

氏 名	さわ だ けい じ 澤 田 圭 司
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 1366 号
学位授与の日付	平成 6 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工学研究科物理工学専攻
学位論文題目	水素原子・分子の衝突輻射モデルにもとづくトカマクプラズマ の分光学的研究

論文調査委員 (主 査)
教授 藤本 孝 教授 万波通彦 教授 石川順三

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、トカマクの周辺プラズマ中に存在する水素分子、原子を対象とし、分子の解離・電離、原子の電離およびそれらの空間的輸送も含めた粒子バランスの全貌を明らかにすることを目的として行った分光研究をまとめたもので、全 6 章からなっている。

第 1 章は序論であり、研究の背景と申請者の問題意識、研究目的を述べている。

第 2 章では、本研究の理論的基礎となる、励起原子ないし分子ポピュレーションの系にたいする準定常近似、または簡略化された衝突輻射モデル、の成立条件について検討している。電離プラズマ、再結合プラズマのそれぞれの条件について、水素原子の励起準位ポピュレーションの連立速度方程式を実際に解き、それぞれのポピュレーションが準定常値に漸近してゆく道筋を調べた。それらが準定常値となるに要する時間は準位によって異なるが、最も長い時間を持つのは「グリームの境界」と呼ばれる準位であり、その緩和時間が系全体の緩和時間を規定していることを見だし、その近似式を提案した。準位を方位量子数にしたがって細かく分離して扱い、解の電子密度依存性を調べた。ある主量子数を持つ準位で、角運動量 1 の状態の輻射遷移と同 2 の状態の衝突遷移から決まるプラズマ密度以上において統計的分布が成立し、その準位を主量子数のみによって区別する簡略化された衝突輻射モデルが成立することを見いだした。以上の結果、トカマクの周辺プラズマの領域では、簡略化された衝突輻射モデルが辛うじて成立しており、実験の解析にそれを利用することができることを示した。

第 3 章では、水素原子、分子にたいする簡略化された衝突輻射モデルを構築している。原子にたいしては、電子衝突励起断面積に対する種々のデータの検討を行い、もっとも確からしいと思われるデータセットを採用した。基底状態分子から励起原子ができる解離性励起の断面積を発光断面積から推定し、その過程をも取り入れた。原子励起断面積と解離性励起断面積の主量子数依存性が異なることから、原子発光線の強度測定からプラズマ中の原子、分子の密度をそれぞれ決定できることを示した。また、原子発光線の強度と電離の速度の比は原子の場合に比して分子の場合は約 1 桁小さいことを示した。

プラズマ中の分子が電離または解離する過程のうち直接過程についてはよく知られているが、励起分子状態を経由する間接的な過程は今までまったく調べられていない。分子励起状態のエネルギー準位を単純化し、その間の輻射、衝突過程のパラメーターを推定して分子に対する衝突輻射モデルを構成した。基底状態分子から出発して、分子イオン、基底状態原子、プロトンそれぞれが生成する実効的な速度係数を広い電子温度、密度の領域で計算した。トカマク周辺プラズマの条件では間接過程が直接過程より大きな寄与を与える場合があることを見いだした。

第4章では、本学理学部プラズマ実験棟に設置され、本研究に用いられたWT-3トカマク装置の概要と水素原子発光線の測定方法の詳細を述べている。

第5章では、ジュール加熱モードにおける発光線強度の空間分布の測定結果を述べ、バルマー- α , β , γ 線の強度を第3章で開発された方法で解釈している。分子は容器壁近くで $7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ の密度を持つがそこから3 cm内側では消滅していること、原子は $3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ から内側にむけて徐々に減少して、主プラズマの端で $5 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ となっていることを見いだした。この分布を元に、第3章で求めた実効的な速度係数を用いて空間各点における解離、電離などの流れを計算した。さらに、分子、原子、イオンの空間的な流れを逆算した。分子は壁近くでは $5 \times 10^{15} / \text{cm}^2 \text{ s}$ の内向きの流束を持つが、原子は主プラズマ近くでは内向きの、壁近くでは $1 \times 10^{15} / \text{cm}^2 \text{ s}$ の外向きの流束をもつことが明らかとなった。これは原子の流れを粒子の拡散として理解している通常の方法に疑問を呈するものである。

第6章は結論と本研究の問題点、将来の展望が述べられている。

論文審査の結果の要旨

トカマクなど磁場閉じ込めプラズマの主成分は(重)水素であり、プラズマ周辺部またダイバーター領域における(重)水素の振舞いの理解・制御は核融合研究において重要である。本研究はプラズマ中の水素分子、原子、プロトンについて、その空間的輸送まで含めた粒子バランスを定量的に把握する分光学的方法を開拓したものであり、得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 水素励起原子ポピュレーションの時間微分連立速度方程式を解き、準定常近似の成立条件を導出した。準位を方位量子数まで細かく区別した衝突輻射モデルを構成し、主量子数のみによって準位を区別する取扱の成立条件を明らかにした。以上により、準定常近似にもとづく簡略化された衝突輻射モデルがトカマクの周辺プラズマを記述できることを示した。
2. 原子の衝突輻射モデル中に分子の解離性励起によって励起原子が生成される過程をも取り入れてモデルを拡張し、原子発光線強度の測定から水素分子、原子、電子の密度を決定する方法を提案した。
3. 水素分子の安定な励起状態の系に対して衝突輻射モデルを構成することにより、プラズマ中の分子、分子イオン、原子、プロトンの系についてそれぞれの励起状態を経由する過程をも含む「反応」の実効的な速度係数を与えた。
4. WT-3トカマクにたいしてバルマー線発光強度の空間分布測定を行い、上の方法により分子、原子、電子の密度分布を決定した。その結果と「反応」速度の空間分布から、各粒子種の空間的輸送量を決定した。原子の輸送に対しては常識的な拡散による描像が成立していないことを示した。

以上要するに、本論文は新たな分光学的方法によりプラズマ中の水素粒子バランスを明らかにしたものであり、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6年2月18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。