

## IAEA 中性子標準断面積に関する技術会合

日本原子力研究開発機構  
核データ評価研究グループ  
国枝 賢  
[kunieda.satoshi@jaea.go.jp](mailto:kunieda.satoshi@jaea.go.jp)

2013年7月に国際原子力機関 (IAEA) @オーストリア・ウィーンにおいて中性子標準断面積に関する技術会合が開催され、日本からは私が参加してきた。本稿では標準断面積の評価方針や手法について概略を述べると共に、今回の会議の内容を私が理解しえた範囲内で報告する。そして、大変勝手恐縮ながら会議参加報告の記事に半ば便乗しつつ共鳴解析についての私の蘊蓄、コメントを少しばかり述べさせて頂きたいと思います。

### 標準断面積とは

核反応断面積の測定実験はその他の断面積に対する相対測定である場合が少なくなく、絶対値を決めるためには基準となる反応の断面積が必要である。また、例えば核分裂電離箱を使って中性子フラックスを測定したい場合は、核分裂反応の標準的な断面積が必要となる。標準断面積とはこの様な際に用いられることを念頭に置いて整備された国際核データライブラリである。最新のデータは2006年に公開されたものであり、IAEAのホームページ (<http://www-nds.iaea.org/standards/>) から入手可能である。現在整備されている核データを下の表にまとめた。

核種(反応)	中性子エネルギー領域
$^1\text{H}(n,n)$	1 keV ~ 20 MeV
$^3\text{He}(n,p)$	0.0253 eV ~ 50 keV
$^6\text{Li}(n,t)$	0.0253 eV ~ 1 MeV
$^{10}\text{B}(n,\alpha)$	0.0253 eV ~ 1 MeV
$^{10}\text{B}(n,\alpha_1\gamma)$	0.0253 eV ~ 1 MeV
$\text{C}(n,n)$	< 1.8 MeV
$\text{Au}(n,\gamma)$	0.0253 eV, & 0.2 ~ 2.5 MeV
$^{235}\text{U}(n,f)$	0.0253 eV, & 0.15 ~ 200 MeV
$^{238}\text{U}(n,f)$	2 ~ 200 MeV

表のように、標準核データライブラリには相対測定の基準断面積としてよく用いられる核反応断面積が格納されている。また、中性子検出器に用いられる主な核反応の断面積を含んでいる。これらの断面積データは IAEA 核データセクション主導の下に国際協力で評価・整備され、これまで幾度か更新されてきた。また、標準断面積は米国の汎用核データライブラリ ENDF/B シリーズに積極的に導入されている。なお、日本の核データライブラリにおいては必ずしもそうではない。例えば、JENDL-4.0 におけるアクチノイドの核分裂断面積は同時評価法が用いられているため、標準断面積は採用されていない。核種間・エネルギー間の相関データが格納されているため、整合性をキープしつつ外部からのデータを部分的に採用することは容易ではないからである。

### 標準断面積の評価手法について

標準断面積の評価では以下のように軽核と中重核で異なる手法を用いる。

- **軽核**

軽核の評価は R 行列理論を用いて行われる。R 行列理論とは量子力学的散乱理論の枠組みに忠実に基づく共鳴理論である。核反応理論としては所謂“モデル化”がなされていないため、その意味では近似がない理論と言える（ただし通常はチャンネル半径における境界条件を予め与えてやる必要があるため、全く仮定がないということではない）。R 行列解析とは断面積等の測定値から共鳴の幅や位置に関する核構造の情報を取得することである。標準断面積の評価では測定データを R 行列理論で解析し、得られた情報に基づいて断面積の値と誤差を推定する。本稿の最後に述べるが、R 行列理論は測定データをフィットする際に理論そのものに由来する非常に強い物理拘束を与える。これまで理論解析計算コードとして米国ロスアラモス研究所の EDA (G. Hale 氏) や中国清華大学の RAC (C. Zhenpeng 氏) が標準核データの評価に用いられてきた。

- **中重核**

中重核の評価は GMA コードによる最小二乗フィッティング法を用いて評価される。統計モデル等によるモデル計算を行わないのはモデルそのものによる誤差の影響を排除するためである。従って評価値には測定データの情報がダイレクトに反映されることは言うまでもない。このように断面積測定実験と表裏一体の手法と言える。標準断面積の評価における特徴は“combined fit”とよばれる方法を用いられているということである。これは、ざっくり言えば標準断面積同士の整合性を保ち、できる限り相関を考慮するということである。標準断面積の評価では相対測定値も解析の対象とするので、その方がより情報量が多く矛盾の無い評価値を与えると考えられるからである。ちなみに combined fit では R 行列で得られた解析結果もフィットの対象となる。なぜならば重核の断面積が  $^1\text{H}$  等の軽核断面積の相対値として与えられている場合があるから

である。

標準断面積の評価に使われる測定データは該当する反応やエネルギー領域以外のものも含まれる。なぜならば異なる反応やエネルギー領域の断面積は一般に相関しており、目的とする断面積および誤差の評価に有用な情報を与えることがあるからである。これは R 行列理論を用いた評価では不可欠である。また、相対測定値を用いた GMA 評価でも重要となることがある。

### 標準断面積の誤差評価手法について

標準核データは主に断面積測定値の規格化に用いられるので、当然、断面積の値のみならずそれなりの根拠に基づく誤差の推定値も求められる。R 行列解析では、得られる核構造パラメータの誤差を断面積に伝播させる、所謂 Bayes の理論に基づいたパラメータ推定法が用いられる。ただし、測定データの系統誤差の扱い方について EDA と RAC に違いがある。EDA では測定データの“形 (エネルギー依存性)”のみを考慮する。この場合、考慮する測定データの誤差は基本的には統計誤差のみであるので相関行列は対角成分のみとなる。一方、RAC では予め測定者等により与えられた系統誤差を考慮し、フル相関の行列として扱う。当然両者には違いが現れることになり、これは長年の議論になっていたようである。現状では両誤差の平均値をとり、さらに測定値の誤差をカバーするようにウェイトを掛けた値が格納されている場合もあるようだ。GMA による最小二乗フィットでは測定データの統計誤差と系統誤差の情報がそのまま評価値の誤差データとして反映される。気になる Peelle's Pertinent Puzzle (PPP) の問題は Chiba-Smith の方法により最小化されている。なお、PPP を最小化する方法は例えば SOK 等に用いられているログスペース法やより一般的な Box-Cox タイプ等のオプションもあり、それらの実用性はこれまでの標準核データプロジェクトにおいても検証されている。

### 今回の会合の内容

さて、今回の技術会合では各国から核データ測定および理論研究者が集まり、オーストラリアから 1 名、オーストリア 1 名、中国から 2 名、ドイツから 1 名、ロシアから 1 名、米国から 5 名、IAEA 等の国際機関から 4 名、日本から私、計 16 名の参加があった (標準断面積の会合に私が招聘されたのは初めてである)。今回の技術会合の目的は、近年の断面積測定値や核反応物理学の知見の導入を議論し、データの更なる高品質化を検討することである。また、最近始まった国際的パイロットプロジェクト Collaborative International Evaluated Library Organization (CIELO) に触発された経緯もあるようである。会議では現在公開されているデータの内容および評価手法のレビュー・確認を行うと共に、現在の標準断面積における問題点の指摘、近年の断面積測定値や理論解析に関する報告があった。以下に概要を私が理解しえた (?) 範囲内で述べる。なお、会議のサマ

リーレポート及び発表者のスライドは IAEA 核データセクションのホームページから既に公開されているので (<http://www-nds.iaea.org/nds-technical-meetings/TM-Std-Jul-2013/>)、詳しく知りたい方はご参照ください。

### 近年の測定データに関する報告

会議では近年の核データ測定に関する報告が半分以上であった。私は、ここ十年ぐらい実験に直接関わっておらず詳細を報告できる立場では無いので、以下にダイジェスト的に報告する。

- **$^1\text{H}(n,n)$ 反応断面積および角度分布**

エネルギー領域によっては角度分布に関する実験データが不足しているようである。特に前方や後方の境界近傍における測定値が無い場合があるため、理論計算に頼らざるをえないケースが少なくない。また、高エネルギー領域における評価値には未だ不確定要素があるようである。例えば近年測定されたインディアナ大学とウプサラ大学のデータ間には後方で最大 10%の違いがあるとの報告があった。

- **$^3\text{He}(n,p)$**

$^3\text{He}$  の中性子全断面積の測定値が幾つか報告されている。また NIST において干渉性散乱長の測定が行われた。これはそもそも低エネルギー領域における標準断面積と誤差の評価を目的とした測定のようなものである。

- **$^6\text{Li}(n,t)$**

北京大学および LANL における角度分布の測定データが報告されている。LANL のデータは標準断面積のエネルギー領域のみならず、更に高エネルギー領域もカバーしているので、R 行列理論による評価に有用な情報を与える。また、IRMM でも測定実験が計画されているようである。

- **$^{10}\text{B}(n,\alpha)$**

IRMM や LANL で測定実験が行われ、予備解析結果が得られている。ただし、両者ともに検出器からの粒子リークあるいは粒子弁別に関してまだ若干の課題を残している様子であった。

- **$\text{C}(n,n)$**

ウクライナの研究炉においてフィルタリングされた中性子を使って測定された弾性散乱角度分布は現在の標準断面積の評価値と大きく異なっている。全断面積に関しては各国で新しい測定値があるが、測定値間および評価値間には数%程度の近いが見られる

ケースがある。

- **Au(n,γ)**

近年 CERN の n\_TOF 実験施設で測定されたデータは既存の評価済みデータと誤差の範囲で一致する。また、近年オーストラリアで行われた(?) 加速器質量分析法 (AMS) を用いた  $^{238}\text{U}(n,\gamma)/\text{Au}(n,\gamma)$  の値は既存の標準断面積と一致する。ちなみに AMS 法を用いた測定値は精度がよく、系統誤差も数%以内に抑えることができるようである。

- **$^{238}\text{U}(n,\gamma)$**

この断面積は所謂標準核データではないが、標準断面積に対する相対測定値が豊富に存在するため、逆に標準断面積の評価においても有益な情報を与える。近年の実験としては IRMM、CERN および LANL で行われた例があるようである。CERN (n\_TOF) の実験では  $\text{C}_6\text{D}_6$  および  $\text{BaF}_2$  2 種類の検出器が用いられており、両者の比較結果が興味あるところである。

- **$^{235,238}\text{U}(n,f)$**

n\_TOF において  $^{238}\text{U}(n,f)/^{235}\text{U}(n,f)$  の値が測定されている。2 種類の方法があり、一つは核分裂電離箱を使う方法、そしてもう一つはアバランシェカウンターを用いる方法である。両者は完全には一致せず、標準断面積はそれらの中間の値をとっているようである。

- **$^{239}\text{Pu}(n,f)$**

LANL において  $^{238}\text{U}(n,f)$  に対する相対断面積が測定されている。ただし十数 MeV 以上で現在の標準断面積よりもやや小さめの値になる傾向にあるようだ。

### 参照断面積 (Reference cross-section) について

さて、標準断面積とは独立して“参照断面積 (Reference cross-section)” という国際核データライブラリが検討されていることを御存知だろうか。標準断面積に該当する核種やエネルギーは例えば、断面積が大きく測定例が豊富にある、そしてエネルギー依存性が小さい等の条件を満たすものとして厳格に指定されている。しかし、そうでない核種やエネルギー領域においても国際標準的な断面積があった方が実験データの規格化等において便利な場合がある。会議ではこのような参照断面積についても議論した。具体的には 200 keV 以下のエネルギー領域における Au の捕獲断面積、 $^{235}\text{U}$  や  $^{252}\text{Cf}$  からの核分裂中性子スペクトル、 $^{48}\text{Ti}(n,n')$  反応に付随する 984 keV ガンマ線の生成断面積、Bi 等の高エネルギー核分裂断面積が提案され、近年の測定データのレビューや TALYS コードを用いた評価例が報告された。

## R 行列評価、ENDF/B への導入など

ロスアラモス国立研究所の G. Hale 氏より、R 行列理論を用いた軽核の評価についての現状や今後の予定が報告された。 $^1\text{H}$  の標準断面積については現在の上限エネルギーは 20 MeV であるが、これを 200 MeV まで拡張しようとしている。これはもちろんそれなりの需要があるからである。EDA コードでは相対論的運動学が考慮されているため、その意味で高エネルギー領域への拡張は問題なく行うことができる。また、 $^6\text{Li}$  の評価については標準断面積のエネルギー領域以外に存在する測定データを有効活用する。これは、エネルギー間に相関があることを利用して、標準断面積や誤差の信頼性を向上させようという狙いがある。 $^{12}\text{C}$  については  $^{12}\text{C}$  と  $^{13}\text{C}$  の断面積を分離して評価しようという研究も行っているようである。この際、弾性散乱等の角度分布のデータを取り入れることが一つのキーとなっているようである。なお、理由は分からなかったが、今回はもう一つの R 行列解析コード RAC の開発者である中国の C. Zhenpeng 氏は来ていなかった。代わりに中国核データセンターの若手が招聘されており、開発中のコードや  $^6\text{Li}$  に対する解析結果を紹介していた。今回の発表は正直、ちょっと理解に苦しむ内容を多々含んでいたが将来的には実用的なコードとなりうるかもしれない。なお、日本のアクティビティに関しては私が現在開発している R 行列コードの概要や近年の研究成果を報告した。

これまで米国は積極的に IAEA 標準断面積を汎用ファイルに導入している。ロスアラモスの河野氏により ENDF/B-VII.1 における標準断面積の導入手法について報告があった。というのは、一口に標準断面積を導入すると言ってもそう単純にはいかないからである。既存の汎用ファイルと整合性を保つために、一部をモデル計算で置き換える等の工夫が必要である。そのためのモデル、あるいは今後の標準断面積や参照断面積に有用となりうる計算手法について最新の核反応理論における成果や知見が報告された。なお、R 行列で得られた断面積誤差・共分散のデータを採用するにあたっては議論の余地があり、必ずしもライブラリには導入されていないようである。事実、EDA 等で過去に行われた R 行列解析で得られる断面積誤差は非常に小さく、一部のユーザーから受入れられていないとのことである。

また、同じくロスアラモスの D. Neudecker 女史は共分散評価手法についての最新の研究成果を報告した。測定データ間の相関やモデルそのものに起因する誤差の扱いについて問題を提起すると共に、彼女なりの対策手法を紹介していた。

## 私および G. Hale 氏の発表内容（私の蘊蓄とコメント）

私の現在の研究テーマの一つが R 行列理論を用いた断面積評価と誤差の推定である。本稿の初めにも少し書いたが、R 行列理論とは核力が及ばなくなる場所(チャンネル半径)で適当な境界条件を仮定し核反応を記述する理論である。核反応の記述においては特にモデル化はされておらず量子力学的散乱理論の枠組みそのものであるとあってよい（と

個人的には思っている)。ただし R 行列理論で波動関数を計算するわけではなく、通常はチャンネル半径で適当な境界条件を与える必要がある。理論本体は核構造の情報を持っていないので、それらに関するパラメータを断面積等の測定データから推定する。必要なパラメータは複合核の励起状態に関する情報、すなわちエネルギー固有値や崩壊幅である。ここでご注意頂きたいのは、エネルギー固有値とはそもそも複合核の励起準位エネルギーに相当する。また、崩壊幅はチャンネル半径における波動関数の振幅に直接関係する量である（英語では reduced width "amplitude" とよばれる）。このように R 行列の計算に必要な核構造の情報は所謂“モデルパラメータ”という概念よりも更に一步踏み込んだ意味を持っている。

さて、理論のことについて私なりの解釈を少し詳しく述べたのには理由がある。私は現在 R 行列理論を用いて  $^{16}\text{O}$  に対する中性子共鳴断面積および誤差の評価を行っている。もちろん標準断面積とは関係ない。これは反応の種類によっては測定値間に大きな系統的な差異があり、この差異が断面積の評価値に不確定要素を与えているからである。これは当然、積分計算値へも不確定要素を与えることになるのは言うまでもない。しかし、私と G. Hale 氏の R 行列解析結果は測定データの系統的な差異にほぼ依存しない。これは我々がなにも特別な手法をとったからではない。R 行列理論には“理論そのものが持つ強い物理拘束”があるからである。この強い物理拘束とは散乱行列 (S 行列) の“ユニタリ性”によるものである。ユニタリ性とは直感的には確率の保存を意味するが、同時に行列要素の振る舞いに一定の規則性を与えることで知られている（興味のある方はインターネット等で“Argand diagram”とか検索すればお解り頂けるかもしれない）。また、共鳴のピーク位置は所謂“ユニタリ上限”に相当するため、同じスピン・パリティを持つ共鳴に注目すると断面積の値は一意的に決まる（実際に R 行列パラメータの断面積に対する感度はゼロとなる）。更に、それと同じぐらい重要なのは、同じスピン・パリティを持つ共鳴間には一般に複雑な相関があるということである。従って、散乱行列要素もそれらの相関を反映した値となり、行列そのものをユニークなものとする。私と G. Hale 氏の解析結果が測定データの系統的な差異 (= 系統誤差?) によらないのは以上の理由によりほぼ説明できる。

ここで以上のような蘊蓄を並べたのは他でもなく、核データを高精度化そして断面積の誤差を矛盾なく推定する上で一つのキーとなる重要なことを暗に示していると思うからである。もし、R 行列解析で用いる測定データに誰も（測定者も）気づいていない不純物の成分が差し引かれないままになっていたらどうであろうか？ また、エネルギー分解能の値が与えられていなかったらどうなるであろうか？ 言うまでもなく、その測定データを用いて得られた R 行列のパラメータは間違っただけのものとなりうる。そしてこれは断面積評価値に反映されることになり、場合によっては最悪のケースとなりうる。しかし、ある測定データがあるとして、その測定値に何某かに起因する不確定性がある、またはその可能性が排除できないことが判っていたらどうであろうか？ この様な例は過



去の測定データに珍しくなく、一見、核データ評価には使い難いように思える。しかし、ここで R 行列理論には散乱行列のユニタリ性に基づく（一般に強い）物理拘束があることを思い出してほしい。この強い拘束力をもってそれらの不確定要素に一定の答えを与えることができるはずである。そもそも系統誤差が“完全にゼロ”である実験なんて存在するだろうか？ また、バックグラウンドの差し引きやエネルギー分解能の推定を“完璧に”行うことなど可能であるだろうか？ そして何より、測定することの本来の目的とは何であろうか？ これまで歴史的に用いられてきた共鳴解析コード SAMMY や REFIT があれだけの膨大なオプションを持つ巨大なコードとなった理由、核物理的背景を改めて整理・確認する必要があるように思う。

私は今回の会議で以上の内容を述べた（実際には英語能力の限界があって全てを出し切れず不完全燃焼に終わってしまったのだが・・・）。標準断面積の評価手法に関連すると考えたからである。当たり前のことと言われればそれまでであるが、ちょっとした大きな議論になった。でも一応理解してもらえたと（本人は）思っている。とり方によっては測定研究者に喧嘩を売っているようなものなので、日本でも賛否両論が予想されるが、以上の内容を含めて 2013 年 11 月に福井で開催される予定の核データ研究会で話そうと思っているので興味のある方は是非ご参加下さい。



会議終了後ウィーンの裏山に登り、風景と素敵な飲み物を楽しみました（2013.07.12）



以上、まとまりのない文章になってしまったことをまずはお詫びしたい。今回始まった標準核データのプロジェクトは主に2006年以降に得られた核データ測定や評価手法に関する知見がフル投入される予定である。これから測定データの収集や吟味、R行列やGMA解析による断面積と共分散の評価作業が行われ、2016年の公開を目指している。

## 謝辞

毎度のことであるが、IAEA核データセクションの大塚直彦氏には現地にて大変お世話になった。また、私のR行列に関する研究については、元々はロスアラモス国立研へ留学していた際に始めたものである。これまでにG. Hale氏、M. Paris氏、河野俊彦氏から多くのアドバイスを頂いたことに感謝いたします。

