

氏 名 小林 汰輔

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2061 号

学位授与の日付 平成 31年 3 月 22 日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 LHD の周辺磁場領域における3次元炭素発光分布構造に関する研究

論文審査委員 主 査 教授 森田 繁
准教授 小林 政弘
教授 坂本 隆一
教授 蓮尾 昌裕 京都大学
大学院工学研究科
教授 稲垣 滋 九州大学 応用力学研究所

(様式3)

博士論文の要旨

氏名 小林 汰輔

論文題目 LHD の周辺磁場領域における 3次元炭素発光分布構造に関する研究

磁場閉じ込め核融合装置において、ヘリウム灰の排気やプラズマ対向壁から生じる不純物のプラズマへの遮蔽効果といった不純物の制御は高温高密度のプラズマの定常維持において重要な研究課題である。大型ヘリカル装置(Large Helical Device, LHD)には統計的磁場構造が周辺磁場中に存在する。磁力線に沿った輸送は磁力線に対して垂直な方向に比べて非常に大きいため、磁場構造は不純物や燃料粒子のプラズマ輸送に大きな影響を与える。その結果、デタッチメントの安定性にも影響を及ぼす。LHD では不純物の発光強度分布の計測が行われ、不純物輸送と磁場構造の関係について議論が行われてきた。しかし周辺磁場領域中での不純物輸送は未だ十分に解明されていない。これらの問題に取り組むために可視分光器による計測システムを立ち上げ、LHD における周辺磁場構造中での不純物と燃料粒子の発光分布計測を行った。

LHD における周辺領域での 2次元発光計測のために分光計測システムを整備・増強した。この分光器は検出器として Charge Coupled Device (CCD) カメラを用い、133本のファイバーアレイを取り付けている。計測領域にはダイバータプレート、ダイバータレグ、X点そして最外殻磁気面を含んでいる。また、分光器は 150、300、2400grooves/mm の回折格子を遠隔操作により切り替えることができる。今回の実験では 150grooves/mm の回折格子は CII (514 nm)の計測に、2400grooves/mm の回折格子は CIII (465 nm)と CIV (466 nm)に用いられた。CCD カメラ中心付近での波長分解能は 150 と 2400grooves/mm でそれぞれ 1.07、0.06nm となっている。また、露光時間はそれぞれ 0.09-0.19sec と 0.2-0.3sec であり、これらの時間はプラズマのパラメータに対応させている。実験計測により、不純物の発光強度の電子密度依存性は価数や磁場構造によって異なることが明らかになった。この結果は磁場構造が起因となって変化する背景プラズマの温度と電子密度分布によって解釈することができる。同様に不純物の 2次元発光強度分布も価数や磁場構造によって大きく異なることがわかった。これらの結果から不純物の輸送や発光分布に対して磁場構造が重要な役割を持つことがわかった。

周辺領域の磁化プラズマ中における不純物の発光強度分布の逆解析のために 1視線観測方向によるトモグラフィ手法を考案した。一般的に正則化で用いられている Tikhonov 項に加え、磁化プラズマ中のプラズマ輸送の特徴を考慮して複数の正則化項を導入した。複数のテストデータによって新規手法の検証を行った。磁力線に対して平行方向と垂直方向の空間微分を行う正則化項の導入によって、計算誤差が減少することを確認し、正則化項の有効性が示された。またテストデータを用いて、正則化パラメータの最適値の同定を行った。この手法を LHD の計測データに適用し、CII (C1+)と CIII (C2+)、CIV (C3+)について 3次元発光強度分布を得ることができた。この結果はそれぞれの価数のイオン化ポテンシャルやプラズマ壁相互作用を考慮すれば合理的な結果と考えられる。一方で、プラ

ズマ壁相互作用によって不純物の発光が局在化するような場合には、磁力線に沿って滑らかな分布を仮定する正則化と矛盾する可能性がある。複数の視線でのトモグラフィーにより、今回開発した手法の検証を行うことが今後の課題として挙げられる。

実験計測及びトモグラフィー解析による発光強度分布と 3 次元周辺輸送コード EMC3-EIRENE との比較を行った。3 次元輸送コード EMC3 は粒子、運動量、電子とイオンのエネルギーの流体方程式を解いている。中性粒子輸送コード EIRENE は壁からのリサイクリング中性粒子の電離、荷電交換などの衝突過程を考慮して輸送を計算する。シミュレーションの結果では発光分布が定性的に再現できていることがわかり、CII の左ダイバータレグでの発光量の増加や CIII や CIV の X 点周辺の局所的発光が確認された。また電子密度増加に伴う最外殻磁気面への発光領域のシフトといった様子も確認された。しかし、詳細な構造は実験とシミュレーションの間で異なっている。また、シミュレーションでは、ダイバータプラズマの電子密度はダイバータプローブによる計測値と著しく異なることが明らかになった。これは不純物の侵入長に大きく影響すると考えられる。また、ダイバータプレートからの炭素の射出エネルギーの増加により実験の発光強度分布とシミュレーションが近くなることが確認された。これらの結果から、ダイバータ板近傍での背景プラズマ輸送、および不純物の発生過程のモデルに見直しが必要であることがわかった。

博士論文審査結果

Name in Full 氏名 小林 汰輔

論文題目 LHD の周辺磁場領域における 3次元炭素発光分布構造に関する研究

最近の磁場閉じ込め装置を用いた長時間放電の進展に伴い、プラズマ対向材料を起源とする不純物の周辺プラズマにおける輸送制御は炉心プラズマへの不純物輸送を抑制し高温高密度プラズマの定常維持を実現する上で不可避の重要課題になっている。トカマク装置ではポロイダルコイルを用いたトロイダル方向に均一なダイバータ磁場配位が考案され、多くの装置で不純物制御に関する研究が行われてきた。一方、大型ヘリカル装置 (LHD) では、プラズマ周辺部に 3次元構造を有する開磁力線領域 (統計的磁場領域) が自然に形成される。統計的磁場領域では必然的に磁力線長が長くなり、磁力線に沿った摩擦力が周辺プラズマ全域で優勢になり、効率的な不純物遮蔽が実証されている。これまで LHD では統計的磁場領域の不純物輸送研究のために極端紫外 (EUV) 分光を用いて 2次元不純物イオン分布が計測されてきたが、EUV 領域では観測できる不純物イオン価数が相対的に高く、より温度の低いダイバータから統計的磁場領域周辺部に至る観測データは得られていない。また、統計的磁場領域における不純物輸送の正確な理解には不純物イオンの 3次元分布構造に関する知見が必須になるが、計測手法の難しさのため実験研究は進展していなかった。そこで出願者は、LHD の統計的磁場領域周辺部における不純物発光分布の 3次元計測を目的として多チャンネル可視分光器を用いた実験研究を開始した。

出願者は既存の多チャンネル可視分光器に設置されていた 131本の光ファイバー (コア径 $50\mu\text{m}$) を再配置し観測視野を拡大することにより、統計的磁場領域周辺部の広い領域 (縦 $1.13\times$ 横 0.68m^2) を 7cm という空間分解能で観測する光学システムを構築した。観測視野には統計的磁場領域周辺部、セパラトリックス X 点、ダイバータレグ、ダイバータプレートが含まれており、ダイバータから統計的磁場領域に至る磁力線構造に関連した不純物イオン発光分布の研究が可能になっている。また、申請者は不純物スペクトル発光線の絶対強度分布観測のための可視分光器の絶対感度較正と各ファイバー間の感度補正、各光ファイバー視線位置較正、最適入射スリット幅の決定、分光器収差によるスペクトルの歪み補正係数の導出等も行った。以上の作業を通して、精度の高い不純物イオンの発光分布の観測と 1km/s の誤差精度でのドップラーシフトの計測に成功した。

LHD 実験では最初に、磁場配位とプラズマ密度を系統的に変化させ炭素発光分布の観測を行った。その結果、 C^+ イオンは統計的磁場領域外側、 C^{2+} 及び C^{3+} イオンは統計的磁場領域周辺部に位置し、密度が上昇すると共に発光位置が上流方向へ移動することを見出した。この観測結果は LHD の統計的磁場領域周辺部の炭素イオン発光分布には、密度上昇による電離の促進 (すなわちダイバータ板に向かう下流への発光位置移動) よりも温度低下による影響が顕著になることを示しており、非接触プラズマ形成の機構解明に向け重要な実験事実となった。磁場配位を変化させると炭素発光分布も変化するが、炭素スペクト

ル線のドップラーシフト解析から得られた炭素イオンフロー速度は数十 km/s 程度で磁場配位にあまり依存せず、常に下流方向へ流れていることがわかった。これは第一壁周辺から侵入してきた炭素イオンが下流にあるダイバータへの輸送を示唆しており、LHD の統計的磁場が有する不純物遮蔽効果と関連して今後の研究展開に向け価値ある発見となった。

次に出願者は詳細な 3 次元炭素発光分布を得るために、新たなトモグラフィー手法の開発に取り組んだ。磁力線方向に沿った速いプラズマ輸送という統計的磁場領域での輸送特性を利用し、磁力線に沿った不純物発光強度をより滑らかにする正則化項を逆問題の解法に取り入れた。また、逆問題解析においては反復計算を導入した。複雑な磁力線構造を解析に取り込むために全ての格子点を磁力線に沿って並べ、全セル数 25078 個の 3 次元グリッドを作成した。この手法を用いて観測データを解析した結果、C⁺イオンはダイバータレグで、C²⁺及び C³⁺イオンは統計的磁場領域周辺部で発光していることが明らかになった。さらに、出願者は周辺プラズマ輸送シミュレーションコード (EMC3-EIRENE) を用いて統計的磁場領域周辺部の炭素不純物輸送計算を行い、観測した炭素発光強度分布との比較を行った。以上の結果から、セパトリックス X 点を通過する 2 本のダイバータレグの間で発光強度の大きな非対称性があること、ダイバータ板から磁力線をさかのぼる方向に発光強度が増加していること、セパトリックス X 点近傍での発光の局在化等を新たに見出した。出願者は観測データを基にしたトモグラフィー解析とシミュレーション計算結果を用いて、統計的磁場領域周辺部に於ける炭素イオン分布が 3 次元ダイバータ磁力線構造を直接反映していることを明確に示し、非接触プラズマ実験や閉型ダイバータ実験等の基礎となる実験事実を明らかにした。

以上のように出願者は多チャンネル可視分光計測法を用いて統計的磁場領域周辺部の炭素スペクトル発光強度分布を観測し、発光強度分布の 3 次元構造を解析し、非軸対称開磁力線構造と炭素不純物輸送の関係を明らかにした。これらの成果は統計的磁場中の不純物輸送研究を進展させ、プラズマ物理の発展に大きく貢献する。博士論文の骨子をなす成果はすでに複数の査読付き英文論文が国際学術誌に掲載されている（掲載済 2 編、投稿中 1 編）。よって本論文の内容は学位（理学）の授与に十分値すると判断した。