

氏 名	永 見 正 幸 なが み まさ ゆき
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	論 工 博 第 1211 号
学位授与の日付	昭 和 54 年 7 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	Divertor Experiment for Impurity Control in a Tokamak (トカマクにおけるダイバーターによる不純物制御実験)

(主 査)  
論文調査委員 教授 飯吉厚夫 教授 宇尾光治 教授 秋宗秀夫

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、トカマク装置（日本原子力研究所 DIVA 装置）を用いて、プラズマ中に混入する不純物を制御する目的で取り付けられたダイバーターを働かせ、不純物の挙動に関する一連の実験を行い、その有効性を検討したものであり、6章より構成されている。

第1章では、核融合制御のためには不純物対策が不可欠であること、そのための不純物制御装置としてのダイバーターの働きを説明している。

第2章では、DIVA 装置の概要、ダイバーター配位をつくり方、並びに実験条件について説明し、プラズマ諸量の測定値について述べている。不純物の挙動は、紫外領域および可視領域の不純物スペクトル線の観測によって行われた。

第3章では、酸素、炭素イオンなどの軽元素不純物のプラズマ中の輸送現象を明らかにする目的で一連の考察が示されている。ダイバーターを用いない通常のトカマク放電途中に、不純物としてメタンガスをパルス的に注入し、炭素イオンのプラズマ半径方向の拡散の様子を分光学的に測定した。その結果、炭素イオンは注入完了後約 1 msec で拡散を完了し、新しい定常状態に達することが示された。この輸送過程を一次元不純物輸送コードを用いた解析結果と比較した結果、不純物に関しても主プラズマ（水素）と同じ大きさの異常拡散を仮定することによって実験結果を説明できることが示された。

第4章では、ダイバーターを働かして一連の不純物制御実験が行われている。まず、平均電子密度（ $\sim 3 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ ）、電子温度（550 eV $\sim$ 700 eV）のほど等しいダイバーター作用有り無しの場合の放電に、等量のメタンガスおよびアルミニウムガスをパルスのに注入し、プラズマ中での挙動を比較した。DIVA のプラズマ領域では炭素イオンは表面付近で4価に、中心部で6価に電離する。このことを利用して各電離状態の炭素イオンのスペクトル比を観測し、ダイバーターの有無に対する混入量の比較を行ったところ、ダイバーターを動かすことによって不純物が約 1/4 $\sim$ 1/2 に低減されることが観測された。一方アルミニウムの重金属不純物に関しては、軽元素の場合と違って壁でのリサイクリングが無いと考えられるので、一旦プラズマの外に出たアルミニウムイオンはプラズマ中に戻ることがないと考えられるため、混入量の

定量的測定が可能である。実験結果はダイバーターを働かさない場合には注入された量の15~20%がプラズマ中心に混入するのに対して、ダイバーターを動かせることによって5%以下に減少することが示された。次に、ダイバーター室に導かれた不純物イオンにより、ダイバーター室壁面より発生する金属不純物の主プラズマへの逆流の大きさが調べられ、ダイバーター室へ注入されたアルミニウム不純物イオンの約0.3%しか逆流していないことが確かめられた。

プラズマ表面のダイバーター層（スクレイブ・オフ層）にメタンガスを適量注入して、プラズマ表面の温度を調節することによる不純物の混入量への影響が調べられた。プラズマ表面の温度を40 eV から20 eV に下げることによって壁からの金属不純物の発生量が減少し、これに伴ってプラズマ中の金属不純物の量が減少することが観測された。このことは、周辺プラズマの冷却による不純物発生の制御の有効性を示唆する結果である。

第5章では、プラズマ中に混入した重金属イオンの輸送現象についての考察がなされている。プラズマの密度が比較的低い場合には不純物の閉じ込め時間はプロトンの閉じ込め時間とはほぼ等しいが、プラズマ密度の上昇につれて不純物の外への拡散がおさえられることを示唆する結果を得ている。これはプラズマの密度の上昇と共に主プラズマの閉じ込め性能が上がり、拡散の異常性が少なくなることにより、新古典拡散理論で予想される重金属のプラズマ中心への集中化現象の始まりを示唆する結果と考えられる。

第6章では、以上の結果をまとめて結論としている。

### 論文審査の結果の要旨

熱核融合を制御するために解決すべき問題の一つに、プラズマ中に蓄積する不純物濃度を如何にして低いレベルに抑えるかという課題がある。

本論文は、不純物制御の研究を目的につくられたダイバーター付トカマク装置（日本原子力研究所 DI VA 装置）を用いて、不純物イオンのプラズマ中での拡散過程、および、不純物制御作用を明らかにしたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1) 新古典拡散理論では、水素プラズマ中へ外部から混入する不純物イオンは、プラズマ中心付近に集中して蓄積されることが示されるが、現在のトカマク装置ではこの現象は顕著には見られない。筆者は、DI VA 装置を用いて不純物イオンの拡散過程を詳細に追跡し、実験結果を不純物イオンの一次元輸送コードを用いた解析結果と比較検討した。その結果、プラズマ中の不純物イオンは、新古典理論に基づくプラズマ中心に向う拡散に加えて、水素プラズマの拡散と同程度の外向きの異常拡散を仮定することによって実験結果を説明し得ること、および、この異常拡散のために、ダイバーターを用いない通常放電の場合でも、プラズマ中心に達する不純物イオン束は壁からの流入束の20%程度であることを示した。

2) ダイバーターを動かせることによって、壁からの不純物をプラズマ表面のダイバーター層（スクレイブ・オフ層）で遮蔽することにより、プラズマ中心に向う不純物イオン束をさらに数分の一に軽減させることが可能なことを示した。遮蔽された不純物イオンは、スクレイブ・オフ層プラズマの磁力線に沿う流速とはほぼ等しい速度でダイバーター室へ流入することが明らかにされた。

3) ダイバーターによって、プラズマ中心部より壁に向う不純物に対してもスクレイブ・オフ層を通し

てダイバーター室へ導く作用のあること、そのために壁に達する不純物粒子束が減少して、スパッタリングによる壁からの不純物の再発生が減少することを示した。又、ダイバーター室で発生する不純物が逆流して主プラズマに混入する割合は0.3%程度と小さいことを明らかにした。

4) 適量のガスを外部より注入してプラズマの表面を冷却することにより、壁からの金属不純物の混入量をさらに低くすることができることを示し、将来の大型トカマク装置に必要と考えられている周辺プラズマの冷却による不純物制御が有効であることを示唆する結果を与えた。

以上要するに本論文は、プラズマの大型化、高温化に伴って今後重要となる不純物対策の一方式としてダイバーターに着目し、系統的な研究によって、その作用を初めて明らかにしたものであり、得られた成果は今後の核融合研究に対して有用な知見を与えるものであり、学術上、實際上貢献するところが大きい。

よって、本論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。