

平成22年 5月31日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19560055

研究課題名(和文) 重荷電粒子に対する気体のW値に関する総合的研究

研究課題名(英文) Comprehensive studies of W-values for heavy charged particles in gases

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)：重荷電粒子に対するW値(粒子が気体中で完全に停止するまでに1イオン対を生成するのに失う平均のエネルギー)を、放射線計測上重要な希ガス、空気、組織等価ガスについて粒子エネルギーを変えて測定し、He²⁺以外の粒子についてエネルギー依存性を観測した。一方、微分W値(粒子が通過する際の部分的な電離に対するW値でw値と表記)は上記のエネルギー範囲では一定値となることが判明した。これらのデータはほとんど取得されたことが無く、結果を学術雑誌、国内外の会議等で報告し、宇宙線量計測や粒子線治療等の実務分野に用いるデータとして蓄積、提供した。

研究成果の概要(英文)：The determination of W , an average energy to produce an ion pair, for heavy ions in gases at atmospheric pressures has been made using heavy-ion beams from an accelerator as a function of the particle energy. For heavy ions except for He²⁺, the energy dependence of W was clearly observed, while W for He²⁺ was approximately constant over a wide range of the energy. The differential values of W (w) were also measured and are almost equal to the value of W for He²⁺.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2007年度 | 1,800,000 | 540,000 | 2,340,000 |
| 2008年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 2009年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 ・応用物理学一般

キーワード：W-値、宇宙放射線計測、粒子線治療、電離効率、Ionization yields、Heavy ions、Energy dependence、Tissue-equivalent gas

1. 研究開始当初の背景

放射線による物質の電離効率を表す量として知られるW-値は荷電粒子によって気体中に1

組の電子・イオン対を生成するために必要な平均エネルギー、と定義される。W-値は、物質に吸収された放射線エネルギーと発生電荷量を結

付ける基本的物理量であり、放射線エネルギーや吸収線量の絶対測定等、放射線計測並びに線量測定分野で重要な実用量でもある。また、電離現象が放射線と物質との相互作用の最も基本的かつ重要な過程であるため、放射線物理学、放射線化学、放射線生物学、放射線医学等々の分野においても W-値への関心は高い。しかしながら、一見して簡単に測定が可能と考えられる W-値であるが、試料気体の純度等に極めて敏感で、その精密測定には多くの注意が必要であり、現在でも幾つかの気体においては確立された値がないし、気体圧力への依存性についても未だ十分に掌握されていない。一方、最近の加速器の発展に伴って、広いエネルギーの種々の荷電粒子が得られるようになり、それを利用した科学研究が盛んに行われるようになった。この場合にも吸収エネルギーの決定には W-値が通例用いられるが、電子や α 線に対して W-値は広いエネルギー範囲でほとんど一定であるのに対して、重荷電粒子に対しては粒子依存性やエネルギー依存性を示し、重荷電粒子に対する線量評価や吸収エネルギーの推定の際の大きな不確定要素の一つとなっている。例えば、粒子線がん治療では患部での吸収線量を決定するために広いエネルギー範囲の高精度の W-値データが必要とされている。また、宇宙ステーション等で人間が直接種々の重荷電粒子を被ばくする機会が増え、今後の宇宙開発において最も重要な課題の一つに宇宙線量計測法の確立があげられるが、その基礎になるものは重荷電粒子に対する W-値のデータである。しかしながら、重荷電粒子に対する W-値の測定例は少なく、現存しても多くが低エネルギー粒子に対して数 Torr ($\sim 1\text{kPa}$) の気体圧力下で測定されたものであり、常圧での測定はほとんどない。W-値の圧力依存性について具体的な知見がない現状では、重荷電粒子に対する W-値はその詳細が知られていない段階にあると言えよう。一方で W-値に対する理論的アプローチも進展してきてはいるが、その対象は電子に対する低圧の水素やヘリウム等の簡単な系に限られ、複雑な系への適用は未だ為されていない。ここでも、精度のよい系統的な実験データの提供が求められている状況にある。

2. 研究の目的

本研究では、放射線計測・線量計測上基本的かつ重要な希ガス、空気、組織等価ガス等の気体における W-値を、放医研 HIMAC 等の加速器からの He、C、N、Ne、Ar 等重荷電粒子に対して、粒子の入射エネルギーを変化させながら測定し、エネルギー依存並びに粒子依存に関するデータの蓄積、提供を行う。特に、ここでは粒子線治療分野で必要とされるエネルギー域である数 MeV/u 以下のエネルギーに重点をおき、照射条件に近い実験条件（常圧、常温）で測定する。また、圧力

を常圧から低圧へ変化させてその依存性について調べ、W 値の圧力依存性の有無を検証する。同様な条件下で、微分 W-値も測定し、その差異について検討する。これらのデータを用いて、エネルギー依存性、粒子依存性並びに圧力依存性についてそれが発生する場合の機構解明にむけて詳細な検討を行う。

3. 研究の方法

W-値の決定には、粒子エネルギー及び生成電荷数の絶対値をそれぞれ掌握することが本質となるが、加速器ビームを用いる場合には、これらに加えて入射粒子数を精度良く知ることが重要となる。本研究では、生成電荷の絶対測定のために電離箱を用い、入射粒子数を可能な限り単一（1 々の入射粒子）とし、入射粒子毎に発生する信号を観測する「パルス法」を採用する。これにより、入射粒子数に対応した波高分布を区別して測定できる。一方、従来の平均電荷電流を測定する「積分法」では、入射粒子数を平均ビーム電流の測定から求めるために、①その測定誤差、②粒子数及びエネルギー変化の幅、③2 次電子の影響に対する測定の妥当性、等に十分配慮する必要があるし、本質として多くの粒子のエネルギーディポジションによる電離電荷の測定となるので、必ずしも単一粒子による電離と同一にはならない、等の曖昧さを排除できない。パルス法は通例電子を収集電荷として用いるが（これを「電子パルス法」と呼ぶ）、ここでは高速電流増幅器を用いてイオンを収集電荷としてパルス信号として取り出す（「イオンパルス法」と呼ぶ）。電子パルス法では、2 電極電離箱では信号の波高値がビームの入射位置に依存するため、正確な測定のためにはグリッド型電離箱とする必要があるが、この方式の電離箱では試料気体の圧力を低下させるとグリッドによる電子捕捉、電子増倍等の影響が現れてくるため、低圧での測定には適用が困難である。イオンパルス法は測定の時定数が数ミリ秒から数百ミリ秒に及ぶきわめて遅いパルス法であり、これまで重荷電粒子に対する W-値測定に用いられたことはないが、上記の電子パルス法における短所はこの方法によれば原理的に問題とならない。電離箱には、その直前に設定された金属薄膜から成るエネルギーデグレーダーとコリメータでエネルギーと数を減弱した粒子が入射される。粒子エネルギーは TOF 装置を用いて精密に測定される。

本研究においては、実験装置として中エネルギー（6 MeV/n 以下）粒子測定用電離箱（LIC）と高エネルギー（6 MeV/n 以上）粒子測定用電離箱（HIC）の 2 つの電離箱を準備した。どちらも並行平板型 2 電極構造とし、LIC はグリッド電極を追加して電子パルス法の適用も可能とした。さらに粒子飛程方向（ビーム方向）の電荷分布を得ることができるように、分割型収集電極を採用し、電極全体の長さはビーム方向に対して 30 cm 程度、幅は低圧測定時の 2 次電子の飛程長

を考慮して 4 cm とした。収集電極の分割数は 10 とした。それぞれの分割電極より信号を取り出すことにより、全電離量とともに電極毎の電離量を測定でき、ビーム方向に対する1次元電荷分布を得ることができる。各分割電極で測定される電離量は w -値を与える。図1に LIC の概要を示す。

一方、HIC では 100 MeV/n 程度までのエネルギーを有する粒子の電離を観測できるように、電極を大型化して有効体積を大きく設定した (82x82x200 mm)。また、試料気体の圧力を変化させた測定が行えるように使用圧力範囲を最大 7 気圧までと大きく設計した。100 MeV/n 以上の粒子に対しては本装置では粒子を試料気体内で完全に停止させることは出来ないため w -値のみの測定が可能である。

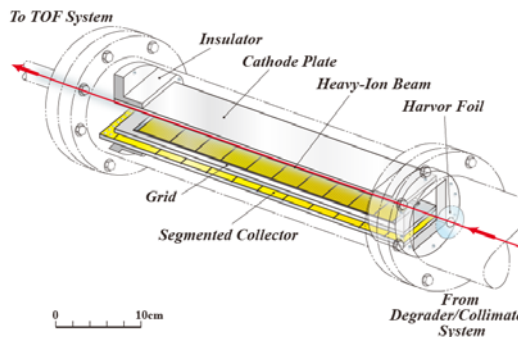


図1 中エネルギー粒子測定用電離箱 (LIC) . イオンパルス法で測定する場合は、グリッド電極を取り外し平行平板2電極型電離箱として使用する。

4. 研究成果

試料気体として、線量計測及び放射線測定分野で最も基本的で重要なアルゴン、空気、組織等価ガスを用い、その W -値を He^{2+} 、 C^{6+} 、 N^{7+} 、 O^{8+} 、 Ar^{18+} 等の重荷電粒子に対して入射エネルギーを変化させ、特にエネルギー依存性の観測に重点をおいて測定した。LICを用いた測定では、6 MeV/u 程度の入射エネルギーを持つ粒子を用いて、そのエネルギーを減弱させ、常圧、常温に近い実験条件下で測定を行っている。図2に測定結果の例として空気における C^{6+} 及び He^{2+} 等の結果を示す。図からわかるように、 W -値は、 He^{2+} に対しては入射エネルギーによらないほぼ一定の値をとるが、 C^{6+} や N^{7+} に対しては、エネルギーが小さくなるに従い W -値が増大する、明確なエネルギーへの依存性を示す。また、微分 W -値(w -値)は、 He^{2+} 同様にほぼ一定値をとり、その値自体も He^{2+} の(積分) W -値に一致している。エネルギー依存性は O^{8+} の等他の重イオンでも同様に観測されている。

この傾向は試料気体をアルゴンや組織等

価ガスとした場合でも同様であった。 W -値に関して直接比較できるデータほとんど無いが、数 Torr の低圧空気に対して得られたデータと比較すると、常圧で得られた結果の方が高い粒子エネルギー域でエネルギー依存性が顕著に現れている。ただし、6 MeV/n 以上のより高エネルギー域において He^{2+} や微分 W -値 (w -値) と一致した値をとるかどうかは LIC を用いた実験では検証されていない。

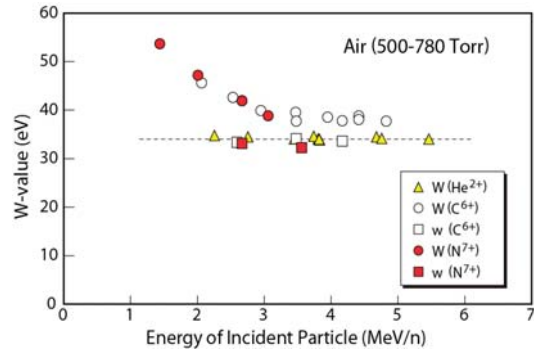


図2 空気中におけるいくつかの重荷電粒子に対する W 、及び w の測定結果の例

これに対して HIC を用いて測定では、100 MeV/n の入射エネルギーを持つ C^{6+} イオンに対するアルゴン中の w は 26.8 ± 1.0 eV となり、LIC で測定した 4.2 MeV/n のエネルギーに対する W (27.5 ± 1.1 eV) にほとんど一致した。これまでの LIC における測定によれば、 W は 3 MeV/n 以上でほぼ一定値をとることがわかっている。 C^{6+} イオンに対する w は 1.5-4.5 MeV/n のエネルギー範囲の He^{2+} イオンに対する W (26.5 ± 1.0 eV) に一致し、5 MeV アルファ線に対して ICRU(1979)が採用した値(26.4 eV)とも良い一致を示す。一方、組織等価ガスや空気の場合には、傾向はアルゴンの場合と同様であるが、同じ粒子エネルギーであっても粒子が大きくなるに従って(原子番号が増加するに従い) w が僅かながら大きくなる傾向が認められ、これらは He^{2+} に対する W に比しても大きい。現在、入射エネルギーを 180 MeV/n とした測定の解析を行い、これを確認する作業を急いでいる。

また、圧力に対する $W(w)$ -値の依存性に関しては、33 kPa~0.4 MPa (250~3040 Torr) の範囲で実験的に調べた結果、この範囲で圧力依存性は認められないことが確認された。

これらの結果は、学術誌や国内外の学会等で報告、公表された。また、宇宙放射線線量計として開発中の位置有感型組織等価比例電離箱(PS-TEPC)の基礎データとして提供され使用されている。

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 5 件)

- ① S. Sasaki, T. Sanami, K. Saito, K. Iijima, H. Tawara, W-values for Heavy Ions in Gases, IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Record, 査読なし、N13-146、2009.
- ② 佐々木慎一、佐波俊哉、俵裕子、飯島和彦、齋藤究、村上健、重荷電粒子に対する気体の W-値の総合的研究、放医研・重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書、査読なし、NIRS-M-226、2009.
- ③ 佐々木慎一、佐波俊哉、俵裕子、飯島和彦、齋藤究、村上健、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、査読なし、NIRS-M-214、2008.
- ④ S. Sasaki, T. Sanami, K. Saito, K. Iijima, H. Tawara, Energy Dependence of W-Values for Heavy Charged Particles in Gases, IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Record, 査読なし、N15-221、2007.
- ⑤ S. Sasaki, H. Tawara, T. Nagayoshi, Y. Fujita, T. Doke, K. Terasawa, K. Miuchi, H. Matsumoto, Y. Uchihori, Development of Position-Sensitive Tissue Equivalent Proportional Chamber for Space Dosimetry, IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Record, 査読なし、N28-2、2007.

[学会発表] (計 7 件)

- ① S. Sasaki, K. Saito, K. Takahashi, H. Tawara, T. Doke, K. Miuchi, T. Komiyama, N. Higashio, H. Matsumoto, Y. Uchihori, K. Terasawa, Development of a New Space Dosimeter Based on LET Measurements for Heavy Charged Particles, The 12th Vienna Conference on Instrumentation (VCI 2010)、2010年2月17日、Vienna、オーストリア.
- ② S. Sasaki, T. Sanami, K. Saito, K. Iijima, H. Tawara, W-Values for Heavy Ions in Gases, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2009年10月27日、Orlando, Florid、米国.
- ③ S. Sasaki, K. Saito, H. Tawara, T. Doke, K. Miuchi, T. Komiyama, H. Matsumoto, Y. Uchihori, K. Terasawa, Present Status of Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC) for Space Dosimetry, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2009年10月27日、Orlando, Florida、米国.
- ④ S. Sasaki, T. Sanami, K. Saito, K. Iijima, H. Tawara, Energy Dependence of W-Values for

Heavy Charged Particles in Gases, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2007年10月31日、Honolulu, Hawaii、米国.

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

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
佐波 俊哉 (Toshiya Sanami)
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
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・助教
研究者番号：40370077

(3) 協力研究者

飯島 和彦 (Iijima 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