

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26790072

研究課題名(和文) 高エネルギー重粒子破砕片の生成角度分布の測定及び理論的研究

研究課題名(英文) Experimental and theoretical study on high energy heavy ion fragment angular distribution

研究代表者

小川 達彦(Ogawa, Tatsuhiko)

国立研究開発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・研究員

研究者番号：20632847

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000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、重イオンの核破砕片生成反応断面積の角度依存性を測定した。軽いターゲット(炭素)から重いターゲット(鉛)までの反応で生成する破砕片の生成断面積を角度の関数として明らかにした。また、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。特にPHITSの反応モデルのうち、破砕片の生成断面積を決定づける量子分子動力学モデルの改良に取り組み、核子間の相互作用の記述を正確にすることで、破砕片生成断面積角度分布が過小評価されていた問題を解決した。一部の改良についてはすでに、本研究を通してPHITSに実装し、公開した。

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 C(Pb,x), and C(C,x) reactions as functions of angle. In this study, the measured cross-sections were used to benchmark radiation transport simulation code PHITS to improve its reaction models. In particular, the quantum molecular dynamics model, which dominates the fragment production cross sections, was revised and implemented to PHITS.

研究分野：原子核工学

キーワード：重イオン 核反応 破砕片 角度分布 断面積 量子分子動力学モデル

1. 研究開始当初の背景

重粒子線治療場や有人宇宙活動では数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。また、炭素イオンを使った重粒子線治療では、治療中の照射野形状を把握するため、入射炭素イオンの破砕によって生じる破砕片(He-4, H-3 など)を検知する技術が精力的に開発されている。

これらの線量評価や検出器開発のためには、イオンの入射方向から大角度に散乱される成分が重要であり、シミュレーションによる断面積の予測が重要である。しかし、カスケードモデル、前平衡モデル、量子分子力学モデルなど、これまで考案されたモデルは、いずれも角度分布を再現できず、特に生成量の多い最前方と、検出等に用いる大角度成分の再現が課題となっていた。

2. 研究の目的

重粒子線治療場や宇宙で起こる数100MeV/uのイオンによる核反応の高精度な予測のため、その核破砕片生成反応断面積の角度依存性を測定することを本研究の目的とした。さらに、実験データや先行研究の文献値をもとに、重イオン核反応を模擬する量子分子力学モデル JQMD の改良を行い、核破砕片生成断面積の角度依存性を再現することも目的とした。

核破砕片生成反応断面積の測定は、 $^{12}\text{C}(\text{NatC}, x)$, $^{12}\text{C}(\text{Al}, x)$, $^{12}\text{C}(\text{Fe}, x)$, $^{12}\text{C}(\text{Pb}, x)$ 反応について行った。炭素は重粒子線治療や宇宙放射線の主要なイオン種であり、それを様々なターゲットに対して照射している。さらに、得られた断面積との比較により、JQMD のベンチマークを行い、それに基づくコードの改善を行った。

3. 研究の方法

平成 26 年度は、以下の 3 点を行った。測定システムの開発：シンチレータ測定器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た。

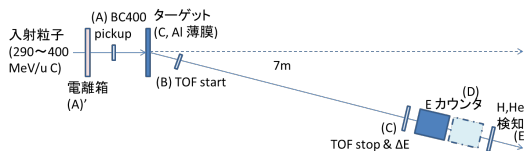


図 1 測定システムの構造。図の左側から入射するイオンは、線束測定用電離箱、線束測定用シンチレータ、ターゲットを通り、反応生成物は TOF スタートカウンタ、TOF ストップカウンタ、エネルギー測定用カウンタを通る。

$^{12}\text{C}(\text{NatC}, x)$, $^{12}\text{C}(\text{Al}, x)$ 反応の測定：炭素・アルミターゲットに対する 290, 400MeV/u 炭素イオンの照射を行い、断面積を測定した。核反応モデル JQMD の改良：核子間に働く相互作用の相対論普遍化と、核子間散乱断面積

の媒質効果補正を修正することで、実験値の正確な再現を試みた。

さらに平成 27 年度には、以下の二点を行った。 $^{12}\text{C}(\text{NatFe}, x)$, $^{12}\text{C}(\text{NatPb}, x)$ 反応の測定：鉄・鉛ターゲットに対する 400MeV/u 炭素イオンの照射を行い、断面積を測定した。核反応モデル JQMD の検証：平成 26 年度に開発した JQMD モデル改良型で、実験値の再現が可能かテストした。

平成 28 年度には、核反応モデル JQMD の改良を行った。特に反応の最中における核子の相互作用や、計算上考慮すべき衝突パラメータの範囲を変えて、実験値や文献値との比較を行った。

平成 29 年度には、反応モデル開発の完成と、関連分野への適用拡大も行った。JQMD の完成にあたっては、反応終了時におけるエネルギー収支のチェックを合理化した。また、JQMD の適用拡大は、無限核媒質(中性子・陽子が無限に分布する体系)に JQMD を適用し、JQMD と同様の原理で計算を行う他のコードとの比較研究に参画した。

4. 研究成果

実験

破砕片生成断面積の測定の結果、破砕片生成の角度依存性を得ることができた。図 2, 3 にその典型的な例を示す。

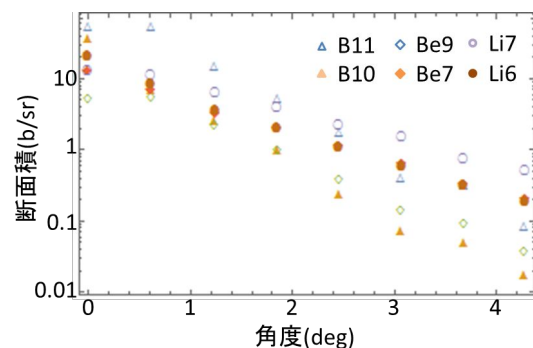


図 2 290MeV/ 核子の C 照射で測定した $^{12}\text{C}(\text{NatC}, x)$ 反応断面積の放出角度分布。

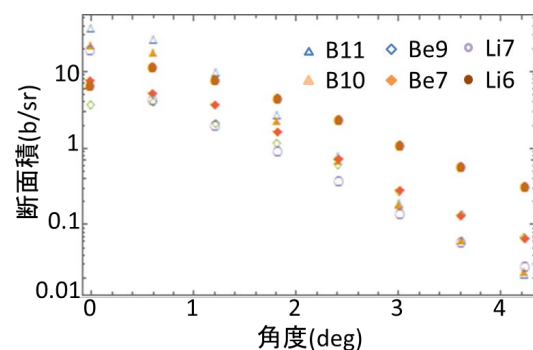


図 3 400MeV/ 核子の C 照射で測定した $^{12}\text{C}(\text{NatC}, x)$ 反応断面積の放出角度分布。

測定された断面積は最前方が最大となり、そこから角度に対して指数関数的に減少す

る分布となった。また、指数関数的な減衰の傾きは核種によって異なり、軽い核ほど大角度にも多く生成する結果であった。

モデル開発

本研究の実験値や、先行研究の文献値を参照し、重イオン核反応モデル JQMD の改良を行った。JQMD は入射核とターゲット核双方を核子の集合体とみなし、それら個々の座標と運動量を、核子間に働く相互作用に基づき経時変化させ、追跡するものである。

以前の JQMD では、核子間に働く相互作用が相対論不変でなく、座標系に依存していたために、実験室系 ターゲット・入射核の重心系で変換する際に、核が不安定になり崩壊していた。そこで、核子間に働く相互作用を相対論不変な形式で書き直す改善を行い、核の安定性を比較した。図 4 は様々な原子核の組み合わせで、4GeV/核子にエネルギーで衝突させた場合、どれくらいの確率で非弾性な反応(核の崩壊)を起こすか調べたものである。

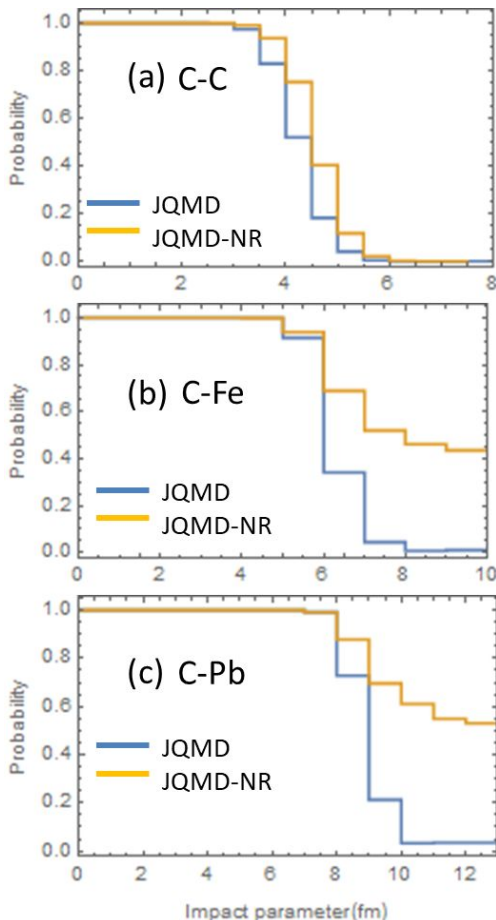


図 4 衝突パラメータに対する核の衝突(崩壊)確率依存性。JQMD は改良型、JQMD-NR は従来版。従来版は、核同士が接触しない遠距離でも崩壊し、疑似崩壊が起こっている。

この結果、JQMD 改良型は大きな衝突パラメータの場合核が崩壊しない、すなわち安定を保っていることが示された。

本研究では、最前方(角度 0 度近傍)に生成する破砕片は衝突パラメータが大きい反応(周辺衝突)によるため、周辺衝突を正確に記述できるこの改良が大きな役割を果たす。

この改良を施したバージョンと従来バージョンを典型的な条件で実験値と比較したものを、図 5 に示す。

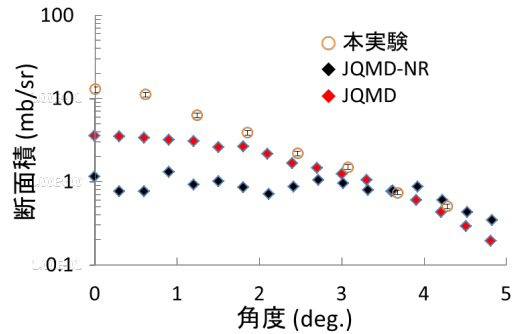


図 5 290MeV/核子の ^{12}C 入射 $^{12}\text{C}(\text{NatC}, x)^6\text{Li}$ 反応の断面積角度依存性。実験値と、従来の JQMD, 改良後の JQMD で計算した値。

従来のバージョンでは前方に集中する分布が再現できず、ほぼ均一であった。しかし改良後のバージョンでは、実験値には届かないながらも前方で生成が多い傾向を再現できた。

さらに Dudouet らの測定では、入射角のエネルギーが 95A MeV と低い場合に、破砕片生成断面積の角度分布が 45 度程度まで測定されており、JQMD を比較すると大角度でも過小評価になることが分かった。それを解決するための対策として、JQMD で時間発展の計算をしている最中に、座標・運動量両面で近くにいる核子をつなぐ In flight coalescence (IFC) 機構を実装した。これは、近くにある陽子・中性子ペアは本来重陽子を形成するが、JQMD はその束縛を表現できないため、時間発展する分解してしまうことがある。IFC はそれを防ぐため、低エネルギーで接触した核子同士の運動量を強制的にそろえ、同伴させる仕組みである。図 6 はこの改良(IFC)を入れた JQMD を、Dudouet らの文献値と比較したものである。

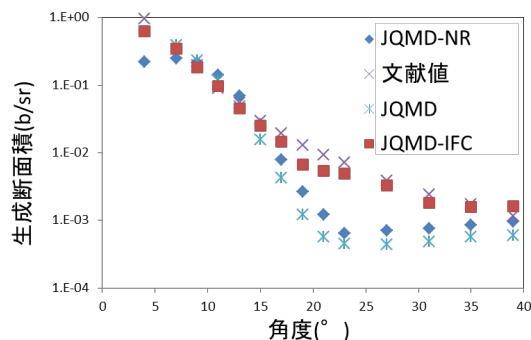


図 6 95MeV/核子の ^{12}C 入射 $^{12}\text{C}(\text{NatC}, x)^6\text{Li}$ 反応の断面積角度依存性。実験値と従来の JQMD,

相対論不変性を修正した JQMD、さらに IFC を取り入れた JQMD で計算した値。

20 度以上に放出される成分が、従来バージョンでは過小評価されており、相対論不変性を取り入れる前後でもほとんど変わっていない。しかし IFC を考慮すると、40 度までの全範囲で生成断面積をよく再現することができる。

こうして、重イオン入射核破砕反応で生成する核破砕片の角度分布を測定し、それを精度良く再現できるモデル開発も行った。計算モデル JQMD の改良版は、現在公開に向けて一般性の確保や計算速度の向上を進めており、それが終わり次第汎用放射線輸送計算コード PHITS の一部として実装し、社会への普及を図る。

また、今回の研究期間中に JQMD を含む QMD 系コードの比較研究が国際的に計画され、国際学会 Transport2017 にてその計算結果の比較を行った。図 7 はその比較の一例である。無限空間に中性子と陽子を 0.16 個/ fm^3 配置し、その運動量分布が時間とともにどう変化するか計算したものである。どのコードもフェルミ縮退 ($0\text{fm}/c$ の状態) を厳格に維持することはできないが、ある程度の一定性を維持することができた。また、その中でも JQMD は他コードと比べ遜色ない計算結果を示すことが分かった。

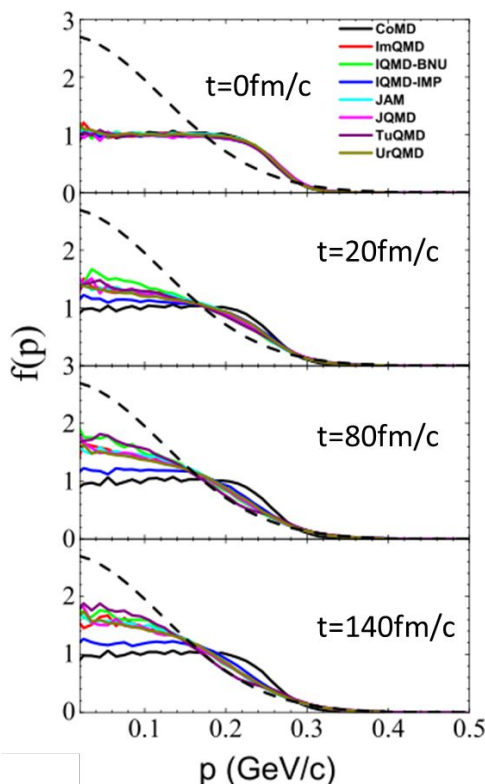


図 7 世界の様々な QMD 系コードで計算した陽子・中性子の運動量分布時間発展。

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 11 件)

Yong-Jia Wang, Maria Colonna, Pawel Danielewicz, Akira Ono, Manyee Betty Tsang, Hermann Wolter, Jun Xu, Lie-Wen Chen, Dan Cozma, Zhao-Qing Feng, Subal Das Gupta, Natsumi Ikeno, Che-Ming Ko, Bao-An Li, Qing-Feng Li, Zhu-Xia Li, Swagata Mallik, Yasushi Nara, Tatsuhiko Ogawa, Akira Ohnishi, Dmytro Oliinychenko, et al, Comparison of heavy-ion transport simulations: Collision integral in a box, PHYSICAL REVIEW C, 査読あり, 97, 34625, (2018)
doi:10.1103/PhysRevC.97.034625

T.Ogawa, S.Hashimoto, T.Sato, K.Niita, T.Kamae, Integrated simulation of fragmentation, evaporation, and gamma-decay processes in the interaction of cosmic-ray heavy ions with the atmosphere using PHITS, Journal of Physics: Conference Series, 査読なし, 2018

Tatsuhiko Ogawa, Tatsuhiko Sato, Shintaro Hashimoto and Koji Niita, Analysis of angular distribution of fragments in relativistic heavy-ion collisions by quantum molecular dynamics, 査読あり, European Physics Journal Web of Conferences series, 査読あり, (2016)

Tatsuhiko Ogawa, Tatsuhiko Sato, Shintaro Hashimoto and Koji Niita, Analysis of angular distribution of fragments in relativistic heavy-ion collisions by quantum molecular dynamics, EPJ Web of Conferences, 117, 査読なし, 3011, (2016)
Doi:10.1051/epjconf/201611703011

Tatsuhiko Ogawa, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Sato, and Koji Niita, Application of JAERI quantum molecular dynamics model for collisions of heavy Nuclei, EPJ Web of Conferences, 122, 査読なし, 4005 (2016)
Doi:10.1051/epjconf/20162204005

T. Ogawa, T. Sato, S. Hashimoto, D. Satoh, S. Tsuda, and K.Niita, Energy-dependent fragmentation cross sections of relativistic ^{12}C , PHYSICAL REVIEW C, 92, 査読あり, 24614, (2015)
Doi:10.1103/PhysRevC.92.024614

T.Ogawa, T.Sato, S.Hashimoto and K.Niita

Revision of JAERI-QMD for analysis of peripheral nucleus-nucleus collisions, CERN proceedings series (Proceedings of the 14th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms), 1, 査読なし,301-306 (2015)

Tatsuhiko Sato, Koji Niita, Norihiro Matsuda, Shintaro Hashimoto, Yosuke Iwamoto, Takuya Furuta, Shusaku Noda, Tatsuhiko Ogawa, Hiroshi Iwase, Hiroshi Nakashima, Tokio Fukahori, Keisuke Okumura, Tetsuya Kai, Satoshi Chiba, Lembit Sihver, Overview of particle and heavy ion transport code system PHITS *Annals of Nuclear Energy*, 査読あり, (2015)

Doi:10.1016/j.anucene.2014.08.023

Tatsuhiko Ogawa, Mikhail N. Morev, Takeshi Iimoto and Toshiso Kosako, Measurement of radioactive fragment production excitation functions of lead by 400 MeV/u carbon ions, *Progress in Nuclear Science and Technology*, 4, 査読あり,574-577 (2014)

Doi:10.15669/pnst.4.574

Tatsuhiko Ogawa, Tatsuhiko Sato, Shintaro Hashimoto and Koji Niita, Incorporation of the statistical multi-fragmentation model in PHITS and its application for simulation of fragmentation by heavy ions and protons, Proceedings of SNA + MC 2013 - Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications + Monte Carlo 2014, 査読なし, 2101, (2014)

Doi:10.1051/snamc/201402101

Tatsuhiko Ogawa, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Sato, and Koji Niita, Application of new nuclear de-excitation model of PHITS for prediction of isomer yield and prompt gamma-ray production, Proceedings of SNA + MC 2013 - Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications + Monte Carlo 2014, 査読なし,2102, (2014)

Doi:10.1051/snamc/201402102

〔学会発表〕(計 8 件)

T.Ogawa, S.Hashimoto, T.Sato, K.Niita, T.Kamae, Integrated simulation of fragmentation, evaporation, and gamma-decay processes in the interaction

of cosmic-ray heavy ions with the atmosphere using PHITS, International Conference of Particle Physics and Astrophysics, 2017年

小川達彦, 橋本 慎太郎, 佐藤 達彦, 仁井田浩二, 高エネルギー重イオン核反応モデル JAMQMD Ver.2 の開発, 原子力学会 2017年秋の大会, 2017年

Tatsuhiko Ogawa, Tatsuhiko Sato, Shintaro Hashimoto and Koji Niita, Radiation transport simulation code PHITS and its hadronic reaction models, International Workshop on Transport Simulations for Heavy Ion Collisions under Controlled Conditions (Transport 2017), 2017年

Tatsuhiko Ogawa, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Sato, and Koji Niita, Application of JAERI quantum molecular dynamics model for collisions of heavy Nuclei, 5th International Workshop on Compound-Nuclear Reactions and Related Topics, 2015年

小川達彦, 橋本慎太郎, 佐藤達彦, 仁井田浩二, PHITS における量子分子動力学モデル (JQMD) の改良による重イオン入射反応計算の高精度化, 日本原子力学会 2015年秋の大会, 2015年

Tatsuhiko Ogawa, Tatsuhiko Sato, Shintaro Hashimoto and Koji Niita, Analysis of angular distribution of fragments in relativistic heavy-ion collisions by quantum molecular dynamics, The 12th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2015), 2015年

T.Ogawa, T.Sato, S.Hashimoto and K.Niita, Revision of JAERI quantum molecular dynamics model for analysis of peripheral nucleus-nucleus collisions, 14th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, 2015年

T.Ogawa, T.Sato and S.Hashimoto, K.Niita, New Algorithm for Monte Carlo Particle-Transport Simulation to Recover Event-by-Event Kinematic Correlations Of Reactions Emitting Charged Particles, Joint International Conference on Mathematics and Computation, Supercomputing in Nuclear Applications and the Monte Carlo Method, 2015年

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

6．研究組織

(1)研究代表者

小川 達彦（ OGAWA Tatsuhiko ）

国立研究開発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・研究員

研究者番号：20632847