

## 科学と技術のための核データ国際会議 (ND2022)

### (2) 実験・測定施設・測定手法・検出器

原子力機構  
核データ研究グループ  
木村 敦  
中村 詔司  
遠藤 駿典  
Gerard Rovira

東京工業大学  
ゼロカーボンエネルギー研究所  
片渕 竜也

[buchi@lane.iir.titech.ac.jp](mailto:buchi@lane.iir.titech.ac.jp)

#### 1. はじめに

ND2022 の測定、施設などのセッションが、7月25日(月)から28日(木)の4日間にわたって開催され、発表件数は、「Measurements」で80件、「Facilities」で36件と盛況であった。「Measurements」のセッションに参加すれば、それで4日間を費やしてしまい、その他のパラレルセッションに参加することが難しかった。そこで、参加した共著者にご協力をいただき、セッションで得られた情報を持ち寄ることにした。測定では、解析手法・施設などの情報が含まれているので、敢えて項目を細分化することはせずに、開催日ごとに参加したセッションのトピックスを記述することにした。本稿が、核データコミュニティの皆様にも少しでも最新の情報を届けられれば幸いです。

#### 2. 会議内容

##### 2.1 7月25日(月)

###### 【 Plenary II 】

Gade Alejandra 氏 (Michigan State Univ.)は、実験手法における近年の進展について概括した。進展の例として、①Masses、②Decays、③Excites states from  $\gamma$ -ray spectroscopy、④Transfer and capture reaction の4項目を挙げ、また新しいFRIB施設について説明した。①Masses について、Multi-reflection TOF spectrometer (MR-TOF)が、高精度質量分析に用いられている。例として、TRIUMFにおいて、 $^{63-70}\text{Fe}$ が $10^{-7}$ 精度で分析された。②Decaysで

は、 $^{11}\text{Be}$  の中性子ハローからの  $\beta$ -delayed proton emission の直接測定が行われた。③FRIB において、fast energy beam を用いて、nucleon knockout, inelastic scattering and Coulomb excitation, charge exchange, transfer, fragmentation などの反応が  $\gamma$ -ray tracking array で調べられている。また、アルゴンヌ国立研究所の ATLAS (Argonne Tandem Linear Accelerator System) 加速器に放射性ビームを供給する CARIBU (Californium Rare Isotope Breeder Upgrade) 施設では、transfer、Coulomb excitation、fusion evaporation, deep inelastic reaction などの低エネルギー反応が調べられている。更に、他の検出器と組み合わせた tracking array は、fusion-evaporation, transfer, charge exchange reaction などにおける triple coincidence spectroscopy ( $\gamma$ -recoil-p あるいは  $\gamma$ -recoil-n)に用いられている。FRIB では、GRETINA と LENDA を組み合わせ、仏 GANIL では、AGATA と NEDA を組み合わせている。④HELIOS のコンセプトを、ISOLDE(ISS)や FRIB(SOLATIS)に導入している ISOLDE の ISS で測定された  $^{206}\text{Hd}(d, p)^{207}\text{Hg}$  反応が例として報告された。高精度で excited-state energy を決定するために、HPGe array が用いられるが、Si 検出器と組み合わせた測定も行われてきている。米国の GRETINA/Gammasphere での  $^{40}\text{Ca}(^3\text{He}, \alpha\gamma)^{39}\text{Ca}$  のスペクトルが示された。最後に、新しい FRIB Lab.について簡単に説明があり、FRIB プロジェクトは、DOE とミシガン州立大学、及びミシガン州により資金提供されている。特徴は、400 kW ビーム出力( $5 \times 10^{13}$ 、 $^{238}\text{U/s}$ )、Separation of isotopes in-flight である。ユーザプログラムが 2022 年 5 月より開始し、1 kW 出力で最初の実験が行われた。2022 年の夏・秋に 3 kW、2023 年には 10 kW、以降は 20、50、100、200、400 kW と順次出力を上げていく予定とのことである。

Karlheinz Langanke 氏(GSI)は、“Nuclear Data – an essential tool in nuclear astrophysics”と題して、宇宙核物理における核データの重要性を概括した。Masses の包括的なデータセットとして、パラメータ化されたセット(3 種類)、微視的な多体モデルによるデータセット(1 種類)を示し、質量数毎の存在量の分布を良く説明することを示した。分布は半減期に依存することと半減期の包括的なデータセットについて説明があり、QRPA+Parametrization (2 種類)と QRPA+平均場 (3 種類)を示された。中性子魔法数の核種は、特に長い半減期を持つために、 $N=82$  と  $126$  の核種 (r-process の滞留ポイント)は、マスフローを制限してしまう。原子数  $Z$  に対する半減期の理研及び ISOLDE による測定データに対して、Zhi 等 (2013) による Shell モデル計算の半減期は良く一致していることが示された。Shell モデル計算で半減期が計算できるが、目標として  $N=82$  の核種の半減期測定が提案された。 $N=126$  に対しては、まだ測定データがない状況である。

## 【 Measurements I 】

A.Mengoni 氏は、CERN の n\_TOF 施設における研究活動と計画について総括して発表した。2つの実験エリアがあり、EAR1 は、Horizontal flight path 200 m、EAR2 は Vertical flight path 20 m である。3 世代目のターゲットへの更新について説明があった。99.99% Pb

Cradle Assembly(40×46×63 cm) で、窒素冷却、ホウ素添加水(幅 5 cm)を減速材としている。陽子ビームは、20 GeV/c、 $8.5 \times 10^{12}$  protons/pulse、繰り返し 1 pulse/1.2 sec、パルス幅 6 nsec である。また、ビームコースに設置された 2 つの測定ステーションに整備されている検出器について説明があった。EAR1(185 m)ステーションには、i-TED detectors、L-C<sub>6</sub>D<sub>6</sub> detectors、EAR2(20 m)ステーションには、s-TED detectors (ring configuration)×9 台、C<sub>6</sub>D<sub>6</sub> detectors×2 台、LaCl<sub>3</sub> detector×1 台の構成が示された。何を測定していくかに対して、Nuclear astrophysics, Advance nuclear system, medicine production など測定核種を挙げて、フェーズ毎に測定核種が示された。2022 年は Phase 4 で、<sup>243</sup>Am、<sup>79</sup>Se、<sup>239</sup>Pu、<sup>94, 95, 96</sup>Mo、<sup>160</sup>Gd、<sup>50, 53</sup>Cr、<sup>94</sup>Nb が示された。次に実施することとして“NEAR Station”が説明された。ターゲットステーション周りの遮蔽研究から、コリメータや気送管設備を取り付けた開閉式の遮蔽体から中性子を取り出して実験を行うことができる新しい near-target experimental area (NEAR station) が進められている。この新しい NEAR Station において、①Measurements of MACS by activation for nuclear astrophysics、②Fusion-related measurements (cross sections, not irradiation)、③Measurements of decay rates of long-lived isotopes の研究を行うとのことである。

S.Bennett 氏 (Univ.of Manchester) は、n\_TOF における <sup>35</sup>Cl(n, γ)反応断面積について発表した。<sup>35</sup>Cl は、①Boron Neutron Capture Therapy において、<sup>35</sup>Cl(n,γ)から脳への線量評価の誤差に影響を与え、②Astrophysics において、<sup>35, 36</sup>Cl と <sup>36</sup>S の存在比の係わりから“minor neutron poison”であり、TOF と AMS での測定による Maxwell average cross-section に食い違いを生じさせ、③Reactor Physics で、グラファイト減速材中の不純物として、<sup>36</sup>Cl 生成の誤差要因となる。実験は、n\_TOF EAR1(185m)ステーションで行い、4 台の C<sub>6</sub>D<sub>6</sub> 検出器を用いて、パルス波高重み法を用いた Total Energy Detection Method で測定を行った。<sup>197</sup>Au の飽和共鳴で規格化を行い、共鳴解析の結果を報告した。また、Resonance capture kernel の実験結果を、評価ライブラリ及び Sayer、Macklin らの結果と比較した。今回の結果は、評価ライブラリより若干 15%大きかったが、Macklin 等の結果と一致していた。

J.Lerendegui-Marco 氏 (IFIC, n\_TOF collaboration) は、“New perspectives for neutron capture measurements in the upgraded CERN-n\_TOF Facility”という題名にて、改良された n\_TOF 施設における中性子捕獲測定への新たな期待について発表した。EAR1 (185 m)ステーションにおいては、<sup>232</sup>Th(n,γ)反応の非分離共鳴領域では、中性子エネルギー1 MeV まで測定が及ぶことが示された。また <sup>80</sup>Se(n,γ)反応の分離共鳴領域では、100 keV までの測定が示された。これを受けて、EAR1 のために、高いエネルギー分解能は維持しつつ、中性子束の維持ないし増加が要求された。EAR2 (20 m)ステーションでは、<sup>244, 246</sup>Cm(n,γ)測定が示された。これを受けて、EAR2 にはエネルギー分解能の改善が要求された。そこで、2019 ~2022 年にかけて、3 世代目の新しい target が upgrade された。2 世代の Target は水冷却+水減速鉛ブロックであったが、3 世代目のものは窒素冷却+水減速鉛ブロックで、中性子

強度を 30%増強することを目指した。ターゲットを変更しても、EAR1 ではエネルギー分解能の性能を維持していた。さらに EAR2 における高計数率による影響を少なくするために  $C_6D_6$  検出器と散乱中性子による影響を抑制するためにコンプトンイメージング検出器からなる検出器システムを開発した。EAR2 では、 $^{197}\text{Au}$  と  $^{56}\text{Fe}$  の共鳴の測定結果を示し、エネルギー分解能が、1 eV から 10 keV の領域にわたって改善された。

## 【 Measurements II 】

Zhizhou Ren 氏 (Institute of Nuclear Physics and Chemistry) は、中国の核破砕中性子源 CSNS の Back-n white neutron source (Back-n) を用いて、 $^{232}\text{Th}/^{235}\text{U}$  核分裂断面積比の測定について報告した。W ターゲットに陽子ビームが入射し、入射方向と逆方向の back-streaming neutrons を”Back-n”と称しているようである。測定は、TOF 法で multi-cell fast fission ionization chamber を用いて行われた。1.6 GeV 陽子、W ターゲット、繰り返し 25 Hz、ビーム出力 40 kW で、single bunch mode、中性子ビームは 60 mmf で、飛行距離は 77 m であった。1~20 MeV の中性子エネルギー領域にわたって、 $^{232}\text{Th}/^{235}\text{U}$  核分裂断面積比を導出した。得られた結果は、過去の実験値及び ENDF/B-VIII.0 評価と傾向が良く一致していた。

Yonghao Chen 氏 (Inst. of High Energy Physics) は、CSNS の Back-n 施設において、 $^{235}\text{U}$  と  $^{238}\text{U}$  の核分裂断面積測定を報告した。但し、今回、ビーム出力 125 kW、Double-bunch mode での測定であった。但し、CSNS Phase-II では 500 kW に Upgrade する計画であり、single-bunch は可能とのことである。ビームラインには 2 つのステーションがあり、飛行距離 55 m に Endstation 1 (ES1)、76 m に Endstation 2 (ES2) があり、今回の測定では、ES1 を用いた。核分裂の測定には fission chamber を、中性子束をモニタするのに陽子反跳テレスコープを用いていた。 $^{235}\text{U}(n,f)$  及び  $^{238}\text{U}(n,f)$  断面積を、n-p 散乱断面積との相対測定により導出し、10 MeV~66 MeV までの暫定的な結果を報告した。今後、断面積の絶対測定と 100 MeV までエネルギー範囲を拡張する予定とのことである。

## 【 Machine Learning-1 】

Adrian Sanchez Caballero (CIEMAT) presented “Deep learning applied to capture cross section data analysis”. Deep learning applied to the TAC detector at n\_TOF to help with the data reduction process. The TAC produced a lot of information from the 40 crystals with two variables of interest, the crystal multiplicity and the total deposited energy. Deep learning can help improve the data reduction process that involves using cuts to constrain the two variables mentioned and improve the signal to noise ratio. A neural network classifier is used using the 40 signals as input. For  $^{197}\text{Au}$ , it was found that the deep learning can produce a signal to noise ratio 3 times higher than using traditional cuts.

## 2.2 7月26日(火)

### 【 Measurements III 】

V.Babiano-Suarez 氏 (IFIC) は、宇宙核物理における s-process の観点から  $^{80}\text{Se}(n,\gamma)$  反応断面積を n\_TOF にて高分解能で測定したことを報告した。測定場所は、EAR1 ステーション(185 m)で、中性子束  $6 \times 10^5$  n/pulse、4 台の  $\text{C}_6\text{D}_6$  検出器を使用した。純度 99% の  $^{80}\text{Se}$  試料 3 g を用いた。測定手法には波高重み法を用い、weighting function は Geant 4 コードを用いてシミュレーションにより用意した。バックグラウンドを差し引いた Capture yield のスペクトルを示され、SAMMY コードを用いて共鳴解析を行った。113 個の共鳴を解析し、そのうち 15 個は透過実験で既知の共鳴であり、残りの 98 個は新たな共鳴であるが報告された。1.47 keV ~ 100 keV までの共鳴解析の結果が示されて、例えば、1.47 keV については、スピンの同定が過去の透過実験では  $J^\pi=0.5^+$  であったが、 $J^\pi=1.5^-$  であり、この radiative kernel が評価ライブラリでは 35% 程過小評価されていることが報告された。熱領域におけるエネルギー依存の断面積の結果から、熱中性子捕獲断面積が  $0.547 \pm 0.014$  (b) と導出された。Maxwellian Average cross-section (MACS) の今回の結果は、過去の報告値と比較して 20-40% 小さいことが報告された。

M.Dietz 氏 (Univ. Of Edinburgh) は、s-process の議論のために  $^{72,73}\text{Ge}$  の MACS データの実験値が無いことから  $^{72}\text{Ge}(n,\gamma)$  反応測定を行ったことを報告した。測定は、EAR1 ステーションで行った。濃縮  $^{72}\text{GeO}_2$  試料(96.59%)を用い、4 台の  $\text{C}_6\text{D}_6$  検出器を使用した(実験手法は、上記、V. Babiano 氏と同じ)。得られた Capture Yield が示された。SAMMY コードを用いて共鳴解析を行い、中性子エネルギー範囲 43 keV ~ 300 keV で 99 個の共鳴を調べ、そのうち 77 個の新たな共鳴を同定した。MACS(30 keV)を、 $57.4 \pm 3.0$  (mb) と求めた。得られた結果を用いると、Ge から Zr にかけての核種の abundance に 5 ~ 20% の変化が生じることが報告された。

### 【 Measurements IV 】

V.Semkova 氏 (Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Bilgaria) は、1 ~ 20 MeV 中性子を Hf 同位体に照射して生成される核種の放射化断面積について発表した。JRC-Geel の 7 MeV Van de Graaff accelerator で、 $^3\text{H}(p,n)^3\text{He}$  反応、 $^2\text{H}(d,n)^3\text{He}$  反応、及び  $^3\text{H}(d,n)^4\text{He}$  反応で生成された中性子を用い、放射化法により実験を行った。照射後、試料を気送管で移送し、Ge 検出器で singles 測定を行って生成放射能を求めた。 $^{178}\text{Hf}(n,n'\gamma)^{178m1}\text{Hf}$ 、 $^{179}\text{Hf}(n,n'\gamma)^{179m1}\text{Hf}$ 、 $^{179}\text{Hf}(n,2n)^{178m1}\text{Hf}$ 、 $^{180}\text{Hf}(n,2n)^{179m1}\text{Hf}$  反応について、それぞれ得られた結果を報告した。得られた結果は、概ね TENDL-2017 の評価データを支持していたが、 $^{180}\text{Hf}(n,2n)^{179m1}\text{Hf}$  反応の結果は、TENDL の過小評価を示唆するものであった。

R.Vlastou 氏(National Technical Univ. of Athens)は、 $^{174,176}\text{Hf}(n,2n)^{173,175}\text{Hf}$  反応の断面積測定と理論研究について報告した。この 2 つの反応を対象としたのは、測定データが少な

く、かつデータ間のくい違いがあるからであった。ギリシャのアテネにある National Center for Scientific Research“Demokritos”の中性子施設で実験が実施された。施設に整備されている 5.5 MeV タンデム加速器は、準単色中性子ビームを供給でき、本発表では、 ${}^3\text{H}(\text{d},\text{n}){}^4\text{He}$  反応を用いて、15~20 MeV エネルギーで中性子束  $10^5 \text{ n/cm}^2\text{sec}$  を利用した。中性子エネルギーを 15.3、17.1、18.9、20.9 MeV と変化させていき、それぞれ 24~30 時間中性子照射して中性子放射化法により反応断面積を導出した。実験結果とともに、他の報告値、ENDF/B-VIII.0 の評価値、及び EMPIRE コードによる計算値を示し、比較した。 ${}^{176}\text{Hf}(\text{n},2\text{n})$  反応の実験結果は、過去の報告値及び ENDF 評価データと整合していたが、 ${}^{174}\text{Hf}(\text{n},2\text{n})$  反応の実験結果は、評価データや計算値より大きく、Serris(2011)の報告値を支持する傾向であった。

### 【 Measurements XIII 】

A.Wallner 氏(ANU, HZDR)は、thermal と sub-thermal (cold)中性子エネルギーにおける  ${}^{235}\text{U}$  の中性子捕獲断面積について報告した。断面積の直接の測定が難しく、例えば、即発ガンマ線を用いる測定の場合、核分裂ガンマ線との競合が生じてしまう。そこで、 ${}^{236}\text{U}$  は非常に長い半減期 2340 万年を持つことから、Activation と AMS を組み合わせた測定を行った。 ${}^{235}\text{U}/{}^{238}\text{U}$  同位体比が保証された  $\text{U}_3\text{O}_8$  試料に  ${}^{233}\text{U}+{}^{242}\text{Pu}$  をスパイクとして混入したものを、熱中性子場といくつかの冷中性子場で照射した。照射済み試料を化学処理して U、Pu を抽出し、加速器質量分析器で U と Pu 同位体の存在比を測定して、 ${}^{235}\text{U}(\text{n},\gamma){}^{236}\text{U}$  熱中性子断面積を導出した。 ${}^{235}\text{U}(\text{n},\gamma){}^{236}\text{U}$  熱中性子断面積を、 ${}^{197}\text{Au}$  の断面積を reference にして  $97.4\pm 2(\text{b})$  と、また  ${}^{238}\text{U}(\text{n},\gamma)$ 断面積を reference にして  $99.8\pm 2(\text{b})$  と導出した。

R.Mucciola 氏 (Universita di Bologna) は、n\_TOF および GELINA で、 ${}^{94,95,96}\text{Mo}$  同位体の捕獲断面積および全断面積測定について報告した。本研究は、SANDA プロジェクトの中の Task 2.2 : 中性子捕獲断面積のサブタスクとして実施されたようである。GELINA で透過実験を行い、得られた透過データを REFIT コードで解析して中性子エネルギー 5 keV までの共鳴を調べた。得られた結果は、論文発表する予定とのことである。また本研究で評価されたデータは、JEFF の新バージョンに提案するとのことであった。もう一方、n\_TOF ERA1 において、濃縮 Mo 試料を用いて測定が進められているが、今回はその実験結果の報告はなかった。

【補足】 SANDA (Supplying Accurate Nuclear Data for energy and non-energy Applications) プロジェクトは、EU の支援により 2019 年に始まったプロジェクトで、当初 4 年の予定。本プロジェクトは、核データの改善、データの不確かさの理解を深めることにより、以て中性子工学、臨界、放射線防護のシミュレーションにデータが利用されることを目的としている。いくつかの Working Package があり、R.Mucciola 氏の発表は、WP2 : New nuclear data measurements for applications in the energy and non-energy sectors の中の細分化された

Taskに基づき実施されたものと理解しています。

S.Singh 氏 (RPI) は、RPI の LINAC で、 $^{54}\text{Fe}$  の中性子捕獲と全断面積測定について報告した。 $^{54}\text{Fe}(n,\gamma)$ 測定は、7 台の  $\text{C}_6\text{D}_6$  液体シンチレータ検出器アレイ、飛行距離 45 m で実施された。波高重み法を適用した。 $^{54}\text{Fe}$  の Capture yield を SAMMY コードでフィッティングして、得られた結果が示された。また、捕獲反応データのフィットを改善するために透過実験も行った。測定試料を 15 m の位置にセットし、35 m 位置に Li-glass 検出器を配置して透過実験を行った。透過実験のデータと SAMMY コードによる解析結果が示された。n\_TOF で得られた共鳴パラメータでは、うまく実験データをフィットできていないようであった。更なる検討が必要で、今後、共鳴パラメータのフィットや分解能関数の検討も進めるとのことである。今後、収束した解析結果が期待される。

筆者の一人である片淵竜也(東工大)は、keV 領域における  $^{128}\text{Te}$  の中性子捕獲断面積と捕獲ガンマ線スペクトルについて発表した。実験は、東工大 3MV ペレトロン加速器にて、 $7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$  反応による 15~91 keV、及び 550 keV の中性子を利用した。飛行距離は 12 cm ないし 20 cm に試料を配置し、中性子ビームに対して 125 度にアンチコンプトン NaI 検出器を配置した。Te 試料は、金属ペレットで、純度 >99.994%、重さ 2.980g、直径 16 mm であった。Te 試料、Blank、そして Au 試料を、順次、測定した。550 keV 中性子で得られた TOF スペクトル、及びパルス波高スペクトルを示し、15 keV~91 keV 及び 550 keV のエネルギー範囲で断面積の結果を報告した。得られた結果は、JENDL-4.0 評価データを支持するものであった。550 keV で、放射化法による過去の測定結果との違いが 30%程度あることが分かり、 $^{129}\text{Te}$  のアイソマーの寄与がこの差の原因になっている可能性を示唆した。

片淵研究室 D3 の中野秀仁(東工大)は、J-PARC MLF の ANNRI 装置を用いた  $^{107}\text{Pd}$  の中性子捕獲断面積測定とその共鳴解析について発表した。 $^{107}\text{Pd}$  試料は、濃縮 15%で、全重量 137.4 mg 中、 $^{107}\text{Pd}$  は 21.0 mg であった。J-PARC の物質生命科学実験施設のビームライン No.4 に設置されている ANNRI 装置を用いて、TOF 法により測定を行った。ANNRI に整備されている大型のアンチコンプトン NaI 検出器を用いた。 $^{107}\text{Pd}$  の熱領域におけるエネルギー依存断面積の暫定結果を報告した。得られた結果は、熱領域において JENDL-4.0 より大きい値を示した。中性子エネルギー領域 3.9 eV から 500 eV の共鳴について、REFIT コードを用いた共鳴解析を行い、JENDL-4.0 の共鳴パラメータに近い結果を得た。

### 【 Reactor Data-III 】

E.M. Gonzalez-Romero (CIEMAT) presented “The SANDA EURATOM project”. The project aims to produce accurate and reliable tools including data, codes and methodologies that can be used to simulate, analyze, optimize, exploit and evaluate the safety of nuclear energy and non-energy applications. The proposal is built taking into account the High Priority Nuclear Data needs

list from OECD/NEA and IAEA to provide the final users with immediately usable data and tools for the cases where this is feasible during the project duration. The project is focused on six work packages:

WP1: Developments of new innovative detector devices

WP2: New nuclear data measurements for energy and non-energy applications

WP3: Target Preparation for Improvement of Nuclear Data Measurements

WP4: Nuclear data evaluation and uncertainties

WP 5: Nuclear data validation and integral experiments

WP 6: Management, ND research coordination at EU level and Education and Training

### **【 Facilities I 】**

M. Bacak (n\_TOF collaboration) presented “Design, construction, commissioning and early operation of the third-generation n\_TOF neutron spallation target at CERN”. A new spallation target has been implemented at the n\_TOF facility consisting of N<sub>2</sub> cooled Pb cladding optimized for both EAR1 and EAR2 stations. The new target has two different moderators: a borated-water moderator for EAR1 and a water moderator for EAR2.

Alberto Mengoni (n\_TOF collaboration) presented “Status and perspectives of the n\_TOF Facility at CERN following the upgrades and consolidation during CERN’s Long Shutdown 2”. The future perspectives of the n\_TOF facility were presented with focus on the newly developed spallation target. Moreover, a new facility called NEAR station for material irradiation was also presented. Construction of facility is still not finished but already started activity.

M. Bacak (n\_TOF collaboration) presented “Characterisation of the n\_TOF/CERN 185m beam-line after the facility’s major upgrades”. EAR1 station at n\_TOF has been recently improved starting with the newly implemented spallation target together with the replacement of the beamline magnet and the addition of two interchangeable collimators for capture and fission experiments, respectively. Experiments showed that the high resolution of the EAR1 facility was preserved following the aforementioned improvements.

Jose Antonio Pavon-Rodriguez (n\_TOF collaboration) presented “Characterisation of the n\_TOF 20 m beam line at CERN with the new spallation target”. The main features and improvements in the EAR2 station at n\_TOF after the implementation of the new spallation target were presented. Results of simulations and experiments were showed of the EAR2 neutron flux that extends from 25 meV to 1 GeV, with improved energy resolution and an intensity 30 to 40 times higher compared to EAR1.

Elisso Stamati (n\_TOF collaboration) presented “The n\_TOF NEAR Station: Physics case and commissioning”. The NEAR target was recently commissioned near the spallation target at the



n\_TOF facility with a very high neutron flux. This facility consists of two stations: an irradiation station aimed at assessing the radiation effects to materials and electronics and an activation station focused on activation measurements on low-mass/high activity samples. The first experiments have already started and the team is investigating the possibility of shaping the NEAR station beam into different Maxwellian distribution for further experiments.

### **【 Facilities II 】**

Katelyn Cook (RPI) presented “New Capabilities of the RPI  $\gamma$ -Multiplicity Detector to Measure  $\gamma$ -Production”. The RPI  $\gamma$ -Multiplicity detector consists of 16 segment NaI(Tl) multiplicity detector aimed at capture yield measurements in 0.01 eV - 3 keV energy range in order to measure  $\gamma$ -emission energy spectra to help understand  $\gamma$ -heating. The new data acquisition system was validated by measuring well-known materials. The resonance capture yields of  $^{181}\text{Ta}$  and  $^{180\text{m}}\text{Ta}$  as a function of neutron energy together with  $^{235}\text{U}$  and  $^{238}\text{U}$  low-energy capture measurement (0.01 – 100 eV) were used for the present validation. Moreover, MCNP was modified to compare  $\gamma$ -emission spectra to experimental results.

### **【 Nuclear Astrophysics 】**

Simone Amaducci (Laboratori Nazionali del Sud) presented “Measurement of the  $^{140}\text{Ce}(n,\gamma)$  cross section at n\_TOF”. The neutron capture cross section of  $^{140}\text{Ce}$  was measured at the n\_TOF facility. Cerium is mostly produced via s-process. The final abundance of  $^{140}\text{Ce}$  (89% of natural cerium) predicted by stellar models strongly depends on its destruction channel  $^{140}\text{Ce}(n,\gamma)$ . Moreover, the MACS (Maxwellian average cross section) is determined by resonances in keV region. The resonance region was analyzed up to 65 keV and MACS was obtained using n\_TOF experimental data and also using JENDL-4.0. The n\_TOF+JENDL-4.0 MACS results are about 20% higher than KADoNiS at low temperature but a reasonable agreement is observed at 30 keV. Since the obtained  $^{140}\text{Ce}$  capture MACS has increased by 20%, it would decrease the abundance of  $^{140}\text{Ce}$  by  $\sim 20\%$ .

### **【 Facilities III 】**

Nil Font i Geli (UPC) presented “miniBELEN: a modular neutron long counter for  $(\alpha,n)$  reactions”. A modular neutron counter was developed within the MANY (Measurement of Alpha Neutron Yields) collaboration in Spain aimed at improving the present experimental data which was mostly measured decades ago. The detector is composed of thermal neutrons counters ( $^3\text{He}$ ) + moderator (high density polyethylene), with a detection efficiency nearly independent from the neutron energy (flat response) up to 8/10 MeV and a modular structure that allow for the detector

to have three different configurations. The detector system characteristics were obtained using  $^{252}\text{Cf}$  neutron sources and the well-known  $^{27}\text{Al}(\alpha,n)^{30}\text{P}$  reaction.

### 2.3 7月27日(水)

#### 【 Measurements VI 】

A.Olacel 氏 (IFIN-HH) は、ベルギー-GELINA の GAINS スペクトロメータについて、過去の開発から将来の Upgrade について総括した。GAINS とは、Gamma Array for Inelastic Neutron Scattering の略であり、基礎研究および応用研究のために中性子非弾性散乱断面積を高精度で測定することを目的としている。GELINA は、Belgium の European Commission-Joint Research Centre の Geel Electron LINear Accelerator であり、加速電子エネルギー70~140 MeV、幅<1 nsec、U-Mo ターゲットにおける光核反応により中性子を発生させている。飛行距離が 8 m から 400 m に及ぶいくつかの飛行管を有する。GAINS スペクトロメータは GELINA 施設に 2000 年から整備され、2~4 台の HPGe 検出器、データ収集システム、検出器架台などが幾度かのアップグレードを経て、2022 年現在は、12 台の高純度 Ge 検出器のレイが、飛行距離 100 m に設置されている。GAINS はビームモニタのために  $^{235}\text{U}$  核分裂チェンバーを備えており、熱中性子エネルギーから 20 MeV までの中性子誘起反応を測定することができる。GAINS は更に高精度とエネルギー分解能の性能を有している。GAINS スペクトロメータを用いて、 $^{235}\text{U}(\text{n},\text{f})$ 断面積で規格化して、ガンマ線生成断面積を測定してきている。また、 $^{58, 60, 61, 62, 64}\text{Ni}$  について測定し、PRC に受理されたとのことである。2022 年の現在、 $^{40}\text{Ca}$ 、 $^{17}\text{N}$  について解析を進めており、2023 年は  $^{56}\text{Fe}$ 、2024 年は  $^{35-37}\text{Cl}$  を測定する計画を述べられた。今までの測定結果の例として、 $^{\text{nat}}\text{Ti}(\text{n},\text{n}'\gamma)^{\text{nat}}\text{Ti}$  や  $\beta\beta(0\nu)$  について紹介された。

T.Nagel 氏 (Univ. Of California, Berkeley) は、Molten Chloride Fast Reactor で熔融塩中の  $^{35}\text{Cl}$  による長寿命核種  $^{36}\text{Cl}$  の生成や中性子経済の観点から、 $^{35}\text{Cl}(\text{n},\text{x})$  反応断面積測定について発表した。実験は 3 つのパートからなり、Integral Exp.#1 は、NaCl タブレットを中性子源のすぐ下流に置いて、 $^{35}\text{Cl}(\text{n},\text{p})$  と  $^{35}\text{Cl}(\text{n},\gamma)$  反応により生成される  $^{35}\text{S}$  と  $^{32}\text{P}$  の生成を調べた。Differential Exp.#2 は、NaCl タブレット試料を HPGe とシンチレーターアレイに配置して、 $^{35}\text{Cl}(\text{n},\text{n}'\gamma)$  及び  $^{35}\text{Cl}(\text{n},\gamma)$  反応を調べた。さらに、Differential Exp.#3 は、CLYC (Ce:Cs<sub>2</sub>LiYCl<sub>6</sub>) active target から  $^{35}\text{Cl}(\text{n},\text{p})$  と  $^{35}\text{Cl}(\text{n},\gamma)$  反応を調べた。Exp.#1 では、 $^{35}\text{S}$  及び  $^{32}\text{P}$  の生成放射能を、Exp.#2 では得られたガンマ線スペクトルから暫定結果として各ガンマ線の Partial cross-section を導出した。Exp.#3 から暫定的な  $^{35}\text{Cl}(\text{n},\text{p})^{35}\text{S}$  cross section を 3.5 MeV~5 MeV の範囲で導出し、過去の報告値と比較した。傾向として、Kuvin(2020)のデータを支持していた。

S.Kuvin 氏 (LANL) は、 $^{56}\text{Ni}$  と  $^{59}\text{Ni}$  の中性子誘起荷電粒子反応の直接測定について発表した。 $^{59}\text{Ni}$  ターゲットを用いて、 $^{59}\text{Ni}(\text{n},\text{p})^{59}\text{Co}$  および  $^{59}\text{Ni}(\text{n},\gamma)^{56}\text{Fe}$  反応を調べた。また、

$^{56}\text{Ni}(n,p)^{56}\text{Co}$  と  $^{56}\text{Co}(n,p)^{56}\text{Fe}$  反応は、放射性的 Ni/Co のターゲットを用いて調べた。測定は、LANSCE にある“LENZ”を用いて行った。LENZ は、Low Energy (n,z) experimental station の略称で、ターゲット試料の近くに配置された double-sided silicon strip detectors により放出された荷電粒子を検出するものである。中性子エネルギー500 keV~10 MeV における  $^{59}\text{Ni}(n,p)$  および  $^{59}\text{Ni}(n,\gamma)$  の測定データが示され、統計模型計算 CoH3 コードの結果と比較して、良い一致を得ていた。

A.Negret 氏 (IFIN-HH) は、GELINA の GAINS スペクトロメータを用いた  $^{56}\text{Fe}(n,n'\gamma)$  の新たな測定を提案した。(A.Olachel 氏の発表で、 $^{56}\text{Fe}$  は 2023 年実験予定。) Negret 氏らは 2014 年に GELINA で  $^{56}\text{Fe}(n,n')$  を測定したが、ENDF/B-VIII.0 の評価では Nelson(2004)等のデータが採用されていた。しかし 2 MeV~12 MeV の範囲で過去の測定データ間のくい違いが大きかった。そこで、Fe の遮蔽ベンチマークを説明するように新たな推奨データとして 4~20 MeV は Nelson(2004)のデータを、4 MeV 以下は Voss(1971)のデータが採用された、とのことである。このような経緯から、GELINA において新たに  $^{56}\text{Fe}(n,n'\gamma)$  測定が提案された。本提案では、Flight Path 3 の 100 m 距離で、現在整備されている 12 台の高純度 Ge 検出器で構成された GAINS スペクトロメータを用いる。また、Fe 試料は、前回  $^{54}\text{Fe}$  であったが、今度は  $^{56}\text{Fe}$  濃縮試料を用意する予定である。また、normalization はダブルチェックのために、 $^{235}\text{U}(n,f)$  fission chamber と非弾性散乱の standard として  $^7\text{Li}$  を用いる方針である。今後、2023 年に実施される GELINA での実験結果が期待される。

## 【 Measurements VII 】

R.Sahoo 氏 (Hebrew Univ. of Jerusalem) は、 $^{41}\text{Ar}(n,\gamma)^{42}\text{Ar}$  反応を、元素合成の観点から放射化法と質量分析を併用して調べた。 $^{40}\text{Ar}(n,\gamma)^{41}\text{Ar}(n,\gamma)^{42}\text{Ar}$  (32.9 年) 反応は、“mini r-process”を見るようなものである。 $^{40}\text{Ar}$  ガスを容量 0.768 cc の石英管に 314 Torr の圧力で封入したものを、仏ラウエ・ランジュバン研究所の原子炉の高束中性子束  $10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>sec で 8 日間照射して、 $^{42}\text{Ar}$  を生成させた。照射後、 $^{42}\text{Ar}$ (32.9 年)と  $^{42}\text{K}$ (12.36 時間)の放射平衡を利用して、 $^{42}\text{K}$  の放射能をガンマ線分光で求めた。更に、加速器質量分析を行って  $^{42}\text{Ar}$  の直接検出を行った。 $^{42}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  の同位体比の結果と  $^{40}\text{Ar}(n,\gamma)^{41}\text{Ar}$  反応の断面積 673 (mb)を用いて、 $^{41}\text{Ar}(n,\gamma)^{42}\text{Ar}$  反応の断面積を  $230\pm 40$  (mb)と導出した。

D.Koliadko 氏 (Nuclear Physics Institute of the Czech Academy of Sciences) は、High Priority Request List から  $^7\text{Li}(d,x)^3\text{H}/^7\text{Be}$ 、 $^{39}\text{K}(n,p)^{39}\text{Ar}$  反応断面積測定について発表した。測定の動機は、 $^7\text{Li}(d,x)^7\text{Be}$  反応については、 $E_d > 12$  MeV での測定がなく、 $^7\text{Li}(d,x)^3\text{H}$  反応では、5~7 MeV で信頼できるデータがないためである。測定は、U-120M Cyclotron で行われた。  
①  $^7\text{Li}(d,x)^3\text{H}/^7\text{Be}$  反応について、重陽子源には、U-120M サイクロトロン 10~20 MeV を用い、試料  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ 、1 mm 厚のペレットを照射した重陽子のエネルギーを 9.8 MeV、12.5 MeV、16.0 MeV と変えて照射した。照射後、HPGe 検出器にて生成された  $^7\text{Be}$  の放射能を測定

した。生成された  ${}^3\text{H}$  は、ペレットにトラップされていると仮定して、液体シンチレーション測定器にて放射能を測定した。Be 生成断面積について、暫定的な結果を示され、ENDF/B-VIII.0 評価データとよい一致を示していた。

②  ${}^{39}\text{K}(\text{n},\text{p}){}^{39}\text{Ar}$  反応について、Mica 箔を使用し Frascati neutron source (D+T) 14MeV 中性子で照射した。照射後、160 日間冷却して、Si(Li)検出器で  ${}^{39}\text{Ar}$  の生成放射能を測定した。 ${}^{39}\text{K}(\text{n},\text{p}){}^{39}\text{Ar}$  反応断面積の暫定結果  $0.09\pm 0.04(\text{b})@14 \text{ MeV}$  を導出し、それは TENDL-2015 評価データを支持していた。

## 【 Facilities V 】

Marcin Bielewicz (NCNR) presented “The Modular Cosmic Ray Detector (MCORD) at physics and astrophysics experiments”. The modular cosmic ray detector (MCORD) is a modular detector that has many applications. It can be used to identify trigger signals and background signals from cosmic ray in many experimental setups or as cosmic calibration in off-beam measurements. It can be also used as muon identifier and in many astrophysics applications as well. Moreover, due to its modular nature, it can be easily upgraded or be used in different applications. The spectrometer consists of 2 sections (2 x 8 plastic scintillators). Several test and initial experiments to demonstrate the uses of the detector were presented.

Andreea Oprea (IFIN-HH) presented “Nuclear data activities at GELINA”. The main characteristics of the GELINA facility were presented in this presentation. The GELINA facility is situated in Geel, Belgium. This neutron facility features a white neutron source that allows for experiments using the time-of-flight (TOF) to be easily performed. 12 different experiments can be carried out simultaneously with flight paths ranging from 10 m to 400 m. The different experiment types possible include: simultaneous neutron elastic and inelastic measurements using the ELISA array, neutron inelastic experiments with the GAINS or the GRAPhEME spectrometers. Transmission experiments are attainable using Li detectors at flight paths of 10, 25 and 50 m and capture experiments can be performed at 12.5 m and 60 m using  $\text{C}_6\text{D}_6$  detectors.

## 【 Facilities VI 】

Elisabeth McCutchan (NNDC) presented “A new decay station for precision decay spectroscopy at Brookhaven”. The plans of the new decay station currently under construction at the NNDC were presented. This facility aims to provide comprehensive and precise measurements of the decay radiation emitted by unstable isotopes. This would allow for isotopes of interest to nuclear data applications to be produced, analyzed, and included in NNDC databases in-house, creating a mechanism for the rapid generation of high-quality nuclear data. The station will feature a multiparameter spectrometer to enable complete and precise characterization of the radiation

emitted from unstable isotopes. Pixelated silicon detectors will allow the detection of  $\alpha$  and  $\beta$  particles, while germanium detectors will be used to detect X-ray and  $\gamma$ -ray emission. The performance of the new system was presented, along with first measurements from the commissioning runs.

## 2.4 7月28日(木)

### 【 Measurements IX 】

B.Mauss 氏(CEA)は“Prompt fission neutron spectra in the  $^{235}\text{U}(\text{n},\text{f})$  reaction”と題して、 $^{235}\text{U}(\text{n},\text{f})$ 反応における即発核分裂中性子スペクトル(prompt fission neutron spectra : PFNS)の測定について、概括して報告した。PFNS のデータは、中性子輸送コードの入力データや(次世代)炉心の設計や圧力容器への損傷を考える上で必要である。PFNS は、入射中性子エネルギーに依存し、入射中性子に対する PFNS の平均エネルギーの評価値にくい違いがある。そのため、1 MeV 以上の入射中性子に対して、 $^{235}\text{U}(\text{n},\text{f})$  PFNS を測定する必要がある。Los Alamos Neutron Science Center の Weapons Neutron Research facility にて、入射、及び核分裂中性子 Segmented Chi-Nu 中性子液体シンチレータアレイ(54 台)と fission chamber とを組み合わせたセットアップで、 $^{252}\text{Cf}$  に対して  $^{235}\text{U}(\text{n},\text{f})$  反応からの PFNS を測定した。二重飛行時間を用いて、核破碎ターゲットからの入射中性子エネルギー、及び核分裂チェンバーからの核分裂中性子を測定した。Pulse Shape Discrimination により、n- $\alpha$  弁別を行った。入射中性子の関数として 100 keV~12 MeV の領域における  $^{235}\text{U}$  の PFNS の暫定結果が示された。また、入射中性子の関数として即発核分裂中性子の平均多重度の暫定結果を示した。PFNS 測定において、測定エネルギー範囲を広げ、時間分解能を改善し、また中性子に対する検出効率を向上させた新しい検出器(72 台の検出器の配置) Versatile Neutron DETector Array(VENDETA)を夏の終わりには建設し、2022 年 9 月~10 月に  $^{238}\text{U}(\text{n},\text{f})$  反応の測定に用いる予定である。 $^{240}\text{Pu}(\text{n},\text{f})$  反応の実験は、2023 年に計画しているとのことである。

Frank Günsing 氏(発表交代)は“Measurement of the  $^{241}\text{Am}$  neutron capture cross section at the n\_TOF facility at CERN”と題して、 $^{241}\text{Am}(\text{n},\gamma)$  反応断面積測定について報告した。CERN の n\_TOF 施設の EAR1 における Fraval と Mendoza 等による過去の測定に続いて、今回は EAR2 ステーションで行われ、飛行距離 20 m、熱中性子束  $2 \times 10^6$  n/cm<sup>2</sup>sec オーダーであった。今回の目的は、先の測定ではよく調べられていなかった低エネルギー領域を精度良く測定することであった。 $^{241}\text{Am}$  試料は、32 mg の  $^{241}\text{Am}$  酸化物に酸化アルミを加えて、12.26 mm $\Phi$ ×2.1 mm の平板ペレット状にしたもので、それをアルミの容器で密封した。 $^{241}\text{Am}$  試料の放射能は 4 GBq であった。 $^{241}\text{Am}$  試料を囲むように、3 台の  $\text{C}_6\text{D}_6$  ガンマ線検出器が配置された。 $^{241}\text{Am}$  試料の場合とともに  $^{197}\text{Au}$  試料の低エネルギーにおける TOF スペクトルを示された。本発表では、まだエネルギー依存の断面積の結果は導出されておら

ず、今後の解析結果が期待される。

Gašper Žerovnik 氏(ヨーージェフ・ステファン研究所：JSI)は、“Am-241 thermal neutron capture cross section and neutron capture resonance integral from reactor activation and oscillation measurements”と題して、 $^{241}\text{Am}$  の activation 及び pile oscillation 測定について報告された。 $^{241}\text{Am}(n,\gamma)$ 反応の熱中性子捕獲断面積の結果は、原子炉の測定で大きくい違いが報告されていた。そこで、JSI の TRIGA 炉で放射化測定を、CEA カダラッシュの MINERVE 炉で Pile Oscillation 測定を行った。測定では、測定試料を炉に入れることによる反応度の変化が、その中性子捕獲反応率に比例することを利用する。2 種類の  $^{241}\text{AmCl}_3$  試料(1 kBq) を、JSI の TRIGA 炉の炉心(Central channel)にて、Cd 遮蔽なし・ありの照射を行い、Cd 比の C/E を、4 種類の評価ライブラリに対して求めた。また、OSMOSE プログラムの一環として、2 種類の Am 試料を用いて Pile Oscillation 測定を、CEA カダラッシュの MINERVE 炉にて実施した。今回得られた結果は、JEFF-3.3 の  $^{241}\text{Am}$  の熱中性子捕獲断面積 747.2 (barn) が過大評価されていることを確認し、かつ WPEC/SG-41 ワーキンググループによって推奨されている  $717\pm 13$  (barn)と整合した。

片淵研究室 D3 の児玉有(東工大)は、J-PARC MLF の ANNRI (Beam Line No.4)にて TOF 法による  $^{243}\text{Am}$  の中性子捕獲反応断面積測定について報告した。得られた熱中性子領域におけるデータから(暫定的に)、熱中性子捕獲断面積を  $94.3\pm 4.6$  (barn)と導出した。この結果は、Kimura (2019)  $87.7\pm 5.4$  (barn)、Nakamura (2021)  $88.5\pm 4.0$  (barn)と誤差の範囲で一致した。また、数百 keV の非分離共鳴領域の断面積の暫定結果も報告した。

Song Feng 氏 (南華大学) は、China Spallation Neutron Source (CSNS)に整備された Back-n white neutron source を用いた、 $^{209}\text{Bi}$  の neutron total cross-section の測定について報告した。試料位置の距離は、W Target から 55 m、検出器は 77 m であった。飛行距離は、 $^{235}\text{U}$  の低エネルギー共鳴 (8.774 eV、12.385 eV、19.288 eV) を用いて校正された。中性子エネルギースペクトルを用いて、 $^{209}\text{Bi}$  の中性子全断面積を 0.3 eV~10 MeV の範囲で導出した。得られた結果は、ENDF/B-VIII.0 と一致した。今回用いた NTOX スペクトロメータは、低検出効率かつエネルギー分解能が低いものであるため、将来、高効率のシンチレーション検出器を用いることが考えている。現在、FAst Scintillator-based neutron Total cross section (FAST) supectrometer の建設を進めており、設計はすでに終了しているとのことである。

## 【 Measurements X 】

J.Gordon 氏 (California Univ. Berkeley) は、 $^{56}\text{Fe}(n,n'\gamma)$ 反応における非弾性散乱と二次中性子角度分布データの測定について報告した。測定には、88-Inch Cyclotron に設置されている Gamma Energy Neutron Energy Spectrometer for Inelastic Scattering (GENESIS) を用いて行った。GENESIS はガンマ線と中性子検出器のアレイであり、2 台の Clover Ge 検出

器、2 台の HPGe 検出器、sTOF 中性子ビームモニタ、1 台の LaBr<sub>3</sub>(Ce)検出器、そして 26 台の EJ-309 有機液体シンチレータ検出器で構成されている。標的として 99.98%濃縮 <sup>56</sup>Fe 試料、9.7563g を用いた。GENESIS は、散乱中性子にタグづけされた特徴的なガンマ線の情報を与えてくれることが示された。ガンマ線の検出により飛行時間に対して散乱中性子の分布を与えてくれる。データ解析を、現在進めているところである。

V.Alcayne 氏 (CIEMAT, Spain) は、n\_TOF の EAR2 ステーションにおける(n,γ)断面積測定のための segmented Total Energy Detector (sTED)の開発の状況について報告した。EAR1 ステーション(185m)では、BaF<sub>2</sub> カロリメータ、全エネルギー検出器に C<sub>6</sub>D<sub>6</sub> 検出器を用いているが、EAR2 は飛行距離 19.5 m であるので、EAR1 に比べて 30 倍も中性子束が大きく、当然、飛行時間も 10 倍短い。そのため、EAR1 に使用している検出器は、EAR2 には最適でない。大容量の C<sub>6</sub>D<sub>6</sub> 検出器では、高計数率と飛行時間の関数でゲインシフトが生じてしまうことが指摘された。そこで、20 MBq の <sup>137</sup>Cs 線源の測定距離を変えて sTED 検出器をテストしたところ、ゲインシフトは観測されなかったことを示した。そこで、ERA2 ステーションには、この sTED 検出器を用いることを提案した。<sup>197</sup>Au を用いて TOF 測定が試験され、JEF-3.3 ライブラリと整合性のある結果が得られていた。C<sub>6</sub>D<sub>6</sub> 検出器では測定限界は 1 keV 程度であったが、sTED 検出器では、現状 300 keV まで測定できることが示された。9 台の sTED 検出器を水平方向に、測定試料を 360 度囲んだセットアップで、<sup>79</sup>Se、<sup>94</sup>Nb、<sup>160</sup>Gd 測定 (発表番号[68、247] 参照) が実施された。

## 【 Measurements XI 】

T.Kogler 氏 (HZDR) は、nELBE での <sup>242</sup>Pu の fast neutron-induced fission cross-section について発表した。<sup>242</sup>Pu(n,f)の実験データは、1 MeV 以上でくい違いがあり、また評価でもくい違いがあるため、nELBE fission ion chamber で測定実験を実施した。<sup>242</sup>Pu ターゲットには、濃縮度 99.959%で試料の均一性がチェックされた 37.24 mg (8 個)、放射能量で 8.31 MBq が使用された。nELBE で、0.5~10 MeV のエネルギー範囲で、<sup>242</sup>Pu(n,f)の実験データが示された。測定結果は、JEFF-3.3 の評価値より 4%小さい傾向を与えていた。

M.Boromiza 氏 (IFIN-HH) は、GELINA における GAINS スペクトロメータを用いた、<sup>58,60,64</sup>Ni の(n,n'γ)反応断面積について発表した。Gamma Array for Inelastic Neutron Scattering (GAINS)スペクトロメータは、GELINA の飛行距離 100 m に設置されており、12 台の高純度 Ge 検出器で構成されている。<sup>nat</sup>Ni 試料は、厚さ 2.661 mg/cm<sup>2</sup>、直径 8.23 cm であった。中性子束をモニタするために、<sup>235</sup>U fission chamber を用いた。各 Ni 同位体に対して得られた結果を示した。このうち <sup>58</sup>Ni、<sup>60</sup>Ni の結果は、中性子エネルギー4 MeV 以上辺りから Talys コードの計算値より大きい結果となった。

K.Guber 氏 (ORNL) は、データの高精度化を目標として <sup>90,91,92,94</sup>Zr 同位体の断面積測定について発表した。<sup>90</sup>Zr については、捕獲反応が Tagliente (2008)、Bartolome (1969)によ

り測定されており、また透過実験は、Harvey (1975)等により行われていた。これら既に得られている測定スペクトルデータについて、SAMMY コードにより共鳴解析を行うことを述べた。また、 $^{90,91,92,94}\text{Zr}$  同位体の測定を行い、同様に SAMMY コードを用いて共鳴解析を行い、評価の正確さを向上させる計画とのことである。

C.Domingo-Pardo 氏 (CSIC-Univ. of Valencia) は、n\_TOF の(n, $\gamma$ )反応断面積の感度を向上させるために、Compton Imaging を用いて、周辺構造物による散乱ガンマ線を除去して、S/N 比を向上させることを発表した。 $^{209}\text{Bi}(n,\gamma)$ 反応の測定において、 $^{209}\text{Bi}(n,n')$ 非弾性散乱断面積が捕獲断面積より大きいので、 $^{209}\text{Bi}$  試料に散乱された中性子が外部構造物に入射し、それから発生したガンマ線が検出器に入射してバックグラウンドを生じてしまう。そこで、Compton Imaging のテクニックを応用し、中性子によるバックグラウンドガンマ線を除去し、もって S/N 比を向上させようとする試みであった。Total energy detector(TED) とコンプトンカメラを組み合わせたもので、“i-TED”と称していた。 $^{56}\text{Fe}$  の keV 領域にある孤立した共鳴を例にあげて測定し、その手法の有効性を示した。 $^{79}\text{Se}(n,\gamma)$ 反応測定に適用しており、暫定結果として TOF スペクトルを報告した。

## 【 Measurements XII 】

川瀬頌一郎先生(九大)は、inverse kinematics method を用いた、200 MeV/u における  $^{79}\text{Se}$  の陽子、重陽子誘起核破砕反応で生成される残留核の断面積測定について報告した。測定は、理研の RI ビームファクトリーで行った。 $^{238}\text{U}$  を  $^9\text{Be}$  ターゲットに入射し、核分裂で生成された  $^{79}\text{Se}$  をタグづけして液体  $\text{H}_2$  や  $\text{D}_2$  ターゲットに入射し、陽子、重陽子による  $^{79}\text{Se}$  の核破砕反応で生成された残留核、中性子を SAMURAI スペクトロメータで検出して、それぞれ残留核の生成断面積を導出した。今回、Br(Z=35)、Se(Z=34)、As(Z=33)、Ge(Z=32)、Ga(Z=31)の 5 核種について、陽子と重陽子によるそれぞれの実験結果を示し、計算結果と比較、議論を与えた。

C.Clisu 氏(IFIN-HH)は、中性子計数管アレイを用いて、低エネルギー荷電粒子誘起反応の断面積測定について発表した。46×46×54 cm のポリエチレンブロック内に、28 台の  $^3\text{He}$  比例計数管を同心円状に配置することにより、検出効率が一定であるような特徴を実現し、“ELIGANT neutron detector”と称していた。Geant 4 シミュレーションで、1 keV~0.1 MeV の領域で、ほぼ検出効率がフラットであることを示した。ELIGANT 検出器を用いて測定した  $^{nat}\text{Cu}(p,xn)$ 反応断面積の結果を示した。 $^{nat}\text{Cu}(p,n)$ 反応の放射化測定も行い、ELIGANT との結果と比較し、議論した。ELIGANT の結果は、放射化測定の結果より全体的に大き目であった。

岩元大樹氏(JAEA)は、GeV エネルギーの陽子による Bi の反応で生成される核種の生成断面積測定について発表した。J-PARC の RCS で加速された陽子ビームが、MLF へ供給される途中にビームダンプがあり、このビームダンプへの Bending magnet の下流にター



ゲットチェンバを設置して、そこで試料に陽子を照射して放射化実験を行った。Bi 箔を 0.4、1.5、3 GeV の 3 種類の陽子ビームで照射し、照射後にガンマ線分光法により生成核種を定量することにより生成断面積を導出した。特に、 $^{202m}\text{Pb}$ 、 $^{119m}\text{Te}$ 、 $^{120m}\text{Sb}$ 、 $^{106m1}\text{Ag}$  の生成断面積を初めて導出することに成功した。

渡辺幸信教授(九大)は、Li、Be、C、Al、Cu、Nb、In、Ta、Au の 200 MeV 重陽子による中性子生成について発表した。上記の核種において、重陽子誘起反応を用いた加速器中性子源が提案されている。実験は、RCNP の中性子 TOF 施設で行われた。二重微分(d,xn) 反応断面積は、通常の TOF 法を用いた。バックグラウンドガンマ線は、検出器信号のパルス形状で弁別(PSD)した。Li(d,n)反応の 200 MeV での二重微分断面積の結果は、JENDL-5 を用いた PHITS コードによる計算結果と良く一致していた。また、 $^{27}\text{Al}$ 、 $^{3}\text{Nb}$ 、 $^{197}\text{Au}$  を挙げて実験値と DEURACS コードによる計算値を比較し、広いエネルギー範囲で一致することを示した。

### 【Mass/Structure/Decay II】

Alberto Perez de Rada Fiol (CIEMAT) presented “ $\beta$ -delayed neutron spectroscopy of  $^{85}\text{As}$  with MONSTER”. The  $\beta$ -delayed neutron emission in the  $^{85}\text{As}$  decay was measured at the Ion Guide Isotope Separator On-Line (IGISOL) facility of the JYFL Accelerator Laboratory of the University of Jyväskylä. The  $^{85}\text{As}$  isotopes were produced by proton-induced fission reactions in  $^{238}\text{U}$ , separated from the rest of the fission fragments with IGISOL, and implanted onto a tape. The MODular Neutron SpectromETER (MONSTER) was employed to detect the emitted neutrons and the decay patterns were analyzed using a plastic scintillator detector for the emitted  $\beta$ -particles, and a HPGe Clover and four LaBr3 detectors for the emitted  $\gamma$ -rays. MONSTER consists of an array of 48 cylindrical cells of 200 mm diameter and 50 mm height, filled with BC501A or EJ301 scintillating liquid. Each cell is coupled through a light guide of 31 mm thickness to a R4144 or R11833 PMT. The neutron energy is determined by the time-of-flight technique, using the signals from the plastic detector and MONSTER as the start and stop signals, respectively. This spectrometer features good neutron/ $\gamma$ -ray discrimination capabilities and excellent energy resolution. The present experimental system was validated by the good agreement with the previous data.

Max Pallas Solis (UPC) presented “Study of decay properties for Ce to Nd nuclei (A~160) relevant for the formation of the r-process rare-earth peak”. The first experimental results of the BRIKEN project, which launched in 2016 at the RIBF in the RIKEN Nishina Center, aimed at measuring  $\beta$ -decay properties for a large number of nuclei on the path of the r-process were presented.  $T_{1/2}$  and  $P_n$ -values for the most influential nuclei to the rare-earth peak REP formation from Ba to Eu (A~160) were measured for the first time with BRIKEN. The details of the

measurements of about 25 isotopes in the region from Ce to Nd were discussed. 9 new  $T_{1/2}$  experimental results and 20 new  $P_{1n}$  values were reported in this work.

### 3. おわりに

ND2019(北京)から3年経過し、CERNのn\_TOF施設ではEAR2ステーションが整備され、研究成果が精力的に出始めている印象である。また、中国のCSNSのBack-n施設を利用した実験が報告されていた。国外の研究動向を知る良い機会となった。では、次回2025年スペイン、マドリッドに向けて研究成果を出してまいりましょう。