

(続紙 1)

京都大学	博士 (工学)	氏名	仲野友英
論文題目	臨界プラズマ試験装置 JT-60U のプラズマ中の不純物に対する分光研究		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、トカマク型磁場閉じ込め方式の核融合プラズマに対する分光研究のうち、プラズマとプラズマ対向壁の相互作用による不純物の発生、核融合プラズマ周辺部のダイバータプラズマ等での不純物の輸送と放射、および分光計測器の性能評価について論じたものであり、本編 8 章と付録 2 章からなっている。</p> <p>第 1 章は序論であり、トカマク型装置による核融合研究開発について歴史的な観点からまとめられており、プラズマ分光研究の対象および本研究の背景となる不純物研究の重要性と研究項目が述べられている。第 2 章には実験装置である臨界プラズマ試験装置 JT-60U の概要、第 3 章には本研究で用いられた主な計測器の概要がまとめられている。</p> <p>第 4 章では、プラズマ中の水素との化学反応による炭素材プラズマ対向壁 (ダイバータ板) の損耗過程、すなわち化学スパッタリングにより発生する炭化水素の収率 (化学スパッタリング率) の測定結果が報告されている。ここでは、炭化水素のうちメタンだけでなく研究報告が例外的な少数に限られていたエタンなど炭素を 2 個含む炭化水素に対しても収率の測定を行った。合計の化学スパッタリング率 (メタンの化学スパッタリング率+ (エタン+エチレンの化学スパッタリング率)$\times 2$) は、ダイバータ板の表面温度 90 °C、150 °C および 300 °C で、それぞれ約 3 %、6 % および 10 % であった。発生する炭化水素に含まれる炭素の 80 % 以上がエタンとエチレンに由来し、この割合がダイバータ板への水素イオンの入射エネルギーの低下にしたがって上昇することを明らかにした。また、化学スパッタリング率は水素イオンの入射エネルギーの 0.37 乗に比例して増加し、水素イオンの入射フラックスには依存しないという解釈を与えた。これらのことより、従来の測定・解析方法では炭化水素発生量が過小評価されていたことを明らかにした。</p> <p>第 5 章では、ダイバータプラズマがダイバータ板に接触している場合に、三価電離炭素イオン C^{3+} のドップラー拡がりから重水素イオン D^+ の温度が評価可能となる条件について、2 次元不純物輸送コードを援用して調べた結果が報告されている。$C^{3+}(n=7)$ 準位のポピュレーションは電子衝突によって基底準位の C^{3+} からの励起で生成されることを衝突放射モデルによる解析で明らかにし、$CIV(n=6-7)$ スペクトル線のドップラー拡がりから C^{3+} の温度を反映することを示した。ここで n は主量子数である。内側ダイバータ領域では、C^{3+} と D^+ の温度緩和時間が C^{3+} の輸送時間および電離時間のいずれよりも短いため C^{3+} と D^+ は等温化し、よって $CIV(n=6-7)$ スペクトル線のドップラー拡がりから D^+ 温度が決定可能であることを</p>			

明らかにした。他方、外側ダイバータ領域では、内側ダイバータ領域と比較して高温で低密度であるため、 C^{3+} と D^+ の温度緩和時間は C^{3+} の輸送時間より長く、よって C^{3+} と D^+ は等温化せず、 $CIV(n = 6-7)$ スペクトル線のドップラー拡がりが見出す温度は D^+ 温度と一致しないことを明らかにした。また、高い波長分解能での測定により $CIV(n = 6-7)$ スペクトル線の波長を過去の測定の2桁近く高い精度で定め、理論計算による波長と高い精度での比較を可能にした。

第6章では、前章のダイバータプラズマに比べ低温・高密度なプラズマがダイバータ板に接触していない場合に、四価電離炭素イオン C^{4+} が電子と体積再結合することを初めて実験により示した結果が報告されているとともに、この体積再結合が放射の増大に寄与するメカニズムについて論じられている。三価電離炭素イオン C^{3+} の放射が局所的に非常に強くなる空間位置からの CIV スペクトル線強度を可視および真空紫外域で観測し、これを衝突放射モデルで解析することによって、電子温度 6.3 eV 、電子密度 $7.8 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ と決定した。さらに C^{3+} の $n < 4$ の準位では電離プラズマ成分が、 $n > 5$ の準位では再結合プラズマ成分が主要な成分であることを明らかにした。これらのパラメータから、電離プラズマ成分に由来する放射パワーはボロメータで測定された総放射パワー 1.4 MWm^{-2} の60%、再結合プラズマ成分に由来する放射パワーは0.2%、および C^{4+} から C^{3+} への体積再結合フラックスは C^{3+} から C^{4+} への電離フラックスの約100倍と見積もった。これらの結果から、体積再結合が放射パワーの低い C^{4+} を放射パワーの高い C^{3+} へ変換する役割をもつという解釈を与えた。

第7章では、加熱用中性粒子ビームに含まれる酸素量を、ビームから放射されるドップラーシフトを受けた $D\alpha$ 線の強度比の測定と中性化セルでの中性化率の計算から決定し、この量のショット数に対する減少傾向が調べられている。中性粒子ビームに含まれる酸素粒子数比は、ビーム入射開始の約150ショット後では8%を超える高い値であったが、約830ショット後には1%まで減少した。中性粒子ビーム入射開始直後のプラズマでは、プラズマ中の酸素量のうち50%以上が中性粒子ビームに由来しプラズマ実効電荷数への寄与は0.5以上であるが、これらの割合はショット毎に減少し約830ショット後ではそれぞれ20%以下および0.06以下になることを示し、プラズマ中の不純物量に与える影響が無視できるほど小さくなることを明らかにした。また、中性粒子ビームに由来する酸素のプラズマ中での閉じ込め時間を0.5秒と決定した。

第8章には研究成果の総括が与えられ、付録Aには上記の実験研究を可能とするための分光計測器の詳細な性能評価、付録Bには第5章および第6章で用いられた衝突放射モデルについての速度方程式の解法と励起速度係数の精度が述べられている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、トカマク型磁場閉じ込め方式の核融合プラズマに対する分光研究のうち、プラズマとプラズマ対向壁の相互作用による不純物の発生、核融合プラズマ周辺部のダイバータプラズマ等での不純物の輸送と放射、および分光計測器の性能評価を研究した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. ダイバータプラズマと炭素材ダイバータ板の化学反応によって発生する炭化水素の量を、従来の測定・解析方法を拡張することで、炭素を2個含む炭化水素を含めて決定した。そのダイバータ板温度依存性などを系統的に示すとともに、従来の測定・解析方法では炭化水素発生量が過小評価されていたことを明らかにした。

2. ダイバータプラズマ中で炭素不純物イオンのスペクトル線のドップラー広がりから水素イオン温度を決定できる条件を、測定結果に2次元不純物輸送コード等を援用することで決定した。また、このスペクトル線の絶対波長をこれまでの測定に比べ2桁近く高い精度で決定した。

3. ダイバータプラズマ中で炭素不純物イオンが電子と体積再結合することを初めて実験的に示した。この過程によって生成された低価数の炭素不純物イオンからの放射パワーがダイバータプラズマからの総放射パワーの大部分を占めることを明らかにし、この過程がダイバータプラズマの冷却に対し本質的な役割を果たしているとの解釈を与えた。

4. 水素原子発光線のドップラー分離計測とその解析より、加熱用中性粒子ビーム由来の酸素不純物量がビーム入射開始時にはプラズマ中の酸素不純物量に対して50%以上であるが、プラズマ放電の回数とともに無視できるほど少ない量にまで減少することを明らかにした。さらに中性粒子ビームに由来する酸素不純物のプラズマ中での閉じ込め時間を決定した。

5. 分光計測器の性能評価(計数値の直線性、統計誤差、波長分散および波長分解能)を行い、この結果に基づいて上記の実験研究に最適な調整を行った。加えて実用的な絶対感度校正の方法を提案した。

以上のように本論文は、分光学的観測とその解析によってダイバータプラズマ等における不純物の挙動特性を明らかにしており、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23年1月26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。