

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23791419

研究課題名(和文)医療用粒子線による放射化に対する高精度シミュレーション計算の開発

研究課題名(英文)Refinement of calculation model for activation induced by medical particle beams

研究代表者

高階 正彰(Takashina, Masaaki)

大阪大学・医学(系)研究科(研究院)・特任助教(常勤)

研究者番号：10392010

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：粒子線治療において粒子線が患者体内や装置内の原子核と反応して2次中性子が発生したり、放射化が起こる。それをシミュレートする核反応模型について、従来使用されているもの(QMD)よりも理論的正当性が高い模型(AMD)を用いてシミュレーションの高精度化が可能かどうかを調べた。結果、実験データが存在する反応のほとんどに関してはAMDとQMDは同程度の精度を持っていることが分かった。ただし、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ の反応における中性子生成断面積はAMDの方がよいと考えられる結果が得られた。今後は中性子遮蔽計算に必要な、軽い重イオンどうしの中性子生成反応に絞って計算データベースを作る方針である。

研究成果の概要(英文)：During particle therapy, radionuclides are produced in patient bodies and equipment. As the nuclear reaction model, QMD (Quantum Molecular Dynamics) has been frequently used. On the other hand, AMD (Antisymmetrized Molecular Dynamics) has theoretical validity than QMD, although it is seldom adopted. In the present study, we investigate whether AMD can give accurate cross sections in particle simulation. As the result, we found that AMD gives comparable results with QMD in the most cases where experimental data exist. However, in the case of neutron production cross section of $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ reaction, AMD is found to give better results. Therefore, we will make calculation database concentrating on neutron production cross section for light heavy-ions, which is necessary for neutron shield calculations.

研究分野：医学物理

キーワード：核反応モデル 放射化 粒子線治療

1. 研究開始当初の背景

粒子線治療の際、患者体内、および治療装置内の原子核と入射した粒子線（原子核）が核反応を起こし、2 次中性子が発生したり、放射化核種が生成される。これを例えばオンライン PET に利用することを考える際や、放射線防護の観点から、治療用ビームで誘発される現象を理解しておくことは重要である。そのためには測定だけでなくシミュレーションも不可欠となる。量子分子動力学（QMD）は粒子線シミュレーションの際の核反応モデルとしてよく用いられるが、実験データを広い範囲で再現できているわけではない。一方で、反対称化分子動力学（AMD）は、核子の統計的性質を正しく取り入れており、QMD よりも理論的正当性が高い。しかし計算量が多いため計算時間がかかり、粒子線シミュレーションにはほとんど用いられてこなかった。

2. 研究の目的

AMD を使用することにより、QMD を使用する場合よりも精度のよい粒子線シミュレーションが行える可能性があるかどうかを調べた。また粒子線シミュレーションに用いる際の時間短縮のための方法を検討した。

3. 研究の方法

AMD の計算は小野が作成したコード [1] を使用して行った。QMD の計算は汎用粒子輸送モンテカルロシミュレーションコード PHITS [2] を用いて行った。AMD、QMD は核反応の動的過程までを記述する。反応の結果生成された破砕片はほとんどが励起状態にあり、その状態からの崩壊は蒸発模型計算コード GEM [3] を用いて行われた。QMD 計算後の GEM 計算は PHITS コードで一連の流れの中で行われた。AMD 計算後の GEM 計算は、PHITS 内で使用されているコードと同じものを使用して行った。

本研究では、粒子線治療でよく使用される陽子、炭素を入射核とし、核子当たりのエネルギー 20 MeV から 400 MeV の反応を調べた。標的核としては人体内に存在する典型的な原子核 ^{12}C 、 ^{16}O 、 ^{40}Ca とした。計算結果を、現存する実験データと比較した。

4. 研究成果

陽子入射反応においては、AMDがQMDと比べて若干良いところもあるものの、全体として両者の精度はほぼ同じであるという結果が得られた。

炭素入射反応の場合の結果の例を図1に示す。図1は $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応で、入射エネルギーが核子当たり290MeVの時に、様々な破砕片を生成する断面積を示している。菱形がAMDの結果、三角がQMDの結果であり、黒丸が実験データ [4] である。実験データが存在するのは ^7Be 、 ^{11}C 、 n のみである。この図が示すように、現存するデータとの比較を行う限りにおいては、

ほとんどの場合でAMDとQMDは同程度の精度を持っていることが分かった。ただし、中性子生成断面積の場合はAMDの方が良い精度を持っていると考えられる。これは、核子当たり400MeVの入射エネルギーの場合でも同様の結果が得られている。

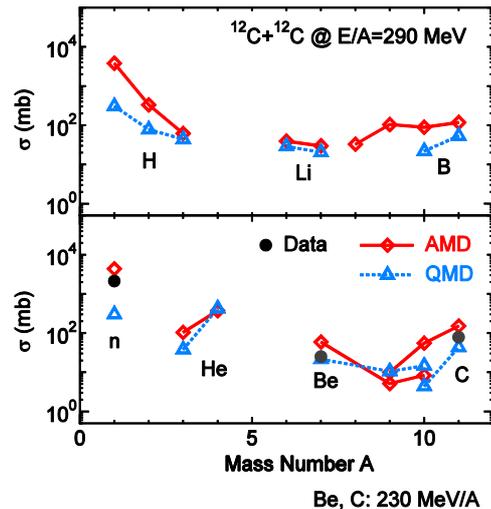


図1. 核子当たり 290 MeV の入射エネルギーの $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応において、様々な破砕片を生成する断面積。 ^7Be 、 ^{11}C の実験データは核子当たりのエネルギーが 230MeV のものの。

以上の結果から、当初は計算可能なすべての反応の断面積のデータベース化を予定していたが、今後は重イオン入射反応における中性子生成反応に焦点を絞り、計算結果のデータベース化を行っていくことを計画している。粒子線治療施設などにおいて、中性子の遮蔽計算は重要であり、高い精度が求められるため、十分意義のあることであると考えている。

理論的な観点からいうと、より重い標的核では AMD の有利性が強調されるはずなので、 ^{40}Ca を標的核とした核子当たりの入射エネルギー 100MeV でも計算を行っている。軽い破砕片の生成断面積では AMD と QMD の結果は同様の傾向を示したが（中性子以外）、重い破砕片では顕著な違いがみられた。 $^{12}\text{C}+^{40}\text{Ca}$ の実験データは現在のところ存在していないため、 ^{12}C 、 ^{16}O を標的とした場合も含めて、様々な入射エネルギー、様々な反応チャネルで系統的な研究が強く望まれる。

<参考文献>

- [1] A. Ono et al., Phys. Rev. Lett. 68 (1992) 2898.
- [2] T. Sato et al., J. Nucl. Sci. Technol. 50 (2013) 913.

[3] S. Furihata, Nucl. Instr. Meth. B 171 (2000) 251.

[4] H. Yashima et al., Rad. Ac. 91 (2003) 689.

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. Takashina, M. Suga, M. Oda, T. Horaguchi, H. Toki, K. Niita, "Monte Carlo Simulation Concerning Particle Therapy", 素粒子論研究 Vol. 10, No. 2 (2010) pp.6-8

(2) 櫻井勇介, 「陽子線照射における放射化シミュレーションの高精度化の検討-反対称化分子動力学(AMD)モデルの適用-」、大阪大学医学部保健学科卒業論文 (2012) pp.1-26

(3) Y. Sakurai, M. Takashina, M. Matsumoto, A. Ono, "Improving the Monte Carlo simulation accuracy for radioactivation in proton therapy with anti-symmetrized molecular dynamics", 医学物理33 (2013) p.119

(4) M. Takashina, Y. Sakurai, K. Fukunaga, M. Matsumoto, M. Koizumi, A. Ono, "Refinement of radionuclide generation simulation using Antisymmetrized Molecular Dynamics (AMD)", 医学物理34 (2014) p.67

(5) 福永康太, 「反対称化分子動力学(AMD)による炭素線照射シミュレーションの精度向上の検討」大阪大学医学部保健学科卒業論文 (2013) pp.1-21

[学会発表](計 19件)

(1) 高階 正彰, 「粒子線治療における体内の放射化シミュレーション」、第101回日本医学物理学学会学術大会、2011年5月9日 - 20日、Web 開催

(2) 高階 正彰, 「粒子線治療にかかわるシミュレーション計算」、RCNP研究会「RCNPでの核データ研究戦略検討」、2011年6月28日、大阪大学RCNP

(3) 高階 正彰, 「粒子線治療に関連するシミュレーション計算」、基研研究会「微視的核反応理論による物理」、2011年8月1日、京

都大学基礎物理学研究所

(4) 高階 正彰, 「粒子線がん治療に関連したモンテカルロシミュレーション計算」、日本物理学会 大阪支部講演会、2011年12月15日、大阪市立大学理学研究科

(5) M. Takashina, "Monte Carlo Simulations concerning Particle Therapy", Osaka Univ. - Indiana Univ. scientific and clinical symposium, 2011年5月25日、米国・インディアナ大学

(6) M. Takashina, "Monte Carlo Simulations concerning Particle Therapy", Osaka - Groningen seminar on Medical Physics, 2011年6月31日、オランダ・ Groningen

(7) M. Takashina, "Monte Carlo Simulations concerning Particle Therapy", 7th Osaka Medical Physics Seminar, 2011年12月7日、大阪大学RCNP

(8) 高階 正彰, 「医療における粒子線シミュレーションと原子核反応」、理研ミニワークショップ「不安定核ビーム実験データベースの開発と利用」、2012年11月28日、理化学研究所

(9) 高階 正彰, 「医療におけるPHITSを用いた粒子線シミュレーション」、RCNP研究会「RCNP加速器増強と核破砕反応中性子利用」、2012年9月28日 - 29日、大阪大学RCNP

(10) M. Takashina, M. Suga, T. Horaguchi, H. Toki, K. Niita, "Residual radioactivity in proton cancer therapy", 51st Annual meeting of Particle Therapy Co-Operative Group, 2012年5月17日 - 19日、韓国Coex

(11) 櫻井 勇介, 「陽子線照射における放射化シミュレーションの高精度化の検討-反対称化分子動力学(AMD)モデルの適用-」大阪大学医学部保健学科 平成24年度「特別研究」発表会、2012年11月22日、大阪大学医学部保健学科

(12) Y. Sakurai, M. Takashina, M. Matsumoto, A. Ono, "Improving the Monte Carlo simulation accuracy for radioactivation in proton therapy with anti-symmetrized molecular dynamics", 第106回日本医学物理学学会学術大会、2013年9月17日 - 18日、大阪大学コンベンションセンタ

—

(13) Y. Sakurai, M. Takashina, M. Matsumoto, A. Ono, "Improving the Monte Carlo simulation accuracy for radioactivation in proton therapy with anti-symmetrized molecular dynamics", The international conference on medical physics, 2013年9月1日 - 4日、Brighton International Center, UK

(14) 福永 康太、「反対称化分子動力学 (AMD) による炭素線照射シミュレーションの精度向上の検討」、大阪大学医学部保健学科 平成 25 年度「特別研究」発表会、2013 年 11 月 22 日、大阪大学医学部保健学科

(15) M. Takashina, Y. Sakurai, K. Fukunaga, M. Matsumoto, M. Koizumi, A. Ono, "Refinement of radionuclide generation simulation using Antisymmetrized Molecular Dynamics (AMD)", 第107回日本医学物理学会学術大会、2014年4月10日 - 13日、パシフィコ横浜

(16) M. Takashina, "Particle simulation studies in JSPS core-to-core program", OSAKA, INDIANA, GRONINGEN symposium on Medical Physics, 2014年8月25日 - 26日、オランダ・ Groningen

(17) M. Takashina, "Particle simulation studies at Osaka University", University of Minnesota, The University of Tokyo, Osaka University Scientific Symposium, 2014年7月25日、米国・ミネソタ大学

(18) M. Takashina, Y. Sakurai, M. Matsumoto, M. Koizumi, A. Ono, "Simulation of radionuclide generation using Antisymmetrized Molecular Dynamics (AMD)", 54th Annual Conference of the Particle Therapy Co-Operative Group (PTCOG), 2015 年 5 月 21 日 - 23 日、米国・サンディエゴ

(19) M. Takashina, Y. Sakurai, K. Fukunaga, M. Matsumoto, M. Koizumi, A. Ono, "Accuracy of radionuclide generation simulation using Antisymmetrized Molecular Dynamics (AMD)", World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, 2015年6月7日 - 11日、カナダ・トロント

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高階 正彰 (TAKASHINA Masaaki)
大阪大学大学院・医学系研究科・特任助教
(常勤)
研究者番号：10392010

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：