

## (2) 核反応測定及び実験施設・装置・測定技術・測定手法

日本原子力研究開発機構

木村 敦

[kimura.atsushi04@jaea.go.jp](mailto:kimura.atsushi04@jaea.go.jp)

明午 伸一郎

[meigo.shinichiro@jaea.go.jp](mailto:meigo.shinichiro@jaea.go.jp)

### 1. Nuclear reaction measurements (木村 敦)

Nuclear reaction measurements に関するセッションはパラレルセッションの期間 5 月 21 日から 23 日を通して開かれており、75 件の発表がアサインされていた。

発表国の内訳で見た場合、中国の発表が 17 件、ヨーロッパの発表が 22 件、米国の発表が 8 件、日本の発表が 7 件であった。近隣の韓国の発表が 3 件しかなかったのに対して、ルーマニアの発表が 5 件あったのは意外であった。また、アサインされた発表には、ナイジェリア 1 件、ベトナム 1 件、インド 3 件、ロシア 3 件などが含まれていたが、これらの講演はビザの問題か全てキャンセルされ、キャンセルの多いセッションであった。

発表種別で区分した場合、インバイト 9 件、レギュラー 48 件、ポスター (+ショートプレゼンテーション) 18 件となった。筆者もポスターの発表となっていたが、ポスターに関しては案内が少なく、自分のポスターを含め同様の研究を行っている研究者以外は積極的に見て回っている人が少ない印象であった。

実験を行った施設別でみた場合、中国の核破砕中性子源(CSNS)が 8 件、CERN の n\_TOF 実験施設が 10 件、JRC-IRMM の GELINA が 8 件、J-PARC・MLF・ANNRI を用いた発表が 3 件であった。

反応別で区分した場合、非弾性散乱反応が 9 件、捕獲反応が 13 件、核分裂反応が 3 件、高速中性子入射に対する反応 ( $(n,2n)$  反応など) が 13 件、陽子または荷電粒子の入射に対する反応が 9 件であった。発表者の都合を優先したためか、反応の種類ごとにプログラムをまとめようとした痕跡はあるものの、各種の反応がばらばらの日程でアサインされており、非常に聞きづらいプログラム構成となっていた。

以下に本報告者 (木村) が関心を持った発表について報告する。

今回の会議の発表で注目を集めたものの一つは中国の核破砕中性子源(CSNS)で行われている実験の発表である。CSNS では、核破砕中性子源となるタングステン標的から入射

陽子と同じ方向（後方）に発生する中性子を用いた「back-n ライン」と呼ばれる白色中性子源実験施設の建設を終了し、ADS の開発に向けた核データの測定研究が精力的に進められている。2017年11月より10kWの利用運転を開始し、昨年12月から約20kW、今年1月より50kWの運転を開始し、今年末までに80kW以上を目指し、その後Phase-1で目標とする100kWに達する予定である。「back-n ライン」には、核破碎中性子源となるタングステン標的から50mおよび80m離れた2箇所に実験室を設けており、ビームシャッターにより加速器運転中でも実験室への入室を可能としている。CERNのn\_TOF実験施設やJ-PARC・MLFと異なり、ビームラインが（物性の実験用に設置された）モデレータではなく中性子ターゲットを見る設計となっている。そのため、熱中性子の成分が小さく高エネルギー中性子が多いスペクトルとなっており、中性子のエネルギー範囲は1eV~200MeVとなっている。また、飛行距離80mでの中性子強度は $5 \times 10^6 / \text{cm}^2 / \text{s}$ とのことである。

「back-n ライン」では2018年より実験が開始され、今回のND2019でこれまでの実験の途中経過などが初めて報告された。主なものとしてはJiang氏（中国、北京大）が $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 反応断面積、Bai氏（中国、北京大）及びSun氏（中国、CAS）が $^6\text{Li}(n,t)^4\text{He}$ 反応断面積、Wang氏（中国、CIAE）が $^{56}\text{Fe}$ の非弾性散乱断面積と放出 $\gamma$ 線分布、Yang氏（中国、CAEP）が $^{235}\text{U}(n,f)$ 反応断面積の測定について途中経過を報告していた。

今後の計画としては、CERNのn\_TOF実験施設にあるTACと同じく40台のBaF<sub>2</sub>検出器からなる $\gamma$ 線スペクトロメータを設置し、 $^{169}\text{Tm}(n,\gamma)$ 実験を今年より行うとのことであった。また、「back-n ライン」を用いた共同実験の提案も募集しているとのことである。

その他の実験に関しては $^{244}\text{Cm}$ 、 $^{246}\text{Cm}$ の中性子捕獲断面積の測定が興味を引いた。 $^{244}\text{Cm}$ 、 $^{246}\text{Cm}$ の中性子捕獲断面積の測定に関してはAlcayne氏（スペイン、CIEMAT）がCERNのn\_TOF施設での暫定的な結果を「Measurement of the  $^{244}\text{Cm}$  and  $^{246}\text{Cm}$  Neutron-induced Capture Cross Sections at the n TOF Facility」というタイトルで、川瀬氏（JAEA）がJ-PARCにおける測定の結果を「Measurement of Neutron-capture Cross Sections of Radioactive Minor Actinide Isotopes with High Time-resolution Neutron Pulses at J-PARC/MLF」というタイトルで報告した。矛盾しない測定結果が得られており、双方の測定データを組み合わせて解析することでより信頼性の高い評価済データが得られることが期待できる。また、Cano-Ott氏（スペイン、CIEMAT）はAlcayne氏が行ったn\_TOF施設での測定から $^{245}\text{Cm}$ のガンマ線強度関数を導出する研究について「Study of Photon Strength Functions of Pu-241 and Cm-245 from Neutron Capture Measurements」というタイトルで発表を行った。川瀬氏の測定で観測された2MeV付近に肩を持つ特徴的なガンマ線波高スペクトルがn\_TOFの測定でも観測されており、この形状がScissorsモードに対応するM1ガンマ線強度関数により説明できる可能性が報告された。

## 2. Experimental facilities, equipment techniques and methods（明午 伸一郎）

Experimental facilities, equipment techniques and methods(実験施設、実験手法等)の講演では、5/21(火)から 5/22(水)に 7 回のセッションが開催され、5 件の招待講演、28 件の口頭発表、および 9 件のショートアナウンス付きのポスター発表があった。原子炉、核融合、および電子加速器を用いた  $\gamma$  線源にわたる多岐にわたる施設の発表が行われた。以下に本報告者(明午)が関心を興味もった内容を記載する。

韓国の太田(デジョン)で建設が進められている Rare Isotope Accelerator Complex for On-line Experiment (RAON)では、施設の建設状況が報告された。RAONの将来計画として、中性子およびミュオン源を視野に入れ建設が進められていることが報告された。

米国のロスアラモス国立研究所(LANL)の中性子散乱センター(LANSCE)にある中性子源に関して次世代の核破砕中性子源に関する発表があり、Be 反射体の構成の変更により keV 領域の中性子に対するパルス性能を改善した内容の発表があった。

欧州原子核研究機構(CERN)の n\_TOF から標的の変更に関する発表はじめ、最近の測定に関して報告があった。n\_TOF では、中性子ラジオグラフィの利用を開始したとの興味深い発表があった。CERN では材料照射試験用の施設(HiRadMat)において照射したインジウム固定標的をスイスのポールシェラー研究所(PSI)の核破砕中性子源(SINQ)に運送し、中性子ラジオグラフィにより非破壊検査を行ったことが、CERN で開催された標的損傷に関する国際ワークショップで報じられていたが、n\_TOF でも非破壊検査が可能となり、反陽子(AP)生成に用いられた標的に対するラジオグラフィの結果の発表があった。本報告者(明午)と類似した発音の苗字となり、原研の核データセンターに一時的に在籍し、n\_TOF の先のスポークスマンである ENEA の A. Mengoni 氏と議論を行ったが、n\_TOF で使用していた固体鉛標的では冷却水による腐食が問題となっていたため、今後は窒素ガスによる冷却方法に変更するとのことであった。CERN では LHC の高ルミネッセンス化のアップグレードのため、約 2 年間の停止期間が計画されており、この期間中に標的を変更する予定である。

また、n\_TOF ではビックバン元素合成における「宇宙リチウム問題」の解決のために、 ${}^7\text{Be}$  の中性子断面積測定を実施しており、この測定に用いる  ${}^7\text{Be}$  試料を SINQ の標的用の冷却水から製作する興味深い発表が PSI の E. Maugeri 氏からあった。高エネルギー加速器では、標的等の冷却水中に生成する  ${}^7\text{Be}$  の取扱いは一般的に頭の痛い問題となるが、これを逆手にとり試料を作製するのは面白いアイデアと思われた。PSI から本会議に参加した研究者は化学系の人が多く、物理系の研究者が参加する核データ国際会議では異例となる。今後の核データ測定の将来展望を考えると、広い範囲におよぶ研究の重要性を痛感せずにはいられなかった。

核分裂反応の詳細な研究のために、ローレンス・リバモア国立研究所(LLNL)の N. Walsh 氏よりタイムプロジェクトチェンバ(TPC)を用いた実験の発表があった。本実験はロスアラモス中性子科学センター(LANSCE)の白色中性子源(WNR)を用いて実施し、実験で

得られた断面積の絶対値の高精度化のために水素の反跳陽子を測定したことが報告された。断面積の絶対値導出のためには、白色中性子ではなく単色中性子を用いた実験が重要となることが紹介された。Walsh氏との詳細な議論により、今後オハイオ大学等の単色中性子を用いて実施する予定と報告された。また同氏とは TPC による核分裂片の測定と中性子検出器による即発中性子の測定と組合わせた実験の可能性等についても議論を行った。今後、TPC を用いた実験により、核分裂反応の詳細な研究が展開されるものと期待される。

主催者の報告によると、今回の発表内容において「核破砕反応、中間及び高エネルギー反応」に関する発表が最も多く、85 件の発表があったと報じられ、同分野の研究者としては嬉しいニュースでもあった。

その中でも、中国の CSNS からは、多数の報告があり、本トピックにおいて 4 件の口頭発表があった。実験室における中性子場の測定として、 $^{238}\text{U}$  を装荷した TPC を用いた中性子エネルギースペクトル測定の報告があり、測定で得られた中性子スペクトルは、FLUKA コードの計算と概ねよい一致を示しているように見えた。8 桁におよぶ対数を用いた中性子強度の表示のため一致しているようにも見え、今後において詳細な検討を行う必要があると感じられた。

残念なことに CSNS も物性の研究者がメインのユーザーであることから中性子の強度が優先されており、J-PARC と同じく 40ms 毎に (25Hz 運転) 1.6GeV に加速された 2 発の幅 60ns 陽子パルスが 420ns 間隔で中性子ターゲットに打ち込まれるダブルバンチ構造 (J-PARC は 3GeV に加速された 2 発の幅 100ns の陽子パルスが 600ns の間隔で中性子ターゲットに入射) で運転されており、同一の飛行時間に複数のエネルギーの中性子が混じる。このダブルバンチの補正法として、CSNS ではベイズ法に基づくアンフォールディング手法を既に開発しており、その報告があった。アンフォールディングによる中性子スペクトルは試験的に行った 1 バンチの測定結果とよい一致を示していた。この方法は J-PARC でも可能であり、MLF での実験に対し、本手法の適用性が CSNS の研究者より示唆された。CSNS では核データ測定の重要性が認識されており、CSNS の年間運転時間となる 4,500 時間のうち約 400 時間をビームバンチ幅の短縮等によりビーム出力を減少させてでも、核データ測定に適した運転を行う計画である。J-PARC センターの MLF では、物質および材料の研究の優先度が高く、核データ測定に特化した運転時間の確保は難しいものの、CSNS では核データの重要性が日本より尊重されている。これは、中国で積極的に進められている加速器駆動型核変換システム(ADS)の開発が背景の一つ要因としてあるのかもしれない。

CSNS の将来計画として、陽子及びミュオンを用いた実験施設の建設も報じられた。また、中国科学院近代物理研究所(IMP)の重イオン高エネルギー加速器用いた中性子利用施設の建設も報じられ、ADS に向けた積極的な研究が展開されていた。