

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24年 6月13日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21540408

研究課題名（和文） 水蒸気へのブラッグピーク領域の炭素線衝撃による高速電子異常放出解明とトラック解析

研究課題名（英文） Investigation of unexpectedly high-energy electron emission from water vapor by the impact of carbon ions with Bragg-peak energies and track analysis

研究代表者

大澤 大輔 (OHSAWA DAISUKE)

京都大学・放射性同位元素総合センター・助教

研究者番号：90324681

研究成果の概要（和文）：種々の装置改造により、水蒸気へのブラッグピーク炭素線衝撃における二次電子生成二重微分断面積の高精度測定に成功した。その結果、MeV領域の重イオン入射では Fermi-Shuttle 加速の寄与は予想より小さいことが分かった。続いて、得られた断面積を用いて水中へのブラッグピーク領域の炭素線入射におけるトラック構造をシミュレーションしたところ、動径線量分布と Chatterjee モデルとの比較において、入射イオン軸近傍の core 領域で不一致がみられ、モデル見直しを示唆するものとなった。

研究成果の概要（英文）：Further improving our previous apparatus, we have successfully measured absolute double differential cross section (DDCS) for secondary electron emission from water vapor by the impact of carbon ions with Bragg-peak energies. The angular distributions of DDCSs disagreed with the CDW-EIS theoretical calculation at the backward angles ($>100^\circ$), while single differential cross section (SDCS) agreed well with the CDW-EIS, particularly in the low-energy region (<200 eV), suggesting the contribution of Fermi-Shuttle acceleration to the ion-atom collisions is rather small for heavy-ion impact with incident energies of several MeV/u or higher. Comparisons of radial dose distributions for the carbon ions, deduced from Monte-carlo track simulation, with the Chatterjee model showed meaningful and significant discrepancies in the core region, implying the necessity of corrections of the model.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：原子・分子

1. 研究開始当初の背景

放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療装置(HIMAC)では炭素線照射による深部がん治療が行われており、ここではブラッグピーク形成と呼ばれる荷電粒子線の持つ際

立った特徴が利用されている。この治療法は照射による表面損傷が激減するという点で、従来の X、 γ 線照射によるそれと異なり非常に効果的かつ有望なものである。ブラッグピーク(6~25 MeV/u)のエネルギー損失は物質の

電離、励起によるものが主であり、それに伴って多数の二次電子が放出されるため、その生物効果初期過程はこれら放出二次電子線の空間及びエネルギー分布に密接に関係している。過去に様々な入射核種(主に軽イオン)、ターゲット(主に希ガス)を用いてこの種の実験がなされてきたが、数 MeV/u の重イオン衝撃による水からの二次電子放出については、高真空下で安定希薄な水蒸気ターゲットを得ることが難しいこともあり、信頼できる高精度実験データは殆ど発表されていない。また、得られる断面積はトラック構造解析、動径線量分布計算等の基礎データとなる。重イオンの持つ高い生物学的効果比(high RBE)、低い酸素増感度(low OER)、細胞周期依存性が無い等のマクロな生物効果の、DNA レベルでのメカニズムは未だ分かっていない。トラック構造は DNA サイズ(~2 nm)におけるエネルギー付与の(平均化されていない)非均質性の情報を提供するため、DNA へのダメージ付与(局所的な原子/分子間結合の損傷)がどのようにして細胞不活性化(分裂停止)へ移行するかを解明する端緒となるが、実験データが不足しているため、信頼性に欠く状況にある。

以上から、本研究の重要性を認識し、1995 年以来、装置開発、改造を行い、 He^{2+} 入射にて、Fermi-shuttle 加速と呼ばれる新奇現象を含む実験データ取得に至った。Fermi-shuttle 加速は、元々、高エネルギー宇宙線(GeV 級の陽子線等)の発生メカニズムを説明するために導入された理論である。近年、この現象がイオン-原子・分子衝突における高エネルギー電子放出でも発生していると報告されているが、その詳細は未だ解明されていない。

2. 研究の目的

本研究は水蒸気へのブラッグピーク領域の炭素線衝撃による二次電子生成二重微分断面積を測定し、 He^{2+} 入射データとの比較により、イオン-原子・分子衝突における新奇現象の 1 つである Fermi-shuttle 加速の解明を目的とする。さらに、得られた断面積を電子輸送モンテカルロコード(KURBUC)に組み込み、水中へのブラッグピーク領域の炭素線入射におけるトラック構造(入射イオンの飛跡に沿って生じるエネルギー付与の微視的空間分布)を解析し、Fermi-shuttle 加速のトラック構造への影響評価も行う。

3. 研究の方法

Fermi-shuttle 加速は attraction(電離前の標的分子内軌道電子の入射イオンへの引き寄せ、すなわち衝突径数の減少→放出二次電子の ~2Vp への加速)と trap(電離後の放出電子の入射イオン-標的核間での繰り返し衝突→放出二次電子の ~4Vp への加速)の 2 つのプロセス

から成ると考えられており(Vp は入射イオン速度)、この現象が有意に発生していれば、 $V_p \sim 2V_p$ 、すなわち、6.0 MeV/u イオン入射において 3.3~13 keV 近傍に異常増加が現れると予想されるため、高エネルギー二次電子の高精度測定が必須となる。

実験は放医研 930AVF サイクロトロンにより加速された 6.0 MeV/u C^{6+} ビームを用い、初年度は、(1) 平行平板静電型電子線分析器の耐電圧向上、(2) 散乱二次電子抑制の 2 つの装置改造と改造効果確認のための予備実験を行った。

(1)については、高エネルギー二次電子測定で問題となる分析器周辺の放電を抑えるため、極板間のセラミック絶縁を高電圧対応の碍子に替えて沿面放電を食い止め、極板に二次電子放出の少ない Ni 板(300 μm)を用い、スリット部(5x10 mm²)にエレクトロフォーミングでメッシュ加工し張り出しのない構造とし耐電圧を向上させた。

(2)については、過去の He^{2+} 入射実験では高エネルギー二次電子が分析器の出口スリット等に当たって発生する散乱電子が含まれている可能性がある。そのため分析器-MCP 間に設置してある銅製コリメータのカーボンマスク化とコリメータ最上段へのサブレッサ電圧印加の 2 つの改造を行い、この寄与を低減させた。改造後、マスフロー流量に対する二次電子計数の直線性を確認したところ、15 sccm 以下で直線性が確認でき、最終的に 5 keV 以上の高エネルギー二次電子は直線性が保持された 10 sccm で測定すべきとの結論を得た。

続いて、次年度は、(3) マイクロチャンネルプレート(MCP)検出効率測定、(4) 二重微分断面積の系統的測定を行った。

(3)については、チャンバ、電子銃、平行平板型電子線分析器、MCP からなる専用装置を開発しており、この装置を用いてさらに高エネルギー電子に対して検出効率を求めた。

(4)については、6.0 MeV/u C^{6+} 入射にて、放出角度 20~160°まで 10°刻み、二次電子エネルギー 1 eV~最大 12 keV(ログスケールで 20~30 点)の広範囲な二次電子生成二重微分断面積(DDCS)を測定した。特に、低エネルギー領域(1 eV<E<100 eV)については、マスフロー流量を変えて二次電子計数の直線性(リニアリティ)を確認し、それを直線フィットすることで流量ゼロでの値(つまり Y 切片値)を求め、これをバックグラウンド計数と再評価し、より信頼性の高い断面積を得た。

最終年度は、前年度に引き続き 6.0 MeV/u C^{6+} 入射にて二次電子生成二重微分断面積の系統的測定を行った。トラック構造解析では、弾性散乱は ZBL ユニバーサル遮蔽ポテンシャル下でのクーロン散乱として計算により、励起は水蒸気への電子線衝撃における半径

験的解析式の1つの Miller & Green モデルにボルン近似を仮定して Z^2 スケーリングにより、それぞれの断面積を求めた。なお、発生二次電子のその後のトラック構造は S. Uehara, H. Nikjoo らが開発した電子輸送モンテカルロコード(KURBUC)を用いている。

4. 研究成果

平行平板静電型電子線分析器の改造による耐電圧向上、分析器-MCP 間へのサプレッサ付きカーボンコレクターの設置による散乱二次電子の抑制、マスフロー流量を変えて二次電子計数のリニアリティ確認によるバックグラウンド再評価等により、高エネルギー二次電子は減少し、MeV 領域の重イオン入射では Fermi-Shuttle 加速の寄与は当初の予想より小さいことが分かった(図 1, 2)。さらに、CDW-EIS による理論計算値との比較では、1~10 eV では、1 eV の前方(<40°)を除いて非常に良く一致した一方、20 eV 以上では、(特に)後方で不一致が観測された。また、微分断面積については、1~100 eV の低エネルギー領域で Z^2 スケーリング値より最大で約 20%減少し、高 Z イオン入射では高速イオン入射の電離、励起におけるボルン近似が過大なることを示唆するものとなった。続いて、得られた断面積を用いて、水中へのブラッグピーク領域の He^{2+} , C^{6+} 入射におけるトラック構造及び動径線量分布をシミュレーションした(図 3)。動径線量分布と Chatterjee モデルとの比較では、入射イオン軸近傍の高線量領域(core)で不一致がみられ、モデルの見直しを要するものとなった(図 4)。

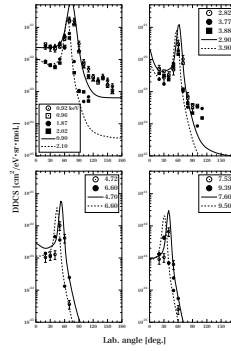


図 1. 水蒸気への 6.0 MeV/u C^{6+} 入射による DDCS 角度分布(放出角度 20~160°, 二次電子エネルギー 1 eV~10 keV)と CDW-EIS 理論計算値との比較。

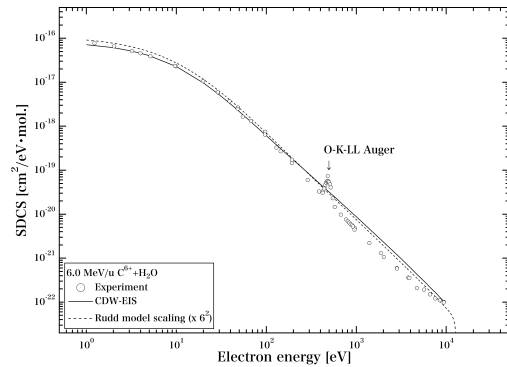


図 2. 水蒸気への 6.0 MeV/u C^{6+} 入射による二次電子生成微分断面積(SDCS)エネルギースペクトルと Rudd モデルスケーリング(x36)、CDW-EIS 理論計算値との比較。

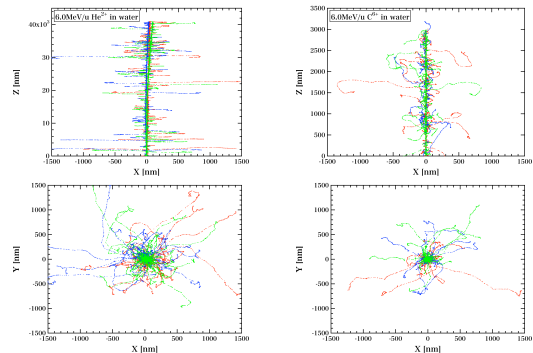
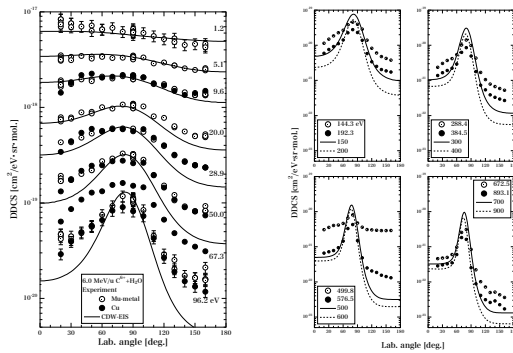


図 3. 水中へ 6.0 MeV/u He^{2+} , C^{6+} イオンが入射し、それぞれ 5%, 1% エネルギー損失するまでのトラック構造。

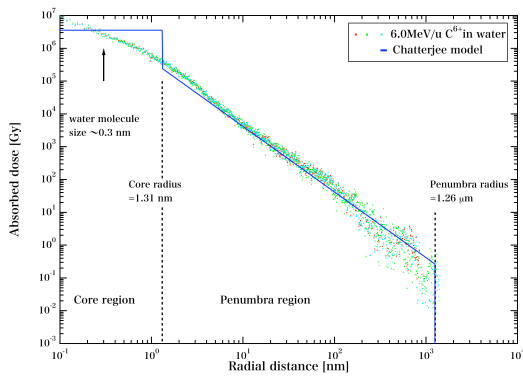


図 4. 6.0 MeV/u C⁶⁺イオントラック構造から求めた動径線量分布.

現在、新たな知見として得られた Z² スケリングからのズレの検証や、非完全電離イオン入射による遮蔽効果等の観測のため、C⁴⁺、O⁵⁺、O⁸⁺入射で断面積測定を継続している。また、トラック構造解析では、線エネルギー、比エネルギー等のマイクロドジメトリ量を求め、それらと細胞照射実験データとの相関を調べることで RBE の再評価を進めている状況である。さらに今後の展開として、F⁹⁺あるいは Ne¹⁰⁺入射で断面積を系統的に測定した後、生成二次イオンの精密測定とその生物効果の解明に着手したいと考えている。

断面積データについては、近年、データの相互利用、有機的なフィードバックを目的とした原子分子データベースの構築、XML(eXtensible Markup Language)等による標準化が進められているが、重粒子線と生体構成原子/分子の相互作用に関する高精度基礎データは未だ整備されていない。本研究で得られる水蒸気ターゲットデータを組み入れることにより、重粒子線治療における治療計画の精密化、テーラーメイド医療の確立、その結果としてがん治癒率の向上に寄与できると言える。

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 4 件)

1. D. Ohsawa, H. Tawara, T. Okada, F. Soga, M.E. Galassi, and R.D. Rivarola, Secondary electron emission from water vapor under 6.0-MeV/u C⁶⁺ ion impact, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, in press.

2. Dal Cappello, C. Champion, O. Boudrioua, H. Lekadir, Y. Sato and D. Ohsawa, Theoretical and experimental investigations of electron emission in C⁶⁺ + H₂O collisions, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 査読有, 267, 781-790 (2009).

3. 岡田豊史, 炭素線衝撃による水蒸気からの二次電子放出とトラック構造解析, 千葉大学大学院理学研究科基盤理学専攻物理学コース, 平成 21 年度 修士論文.

4. T. Okada, D. Ohsawa, H. Tawara, F. Soga, T. Murakami, Y. Honma, K. Noda, "Secondary electron emission from water vapor by carbon ion (6.0 MeV/u C⁶⁺) impact and track-structure analysis in liquid water", Proc. of the 11th Symposium on Accelerator and Related Technology for Application ARTA 2009, 査読無, 41-44, 2009.

[学会発表] (計 4 件)

1. D. Ohsawa, H. Tawara, T. Okada, F. Soga, M.E. Galassi, and R.D. Rivarola, Secondary electron emission from water vapor under 6.0-MeV/u C⁶⁺ ion impact, XXVII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, 2011, July 27- August 2, Belfast, Northern Ireland, UK.

2. 大澤大輔, ブラッグピーク領域の炭素線衝撃による水蒸気からの二次電子放出とトラック構造解析, 日本物理学会 第 67 回年次大会 領域 1 シンポジウム 放射線が生体に与える影響 —原子分子から生物まで—, 2012 年 3 月 24 日-27 日, 関西学院大学 西宮西宮上ヶ原キャンパス.

3. 大澤大輔, 俵博之, 上原周三, 曾我文宣, ブラッグピーク領域の炭素線衝撃による水蒸気からの二次電子放出とトラック構造解析, 日本原子力学会 2011 年 秋の大会, 2011 年 9 月 19 日-22 日, 北九州国際会議場.

4. T. Okada, D. Ohsawa, H. Tawara, F. Soga, T. Murakami, Y. Honma, K. Noda, Secondary electron emission from water vapor by carbon ion (6.0 MeV/u C⁶⁺) impact and track-structure analysis in liquid water, 11th Symposium on Accelerator and Related Technology for Application, 2009 年 6 月 12 日, 東京工業大学百年記念館.

[その他]

ホームページ等

<http://kyouindb.iimc.kyoto-u.ac.jp/j/vQ8h0>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大澤 大輔 (OHSAWA DAISUKE)

京都大学・放射性同位元素総合センター・助教

研究者番号 : 9 0 3 2 4 6 8 1

(2)研究分担者

戸崎 充男 (TOSAKI MITSUO)
京都大学・放射性同位元素総合センター・
准教授
研究者番号：70207570

(3)連携研究者

該当無し