

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月20日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760686

研究課題名（和文） 陽子入射に伴う全放出粒子測定システムの開発と包括的な反応機構の研究

研究課題名（英文） Development of the system measuring all particles produced from proton-induced reaction and the study of the reaction mechanism

研究代表者

萩原 雅之（HAGIWARA MASAYUKI）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・放射線科学センター・助教

研究者番号：10450363

研究成果の概要（和文）：陽子入射に伴う全放出粒子測定システムの開発のために、日本原子力研究開発機構 TIARA 施設において、十数 MeV～数百 MeV に加速した陽子やネオンを様々なターゲットに照射し、放出されるγ線や中性子、陽子、重陽子、三重陽子等の軽粒子、ヘリウムからアルゴンまでの重粒子の二重微分断面積を測定した。得られた測定結果は評価済み核データ LA150 や量子分子動力学 QMD モデルを用いた粒子・重イオン輸送計算コード PHITS を用いた計算結果と比較した。

研究成果の概要（英文）：In order to develop the system measuring all particles emitted in the proton-induced reaction, we measured the thick target yield for neutron and photon production and double-differential cross sections of various target in the reaction of charged particle production from He to Ar using proton and neon accelerated to tens to several hundreds of MeV at the TIARA facility, JAEA. The measured results were compared with the results calculated by PHITS code using evaluated nuclear data LA150 and QMD model

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：核データ測定、放射線工学

科研費の分科・細目：総合工学、原子力学

キーワード：放射線工学、ビーム科学、原子核工学

1. 研究開始当初の背景

近年の加速器技術の発展に伴い、数 100 MeV の中高エネルギー粒子線は原子核物理等の基礎科学分野のみならず、医学や工学などの多様な分野で応用されている。医学分野での応用の代表的なものは炭素線や陽子線を用いたがん治療であり、高度先進医療制度が適用になったこともあり、今後ますます一般化

していくと考えられる。工学分野での代表例としては長寿命放射性核種の核変換処理がある。原子力発電所から発生する超ウラン元素などの長寿命核種を含む廃棄物を中高エネルギー陽子による核破砕反応から生成する中性子を用いて未臨界炉で発電を行いながら燃焼・消滅させようという試みであり、現在、日本や EU を中心に研究が進められて

いる。

このような中高エネルギー粒子を用いた応用技術の基礎データとして必要不可欠なものの一つに、中高エネルギー粒子線と標的核(細胞組織や未臨界炉を構成する原子核)との相互作用に関する核データがある。中高エネルギー領域の核反応では、入射粒子によって標的核が破壊される核破砕反応が支配的となり、多くの中性子やp, d, tなどの軽イオンとともに核破砕片(フラグメント)が放出され、様々な照射効果を引き起こす。近年、宇宙環境や航空機で問題となっている半導体機器の誤動作(ソフトウェア)現象はフラグメント誘起の照射効果の代表例である。一方、核破砕反応における反応機構は現在でも完全には解明されておらず、全ての放出粒子に対し包括的に記述できる理論計算モデルはまだ実現していない。そのため理論計算では実験データを基にパラメータを取得しモデル化を行っているが、フラグメント生成に関しては実験データも少ないため、その予測精度も非常に低いのが現状である。中高エネルギー粒子を用いる応用技術の精度向上のためには、核破砕反応における核データ・理論計算の精度向上が必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、加速器を用いたがん治療、長寿命核種の核変換処理技術、半導体ソフトウェアの評価・解明等に代表されるような放射線高度利用のための基礎データとなる中高エネルギー陽子による核反応から生成するあらゆる放出粒子の放出エネルギースペクトル(二重微分断面積)を測定するための包括的な検出器システムの開発を行う。このために様々な粒子種(光子、中性子、荷電粒子)に対して広いエネルギー領域で粒子弁別性能を有する検出器システムを開発し、陽子や重イオン入射における様々なターゲットからの中性子、 γ 線、軽イオンやフラグメント生成の包括的なエネルギースペクトルデータを測定し、得られた結果を Los Alamos グループによる評価済み核データ(LA150)や量子分子動力学 QMD モデル等の理論計算と比較し、システムの検証を行う事を目的とする。

3. 研究の方法

本研究ではあらゆる粒子種の測定を可能とするため、3種類の測定手法[飛行時間(TOF)法、アンフォールディング法、カウンターテレスコープ法]をそれぞれ中性子、 γ 線、荷電粒子のエネルギー測定に対して用いた。これらの測定手法の複合体が最終的な全粒子測定システムとなるが、手法の検証のため、実験は TOF 法とアンフォールディング法を用いた測定とカウンターテレスコープ法を用いた測定を分けて行った。

実験は高崎量子応用研究所 TIARA 施設の HB1 コースを用いて行った。AVF サイクロロンによって陽子やネオンをそれぞれ 12, 18 MeV、260 MeV に加速し、真空チェンバー内に設置したターゲットに照射して、様々な二次粒子を生成させ、そのエネルギースペクトルの測定を 0° から 150° まで幅広い角度範囲で行った。中性子及び γ 線の測定体系の一例を図1に示す。直径、厚さが2インチの有機液体シンチレータ(NE213)をターゲットから2-5 mの位置に配置して中性子や γ 線の飛行時間、シンチレータの発光量(波高分布)、波形情報をリストモードで測定した。中性子は非荷電粒子なので、飛行時間からそのエネルギーを導出する。中性子と γ 線は信号波形の違いから、弁別が可能である。粒子弁別の2次元図の一例を図2に示す。中性子によるイベントと γ 線によるイベントが明瞭に分かれている。波高分布は SCINFUL-R コードにて中性子の検出効率を計算する際に使用した。

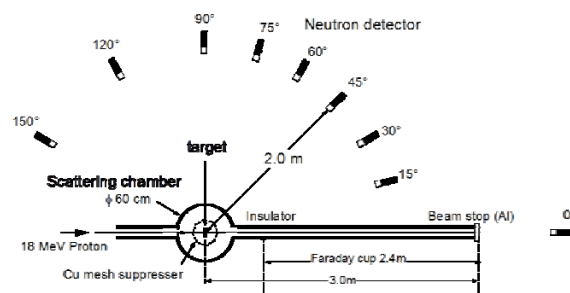


図1 実験体系(中性子・ γ 線)

γ 線のエネルギースペクトルは FERDO-U コードを用いて波高分布をアンフォールディングすることで導出した。アンフォールディングに使用する γ 線の波高分布は図2に示した波形情報の2次元図から γ 線イベントのみを抽出し、更に TOF 情報からターゲットから直接検出器に到達したイベントのみを選別したものである。

用いたターゲットは、18 MeV 陽子のフルストップ厚さの ${}^9\text{Be}$, ${}^{\text{nat}}\text{C}$, ${}^{\text{nat}}\text{N}$ (AlN, メラミン($\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$)), ${}^{\text{nat}}\text{O}$ ($\text{H}_2^{\text{nat}}\text{O}$, Al_2O_3), ${}^{18}\text{O}$ (H_2^{18}O), ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{\text{nat}}\text{Cu}$, ${}^{\text{nat}}\text{Ta}$, ${}^{\text{nat}}\text{Pb}$)であり、幅広い範囲の質量数で系統的に測定を行った。NやOは化合物(窒化アルミニウムやメラミンやアルミナ等)の測定値からアルミニウムの寄与を差し引くことで評価した。また、 $\text{H}_2^{\text{nat}}\text{O}$ や H_2^{18}O (98atom%)等の液体ターゲットを用いるために10 μm 厚のハーバー箔(16 mm ϕ)の入射窓を備えたステンレス製あるいは銅製の容器を作成した。液体のターゲット部の厚さは18 MeV陽子が十分止まる6 mmとした。

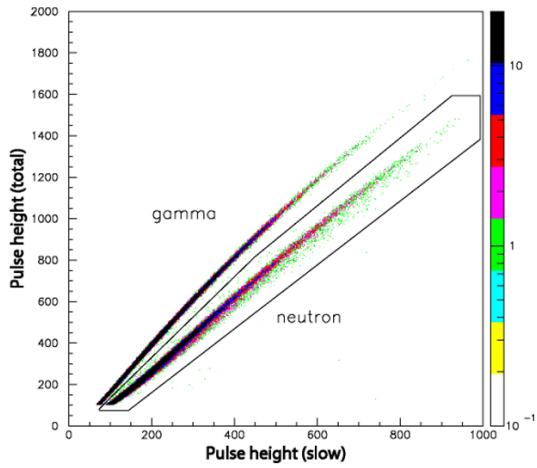


図2 粒子弁別 (中性子・γ線)

カウンターテレスコープ法を用いた荷電粒子の測定体系を図3に示す。AVFサイクロトロンによって核子当たり13 MeVに加速された ^{20}Ne ビームを真空チェンバー内に設置した薄いターゲット; Be(15 μm 厚), C(0.49 mg/cm^2 厚), Fe(1 μm 厚)に照射して、 30° , 60° , 90° に生成された荷電粒子のエネルギースペクトルを測定した。

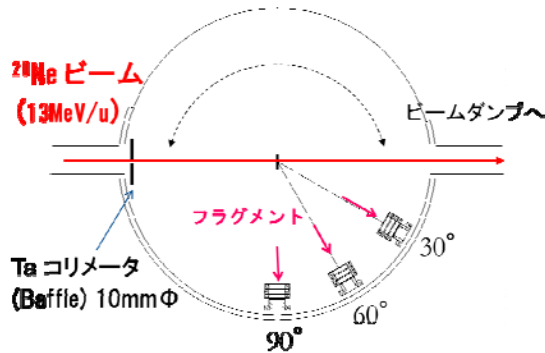


図3 実験体系 (荷電粒子)

様々な電荷・質量をもつ放出粒子を広いエネルギー範囲で測定するため。異なる厚みを持つ3層のシリコン検出器とLYSO(Ce)シンチレータから成る多層型テレスコープ検出器を作成した。各検出器要素の厚さが異なる2種類のテレスコープ検出器を用いて試験を行った。一つ目のパターンはSSD (40 μm 厚) - SSD (250 μm 厚) - SSD (1012 μm 厚) - LYSOシンチレータ (2cm厚)であり、二つ目のパターンはSSD (23 μm 厚) - SSD (150 μm 厚) - SSD (500 μm 厚) - LYSOシンチレータ (2cm厚)である。図4、5に隣り合う二つの検出器で測定されたFeターゲットから生成された二次粒子の二次元スペクトルを示す。二つの検出器に付与するエネルギー ($\Delta E-E$)の違いによっては水素同位体からアルゴンまでの多くの生成粒子を同定できた。

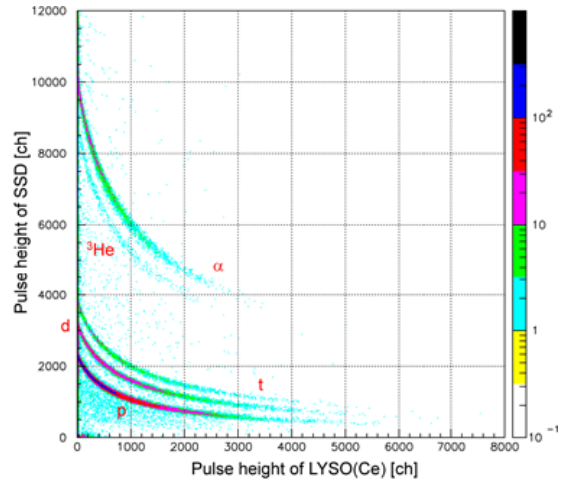


図4 260 MeVの ^{20}Ne イオンを鉄ターゲットに入射させ、 30° 方向に放出した二次粒子に対して得られたSSD(1012 μm 厚)対LYSO(Ce)シンチレータ(2 cm厚)の2次元波高分布。陽子、重陽子、三重陽子、 ^3He 、 α 粒子によるイベントの縞が明瞭に分かれている。

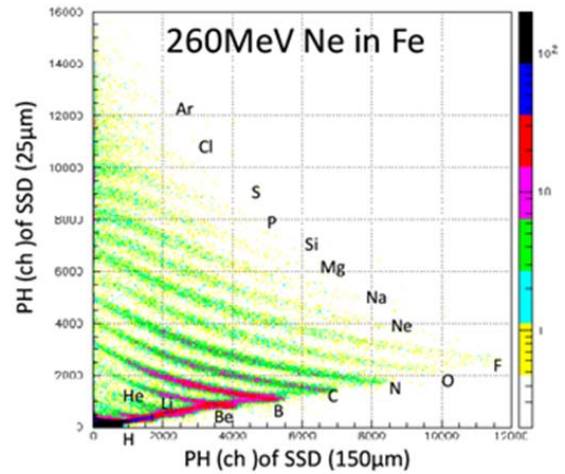


図5 260 MeVの ^{20}Ne イオンを鉄ターゲットに入射させ、 30° 方向に放出した二次粒子に対して得られたSSD(23 μm 厚)対SSD(150 μm 厚)の2次元波高分布。陽子からArまでの粒子が同定できている。

本研究では、テレスコープの最終段の検出器として、短い減衰時間、比較的高い発光量、高阻止能の特徴を持つLYSO(Ce)シンチレータ(2 cm^3)を選択した。また、アバランシェフォトダイオード: APD (Hamamatsu: S8664-1010)と組み合わせて信号読出しを行うことによって、検出器群をコンパクトにかつ真空中に設置できるようにした。これによって、検出器群を真空チェンバー内に設置でき、比較的高い立体角で低エネルギー粒子まで測定することができる。しかし、LYSO(Ce)シンチレータへの付与エネルギーと発光量の関係は非線形であることが知られており、測定粒子により異なる事が報告されている。

そこで、本研究では、Birks の式に基づく経験式を用いて10–100MeV 領域における様々な粒子 (p, d, t, ^3He , α) に対するLYSO(Ce)シンチレータの発光特性を調べた。

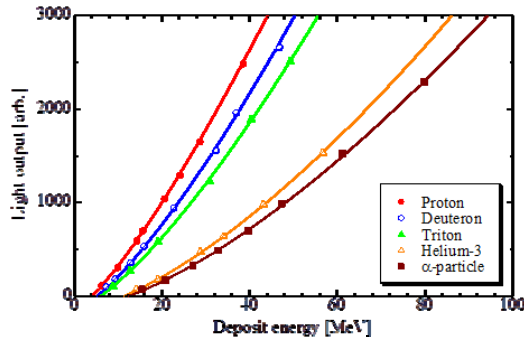


図6 260 MeV の ^{20}Ne ビームを鉄ターゲットに入射させた際に生成する二次粒子から導出した LYSO(Ce)シンチレータの付与エネルギーと発光量の関係。シンボルが実測値で、実線は Birks の式に基づく経験式[(4)式]によるフィッティング

図6に260 MeV のネオンビームを鉄ターゲットに入射させた際に生成する二次粒子をから導出した LYSO(Ce)シンチレータの付与エネルギーと発光量の関係を示す。陽子、重陽子、三重陽子、 ^3He 、 α 粒子について測定することができた。得られた実測値のフィッティングから、下記のような関係式を得た。これらの値の確認のため、数10 MeV の陽子、重陽子、ヘリウムの単色ビームを用いた照射試験も行い、値の整合性を確認した。

$$L(E) = a \left(\frac{E^\alpha}{A^{0.61} Z^{1.65}} \right) + b \quad (4)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1.275 & (p) \\ 1.341 & (d) \\ 1.369 & (t) \\ 1.491 & (^3\text{He}) \\ 1.499 & (\alpha) \end{cases}$$

4. 研究成果

本実験で得られた結果の一部を図7から図12に示す。図7、8は陽子18 MeVによる厚いアルミニウム、銅からの中性子二重微分収量の測定結果であり、実験値は評価済み核データ LA150 を用いた MCNP の計算値である。実験値は計算値とよく一致しているのが確認された。

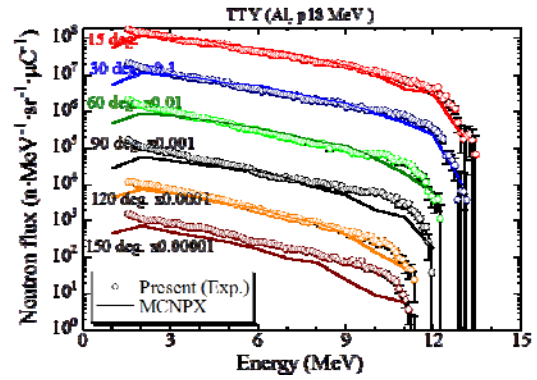


図7 18 MeV の陽子を厚いアルミニウムターゲットに入射させた際に生成する中性子スペクトル。シンボルが実測値で、実線は LA150 評価済みデータを用いた MCNP の計算値

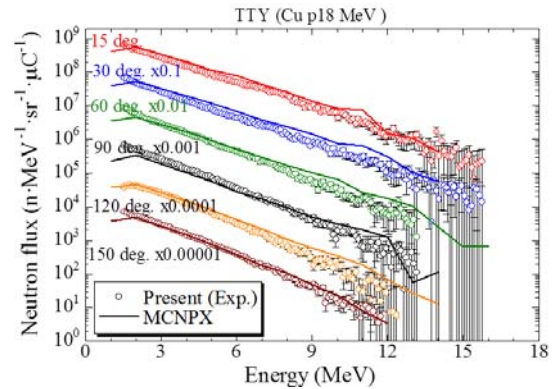


図8 18 MeV の陽子を厚い銅ターゲットに入射させた際に生成する中性子スペクトル。シンボルが実測値で、実線は LA150 評価済みデータを用いた MCNP の計算値

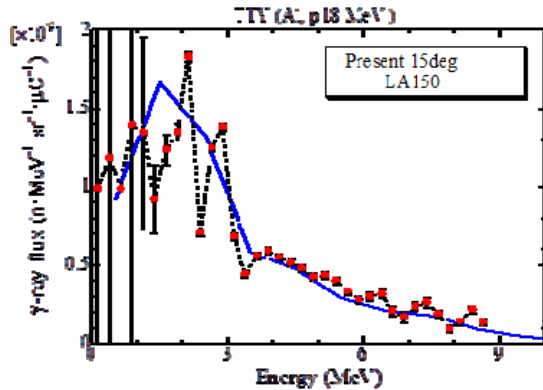


図9 18 MeV の陽子を厚いアルミニウムターゲットに入射させた際に生成する γ 線スペクトル。シンボルが実測値で、実線は LA150 評価済みデータを用いた計算値

図9は陽子18 MeVによる厚いアルミニウムターゲットからの γ 線スペクトル結果である。LA150を用いたMCNPの計算値と比較し、良い一致が得られている。図10から12は260 MeVの ^{20}Ne 入射に伴うベリリウムの陽子、重陽子、三重陽子、 ^3He 生成二重微分面積で

ある。後方角を除いて本実験値と QMD モデルによる計算結果はよく一致している。

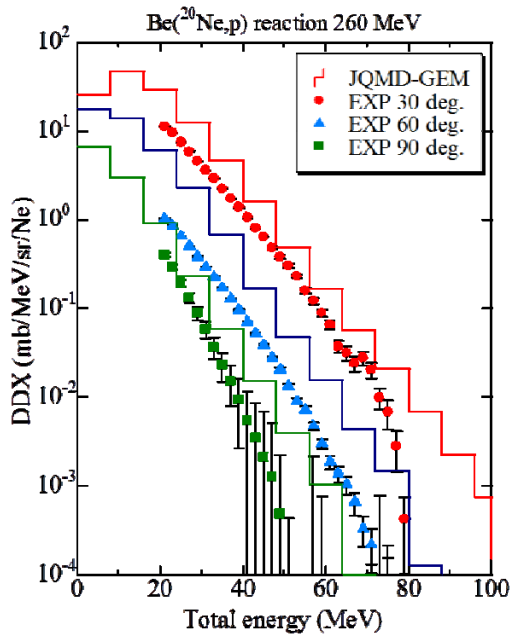


図 10 260 MeV の ^{20}Ne イオン入射による 30、60、90° 方向のベリリウム陽子生成二重微分断面積。シンボルが実測値で、実線は QMD モデルを用いた PHITS の計算値

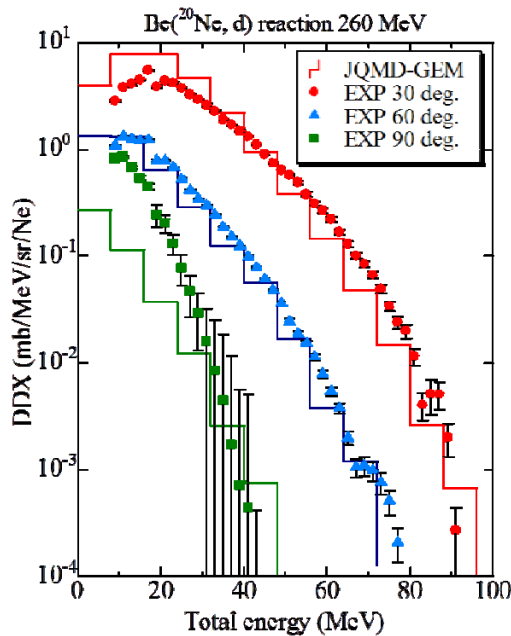


図 11 260 MeV の ^{20}Ne イオン入射による 30、60、90° 方向のベリリウム重陽子生成二重微分断面積。シンボルが実測値で、実線は QMD モデルを用いた PHITS の計算値

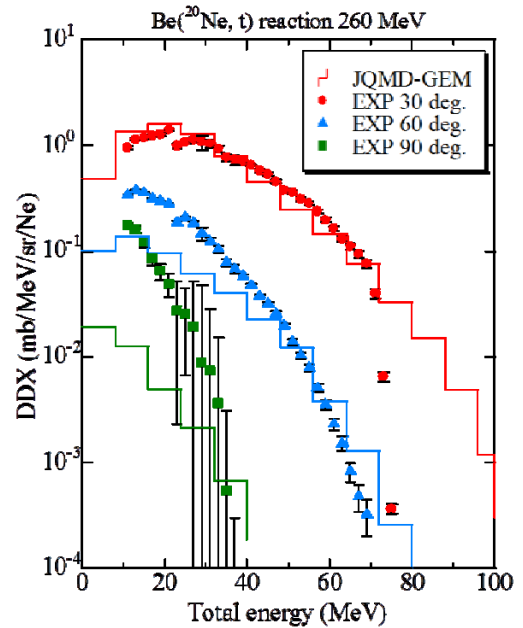


図 12 260 MeV の ^{20}Ne イオン入射による 30、60、90° 方向のベリリウム三重陽子生成二重微分断面積。シンボルが実測値で、実線は QMD モデルを用いた PHITS の計算値

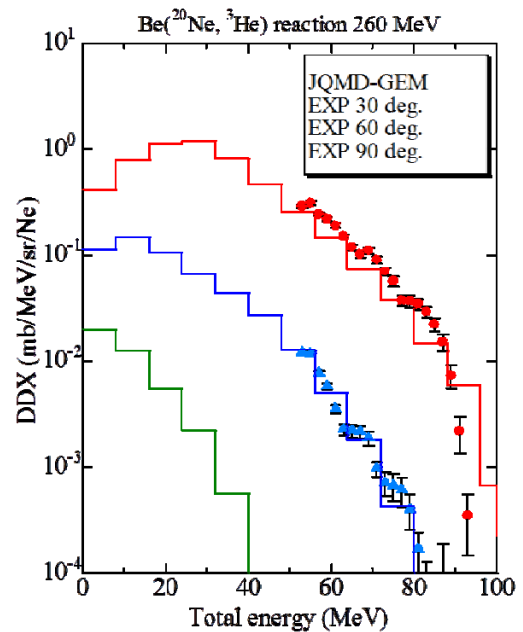


図 13 260 MeV の ^{20}Ne イオン入射による 30、60、90° 方向のベリリウムヘリウム-3 生成二重微分断面積。シンボルが実測値で、実線は QMD モデルを用いた PHITS の計算値

以上のように、中高エネルギー領域の核破砕反応から生成するあらゆる二次粒子の放出エネルギースペクトル（二重微分断面積）を測定するための包括的な検出器システムの開発を行った。開発した測定システムから

得られた結果は Los Alamos グループによる評価済み核データ (LA150) や量子分子動力学 QMD モデル等の理論計算と比較し、その妥当性、整合性を検証した。このことにより、今後、本システムを用いて中高エネルギー陽子入射反応に伴う包括的な核データを取得することが可能となった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① M. Hagiwara, T. Sanami, T. Oishi, et al., Differential cross sections on fragment ($2 \leq Z \leq 9$) production for carbon, aluminum and silicon induced by tens-of-MeV protons, Journal of Nuclear Science and Technology, 査読有, Vol. 49, No. 6, 2012, pp. 571–587
- ② M. Hagiwara, T. Sanami, K. Masumoto et al., Spectrum Measurement of Neutrons and Gamma-rays from Thick $H_2^{18}O$ Target Bombarded with 18 MeV Protons, Journal of the Korean Physical Society, 査読有, Vol. 59, No. 2, 2011, pp. 2035–2038、
- ③ T. Sanami, M. Hagiwara, H. Iwase et al., Fragment DDX Measurement of Proton Induced Reactions on Light-medium Nuclei for Energy Range from Reaction Threshold to a Few Hundred MeV, Journal of the Korean Physical Society, 査読有, Vol. 59, No. 2, 2011, pp. 1805–1808、
- ④ M. Hagiwara, T. Sanami, Y. Iwamoto et al., Systematic Measurement of Neutron and Gamma-ray Yields on Thick Targets Bombarded with 18 MeV Protons, Proceedings of the 2010 Symposium on Nuclear Data, JAEA-Conf, 査読有, Vol. 2, 2011, pp. 119–124
- ⑤ T. Sanami, M. Hagiwara, H. Iwase et al., Experimental studies of light fragment production cross section for nucleon induced reaction at intermediate energies, Proceedings of the 2010 Symposium on Nuclear Data, JAEA-Conf, 査読有, Vol. 2, 2011, pp. 59–64

[学会発表] (計 8 件)

- ① 萩原雅之ら、“低エネルギー重イオン入射核反応から生成する粒子生成二重微分断面の包括的な測定 -核子あたり 13 MeV のネオン入射によるベリリウム、炭素、鉄からの荷電粒子 (H~Ar) 生成-” 日本原子力学会 2012 年春の大会、2012 年 3 月 19 日、福井大学文京キャンパス

- ② 萩原雅之ら、“低エネルギー重イオン入射核反応による荷電粒子生成二重微分断面の測定-” 日本原子力学会 2011 年春の大会、2012 年 3 月 28 日、福井大学 (ただし地震により発表は中止)
- ③ 萩原雅之ら、“陽子 12, 18 MeV における厚いターゲットからの中性子・ γ 線スペクトルの測定” 日本原子力学会 2011 年秋の大会、2011 年 9 月 22 日、北九州国際会議場
- ④ 萩原雅之ら、“低エネルギー加速器を用いた高度放射線医療のための核データ測定 -陽子 12, 18 MeV における厚い Be, $H_2^{18}O$ ターゲットからの中性子・ γ 線スペクトルの測定” 第 6 回高崎量子応用研究シンポジウム、2011 年 10 月 14 日、高崎シティギャラリー
- ⑤ M. Hagiwara et al., “Systematic Measurement of Neutron and Gamma-ray Yields on Thick Targets Bombarded with 12 and 18 MeV Protons” 2011 年度核データ研究会、2011 年 11 月 16 日、テクノ交流館リコッティ
- ⑥ 萩原雅之ら、“陽子 18MeV 入射における厚いターゲットからの中性子・ γ 線スペクトルの系統的測定-” 日本原子力学会 2010 年秋の大会、2010 年 9 月 15 日、北海道大学
- ⑦ 萩原雅之ら、“低エネルギー加速器施設における加速器構造材等からの中性子・ γ 線スペクトルの測定” 第 5 回高崎量子応用研究シンポジウム、2010 年 10 月 14 日、高崎シティギャラリー
- ⑧ M. Hagiwara et al., “Systematic Measurement of Neutron and Gamma-ray Yields on Thick Targets Bombarded with 18 MeV Protons” 2010 年度核データ研究会、2010 年 11 月 26 日、九州大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

萩原 雅之 (HAGIWARA MASAYUKI)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・放射線科学センター・助教
研究者番号：10450363

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし