

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25年5月15日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360406

研究課題名（和文） 重粒子線治療の二次被ばく線量評価に向けた中性子・ガンマ線断面積の研究

研究課題名（英文） Study of double-differential cross sections of neutron and gamma-ray productions for heavy-ion therapy

研究代表者

魚住 裕介 (UOZUMI YUSUKE)

九州大学・工学研究院・エネルギー量子工学部門・准教授

研究者番号：00232801

研究成果の概要（和文）：

重粒子線ガン治療では、中性子による二次被ばく線量の予測が喫緊の課題であり、シミュレーションコード開発に用いられる中性子およびガンマ線の生成断面積データが必要となっている。本研究では、生物学的効果が大きな1 MeV 領域を含む0.1 MeV～500 MeV までの二重微分断面積を決定している。実験では、ビームとして290 MeV/u、100 MeV/u の炭素イオン等を使用して測定を行い、各種ターゲットに対する中性子とガンマ線の二重微分断面積データを取得することができた。

研究成果の概要（英文）：

In the heavy-ion radiotherapy, secondary neutrons are produced by nuclear reactions along the primary beam. The risk of second cancer induction is under considerable discussion. To develop a simulation tool to estimate neutron doses, cross section data must be accumulated. In the present work, we conducted experiments, and measured energy-angle double-differential cross sections of neutron and γ -ray productions by using C-ion beams of 290 MeV/u and 100 MeV/u.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2011年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2012年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	10,900,000	3,270,000	14,170,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学原子力学

キーワード：核データ、粒子線ガン治療、二重微分断面積、中性子、ガンマ線、シンチレータ

1. 研究開始当初の背景

炭素等の重粒子ビームを用いたガン治療は、高いQOL(Quality of Life)と大きな治療効果のため、陽子線治療と同様大きな期待が

寄せられている。重粒子が患者の体内で核反応を起こすと、フラグメンテーションにより中性子が発生する。中性子は生物学的効果が大きく潜在的ガン誘発確率が高いため、治療

計画が精密化した現在、二次被ばくの線量の見積もりを計画に反映させる事が必要な状況となっている。文献1 (D.J. Brenner and E.J. Hall, *Radiotherapy and Oncology*, vol. 86 (2008) 165) は、陽子線治療における二次中性子線量測定研究についてレビューしたものである。強いガンマ線が混在する狭隘な部屋で線量計を使用して測定する場合、実験条件・環境の影響は極めて大きく、報告されている測定値の間には最大二桁の矛盾が見られるため、シミュレーション計算による中性子線量予測が必要と結論している。

重イオンによる治療に関わる線量評価には、PHITSなどの粒子輸送コードが利用されている。これらの粒子輸送コードの精度は、コード内で使用されている原子核反応モデルに依存している。原子核反応モデルの精度検証方法の一つとして、生成粒子のエネルギー分布と角度分布を表す二重微分断面積(DDX)の再現性を実験値と比較する方法がある。

検証には断面積データが不可欠であるが、重粒子核反応に関する断面積測定は主として遮蔽計算を目的としており、生体構成元素である窒素や酸素に関するデータはほとんど無い。さらに、5 MeV 以下の低エネルギー中性子はガンマ線との弁別が技術的に困難なため、生物学的効果が最大となる1 MeV 付近のデータは存在しない。ガンマ線弁別を強化した検出器を開発して、低エネルギーから高エネルギーまでの中性子スペクトルを測定し、二重微分断面積を決定・整備することが極めて重要となっている。

一方ガンマ線は、生物学的効果は小さいが核反応からの収量が比較的大きいと考えられる。ガンマ線は、実験では中性子測定の際同時に測定されるが通常解析されずに

捨てられるため、その生成断面積データも全く不十分であり、データ収集が望まれている。

患者への線量評価と治療施設の放射線安全設計の高精度化のためには、従来測定されてきた中性子に加えてガンマ線発生機構の精度検証も重要となってくる。

2. 研究の目的

重粒子線ガン治療では、中性子による二次被ばく線量の予測が喫緊の課題となっており、シミュレーション計算による線量予測が必要となっている。本研究では広いダイナミックレンジを有する測定法を開発し、生物学的効果が大きな1 MeVの領域を含む0.1 MeVから数百 MeV までの二重微分断面積データを決定する。エネルギーが290 MeV/u および100 MeV/u の炭素イオンと酸素イオンをビームとして用い、ターゲットとして生体元素である炭素、窒素、酸素に入射した際に生成される中性子と同時に検出されるガンマ線についても断面積を決定し、モデル計算の検証を行うと共に医療用核データとして整備する。さらに、水ファントムをターゲットとして使用して、中性子輸送計算の検証も行う。

3. 研究の方法

実験は、放射線医学総合研究所重粒子加速器施設 (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba, HIMAC) の物理・汎用照射室 PH2 ビームコースで行った。実験体系を図1に示す。入射粒子にはエネルギーが290 MeV/u の炭素と酸素イオンを使用した。実験中の粒子数はプラスチック製ビームピックアップ検出器でそれぞれの入射イオンを独立に検出できるように 3×10^5 particle per seconds (pps) 程度とした。

ターゲットには炭素等の固体板を使用した。入射重イオンビームはターゲット直前に設置したビームピックアップ検出器を通過させる。この検出器で通過した炭素イオン数を入射イオン数として計測した。

検出器には直径と長さが 127 mm の NE213 有機液体シンチレータを使用した。これは、中性子生成 DDX 測定に一般的な検出器であるが、ガンマ線 DDX データも同時に取得できる。炭素ターゲットからはガンマ線や中性子の他に荷電粒子が生成される。このうち荷電粒子を識別するためにそれぞれの NE213 シンチレータの前にプラスチックシンチレータを設置した。測定角度は 15°、30°、45°、60°、75°、90° の 6 方向とした。ターゲットから検出器までの距離は測定回路系の不感時間と測定時間の関係で測定角度によって、2.5 m から 4.0 m までとした。

実験室環境はターゲットを通過した重イオンビームを止めるためのビームダンプからのバックグラウンド放射線が高いため、ビームダンプと検出器の間に鉄とコンクリートとからなるシールドを設置し、バックグラウンド放射線の検出器への混入を低減した。

ターゲットからの直達粒子以外の影響を除去するために、ターゲットと NE213 シンチレータの間に鉄製のシャドーバーを設置し、直達粒子以外の寄与を測定した。

検出器からの信号は、NIM モジュール群を使って整形し、ターゲットで生成された粒子の飛行時間と発光量の情報を CAMAC モジュールでデジタル量に変換した上で PC に保存し、実験終了後にデータ解析を行った。

NE213 シンチレータの信号発生時刻スペクトルにはガンマ線以外に中性子や荷電粒子により発光したイベントも含まれている。炭素ターゲットから放出されるガンマ線は重

イオンビームがターゲット原子核と衝突後ある決まった時刻に生成されるため時間スペクトルではシャープなピークを形成する。一方、中性子は飛行時間によって広く分布する。

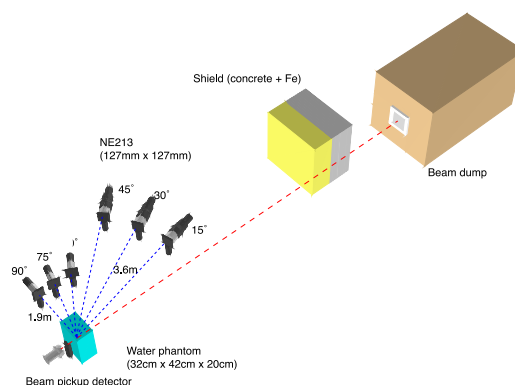


図 1 検出器等の配置図。

荷電粒子イベントは、NE213 シンチレータの前に付けたプラスチックシンチレータの発光量データにより分離した。

ガンマ線イベントは、シンチレーション光の減衰時間が中性子とガンマ線で異なることを利用して中性子イベントと分離できる。図 2 に荷電粒子イベント除去後のイベントに対してガンマ線と中性子イベントを分離している様子を示す。

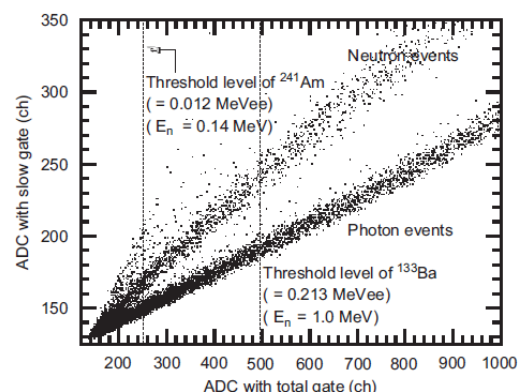


図 2 中性子とガンマ線の分離。

ビームピックアップ検出器の発光量スペクトルから、測定ゲート時間である 400 ns 程度の非常に短い時間に 2 個以上の重イオンが検出器を通過している場合がある。このような事象は除去してデータを解析した。

ガンマ線のエネルギースペクトルは、既知のガンマ線エネルギーにより NE213 シンチレータの発光量スペクトルを校正した後、FORIST コードによりアンフォールディングすることにより求めた。この際に必要となる種々のエネルギーのガンマ線に対するシンチレータの応答関数は EGS5 コードにより求めた。

中性子検出効率は、SCINFUL-QMD コードの計算結果を用いた。SCINFUL-QMD コードでは、検出器中での核反応を考慮し、シンチレーション出力を電子等価単位で与える事が出来る。設定した検出しきいエネルギー以上で検出効率を決定する。検出しきいエネルギーは、 ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{60}Co , $^{241}\text{AmBe}$ の各標準ガンマ線源からのガンマ線に対するコンプトン端とした。電子等価単位 (MeVee) への変換は Dietze-Klein の方法を使用した。

4. 研究成果

本研究では、現在まで 290 MeV/u の炭素ビームと酸素ビーム、100 MeV/u の炭素ビームを用いた測定を行ってきた。炭素ビームでは、ターゲットとして炭素、窒化アルミニウム、酸化アルミニウム、アルミニウムを用いて、290 MeV/u と 100 MeV/u とで、炭素、窒素、酸素に対する DDX を決定した。290 MeV/u 炭素では、水ファントムに対して中性子フラックス測定も行った。酸素ビームでは、炭素ターゲットに対して DDX を決定した。

結果の例を図 3 と 4 に示す。それぞれ、290MeV/u C+C および 290MeV/u O+C からの中性子 DDX である。図 4 では、0.6MeV まで測定

できていることが分かる。

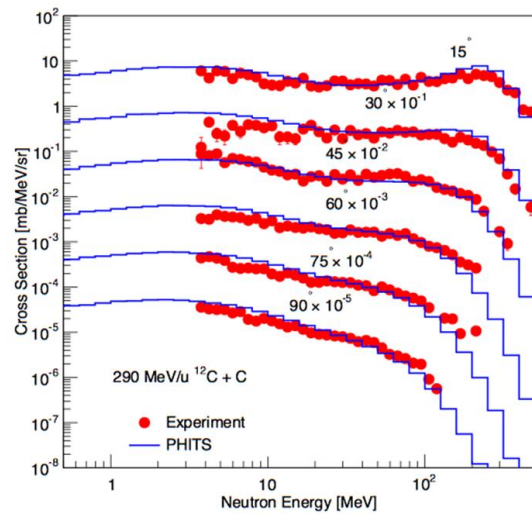


図 3 290MeV/u C+C 中性子 DDX。

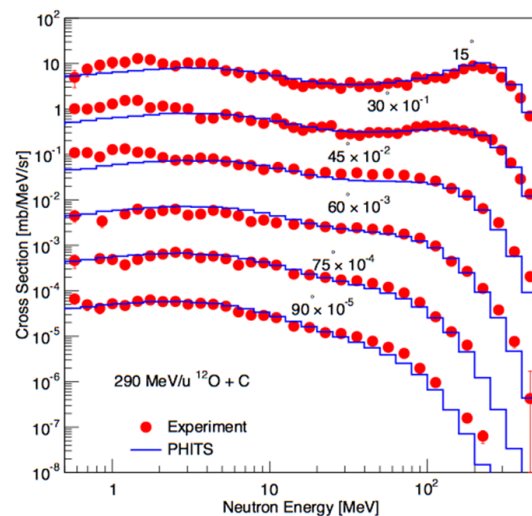


図 4 290MeV/u O+C 中性子 DDX。

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 10 件)
 (1) H. Uehara, N. Shigyo (7 番目), Y. Uozumi (8 番目), D. Satoh (9 番目), T. Sanami (10 番目), Y. Koba, M. Takada, N. Matsufuji, 他 5 名, Measurement of Gamma-ray-Production Double-

Differential Cross Section for 290 MeV/u Oxygen Ion Incidence, Proceedings of the 2011 Symposium on Nuclear Data, JAEA- Conf 2012-001 (査読有), 6, 2012

- (2) D. Satoh, N. Shigyo (5 番目), Y. Uozumi (8 番目), T. Sanami (9 番目), Y. Koba, M. Takada, N. Matsufuji 他 5 名, Measurement of neutron-production double-differential cross-sections on carbon bombarded with 290-MeV/nucleon carbon and oxygen ions, Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A, (査読有) 644, 59-67, 2011. DOI: 10.1016/j.nima.2011.04.054

[学会発表] (計 10 件)

- (1) N. Shigyo, Y. Uozumi, H. Uehara, T. Nishizawa, T. Mizuno, M. Takamiya, T. Hashiguchi, D. Satoh, T. Sanami, T. Kajimoto, Y. Koba, M. Takada, N. Matsufuji: Measurement of 100- and 290-MeV/u Carbon Incident Neutron Production Cross Sections for Carbon, Nitrogen and Oxygen, International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND2013), New York, USA, 2013 年 3 月 7 日
- (2) N. Shigyo, Y. Uozumi, H. Uehara, T. Nishizawa, K. Hirabayashi, D. Satoh, T. Sanami, Y. Koba, M. Takada, N. Matsufuji: Measurement of Neutron Yields from A Water Phantom Bombarded by 290 MeV/u Carbon Ions, 12th International Conference on Radiation Shielding (ICRS-12), 奈良, 2012 年 9 月 3 日
- (3) 上原春彦, 執行信寛 (7 番目), 魚住裕介 (8 番目), 佐藤大樹 (9 番目), 佐波俊哉 (10 番目), 古場裕介, 高田真志, 松藤成弘, 他 5 名, 290MeV/u 酸素イオン入射ガンマ線生成断面積測定, 2011 Symposium on Nuclear Data, 東海村, 2011 年 11 月 16 日

[その他]

ホームページ等

和文

<http://meteor.nucl.kyushu-u.ac.jp/home/ja/nirs>

<http://nsed.jaea.go.jp/ers/radiation/rpro/index.htm>

英文

<http://nsed.jaea.go.jp/ers/radiation/en/rpro/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

魚住 裕介 (UOZUMI YUSUKE)
九州大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：00232801

(2) 連携研究者

執行 信寛 (SHIGYO NOBUHIRO)
九州大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：40304836

(3) 連携研究者

遠藤 章 (ENDO AKIRA)
日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学
研究部門・ユニット長
研究者番号：10354705

(4) 連携研究者

佐藤 大樹 (SATO DAIKI)
日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学
研究部門・研究員
研究者番号：00370403

(5) 連携研究者

佐波 俊哉 (SANAMI TOSHIYA)
高エネルギー加速器研究機構・共通基盤研
究施設・放射線科学センター・准教授
研究者番号：90321538