

PHYSOR 2016 に参加して 2016年5月1～5日、Sun Valley, Idaho, USA

日本原子力研究開発機構
核データ研究グループ
水山 一仁
mizuyama.kazuhito@jaea.go.jp

1. はじめに

2016年5月1日～5日の日程でアメリカ・サンバレーにて開催された炉物理の研究と開発のために2年おきに開催される国際会議（PHYSOR 2016: Unifying Theory and Experiments in the 21st Century）に参加し、原子力システム研究開発事業「マイナーアクチニドの中性子核データ精度向上に係る研究開発」で得られた研究成果を報告するとともに、炉物理に関連した様々な他の研究開発の報告を核データ評価、及び、本事業の遂行の見地から情報収集や意見交換を行った。

私自身は現在、日本原子力研究開発機構の核データ研究グループで原子力システム研究開発事業「マイナーアクチニドの中性子核データ精度向上に係る研究開発」の特定課題推進員として核データの評価の仕事をしているが、炉物理の専門家ではなく、それどころか原子力機構に着任以前の専門は理論核物理であったため、専門外の炉物理の国際会議に関する記事を書ける自信はなかったが、「核データの関係者としての視点」で書いてほしいという依頼だったので僭越ながら核データニュースの執筆を引き受けることにした。



会場周辺のSun Valleyの景色（写真：京大炉 高橋氏提供）



左：会議会場のSun Valley Inn。右：宿のSun Valley Lodge（写真:JAEA 小嶋氏提供）

2. 会議の内容

PHYSOR 2016 はアメリカ原子力学会（ANS）が中心となって開催された炉物理の研究と開発のために 2 年おきに開催される国際会議であり、口頭発表 345 件、ポスター発表 41 件、計 386 件もの発表があり、欧米諸国以外にも中国・韓国、そして日本からも多数の参加者があり、総勢 454 名に上る非常に大規模な会議だった。会場となったアイダaho州のサンバレーはヘミングウェイが全米に紹介したことで有名なスキーリゾート地であり、自然豊かな山々に囲まれた穏やかな土地柄で、天候にも恵まれ、多くの研究者がセッションの合間に屋外で青空の下、終始和やかな雰囲気の中で議論や交流を深めるなどの光景が見られた。

会議のトピックスは原子炉物理、モンテカルロ・シミュレーション、マルチフィジクス、不確かさ、核燃料サイクル、核データなど多岐に渡った。先進燃焼炉やペブルベッド炉などにおける核データの不確かさの影響を調べるなど、核データの見地からも興味深い報告も含まれていた。先進燃焼炉の運転性能における核データの不確かさの影響についての報告では、U-238, Pu-239,240, Na-23, Fe-56 などの核データの不確かさが炉定数パラメータに大きな影響を与えるということが報告されていた。また、ペブルベッド炉における断面積の影響に関する報告では、Pu-239, U-235, U-238, Xe-135 などの断面積の不確かさが中性子輸送方程式の解である固有値に対する影響が大きいということが報告されていた。

核データ評価のセッションでは、分子動力学法に基づく LiF - BeF₂ 混合フッ化物溶融塩（FLiBe）内における中性子束の熱化についての理論計算や R 行列理論を用いた O-16 の新しい実験値の解析で得られた核データによる炉定数への影響、超高温環境下における臨界計算における核データの不確かさの影響などの大変興味深い報告もあった。R 行列理論を用いた O-16 の評価に関する報告では、炉物理計算などに用いる評価データは常に新しいものに更新すべきだという主張と議論がなされていた。ただし、全般的に、核

データ評価のセッションでも計算結果を示すにとどまり、核データ評価の観点からの詳細な議論（例えば、異なる核データライブラリを用いたことによる結果の変化に対しての原因の追究やライブラリの良し悪しについての議論など）はあまり見受けられなかったように思われる（非常に多くのパラレルセッションがあったので、一人の参加者が聴講できたのはごく一部であり、たまたま私が見たセッションだけがそうだった可能性もあるが）。

私自身は「Importance of the Neutron Flux Information to the Evaluation of Thermal Neutron Capture Cross Section and Resonance Integral of Minor Actinides」というタイトルで発表を行い、原子力システム研究開発事業で得られた研究成果を報告した。

ここで発表の内容を簡単に紹介する。放射化法で測定された既存の MA 核種に対する熱中性子捕獲断面積の測定値間には大きな食い違いが見られることに着目し、これまでに放射化法で断面積の導出に用いられてきた Cd 比法を、手法の基本となる Westcott の反応率表記モデルまで立ち戻って調べ直し、ばらつきが MA 核種の持つ特殊な共鳴構造に起因することを明らかにするとともに、それを補正する手法を見出した。その結果、最大 20% ほどの開きがあった熱中性子捕獲断面積の既存データのばらつきは 10% 以内まで改善されることを示した。一方で、共鳴積分値の既存データのばらつきは本手法では改善しないのは実験施設ごとの中性子束の熱外中性子成分の違いに起因する可能性があることを示した。また、熱中性子捕獲断面積、及び、共鳴積分値は中性子束の性質に非常に敏感であることから、測定環境下における信頼性の高い中性子束情報がこれら断面積の補正及び核データ評価の信頼性という点において重要であるという内容であった。

活発な質疑応答を期待していたが、元々、私のセッションは発表者が 3 人だったのが一人キャンセルされて二人だったということと、直前にスポンサー主催の「アイスクリーム・ブレイク」が行われていて、セッション開始時にはまだ多くの人ブレイクの会場にいて歓談中だったことなどもあり、私自身の発表時には聴衆が非常に少なく、お陰で気負わずに発表できたものの、質疑応答がほとんどなかったことは少々残念だった。



ポスターセッションの様子。飲み放題のビールを飲みながらリラックスモードで交流

3. 交流・意見交換

PHYSOR 2016 では自分の発表日当日の朝食で「Speakers Breakfast」という同じセッションの座長と発表者が朝食時に集う交流の機会が設けられていた。私の発表するセッションでは上述のとおり発表者が当初3人の予定だったが、一人がキャンセルとなってしまったため、発表者2人、座長一人、の計3人という少人数の「Speakers Breakfast」であったが、少人数ならではの深い議論を伴った忌憚のない交流をすることができた。他にも昼食や夕食時に多くの専門家との交流・意見交換をすることができた。

交流・意見交換のなかで「水素の中性子散乱断面積に不確かさがあるのはどうしてか？」「核物理の第一原理計算でしっかり定めることは出来ないのか？」という問いを受けた。水素の中性子散乱断面積は原子力において炉内の中性子の減速効果を見積もる上で非常に重要であることは専門外の私も知っている。しかし、これは実は長年、核物理屋を悩ましていた問題でもある。なぜなら、「水素の中性子散乱断面積に不確かさがある」というのは「核力がよくわかっていない」とことと等価な問題であるからである。

核力の基本的性質は核子同士の散乱実験などによって現象論的に確認されているように、非常に強い短距離引力であるが非常に近距離では強い斥力（斥力芯）を持ち、かつ、単純な中心力ではなくスピンやアイソスピンに依存する非中心力成分（テンソル力）も持つ力であることが明らかにされた。湯川秀樹の中間子理論によって核力は質量を持った中間子が媒介する相互作用であるという解釈が出来るということが示され、以来、核力の微視的な理論的記述の研究が行われてきたが完全な解明には至っていない。近年になり格子量子色力学（格子 QCD）を第一原理とした核力の計算がスパコンを用いて行われ、



セッションのひとコマ

中間子理論に基づく現象論的核力を再現したことが話題になったが、依然として斥力芯の性質は解明されておらず、更に原子力が求める定量的精度という観点でもまだまだ解決・改善する問題や検証することがたくさん残っていると考えられる。

このような核力研究の現状もあり、核物理では陽子-陽子散乱や陽子-中性子散乱（水素の中性子散乱）などの実験データと中間子理論を基にして作られた現象論的核力を用いて、原子核の構造や反応の微視的な計算を行う。これが核物理ではしばしば“第一原理計算”と呼ばれている。このように原子力で極めて重要な問題が核物理の最先端の問題でもあるのである。

また、炉物理計算における「核データの不確かさ」の影響に着目した発表がかなり多かったが、「水素の中性子散乱断面積」以外の核データの不確かさにも核力以外の未解決問題・懸案課題が大きく関わっている。

核物理では核力の問題以外に、

- ✓ 核力における3体力や密度依存力の存在の可能性の問題
- ✓ 対相関や変形の効果や標的核の振動・回転励起の効果など量子多体効果の全ての要素を考慮した理論計算
- ✓ 原子力で重要な低エネルギー・共鳴領域の微視的な反応過程の微視的記述
- ✓ (現象論的) 光学ポテンシャルの起源と微視的導出

などといった量子多体問題に根ざした未解決問題が数多く存在し、これらは核子-原子核散乱や原子核-原子核散乱の微視的な記述の上で極めて重要であると考えられる。もちろん、近年までに数多くの研究や進展がなされてきてはいるが、核力がよくわかっていないためにはっきりとした結論を導くことはなかなか難しいという現状がある。

核データの不確かさの改善のためには、高精度な実験測定もさることながら、評価・解析に用いる核物理のモデル（光学モデルなど）の信頼性も非常に重要な要素となるが、核物理に存在する問題の数々とその解決の困難さから、核データの不確かさの改善は一朝一夕にはいかないという現状であると言える。しかし、逆に言えば、原子力や核データ評価において頭を悩ませている問題（不確かさ）は最先端の核物理や素粒子の問題と直結している、という考え方もできる。

こう言った核物理の現状の話を作り交ぜつつ、炉物理における核データの不確かさに関する議論のあり方や不確かさの起源と今後の改善の可能性などの意見交換を行うことができた。意



バンケットの様子。いまいち盛り上がりず・・・

見交換の中で誰かが、「炉物理は総合科学」と言っていたが、その通りだと思う。輸送理論、拡散理論、核反応、核データなどを取り扱い、炉定数や原子炉のパフォーマンスへの影響として現れる核データの不確かさは核物理の最先端問題につながり、物理学におけるほぼ全ての要素を扱う学問である。

エンリコ・フェルミは理論屋でもあり実験屋でもあった。原子炉をつくる一方でフェルミオン統計の導出やベータ崩壊の理論、金属の熱伝導、はたまた白色矮星の安定性に関する理論など分野の垣根を越えて多大な業績をあげた史上稀に見る偉大な物理学者であった。彼の頭の中では、常に「総合科学」としてのイメージを持ちながら研究に取り組んでいたのではないだろうか。そういったことなどを思いつつ、(かつてフェルミが行ったような)核物理に未だ多く存在する謎の解明と原子力の新たな発展を両立させるような、原子力工学と核物理、理論と実験の相互フィードバックを行うような研究開発が再び出来ないだろうか、などと言った熱を帯びた意見交換も行うことができた。「言うは易く行うは難し」ではあるが、少なくとも思いと姿勢だけは持ち続けたいものだという気持ちになったので非常に有意義な交流だったと思う。

4. おわりに

私はポスドクとして海外で4年間（フィンランド2年、イタリア2年）過ごしたことがあります。アメリカは実はほとんど行ったことがなく、2007年学位取得直後にテネシー州オークリッジのワークショップに参加して以来の人生二度目の渡米でした。最初の時は（旅行を含めての）人生初の海外渡航だったので不安と高揚感が入り混じっていて、ひどい時差ぼけに悩まされたことを覚えています。

日本から開催地のアイダホ州サンバレーには、成田からロサンゼルス、ソルトレイクシティを経由し、ほぼ24時間を要してたどり着きました。初めての時には同行者にくっついていくので必死だったのですが、今回はわからないことがあれば即、誰か係の人を捕まえて英語で聞くことができるようになっていながら成長したものだ・・・と、9年という月日をしみじみと感じる今回の渡米でした。ただし、今回も前回と同様、ひどい時差ぼけに悩まされ、解消されることなく帰国の途につきました。けれども、サンバレーの穏やかで自然豊かな環境は天気にも恵まれ、十分に満喫できたと思います。



バンケット直前の様子。この時はまだまだ皆期待していた・・・



京大炉の佐野氏（右）と記念写真（写真：京大炉 高橋氏提供）

一つだけ大きな不満もありました。最後の Banquet です。プログラムには Western BBQ Dinner とあったので非常に楽しみにしていたのですが、通常の昼食と同じクオリティの料理と一人一杯までのみ無料のビールというものだったので（それ以上は有料。コーラも 3 ドルと言うぼったくり料金）、かなりがっかりしました。特にその日の昼食はアメリカらしいローストビーフとチキンをおかわり自由で食べることができたのですが（あれはかなり美味しかった）、バンケットのことを考えて控えめにしておいたのもあってがっかり感が余計に強かったです。初日のポスターセッションの時に会場でビールが飲み放題だったのもバンケットに過剰な期待を抱かせることにつながったと思います。

それはさておき、会議全般としては有意義な交流もあったので非常に充実した 1 週間でした。最後に、原子力システム研究開発事業「マイナーアクチニドの中性子核データ精度向上に係る研究開発」で得られた研究成果発表の機会を PHYSOR2016 への参加という形で与えていただけたことを事業の関係者の皆さまに深く感謝致します。