

会議のトピックス(II)

小型加速器中性子源に関する国際シンポジウム (UCANS9)に参加して

日本原子力研究開発機構

国枝 賢

kunieda.satoshi@jaea.gp.jp

1. はじめに

令和4年3月28日から31日にかけて開催された理化学研究所主催の小型加速器中性子源に関する国際シンポジウム(UCANS9)に参加した。オンライン形式ではあったものの、日本、欧州、カナダ、中国、韓国などから100名ほどの参加があり、多くの興味深い研究成果が報告された。また、中規模な会議ながらも活発な議論が行われた。

小型の加速器(中性子源)は、強度やエネルギーという観点では明らかにJ-PARCのような大型加速器には及ばない。しかしながら、柔軟性、コンパクト性、コスト面やメンテナンスし易さ等の観点からは大型にはない利点を備えている。そのことから小型加速器中性子源は、医療、インフラなど多様な応用分野において活用・活躍できる可能性を秘めていると言えるだろう。また大型施設を含め、国内外の施設・装置間の協調により、さらに活躍の舞台が広がるものと考えられる。なお、ワークショップのトピックスは、基礎科学というよりは産業・医学利用に主眼が置かれており、ほとんどの発表内容が社会実装を見据えたものであった。筆者のような基礎科学よりの研究者は多少のよそ者感があったものの・・・、みなさん、基礎研究に理解がある方が多く、(オンライン越しにはではありませんが)、とても暖かく接して下さり嬉しかったです。

2. 会議の概要

ワークショップでは、招待講演やポスター発表も含めて、全部で80件ほどの発表があった。参加者の発表は、医療、非破壊検査、宇宙放射線、中性子ターゲットや中性子場の設計に関する内容が主であった。なお、発表者の講演で登場する加速器の入射粒子のエネルギーについては、殆どが数十MeV以下であったが、中には100MeVぐらいの加速器に関する海外からの講演も数件ほど見受けられた(「小型」の定義に関しては、多少のマージンがとられていたと思う)。

医療分野においては、殆どが中性子捕捉療法 (BNCT) に関する発表であった。国内の大学をはじめ、欧州、カナダや中国から熱外中性子場の最適化などの核計算を含む実用面を意識した講演が多数あり、国際的に注目されている医療技術であることを改めて感じた。なお、中性子源として利用されている核反応は殆どが $p+{}^9\text{Be}$ であった。この中で、IAEA の発表が一件あり、各国の小型加速器中性子源の技術情報を収集・文書化しているとのことである。これは主に BNCT の今後の展開を見据えたプラットフォーム的取り組みとのことである。

非破壊検査の分野では、筆者は社会インフラ分野への応用に特に興味を持った。特に理化学研究所の研究グループから老朽化構造物 (橋梁や道路など) の検査を目的とした超小型加速器中性子源やオンサイト塩分分析技術等の講演があり、社会ニーズを的確にとらえかつ将来を見据えた大変意義のある研究であると感じた。また、国内外の大学から複雑機器内部の動的挙動イメージングやドップラー効果を利用した温度計測技術に関する講演があり、中性子による非破壊測定技術は現代/将来のハイテク技術を支えるツールの一つになり得ると感じた。当然、この分野においても中性子核反応や散乱が素過程に位置していることは言うまでもない。今後、保障措置や 1F デブリ分析等への応用も考えられるのではと個人的には思っている (会議では、おこがましいとは思いつつも・・・、筆者からその旨の発言をさせて頂いた)。

宇宙放射線の分野では、主に産業界の方々から半導体ソフトウェアに関する講演があった。ちなみに最近、ソフトウェアの話題を耳にすることが多くなったと感じているのは私だけであろうか (近年の宇宙&地上 (+1F) におけるハイテク技術の進歩・導入により国内外で関心が高まっているのは事実である)。とあるメーカーの方からの講演の一つに、半導体素子レベルのエラー率把握は大型の中性子源が適しているが、装置レベルであればむしろ小型中性子源を有効に活用することが現実的である、旨の報告があり興味を惹かれた。なお、ソフトウェア断面積なるワードが頻出していたため、核データ研究に携わっている筆者はコミュニケーションを取らずにはいられなかった (チャットで積極的に会話した)。

そのほか、中性子源そのものや中性子場の最適化に関する発表が多数あった。中性子源としては、今回の発表では $p+{}^9\text{Be}$ 反応を用いたものが最も多く、次いで $p+{}^7\text{Li}$ が多かった (たまたまかもしれません)。低エネルギー (10 MeV 以下) の陽子ビームで効率よく中性子を発生できることが本質的な理由だと思われる。また、ターゲットの放射化等の問題も抑えることができる。海外では重陽子反応を用いた研究も幾つか報告があった。さらに、会議の後半では、イメージング等で効果的な中性子場を作ることとを目的としたモデレータの最適化に関する報告が多数あった。よく話題に挙げられていたのはメシチレン (C_6H_{12}) という物質である。水素を多く含むため減速材としては適しているが、これまであまり検証や実績が無いものと見受けられた。今回の会議ではメシチレンに対する散乱則データ

の検証に関する講演など、核データ研究者にとって興味深い内容が多数あった。

3. 核データとの関係

さて、小型加速器中性子源と核データは、当然のことながら密接に関係している。まずは中性子源の設計には陽子や重陽子入射の核データが必須である。特にリチウムとベリリウムが重要であるが、少し大型の中性子源になるとタンタルやタングステンなども用いられている。ただし重核を用いると放射化や発熱などの課題があり、会議ではそれらに対する研究成果も幾つか見受けられた。次いで、冷中性子場や熱外中性子場を最適化するためのモデレータのデータ、即ち熱中性子散乱則のデータである。上述のメシチレンは特に最近注目されている物質と思われる（ちなみにデータは JENDL-5 に含まれている）。また、目的によっては即発ガンマ線データ、放射化断面積や崩壊データ等の核データが参照されていた。

会議では核データそのものの議論は少なかったものの、MCNP、PHITS、Geant-4等のシミュレーションコードによる解析結果が頻繁に登場しており、JENDLやENDF等の核データライブラリが使われていることが窺えた。中には核データライブラリ間の比較を行った研究発表が数件あり、優位な差異が生じている結果について興味深く聞きいるとともに、筆者は発表者に質問を何度かした。今後この分野で最もニーズが高いと感じたのは散乱則のデータである。小型加速器中性子源は大型に比べ強度が低いことから、モデレータの選択/設計に関しては特に力を入れているようである。ワークショップで親しくなった(?)欧州の研究者からは、JENDL-5のデータの利用法などについて会議後に問い合わせなどを幾つか頂いた。この会議をきっかけに、今後の核データのニーズ把握に努めたい。

4. 筆者の発表について

理研のRANSチームと交流があったこと、また、とある方のお誘いもあり、筆者は本シンポジウムに初めて参加した。自身は多少のよそ者感を感じていたものの、背後にある素過程は核反応であり、参加者は核データに絶対興味を持っており(今後持つようになるのでは)と内心では思っていた。

筆者の発表は $p+{}^9\text{Be}$ の核データに関する内容である。上述の通り、小型加速器中性子源には $p+{}^9\text{Be}$ 反応が利用されることが多い。歴史的には、米国 LANL で LA150 (現在は ENDF へ統合されている) が開発された 2000 年頃からデータ自体は利用可能であった。2015 年に公開された JENDL-4.0/HE では、チャンネル結合計算等を取り入れた $p+{}^9\text{Be}$ の評価済データが格納されたのだが、ENDF よりは良い TTY ベンチマーク結果を与えるものの、数 MeV 領域でのパフォーマンス向上には限界があった。これは、本質的には ${}^9\text{Be}$ が少数多体系であり、従来の核データ評価では光学模型や統計模型などを半ば強引に適

用していたことによる。理研はこの問題を認識しており、近年、 ${}^9\text{Be}(p,xn)$ 二重微分断面積を記述する関数を独自に開発した（若林関数[1]）。筆者の発表内容は、この新たな関数に一部改良を加え JENDL-5 の ${}^9\text{Be}(p,xn)$ の評価計算に適用したという内容である。また、TTY ベンチマーク解析の結果により、この関数（≡JENDL-5）が ENDF/B-VIII.0 や JENDL-4.0/HE に比べて（特に低エネルギーで）大きく改善されていることを示した。参加者からはベンチマークの詳細等について技術的な質問を受けたほか、海外の研究者から重陽子データの現状についても追加で質問を頂いた。その後の雑談を通じて、これらのデータに限らず、JENDL に興味を示している方々は少なくないと（オンライン越しに！）直に感じた。個人的には今後、この分野の方々とコミュニケーションを図りつつ、核データのニーズ調査を行いたいと考えている。

4. おわりに

UCANS 国際ワークショップは1、2年おきに開催されているようである。筆者がこのシンポジウムに参加したのは初めてであった。参加者の発表内容は将来性を感じる夢のある物が多く、社会実装を見据えた内容がほとんどであった。また、核データと直接あるいは間接的に関連のある内容が数多く見受けられた。読者の皆さん（特に若手の方々）には次回参加されることを是非お勧めしたい。最近、原子力の業界では小型モジュール炉の話題を耳にすることが多いが、日本での導入をめぐる（技術的？社会的？な）議論等においても何か参考になることがあるような気がしている。最後に、主催者の理研 RANS チームの方々へ心から敬意を表したい。

参考文献

[1] Wakabayashi Y, Taketani A, Hashiguchi T, et al. A function to provide neutron spectrum produced from the ${}^9\text{Be} + p$ reaction with pro- tons of energy below 12 MeV. Journal of Nuclear Science and Technology. 2018; **55** (8):859-867.