

氏 名	志 基 藤 後
学 位 の 種 類	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	論 工 博 第 3754 号
学位授与の日付	平 成 15 年 9 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学 位 論 文 題 目	Plasma spectroscopy of hydrogen and helium in the Large Helical Device (大型ヘリカル装置LHDにおける水素およびヘリウムのプラズマ分光研究)

論文調査委員 (主 査) 教 授 藤 本 孝 教 授 斧 高 一 教 授 立 花 明 知

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、中性ヘリウム原子に対する衝突輻射モデルの高精度化を行い、それを用いた新たな計測手法の提案および実証を試みた結果をまとめたものであって、7章からなっている。

第1章は序論で、分光計測をふたつのカテゴリーに分けて考えている。ひとつは高波長分解の分光器を用いた発光線プロファイルの計測で、もうひとつは分散の小さな観測系を用いて多くの発光線を同時に計測するものである。前者はドップラー広がりやゼーマンおよびシュタルク効果による発光線分裂を計測するもので、主にプラズマのパラメータ計測に有効である。後者はある原子あるいはイオン種の励起準位ポピュレーションの分布を計測するためのもので、電離進行プラズマ、あるいは再結合プラズマであることなどの判断基準に利用することができる。本論文はこれら二つの計測を相補的に用いて、核融合科学研究所大型ヘリカル装置LHDに対して実験を行い、水素およびヘリウムプラズマの性質について議論し、とくにそれらの電離・再結合メカニズムについて定量的な解析を行っている。

第2章では実験装置の概略と計測システムの較正について述べている。LHDはヘリカル型の核融合プラズマ実験装置で(主半径3.5–4.2m および平均小半径0.8m)、超伝導コイルを用いて定常放電を目指すものである。プラズマ加熱には、中性粒子ビーム装置、電子サイクロトロン共鳴装置、およびイオンサイクロトロン共鳴装置が利用される。これまでに、プラズマ中心において、電子温度10keV、イオン温度8 keV、および電子密度 $1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ が達成されている。本論文では、LHDプラズマのあるポロイダル断面全体を約40本の光ファイバーケーブルおよびコリメータレンズで観測している。計測系は基本的には分光器と検出器であるCCDから構成される。第1章で述べた二つのカテゴリーに対応して、高波長分解のシステムと低波長分散のシステムを用意し、それぞれに対して絶対感度較正を行っている。

第3章は衝突輻射モデルの解説にあてられており、衝突輻射モデルの考え方と得られる結果の解釈について説明している。とくに、本論文の主要テーマのひとつであるヘリウム原子の衝突輻射モデルに加えられた改良点について述べている。衝突輻射モデルは与えられたプラズマのパラメータに対して、原子あるいはイオンの励起準位ポピュレーションの分布と、実効的な電離および再結合のレート係数を与えるコードである。ヘリウム原子に対するコードはもともとFujimoto (1979) によって構築されたが、近年、より信頼性の高い電子衝突励起断面積計算手法が確立し、それらの結果を採用することで、計算結果の信頼度が改善された。我々が主として対象とするプラズマは磁気閉じ込め核融合プラズマであり、磁場強度に依存する1重項–3重項間の波動関数混合の影響が新たに組み込まれた。コードの応用例として、中性ヘリウムの発光線強度比を用いた電子温度および密度計測をLHDプラズマに対して試み、妥当な結果を得た。

第4章では、発光線強度と電離あるいは再結合の流れの大きさに関する詳細な考察がなされている。衝突輻射モデルによると、電離の流れの大きさは光子放出レートにある比例係数を掛けた形で表すことができるが、我々が対象とするプラズマパラメータの範囲内ではこの係数の電子温度および密度依存性は小さい。再結合に関しても同様である。このことから、観測された発光線の強度はほぼそのまま電離あるいは再結合の流れの大きさを反映すると考えてもよいという結論が得られ

る。この章ではさらに、電離進行プラズマ、再結合プラズマ、および電離バランスプラズマについて、電子温度の変化に対する発光線強度の変化について詳細な考察を行っている。また、全発光線および連続光も含めた全放射強度について、水素原子、ヘリウム原子、そしてヘリウムイオンに対する計算結果を示している。ヘリウムイオンはプラズマの放射冷却に有効であることを指摘している。

第5章では、第4章で得られた結果をもとに、発光線強度の時間変化を積分してプラズマ中のイオン密度を求める手法を提案し、その有効性をLHDプラズマに対して実証した。放電初期の電子密度の上昇量および、放電終了時の電子密度の減少量は、観測された水素およびヘリウムの発光線強度から見積もられた値と定量的に一致した。また、ヘリウムガスバフ、水素ガスバフ、および水素のアイスベレット入射を用いた、広い電子密度領域にわたる複数の放電プラズマに対して、放電終了直前の水素およびヘリウムそれぞれのイオン密度の決定を行い、真空容器壁面等に蓄積していたと推測されるヘリウム原子が、主放電時にプラズマ中に混入する事実を明らかにした。実験に先立って行われるグロー放電洗浄において、ヘリウムガスの代わりに水素ガスを用いた場合、このようなヘリウムの主放電への混入が認められなかったことから、ヘリウム原子の壁面への蓄積は放電洗浄中に行われていることが確認された。

第6章では、ゼーマン効果を利用したヘリウム原子発光位置同定の計測手法について述べられている。一般に受動的な分光計測により得られる信号は視線上の積分値となる。LHDではプラズマ中の磁場強度分布があいまいさなくわかっているため、発光線のゼーマンプロファイルから発光位置の磁場強度が求められれば、発光の空間位置を求めることが可能となる。実際にこのような計測を中性ヘリウム発光線に対して行い、あるポロイダル断面における発光線強度分布を求めた。発光は最外殻磁気面の外側のエルゴディックレイヤーと呼ばれる領域のさらに外側5 cm以内の厚さの層内で生じており、発光線強度はポロイダル方向に強い非一様性があることが見出された。

第7章では、第6章で用いた手法を3本の発光線に対して拡張し、第3章で用いた手法により各発光線位置の電子温度および電子密度を求めている。電子温度の分布はほぼ一様であったが、電子密度はX点近傍で、そのほかの場所よりもやや低い値を示した。この結果はプラズマ周辺部での電離の流れが内側X点近傍にピークのあるポロイダル非一様性を持つことを示す。電離の流れの大きさは内向きの中性原子のフラックスと等価であると解釈され、上のポロイダル非一様性は原子フラックスの非一様性を示している。

論文審査の結果の要旨

本論文では、主に核融合プラズマ計測への応用を目的として、衝突輻射モデルの高精度化と、それにもとづいた新たな計測手法の提案と実証を試みたものである。得られた主な研究成果は以下のとおりである。

1. ヘリウム原子に対する衝突輻射モデル中の電子衝突励起断面積データを信頼度の高い最新のものに入れ替え、計算結果の定量性の向上を図るとともに、新たに1重項－3重項間の波動関数混合の影響を組み込むなど、計算コードの適用範囲を広げる改良を行った。その応用例として、LHD（核融合科学研究所大型ヘリカル装置）において発光線強度比を用いた電子温度および密度計測を行い、コードの信頼度の高さと計測手法の有効性を示した。
2. 水素およびヘリウムを対象として、衝突輻射モデルを用いた計算結果から、発光線強度が原子あるいはイオンの電離ないし再結合の流れの大きさを定量的に示す尺度として用いることができることを指摘した。また、これらの原子あるいはイオンのプラズマ中での全放射強度を求め、核融合プラズマのダイバータ領域における放射冷却のためには、ヘリウムイオンが効果的に作用する可能性を示した。
3. 発光線強度と再結合流れの大きさとの間の比例係数がプラズマのパラメータにほとんど依存しない事実を利用して、プラズマ中のイオン密度を計測する手法を提案した。この手法を大型ヘリカル装置LHDにおけるさまざまな放電プラズマに適用し、プラズマ中の水素およびヘリウムイオンの成分比を求めることに成功した。
4. 発光線プロファイルのゼーマン効果による分岐の大きさが磁場強度に依存することを利用し、LHDにおいて磁場強度の変化する視線線上積分値計測の結果から、ヘリウム原子の視線上の発光位置を同定することに成功した。発光線強度分布から、プラズマ中へ侵入する中性ヘリウム原子の粒子フラックスに、強いポロイダル非一様性が存在することを明らかにした。また、この手法を3本の発光線に対して適用し、それらの発光線強度比から各発光位置における電子温度

および密度を求めた。これらの結果は、中性原子の内向きの流れの大きさ、あるいは原子密度がポロイダル方向非一様性を持つことを示した。

以上要するに本論文は、プラズマ中の原子あるいはイオンからの発光線強度がそれらの電離あるいは再結合の流れの大きさを表すという新たな解釈の有効性を、モデル計算および実験から定量的に示し、その観点からいくつかの新しい計測手法を開発したものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年8月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。