

2016 年度核データ部会賞

奨励賞

— 重陽子入射中性子及びガンマ線生成に関する実験的研究 —

九州大学大学院総合理工学府
先端エネルギー理工学専攻
荒木 祥平
araki@aees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

近年、IFMIF（国際核融合材料照射試験施設）をはじめとした様々な中性子応用分野において、重陽子加速器中性子源が注目されています。重陽子加速器中性子源とは、重陽子ビームを Li や Be、C といった軽い標的に照射し、高強度の中性子ビームを得ようとするものです。重陽子入射反応では分解反応が生じやすいため、放出中性子スペクトルは図 1 に示すように入射エネルギーの約半分に緩やかなピークを持つ形状を示します。さらに準単色中性子源として用いられる(p,n)反応よりも多くの中性子収量を得ることができます。このように重陽子加速器中性子源はエネルギー選択性を持った高強度の中性子源として期待できます。このため、最近では医療用 RI の製造への応用なども提案されています。[3, 4]

重陽子加速器中性子源の設計開発には高い信頼性を持った重陽子核データライブラリーが必要不可欠ですが、現在利用可能な重陽子核データは汎用核反応計算コード TALYS を基に開発された TENDL のみであり、その信頼性も十分とは言えない状況にあります。

信頼性の高い重陽子核データの整備・拡充には、重陽子入射反応に対する実験データの取得と重陽子反応を記述可能な理論モデル開発が必要となります。最近、九大-JAEA-阪大の合同研究グループによって、重陽子反応中の反応過程ごとに異なる理論モデルを適応し、断面積を計算するコードシステム“DEURACS” [5,6]が開発され、陽子放出反応について高い再現性を示しています。しかし、実用上重要となる中性子生成反応については実験データが乏しいため、十分な検証が行えない状態にありました。

そこで、本研究では、実験データが質・量ともに乏しい 10MeV 以下の厚い標的(重陽子が標的内で停止する厚さの標的)からの中性子及びガンマ線収量の実験データを新規取得するとともに、実験データが皆無である 100MeV 付近の重陽子入射中性子生成二重微分断面積を新規に測定しました。

2. 厚い標的に対する 10MeV 以下の重陽子入射中性子・ガンマ線分収量の測定

実験は九州大学理学部原子核実験室のタンデム加速器施設で行いました(図 1、現在はキャンパス移転に伴い本施設は閉鎖されました。)タンデム加速器で加速した重陽子をターゲットチェンバー内の厚い標的に照射し、NE213 液体有機シンチレータを用いて中性子とガンマ線を測定しました。

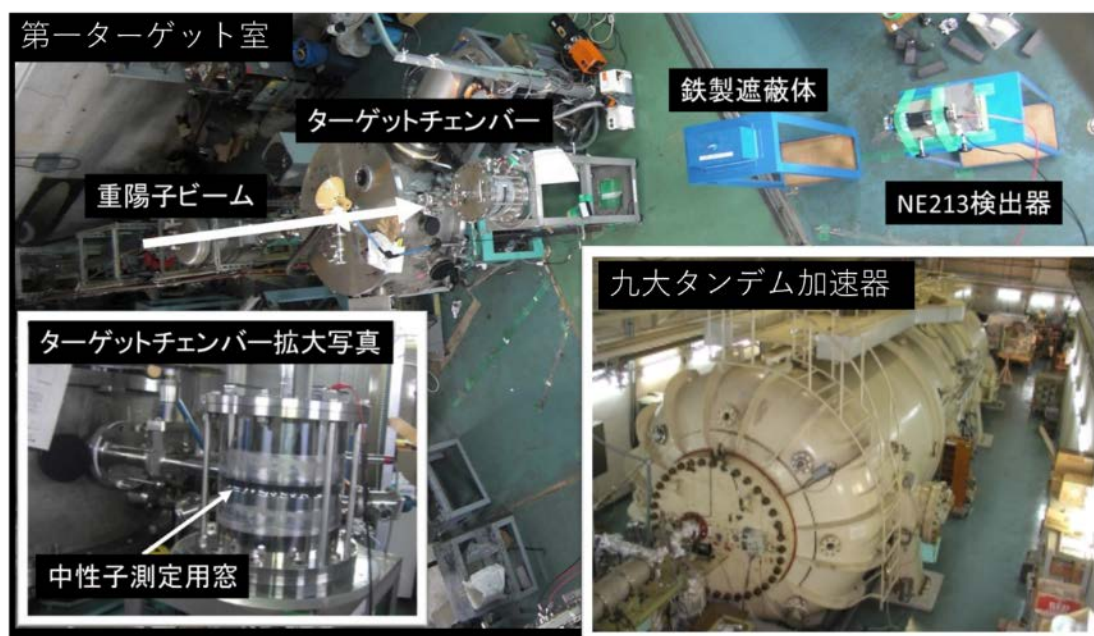


図 1 九州大学理学部原子核実験室タンデム加速器と実験配置の写真

NE213 検出器で検出した中性子とガンマ線は両者の遅発発光成分の違いにより分離するゲート積分法を用いて分離しました。分離されたそれぞれの発光量スペクトル $M(E)$ は次式のように元のエネルギースペクトル $\varphi(E')$ を応答関数 $R(E, E')$ でフォールディングした形となります。

$$M(E) = \int R(E, E') \varphi(E') dE'$$

本解析ではこの関係を基にエネルギースペクトルを導出するアンフォールディング法を用いました。アンフォールディングコードには FORIST[7]を、中性子、ガンマ線の応答関数の導出にはそれぞれ SCINFUL-QMD[8]と PHITS[9]を用いました。

本研究[10,11]や先行研究[12-14]によって九大タンデム加速器では図 3 左に示すような中性子収量の標的核に対して系統的な実験データを取得することができました。また、ガンマ線イベントの解析により、図 3 右のようなガンマ線収量のデータも取得することができました。

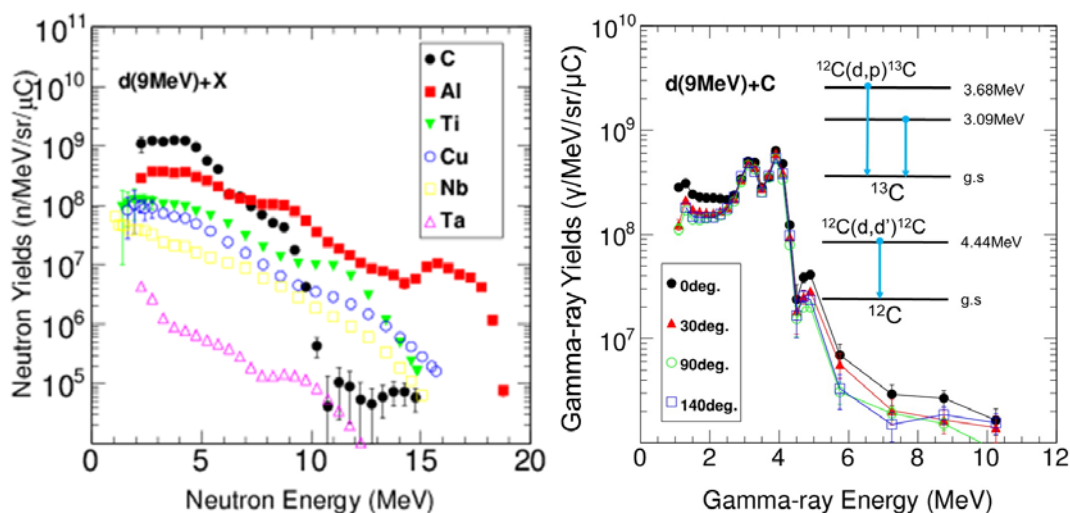


図 2 九大タンデム加速器において測定した厚いC、Al、Ti、Cu、Nb、Ta標的からの9MeV重陽子入射中性子収量（左）と厚いC標的からのガンマ線収量（右）スペクトル

3. 102MeV 重陽子入射中性子生成二重微分断面積 (DDX) の測定

実験は大阪大学核物理研究センター (RCNP) で行いました。RCNP ではこれまで JAEA の岩元氏が飛行時間法 (TOF) 法を用いた Li(p,n)反応の測定実験[15]を行っています。この手法を参考にして、本研究では Li, Be, C, Al, Cu, Nb に対する 102MeV 重陽子入射における 0 度から 25 度までの中性子生成 DDX を測定し、広い質量数に亘る系統的な中性子放出 DDX データを取得しました。

リングサイクロトロンで 102MeV まで加速された重陽子は中性子実験ホールに輸送されスウィンガー電磁石内に設置した薄い標的に照射されます。生成された中性子は TOF トンネルに導かれ、ターゲットから 7m、17m 設置された 2 台の大きさの異なる検出器(2"×2", 5"×5")を用いて測定しました。

中性子エネルギーは飛行時間法で測定し、DDX 導出で必要となる検出器の検出効率は SCINFUL-QMD を用いて計算しました。

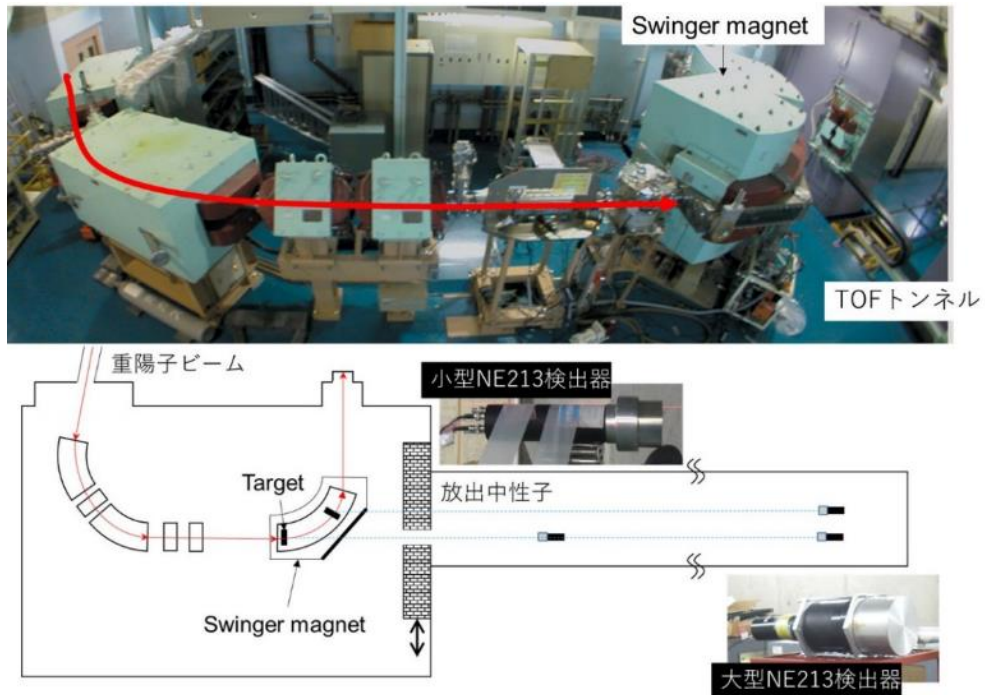


図 3 大阪大学核物理研究センター中性子実験室及びTOFトンネルの写真と模式図

本実験で得られた0度におけるLiからNbまでの中性子放出DDXの結果を図5に示します[16]。重陽子分解反応によって生じる50MeV付近の幅広いピークの大きさや幅が、標的核の原子番号に従って系統的に変化していることがわかりました。

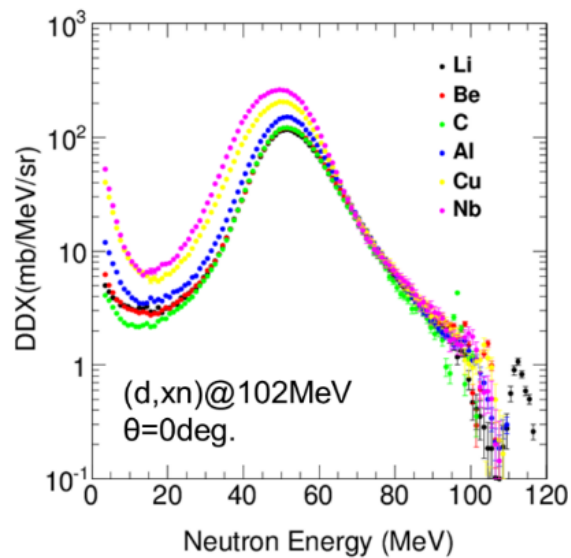


図 4 Li、Be、C、Al、Cu、Nb標的に対する0度における102MeV重陽子入射中性子生成二重微分断面積[16]

4. おわりに

上述のように本研究グループでは、九大タンDEM加速器施設と阪大 RCNP でそれぞれ低・高エネルギー重陽子入射実験を行い、新規に実験データを取得しました。しかし、重陽子入射反応の実験データは依然乏しく、高い信頼性を持った重陽子核データライブラリーの開発のためには、さらに実験データを取得する必要があります。

そこで、本研究グループでは、2017年3月に阪大 RCNP で200MeV重陽子入射の実験を予定しています。この実験では、102MeV実験と同じ標的を使用し、系統的な二次中性子生成 DDX データを取得し、DDX の入射エネルギー依存性を調査する計画です。また、これら102MeV、200MeVの実験データは DEURACS をはじめとした理論モデル解析に利用され、信頼性の高い理論モデル及び核データの整備に役立つと考えています。

最後に、九大箱崎キャンパスのタンDEM加速器は閉鎖されましたが、現在、九大伊都キャンパスのタンDEM加速器の運転が始まりました（図6）。ここでは中性子収量などの実験の他、前述の重陽子加速器中性子源を利用した医療用 RI 製造に向けた基礎実験が計画されています。

以上のように、今後も九大グループでは、重陽子反応に対し実験・理論・応用を一体とした研究が行われていくと思います。

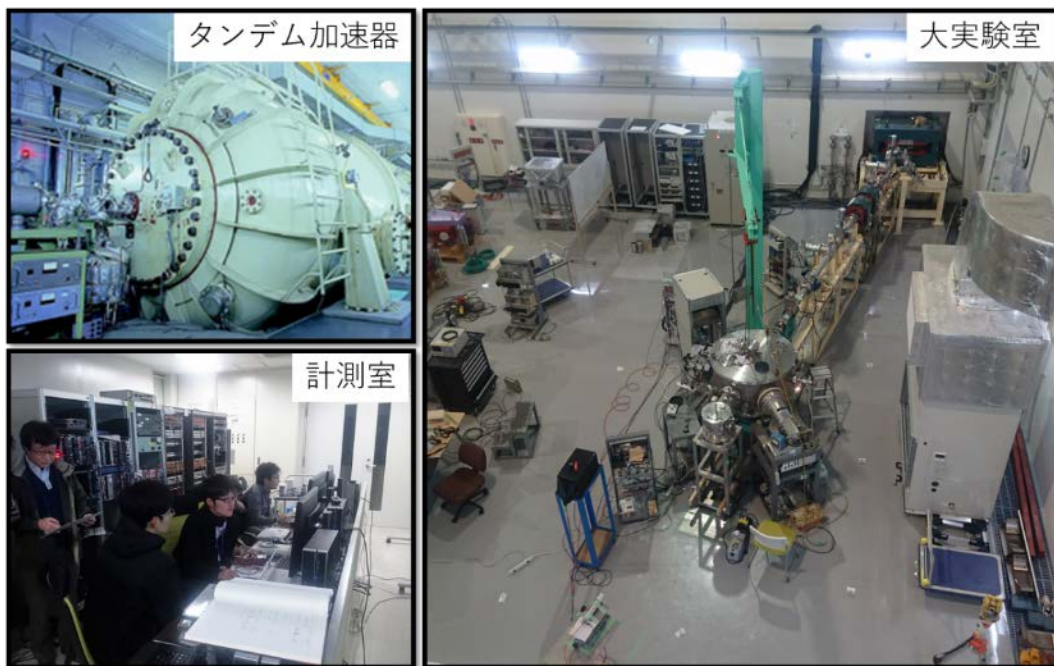


図5 九大伊都キャンパスタンDEM加速器施設の写真

謝辞

本研究は筆者が所属する九州大学大学院総合理工学府での研究として行ったものです。指導教員の渡辺幸信教授にはご多忙の中、貴重な時間を割いて熱心な指導を頂きました、心より御礼申し上げます。九大タンデムでの実験では、九州大学理学府の相良建至名誉教授、工学府の執行信寛助教にタンデム加速器の運転、測定系について多大なご協力、貴重なご助言を賜りました。阪大 RCNP 実験では、JAEA の岩元洋介博士、佐藤大樹博士、KEK の萩原雅之博士、京大炉の八島浩助教、大阪大学の嶋達志准教授には多大なご協力、ご助言を賜りました。皆さまに深く感謝いたします。最後に研究活動の様々な場面でお世話になりました、金政浩准教授をはじめ渡辺研究室の皆さまに心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] M. J. Saltmarsh, C. A. Ludemann, C. B. Fulmer, R. C. Styles, Nucl. Instr. Meth. 145, 81-90 (1977).
- [2] Y. Uwamino, T. Okubo, A. Torii, T. Nakamura, Nucl. Instr. Meth. 271, 546-552 (1988).
- [3] Y. Nagai, K. Hashimoto, Y. Hatsukawa, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 82, 064201 (2013).
- [4] T. Kin, Y. Nagai, N. Iwamoto, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 82, 034201 (2013).
- [5] S. Nakayama, S. Araki, Y. Watanabe, et al., Nuclear Data Sheets, 118, 305-307 (2014).
- [6] S. Nakayama, H. Kouno, Y. Watanabe, et al., Phy. Rev. C, vol. 94, 014618 (2016).
- [7] R. H. Johnson, D. T. Ingersoll, B. W. Wehring, et al, Nucl. Instr. Meth. 145, 337-346 (1977).
- [8] D. Satoh, T. Sato, N. Shigyo, et al., JAEA-Data/Code 2006-023 (2006).
- [9] T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, et al., J. Nucl. Sci. Tech. 50, 913 (2013).
- [10] S. Araki, Y. Watanabe, T. Kin, Energy Procedia, 71, 197-204 (2015).
- [11] 荒木祥平, 渡辺幸信, 金政浩, 他, 放射線 41, 127 – 132 (2015).
- [12] N. Shigyo, H. Hidaka, K. Hirabayashi, et al., Progress in Nuclear Science and Technology, 4, 582-586 (2014).
- [13] K. Hirabayashi, T. Nishizawa, T. Uehara, et al., Progress in Nuclear Science and Technology, 1, 60-64 (2012).
- [14] Y. Tajiri, Y. Watanabe, N. Shigyo, et al., Progress in Nuclear Science and Technology, 4, 582-586 (2014).
- [15] Y. Iwamoto, M. Hagiwara, D. Satoh, et al., Nucl. Instr. Meth. A, 804, 50-58 (2015).
- [16] S. Araki, Y. Watanabe, M. Kitajima, et al., Nucl. Instr. Meth. A, 842, 62-70 (2017).