

論文内容の要旨

Abstract of Dissertation

氏 名 Name 生駒直弥

現代において、粒子加速器は原子核・素粒子物理学のみならず社会的にも重要な役割を担っており、さらなる高度化が進められている状況にある。加速器の要素技術のひとつであり、真空のビームラインと高圧ガス雰囲気の標的などを分離するビーム窓は、ビームに直接さらされる機器であり、とくに加速器の大強度化を考えた時、窓の耐久性やビーム品質に与える影響の観点から重要な技術的課題となる。チャンネルを満たす高温のアークプラズマによって圧力保持を実現する「プラズマウィンドウ (PW)」は、高い耐久性と圧力保持性能を両立する革新的な圧力保持デバイスであるが、現時点で達成されている直径は数mmオーダーと小さく、空間電荷効果を抑えるなどの理由からビーム径の大きな大強度粒子加速器に応用するには、数10mmオーダーの直径が要求される。しかし、そのような領域でのデータは提供されておらず、設計の指針もない。そこで本研究では、PWを大強度粒子加速器のビーム窓に応用するために、実機スケールの大口径PWを開発し、その特性を調べることを目的とした。

本論文は5章で構成される。

第1章では、本研究の背景と目的について述べた。粒子加速器の応用例として、放射性同位体ビームによる重元素の合成プロセスの検証や、粒子ビームを用いた放射性廃棄物（マイナーアクチノイド、長寿命核分裂生成物）の核変換処理、そして、粒子ビームあるいはそれによって駆動される中性子を用いたがん治療などを挙げ、加速器の重要性について述べた。そして、加速器の要素技術であるビーム窓について、従来の固体膜や差動排気と比べてPWの優位性と課題について説明し、本研究の目的を述べた。理化学研究所の重イオン加速器施設RIBFについても紹介し、ガス荷電変換装置における圧力保持にPWを応用する場合のパラメータについても試算した。

第2章では、直流放電、およびアーク放電の理論と、アーク放電の発展型である器壁安定化カスケードアーク放電について述べた。自由燃焼アークでは、電流を増加させてもプラズマ柱が広がるため電流密度を一定以上に上げることができず、得られる温度に限度がある。そこで、器壁安定化アークでは、水冷壁によってプラズマ柱の周辺部を冷却し、温度が高く導電率も高い中心部にのみ電流を集中させ、より高い温度を実現している。さらに、PWに採用されている器壁安定化カスケードアーク放電は、水冷された金属電極を、絶縁体を挟んでスタックすることで壁を形成し、より大きな熱流束にも耐える構造となっている。

第3章では、本研究で開発した大口径PWおよび実験セットアップについて述べた。従来のPWの中間電極は、無酸素銅のディスクに冷却水路を切削加工し、電子ビーム溶接でふたをする構造であり、チャンネル直径を可変できず、また製作にも高いコストを要した。そこで本研究では、中間電極は分割構造とし、プラズマに接する内側電極には耐アーク性の高い銅タングステンを選定し、外側はステンレスを採用した。内側電極を交換することで、容易に直径を可変して系統的な実験が可能となった。実験セットアップは、PWの点火およ

び圧力測定のための真空チェンバーと，電子温度測定のための可視光分光計測系から構成された．

第4章では，6，10，15，20mmの4種類のPWの直径で得られた圧力測定および電流-電圧特性の測定結果について述べた．プラズマを点火することで，いずれの直径でも保持圧力の増加が観測され，大口径での保持圧力の増加が初めて実証された．次に，電流-電圧特性からSpitzerの式を用いて見積った電子温度は，直径によらず約2eV程度という傾向が得られた．さらに，プラズマの可視光分光からBoltzmann plot法を用いて得た電子温度は，いずれの直径でも約0.8eVという結果となった．この電子温度を用いて，円管を流れる粘性流を記述するHagen-Poiseuilleの式に基づく理論式から保持圧力の理論値を求め，実測の圧力と比較した．その結果，PWの直径が大きいほど実測値が理論値を下回り，既知の理論式が適用できなくなることを見出した．この原因として，電離度の上昇に伴う粘性の減少が考えられることを示し，大口径PWの設計には，作動流体を従来のように高温ガスとしてではなく，プラズマとして考える必要があることを示した．

第5章では，上記をまとめ，本論文の総括とした．