

Oral presentation | II. Radiation, Accelerator, Beam and Medical Technologies : 201-1 Nuclear Physics, Nuclear Data Measurement/Evaluation/Validation, Nuclear Reaction Technology

📅 Thu. Sep 12, 2024 9:30 AM - 10:55 AM JST | Thu. Sep 12, 2024 12:30 AM - 1:55 AM UTC 🏠 Room F(Recture RoomsA 2F A202)

## [2F01-05] Measurement

Chair:Hideaki Otsu(RIKEN)

9:30 AM - 9:45 AM JST | 12:30 AM - 12:45 AM UTC

[2F01]

Measurement of neutron capture cross sections of Tc-99 at ANNRI of J-PARC MLF

\*Maxwell Clark Maloney<sup>1</sup>, Tatsuya Katabuchi<sup>1</sup>, Chikako Ishizuka<sup>1</sup>, Gengchen Li<sup>1</sup>, Jiamo Han<sup>1</sup>, Zefeng Shao<sup>1</sup>, Gerard Rovira<sup>2</sup>, Shunsuke Endo<sup>2</sup>, Atsushi Kimura<sup>2</sup>, Shoji Nakamura<sup>2</sup> (1. Tokyo Institute of Technology, 2. Japan Atomic Energy Agency)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[2F02]

Neutron total and capture cross-section measurements of <sup>nat</sup>Er at ANNRI and resolved resonance analysis

\*Gerard Rovira Leveroni<sup>1</sup>, Atsushi Kimura<sup>1</sup>, Shoji Nakamura<sup>1</sup>, Shunsuke Endo<sup>1</sup>, Osamu Iwamoto<sup>1</sup>, Nobuyuki Iwamoto<sup>1</sup>, Tatsuya Katabuchi<sup>2</sup> (1. JAEA, 2. Tokyo Tech)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[2F03]

Measurements of double-differential cross sections of the Al(p,xp) reaction for 400 MeV - 3 GeV protons

(5) Measurements of proton spectrum of the incident of 3-GeV protons

\*Shin-ichiro Meigo<sup>1</sup>, Yuji Yamaguchi<sup>1</sup>, Hiroki Iwamoto<sup>1</sup> (1. J-PARC/JAEA)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[2F04]

Measurement of C Incident Electric Charge Particle Production Double Differential Cross Section

\*Hiroya Sotooka<sup>1</sup>, Yusuke Uozumi<sup>1</sup>, Toshimasa Furuta<sup>1</sup>, Yusuke Koba<sup>3</sup>, Yuji Yamaguchi<sup>2</sup> (1. Kyushu Univ., 2. JAEA, 3. NIRS)

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[2F05]

Estimation of energy spectra of light charged particles emitted from muon-nuclear capture reaction on Si using an unfolding technique

\*Kentaro Kitafuji<sup>1</sup>, Shoichiro Kawase<sup>1</sup>, Teppei Kawata<sup>1</sup>, Yukinobu Watanabe<sup>1</sup>, Megumi Niikura<sup>2</sup>, Rurie Mizuno<sup>3</sup>, Dai Tomono<sup>4</sup>, Katsuhiko Ishida<sup>5</sup>, Adrian Hillier<sup>6</sup> (1. Kyushu Univ., 2. RIKEN, 3. UTokyo, 4. Osaka Univ., 5. KEK, 6. RAL)

10:45 AM - 10:55 AM JST | 1:45 AM - 1:55 AM UTC

Time reserved for Chair

## Measurement of neutron capture cross sections of Tc-99 at ANNRI of J-PARC MLF

\*M. Maloney<sup>1</sup>, T. Katabuchi<sup>1</sup>, C. Ishizuka<sup>1</sup>, G. Li<sup>1</sup>, H. Kondo<sup>1</sup>, J. Han<sup>1</sup>  
Z. Shao<sup>1</sup>, G. Rovira<sup>2</sup>, S. Endo<sup>2</sup>, A. Kimura<sup>2</sup>, S. Nakamura<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratory for Zero Carbon Energy, Tokyo Institute of Technology

<sup>2</sup> Nuclear Science and Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency

The neutron capture cross section of <sup>99</sup>Tc was measured at the ANNRI beamline in the J-PARC MLF facility. Prompt  $\gamma$ -rays from the capture reactions were measured with a NaI(Tl) detector. The time-of-flight method was employed to determine the incident energy.

**Keywords:** <sup>99</sup>Tc, J-PARC, ANNRI, Neutron Capture Cross Section, Time-Of-Flight Method, Long-Lived-Fission-Products.

### 1. Introduction

Technetium-99 is a fission product which undergoes  $\beta$  decay with a half-life of 211,100 years. This long-lived nature, relative abundance of production (approximately 6% of fission events produce <sup>99</sup>Tc) and environmental migration poses difficulties for long term waste storage. As such it is a possible candidate for reducing the amount of LLFPs via nuclear transmutation. The <sup>99</sup>Tc(n,  $\gamma$ )<sup>100</sup>Tc produces <sup>100</sup>Tc which undergoes  $\beta$  decay to stable <sup>100</sup>Ru with a half-life of 15.46 min. To design systems that could drive these reactions, more accurate neutron capture cross section data are needed. There are large differences between experimental data of the neutron capture cross sections, especially in the keV neutron energy range [1]. This motivated us to perform the present measurement of the neutron capture cross section of <sup>99</sup>Tc.

### 2. Experimental Setup

The experiment was carried out at the Accurate Neutron-Nucleus Reaction measurement Instrument (ANNRI) beamline at the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) at the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC). A NaI(Tl) detector set at a scattering angle of 90 degrees with respect from the neutron beam axis was used to measure prompt  $\gamma$  rays from the neutron capture cross reactions. The <sup>99</sup>Tc sample with a total mass of 78 mg was sealed in an aluminum container. The sample was placed at a neutron flight distance of 27.9 m. Blank, a dummy case and a carbon sample were also measured for the purposes of background subtraction. The time-of-flight (TOF) method was employed to determine the incident neutron energy. The incident neutron energy spectrum was determined by detecting 478-keV  $\gamma$ -rays from the <sup>10</sup>B(n,  $\alpha$ )<sup>7</sup>Li reaction placing a boron sample at the sample position. The anode signal from the NaI(Tl) detector was fed into a data acquisition system, recording the TOF and pulse height of detected events.

### 3. Results

A TOF spectrum for <sup>99</sup>Tc is shown in Fig. 1. Resonance peaks of <sup>99</sup>Tc were successfully observed.

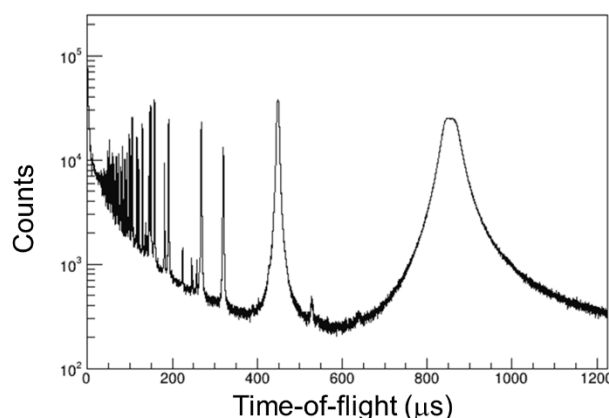


Figure 1 TOF spectrum of neutron capture events for <sup>99</sup>Tc

### 4. Conclusions

In order to derive the neutron capture cross section of <sup>99</sup>Tc, prompt  $\gamma$ -rays from <sup>99</sup>Tc(n,  $\gamma$ )<sup>100</sup>Tc have been measured from thermal to the keV energy range using the TOF method at ANNRI of J-PARC MLF. Detailed results and comparison with past measurements will be presented in the presentation.

### References

- [1] G. Noguere et al. Phys. Rev. C, 102, 015807 (2020).

# Neutron total and capture cross-section measurements of $^{nat}\text{Er}$ at ANNRI and resolved resonance analysis

\*Gerard Rovira<sup>1</sup>, A. Kimura<sup>1</sup>, S. Nakamura<sup>1</sup>, S. Endo<sup>1</sup>, O. Iwamoto<sup>1</sup>, N. Iwamoto<sup>1</sup>, T. Katabuchi<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> Nuclear Science and Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency

<sup>2</sup> Laboratory for Advanced Nuclear Energy, Tokyo Institute of Technology

The neutron total and capture cross sections of  $^{nat}\text{Er}$  were measured at the ANNRI beamline of J-PARC. The neutron capture cross section was determined using Ge and NaI(Tl) spectrometers, while the neutron total cross section was measured with Li-glass detectors. In the present work, the neutron total and capture cross-section results of  $^{nat}\text{Er}$  are provided, together with the results of a resonance shape analysis to determine the resonance parameters of low energy resonances of  $^{166,167}\text{Er}$ .

**Keywords:** J-PARC, ANNRI,  $^{nat}\text{Er}$ ,  $^{166,167}\text{Er}$ , Neutron Total Cross Section, Neutron Capture Cross Section.

## 1. Introduction

The extension of the nuclear fuel life has always been seen as an effective method to improve the economic viability of nuclear reactors. Nonetheless, this has always been hampered by the limitation of  $^{235}\text{U}$  5 wt% due to criticality concerns[1]. Enrichment of  $^{235}\text{U}$  above the 5 wt% threshold would mean a major reformulation of both reactor criticality and safety assessments for the present nuclear reactors. The Erbium-credit super high burnup (Er-SHB) fuel is an innovative configuration that allows for the fuel life to be extended by increasing the enrichment of  $^{235}\text{U} > 5$  wt%, while treating the fuel as if the enrichment of  $^{235}\text{U}$  were to be lower than 5 wt%, as in present LWR reactions. Er-SHB is also able to achieve this while providing several physical improvements (i.e., less downgrade of the flux distribution, improving the intrinsic reactor safety parameters, better control of the transient power phase) [1], [2]. Nonetheless, for this to be attainable, the accuracy of the nuclear data for the neutron capture cross section of Erbium needs to be improved. Sensitivity and uncertainty analyses have remarked the importance of improving the neutron capture cross section data of Erbium isotopes below 100 eV, with special emphasis on  $^{167}\text{Er}$ , since it accounts for about 18% of the total criticality uncertainty[3].

## 2. Experimental Setup

The present experiments were performed in the Accurate Neutron-Nucleus Reaction Measurement Instrument (ANNRI) at the Materials and Life Science Facility (MLF) of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) using Li-glass detectors to measure the neutron total cross section; NaI(Tl) and Ge spectrometers to determine the neutron capture cross section, in separate measurements. In order to obtain high statistical accuracy at the neutron energy range targeted by each spectrometer, five  $^{nat}\text{Er}$  samples with different conditions were prepared.

## 3. Cross Section Results

The neutrons capture cross section of  $^{nat}\text{Er}$  was determined from the thermal energy to about 1 keV with the Ge spectrometers and from thermal energy to about 500 keV with the NaI(Tl) spectrometers using two 0.025-mm-thick sample. At the same time, the neutron total cross section of  $^{nat}\text{Er}$  was measured using samples with 0.05, 0.175 and 1 mm in thickness, from thermal to about 1 keV with the Li-glass detectors. Moreover, since the neutron capture cross section of  $^{167}\text{Er}$  accounts for about 95% of the capture events below 10 eV and there are no resonances of other isotopes, the neutron capture cross section of  $^{167}\text{Er}$  was also derived with corrections using JENDL-5.

## 4. Resolved Resonance Analysis.

A resonance shape analysis was performed using the REFIT in order to derive the resonance parameters for the  $^{166,167}\text{Er}$  resonances up to 65 eV. For this, 4 sets of data were employed: two capture data sets using two 0.025-mm-thick  $^{nat}\text{Er}$  samples measured with the Ge and NaI(Tl) spectrometers, respectively; and two transmission data sets with  $^{nat}\text{Er}$  samples with 99.9% purity and thicknesses of 1mm and 0.175 mm.

## 5. Conclusions

In this study, the results for the  $^{nat}\text{Er}$  neutron total and capture cross sections measured with Li-glass, Ge and NaI(Tl) spectrometers are presented and compared. Moreover, the results of a resonance analysis using both capture and transmission data is also presented.

## References

- [1] M. Yamasaki, et al., *Nucl. Technol.*, 177, 63–72, (2012).
- [2] R. Pergreffi, et al., *EPJ Nucl. Sci. Technol.*, 3, 8, (2017).
- [3] A. Guglielmelli, “NEA HPRL.” <https://www.oecd-neo.org/dbdata/hprl/hprlview.pl?ID=539>.

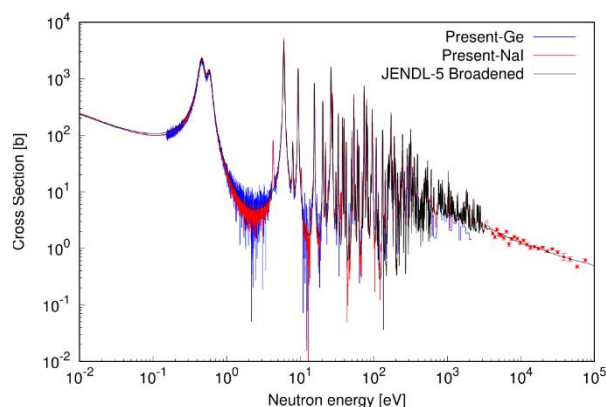


Figure 1 Neutron capture cross section results for  $^{nat}\text{Er}$  measured with the NaI(Tl) and Ge spectrometers compared to JENDL-5

## 400 MeV - 3 GeV 陽子における Al(p,xp)反応の二重微分断面積 (DDX) の測定 — (5) 3 GeV 陽子入射における陽子スペクトル測定—

Measurements of double-differential cross sections of the Al(p,xp) reaction for 400 MeV - 3 GeV protons

— (5) Measurements of proton spectrum of the incident of 3-GeV protons—

\*明午 伸一郎<sup>1</sup>, 山口 雄司<sup>1</sup>, 岩元 大樹<sup>1</sup>

<sup>1</sup>J-PARC 原子力機構

核内カスケードモデルの比較検討のため、J-PARC のビームダンプ入口に設けたアルミニウム製の窓から入射陽子 3 GeV の Al(p,xp)反応により大気中に放出される陽子エネルギースペクトルを測定した。

**キーワード：** 3 GeV 陽子、Al(p,xp)反応、DDX、準弾性散乱、弾性散乱

### 1. 背景

宇宙における荷電粒子検出器の応答測定には、数百 MeV から GeV 領域の陽子が必要となる。0.4 GeV 以上の陽子の供給が可能な加速器施設は世界的に少なく、国内では J-PARC が唯一となるが、利用者への陽子の供給は困難なため、ビームダンプ入口に設けたアルミニウム製ビーム窓による散乱陽子を用いた試験を実施している。この試験で応答関数は測定可能なものの、入射エネルギーの増加とともに連続的なスペクトルの寄与が大きくなるため、この影響が決して無視できない。また大強度陽子加速器施設では、核計算に用いる核内カスケードモデル(INC)の高度化が重要となるが、このため、陽子放出の二重微分断面積(DDX)の実験データが必要となる。中性子放出の DDX の実験データは比較的にあるものの、陽子放出データはほとんど無いので、我々は入射陽子 400 MeV における Al(p,xp)反応の DDX の測定を実施した。測定に用いる検出器は 1 GeV 以上の陽子を停止することが困難なため、測定信号の波高とエネルギーが一意となるカロリメトリックな測定は不可能となる。本研究では、数 GeV 陽子の Al(p,xp)反応による DDX データ取得および弾性散乱断面積の取得を目指し、飛行時間と検出器の部分的なエネルギー付与の観測により、入射陽子 3 GeV のエネルギースペクトルを測定した。

### 2. 実験

J-PARC 3NBT のビームダンプ入口には、厚さ 0.3 mm の Al 製のビーム窓を設置しており、散乱した陽子を 5 台(dE1, 2, 3, 4, 5)の厚さの異なる多段のプラスチックシンチレータ EJ200 (形状 □50 mm, 厚さ 10, 50, 100, 200, 400 mm)により測定した。陽子ビームに対し 13°の角度となり、14 m 離れた大気中に検出器を設置した。400 MeV 陽子は dE5 で停止することが可能となり、弾性散乱の明瞭なピーク (幅 4%) を確認した。飛行時間測定のため、ダンプ付近の窓から 4 m の位置に小型(□10 mm, 2.5 mm 厚)をスタート信号用のシンチレータ(S)として設けた。各検出器の光電子増倍管のアノード信号を、デジタル化(SIS3316)に入力し、飛行時間とパルス波高の測定を行った。通常の加速器運転に対し微弱な陽子ビーム信号を取り扱うために、ビーム強度モニタにプリアンプを接続し、さらにノイズの影響低下のため波形の平均化処理した。

### 3. 結果

0.4 GeV 陽子入射に対し明瞭に測定可能なビーム強度を 3 GeV 陽子に適用すると、パイルアップと偶発的計数による分布の悪化が生じたため、さらに微弱なビームを用いた。3 GeV 陽子入射に対する dE4 と dE5 検出器の波高分布の測定結果を図 1 に示す。明瞭な陽子の帯状分布と準弾性散乱と弾性散乱のピークが観測された。dE1 と dE2 検出器における時間差の幅は、0.2 ns と良好であったものの、S - dE1 のピーク時間幅は 3 ns 程度となった。S 検出器は通過した陽子のみならず、ビームダンプで生成した放射線の偶発的計数によるものと推測される。今後図 1 の解析を進めるとともに、秋以後に S 検出器をダンプから離し再度測定を行う予定である。

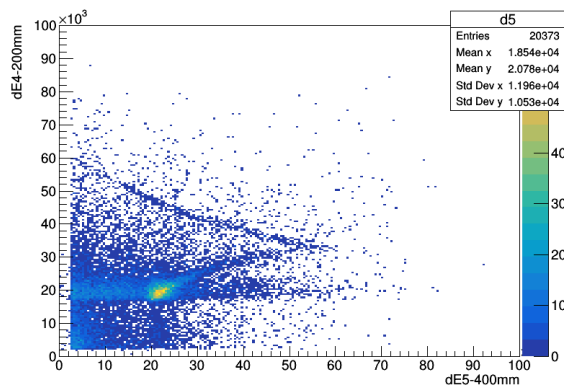


図 1 入射陽子 3GeV における dE4 および dE5 検出器の波高分布

\*Shin-ichiro Meigo<sup>1</sup>, Yuji Yamaguchi<sup>1</sup>, Hiroki Iwamoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>J-PARC/JAEA

## 炭素入射荷電粒子生成二重微分断面積の測定

Measurement of C Incident Electric Charge Particle Production Double Differential Cross Section

\*外岡 大弥<sup>1</sup>, 魚住 裕介<sup>1</sup>, 古田 稔将<sup>1</sup>, 山口 雄司<sup>2</sup>, 古場 裕介<sup>3</sup>

<sup>1</sup>九大, <sup>2</sup>JAEA, <sup>3</sup>QST

放射線治療や宇宙開発に必要な、炭素入射荷電粒子生成反応の二重微分断面積を測定した。実験は QST の HIMAC 棟にて行い、表面障壁型シリコン半導体検出器 (SSD) とシンチレータ (GSO(Ce), PWO, CsI(Tl)) を用いた。粒子弁別の為、 $\Delta E$ -E 法を採用し p から C までの荷電粒子の放出を確認した。

**キーワード**：二重微分断面積 1, PHITS2, 重粒子線がん治療 3

### 1. 緒言

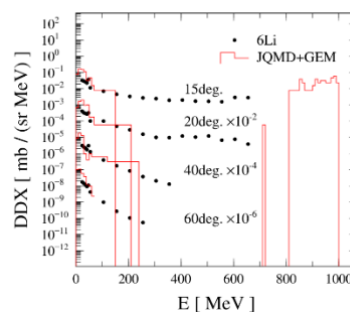
炭素イオンを含む重粒子はがん治療において大きな注目を浴びている。ブラッグピークにより患部に線量を集中させる事のできる優れた治療法である一方、細胞を構成する原子との核反応により荷電粒子が生成され、周囲の健常細胞へ予期しない線量付与が行われる可能性がある。線量分布予測に用いる重粒子輸送計算コードの精度評価及び高精度化を目指す為、炭素入射荷電粒子生成二重微分断面積 (DDX) の取得が必要とされている。

### 2. 実験

実験は量子科学技術研究開発機構の HIMAC 棟、物理・汎用照射室にて行った。核子当たり 100 もしくは 180MeV のエネルギーにて炭素イオンを入射した。ターゲットは  $^{nat}\text{C}$ ,  $^{27}\text{Al}$  と  $^{59}\text{Co}$  を用い、 $15^\circ \sim 60^\circ$  の範囲で測定を行った。原子番号が 3 以降のリチウム以上の核種に関して、空気によるエネルギー損失の大きさが無視できない為、真空チェンバー内に検出器を入れ測定を行った。粒子の検出には透過型の  $\Delta E$  検出器として SSD を、全停止型の E 検出器を組み合わせたカウンターテレスコープを設置し  $\Delta E$ -E 法によって粒子の測定を行った。この方法によって粒子は弁別され、24MeV から 700MeV 程度の DDX を決定することが出来た。

### 3. 結論

180MeV/u の炭素イオンを  $^{59}\text{Co}$  に入射させた際の  $^6\text{Li}$  放出の DDX と PHITS(JQMD+GEM)による比較を右図に示す。四つの角度とも低エネルギー帯の DDX は計算値と実験値は良い一致を果たしている。200~700MeV までは計算値を得ることが出来ず、得られた 800MeV 以降の DDX に関しては比較する実験値のプロットは得られなかった。これは E 検出器を貫通し解析が困難であった為である。今後はより広いエネルギーを測定する為に検出器の改良が必要である。



\*Hiroya Sotooka<sup>1</sup>, Yusuke Uozumi<sup>1</sup>, Tosimasa Furuta<sup>1</sup>, Yuji Yamaguchi<sup>2</sup>, Yusuke Koba<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kyushu Univ., <sup>2</sup>JAEA, <sup>3</sup>QST.

# Si における負ミューオン原子核捕獲反応からの 放出軽荷電粒子エネルギースペクトルのアンフォールディングによる推定

Estimation of energy spectra of light charged particles emitted from  
muon-nuclear capture reaction on Si using an unfolding technique

\*北藤 健太郎<sup>1</sup>, 川瀬 頌一郎<sup>1</sup>, 川田 哲平<sup>1</sup>, 渡辺 幸信<sup>1</sup>, 新倉 潤<sup>2</sup>, 水野 るり恵<sup>3</sup>,  
友野 大<sup>4</sup>, 石田 勝彦<sup>5</sup>, Adrian Hillier<sup>6</sup>

<sup>1</sup>九大, <sup>2</sup>理研, <sup>3</sup>東大, <sup>4</sup>阪大, <sup>5</sup>KEK, <sup>6</sup>ラザフォードアップルトン研

宇宙線負ミューオン起因ソフトエラー発生確率の高精度な推定に向けて、英国 Rutherford Appleton Laboratory において Si における負ミューオン原子核捕獲反応からの放出軽荷電粒子エネルギースペクトルを測定した。その後、アンフォールディング法による初期エネルギースペクトルの推定を行った。

**キーワード：**ミューオン原子核捕獲反応, ソフトエラー, 軽荷電粒子, エネルギースペクトル,  
アンフォールディング

## 1. 緒言

宇宙線ミューオンが電子機器内部の半導体デバイスに入射して発生する一過性の誤動作を宇宙線ミューオン起因ソフトエラーと呼ぶ。ソフトエラーに対して負ミューオンは正ミューオンと異なる寄与があることが調べられており、その発生確率の高精度な推定には Si における負ミューオン原子核捕獲反応からの放出軽荷電粒子のエネルギースペクトルが必要である。そこで、我々はこのスペクトルを実験により測定した。また、取得した測定エネルギースペクトルは Si 標的内でのエネルギー損失により歪んでいるため、アンフォールディング法により測定エネルギースペクトルから初期エネルギースペクトルの推定を行った。

## 2. 実験及び解析方法

実験は英国 Rutherford Appleton Laboratory の加速器施設 ISIS Neutron and Muon Source にて行った。加速器を用いて生成した負ミューオンを Si 標的に照射し、Si における負ミューオン原子核捕獲反応から放出される陽子、重陽子、三重陽子、 $\alpha$  粒子のエネルギースペクトルを測定した。測定において、低エネルギー粒子は nTD-Si 検出器を用いた波形解析法<sup>[2][3]</sup>によって、高エネルギー粒子は Si 検出器及び CsI シンチレータを用いた  $\Delta E$ -E 法によって、粒子の検出と識別を行った。その後、標的内部でのエネルギー損失が大きい低エネルギー粒子の測定エネルギースペクトルについては、シミュレーションにより検出器の応答関数を作成し、RooUnfold<sup>[4]</sup>ライブラリを用いたアンフォールディングによる初期エネルギースペクトルの推定を行った。結果として、本研究では先行研究より広範囲なエネルギー領域での測定に成功し、エネルギーの重なる領域では先行研究と概ね一致していることが確認できた。本発表では、実験結果及びデータ解析について報告する。

## 参考文献

- [1] S. Manabe et al., IEEE Transactions on Nuclear Science, 65, 1742-1749 (2018).
- [2] M. Assié et al., The European Physical Journal A, 51, 1-11 (2015).
- [3] S.Kawase et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 1059, 168984 (2024).
- [4] L. Brenner et al., International Journal of Modern Physics A, Vol. 35, No. 24, 2050145 (2020).

\*Kentaro Kitafuji<sup>1</sup>, Shoichiro Kawase<sup>1</sup>, Teppei Kawata<sup>1</sup>, Yukinobu Watanabe<sup>1</sup>, Megumi Niikura<sup>2</sup>, Ruric Mizuno<sup>3</sup>, Dai Tomono<sup>4</sup>, Katsuhiko Ishida<sup>5</sup> and Adrian Hillier<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Kyushu Univ., <sup>2</sup>RIKEN, <sup>3</sup>UTokyo, <sup>4</sup>Osaka Univ., <sup>5</sup>KEK, <sup>6</sup>RAL