の記念セッションでこの文章の答え合わせをすることになるかもしれない。20 年後のその時に、この夢が現実になっているように精進していく所存である。

なお、本文章はあくまでも筆者個人の私見、夢であり、所属組織を代表するものではありません。

#### 参考文献

- [1] 田中 充、中山 貫、根津 嘉明、藤井 賢一、藤本 弘之:「Avogadro 定数の絶対測定」、日本物理學會誌 Vol. 52、No. 5、p.320-327 (1997).
- [2] 倉本 直樹:「基礎物理定数に基づくキログラムとモルの新たな定義—さらばキログラ

△原器—」, 計測と制御, Vol. 58、No.5、p. 330-335 (2019)