

## 会議のトピックス(III)

# 核データ共分散に関する国際ワークショップ CW2017

北海道大学工学研究院  
エネルギー環境システム部門 原子炉工学研究室

千葉 豪

[go\\_chiba@eng.hokudai.ac.jp](mailto:go_chiba@eng.hokudai.ac.jp)

## 1. はじめに

2008年にアメリカのポート・ジェファーソンで初めて開催されたこのワークショップも、2011年の第2回（ウィーン）、2014年の第3回（サンタ・フェ）を経て、第4回を迎えることとなった。開催されたのはエクス・アン・プロバンスの市街地にある Hotel Aquabella で、期間は10/2の午後から10/6の正午までの正味4日間であった。ホスト機関はCEA/Cadaracheで、参加者数は配布された名簿に基づく58となっており、欧州外からの参加は、米国7名、中国4名、日本1名であった（ちなみにホストのCEA/CadaracheからはPhD学生なども含めて19名が参加）。また、講演件数は44で、その内訳は共分散評価手法が15、測定が7、核模型が3、応用が15、核データライブラリが3、そして総論が3であった（発表資料は <http://www.cw2017.com/Presentations> で閲覧可能）。第1回についてはLANL 河野氏が核データニュース91号で、第3回についてはJAEA 横山氏が同109号で、それぞれ報告しているの、それらに予め目を通してから拙稿を読んでいただくと効果的かと思う。

本稿では、本ワークショップで報告されたこと、議論となったこと、さらには報告者自身が学んだこと、感じたことを項目別に述べていきたいと思う。以下にそれらの項目をまとめて示しておく。

- ・核データ共分散の活用に向けて真に必要なものとは？
- ・連続エネルギーでの核データ調整
- ・核データ評価における積分データの利用
- ・不確かさが与えられていない核データの取り扱い
- ・誤差伝播計算における不確かさの大きい核データの取り扱い
- ・熱中性子散乱データの不確かさに関して
- ・共分散データの検証

・次回 CW2020 に関して

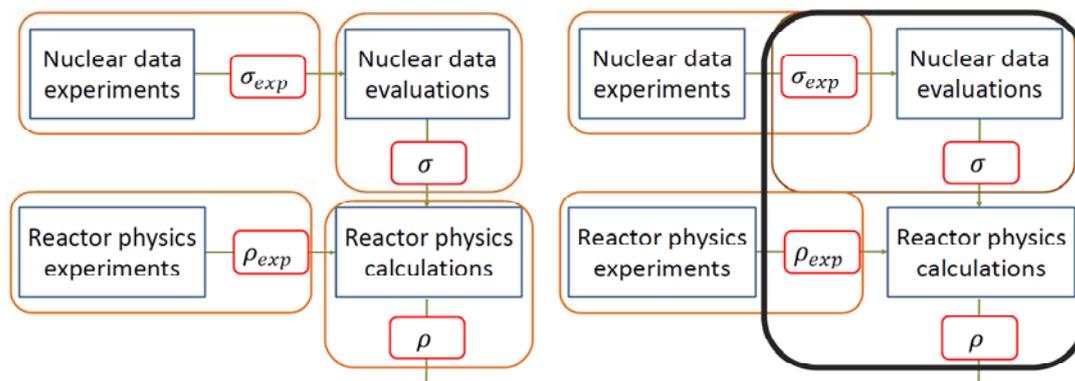
## 2. 核データ共分散の活用に向けて真に必要なものとは？

結論から言うと、それは「関係者の覚悟」の一言に尽きると思う。それについて説明を行いたい。

この会合のちょっと前の飲み会の場で、電中研の N さんから、「核データの測定値にはいろいろな誤差が必然的に含まれていて、そういうものが全て考慮されているとは思えない」というような話があった（と記憶している）。そのときに私は、「それは核データの測定や評価側の話であって、我々ユーザー側は、与えられた（評価された）誤差を基にして、関心のあるパラメータの不確かさの定量化に励めばよい」という（今考えれば、物凄く不誠実な）回答をした。私の考えは、「それぞれの持ち場でしっかりやってもらえば全体がしっかり回るわけなので、それぞれが頑張りましょう」というものであり、そのような姿勢は基本的には今も大きく変わっているわけではない。

CW2017 では、LANL の Talou 氏と White 氏の講演が共分散の利用について示唆に富んでいた。他の参加者の講演は、基本的には共分散に関わる技術的かつ専門的な内容であったが、彼らの講演は、共分散の評価の現状や問題点、将来の見通しなどを熱く語る内容だったと思う（まあ、彼らは「熱く」というよりも「クールに」といったほうが適切かもしれないが）。現状の共分散データを用いて原子力施設を設計しようとしたときに、我々はこの共分散データに基づいて評価されたマージンを、自信を持って提示できるだろうか？「 $5\sigma$  の余裕をとったから、それを超える可能性は殆ど考える必要がありません、安心して下さい」と言ってよいのだろうか？そのようなことを考えさせられる内容だった。

「それぞれの持ち場でしっかりやりましょう」という考え方では、異なる分野の間で境界条件が設定され、各々の分野は課された境界条件のもとで出来るだけ正確に問題を解くことが求められる（下図左）。ところが、核データ共分散のように、まだまだ未成熟、不確かな部分も多いような技術課題については、各分野が連携しつつ、お互いの問題点を指摘し、共有していかないと、全体としてうまく進んでいかないことに今回気づかされた。そして、私自身、核データ共分散を使って、いろいろ（しょうもない）論文を書いてきたが、ただの「数字遊び」だったのではないかと、深く自省することとなった。そのようなことを実現するためには、下図右のように、より下流に位置する分野は、自らの上流に位置する分野に対して積極的に関わっていく必要があることになる。このような考え方は、「それぞれの持ち場でしっかりやりましょう」的な考え方をする人間（例えば私）には極めて居心地の悪いものであり、正直なところ出来ることならば避けたいものである。



また、Talou 氏が講演で指摘したように、核データ共分散の評価では「分かっていない未知なもの」を可能な限り抽出すべきであるし、また White 氏が「By using lower limits, covariances are completely asinine」というタイトルの講演で述べたように、核データ共分散で評価されている不確かさはあくまで「不確かさの下限」であることにユーザー側の人間として認識が足りなかったのではないかと気づいた。このようなことを考え始めると、「何か面白いことをやって、沢山論文を書きたいな」という人は、及び腰になってしまうのではないかと思う（私もそうです）。

「核データ共分散を積極的に活用しよう」ということは、突き詰めればそういうことであり、ただの「数字遊び」に終わらせないぞ、という覚悟を持てるのか、ということに帰結するのではないかと考えている。

ちなみに White 氏の講演タイトルに含まれる「asinine」という単語の意味は、ジーニアス英和辞典によると「ロバの（ような）、愚かな、石頭の」とされていた。

### 3. 連続エネルギーでの核データ調整

CNRS の Bidaud からは、連続エネルギーでの不確かさ評価や核データ調整に関する講演があった。これは UC Berkeley の Aufiero 氏らが提案している「EGPT」と呼ばれている方法に関するものであり、Salvatores 氏も Plenary talk で随分と褒めそやしていた。個人的には、断面積の共分散は、基本的には核模型計算におけるパラメータや共鳴パラメータから得られるものであるもので、断面積ではなくてそういった上流のパラメータを扱えばいいだけの話だと思っており、Bidaud 氏自身も講演中にそんなことを話していた。ただ、最近は連続エネルギーモンテカルロ計算が主流になっているので、その枠組みで不確かさ解析や核データ調整が実施可能となるという点で意義があると主張しているようであった。Salvatores 氏には、休憩中に「連続エネルギーでやることの意味ってあるのですか？」と聞いてみたところ、「多群断面積を作るときには対象とする炉型を想定した重み関数が必要となるだろ？連続エネルギーで調整すれば、universal な調整データが作れる

じゃないか」という回答があった。また、共鳴パラメータの直接的な調整は、ずっと昔にやってみたがうまくいかなかった、とのことであった。

Salvatores 氏は Plenary talk において、「核データの調整により、核データと炉物理実験データとの間で相関が生じることに留意すべし」という点を指摘し、他の講演者の発表のときにも同じコメントを繰り返ししていた。核データ調整計算では、核データの最尤値を積分データの情報を加えて再計算するわけであるが、積分データも確率変数の一つであるので、その最尤値も調整計算により変動する結果、核データと積分データとで相関が発生する、ということであろう。

#### 4. 核データ評価における積分データの利用

CEA/Arpajon の Bauge 氏の「Evidence of sigma-chi-nu correlations in evaluated data files」という講演では、「最近の核データファイルには、U-235 や Pu-239 の核分裂性核種について、断面積と核分裂スペクトル及び核分裂あたりの平均発生中性子数の間に相関が存在する」ということが主張された。これは、近年の核データ評価において積分データを用いた検証計算の結果がフィードバックされていることに由来しており、「何を今更、、、」という感じであった。積分テストの情報が核データ評価にフィードバックされているのは暗黙（周知？）の事実であるが、それを共分散評価で真面目に考慮しようとするのは非現実的（様々な核データの間に関係が生じてしまうので）なのでそれについては触れないことにしよう、というのもまた暗黙（これも周知？）の事実だったのではないかと思うので、この講演は「このことにそろそろしっかり向き合いましょう」という強いメッセージなのかな、とも理解した。

「そもそもの核データの不確かさに比べて、ほんのちょっとだけ評価値に手を加えているだけなので、共分散データを見直さなくてもいいとは言えませんかね」という内容のことを私自身の講演で話したが、「理論的にそれはダメだ」という聴衆からの反応があり、「でも、もの凄く大きな共分散行列を評価して、それを核データファイルに格納するのって非現実的ですよ」と言うと、「そうなんだよね」というあきらめムードに。

共分散データに「真剣に」向き合おうとしたときには、このことから逃れることはできないであろう。「積分データのフィードバックも、結局、ある特定の積分データのみが用いられることになるので、そのようにして評価された核データファイルは結局のところ、ただの application library の一つにすぎない」という意見もあった。ワークショップ第一回でも同様の議論が行われたことが河野氏の報告に記載されており、そこでは「積分データによる評価値の「汚染」を心配する声の方が大きかったようだ」という記述がある。この 10 年で、積分データの核データ評価への利用は促進されているように見受けられるので、「汚染を心配しつつも、積分データの再現性向上への流れには逆らえない」ということになるのだろうか。

日本国内でも、JENDL アクチノイドファイル 2008 の開発の際に同様の議論が巻き起こったことを覚えている方もいらっしゃるかもしれない。「より高い性能を示す」ことが新しい核データファイルの重要な条件の一つであり、それを達成するために「積分データを用いた核模型パラメータの調整」という、当時としては画期的な方法が導入された。当時、積分データによる「汚染」を心配したのは、石川眞氏一人であった。私自身はファイル開発のメンバーの一人でもあり、「石川さんの主張されることは分かるのだが、それよりも大事なことがある」と考えていたが、今となっては、私のスタンスもだいぶ揺れ動いている。

純粋に、積分データの情報を排した核データファイルを作成し、積分データを活用した不確かさの低減は応用側で実施するという、そのような立場はとれないものだろうか？ 先進的な核模型の開発や、画期的な装置・手法を用いた微分データの測定の蓄積により、積分データの情報が入らずとも、「高品質の」核データファイルは開発できるのではないだろうか？

## 5. 誤差伝播計算における不確かさが与えられていない核データの取り扱い

核データ共分散に関するユーザー側が持つ疑問点の一つは、「不確かさが与えられていない核データの扱いはどうすればよいか？」というものである。以前の私であれば、「不確かさが与えられていないのだから、ゼロとすればよいだろう」として、「ゼロ境界条件」のもとで評価を行っていたわけだが、前述の White 氏の講演で「核データ共分散は不確かさの「下限値」を与えている」という考えに基づけば、このような境界条件の設定は危険極まりない。ユーザー側としては、「この核データは応用において重要であるが、不確かさの評価がされていない。だから、是非とも評価して欲しい」という要望を出すのが望ましいだろうし、「不確かさをこの程度仮定したらこれくらいインパクトがあった」という情報を添えたりすると、なお良いのであろう。

崩壊熱の不確かさを総和計算に基づいて導出した片倉氏の研究では、不確かさが与えられていない核データについては 100%の不確かさが仮定されている。私も、「専門家である片倉さんがそうやっているんだから、それでよいだろう」ということで、同様の扱いをしている。一方、今回の会合では、100%ではなく 10%と設定しているという発表もあり、当たり前ではあるが、「正解」はないようである。せめて、10%、50%、100%というように、不確かな不確かさをパラメータとして結果を提示するくらいはしたほうがよいか、などと個人的には考えている。

## 6. 誤差伝播計算における不確かさの大きい核データの取り扱い

前項とも関係するが、100%の不確かさを有する確率変数について、乱数を用いてサンプリングを行うと、正規分布を仮定した場合は 15%程度強の確率で負の値が得られるこ

とになる。大部分の核データは物理的に負の値を許容しないので、このような問題にどう対処しようか、というのが、特に崩壊データや核分裂収率データなど、比較的大きな不確かさを有する核データを扱うユーザーの関心事の一つであった。CW2017 では、CEA/Saclay の Lahaye が詳細な検討結果を報告してくれたので、大変参考になった。

負の値のサンプリングを避ける方法の一つとしては、まずは負の値を棄却するというもの (Positively truncated Gaussian) がある。この場合、当然のことながら、サンプルから得られる統計量はもとの値を再現することが出来ない。そのため、負の値は棄却するかわりに、サンプリングの結果得られる統計量がもとの値を再現するようにサンプリングに用いる正規分布の平均と分散を調整する手法 (Gaussian distribution with correct mean and variance) が紹介された。また、対数正規 (Lognormal) 分布を用いるというものも紹介された。この分布を用いてサンプリングを行った場合、やはりサンプリングの結果得られる平均や分散などの統計量がもとの値を再現しないという問題があるが、対数正規分布に対応した平均と分散を正規分布でのそれら統計量を再現するように定義することでこの問題を回避している。また、これらいくつかの確率分布の良し悪しについてはシャノンエントロピーによって判断を行い、それを最大化させる分布を最良のものに見做す、という考え方が紹介され、その結果、不確かさの範囲によって使用すべき確率分布が変わってくることを示された。

ランダムサンプリングによる不確かさの伝播計算は比較的一般的な事柄であるので、他分野でいろいろ研究尽くされているように思うのであるが、不確かさが 100% や 1000% になるような問題というのはそうあるものではないようで、こういった話は原子炉物理特有の問題なのかもしれない。

## 7. 熱中性子散乱データの不確かさに関して

熱中性子散乱データについては、日本では京大の安部先生の研究グループが独自に評価を行っているが、データの不確かさが炉物理パラメータに与える影響について、軽水炉のユーザー側に強い関心がある。日本ではこの点についての検討は全く行われていないが、世界的にはいろいろ行われている模様である。今回は CEA/Cadarache の Noguere から関連する発表があったが、Noguere 氏の論文は既に *Annals of Nuclear Energy* 誌に発表されている (Vol. 104, p.132) ので、関心のある読者はそちらを参照されるとよいだろう。

## 8. 共分散データの検証

「共分散データの検証」は、共分散を実際の許認可などに活用する上では避けて通れない問題である。私個人としては、核データ評価とは独立な積分実験データを用意し、実験値の再現性と計算値の核データに起因する不確かさを比較することにより、計算値の不確かさ評価に用いた核データ共分散が「不当に小さい」ことくらいは言えるのではな

いかと考えている。ただし、積分実験データの核データ評価への活用が進められている昨今、そのような比較を行うことは出来ず、逆に「核データ共分散が不当に大きいのではないか?」「いやいや、積分実験データはあくまで『新しい情報』なのだから、そういう議論をすること自体がナンセンス」という議論が巻き起こることになる。実際には、核データライブラリには積分実験データの情報が入り込んでいるため、その点を考慮しないで核データ共分散を評価することが問題なのだが、「積分実験データの情報が評価に使われている?え、そんなこと知らないよ」と言ってしまえばそれまでなので、なかなか難しい問題ではある。異なる核データファイルの核データ評価値のバラつきをもって共分散と見做したり、さらにはそれを用いて共分散の妥当性を議論したりするのは当然行うべきことではないが、他に手段が無ければそのような方法に逃げ込むのも仕方ないかと思ったり、、、。

共分散データの検証については、前述の河野氏の会議報告にも記載があり、「共分散の検証には積分データと比較すればよいとの意見があるが、これは共分散データを断面積のような物理データと混同することによる勘違い」という記述があった。共分散データはある意味、「ナマモノ」みたいなもので、そのときに我々（評価者）が持っている情報に基づいて評価されるものであり、それは時とともに小さくなる場合もあれば、大きくなってしまう場合もある。結局のところ、共分散データは、何かの「指標」程度には使えるが、それを使って実際に原子力施設を建設する、というのはなかなか難しいのかもしれない（例え、建設予定地が河野家の隣でなくても）。

## 9. 次回 CW2020 に関して

会議の開催中に、CW2017の実施責任者である CEA/Cadarache の De Saint Jean 氏と Talou 氏から、「次の CW は是非日本で行ってもらいたいと思っていて、それを Conference dinner のときにアナウンスしようと思うんだがどうだろう」という話をされた。このワークショップも 4 回目を迎え、今後もこれを軸にして、核データ共分散の研究を継続して盛り上げて行きたいということであった。会合の時点では明確な回答は出来なかったので、Conference dinner では「3 年後には次の CW を開催するつもりであり、日本が候補の一つとなっている」程度のアナウンスがされた。会合後、日本の関係者で議論した結果、以下のことが決まった。

- ・ CW2020 は日本がホストする。
- ・ 会場は東工大。
- ・ Chair は千葉敏氏、Co-chair は岩本修氏と私。

3 年後の CW2020 開催に向けて、これから国内の核データ・炉物理関係者を巻きこんで、盛り上げていければと考えている（積極的なご参加・ご協力をよろしくお願ひいたします）。

## 10. おわりに

この会合への参加は、正直なところ、あまり気が乗るものではなかった。というのも、最近の研究もそれほど進まず、読書とか将棋の勉強とかに逃げてばかりで、会合で報告できるようなネタも特に持っていなかったからである。ただ、この会合の **International program committee** のメンバーにも名前を連ねてしまった以上、お誘いを断るわけにはいかず、渋々参加の準備をした、という状況であった。

それでも、前述の **Talou** 氏や **White** 氏の講演を聞いていて、自分も考えることが多かった。いつもは、自分の講演資料は出発までに必ず準備しておき、現地到着後に手を入れることはないのだが、今回については、発表直前にいろいろ自分の考えなどを追加し、本来とは大幅に異なる内容で講演を行った。ワークショップなので、予め決めておいた内容を話すよりは、議論の種になりそうなことを盛り込んだ内容にするのも良いことだと思う。

私自身と核データ共分散との関わりであるが、業界の一部では結構有名だった共分散処理コード「**ERRORJ**」の開発から始まった。このコードはもともと小迫和明氏が **NJOY** の **ERRORR** モジュールを拡張するかたちで開発されたものであり、**Reich-Moore** 公式で記述される共鳴パラメータに与えられる共分散から多群断面積の共分散を計算できる、当時は世界で唯一のコードであった。私は当時の勤務先でそのメンテナンスを担当し、多くの海外の核データ研究者とやり取りをすることになった（**ND2004** に参加させてもらったり、**LANL** に滞在させてもらったりもした）。もう 10 年くらい前の仕事なので、今の若い世代の人はこの仕事について全く知らないようだが、この分野で長く仕事をしている人からは、「**ERRORJ** の千葉」ということで認識してもらえる場合が時々ある（私としては、炉物理分野を主戦場と考えているので、炉物理の成果で認識してもらえないことに傷つきもするのであるが、、、）。今回も、「あー、あなたがあの **ERRORJ** の千葉なのですね」という方がいた。私はただメンテナンスをしていただけなので、なんだか申し訳ないのだが、今でも覚えてくれる人がいるというのは嬉しいことである。

最終夜に催された **Conference dinner** では、ワインをしこたま飲んだあと、**JSI** の **Ivo Kodeli** といろいろ昔話に花を咲かせた。過去の研究の思い出話を肴に酒を飲むということで、自分もいよいよ「中堅」だなと感じた次第である。

まあ、40 歳を過ぎたら体の衰えが明らかで、もう自分のことを「若手」とも思わなくなりましてけど。