

京都大学	博士 (工学)	氏名	米 田 奈 生
論文題目	Emission Spectroscopy of Wall Surface Temperature and Impurity Ion Flow in Tokamak Edge Plasmas (トカマク周辺プラズマにおける壁表面温度と不純物イオン流れの発光分光計測)		

(論文内容の要旨)

本論文は、トカマク型核融合実験装置の周辺プラズマにおける不純物発生と輸送の支配因子であるプラズマ対向壁表面温度とプラズマ流れの評価を目的として、水素分子および不純物イオンに対する可視分光を行った結果をまとめたものであり、6章から構成されている。

第1章は序論である。1.1節では核融合発電の原理と研究開発の状況について述べた後、トカマク型核融合実験装置の構造と周辺プラズマについて国際熱核融合実験炉ITERを例に挙げて説明している。1.2節では不純物の発生と輸送について説明している。プラズマ対向壁の損耗によって起こる不純物発生に対向壁表面温度が与える影響、発生した不純物の輸送にプラズマ流れが与える影響について述べている。さらに、将来の核融合装置の放射線環境下で可視分光法による計測を行うことの重要性を説明し、本研究の目的について述べている。

第2章は本論文を読み進める上で必要となる基礎事項についてまとめた章である。2.1節ではプラズマの輻射の物理量と単位系について説明している。続く三つの節では本研究の計測対象であるC²⁺イオンと水素分子について、2.2節でエネルギー準位構造、2.3節で周辺プラズマ中の励起発光過程、2.4節で輝線強度から基底準位密度を求めるコロナモデルを説明している。

第3章では、プラズマ対向壁近傍における衝突・輻射過程による水素分子回転温度上昇のモデリングについて説明している。3.1節では対向壁表面温度計測法の先行研究を紹介し、その後、本研究で提案する水素分子回転温度を用いた表面温度計測法の原理を説明している。3.2節では水素分子の並進・振動・回転温度を定義し、周辺プラズマや他の低圧放電プラズマで計測された振動回転占有密度分布の例を紹介している。3.3節では対向壁近傍の回転温度を決める因子である表面温度、表面再結合および脱離反応、プラズマ中の衝突・輻射過程について説明している。これらの因子のうち、3.4節ではプラズマ中の衝突・輻射過程による回転温度上昇のモデリングについて説明している。3.4.1項では回転温度に影響を与える過程を、3.4.2項ではレート方程式を用いた対向壁からの距離に応じた回転温度上昇の計算方法を説明している。3.4.3項では計算コードの動作検証を説明し、3.4.4項では計算結果として、一様プラズマ中における対向壁からの距離に応じた回転温度上昇、また、電子・振動・回転準位間の衝突・輻射過程による回転温度上昇への寄与の違いを示している。構築したモデルにより、電子・水素イオン密度が約 10^{19} m^{-3} 以下では回転温度上昇には回転準位間の衝突過程が主に影響し、 10^{19} m^{-3} 以上ではこれらに加え電子・振動準位間の衝突・輻射過程が影響することを明らかにした。

第4章では、異なる三つのトカマク型核融合装置における水素分子回転温度を利用した表面温度計測について述べている。4.1節では実験セットアップを説明している。4.1.1項では実験に用いた三つの装置 (QUEST (九州大学応用力学研究所)、LTX-β (米

京都大学	博士 (工学)	氏名	米 田 奈 生
<p>国、プリンストンプラズマ物理研究所)、DIII-D (米国、ジェネラル・アトミックス社)) について説明している。4.1.2 項では計測対象のプラズマと、周辺プラズマの電子密度・電子温度評価方法、既存手法によるプラズマ対向壁表面温度評価方法について述べている。4.1.3 項では水素分子輝線スペクトル計測に用いた可視分光システム、波長・感度較正、装置関数評価について述べている。4.2 節では解析手法と実験結果について述べている。4.2.1 項では水素分子輝線スペクトルの計測結果を示している。4.2.2 項ではコロナモデルを用いてスペクトルから電子基底準位の回転温度を求める方法を説明している。4.2.3 項では計測した回転温度と 3 章で構築したモデルを用いた表面温度推定の結果について述べている。三つの装置での実験から回転温度が対向壁表面温度の影響を受けること、構築したモデルにより幅広いパラメータのプラズマ中において衝突・輻射過程による回転温度上昇を一定精度で説明できること、表面再結合および脱離反応による回転温度上昇が材料に大きく依存しない可能性があること、が明らかになり、回転温度を利用した対向壁表面温度の推定が可能であることを示した。</p> <p>第 5 章では、C^{2+}イオン輝線のドップラーシフトを利用した周辺プラズマの流れ計測について述べている。5.1 節では周辺プラズマの特徴的な三つの領域 (スクレイプオフ層、X 点、ダイバータ) における流れの駆動機構と空間分布について述べている。5.2 節では C^{2+}イオン輝線スペクトル形状を決める因子について説明し、ドップラーシフトからイオンの速度を計測する方法を述べている。5.3 節では QUEST で行った実験のセットアップを説明している。5.3.1 項では三つの領域の磁場構造と流れ構造を模擬したプラズマ生成法と電子密度・電子温度の空間分布評価を説明している。5.3.2 項では C^{2+}イオン輝線スペクトル計測に用いた多視線可視分光システム、波長・感度較正、装置関数評価について述べている。5.4 節では視線積分スペクトルからイオンの放射率・トロイダル速度・温度の空間分布を得るための逆変換手順を説明している。5.4.1 項で視線積分、5.4.2 項でアーベル逆変換、5.4.3 項でシェルモデルについて説明している。5.4.4 項では既知の放射率・トロイダル速度・温度の空間分布から合成した視線積分スペクトルに対して逆変換を適用し、誤差評価を行った結果を示している。5.5 節では 5.3.1 項で述べた三つのプラズマ中で計測した視線積分スペクトルに逆変換を適用した結果を述べている。また、得られた放射率にコロナモデルを適用して求めた C^{2+}イオンの基底準位密度を示している。これらの結果から、周辺プラズマの三つの領域を模擬したプラズマ中の流れを明らかにした。また、より大型のトカマク型核融合装置の周辺プラズマ中においても、本手法により原理的に流れを計測できることを示した。</p> <p>第 6 章は総括であり、本論文で得られた知見についてまとめている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

トカマク型核融合発電装置は、温室効果ガスの排出を抑えるための次世代発電手段として期待されており、国際熱核融合実験炉 ITER をはじめとする装置開発が進められている。核融合発電装置では、炉心から周辺プラズマに流出する粒子や熱によるプラズマ対向壁の損耗を低減するために対向壁表面温度の評価が求められており、また、対向壁の損耗等により発生する不純物の輸送を理解するために周辺プラズマ流れの評価が求められている。本研究は、水素分子輝線スペクトルの分光計測から求まる回転温度とプラズマ中の衝突・輻射過程による回転温度上昇のモデリングを併用して対向壁表面温度を評価し、また、 C^{2+} イオン輝線スペクトルの分光計測から求まるイオン速度を利用して周辺プラズマの流れを評価することで、不純物の発生と輸送の計測法について知見を深めている。主な内容は以下の通りである。

(1) 対向壁表面から脱離した水素分子がプラズマ中に侵入した際に起こる衝突・輻射過程による回転温度上昇をモデル化し、プラズマ中で計測した回転温度から対向壁表面温度を推定する手法を提案した。

(2) トカマク型実験装置 QUEST (九州大学応用力学研究所) において多視線分光システムを用いて回転温度の空間分布を計測し、回転温度が対向壁表面温度の影響を受けること、構築したモデル計算により対向壁からの距離に応じた回転温度上昇を説明できることを示した。

(3) QUEST と壁材料およびプラズマパラメータが異なる他のトカマク型実験装置 LTX- β (米国、プリンストンプラズマ物理研究所)、DIII-D (米国、ジェネラル・アトミックス社) においても QUEST と同様の実験とモデル計算を行い、構築したモデルにより幅広いパラメータのプラズマ中において衝突・輻射過程による回転温度上昇を一定精度で説明できること、表面再結合および脱離反応による回転温度上昇が材料に大きく依存しない可能性があることを示した。

(4) QUEST において磁場構造を変えることで周辺プラズマの異なる領域を模擬したプラズマを生成する方法を提案した。さらに、多視線発光分光システム、波長・感度較正法、視線積分された発光スペクトルの空間分解法を開発し、模擬プラズマ中で C^{2+} イオン速度の空間分布を計測できることを示した。

これらの成果は、トカマク型核融合発電装置の周辺プラズマにおける対向壁表面温度と不純物イオン流れの評価という課題に対し、発光分光法による計測が可能であることを示したものであり、学術上、實際上、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、令和4年1月25日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。