

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：82110

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24860072

研究課題名(和文) 中高エネルギー重粒子の核破砕片生成反応断面積の測定とエネルギー依存性評価

研究課題名(英文) Measurement and evaluation of fragmentation cross-sections of intermediate energy heavy ions

研究代表者

小川 達彦 (Ogawa, Tatsuhiko)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究センター・博士研究員

研究者番号：20632847

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：重粒子線治療・宇宙線で重要な10～1000 MeV/u領域で、重要元素(炭素,酸素等)の核破砕片生成反応断面積のエネルギー依存性を測定した。特に重いターゲットの例としてPb(C,x)反応と、軽いターゲットの例としてC(C,x), C(Al,x)反応で生成する破砕片の生成断面積をエネルギーの関数として明らかにした。また、その測定を行うための画期的測定法を開発することに加え、測定された断面積を基に放射線輸送計算コードPHITSの反応モデル改良を行った。PHITSの反応モデルのうち、統計マルチフラグメンテーションモデルと量子分子動力学モデル改良版を本研究を通じて実装した。

研究成果の概要(英文)：Fragmentation cross-sections in the energy range from 10 to 1000 MeV/u of nuclei important for heavy ion therapy and manned space missions were measured. The cross-sections were measured in Pb(C,x), C(C,x) and C(Al,x) reactions as functions of reaction energy. In this study, novel methods to measure these cross-sections were developed and the measured cross-sections were used to benchmark radiation transport simulation code PHITS to improve its reaction models. The statistical multi-fragmentation model and revised quantum molecular dynamics model were implemented in this study.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：原子力学

キーワード：重イオン 核反応 断面積 シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

重粒子線治療場や宇宙では数 100MeV/u の運動エネルギーを持つ重イオンが核破砕片生成反応を起こし、被ばくに影響することが知られている。重イオンは人体などの物体中でエネルギーを失いながら運動するため、重イオンによる被ばく線量はエネルギーに依存する。また Bethe-Bloch の式が示すように、イオンによる被ばく(エネルギー沈着)は生成核の電荷と質量に依存する。一方、これまでの断面積測定実験では加速器を線源に用いるためエネルギーの変更は難しく、また従前の測定法の殆どは電荷か質量の片方にしか感度がないため断面積のエネルギー・生成核の電荷・質量依存性の測定値は殆どなかった。

また、重粒子による核破砕片生成の研究によると、シミュレーション値は実験値と3倍程度も乖離することが報告されていた。それを解決するためには核破砕片生成反応断面積の測定と、それに基づくシミュレーターの改善が必要であった。

2. 研究の目的

重粒子線治療場や宇宙で起こる数 100MeV/u のイオンによる被ばくの高精度な予測のため、その核破砕片生成反応断面積を測定、シミュレーションにより再現できるようにすることを本研究の目的とした。

核破砕片生成反応断面積の測定は、 $^{12}\text{C}(\text{NatC}, x)$, $^{12}\text{C}(\text{Al}, x)$, $^{16}\text{O}(\text{Al}, x)$, $^{\text{Nat}}\text{Pb}(\text{C}, x)$ 反応について行う。炭素、酸素は人体構成元素として、アルミ、鉛は遮蔽材料として重要である。さらに、得られた断面積との比較により、放射線輸送計算シミュレーションコードのベンチマークを行い、それに基づくコードの改善を行う。

3. 研究の方法

平成 24 年度は、以下の 3 点を行った。

測定システムの開発：測定器(シンチレータ、HPGe 半導体検出器など)を信号処理回路に接続し、測定対象とする核破砕片を測定するシステムを完成させる。

$^{\text{Nat}}\text{Pb}(\text{C}, x)$ 反応の測定：鉛ターゲットに対する 400MeV/u 炭素イオンの照射を行い、後述の測定法 1 で断面積を測定する。

$^{12}\text{C}(\text{NatC}, x)$ 反応の測定：炭素ターゲットに対する 400MeV/u 炭素イオンの照射を行い、後述の測定法 2 で断面積を測定する。

さらに平成 25 年度には、以下の 2 点を行った。

$^{12}\text{C}(\text{Al}, x)$, $^{16}\text{O}(\text{Al}, x)$ 反応の測定：アルミターゲットや酸素ビームを用いた照射を行い、測定法 2 で断面積を測定する。

シミュレーションコード開発へのフィードバック：上記の実験をコード(PHITS)の計算値と比較し、コードのベンチマークを行う。その結果を基にコードの改善点を究明する。

本研究で用いた断面積の測定法は以下の二通りである。それぞれの概念図を図 1,2 に示した。

・測定法 1 (重核フラグメンテーション用) 炭素イオンを(厚い鉛板の積層)ターゲットに照射し、ターゲット中に生成した鉛の核破砕片をガンマスペクトロメトリーで測ることによって核破砕片生成断面積を測定する。入射重イオンはエネルギーを失いながらターゲット中を進んで鉛を破砕し、鉛の核破砕片は生成した場所に残るため、核破砕片の位置は反応時のエネルギーと対応する。また、質量数が小さい核破砕片ほど入射重粒子によって生成し中性子などの寄与は小さい。したがって、ターゲット内の各深度で、ある程度軽い核種を計測することで、核破砕片生成断面積を得られる。

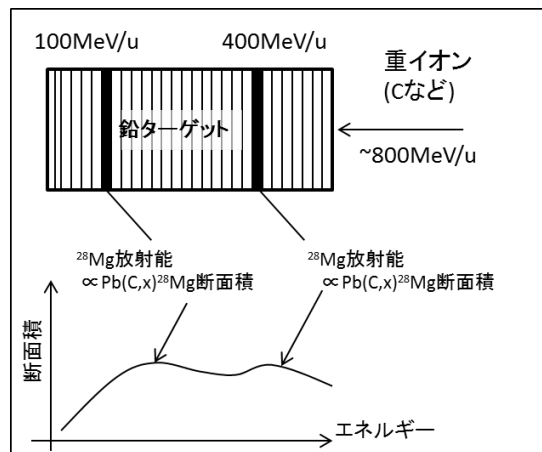


図 1、測定法 1 の概念図。実際に行った $^{\text{Nat}}\text{Pb}(\text{C}, x)$ 反応の断面積測定の例。

・測定法 2 (軽核フラグメンテーション用) 炭素や酸素など重イオンを厚い炭素ターゲットに照射すると、入射重イオンは様々なエネルギーで反応する。生成した破砕片の原子番号・質量数は、シンチレータを通る際の信号強度から決定できる。反応のエネルギーはターゲット後方での運動エネルギーに影響し、運動エネルギーは離れたところに置いたシンチレータ 2 台の信号の時間差から決定できる(TOF 法)。こうして運動エネルギーを

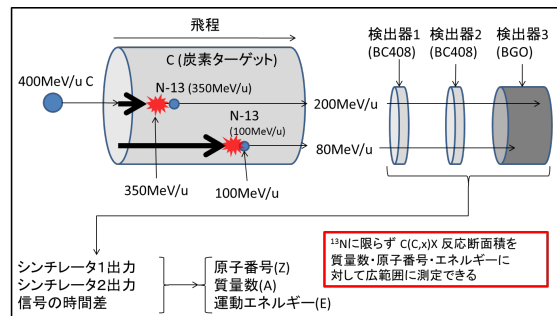


図 1、測定法 2 の概念図。 $^{12}\text{C}(\text{NatC}, x)$ 反応断面積測定 (<400MeV/u) の例。

生成核種(質量数・原子番号)ごとに測ること
で、核破砕片生成反応断面積をエネルギーの
関数として得られる。

4. 研究成果

(1) 重核のフラグメンテーション

$^{238}\text{Pu}(C, x)$ 反応の断面積測定により、計 32
核種の生成反応断面積を測定することに成
功した。その実験結果を用いて PHITS の検証
を行ったところ、従来の PHITS による計算結
果は、この測定値を最大で 100 分の 1 程度に
過小評価することが判明した。その理由とし
て、PHITS コードは励起核が必ず核分裂・蒸
発過程を経ることでフラグメントを生成す
ると仮定しており、核が多数の細かい破砕片
に分裂するマルチフラグメンテーション過
程を扱っていないためと予想した。

そこで、PHITS コードの計算モデルに、様々
な分裂パターンの確率を統計力学に基づき
計算し、実際に起こる分裂のパターンを決
める統計マルチフラグメンテーションモデル
を新たに組み込んだ(図 3)。改良後の PHITS
により計算されたフラグメント生成断面積
は、実験値を精度良く再現できるようにな
った(図 4)。

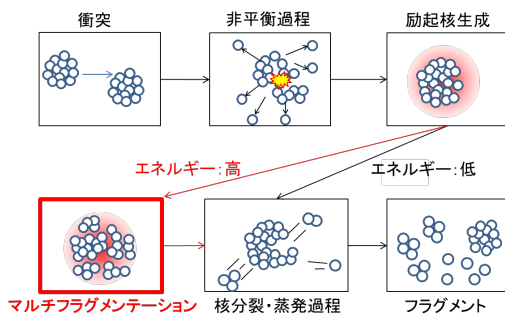


図 3 PHITS の核反応計算ルーチン。本研究
の改良により、図中の赤枠で示したマルチ
フラグメンテーション過程を模擬するモデル
が加わった。

なお、本研究で得られた断面積は実験デー
タライブラリ EXFOR に収録され、本研究で
PHITS コードに実装された統計マルチフラ
グメンテーションモデルは PHITS Ver.2.50 から
実装され、ユーザーが利用できるよ
うになっている。

(2) 軽核のフラグメンテーション

$^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, x)$, $^{12}\text{C}(\text{Al}, x)$ 反応などの断面積測
定により、プロジェクトイルからの破砕片生
成反応断面積を測定することに成功した。そ
の実験結果を用いて PHITS の検証を行っ
たところ、従来の PHITS による計算結果は、過
大評価傾向にあり、特に ^7Be などの軽い核を過
大評価する傾向にあることが判明した。その
理由として、PHITS コードは原子核-原子核衝
突を再現する際に使用する JQMD モデルが、
周辺衝突と弾性散乱を区別できないため周
辺衝突を計算しておらず、 ^7Be などの軽核を

生成しやすい中心衝突に偏って計算してい
るためと予想した。

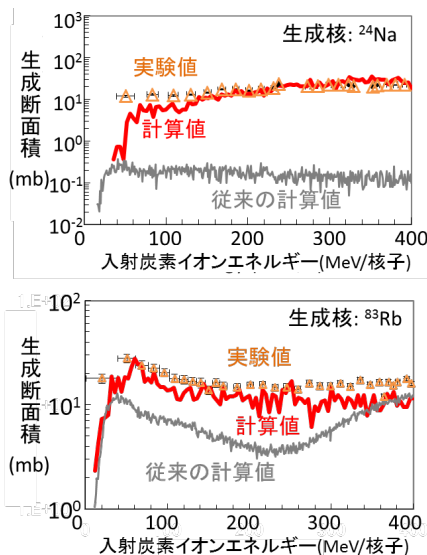
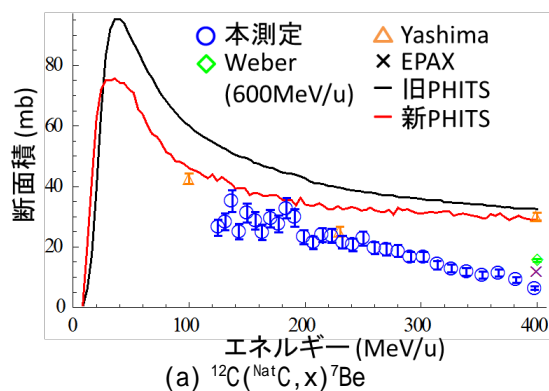


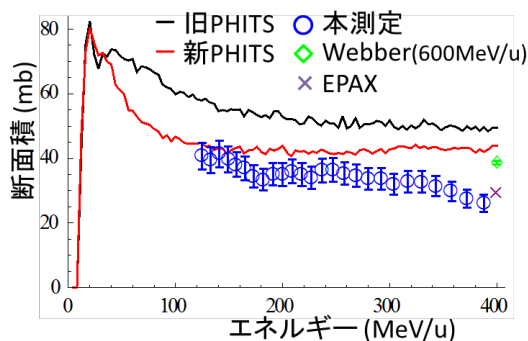
図 4 反応断面積の実験値と、PHITS コード
による計算値を比較した例。従来の計算値は
実験値を最大で 100 分の 1~10 分の 1 程度に
過小評価している一方、本研究で改良した
PHITS による計算値は実験値とよく一致して
いる。

そこで、JQMD モデルが周辺衝突と弾性散
乱を区別できるよう、原子核の基底状態の設
定してから、時間 150fm/c の間崩壊しないも
ののみを基底状態として採用することとした。
さらに反応の時間発展中に核子間に働く相
互作用が、従来慣性系に依存した記述であ
ったところを改めて相対論不変な記述にし、
弾性散乱が非弾性散乱と区別できなくなる
要因を取り除いた。改良後の PHITS により計
算されたフラグメント生成断面積は、実験
値に対して近い値を示すようになった(図 3)。
軽核は準位構造が離散的である一方、JQMD
でのシミュレーションでは位相空間中で近
い核子同士を結合してフラグメントとみな
しているため、準位構造の離散性が反映さ
れていない。その効果を考慮し、フラグ
メントとして結合できない場合を判定して
結合を阻止すれば、より正確に実験結果
を再現できるものと考えられる。

なお、本研究で行った JQMD への改良は
PHITS Ver.2.60 から徐々に実装され、2014
年夏に公開されるバージョンでは、その
すべての機能をユーザーが利用できるよ
うになる予定である。



(a) $^{12}\text{C}(\text{NatC}, x)^7\text{Be}$



(b) $^{12}\text{C}(\text{NatC}, x)^{10}\text{B}$

図3 炭素ターゲットへの炭素ビーム照射におけるフラグメント生成反応断面積の実験値と、PHITSコードによる計算値。Weber, Yashima はそれぞれ実験値、EPAXはSummererらの系統式による推定値。旧PHITSはJQMD改良前のPHITSによる計算値、新PHITSはJQMD改良後の計算値を示す。

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 6 件)

T. Ogawa, M. N. Morev, T. Sato, S. Hashimoto, Analysis of fragmentation excitation functions of lead by carbon ions up to 400 MeV/u, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, 査読有, 300, 35-45 (2013)
Doi: 10.1016/j.nimb.2013.01.031

T. Ogawa, T. Sato, S. Hashimoto, K. Niita, Analysis of multi-fragmentation reactions induced by relativistic heavy ions using the statistical multi-fragmentation model, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 査読有, 723, 36-46 (2013)
Doi: 10.1016/j.nimb.2013.04.078

T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta and

L. Sihver, Particle and Heavy Ion Transport code System, PHITS, version 2.52, Jour. Nucl. Sci. Technol., 査読有, 50, 913-923 (2013)

Doi: 10.1080/00223131.2013.814553

T. Ogawa, M. N. Morev, T. Kosako, Measurement of Radioactive Fragment Production Excitation Functions of Lead by 400 MeV/u Carbon Ions, Trans. American Nucl. Soc. 査読有, 109, 1253-1255 (2013)
<http://epubs.ans.org/download/?a=21931>

T. Ogawa, S. Hashimoto, T. Sato, K. Niita, Development of gamma de-excitation model for prediction of prompt gamma-rays and isomer production based on energy-dependent level structure treatment, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, 査読有, 325, 35-42 (2014)
Doi: 10.1016/j.nimb.2014.02.007

T. Ogawa, M. N. Morev, T. Iimoto, T. Kosako, Measurement of radioactive fragment production excitation functions of lead by 400 MeV/u carbon ions, Prog. Nucl. Sci. Technol., 査読有, (in press)

〔学会発表〕(計 8 件)

T. Ogawa, M. N. Morev, T. Sato, Design of an experimental method for measurement of isotopic fragmentation cross-section energy dependence of nucleus-nucleus collisions, 11th Meeting of the Task Force on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities, Ibaraki Japan, Sep. 2012

小川達彦, 佐藤達彦, 橋本慎太郎, ミハエル モレフ, 小佐古敏荘, 仁井田浩二, 10~400MeV/u における Pb-Nat(C-12, x) フラグメンテーション反応の JQMD+GEM を用いた再現の問題点, 原子力学会 2012 年秋の大会, 広島, 2012 年 9 月

小川達彦, 佐藤達彦, 橋本慎太郎, 仁井田浩二, PHITS-SMM による二重微分中性子収量とフラグメント生成断面積の再現性向上, 原子力学会 2013 年春の年会, 大阪, 2013 年 3 月

小川達彦, 佐藤達彦, 津田修一, Benchmark experiment of activation induced by high-energy heavy ions, 平成 24 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会, 千葉, 2013 年 4 月

小川達彦, 佐藤達彦, 橋本慎太郎, 仁井田浩二, 脱励起モデル EBITEM の開発, 2013 年度 PHITS 研究会, 茨城, 2013 年 8 月

小川達彦、佐藤達彦、津田修一、シンチレ
ータテレスコープを用いた重粒子入射反応
に対するフラグメント生成断面積のエネル
ギー依存性測定、原子力学会 2013 年秋の大
会、青森、2013 年 9 月

T.Ogawa, T. Sato, S. Hashimoto, K.Niita,
Incorporation of the statistical
multi-fragmentation model in PHITS and its
application for simulation of
fragmentation by heavy ions and protons,
Joint International Conference on
Supercomputing in Nuclear Applications +
Monte Carlo 2013 , Paris France, Oct. 2013

T.Ogawa, S. Hashimoto, T. Sato, K.Niita,
Application of the new nuclear
de-excitation model of PHITS for
prediction of isomer yields and prompt
gamma-ray production, Joint International
Conference on Supercomputing in Nuclear
Applications + Monte Carlo 2013 , Paris
France, Oct. 2013

〔その他〕

ホームページ等：

原子力機構の研究開発成果ホームページ
http://jolifukyu.tokai-sc.jaea.go.jp/fukyu/mirai/2013/8_2.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川 達彦 (OGAWA, Tatsuhiko)

(独)日本原子力研究開発機構・原子力科学
研究部門・原子力基礎工学研究センター・
博士研究員

研究者番号：20632847