

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01908

研究課題名(和文) 中性子非弾性機構によるトリプルアルファ反応の増幅率の決定

研究課題名(英文) The determination of the enhancement factor for the triple alpha reaction rate via the neutron inelastic mechanism

研究代表者

伊藤 正俊 (ITO, Masatoshi)

東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・教授

研究者番号：30400435

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高温・高密度の環境下におけるトリプルアルファ反応の中性子の非弾性機構による増幅率を決定するために10MeV領域の単色中性子源を開発した。開発では、中性子源に用いる候補となる反応からの中性子ビームの性質を評価し、 $1\text{H}(13\text{C},n)$ 反応が最適であることを確認した。最終的に、 2.2×10^7 n/sr/secのビーム強度で10MeVの単色中性子を安定に供給できることを確認した。中性子非弾性機構による増幅率を決定するため、10MeV中性子源を用いて、炭素の中性子非弾性散乱測定システムを構築した。測定では、中性子との弾性散乱のピークを確認し、統計を上げることで正しく測定できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙において元素がどのようにして作られたかを知るために、ヘリウムから炭素を合成するトリプルアルファ反応率を高精度で決定することが求められている。本研究では、これまで実験データのなかった低エネルギー領域における炭素の中性子非弾性断面積を測定することで、その精度を向上させることを可能にした。本研究で開発した10MeV単色中性子源はこれまで実用化されていなかったエネルギー領域の単色中性子源であり、本研究だけでなく、さまざまな中性子非弾性散乱の測定や応用研究にも使用でき、周辺分野にも大きく影響を与えることができるであろう。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed a mono-energetic neutron source in the 10 MeV region to determine an enhancement factor of the triple alpha reaction due to inelastic neutron scattering under high temperature and high density conditions. In the development, the properties of neutron beams were evaluated for the neutron source with candidate reactions and the $1\text{H}(13\text{C},n)$ reaction was confirmed to be the most suitable. Finally, we obtained the neutron beam intensity of 2.2×10^7 n/sr/sec and confirmed it can be stably supplied 10MeV neutrons. In order to determine the enhancement factor by the neutron inelastic mechanism, a measurement system for inelastic neutron scattering on carbon was constructed using a 10 MeV neutron source. In the measurement, we confirmed the peak of elastic scattering of neutrons, and confirmed that we can measure correctly the cross section of inelastic neutron scattering by increasing the statistics.

研究分野：原子核物理

キーワード：トリプルアルファ反応 中性子非弾性散乱 元素合成 単色中性子源

1. 研究開始当初の背景

ヘリウムから炭素を生成する過程であるトリプルアルファ反応は、宇宙における元素合成過程において最も重要な反応の一つである。このトリプルアルファ反応が高温・高密度下の恒星内部において増幅される可能性が指摘されている。反応の鍵となる ^{12}C の 3α 共鳴状態であるホイール状態から 2^+ 束縛状態または基底状態へ脱励起する際、周りの粒子がエネルギーを吸収することで脱励起が促進され、反応率が增大する。特にクーロン力の影響を受けない中性子による反応の増幅は、恒星内部で元素合成が行われるエネルギー領域において、無視できないほど大きいことが指摘されている。

しかしながら、この問題を解決するために重要な、反応しきい値エネルギー付近での中性子と ^{12}C のホイール状態への反応断面積の測定データが全くない状態であった。その最も大きな理由は、測定に必要な反応しきい値エネルギー付近の中性子、つまり 10MeV 程度のエネルギーの実用的な単色中性子源がないことであった。

2. 研究の目的

本研究では、上記のトリプルアルファ反応率を精度良く求めるために必要な、中性子非弾性散乱断面積、特に”低エネルギーの領域”に相当する反応しきい値エネルギー付近($8\sim 12\text{MeV}$)において、炭素の基底状態からホイール状態への中性子非弾性散乱断面積を測定し、中性子非弾性機構によるトリプルアルファ反応率の増幅率を決定することである。

この目的のため、これまで実用化されてこなかった、 10MeV 領域の単色中性子ビームを得るための中性子源を開発することも重要な目的の一つである。

3. 研究の方法

トリプルアルファ反応率の増幅率(R)は以下のように表される^①。

$$R = k_n \rho_n T_9^{-1.5} C_{spin} \int_0^\infty \sigma_{nn'}(E)(E - Q) \exp\left(-\frac{11.605E}{T_9}\right) dE$$

ここで $k_n=6.557 \times 10^{-6}$ 、 ρ_n は中性子密度 (g/cm^3)、 T_9 は温度 ($\times 10^9 \text{ K}$)、 C_{spin} は始状態/終状態のスピン因子、 $\sigma_{nn'}(E)$ は散乱断面積 (mb)、 Q はホイール状態から基底状態または 2^+ 束縛状態への励起エネルギーである。本来の目的のために必要な散乱断面積は、ホイール状態から基底状態 (2^+ 束縛状態) への散乱断面積であるが、現実的には測定できないため、詳細つり合いの原理を用いて、その逆反応である基底状態からホイール状態への散乱断面積を測定する。上記の式は、詳細つり合いの原理を適用した後の増幅率との式となっている。本研究では、反応のエネルギーしきい値付近の 10MeV 単色中性子ビームを用いて、 ^{12}C の基底状態からホイール状態への中性子非弾性散乱断面積を測定し、上記の増幅率 R を求める。

反応の増幅率 R を求めるために必要な中性子非弾性散乱断面積を測定するために必要な開発は下記の通りである。

1. 10MeV 単色中性子源の開発
 2. Flash ADC によるデータ収集システムの開発
 3. 中性子非弾性散乱測定システムの開発
- 本報告書では上記の開発項目に沿って報告する。

4. 研究成果

(1) 10MeV 単色中性子源の開発

中性子のエネルギーが 8MeV 以下や 14MeV の中性子源については、これまで $\text{D}(\text{d}, \text{n})$ 、 $\text{T}(\text{d}, \text{n})$ 反応を用いて中性子源として利用されてきた。しかし、 8MeV から 14MeV の間の 10MeV 領域の単色エネルギーの中性子源は、「ギャップ領域」と呼ばれ、容易に生成することができず、実用化されてこなかった。そこで本研究では、 ^{11}B や ^{13}C 、 ^{15}N などの重イオンを水素標的に照射する、 $^1\text{H}(\text{HI}, \text{n})$ 反応 (HI : ^{11}B 、 ^{13}C 、 ^{15}N) を用いた中性子源を開発した。

この中性子源は、重イオンを加速することで重心系の速度を大きくし、生成される中性子を前方角度に集中することができることが特徴である。また、生成される中性子の散乱角度を選択することにより、中性子のエネルギーを変化させることができることも特徴の一つである。図 1 に $^1\text{H}(\text{C}, \text{n})$ 反応における中性子の散乱角度とエネルギーの関係を示す。重心系の後方散乱に対応する 2 MeV 以下の中性子も伴うが、ホイール状

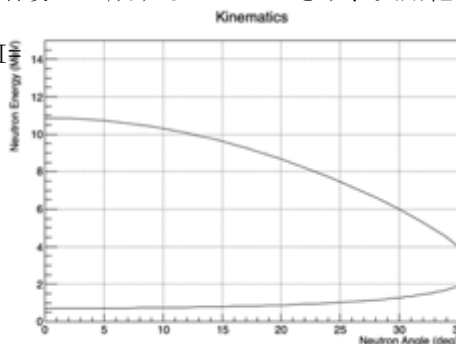


図 1 $^1\text{H}(\text{C}, \text{n})$ 反応の運動学計算

態を励起させるエネルギーしきい値以下であり、本研究の測定には影響しない。

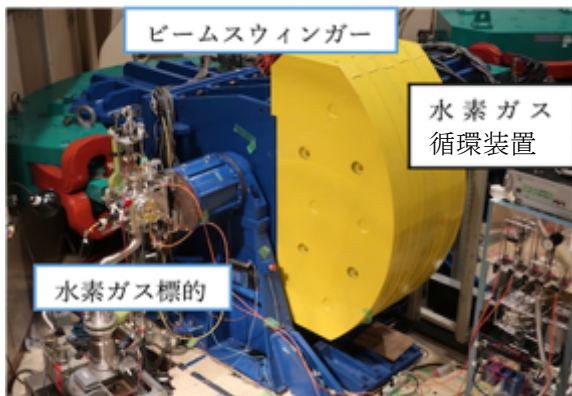


図 2 ビームスウィンガーを用いた中性子源システム

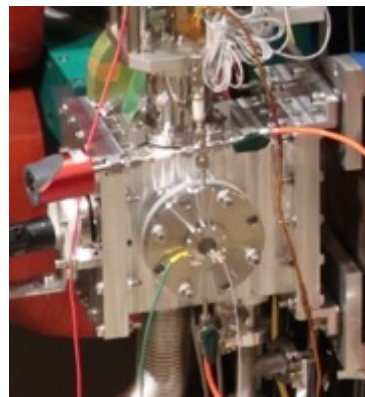


図 3 水素ガス標的部外観

この特徴を活かすため、本研究ではCYRICのビームスウィンガーを利用し、中性子ビームのエネルギーを短時間に変更することを可能とするシステムを開発した(図2)。図3に水素ガス標的部の外観、図4に水素ガス標的の構造を示す。サイクロトロンで加速されたビームは、タンタル(Ta)膜5μmを通過したのち、水素ガスに衝突する。ビームはタングステン(W)300μmのビームストッパーにより止められるが、ビーム粒子とWストッパーのクーロン障壁により、ビーム粒子とWの反応による中性子・ガンマ線等の2次粒子の生成が抑制される。一方、 $^1\text{H}([^1\text{H}], n)$ 反応によって生成された中性子は前方へ放出されビームとして利用される。このガス標的では、大強度の一次ビームにも対応できるように大気側からの送風と同時に標的の水素ガスを循環させて、標的ガスの密度および温度が一定になるようにしている。

CYRICでは ^{11}B イオン加速の実績がなかったため、CYRICのECRイオン源を用いて ^{11}B イオンを効率的に生成するイオン源の開発も同時に進めた。最初に棒状の窒化ホウ素を直接マイクロ波に挿入する方法を試した。窒化ホウ素によるイオン生成では、平均約 $6\mu\text{A}$ の $^{11}\text{B}^{3+}$ イオンを生成することができたが、それ以上のイオン電流では安定に $^{11}\text{B}^{3+}$ イオンを生成できなかった。

次にMIVOC (Metal Ion from Volatile Compounds) 法によるイオン生成を試みた。MIVOC法でも平均 $6\mu\text{A}$ の $^{11}\text{B}^{3+}$ イオンを安定して生成できたが、目標である $10\mu\text{A}$ でのイオン生成には、さらなる開発が必要であった。最終的にサイクロトロンで加速した60 MeVの $^{11}\text{B}^{3+}$ ビーム電流は約200nAであった。

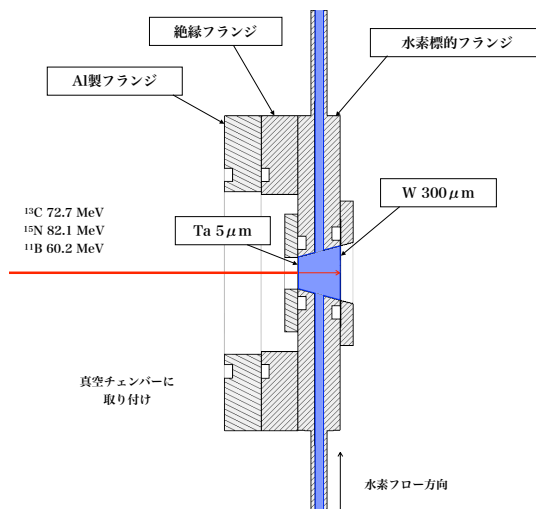


図 4 水素ガス標的の構造

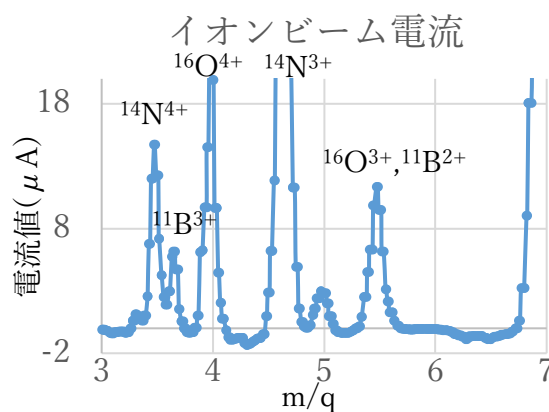


図 5 窒化ホウ素によるイオンビーム電

中性子非弾性散乱測定に必要なビーム強度を達成するため、 $^1\text{H}(^{11}\text{B}, n)$ 、 $^1\text{H}(^{13}\text{C}, n)$ 、および $^1\text{H}(^{15}\text{N}, n)$ 反応のうち、CYRICにおける最適な反応を調査した。図6は各反応における生成中性子の測定セットアップを示す。反応により生成された中性子は、ビームスウィンガー下流に設置した6台の液体シンチレーター(BC501A)に入射し、飛行時間法によりエネルギーが測定される。

^{11}B は60MeV、 ^{13}C は72.7MeV、および ^{15}N は82MeVのビームを水素ガス標的へ入射した。図7, 8, 9にそれぞれ $^1\text{H}(^{11}\text{B}, n)$ 、 $^1\text{H}(^{13}\text{C}, n)$ 、および $^1\text{H}(^{15}\text{N}, n)$ 反応による生成中性子のエネルギースペクトルを示す。それぞれ図の左側のスペクトルは、水素ガスのスペクトル(青)と水素ガス標的システムを真空にした時のスペクトル(赤)を示し、右側のスペクトルは水素ガスありのスペクトル

から水素ガスなしのスペクトルを引いたスペクトルを示す。それぞれ 10MeV 程度の単色のスペクトルが得られ、角度に応じてエネルギーが変化していることがわかる。エネルギー幅は FWHM でおおよそ 700 keV 程度であり、主に加速器からのビームの時間幅や検出器の立体角によって制限される。

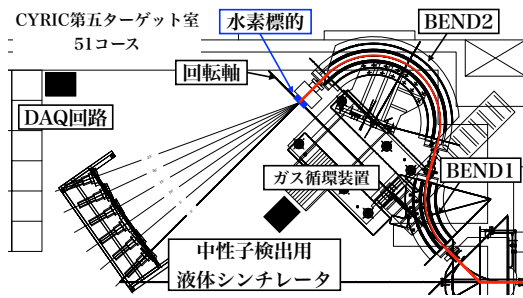


図 6 生成中性子の測定セットアップ

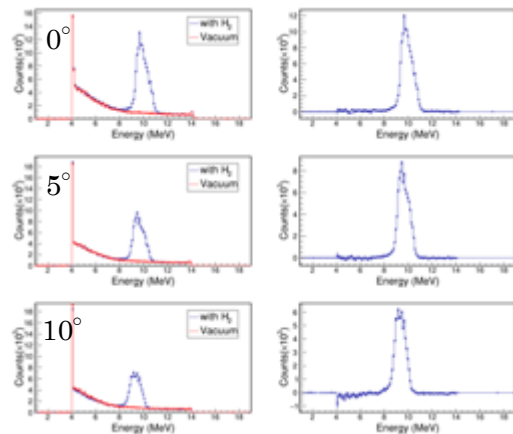


図 7 ${}^1\text{H}({}^{11}\text{B},n)$ 反応の中性子スペクトル

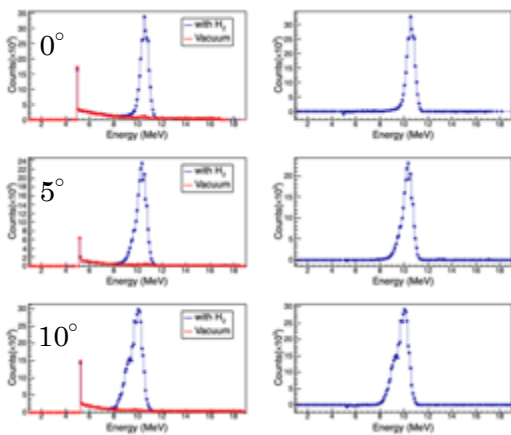


図 8 ${}^1\text{H}({}^{13}\text{C},n)$ 反応の中性子スペクトル

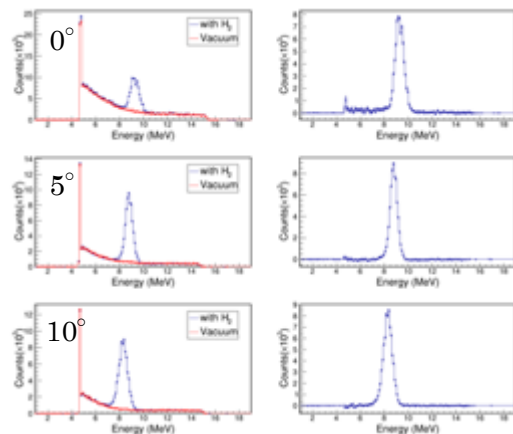


図 9 ${}^1\text{H}({}^{15}\text{N},n)$ 反応の中性子スペクトル

表 1 各反応における中性子数(10cm の距離)の評価

ビーム	反応	最大ビーム電流	最大中性子数(個/cm ² ・秒)
${}^{11}\text{B}^{3+}$	${}^1\text{H}({}^{11}\text{B}, n) {}^{11}\text{C}$	200 enA	2.4×10^4
${}^{13}\text{C}^{3+}$	${}^1\text{H}({}^{13}\text{C}, n) {}^{13}\text{N}$	1.8 eμA	2.2×10^5
${}^{15}\text{N}^{4+}$	${}^1\text{H}({}^{15}\text{N}, n) {}^{15}\text{O}$	1.2 eμA	1.7×10^4

これらの中性子生成量と CYRIC において加速実績のある一次ビーム強度を考慮した結果を表 1 に示す。その結果、 ${}^1\text{H}({}^{13}\text{C}, n)$ 反応が CYRIC において最適であると判断した。さらに、 ${}^1\text{H}({}^{13}\text{C}, n)$ 反応を用いて水素ガス標的のビーム強度耐性試験を実施し、 ${}^{13}\text{C}^{3+}$ ビーム 1.8 μA で 1 時間連続して照射しても、水素ガス標的の温度上昇は室温 (25°C) から 2.5°C の上昇に抑えられることを確認した。

(2) Flash ADC によるデータ収集システムの開発

本研究では、開発した単色中性子源と液体シンチレーターを用いて飛行時間測定法により測定を行う。測定時には、中性子源から直接飛来する中性子や、ガンマ線などの大量のバックグラウンドが散乱中性子とともに検出器へ飛来する。そのため、大強度の中性子ビームを使用して中性子非弾性散乱測定を行う場合は、転送スピードの速いデータ収集システムを必要とする。本研究では、これを Flash ADC を用いたデータ収集システムを構築することで、これまでの約 10 倍の効率でデータ収集を可能にする。

Flash ADC には CAEN 社の V1730SB を使用し、オンライン解析モニター用に CAEN 社が提供する CoPASS を用いた。V1730SB は PC と光通信でデータ収集可能であり、80MB/秒で読み出しが可能となっている。本研究では、6 台の液体シンチレーターを用いて飛行時間測定法により中性子のエネルギー測定が行えるシステムを構築した。従来の VME と QDC (Charge to Digital Converter), TDC (Time to Digital Converter) を用いたデータ収集システムに比べ約 10 倍のトリガーレートでも測定が可能となった。また、得られた波形データを用いてベースラインを適切に求める手

法を開発し、中性子とガンマ線の識別能力を向上させることに成功した。しかしながら、V1730SBは2ns毎のサンプリングであるため、飛行時間情報に2ns周期の構造が見えることがある。数chのデータを用いて2nsの中を内挿することにより、より正確な時間情報を得られるようにしているが、わずかに2nsの構造が残る。より精度の良い時間情報を取得するためにはよりサンプリングレートの高いFlash ADCを使用する必要がある。

(3) 中性子非弾性散乱測定システムの開発

本研究で開発した10MeV単色中性子源を使用する中性子非弾性散乱測定システムの開発を行った。測定の設定アップを図10に示す。本セットアップでは、中性子散乱測定のために直径15mm長さ250mmの鉄製のコリメーターを使用し、コリメーター直後に直径20mm長さ50mmの円筒形の炭素標的を設置した。コリメーターを通過した中性子は炭素と散乱し、液体シンチレーターを用いて測定される。図11に炭素ありの場合と炭素なしの場合の中性子のエネルギースペクトルを示す。なお、この測定では水素ガス標的の膜にハーバー膜 $6.5\mu\text{m}$ を使用しており、Ta膜 $5\mu\text{m}$ と比べるとやや連続領域の中性子が多いが、炭素により散乱される中性子はわずかなことがわかる。また、図12に炭素ありのスペクトルから炭素なしのスペクトルを差し引いたスペクトルを示す。10MeV付近に矢印で示した顕著なピークが見えるが、過去の16.5MeVの中性子を用いた弾性散乱のデータ②との比較から10MeV付近のピークは炭素と10MeV中性子との弾性散乱のピークであることが予想される。ホイル状態への散乱は3MeV付近に現れるが、今回の測定では統計精度が足らず、決定的なデータを取得するためには、今後、統計を増やして測定する必要がある。

本測定では、測定時間やTa膜が使用できなかったことによる中性子やガンマ線のバックグラウンドの増加など、いくつかの要因により統計精度を上げることができなかった。今後は、水素ガスを冷却することで、水素ガスの密度を上げ、単色中性子ビーム強度を増強することで、統計精度の良い測定を行っていく。

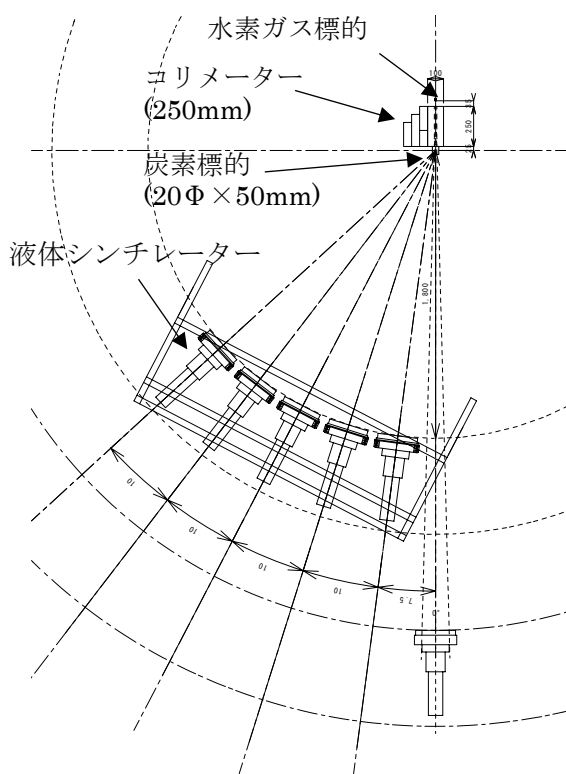


図10 中性子非弾性散乱測定セットアップ

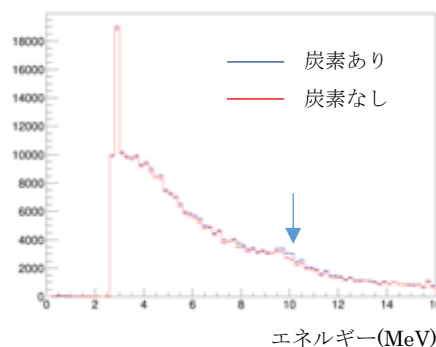


図11 測定中性子のエネルギースペクトル

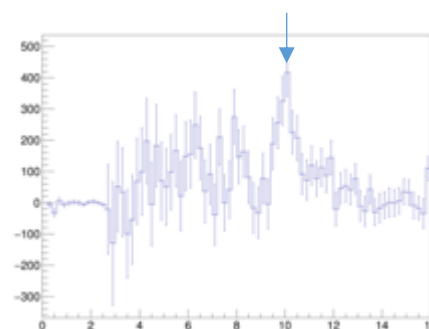


図12 炭素あり/なしの差分スペクトル

<引用文献>

- ① M. Beard, S. M. Austin, and R. Cyburt, Physical Review Letters 119, 112701 (2017).
- ② N. Olsson et al, Nucl. Phys. A496 (1989) 505.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Furuno T., Koshikawa A., Kawabata T., Itoh M., Kurosawa S., Morimoto T., Murata M., Sakanashi K., Tsumura M., Yamaji A.	4. 巻 16
2. 論文標題 Response of the GAGG(Ce) scintillator to charged particles compared with the CsI(Tl) scintillator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P10012 ~ P10012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/16/10/p10012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Inaba K, Sasamoto Y, Kawabata T, Fujiwara M, Funaki Y, Hatanaka K, Itoh K, Itoh M, Kawase K, Matsubara H, Maeda Y, Suda K, Sakaguchi S, Shimizu Y, Tamii A, Tameshige Y, Uchida M, Uesaka T, Yamada T, Yoshida H P	4. 巻 2021
2. 論文標題 Search for α condensed states in ^{13}C using α inelastic scattering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 093D01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Adachi S., Fujikawa Y., Kawabata T., Akimune H., Doi T., Furuno T., Harada T., Inaba K., Ishida S., Itoh M., Iwamoto C., Kobayashi N., Maeda Y., Matsuda Y., Murata M., Okamoto S., Sakaue A., Sekiya R., Tamii A., Tsumura M.	4. 巻 819
2. 論文標題 Candidates for the 5 condensed state in ^{20}Ne	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136411 ~ 136411
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136411	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsumura M., Kawabata T., et al.	4. 巻 817
2. 論文標題 First experimental determination of the radiative-decay probability of the 3 - 1 state in ^{12}C for estimating the triple alpha reaction rate in high temperature environments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136283 ~ 136283
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136283	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K.B.Howard, U.Garg, M.Itoh, H.Akimune, T.Kawabata, et al.	4. 巻 807
2. 論文標題 Compression-mode resonances in the calcium isotopes and implications for the asymmetry term in nuclear incompressibility	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135608
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.135185	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 A.Watanabe, S.Nakai, Y.Wada, K.Sekiguchi, M.Itoh, et al.	4. 巻 103
2. 論文標題 Proton-3He elastic scattering at intermediate energies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 44001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.103.044001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 山本広平, 伊藤正俊, 川畑貴裕, 秋宗秀俊, 松田洋平, 足立智, 小野寺史龍, 今間可奈子, 服部幸平, 氷見香奈子, 宮本憲伸, 米倉章平
2. 発表標題 高密度下におけるトリプルアルファ反応率決定に向けた10MeV領域のエネルギー可変な単色中性子源開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今間可奈子, 伊藤正俊, 山本広平, 小野寺史龍, 服部幸平, 米倉章平, 足立智, 氷見香奈子, 宮本憲伸, 川畑貴裕, 三木謙二郎, 松田洋平, 秋宗秀俊
2. 発表標題 単色中性子源開発におけるDigitizerを用いたデータ収集
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野寺史龍, 伊藤正俊, 山本広平, 今間可奈子, 服部幸平, 米倉章平, 川畑貴裕
2. 発表標題 前方角度における ^{160}O の 4^- 崩壊粒子測定による崩壊しきい値近傍の $^{12}\text{C}(0_2^+)^+$ および $8\text{Be}+8\text{Be}$ クラスター状態の探索
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 氷見香奈子, 古野達也, 宮本憲伸, 川畑貴裕, 足立智, 坂梨公亮, 辻聖也, 本多祐也, 村田求基, 土井隆暢, 藤川祐輝, 岡本慎太郎, 伊藤正俊, 秋宗秀俊, 松田洋平, 久保野茂
2. 発表標題 $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}(0+2)$ 断面積の測定のための大型アクティブ標的MAIKoの開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂梨公亮, 辻聖也, 川畑貴裕, 古野達也, 足立智, 氷見香奈子, 村田求基, 藤川祐輝, 稲葉健斗, 岡本慎太郎, 伊藤正俊, 松田洋平, 黒澤俊介, 山路晃広
2. 発表標題 GAGGシンチレータの波形解析による粒子識別法の開発 (2)
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒澤駿斗, 伊藤正俊, 松田洋平, 中川杏菜, 野坂恭子, 前田流, 小野寺史龍, 山本広平, 今間可奈子, 蜂須賀大暁, 秋宗秀俊, 久保野茂, 川畑貴裕
2. 発表標題 中性子によるトリプルアルファ反応の増幅率決定に向けた 10MeV 単色中性子源の開発
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前田流、松田洋平、伊藤正俊、石橋陽子、烏谷晃平、石田駿野、中川杏菜、黒澤駿斗、野坂恭子、山本広平
2. 発表標題 重イオンビーム用オンラインプロフィールモニターの開発(2)
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本広平、伊藤正俊、池田隼人、渡部浩司、Hajar Zarei、松田洋平、黒澤駿斗、中川杏菜、野坂恭子、前田流、小野寺史龍、今間可奈子、蜂須賀大暁
2. 発表標題 高分解能GAGG結晶を用いたコンプトンカメラの開発(2)
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	松田 洋平 (MATSUDA Yohei) (50569043)	甲南大学・理工学部・准教授 (34506)	
研究分担者	秋宗 秀俊 (AKIMUNE Hidetoshi) (60319829)	甲南大学・理工学部・教授 (34506)	
研究分担者	川畑 貴裕 (KAWABATA Takahiro) (80359645)	大阪大学・理学研究科・教授 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------