

京都大学	博士（工学）	氏名	藤井 恵介
論文題目	大型プラズマ閉じ込め装置 LHD における水素リサイクリングの分光研究		
（論文内容の要旨） 本論文は、核融合研究のための大型プラズマ閉じ込め装置 LHD において、水素リサイクリングと呼ばれる水素原子・分子の生成と輸送、イオン化、解離の挙動を、独自に開発した水素原子・分子発光線スペクトルの同時高分解計測法や水素原子発光線スペクトルの高ダイナミックレンジ高速計測法により解明することを目的としてまとめたものであり、5 章から構成されている。 第 1 章は序論であり、磁場方式のプラズマ閉じ込め装置において、その閉じ込め性能を向上するためには水素リサイクリングを理解し制御することが重要であることを述べた後、これまで行われてきた水素リサイクリング計測について述べている。特に、磁場により発光線スペクトルが分裂する効果を用いた水素原子の発光位置計測例を紹介している。水素分子に関しては水素リサイクリングの一翼を担っているにも関わらず、これまで大型のプラズマ閉じ込め装置でその発光位置が同定された例はないことを述べており、水素原子と分子の発光位置の同時計測の必要性を説明している。また水素原子発光線スペクトルには高温の水素原子による裾形状が見られることが複数のグループにより報告されてきたが、その定量的な理解がなされていないことを指摘している。 第 2 章は本論文で用いる基礎事項について述べた章である。まず LHD で生成されるプラズマについて、トラス状の高温プラズマが生成される閉じ込め領域とその外側の比較的低温のプラズマが生成されるスクレイプオフ層とダイバータレッグを説明している。次に水素原子・分子のエネルギー準位について述べた後、分光計測の原理および発光線スペクトルの解析法について説明している。さらに、プラズマ閉じ込め装置内の水素原子の速度分布に影響する素過程について概説している。 第 3 章は LHD に対する水素原子・分子発光線の同時高分解分光計測について述べた章である。3.1 節では複数波長域高分解分光システムを新たに提案し、開発したことについて述べている。この分光システムにより、異なる波長域にある水素原子 Balmer-α、β、γ 発光線と水素分子 Fulcher-α 発光帯を装置分解能 0.010 nm 以下で同時に計測することを実現している。3.2 節では LHD の水素プラズマに対して、上記発光の同時高分解分光計測を複数の観測視線を用いて行い、ポロイダル断面上の水素原子・分子の発光位置の空間分布を計測した結果について述べている。水素原子の発光位置は閉じ込め領域すぐ外側のスクレイプオフ層、水素分子の発光位置はより外側のダイバータレッグ付近であることを明らかにしている。また、水素分子の発光強度はダイバータと呼ばれる受熱板付近で局所的に大きい、水素原子の発光強度分布は比較的一様であり、ダイバータから脱離した水素分子はその近傍で発光、解離し、閉じ込め領域すぐ外側では主に原子となってプラズマに流入することを明らかにしている。3.3 節では高いダイナミックレンジで発光スペクトル観測を行い、原子発光線が中心部に比べ $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 倍程度の強度で中心部から離れるに従い指数関数的に減少する裾部を有すること、その裾部が高速			

京都大学	博士（工学）	氏名	藤井 恵介
の水素原子のドップラー効果によるものであることを明らかにしている．また，主量子数 3, 4, 5 の水素原子がほぼ同じ形状の速度分布を持つこと，低速の水素原子に対する高速の水素原子の割合が閉じ込め領域内の電子温度・密度に依存して変化することを明らかにしている．3.4 節では，3.2 節で明らかにした水素原子・分子の発光位置の違いと 3.3 節で明らかにした高速水素原子の存在を理解するための 1 次元水素輸送モデルを提案し，計測結果と比較している．その結果，大部分の水素分子はダイバータレッグ付近で発光すること，大部分の水素原子はスクレイプオフ層で発光することが再現されている．また，水素原子発光線スペクトルの裾部として観測される高速の水素原子は，陽子との荷電交換衝突により閉じ込め領域内側に侵入し加熱されて生成するというメカニズムを明らかにしている． 第 4 章では，水素原子発光線スペクトルの中心部と裾部を高いダイナミックレンジで高時間分解計測する手法を新たに提案・開発し，LHD プラズマ計測に展開している．4.1 節では，高分散分光器と光電子増倍管リニアアレイを用いて開発した計測システムについて述べている．時間分解能 14 μs，波長分解能 0.14 nm，ダイナミックレンジ 10^3 以上で，スペクトルの中心部と裾部の発光強度の時間変化を計測することを可能としている．4.2 節では，水素ガス圧力の変化やプラズマの不安定性により電子温度・密度が変動する LHD プラズマからの発光を上記システムにより計測した結果について述べている．中心部と裾部では，100 μs 程度の短い時間スケールにおいても，それらの発光強度の時間変化が異なることを明らかにしている．計測結果に対し，3.3 節，3.4 節の考察に基づき，プラズマへ流入する水素原子数の変化に対応して低速水素原子の発光強度が変化し，また電子温度・密度の変化により水素原子が高温部に侵入する確率が変化することで低速水素原子の発光強度に対する高速水素原子の発光強度の比が変化するというメカニズムを考察している． 第 5 章はまとめの章であり，本研究により得られた知見がまとめられている．			

(論文審査の結果の要旨)

核融合発電に向けた研究が進められている磁場方式の高温プラズマ閉じ込め装置では、水素リサイクリングと呼ばれる装置内での水素原子・分子の生成や輸送、解離、イオン化の挙動がプラズマ中の粒子バランスに直結するため、その理解と制御が求められている。本研究は水素原子・分子の発光スペクトルの同時高分解計測や水素原子発光スペクトルの高ダイナミックレンジ高速計測という新しい分光手法を提案し、それらを大型プラズマ閉じ込め装置 LHD へ適用することで、水素リサイクリングの理解に重要な水素原子・分子の発光位置空間分布や速度分布、およびその起源となるメカニズムを明らかにしている。主な内容は以下の通りである。

(1) 通常の分光装置を用いることでは同時に高分解分光計測することが出来なかった異なる波長域にある水素原子・分子発光線を、独自に分光光学系を設計・開発することで、12本の光ファイバー入力に対し、波長分解能 0.01 nm 以下で同時計測することを可能にした。

(2) (1) で開発した計測システムを LHD プラズマ計測に適用し、水素原子・分子発光位置のポロイダル面内空間分布の同時計測に成功した。その結果、水素分子は原子に比べ、より外側の領域で発光することを初めて明らかにした。また、水素原子・分子の発光線強度の空間分布より、壁面から脱離した水素分子はダイバータレッグ付近で発光・解離し、閉じ込め領域すぐ外側では主に原子となってプラズマに流入することを明らかにした。

(3) LHD プラズマの水素原子・分子発光スペクトルを高いダイナミックレンジで同時計測し、分子発光線にはない発光スペクトルの幅広い裾部が原子発光線に共通して見られること、その形状がプラズマの電子温度・密度によって変化することを初めて明らかにした。さらに、1次元水素輸送解析モデルを提案し、このスペクトルの裾部が高温の陽子との荷電交換衝突により閉じ込め領域内に生じた高温の水素原子の発光によることを明らかにした。

(4) 時間分解能 14 μ s、波長分解能 0.14 nm、ダイナミックレンジ 10^3 以上の分光計測法を提案・構築し、裾部まで含めた水素原子発光スペクトルの高速計測を可能とした。LHD プラズマへ適用した結果、スペクトルの中心部と裾部の発光強度が 100 μ s 程度という短い時間スケールでも異なる挙動を示すことを明らかにした。

これらの成果は、高温プラズマ閉じ込め装置の水素リサイクリングの理解に重要となる諸現象を実験的・解析的に明らかにしている。さらに、本研究で開発された装置・手法は様々なプラズマ分光診断にも展開可能であり、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、平成 24 年 1 月 23 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、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。