

積分ベンチマークにおける核データ相殺効果に関する IAEA 諮問者会合

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

1. はじめに

天下の IAEA に「諮問者」として招聘していただけることになり、こんな私も、とうとう今流行りの「グローバル人材」の仲間入りか、と鼻高々であった。「あまり仕事してない、大学の冴えない先生」というのが家族の私への評価であったので、「オレだって結構凄いんだぜ」と自慢しまくり、もうノリノリであった。

ところが、実のところ、内心は戦々恐々であった。なぜならば、私は英会話、特に聞き取りが極めて苦手だからである。「外国人の皆さんが侃々諤々議論している中に取り残される日々を過ごすことになるのでは」という一種の恐怖がイケイケの陰に常に隠れていたわけである。いや、実際のところは、それを隠すことができず、「だけどホントは心配なんだよね〜」という気弱な姿を家族に晒していたわけで、結局、こういうことで評価が低空飛行のままなのである。

2. 会合について

今回の諮問者会合のタイトルは「Compensating effects due to nuclear reaction and material cross correlations in integral benchmarks」となっており、IAEA の A. Trkov 氏が企画したものである。最近の評価済み核データファイルは積分ベンチマーク実験に対して極めて良好な性能を示すが、各々のファイルの核データ評価値には大きな差異がある。このことは、核データファイル間の核データ評価値の差異が積分特性に与える影響が複数の核データで相殺することにより、全ての核データファイルが類似の積分特性推定値を与えていることを意味し、それが Compensating Effect (CE) と呼ばれているものに対応する。最近では、重核の非弾性散乱断面積などが一つの例としてよく言及されている。この CE に関して議論しよう、というのがこの会合であるが、Trkov 氏は CIELO プロジェクトと

絡めた議論を強く期待しているようであった。

参加者は IAEA の Trkov 氏と R. Capote 氏、LANL の A. Kahler 氏、ロシアの V. Proniaev 氏、CEA/Cadarache の D. Bernard 氏、OECD/NEA の O. Cabellos 氏、CIAE/CNDC の L. Ping 氏、そして私の計 8 人であった。会期は 4 日、1、2 日目に参加者からのプレゼンテーション、3、4 日目が議論に充てられた。

3. 一日目の発表

まずは Trkov 氏より今回の会合の目的が説明された。CE を特定することとそれに取り組むための戦略を構築すること、コモンエラー（例えばエラーを含んだ同一の MCNP 入力を共通して使うことで生じるエラー）を避けるための多様な積分ベンチマーク計算を実現すること、核データ評価へのフィードバックの道筋を構築することなどが挙げられた。「まずは CE の定義を明確にすべき」というコメントがあり、議論のなかで、「ある積分ベンチマーク計算結果を得る核データセットは一意に決まらないが、同一の積分計算結果を得ているということは特定の核データ間で強い関係性がある筈である。それが CE であり、その関係性をどのように特定していくかが重要だ」ということにまとまったように思う。Capote 氏は核データ評価者の観点から「Physics との整合性を保つこと」の重要性を強く主張していた。応用側はともすれば積分データを再現することに注力しがちであるが、それに対する警鐘であろう。

引き続き Bernard 氏からの報告があった。EPR (SUS 反射体付き大型 LWR) の出力分布に対する核データの不確かさ評価を行ったところ、U-238(n,n')や H-1(n,n)の不確かさに起因して、炉中心では 5%を超えることが判明し、U-238(n,n')の核データ精度の改善が焦眉の急となったようである (COMMARA 等、独自の共分散データを使っており、JENDL 等と比べて U-238(n,n')に対する不確かさがかなり大きく評価されている模様)。核データに起因する不確かさがあまりに大きいので驚いたが、大型炉心であること、SUS 反射体を外周に配置していることに起因しているとのことである。ICSBEP などの臨界データからは U-238(n,n')のみの妥当性を検証することが難しいため、天然ウランを用いた中性子透過実験を行い、U-238(n,n')に感度が大きい実験データを取得したとのことである。現在は実験データの整理と解析を実施し、そのうち結果が報告されるようである。実験データ自体を公開する予定はないとのこと、参加者は皆で残念がった。他にも、裸炉心とウラン反射体炉心との比較や、実効増倍率と無限増倍率との比較等から、特定の核データの検証を行う試みについて報告された。

Cabellos 氏は CE のひとつの例として、JENDL-4.0 の Na-23 について言及した。MT=51 について、遮蔽ベンチマークの再現性を向上させるために 1.2 程度のファクタが乗じられていることが評価ファイルのコメント部分に記載されている一方、高速炉のベンチマークデータを使って断面積調整を行った ADJ2010 では、Na-23 の当該領域の非弾性散乱が

20%程度減少するという結果となっているのが「まさに CE である」ということである。かたや遮蔽データを再現し、かたや高速炉臨界データを再現するという話を CE と呼ぶのはおかしいのではないかとコメントしたが、うやむやに終わった。また、OECD/NEA での種々の感度解析ツールについて紹介があり、ある核データに変動を与える（ある核データについて新しい実験データが加わった）という条件の下で、確率を最大化させるように核データを調整するベイズ推定法に基づく計算ツールが詳しく説明された。ある新しい核データ評価が提案されたときに、それと Compensation を引き起こす核データを抽出するという意味で有効であると感じた（が、全断面積を一定にするという束縛条件と断面積共分散を併用するなど不明なところも多々あり、会期中何度か議論したものの、結局よく分からなかった）。

1 日目の最後には、Trkov 氏より CIELO テストファイルのベンチマーク計算結果について報告があった。「Physics」（要は新しい知見、データに基づく核データ評価）をまずは優先すべきであり、積分ベンチマーク計算のフィードバックはあくまで不確かな核データに対してのみ行われるべきである、というコメントが最初にあった。主要な重核の核分裂スペクトルが軟らかくなること、U-235(?)の(n,n')が小さくなることが最近の研究で示されており、また共鳴パラメータも新しいものが準備中である。こういった新しい「Physics からの知見」を反映しながら、他の不確かな核データをうまく按配することにより、積分データの良好な再現性を保つ（もしくはさらには向上させる）ことをどのように実現するかということが、今回の会合の主眼のようである。では不確かなデータとは何ぞや、となるが、U-235 の Nu-bar あたりはまだ検討の余地がある（Pu-239 の Nu-bar については SG34 で検討）し、U-235 の捕獲断面積もまだまだ検討の余地がある、というような話になっていたと思う。また、積分ベンチマークデータの実験値の不確かさが過小評価されている可能性についても言及があった。20pcm のような不確かさは現実的にあり得ない、組成上の不確かさ（不純物混入等）や、体系情報の不確かさ（プレート面の歪曲など）など、未知の不確かさ要因があるだろう、という点を何人かの参加者が指摘していた。また、Godiva のような U-235 金属球の実験データは複数あるので、単一の積分データに依らずに複数の似たような体系の結果を吟味することが大事であるという主張があった。

4. 二日目の発表

まずは Kahler 氏から LANL の積分ベンチマークテストの概要について紹介があり、CIELO テストファイルを適用した結果が示された。U233-SOL-INTER のデータが系統的に過小評価となること、U233-SOL-THERM のデータでもスペクトルが硬くなるとやはり過小評価傾向となること、HEU-MET-FAST-007 のデータは CH₂ の含有量を変化させたデータが複数あるため、スペクトル依存性を見るのに有効なこと、LEU-COMP-THERM-005、-007 もスペクトル依存のデータであるが、両者には矛盾がある（片方を立てるともう片

方が立たない) こと、PU-MET-FAST ではスペクトルが軟化するに従い過大評価傾向となること (FCA の高転換炉データでも同じ傾向が見られていたと記憶している) などが報告された。

千葉からは、①CIELO テストファイルを小型高速中性子体系の臨界性とスペクトルインデックス及びJAEA の福島氏が整備された FCAIX の臨界性データに適用した感度解析結果、②異なる核データファイルを用いて小型高速中性子体系の積分データにより炉定数調整を行った結果 (11 月の核データ研究会でも発表)、③CE を考えるために部分空間法を核データの検証に応用した結果 (2015 年春の年会の特別セッションでの話を具体化したもの) を紹介した。2 つ目の話題に関連して、JEFF-3.2 の U-238(n,f) の評価値が JENDL-4.0 や ENDF/B-VII.1 と大きく異なり、それが U-238/U-235 の核分裂反応率比等に大きく影響していることを指摘したが、JEFF-3.2 のデータは標準断面積から大きく外れており、「なぜそうなったのか?」とちょっとした議論になった。ある人は「CEA/BRC の評価だから、ミリタリーのデータがあるんじゃないの?」などと話していた。

Ping 女史からは鉄の積分ベンチマークテストについて紹介があった。Fe-56 の中性子吸収の全吸収に占める割合が設定値 (今回は 1%) を超えるものを ICSBEP から抽出して、一連のベンチマークシートを作成したとのことである。臨界データに加えて LLNL や FNS の遮蔽データも使っている。鉄の吸収割合の増加に伴い、臨界性に対する過大評価が観察されることが報告された。IPPE の遮蔽データが ICSBEP の ALARM カテゴリーに含まれること、JEFF-3.1 の鉄の評価は CEA/Cadarache の種々の積分データの再現性がかなり良いことなどのコメントがあった。

Pronyaev 氏からは、PFNS の新しい評価と積分特性への影響、感度係数を用いて核データの更新に伴う積分データ特性値の推定を行う方法、弾性散乱断面積角度分布のエネルギー依存性の取り扱い、構造材核種の熱中性子領域の断面積に関する検討の 4 点について報告があった。溶液系積分データでは、核燃料濃度が大きいと必然的に体系が小さくなり、漏洩の寄与が大きくなるため、PFNS の感度が一般的に大きくなるとのことである。また、感度係数と断面積差を用いるいわゆる「感度解析」については、感度解析結果と実際の輸送計算結果とでは有意な差が現れる場合があり (非線形効果と共鳴自己遮蔽効果)、注意を要することが Trkov 氏よりコメントされた。3 点目の P1、P2 係数のエネルギー依存性であるが、SG35 等の検討では、こういったパラメータの詳細なエネルギー依存性は考慮しなくても積分特性に影響がないという結果が得られているが、場合によっては有意な誤差が発生することもあり注意が必要との主張があった。Na、Mn、Al などの核種について、検討が必要とのことであった。

5. 議論・雑感

以上で参加者からのプレゼンテーションが終わり、議論の時間となった。論点として

- ・どのように CE に対処するか戦略 (Strategy) を考える。
- ・CIELO データファイルのベンチマーク計算に適した積分データを抽出する。

が Trkov 氏から挙げられた。

1 点目が今回の諮問者会合の最大の目的であったかと思うが、実のところ (私も含めた参加者の準備不足で?)、肝心なところの議論が殆ど進まず、結局 2 点目に注力することになった。この 2 点目も少し唐突で、CE と何の関係があるの? と感じる方もいらっしゃるかと思うが、何かしらの成果物を出さなければならないということから、こういった方向に収斂していったのではないかと考えている。最終的には、ICSBEP ハンドブックから必要と思われるデータをそれぞれが提案する、という (私としてはちょっと不毛と感じた) 作業となった。

というわけで、CIELO ファイルのためのベンチマークデータ群が作成されるとともに、いくつかの細かいアクション・リストもまとめ、4 日目の昼過ぎに閉会した。

CE なるものは必然の結果 (核データの数に比べて積分データの数が少ないので、積分データを再現する微分データの組み合わせは複数存在するという事) であり、これに働きかけるというのは具体的にどのようなことをするのかイメージが難しく、なかなか話がまとまらないのではないかと会合の前に漠然と考えていたが、実際にその通りとなった気がする。会合としては、「うまくいった」とは言えないかもしれない。

私としては、やろうやろうと思って先延ばしにしていた案件 2 つをやっつけるちょうど良い機会となった。発表もそれなりにウケたので、招聘してもらった分の貢献は果たせたのではないかと考えている。また、3.5 日間、会議室で長い休憩をはさみながらも、延々と発表・議論を行うという機会はおそらく初めてであり、大変貴重な経験が出来た。Cabellos 氏や Bernard 氏は同年代だと思うが、繋がりができたのはとても良かった。

6. おわりに

会議終了後は、ウィーンの街中を探訪し、ホテル近くのスーパーでお土産を買い、夕方からは今回のツアーのメインイベント「ホイリゲでの飲み会」となった。日本に帰国したら学校が始まってしまうので、夏休み最後の景気づけということで気合いを入れて臨んだ。若い(?) 白ワインに始まり、よく冷えた白ワインを延々と O さんと 2 人で飲み続けた。おしゃべりとワインに夢中になり、食べ物を口に入れるのをしばらく忘れるくらいであった。O さんにはたくさんの励みになるお言葉をいただき、それが飲むペースを加速していったようである。

何やかにやでおひらきとなり、ふらふらする O さんに地下鉄駅のホームまで見送ってもらったわけだが、O さんにドア越しに手を振ってすぐに記憶が消失。それが復活したのは停車した地下鉄の中であった (多分、乗客に起こしてもらった)。U4 の地下鉄に乗り 5 個目くらいの駅で U1 に乗り換えて・・・という目論見だったが、おそらく U1 の終点駅

に到着したようであった（でもなぜ U1?）。地下鉄は営業終了。流しのタクシー拾えばいいよね、と高をくくっていたが、道にはタクシーが流れていないようである。バス停で地図を見てもよく分からない（なにせ泥酔中ですから）。暗いし寒いし、もう泣きたい状況であったが、周りの人の助けを借りて、なんとか IAEA 本部の最寄りのバス停を通過したことを確認したときには本当にホッとした（今思うと路面電車だったかも）。ホテルに帰還したのは 1 時 30 分であった。

よせばよいのに、こんな顛末もついつい報告してしまうので、家族中での私の株は下がり続けるのであった。



向かって左から A. Trkov 氏 (IAEA)、V. Pronyaev 氏 (IPPE)、D. Bernard 氏 (CEA/Cadarache)、L. Ping 氏 (CIAE)、筆者、O. Cabellos 氏 (OECD/NEA)、A. Kahler 氏 (LANL)、R. Capote 氏 (IAEA)