

原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ
若手原子力研究プログラム 事後評価総合所見

研究開発課題名：中高エネルギー陽子による核破砕片の系統測定に関する研究	
研究代表者（研究機関名）：佐波俊哉（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構）	
研究期間及び予算額：平成21年度～平成22年度（2年計画） 14百万円	
項目	要 約
1. 研究開発の概要	<p>加速器を用いたがん治療等の放射線の高度利用を進めるための基礎データとなる、中高エネルギー陽子による核反応からの核破砕片の生成機構を解明するために、核破砕片の高効率測定法の開発と系統測定を行う。広いエネルギー領域において良好な粒子弁別性を有するブラッグカーブ検出器に改良を加え、放出エネルギーと角度ごとの系統的なデータを得る。得られたデータと計算コードを用い、核破砕片放出に至る核反応モデルの検証を行う。</p>
2. 総合評価	<p style="text-align: center;">S</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 独自に開発してきた検出器を改良し、C, Al, O, N, Ti, Cuの6元素に対する中高エネルギー陽子入射核反応において、Li, Be, B, Cの核破砕片の角度・エネルギー分布を測定し、世界に先駆けて、約300の二重微分断面積データを得るなど、極めて優れた成果を挙げている。 ・ 上記基礎データは中高エネルギー陽子による核反応からの核破砕片の生成機構の解明に資するものであり、研究成果を学術誌で公表し、核破砕片測定分野で世界をリードして欲しい。 <p>S) 極めて優れた成果が挙げられている</p> <ul style="list-style-type: none"> A) 優れた成果が挙げられている B) 一部を除き、相応の成果が挙げられている C) 部分的な成果に留まっている D) 成果がほとんど挙げられていない
3. その他	<ul style="list-style-type: none"> ・ IAEAのデータベース（CINDA/EXFOR）へのデータ登録が開始され、国際的な寄与が期待されている。

<p>1. 目的・目標</p>	<p>加速器を用いたがん治療等の放射線の高度利用を進めるための基礎データとなる、中高エネルギー陽子による核反応からの核破砕片の生成機構を解明するために、核破砕片の高効率測定法の開発と系統測定を行う。広いエネルギー領域において良好な粒子弁別性を有するブラッグカーブ検出器に改良を加え、放出エネルギーと角度ごとの系統的なデータを得る。得られたデータと計算コードを用い、核破砕片放出に至る核反応モデルの検証を行う。</p>
<p>2. 研究成果</p>	<p>【研究開発項目(1) 検出器の製作】 [得られた成果]</p> <p>本項目では高効率核破砕片検出器の製作を目的とし、検出器の設計、特性試験、ビームライン整備、データ収集システムの構築を行った。平成 21 年度には検出器 1 式を製作し、重イオン直接入射試験により性能検証を行った。設計・製作した検出器は、飛程・エネルギー相関を用いた粒子弁別、突き抜け粒子エネルギー補正による可測定域の拡充の工夫に加え、3x3 のウィンドウフレーム型サブミクロン入射窓を備え、核破砕片を広いエネルギー領域で効率的に測定できるものとなった。特性試験では、検出器が十分な性能を保持していることが確認された。その後 1 式を作成し、計 2 式により同時使用の実証試験を行った。実証試験では、2 台の検出器を同時に使用する配置とデータ収集システムを実現することができた。平成 22 年度には 21 年度の結果を踏まえ、2 式の検出器を追加で作成し、大阪大学核物理研究センターにおける 4 式の検出器を用いた同時測定実験のための準備を行った。この準備ではビームタイム取得のためのプログラム委員会による審査を通過させ、専用ビームラインを確保して、ビームオプティクスに基づいた試料位置の確保とチェンバーと検出器の配置を行い、4 台の検出器からのデータを短い調整時間で効率よく測定できるデータ収集システムを構築した。いずれも計画に基づき着実に実行することができ、目標を十分達成することができた。</p> <p>【研究開発項目(2) データ測定】 [得られた成果]</p> <p>本項目では、前項で用意した検出器及び測定システムを用いて、放射線医学総合研究所サイクロトロン、大阪大学核物理研究センターリングサイクロトロンにおけるデータ測定を行うことを目的とした。平成 21 年度は放射線医学総合研究所サイクロトロン施設において、検出器 2 式同時使用の実証を兼ね、70 MeV 陽子に対するデータ測定を行った。この実験では窒素及び酸素の核破砕片生成二重微分断面積を測定するために、酸化アルミニウム、窒化アルミニウムをタンタル箔上に蒸着し</p>

たターゲットを新たに追加し、炭素、窒素、酸素、アルミニウムの核破砕片生成二重微分断面積の測定データを得た。平成 22 年度は大阪大学核物理研究センターリングサイクロトロン施設において、140, 200, 300 MeV 陽子に対する、データ測定を行い、炭素、窒素、酸素、アルミニウム、チタン、銅の核破砕片生成二重微分断面積の測定データを得た。大阪大学核物理研究センターでは、平成 22 年度に初めて実験を行うことから、2 度の下見と十分な準備期間を用いて新設ビームコースの整備と機器調整を行い、実験グループを組織することによりビーム実験を遂行することができた。また、放射線医学総合研究所サイクロトロン施設において 50 MeV 陽子に対するデータ測定を行った。いずれの実験も計画に基づき着実に実行することができ、目標を十分達成することができた。

【研究開発項目(3) データ解析・計算】

[得られた成果]

本項目では、前項で取得した測定データについて粒子弁別、エネルギー決定を含むデータ解析を行って二重微分断面積の測定値を得、理論計算を行い核反応モデルの検証を行うことを目的とした。データ解析においては入射エネルギーが 5 点、測定角度が 4(または 3)点、測定試料が 5(または 3)点、被測定粒子種が 4 種、総計で 300 あまりの二重微分断面積データを得た。窒素、及び酸素については、酸化アルミニウム、窒化アルミニウムをタンタル箔上に蒸着したターゲットのデータと、アルミニウム、タンタルのデータから、断面積値を得る手法を実現し、これらの核破砕片生成二重微分断面積を中高エネルギー領域で初めて得ることができた。この結果と先行研究で得られた結果から $Z=6$ から 29 のターゲットに対して、40MeV から 300MeV までの入射エネルギー、30 度から 120° までの角度範囲において核破砕片の二重微分断面積を得ることに成功した。これらのデータについて、3つの異なる核内カスケードモデルを用いた理論計算を行い、核反応モデルの検証を行った。検証では Q 値を取り入れたモデルの変更が行われたコードについて、核反応過程の切り替え時間の再現性への影響を調査し、核内カスケードコードの違いが蒸発過程に与えるエネルギーを変化させ、核破砕片放出の再現性を左右することが、各エネルギー、ターゲット、放出角度毎に検証された。再現性のモデル依存が入射エネルギーにより変化することが明らかになり、これまでのモデルでは再現できない成分について核種毎、エネルギー毎に明らかになった。実験データを 4つのパラメータを含む式でフィッティングして容易に数値を与えることを可能とし、また実験点を内挿し角度微分断面積を得ることができた。得られた角度微分断面積は計算結果と比較し、理論計算の積分値での検証を可能とした。実験データの結果、計算コードとの比較を関連学会、専門家によるシンポジウ

ム、核データ国際会議、投稿論文において発表し、これに基づいた CINDA および EXFOR への収録が開始された。いずれも計画に基づき着実に実行することができ、目標を十分達成することができた。

【論文、特許等】

[論文発表]

- 1) T. Sanami, M. Hagiwara, H. Iwase, M. Takada, D. Satoh, Y. Iwamoto, S. Kamada, S. Kunieda, H. Yashima, A. Tamii, K. Hatanaka, "Fragment DDX measurement of proton induced reactions on light-medium nuclei for energy range from reaction threshold to a few hundred MeV", *Journal of Korean Physics Society* **59** (2011) 1805-1808
- 2) T. Sanami, M. Hagiwara, M. Takada, M. Baba "Measurement of fragment production DDX of 72 and 144 MeV ^{12}C beam induced reaction on carbon using Bragg Curve Counter", *Proceedings of the 2009 Symposium on Nuclear Data, JAEA-Conf 2010-005*, 87
- 3) T. Sanami, M. Hagiwara, H. Iwase, M. Takada, D. Satoh, H. Yashima, T. Kajimoto, Y. Iwamoto, S. Kamada, Y. Nakane, S. Kunieda, A. Tamii, K. Hatanaka, "Experimental studies of light fragment production cross section for nucleon induced reaction at intermediate energies", *Proceedings of the 2010 Symposium on Nuclear Data, JAEA-Conf 2011-002*, 59
- 4) 佐波俊哉、萩原雅之、岩瀬広、高田真志、鎌田創、「核破砕片生成二重微分断面積の測定」、放射線医学総合研究所サイクロトロン利用報告、平成 23 年 3 月
- 5) T. Sanami, M. Hagiwara, H. Iwase, M. Takada, D. Satoh, H. Yashima, T. Kajimoto, Y. Iwamoto, S. Kamada, Y. Nakane, S. Kunieda, A. Tamii, K. Hatanaka, "Fragment DDX on C, N, O, Al, Ti Cu for $E_p=140, 200, 300$ MeV", *Annual Report 2010, Research Center of Nuclear Physics, Osaka university to be published*

【データベース化】

- 1) 論文発表 1 に係わる実験データの CINDA/EXFOR への収録(データ送付済み、収録作業中)

【口頭発表】

- 1) 佐波俊哉、「数 100MeV 陽子によるフラグメント生成二重微分断面積の測定」、RCNP における核データ戦略検討会、平成 23 年 6 月 28, 29 日、大阪大学核物理研究センター
- 2) 佐波俊哉、萩原雅之、岩瀬広、高田真志、佐藤大樹、梶本剛、八島浩、岩元洋介、鎌田創、中根佳宏、國枝賢、民井淳、畑中吉治、「数

	<p>100MeV 陽子入射に対する核破砕片生成二重微分断面積測定」、日本原子力学会春の年会, 平成 23 年 3 月、福井大学</p> <p>3) 佐波俊哉、萩原雅之、岩瀬広、高田真志、佐藤大樹、梶本剛、八島浩、岩元洋介、鎌田創、中根佳宏、國枝賢、民井淳、畑中吉治, “Experimental studies of light fragment production cross section for nucleon induced reaction at intermediate energies”、2010 年核データ研究会、平成 22 年 11 月、九州大学</p> <p>4) 佐波俊哉、萩原雅之、高田真志、馬場護、「窒素、酸素における数 10MeV 陽子入射反応からの核破砕片生成二重微分断面積」、日本原子力学会秋の大会、平成 22 年 9 月、茨城大学</p> <p>5) T. SANAMI, M. HAGIWARA, H. IWASE, M. TAKADA, D. SATOH, Y. IWAMOTO, S. KUNIEDA, H. YASHIMA, A. TAMII and M. BABA, ” FRAGMENT DDX MEASUREMENT OF PROTON INDUCED REACTIONS ON LIGHT-MEDIUM NUCLEI FOR ENERGY RANGE FROM REACTION THRESHOLD TO A FEW HUNDRED MEV” , International conference on Nuclear data for Science and Technology, 平成 22 年 4 月, Jeju Korea</p> <p>【ポスター発表】</p> <p>1) T. Sanami, M. Hagiwara, M. Takada, M. Baba, “Measurement of fragment production DDX of 72 and 144 MeV ¹²C beam induced reaction on carbon using Bragg Curve Counter” , 2009 年核データ研究会, 2009 年 11 月 26 日 (木)、27 日 (金) , テクノ交流館リコッティ (茨城県東海村)</p>
--	--