

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25年6月14日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560834

研究課題名（和文） 高エネルギー重荷電粒子に対するW値の系統的研究

研究課題名（英文） Study of W-values for High Energy Charged Particles

研究代表者

佐々木 慎一（SASAKI SHINICHI）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・放射線科学センター・教授

研究者番号：80178649

研究成果の概要（和文）：

W値は、放射線による生成電荷量とエネルギーを直接結びつける基礎量であり、粒子線医学や放射線計測の分野では重要な実用量でもあるが、重荷電粒子に対する実験値は極めて少ない。本研究では、高エネルギー重荷電粒子（ He^{2+} から Fe^{26+} ）に対するW値を気体中で測定し、エネルギーや気体圧力への依存性を調べた。エネルギーが 3MeV/n 以下ではW値は増加し、高くなると一定値に漸近し、電子のW値に近い値となること等が観測された。圧力依存性は $0.05\sim 0.5\text{MPa}$ の範囲では有意に観測されなかった。

研究成果の概要（英文）：

There are few experimental data for W for heavy ion and that is one of indefinite parameters in dose evaluation or in presumption of absorbed energy. We aim to determine W for heavy ions as a function of energy, to provide data to application fields such as the heavy ion therapy, and to explicate mechanisms of the dependence. In this study, we measured W and the differential values of $W(w)$ for He^{2+} , C^{6+} , N^{7+} , O^{8+} , Si^{14+} , Ar^{18+} and Fe^{26+} , and the clear dependence of energy was observed in lower energy of less than 3MeV/n .

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：放射線物理・W値

1. 研究開始当初の背景

放射線に対する物質の電離効率を表す W 値（1イオン対を生成するために必要な粒子の平均エネルギー）は、放射線によって発生した電荷量と物質に吸収されたエネルギーとを直接結びつける放射線物理学や放射線計測における基礎物理量である。特に、重荷電粒子に対する W 値は、粒子線医学、放射線生物学、宇宙放射線計測、宇宙放射線防護等の新たな分野で吸収エネルギーを求めるための重要な実用量でもある。アルファ線やベータ線に対する W 値は古くから測定がなされ、ほとんどエネルギーによらず一定であり、多くの気体で確立された値がある。しかしながら、重荷電粒子に対する W 値の実験データは極めて少ない現状にあり、特に重粒子のエネルギーに対する依存性に関する知見はほとんどなく、粒子線治療や宇宙線量測定など重荷電粒子が対象となる測定では、結果における曖昧さや誤差を生じる要素の一つになっている。また、重荷電粒子に対していくつか取得された希少な実験データは、数 Torr（1~2kPa）程度の極低圧で測定されたもので、また、粒子自体のエネルギーも数 MeV 程度以下と低い。これらのデータと大気圧近傍（常圧）の値との比較や相関を試みるためには、圧力依存の問題が解決される必要がある。現状では、この圧力依存に関してもほとんど測定例がなく、直接の比較が行えない状況にある。

粒子のエネルギーが完全に吸収された場合の電離（全電離）とその一部しか吸収されなかった場合の電離（部分電離）では、その収率（前者が W 値に対応し、後者は微分 W 値と呼ばれ w で表される）は異なり、特に重荷電粒子では、エネルギーに対する応答にも相違があると考えられる。しかしながら、これに対する系統的な測定は十分には行われたことがなく、同意味のように使用されることも珍しくない。

2. 研究の目的

本研究では、放射線物理学や放射線計測の観点からの興味ばかりではなく、粒子線医学、放射線生物学、宇宙放射線計測、宇宙放射線防護等分野でよく参照される 1~200MeV/n の範囲の高エネルギー重荷電粒子、 He^{2+} 、 C^{6+} 、 N^{7+} 、 O^{8+} 、 Ne^{10+} 、 Si^{14+} 、 Ar^{18+} 、 Fe^{26+} 等に対する W 値、及び微分 W 値 (w) を、基本的かつ一般的な放射線検出媒体ガスである希ガス、空気、生体組織等価ガスにおいてその圧力を変化させて測定し、データの蓄積並びに上で述べた分野への提供を行う。ま

た、エネルギーや粒子種類、並びに試料気体圧力に対する W 値の依存性の有無について検証を行うことも、本研究の目的とするところである。さらには、取得したデータを元にして、依存性が発生するメカニズムを探る試みを目指したい。

3. 研究の方法

重荷電粒子は放射線医学総合研究所の重イオン加速器 HIMAC（からのビームを用いた。加速器を用いる実験においては、ビーム中の粒子数並びにそれらの平均エネルギーを知ることが、1粒子当たり吸収されたエネルギーを求める際に重要であるが、ビーム電流測定の精度等曖昧な点が多くある。本研究ではパルス計測法により個々の粒子の入射イベント毎の電離電荷を計測することでビーム中の粒子数決定等の曖昧さを排除した。具体的には、高速電流増幅器を用いてイオンを収集電荷とする、スローパルス法を測定法として開発し適用した。通常のように、電子を収集電荷とできないのは、試料とするガスの中に空気のように酸素等の電子親和性の気体を含むものがあるためである。100MeV/n 以上の高エネルギー粒子、並びに高圧試料気体に対する測定を可能とするように検出体積の大きなしかも高圧に耐える電離箱実験装置が必要で、これらについては新たな設計開発並びに製作を行い、80 x 80 x 500 mm（ビーム方向に 500mm 長）の有効体積を有する電離箱を完成させた。内部の電荷収集用の電極は 5 分割され、前後の電極は有効電場を形成するために使用され、中央に位置する 3 つの電極からの信号が、収集電荷として測定される。一方、粒子エネルギーの決定精度向上のため、飛行時間分析型 (TOF) エネルギー測定装置を導入し、電離箱の下流部に設置した。飛行距離は最大で 6 m であった。この TOF 装置においては、時間分解能を向上させる目的で、高速光電子増倍管 (PMT) の導入、スタート信号を得るための 10 μm 膜厚のプラスチックシンチレータの設定、ストップ信号には光電子増倍管への直接入射により得られるものを用いるなど、工夫改良を重ねながら、最終的には時間分解能 22 ピコ秒 (1σ) を達成しうる手法を確立した。TOF の測定結果は、SRIM 並びに PHITS 等の計算コードによる結果と比較した。その差異は、飛行時間で $\pm 0.2 \sim \pm 1.5\%$ 、エネルギーにおいては $\pm 0.5 \sim \pm 3\%$ であった。

4. 研究成果

試料気体 (純アルゴン、空気 (0.9%Ar + 21%O₂ + 78.1%N₂の標準混合ガス)、生体組織等価ガス (5.4%N₂ + 39.6%CO₂ + 55.0%C₃H₈の標準混合ガス))における、He²⁺、C⁶⁺、N⁷⁺、O⁸⁺、Si¹⁴⁺、Ar²⁰⁺、Fe²⁶⁺等の粒子 (低エネルギー領域: 2~6 MeV/n、及び高エネルギー領域: 100~300 MeV/n) に対する W 値を測定した。試料気体の圧力は、低エネルギー域で 0.02~0.2 MPa、高エネルギー域では、2 次電子の飛程を考慮して 0.2~0.5 MPa の範囲で設定した。He²⁺を除く粒子に対して、いずれの試料気体においてもエネルギー依存を観測した。一方、粒子のエネルギーが大きくなり 6MeV/n 程度までの領域では、いずれの試料気体においても W 値は一定値に漸近する。この漸近値は、測定に用いた試料気体における He²⁺、α粒子や電子に対する W 値にほぼ等しく、微分 W 値にほぼ等しいかわずかに大きい。Si¹⁴⁺、Ar²⁰⁺等の重い粒子では、漸近する傾向は示すものの、その微分 W 値や電子に対する W 値よりも大きな値が得られ、粒子依存性の可能性を観測しているが、より詳細な実験が必要で、結論に至っていない。高エネルギー域では、粒子を完全に有効体積内で止める事はできず、W 値は測定できなくなり、微分 W 値のみが測定可能となる。このとき、微分 W 値は低エネルギー側の微分 W 値とほぼ等しくなる。圧力については、上述の範囲では明確な変化或いは依存性は認められなかった。圧力依存について明確に述べた報告はこれまであまり例がない。

これらの結果は、国際会議等で報告され、いくつかの研究報告の中でも公表された。また、データや電離特性に関する結果は、現在開発が進む LET 測定型生体等価宇宙線量計 (PS-TEPC) や「壁なし生体組織等価線量計」の基礎データや検出器パラメータとして提供された。また、本研究に関連して、陽子や光子を含む種々の粒子に対する W 値測定の現状について総括を行う機会があり、その中では本研究の成果を示し、重荷電粒子と他の粒子の実験手法、測定状況の違いを明確化させた。

エネルギー依存の起こるメカニズムについては、電子以外では十分明らかになっていない。重荷電粒子において指摘される、核との弾性散乱によるエネルギー損失や荷電変換による損失等については、極めて低いエネルギー域では考慮しうるが、今回の測定のような 3MeV/n 前後の高エネルギー域で観測される依存性については、現状では十分な説明ができない。粒子の種類に関する粒子依存性が関与している可能性もあり、取得データの詳細な解析を行いながら、機構解明を進める。

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 10 件)

- (1) S. Sasaki, "気体の W 値測定の現状と問題点", RADIOISOTOPES, 61 (2012) 415-427. (査読あり)
- (2) S. Tsuda, S. Sasaki et al., "Systematic Measurement of Lineal Energy Distributions for Proton, He and Si Ion Beams over a Wide Energy Range Using a Wall-less Tissue Equivalent Proportional Counter, J. Radiat. Res., 53 (2012) 264-271. (査読あり)
- (3) S. Sasaki, "LET 計測に基づくリアルタイム宇宙放射線量計の開発", J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., 28 (2011) 67-73. (査読あり)
- (4) S. Sasaki et al., "Average Energy to Produce an Ion Pair in Gases for High Energy Heavy Ions", IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Record, (2011) 1873-1876. (査読なし)
- (5) S. Tsuda, S. Sasaki, et al., "Measurement of microdosimetric spectra with a wall-less tissue-equivalent proportional counter for a 290 MeV/u ¹²C beam", Phys. Med., Biol. 55 (2010) 5089-5101. (査読あり)
- (6) S. Sasaki et al., "重荷電粒子に対する気体の W 値に関する研究", 放医研重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書, HIMAC-134, (2010) 283-285. (査読なし)

[学会発表] (計 7 件)

- (1) S. Sasaki, et al., "A New Space Dosimeter, PS-TEPC: Position-Sensitive Tissue Equivalent Proportional Chamber", IEEE Nucl. Science Symposium and Med. Imag. Conference, Anaheim, USA (26 Oct- 2 Nov., 2012).
- (2) S. Sasaki et al., "Experimental Study of Ionization Yields in Gases for Heavy Ions", Symposium of Research Project with Heavy Ions at NIRS-HIMAC, Chiba (23-24 April, 2012).
- (3) S. Sasaki, et al., "Average Energy to Produce an Ion Pair in Gases for High Energy Heavy Ions", IEEE, Valencia, Spain (23-29 Oct. 2011).
- (4) S. Sasaki et al., "Experimental Study of Ionization Yields in Gases for Heavy Ions", Symposium of Research Project with Heavy Ions at NIRS-HIMAC, Chiba (21-22 April, 2011).

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐々木慎一 (SASAKI SHINICHI)
高エネルギー加速器研究機構・放射線科学
センター・教授
研究者番号：80178649

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)協力研究者

佐波俊哉 (SANAMI TOSHIYA)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速
器研究機構・放射線科学センター・准教授
研究者番号：90321538

俵裕子 (TAWARA HIROKO)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速
器研究機構・放射線科学センター・准教授
研究者番号：30188453

齋藤究 (SAITO KIWAMU)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速
器研究機構・放射線科学センター・研究機
関講師
研究者番号：40370077

岸本祐二 (KISHIMOTO YUJI)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速
器研究機構・放射線科学センター・博士研
究員
研究者番号：50583481

飯島和彦 (IJIMA KAZUHIKO)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速
器研究機構・放射線科学センター・技師
研究者番号：60391794