

審査の結果の要旨

氏名 梶田 信

国際熱核融合実験炉(ITER: international thermonuclear experimental reactor)などの次期核融合実験炉において周辺プラズマの理解と制御は重要な課題であり、プラズマ対向壁(ダイバータ板)への熱負荷軽減のために、プラズマを壁直前でガス化させる“非接触プラズマ”が ITER での標準運転モードとして考えられている。非接触プラズマ形成の物理機構にはプラズマの体積再結合過程が重要であり、その素過程の一つに負イオンを介した再結合過程の存在が指摘されている。この再結合素過程は理論的な予測がされたものの、実験検証に関しては多くの課題を残しており、負イオン密度の直接的な計測は素過程を解明する重要な手がかりとなりうるものである。ただし、負イオンの計測に広く用いられてきたレーザー光脱離法(LPD: laser photodetachment)をダイバータ領域のような高密度で磁場が存在するプラズマに適用する際にはいくつかの問題が指摘される。本論文は、それらの問題をモニタする手法、回避して計測をおこなう手法の開発を行い、ダイバータ領域での負イオン密度計測法を確立し、さらにその手法をダイバータ模擬装置 MAP-II に適用し負イオンの生成、消滅、輸送過程に関する考察をおこなったものである。

本論文は5章よりなる。

第1章は序論であり、研究背景として核融合ダイバータ領域における非接触プラズマ生成の意義、及び非接触プラズマ形成における負イオンの役割について指摘している。

第2章では本研究の主旨である負イオン計測法であるレーザー光脱離法の原理について説明している。次にレーザー光脱離法をダイバータ領域に適用する際に問題となる以下の4つの問題点を指摘している。すなわち(1)プラズマ中の電子密度揺動に伴うノイズ、(2)レーザーがプローブ電極に引き起こすアブレーション、(3)シース、捕集領域が磁場に沿って伸びることによる悪影響、(4)低温の非接触再結合プラズマにおいてシングルプローブ計測に異常性があらわれること、である。さらに本章では従来のレーザー光脱離法に改良を加え、これらの問題点を回避する手法を提案している。

第3章では前章で提案した手法の評価を行った結果について述べている。(1)については検出システムに適切なハイパスフィルタを挿入することによって回避できることを示している。(2)についてはアブレーションのメカニズムを解明し、モニタ可能であることが示されている。さらに積極的なアブレーションを回避する手法として、加熱プローブの利用とレーザー光路に影を形成しプローブへの直接照射を防ぐエクリプス光脱離法の開発について述べられている。(3)については(2)のエクリプス光脱離法をシース、及び脱離電子の捕集領域の直接計測に応用可能であることが示され、それを用いて磁場の影響を調べることが

できることが述べられている。シース厚測定の結果、弱磁場条件で円筒のプロープを用いた場合でもチャイルド・ラングミュア理論による平板シース厚の理論式に近い値が得られており、磁場の影響が示唆されている。

第4章ではダイバータ模擬装置 MAP-II において負イオンを計測した結果について述べられている。接触プラズマの生成条件と非接触プラズマの生成条件について負イオン密度とその生成に寄与する水素分子振動励起状態の分光測定を同時に行い、負イオンの生成・消滅モデルと計測値が比較されている。非接触プラズマについては問題点(4)を回避するために提案した、電子温度計測にダブルプロープを併用する手法が用いられている。負イオンは周辺部に局在しており、電子温度の高い中心部では電子衝突による消滅速度が大きいことが示されている。接触プラズマの条件においては、振動温度に強く依存していることが示されている。ただし、輸送による損失項を仮定する必要があることも述べられている。それに対し、非接触プラズマの条件では、ガス圧増加に伴う振動温度の減少から予測される負イオン密度と比較して有意に多くの負イオンが周辺部に存在していることが示されている。その理由として、中心部で生成された負イオンが周辺部に輸送される量を流入項として付与しなければならないことが示唆されている。

これらの結果より、電子温度、電子密度の関数である消滅速度が両者の違いに寄与している可能性が高いと結論づけられている。さらに、非マックスウェル分布をした振動励起分布の寄与、及び粒子輸送シミュレーションの必要性が示唆されている。

第5章は総括であり、結論と今後の展望が述べられている。

以上要するに、本論文では、従来の負イオン計測手法では困難であったダイバータ領域に代表される磁場環境、高密度への適用を可能なシステムが提案・実証され、負イオンの生成、消滅、輸送の寄与が解明されたものである。これらはシステム量子工学、特にプラズマ中の負イオンに関する新たな計測システムの構築及び負イオンの挙動解明に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。