

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K21191

研究課題名(和文)重粒子入射軽フラグメント生成断面積測定のための検出器の開発

研究課題名(英文)Development of detector system for measurement of heavy ion incidence light fragment production double differential cross sections

研究代表者

梶本 剛 (Kajimoto, Tsuyoshi)

広島大学・工学研究院・助教

研究者番号：70633759

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：重粒子線治療において線量を付与する粒子は、重粒子だけでなく2次粒子もある。2次粒子の線量を評価するにはモンテカルロシミュレーションコードが有効である。その適用のためには実験値との比較が不可欠であるが、実験値が報告されていないのが現状である。そこで、重粒子入射軽フラグメント生成二重微分断面積を測定するための検出器を開発した。検出器は複数のシンチレータを縦列配置させたものである。粒子の飛行時間と発光量の関係から粒子を識別し、粒子エネルギーは飛行時間法を用いる。さらに、開発した検出器を用いて二重微分断面積を測定した。

研究成果の概要(英文)：In heavy ion radiotherapy, dose is given by not only heavy ions but also secondary particles produced by nuclear reaction between heavy ion and tissue nucleus. Monte Carlo simulation code is effective to evaluate the dose. The validation of calculation is required for the application. However, experimental values have not been reported. In this study, the detector system were developed to measure heavy ion incidence light fragment particle production double differential cross sections. The detector system consisted of scintillators arranged in a line. Particle identification and energy determination were performed with energy time of flight technique. We measured heavy ion incidence proton, deuteron, triton,  $^3\text{He}$ , alpha particle production double differential cross sections with the detector system.

研究分野：放射線計測

キーワード：軽フラグメント生成 重粒子 二重微分断面積

### 1. 研究開始当初の背景

近年、ガン治療において、重粒子線治療が飛躍的に実績を伸ばしている。現在も治療法の高度化が進められており、その一つに精度の高い線量計算法の開発が行われている。

これまでの線量計算法では重粒子のみの線量評価であった。しかし、生体物質との核反応で生成されるフラグメントも付加的な線量を与える。そのため新たに開発される線量計算法では、重粒子が生体中で核反応を起こして生成されるフラグメントによる被ばく線量が計算できることが望まれている。しかしながら、フラグメントの被ばく線量の計算には精度の高い核反応モデルが必要であるが、検証のための断面積測定値が不足しており、核反応モデルの精度検証は十分ではない。そのため、重粒子入射二次粒子生成の核データ整備が早急に求められている。

研究代表者を含む研究グループは、これまで、核反応モデルの精度検証のための中性子生成二重微断面積を測定してきた。これにより、中性子生成に関するデータの整備が進んでいる。その一方で、陽子生成の実験データは一件のみしか報告されていない。更に、陽子より重いフラグメントでは、生物効果が大きいにも関わらず実験データは皆無である。

### 2. 研究の目的

本研究では、重粒子入射軽フラグメント生成二重微断面積を測定するための検出器システムを開発する。陽子、重陽子、三重陽子、 $^3\text{He}$  と  $^4\text{He}$  を測定対象とし、一度の測定で多くの粒子の断面積データを測定する。求める性能は、粒子識別能が良いこと、エネルギーの決定が容易であること、数十から数百 MeV の広範なエネルギーを持つ軽フラグメント測定が可能であることである。開発した検出器システムを用いて二重微断面積を測定し、軽フラグメント生成の指標となる核データを提供する。また、核反応モデルの計算値と測定値を比較・検討を行う。

### 3. 研究の方法

エネルギー飛行時間法の適用が可能な検出器システムをシミュレーションコードによって開発する。検出器システムは薄いプラスチックシンチレータと厚いシンチレータが縦列に並び配置とした。シミュレーションコードにより、断面積測定時の標的・検出器間距離(飛行距離)と、無機シンチレータの種類と厚さを決定した。

放射線医学総合研究所の HIMAC で検出器システムの性能確認実験、陽子検出効率の測定、断面積の測定を実施した。性能確認実験では、検出器システムのエネルギー飛行時間法による粒子識別、粒子エネルギーの決定の可否を確認した。陽子測定効率は2種類のエネルギーについて測定した。断面積測定については、検出器の設置角度を変えて測定し、

軽フラグメント生成の角度依存性について言及できるデータを取得した。

### 4. 研究成果

図1に開発した検出器システムを示す。上流からアクティブコリメータ、薄いプラスチックシンチレータ、EJ-299-34 シンチレータ、BGO シンチレータ、BGO シンチレータ、ベトシンチレータの並びとした。各シンチレータの役割は、アクティブコリメータは停止せずに検出器横方向に逃げる粒子を弁別することで立体角の決定を容易にするため、薄いプラスチックシンチレータは荷電・非荷電粒子の弁別及び荷電粒子の原子番号識別をエネルギー飛行時間法を用いて実施するため、EJ-299-34 シンチレータは飛行時間法において時間基準となる即発線の弁別できること及び時間分解能が良いこと、BGO シンチレータは高エネルギーフラグメントの粒子種弁別ができるよう阻止能の大きいこと、ベトシンチレータは荷電粒子が BGO シンチレータを突き抜けた否かを確認するためである。EJ-299-34 と BGO シンチレータの厚さを 5 cm とし、断面積測定時の標的・検出器間距離を 2 m 程度とし、アクティブコリメータの穴径の 35 mm とした。シミュレーションコードを用いて計算した測定可能最大エネルギーは、陽子については 320 MeV であった。また、シミュレーションコードによって、エネルギー飛行時間法による粒子識別が可能であることを確認した。

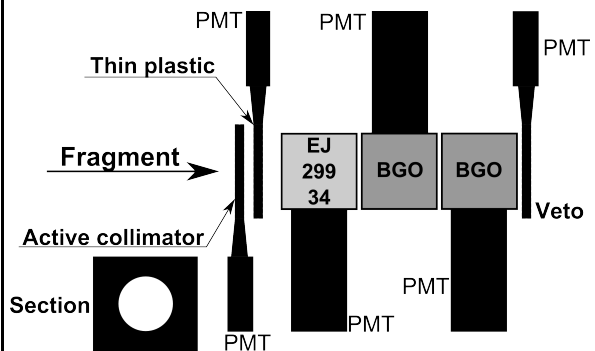


図1 検出器システムのシンチレータの並び

本研究において、粒子識別法が独創的であり、 $\Delta E \cdot E$  法を適用せず、検出器付与エネルギーと飛行時間の関係から粒子種の弁別およびエネルギーの決定ができる測定手法(エネルギー飛行時間法)を適用した。本手法の利点は、エネルギーを決定するための検出器の発光量校正をする必要がないことが挙げられる。開発した検出器システムにおいて、エネルギー飛行時間法の適用の可否を、実験により確認した。実験は放射線医学総合研究所の HIMAC で行った。炭素標的に 230 MeV/u の炭素を照射し、ビームラインから 15 度方向に設置された検出器システムでフラグメントを測定した。飛行時間法適用のため、標的の上流側にはビーム検出用のシンチレー

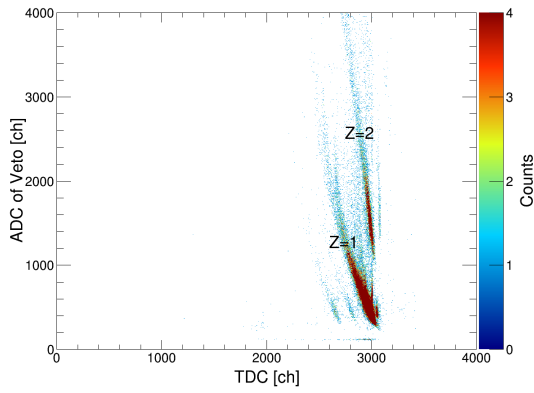


図 2 薄いシンチレータの飛行時間・発光量分布

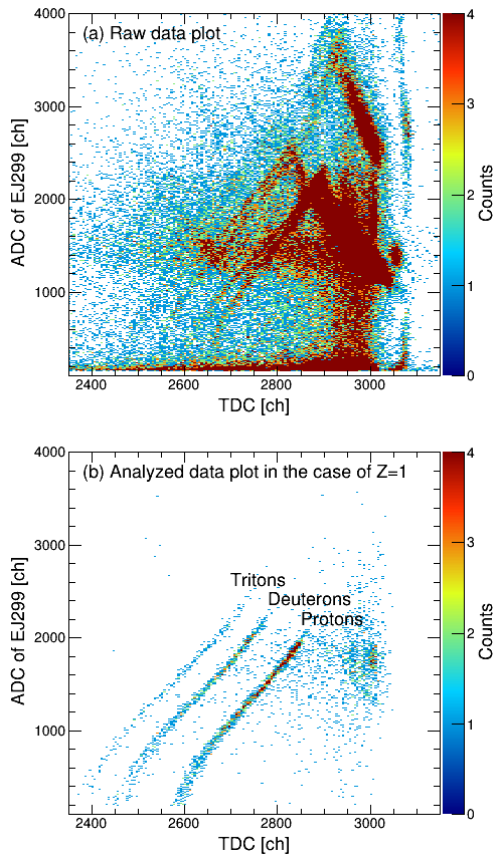


図 3 EJ299-34 の飛行時間・発光量分布。(a) は解析前、(b)は原子番号 Z=1 の場合の解析後

タを設置した。粒子識別の解析の流れは、アクティブコリメータの穴を通った事象の抽出、図 2 に示す薄いシンチレータの飛行時間・発光量分布から原子番号ごとに粒子を識別、EJ299-34 または BGO シンチレータの下流側のシンチレータでの発光量分布からシンチレータを突き抜ける事象の弁別、EJ299-34 または BGO シンチレータの飛行時間・発光量分布から質量数ごとに粒子を識別する。一例として図 3 に EJ299-34 の飛行時間・発光量分布を示す。重複なく粒子識別できることが確認された。一方で、飛行時間

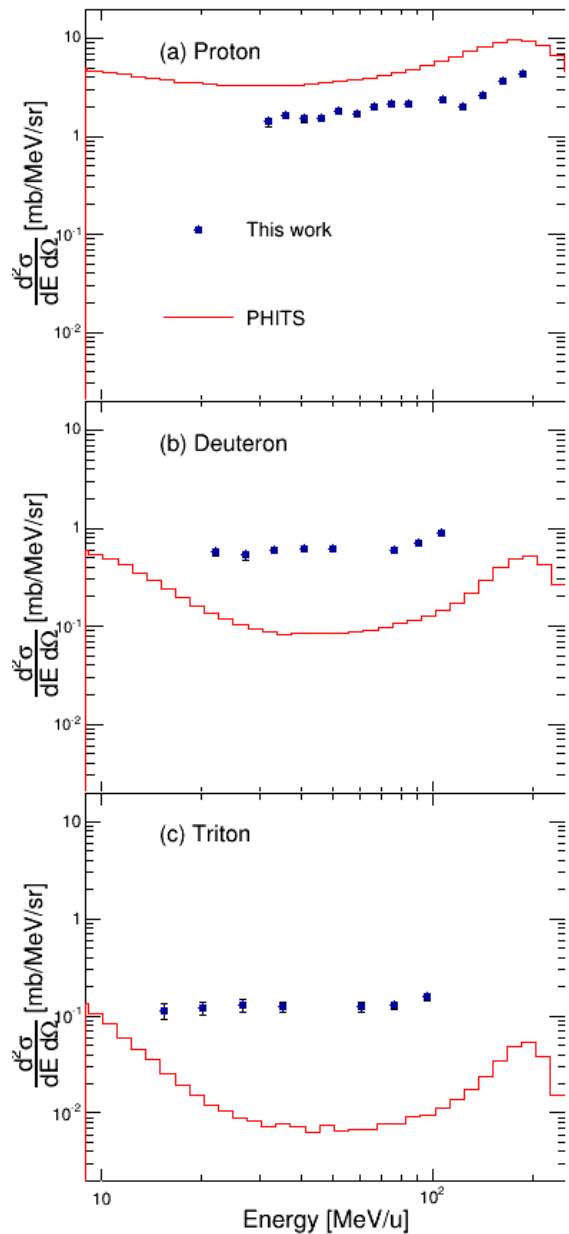


図 4 炭素標的における 230 MeV/u 炭素入射陽子(a)、二重陽子(b)、三重陽子(c)生成二重微分断面積。角度は 15 度

法によるエネルギーの決定のために標的に生成される即発  $\gamma$  線事象を時間基準とした。EJ299-34 は波形弁別法によって中性子と  $\gamma$  線の弁別が可能であることから、 $\gamma$  線事象を抽出することで、時間基準を得た。大気下での実験より、飛行中のフラグメントのエネルギー減衰を考慮することで飛行時間を導出し、エネルギーを決定した。

断面積を測定する上で粒子の検出効率が必要となる。シミュレーションコードによる計算で求められる検出効率を使用するために、実験によりその精度確認を実施した。検出器システムに加速器からの陽子ビームを当てることで、陽子検出効率を測定し、シミュレーションコードの計算値と比較した。実験は先と同様に HIMAC で実施された。135 および 180 MeV 陽子ビームを使用した。解

析した結果、135 MeV 陽子については、実験値 84.4%、計算値 83.9%、180 MeV 陽子では、実験値 76.6%、計算値 76.8%となり、入射エネルギーに関わらず良い一致を示した。

開発した検出器を用いて HIMAC で重粒子入射軽フラグメント生成二重微分断面積の測定を行った。一例として、図 4 に炭素標的における 230 MeV/u 炭素入射陽子、二重陽子、三重陽子生成二重微分断面積を示す。測定角度は 15 度である。比較のため、シミュレーションコード(PHITS)の計算値も併せて示す。陽子については PHITS が実験値より 2 倍程度大きいのに対し、二重陽子、三重陽子について、PHITS は実験値より小さく、最大で一桁程度小さい。質量数が大きくなるほど、差異は大きくなっており、PHITS に組み込まれた物理モデル JQMD は、核子生成は比較的良いが、核子より重い粒子については問題があることが窺える。断面積の形、特に三重陽子について、実験値は低エネルギー側に蒸発過程による盛り上がりが見測されていないのに対し、計算値は観測されている。つまり、実験値は前平衡過程による成分が大きく、蒸発過程が相対的に埋もれていることから、JQMD で生成される粒子が少ないことが推測される。

## 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 0 件)

[学会発表](計 2 件)

1. 梶本 剛, 宇宙線起源  $\mu$  粒子の測定による有機液体シンチレータの校正点取得, 第 31 回放射線検出器とその応用, 20170123, 茨城県つくば市.
2. 由井 友樹, 230 MeV/u 炭素入射炭素標的陽子・重陽子・三重陽子生成二重微分断面積の測定, 日本原子力学会 2016 年秋の大会, 20160907, 福岡県久留米市.

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

梶本 剛 (KAJIMOTO TSUYOSHI)

広島大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：70633759