

氏 名	ひがし しま さとる 東 島 智
学位の種類	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	論 エ ネ 博 第 35 号
学位授与の日付	平成 16 年 1 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	Study of Impurity Control and High Density Plasma Formation with High Confinement by Impurity Injection in JT-60 Upgrade (JT-60Uにおける不純物制御と不純物入射による高閉じ込め高密度プラズマ 生成の研究)
論文調査委員	(主 査) 教授 近 藤 克 己 教授 佐 野 史 道 教授 前 川 孝

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、核融合出力の低下の原因となる不純物を低減する第一壁調整法を提案するとともにその成果を実証し、またダイバータにおける熱及び粒子の制御性能とプラズマ閉じ込め性能の向上に不可欠な高密度・高放射損失・高閉じ込めプラズマを生成する手法を確立して核融合炉の早期実現を目指すとともに、炉心プラズマにおける新たな物理的な知見を得ることを目的として研究を進め、多くの有益な知見を得た結果についてまとめたものであり、7章から成っている。

第1章は序論で、核融合研究の進展とトカマク装置における不純物に関する研究について従来の知見を整理するとともに、核融合炉の実現に必要な定常運転を行う際に重要となる課題から、ボロナイゼーションによる不純物と水素リサイクリングの低減とそれによる高閉じ込めプラズマの生成、ダイバータにおける炭素不純物の発生機構（特に化学スパッタリング）、炭素不純物の制御性に関するダイバータ形状の効果、国際熱核融合実験炉（ITER）で必要な高密度・高閉じ込め・高放射損失の生成に関し、各々の背景と目的を述べている。

第2章では、本論文の研究を実施した日本原子力研究所の臨界プラズマ試験装置（JT-60U）の形状や主要プラズマパラメータなどの概要、プラズマ計測機器の概要、また特に本論文で用いたプラズマ分光計測機器について詳細に述べている。

第3章では、不純物低減を目指したJT-60Uにおける第一壁調整法について述べている。まず第一壁調整法の必要性を明らかにし、JT-60Uの第一壁調整法である真空容器ベーキング、テイラー放電洗浄、グロー放電洗浄、トカマク放電を使った洗浄、ボロナイゼーションについて、各放電洗浄の役割、実施手順とその効果を明らかにした。特にボロナイゼーションについては、デカボラン（ $B_{10}H_{14}$ ）を用いたボロナイゼーションを初めて実機に適用し、ボロナイゼーションの実施前後の多数のプラズマ放電における不純物量を系統的に調べ、ボロナイゼーションの実施前に0.5-2%程度あった酸素不純物量を平均0.2%に低減させること、100gのデカボランを使用した場合にボロナイゼーションの酸素低減の効果が持続する放電数は約1000放電（約半年の運転に相当）であることを明らかにした。この知見より、デカボランの最適な使用量を決めてボロナイゼーションの実施回数を減らし、JT-60Uの運転に占めるボロナイゼーションの実施時間の短縮に寄与した。水素リサイクリングについては、ボロナイゼーション実施後に真空容器内の全体の水素リサイクリング量が低くなることを明らかにした。更に、ボロナイゼーションにより実現した水素リサイクリング量が低い第一壁の状態は、高い電子密度の重水素プラズマ放電を可能にし、JT-60Uの運転領域を高密度側へも拡大させた。更にボロナイゼーションの最適化を行い、JT-60Uの臨界プラズマ条件（ $Q^{DT}=1.05$ ）を達成した。

第4章では、ダイバータにおける炭素不純物の発生機構について述べている。まず、ヘリウムのみと重水素のみの低温・

高密度ダイバータプラズマを生成して比較し、重水素の場合に炭素不純物量が多く、到達可能なプラズマの最高電子密度が低いことを実験的に示し、化学スパッタリングによる炭素不純物発生機構が重要であると結論付けた。次に、多様なエネルギー分布を持つイオンの存在するダイバータプラズマ条件下で、分光的な手法を用い、炭素材の化学スパッタリング率の表面温度、電子温度、粒子フラックスに対する依存性をJT-60Uにおいて明らかにし、実験室におけるビーム実験の結果と比較した。その結果、電子密度を増加させて生成した低温・高密度ダイバータプラズマにおいて、化学スパッタリングに起因する炭素不純物の占める割合を明らかにした。なお、ここで評価した化学スパッタリング率は、ITER設計に必要な化学スパッタリング率のデータベースに採用された。

第5章では、JT-60UのW型ダイバータにおける炭素不純物挙動に関し、特に二つの結果について述べている。まず、ダイバータ不純物輸送コードを用いて、炭素不純物がX点付近に輸送される機構を明らかにし、X点付近の炭素不純物を低減させるためにはダイバートドームを設置することが有効であることを提案し、実験的にその効果を明らかにした。JT-60Uで初めて導入されたダイバートドームは、炭素不純物を主プラズマに侵入させない有効な方法であると広く認識され、この成果により、ITERのダイバータ形状に採用されている。不純物低減の手段として、ガスパフとダイバータ排気を組み合わせた能動的な制御法を開発し、主プラズマにおける不純物量の増加の原因となるMARFEを制御するとともに、炭素不純物量を減少させることを実証した。

第6章では、少量のアルゴンをELMyHモードプラズマに入射し、JT-60Uの運転領域を $HH_{98(y,2)} \sim 1$ 、電子密度 $\sim 0.8n_{GW}$ 、放射損失割合 ~ 0.8 まで拡大し、ITERで必要とされる高密度・高放射損失・高閉じ込めプラズマを生成した。また、同プラズマの生成理由を高いペデスタルイオン温度の維持と主プラズマイオン温度の「stiffness (硬直性)」で説明できることを明らかにした。更に、アルゴン入射により、ELMによるダイバータ板への熱負荷は $1/3 - 1/5$ に減少すること、ストライク点の位置を変えることにより、ELM特性を制御できることを明らかにした。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果を要約している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、核融合出力の低下の原因となる不純物を低減する第一壁調整法を提案するとともにその成果を実証し、またダイバータにおける熱及び粒子の制御性能とプラズマ閉じ込め性能の向上に不可欠な高密度・高放射損失・高閉じ込めプラズマの生成手法を確立して核融合炉の早期実現を目指すとともに、炉心プラズマにおける新たな物理的な知見を得ることを目的とした研究結果をまとめたもので、主な成果は以下の通りである。

1. 第一壁調整法では、ジボラン (B_2H_6) より取り扱いが容易かつ安全なデカボラン ($B_{10}H_{14}$) を用いたボロナイゼーションを初めて実機に適用し、それまでプラズマ性能の進展を妨げていた酸素不純物と粒子リサイクリングの低減を実現した。更にボロナイゼーションの最適化を行い、JT-60Uの臨界プラズマ条件 ($Q^{DT}=1.05$) を達成した。
2. 核融合炉で想定される低温・高密度ダイバータプラズマでは、CFC製ダイバータ板への粒子束が増加し、化学スパッタリングによる炭素材の損耗が大きくなることが重要な課題であった。そこで多様なエネルギー分布を持つイオンの存在するダイバータプラズマ条件下で、分光的な手法を用い、炭素材の化学スパッタリング率の表面温度、電子温度、粒子フラックスに対する依存性をJT-60Uにおいて明らかにし、実験室におけるビーム実験の結果と比較した。その結果、電子密度を増加させて生成した低温・高密度ダイバータプラズマにおいて、化学スパッタリングに起因する炭素不純物の占める割合を明らかにした。
3. ダイバータ不純物輸送コードを用いて、炭素不純物がX点付近に輸送される機構を明らかにし、X点付近の炭素不純物

を低減させるためにはダイバータドームを設置することが有効であることを提案し、実験的にその効果を明らかにした。

4. 不純物低減の手段として、ガスパフとダイバータ排気を組み合わせた能動的な制御法を開発し、主プラズマにおける不純物量の増加の原因となる MARFE を制御するとともに、炭素不純物量を減少させることを実証した。
5. 少量のアルゴンを ELM_{MyH} モードプラズマに入射し、JT-60U の運転領域を拡大するとともに、国際熱核融合実験炉 (ITER) で必要とされる高密度・高放射損失・高閉じ込めプラズマを生成した。また、同プラズマの生成理由を高いペデスタルイオン温度の維持と主プラズマイオン温度の「stiffness (硬直性)」で説明できることを明らかにした。

以上要するに本論文は、核融合炉の実現にとって課題となっていたプラズマ中の不純物量の低減のための制御方法と核融合炉の運転に必要なプラズマの生成方法を見出し、核融合炉の早期実現に貢献したもので、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 (エネルギー科学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 15 年 11 月 10 日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。