

氏名・(本籍)	あら 新	い 井	ひで 英	ひこ 彦
学位の種類	理	学	博	士
学位記番号	理	第	708	号
学位授与年月日	昭和57年10月27日			
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当			
最終学歴	昭和40年3月 東北大学理学部卒業			
学位論文題目	各種気体中でのパルス電子線の自己集束性と気体電離過程の研究			
論文審査委員	(主査)			
	教	授	井	上
	教	授	池	上
	教	授	斎	藤
	教	授	吉	原
	朋	作	雄	一
		夫	賢	二

論 文 目 次

- 第1章 序 論
- 第2章 実験方法および各種単一気体イオン化の実験結果
- 第3章 低圧気体の電離
- 第4章 1～300Torr の各種気体の電離過程の数値解析
- 第5章 10～100Torr の各種単一気体の電離
- 第6章 He および Ar の電離過程に及ぼす添加気体の効果
- 第7章 総 括

論文内容要旨

第1章 序論

近年、大強度パルス電子線が核融合プラズマの加熱、気体レーザーの発振、パルスラジオリシス等の研究に広く用いられている。パルス電子線は、中性気体中に入射させると、そのイオン化の程度に依存して自己集束、あるいは発散する。この現象は次のように説明されてきた。すなわち、パルス電子線には、ビーム電荷間の反発力とビーム電流のつくる自己磁場による集束力が作用するが、ビームの先頭部分では反発力の方が強いいため、ビーム電子は気体のイオン化で生じた二次電子ともどもビーム外に押し出される。一方、正イオンは短い時間のスケールではその場に残留するので、ビームの後続部分の電荷は、この正イオンにより電気的に中和される。このためビームの後続部分では、ビーム電流の自己磁場による集束力が有効に働くようになって集束性が現れ、また、二次電子もビーム内にとどまるようになる。他方パルス電子線では、パルス初期のビーム電流の急増からビーム軸方向の逆向きの誘導電場が発生し、この作用によりビーム内の二次電子の加速と気体の二次イオン化が起こる。同時に、この誘導電場により媒体気体中には二次電子が逆流し、ビーム電流を中和する。この結果、ビームの自己磁場が弱まるため、ビームのより後続部分では発散する。

このような気体中でのパルス電子線の自己集束性と気体イオン化については、従来、プラズマ生成過程の研究の観点から、主に低圧の He 等について研究されてきたが、電場下の気体イオン化に関係するイオン化ポテンシャル、イオン化断面積、電子に対する全衝突断面積等の気体の特性との関係についてはほとんど検討されていない。

本研究は、上述のようなパルス電子線の自己集束性と気体イオン化の関係に注目して、ビーム挙動の測定に基づき、パルス電子線による各種気体のイオン化と上述のような各気体の特性との関係および気相中での二次電子の役割・挙動を明らかにしたものである。すなわち、ビーム軸上の線量 D_{obs} の測定からパルス電子線による気体イオン化過程を検討した。

第2章 実験方法および各種単一気体イオン化の実験結果

Febetron706からのパルス電子線(平均エネルギー約480keV、ピーク電流約8 kA、パルス持続時間約5 ns)を、気体を所定圧充填した照射セル中に入射させ、ビーム軸上に置いたアルミニウム・ブルーセロハン積層線量計中の深部線量分布の最大線量を測定し、この値をビーム軸上の線量 D_{obs} とした。この D_{obs} は、パルス電子線の自己集束度の尺度にもなっている。線量計の位置がビーム入射窓より遠くなるほど、ビームが発散したときの D_{obs} (バックグラウンド値)が小さく、ビーム挙動の観測に適するが、ビームの不安定性が増し、再現性が悪くなる。10.4cmの点ではバックグラウンド値は幾分高い(約0.3Mrad)が、再現性がよいので、本研究ではこの点に観測点を固定して実験を行った。この観測点での再現性は、 D_{obs} 値の標準偏差で $5.4 \pm 4.0\%$ であった。

各種の気体(希ガス, 無機気体, 炭化水素, ハロゲン化メタンについて 0 ~ 760 Torr の圧力範囲でビーム軸上の線量 D_{obs} を測定した。その結果, どの気体についても, 10 Torr 付近で極小の D_{obs} が, また数 Torr 付近と 100 Torr 付近で D_{obs} の極大が観測されたが, 低圧域の極大の現れる圧力は分子量の大きい気体ほど低圧に位置し, また, 10 ~ 100 Torr では希ガスのような簡単な気体分子中ほど D_{obs} が小さい傾向が見られた。これらの差異について以下の章で詳しく論じている。

第 3 章 低圧気体の電離

本章では, 数 Torr 以下の低圧気体中でのビーム挙動と気体イオン過程について論じた。この圧力域では, ビーム軸上の線量 D_{obs} は気体圧の増加と共にほぼ直線的に増加する。この D_{obs} と気体圧の関係を, ビーム電子による気体イオン化を仮定して Ar を例としてシミュレーションした。

まず, 各時間でのビーム空間電荷中和係数 $f_e(t)$ (= 正イオン数密度/ビーム電子数密度) を求めた。 $f_e(t)$ は, その時間 t までに通過したビーム電流の総量と $p\sigma_{\text{ion}}(E_b)$ で決定され, 気体圧増と共にビーム先端により近い部分で $f_e(t) = 1$ となる。ここで p は気体圧, $\sigma_{\text{ion}}(E_b)$ はビーム電子に対する気体の全イオン化断面積である。ビームに働く集束力は $f_e(t)$ と共に増加するので, 気体圧が増すとビームは次第に集束し, 線量計に入射するビームの有効部分が増加する。このモデルによると低圧域の圧力増による D_{obs} の直線的増加がよく説明される。

上述のモデルに基づくと, D_{obs} の直線的増加の見られる圧力域では, ある特定の D_{obs} を与える条件下では気体の種類に関係なく $p\sigma_{\text{ion}}(E_b)$ はある一定値を与える。この関係からビーム電子に対する気体の相対的全イオン断面積が求められ, 得られた値と文献値との間により一致が見られた。

第 4 章 1 ~ 300 Torr の各種気体の電離過程の数値解析

第 4 章では, 10 Torr 付近で見られたビーム軸上の線量 D_{obs} の極小値およびさらに気体圧を増した際に各気体固有の D_{obs} の増加現象を解明するため, He, Ar, H₂, N₂, CH₄ のパルス電子線によるイオン化過程の数値解析を行った。

前章の圧力以上では, ビーム電荷はパルス初期で中和され, 二次電子はビーム内にとどまるようになる。一方, パルス初期のビーム電流の急増から逆向きの誘導電場が発生する。ビーム内の二次電子はこの誘導電場によって加速され, 次々と気体をイオン化させる(二次イオン化)。この結果, 照射気体の導電率が増加し, 多量の逆電流が流れ, 照射セル中を流れる正味の電流 $I_{\text{net}}(t)$ は, ビーム電流より小さい値となる。これらの過程の数値計算を行い, 各時間における $I_{\text{net}}(t)$ や二次電子数密度等の値を推定した。また, この圧力域の D_{obs} の気体圧依存性は $I_{\text{net}}(t)$ の気体圧依存性で説明できることを示した。

計算結果の詳しい解析から, 本章の圧力域では誘導電場の二次イオン化の作用により急速な

二次電子増倍が起り、気体イオン化の大部分はこの寄与によることが明らかとなった。二次イオン化速度は E/p (E は電場強度) で決まる平均イオン化時間 t_i の小さいほど速い。10~100 Torr の D_{obs} と t_i の文献値の比較から、同一 E/p での t_i の大きい気体ほど、この圧力域の同一圧力での D_{obs} が大きいことが明らかとなった。この関係から、逆に上記圧力域の D_{obs} から気体間の t_i の大小関係を推定できる。気体圧が増すと E/p は小さくなり t_i が増大する結果、二次イオン化の寄与は減少する。また、二次電子の平均エネルギーが数 eV 以上であるため、パルス持続時間中での二次電子と正イオンの再結合はほとんど無視できる。

第 5 章 10~100Torr の各種単一気体の電離

第 5 章では、10~100Torr の各種気体間でのビーム軸上の線量 D_{obs} の差を次のような気体の特性と関連づけて考察した。すなわち、上記の圧力域の D_{obs} を決める電場下の気体の平均イオン化時間 t_i は、気体の特性としては、イオン化ポテンシャル IP、イオン化断面積 σ_i および電子に対する気体の全衝突断面積 Q_t と衝突 1 回当たりの電子の平均エネルギー損失率 f との積 $Q_t f$ で決まる。 $Q_t f$ は、気体との衝突による電子のエネルギー損失速度の定性的な尺度を意味する。

この考えに基づいて、 D_{obs} と気体の特性との関連について考察した結果、次のようなことが明らかとなった。すなわち、 $Q_t f$ の大きい気体中では 10Torr 付近から D_{obs} の大きな増加が見られる。とくに、 N_2 では IP が高く σ_i が小さいうえ、 $Q_t f$ が大きい。 N_2 のこの特性は、同じ二原子分子の H_2 と O_2 中に比べ、 N_2 中の D_{obs} が相当大きいことに現れている。この大きな D_{obs} は、 N_2 が 2 eV 付近の電子に対し大きな $Q_t f$ の山を示すためとみられる。このように低エネルギー電子に対する大きな $Q_t f$ の山が D_{obs} を増加させている例が N_2O , SF_6 , C_2H_2 , C_2H_4 および各種のハロゲン化メタンで見られた。これらの分子は SF_6 を除いて IP は比較的 low、そのうえ σ_i は十分に大きい。

他方、このような山をもたない気体は、 H_2 , O_2 , 希ガスおよびアルカンであるが、アルカンを除いたこれらの気体中では、 D_{obs} は相当高い圧力まで小さく、これらの気体中では誘導電場により二次電子が加速され易いことを示している。アルカンは数 eV~10eV の電子に対して大きな $Q_t f$ の山を示すので、 D_{obs} は H_2 等中に比べ、低圧から増加が始まる。また、10Torr 付近から大きな D_{obs} が観測される SF_6 とハロゲン化メタンでは、電子付着が顕著になるので、この効果も同時に D_{obs} を増加させている原因であろうと考えられる。

第 6 章 He および Ar の電離過程に及ぼす添加気体の効果

100~300Torr の He および Ar に各種気体を添加したときのビーム軸上の線量 D_{obs} の増加から、希ガス混合気体のイオン化過程に及ぼす添加気体の効果を論ずることができる。この D_{obs} の増加は、気体添加により t_i 値が増加したことを意味する。同じ気体を同程度添加しても He 混合系と Ar 混合系では D_{obs} の増加が著しく異なった。これらの実験結果と添加気体の特性 (IP, σ_i , $Q_t f$) との関連を本章で考察した。

He 混合系では、気体添加による D_{obs} の増加は、 N_2 を除いて小さい。これは、気体添加により電子のエネルギー損失速度が大きく増大し、系の二次電子エネルギー分布が低エネルギー側に移行したことによる He のイオン化量の減った分を、He より IP の十分低く σ_1 も十分大きい添加気体のイオン化が補っているからであろう。すなわち、IP が高く、IP 付近の σ_1 が小さく、 Q_{if} の大きい N_2 の添加による D_{obs} の増加は特に大きく、IP が低く、 σ_1 の大きい気体 (N_2O , CH_4 , C_2H_4) の添加による D_{obs} の増加は小さい。

Ar 混合系では、 D_{obs} がある圧力以上で急に立ち上がる。Ar の IP および σ_1 は、添加気体のそれらと同程度である。このため、Ar 混合系では、二次電子エネルギーを低エネルギー側に移行させる作用としての添加気体の特性が、 D_{obs} の増加に反映される。すなわち、IP が高く、 Q_{if} の大きい N_2 と SF_6 の添加による D_{obs} の増加は大きい。また、IP が低く、 Q_{if} の小さい O_2 と CH_4 添加による D_{obs} の増加は小さい。これに対して、 N_2O , C_2H_2 , C_2H_4 , CCl_2F_2 , CCl_3F では、IP が低く、IP 付近の σ_1 が大きいにもかかわらず、添加による D_{obs} の増加が大きい。この結果は、これらの気体が誘導電場による二次電子の加速を妨げ、二次電子エネルギー分布を低エネルギー側に大きく移行させる特性をもつことを示すもので、単一気体中の D_{obs} から得られた結論と一致する。

第 7 章 総 括

第 7 章では、本研究で得られた結論をまとめた。本研究で得られた知見は、気相放射線化学の初期過程における二次電子の役割・挙動、放射線照射生成物の生成機構を解明する上で有用であるばかりでなく、プラズマ化学、気体レーザー発振、気体放電、各種放射線計数管中の充填気体の作用機構等の研究に役立つと考えられる。

論文審査の結果の要旨

新井英彦提出の論文は、パルス電子線の自己集束性と気体イオン化の関係に注目して、各種気体中でのビーム電流強度の圧力依存性を測定し、その結果から、気体分子のイオン化と分子の特性との関係およびパルスビーム中での二次電子の挙動・役割についての知見を求めることを目的とする。これらの知見は、プラズマ生成の初期過程の解明、レーザー開発の基礎研究などとして重要である。

本論文は7章からなる。第1章においては、この研究の目的・意義、研究を進める上での基本的な考え方を述べている。第2章では、実験方法について述べるとともに、測定結果を総括的に示してある。すなわち、約480keV、5 ns のパルス電子線を各種の単一成分気体中に入射させたときの電子線量をアルミニウム・ブルーセロファン積層線量計で測定した結果、1～10 Torr 領域で極大値が得られ、10～100Torr に現れる極小値を経た値、再び増加することを見出した。第3章乃至第5章は、各圧力領域における現象を気体分子のイオン化特性との関係から論じたもので、第3章では1～10Torr 領域で極大値の得られる原因について論じ、第4章では1～300Torr 領域におけるイオン化過程について数値解析を行い、また第5章では極小値を通り過ぎた後の電子線量の増加について考察を行った。その結果、これら各圧力領域における現象はいずれも、一次電子線パルスによる標的分子のイオン化、初期のビーム電流急増による誘導電場の発生、これの作用による二次電子の加速および気体分子のイオン化(二次イオン化)、二次電子の逆流による一次ビーム電流の中和などの複合作用によるとして説明できることを示した。第6章は He, Ar に各種の気体を添加するときの電子線強度の変化から添加気体の効果を論じており、添加が二次イオン化を促進すると結論した。第7章は以上の結果のとりまとめである。

これらの成果は、新井英彦が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示しており、よって新井英彦提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。