

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24561051

研究課題名(和文)入射粒子に捉われない核破砕片生成モデルのための実験的研究

研究課題名(英文)Experimental studies on fragment production model for various incident particles

研究代表者

佐波 俊哉 (sanami, toshiya)

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・教授

研究者番号：90321538

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：近年様々な分野で利用されている、中高エネルギー粒子の照射影響評価の改善を図るためには原子核反応の寄与を取り入れる必要がある。この原子核反応のうち中高エネルギーにおいて特徴的な核破砕片生成反応に着目し、その系統性を入射粒子種やエネルギーに対する包括的な実測データにより明らかにすることを試みた。独自に開発した測定器と散乱槽を改良し、4種類の入射粒子に対して3つの入射エネルギーで5種類のターゲットを照射し、生成した核破砕片を3つの角度で測定した。得られたデータを理論計算結果と比較し、その不一致の系統性を反応過程について明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To evaluate irradiation effect of intermediate energy particles that is applied in various fields, contribution from nuclear reaction should be properly taken into account. In this research, fragment production that is one of typical nuclear reaction processes for intermediate particles was studied through systematic data for various incident particles and energies. Using improved detector and scattering chamber to suit this experiment, fragments were measured at three angles from nuclear reactions that were combination of four kinds of incident particles, three energies, on five targets. The data were compared with results of theoretical calculation to discuss reason of disagreement from the systematics.

研究分野：放射線工学

キーワード：核破砕片 二重微分断面積 ブラックカーブカウンター

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 10 MeV から数 100 MeV のいわゆる中高エネルギーを持つ粒子線は、医療を初めとするさまざまな分野で利用されている。その代表的な例が炭素線や陽子線を用いたがん治療であり、一次粒子ビームの照射効果評価に基づく臨床適用のための研究から、二次粒子の効果を含む、治療の質を高める研究が進められている。ここで問題となる二次粒子は、一次粒子ビームと体内構成元素との核反応により生成する荷電粒子や、一次粒子ビームの成形の際に発生する中高エネルギー陽子、中性子線である。これの中高エネルギー粒子の二次粒子生成や影響の評価のためには、信頼できる精度を持った中高エネルギー粒子の相互作用の基礎データを用いた放射線輸送シミュレーションが必須である。

中高エネルギー粒子の相互作用の特徴的なものとして、標的核との核破砕反応がある。核破砕反応では標的核が破砕され、軽粒子とともに比較的重い核破砕片が放出される。この核破砕片は単位長さあたりのエネルギー付与が格段に大きく、数マイクロメートルという細胞サイズに大きなエネルギーを付与するために大きな照射影響を引き起こす。核破砕片の放出に至るモデルはいくつか提案されているが、これを完全に記述するグローバルなモデルとパラメータはない。特に炭素、窒素、酸素などの生体を構成する軽い核は、画一的なモデルが難しく、核破砕片放出に大きな不確定性がある。核破砕片放出過程を系統的な実測データにより明らかにすることが必要である。

研究代表者は「原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ(若手) 中高エネルギー陽子による核破砕片の系統測定に関する研究」において実験データの少ない中高エネルギー領域における核破砕片生成のデータを測定するシステムを独自に開発し、系統的データを取得した。その結果、(1)既存のシミュレーションコードに組み込まれた核反応モデルが中高エネルギーでの核破砕片生成を著しく過小評価する一方で、(2)核破砕片放出に系統性が見いだせること、が明らかとなった。

本研究ではこの系統性の適用範囲を拡張するために、陽子以外の入射粒子での核破砕片放出データを取得し、入射粒子、放出粒子を限定しない、よりグローバルな核破砕片放出モデルの構築を目指す。

2. 研究の目的

本研究では数 10 MeV から数 100 MeV までの中高エネルギーを持つ核子及び原子核が標的核に入射した場合の核破砕片放出を記述する包括的モデルを作成するために、核子入射及び原子核入射による核破砕片生成二重微分断面積の実験データを以下の条件に従い取得する。

(1)系に与えるエネルギーをそろえた場合 同

一エネルギーを持つ、陽子、重陽子、ヘリウム原子核、炭素原子核を軽核から中重核までの標的に入射させる条件。

(2)核子の持つエネルギーをそろえた場合 核子あたりに同一のエネルギーを持った、陽子、重陽子、ヘリウム原子核、炭素原子核を軽核から中重核までの標的に入射させる条件。

以上 2 種類の実験データから入射エネルギーごとの核破砕片生成における統計的寄与と核子的寄与の割合を導出する。測定系のために、原子力イニシアティブで整備した検出器によりエネルギーの高い核破砕片に対応するための改良を施す。核子入射により得られている系統性が原子核入射のどの条件と整合するかを調査し、核子入射と原子核入射に対応できる核破砕片放出のよりグローバルな系統性を導出する。

3. 研究の方法

(1) 検出器の改良

核破砕片の測定はブラックカーブカウンタ(BCC)を用いるが、多様な入射粒子とエネルギーに対応するために可測定エネルギー域を拡充する改良を施した。具体的には、(1)前置検出器を内蔵させることによりエネルギー分解能の向上を図り、(2)半導体検出器を組み合わせることによりエネルギーの高い粒子を測定可能にし、(3)全体を小型化してより広い角度範囲の測定を可能とした。

図 1 に新たに設計した改良型の BCC を示す。アノードと検出器フランジの間に 70mm 程度のスペースを設けて、アノード用前置検出器と半導体検出器、シンチレータを組み込み可能な形状とした。アノード用前置増幅器は、クリアパルス社製 581 型を利用した。半導体検出器はセイコーEG&G 社製の 1000 μm 厚みと 500 μm 厚みを組み込んだ。

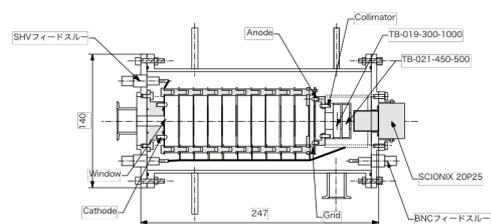


図 1 改良型 BCC の断面図

(2) 散乱チェンバーの改良

これまでの実験で用いてきた散乱チェンバーは、測定角度が 30 度、60 度、90 度、120 度の 4 点と限られていること、入射粒子が重イオンの場合、入射エネルギーが低い場合は放出粒子が前方に集中することから、前方角度の測定を中心とするために、散乱チェンバーの改良を行った。図 2 に改良した散乱チェンバーと BCC を組み合わせ、放射線医学総合研究所サイクロトロン C6 コースに設置した際の写真を示す。

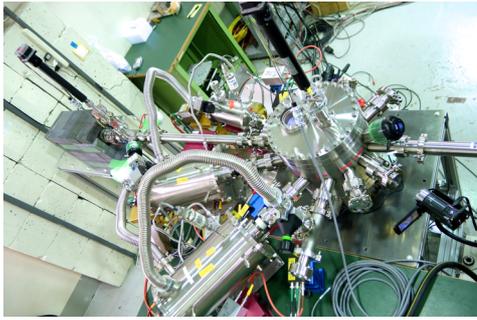


図2 改良した散乱チェンバーと BCC をビームラインに設置した写真

(3) 入射粒子の種類とエネルギー

今回取得した実験データのビーム条件を表1にまとめる。He の 50 MeV と 12 MeV/u など一部重複があるために、本研究で実際にデータとして取得されたのは○で示す条件のうち8ビーム条件である。済は先行研究で取得済みのデータを示す。×は使用した加速器の適用外であったために測定できなかったものと、エネルギーが低くて核破砕片が期待できないものである。それぞれのビーム条件に対して、ベリリウム、炭素、アルミニウム、チタン、銅、銀のうちから4ターゲット、15度、20度、30度、60度、90度の角度から3角度について測定を行った。

表1 実験で用いたビーム条件

粒子種	p	d	He	C
粒子あたり同一エネルギー				
50 MeV	○	○	○	○
70 MeV	済	×	○	○
140 MeV	済	×	×	済
核子あたり同一エネルギー				
12 MeV/u	×	○	○	済
25 MeV/u	○	○	○	×

4. 研究成果

(1) 検出器の試験

前節で改良した検出器の性能試験を放射線医学総合研究所サイクロトン施設で行った。データ収集システムとして A3000 システムを用い、BCC のアノードとカソードとブラックピーク、2つの SSD の波高信号をタイムスタンプ付セルフトリガーリストで収集した。改良した BCC を散乱チェンバーの 30 度方向に設置し、50 MeV 陽子を 4 μm 厚みのポリエチレン膜に入射して取得したデータを図3に示す。左上は BCC のブラックピークとエネルギーのプロットで、右上の BCC のカソードとエネルギーのプロットで決めた分離下限値を元に He 以上の粒子の分離を行っている。左下は

BCC と SSD による ΔE-E プロットで陽子からリチウムまでが測定されている。右下は SSD と Veto の ΔE-E プロットで陽子、重陽子、三重陽子が測定されている。また、エネルギー分解能が向上し、良好な粒子弁別性能が得られた。

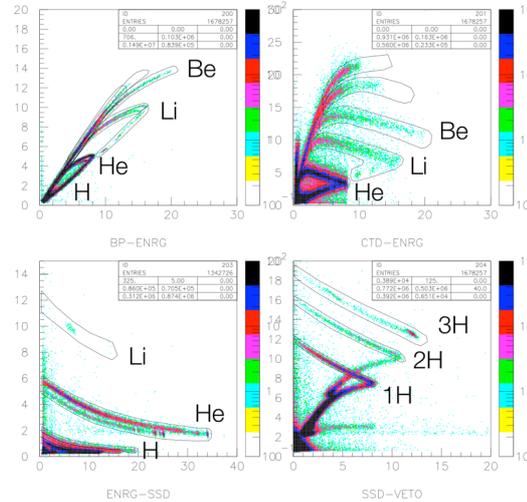


図3 50 MeV の陽子が 4 μm 厚みのポリエチレン膜に入射した際に生成した二次粒子を改良型 BCC で測定して得た二次元スペクトル
左上:BCC のブラックピークとエネルギー、右上:BCC のカソードとエネルギー、左下:BCC と SSD の ΔE-E、右下 SSD と Veto の ΔE-E

(2) 二重微分断面積

図4に測定で得られた二重微分断面積の例として70 MeV の陽子、ヘリウム、72 MeV の炭素が炭素ターゲットに入射した場合に放出される核破砕片の 30 度方向の二重微分断面積を示す。点は実験値であり、線は原子核入射反応を記述する QMD モデルを用いた核破砕片生成二重微分断面積コードによる計算値を示している。

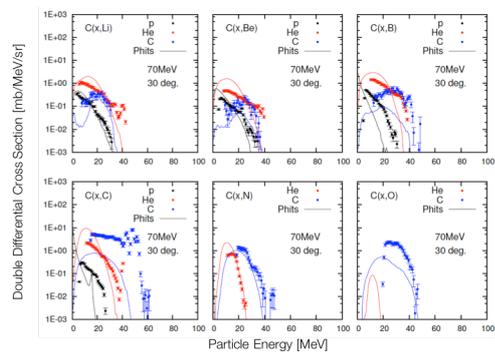


図4 70 MeV の陽子、ヘリウム、72 MeV の炭素が炭素ターゲットに入射した場合に放出される核破砕片の 30 度方向の二重微分断面積

炭素ターゲットに炭素原子核を入射したために、直接過程成分により炭素放出が多い。また、ボロン放出と酸素放出はストリッピング及びピックアップ過程による寄与があると

考えられる。これらの直接過程成分による収量の変化は陽子、ヘリウム入射に対しては見られない。

計算値は概ね実験値を再現するが、上記直接過程のみみられる成分については過小評価している。同様な比較をすべての入射エネルギー、ターゲット原子核について行った結果、ターゲット原子核が重くなるにつれて過小評価傾向が大きくなることがわかった。

図5に図4と同様の粒子がアルミニウムターゲットに入射した場合に放出される核破砕片の30度方向の二重微分断面積を示す。この場合は計算値が実験値を過小評価していることがわかる。一方で放出粒子のエネルギー分布は実験値と類似の形状を示していることから、放出機構の記述ではなく、その絶対値を決めるパラメータについて検討が必要であることが示唆されている。

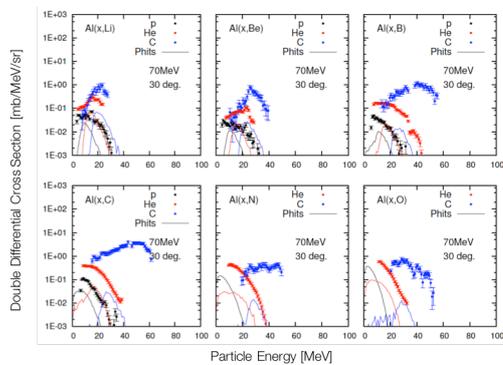


図5 70 MeVの陽子、ヘリウム、72 MeVの炭素がアルミニウムターゲットに入射した場合に放出される核破砕片の30度方向の二重微分断面積

同様の比較を50MeV,140MeV入射の各ターゲットについて行い、同様の傾向を示すことが明らかになった。

(3) 積分断面積

前節で示した二重微分断面積をエネルギー積分し、その値のターゲット依存性を示したものを図6に示す。実験値はゼロエネルギーまでのデータが得られていないが、入射粒子の近傍の核破砕片の放出が直接過程成分とし

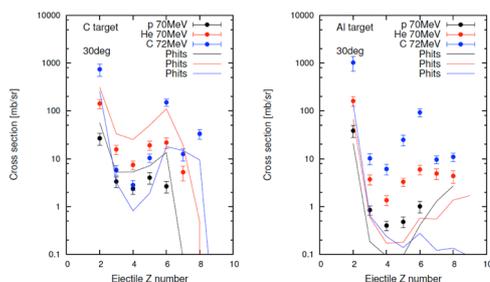


図6 70 MeVの陽子、ヘリウム、72 MeVの炭素が炭素およびアルミニウムターゲットに入射した場合に30度方向に放出される核破砕片のターゲット原子核依存性

て生成量を押上げている様子がわかる。直接過程は入射粒子とターゲット原子核、残留核のエネルギー準位、核子の拾い上げと剥ぎ取りを取り入れることにより、実験データをよく再現することが近年報告されている。この成果を用いて本実験値の非直接過程成分の系統性を評価することにより、核破砕片の記述の精度が改善することが期待出来る。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3件)

- ① T. Sanami, M. Hagiwara, Target mass dependency of light mass fragment energy spectra for intermediate energy proton induced reactions, Nuclear data sheets 119 (2014) 241-244, DOI 10.1016/j.nds.2014.08.066 (査読有)
- ② T. Sanami, Light mass fragment production DDXs of 70 MeV proton, helium and carbon induced reactions, Proceedings of the 2013 symposium on nuclear data, JAEA-Conf 2014-002 (2014) 139-144, <http://dx.doi.org/10.11484/jaea-conf-2014-002> (査読無)
- ③ T. Sanami, Target dependency of light mass fragment production DDX for 6MeV/u carbon induced reaction, Proceedings of the 2012 symposium on nuclear data, JAEA-Conf 2013-002 (2013) 185-190, <http://jolissrhc-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Conf-2013-002.pdf> (査読無)

[学会発表] (計 9件)

- ① T. Sanami, Y. Yamaguchi, Y. Uozumi, M. Hagiwara, Y. Koba, Double Differential Cross Section for light mass fragment production on tens of MeV proton helium and carbon induced reactions, ND2016 - International Conference on Nuclear data for Science and Technology, 2016/9/11-9/16, Bruges (Belgium, Bruges) to be presented (invited)
- ② T. Sanami, M. Hagiwara, Experimental data of light mass fragment production for intermediate energy nucleon and nucleus induced reactions, International conference in nuclear reaction mechanisms, 2015/6/15-6/19, Varenna (Italy, Varenna)
- ③ 佐波俊哉, 軽荷電粒子の同時測定のためのブラックカーブカウンターの改良, 日本原子力学会 2014 秋の大会, 2014/9/8-9/10, 京都大学(京都府、京都市)

- ④ 佐波俊哉, 70MeV ヘリウム入射に対するフラグメント生成二重微分断面積の測定, 日本原子力学会 2013 秋の大会, 2013/9/3-9/6, 八戸工業大学(青森県、八戸市)
- ⑤ T.Sanami, Light mass fragment production DDXs of 70 MeV proton, helium and carbon induced reactions, 2013 核データ研究会, 2013/3/26-3/28, 福井大学 (福井県、敦賀市)
- ⑥ 佐波俊哉, 72MeV 炭素に対する Be, C, Al, Ti, C の核破砕片生成二重微分断面積の測定, 日本原子力学会 2013 春の年会, 2013/3/26-3/28, 近畿大学(大阪府、東大阪市)
- ⑦ T.Sanami, M.Hagiwara, Target mass dependency of light mass fragment energy spectra for intermediate energy proton induced reaction, International conference on nuclear data for science and technology, 2013/3/4-3/8 NewYork (US, NewYork)
- ⑧ 佐波俊哉, 低エネルギー炭素入射によるフラグメント生成二重微分断面積の測定, 日本原子力学会 2012 秋の年会, 2012/9/19-9/21, 広島大学(広島県、東広島市)
- ⑨ T.Sanami, Target dependency of light mass fragment production DDX for 6MeV/u carbon induced reaction, 2012 核データ研究会, 2012/11/15-16, 京都大学原子炉実験所(大阪府、熊取町)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐波 俊哉 (SANAMI Toshiya)
高エネルギー加速器研究機構・
放射線科学センター・教授
研究者番号：90321538