

学位論文題名

トカマクプラズマ中の不純物挙動の分光法による研究

学位論文内容の要旨

本研究は、分光的手法を用いて高性能トカマク開発試験装置(JFT-2M)で得られる追加熱プラズマ中の不純物の挙動を明らかにし、それに基づき次期大型装置等の将来の核融合炉に適用可能な新しい不純物制御技術を探索することを目的として行った。

高温プラズマを閉込め、核融合反応を起こす制御熱核融合の研究は、トカマク装置の優秀性が認められて以来急速に進歩してきた。特に3大トカマク(TFTR, JFT, JT-60)装置の実験で熱核融合反応に対するローソン条件の達成がまじかに迫ってきた。しかしながら、閉込め領域からわずかに流出するプラズマ粒子(イオン, 電子, 中性粒子)と真空容器内壁との相互作用により壁材がプラズマ中に混入するため、純粋に重水素(D)と三重水素(T)のみのプラズマを作成することは実質的に不可能である。しかも、その混入量が僅かであっても、プラズマ中から莫大なエネルギーが損失し、ローソン条件の達成が著しく困難になる。特に、追加熱プラズマ中では、加熱方法に起因する新たな不純物発生機構による不純物混入量の増加やHモード等の高閉込めモード時における粒子閉込めの改善による不純物の蓄積等新たな問題が生じている。そのため追加熱プラズマでの不純物の発生機構及びプラズマ中での不純物の挙動を明らかにし、それに基づき不純物の混入量を低減させる方法及びプラズマ中の不純物を効果的に排除する方法を確立することが重要となる。特に次期装置等の核融合炉では、プラズマからの放射損失量を低減するばかりではなく、主に軽元素不純物の混入により生ずるプラズマ中の燃料の希釈を低減することも重要である。そのためには完全電離した軽元素不純物の挙動を明らかにする必要がある。そこで本研究では、従来行われてきた受動的分光法に加え、新たに加熱用中性粒子ビームと完全電離炭素イオンの荷電交換再結合反応を利用した荷電交換再結合分光法を用いて完全電離炭素イオンの挙動を明らかにした。以下に各章の概要を述べる。

第1章の序論では、本研究の目的と意義を述べた。第2章ではJFT-2M計画の目的と意義を述べ、実験に使用したJFT-2M装置本体、追加熱装置および各種の計測器の特徴や性能に

ついて概説した。第3章では、分光学的手法によりプラズマ中の不純物研究を行う上で必要不可欠な原子素過程の生起率係数とその精度およびプラズマモデルとその適用範囲について論じ、トカマクプラズマ中に混入する不純物の密度、放射損失量およびスペクトル線強度は、コロナ平衡モデルおよび修正コロナモデルを用いて評価できることを、動作気体(H, D)のそれは、衝突放射モデルを用いて評価できることを示した。また、本研究で使用する電離、再結合、励起の各生起率係数および自然放射遷移確率は、数10%の誤差を含むが、この誤差の範囲内で不純物の研究に充分適用できることを示した。第4章ではプラズマ中での粒子の輸送を議論するために必要なイオン温度およびトロイダル方向へのプラズマの回転速度の空間分布測定について記述した。核融合炉では中心付近のプラズマは非常に高温高密度となるため、この付近から発光するスペクトル線は主に軟X線領域の光となる。そのため、従来用いられていた可視分光器や真空紫外分光器ではプラズマ中心付近のイオン温度やトロイダル回転速度の測定ができない。そこで、新たに軟X線測定用結晶分光器を設計、製作した。小型のX線光源を使って焦点調整を行い、設計値通りの性能を有することを明らかにし、このようなプラズマの計測に使用できることを示した。次に高温高密度プラズマに対する能動的な測定法として、プラズマ加熱用の中性粒子ビームとプラズマ中の完全電離炭素イオンおよび完全電離水素イオンとの荷電交換再結合反応を利用した荷電交換再結合分光法をJFT-2Mに適用し、プラズマ中心付近のイオン温度とトロイダル回転速度の測定を行った。本測定法で測定したイオン温度と中性粒子エネルギー分析器で測定したイオン温度がよく一致することを示し、本分光法がイオン温度、トロイダル回転速度の空間分布測定の有力な手段であることを明らかにした。また、本測定法により、完全電離不純物イオンの挙動を知ることができることを示した。第5章では、本研究の主題である追加熱プラズマ中における不純物の挙動について記述した。最初に不純物の挙動を観測するために必要な斜入射分光器の特徴、性能および原子分岐線対法により行った本分光器の絶対感度較正について記述した。それより、較正誤差20%の範囲で本分光器が不純物イオンが放射するスペクトル線の発光強度の絶対測定に使用できることを示した。また、写真測定からJFT-2Mプラズマの主な不純物は、炭素、酸素および鉄であり、チタン蒸着を行った後では、チタンもプラズマ中に混入することが明らかになった。次にイオンサイクルトロン周波数帯(ICRF)波によるプラズマ加熱の実験から、ICRF加熱中の金属不純物はアンテナ近傍から発生し、高周波がアンテナ近傍に作る電場がその発生機構に大きく寄与していることを明らかにした。この結果に基づき、3本のアンテナの内、真ん中のアンテナに給電する高周波を逆相で印加することにより高周波の作る電場を小さくすることができた。その結果、ICRF加熱中の不純物の発生を約1/2に低減できることが分った。

さらに、アンテナ近傍に炭素板を設置することにより金属不純物の発生を低減でき、ICRF加熱中の放射損失量の増加を著しく低減することができた。Hモード中における不純物の挙動を調べる実験では、斜入射分光器を用いた受動的分光法及び荷電交換再結合分光法の測定結果から、ELMs (Edge Localized Modes) とよばれるHモード時特有の不安定性が発生していないHモードでは、金属不純物のみならず軽元素不純物もプラズマ中に集中することを初めて明らかにした。このような不純物の集中は、Hモード遷移によってプラズマ周辺での粒子閉込めが改善されるために起こることを明らかにした。また水素プラズマでのHモードにおける粒子閉込め特性は重水素プラズマでのそれより悪いために、水素プラズマの方が不純物の集中が小さいことを明らかにした。次にELMsの発生しているHモードでは、ELMsによりプラズマ周辺の粒子閉込めが劣化するために不純物がプラズマ中から排除され、その結果プラズマ中心の不純物の集中が抑制されることを明らかにした。またペレットを入射したHモードプラズマでは、ELMsが発生していないにも関わらず、不純物の集中が抑えられることを明らかにした。さらに、真空容器内壁に炭素板を設置することにより金属不純物の混入を約1/2に減少することができ、Hモード中の放射損失量の増加が低減され、より長時間Hモードを維持することができた。第6章では本研究の成果を総括した。

本研究から、金属不純物ばかりではなく軽元素不純物の混入も抑制することがプラズマの性能を向上させる上で重要であることを示した。また、ICRF波を逆相で入射することにより不純物発生量を低減できることを示した。さらにHモードプラズマに対する不純物制御方法として、ペレット入射による不純物制御法およびELMsの発生を制御することによる不純物制御法の可能性を明らかにした。

## 学位論文審査の要旨

主査 教授 山崎 初男  
副査 教授 山科 俊郎  
副査 教授 粥川 尚之  
副査 教授 榎戸 武揚  
副査 教授 本間 利久

制御熱核融合エネルギーを実用に供する有力な道として、現在、トカマク装置が盛んに研究されている。トカマク核融合炉について解決すべき問題は多々あるが、その炉心プラズマに限っても、いくつかの問題がある。その一つとして、器壁より炉心プラズマに混入する金属不純物が原因で放射損失が増大し、ローソク条件の達成を困難にする問題がある。この対策として、プラズマ対向壁表面を軽元素で覆う方法が取られているが、実用炉の場合、軽元素不純物による燃料希釈の欠点があり、根本的解決にならない。実用炉の実現には、炉心プラズマへの不純物混入の低減や炉心プラズマより不純物の排出等の不純物制御が必要である。また、プラズマ中での不純物の挙動についての十分な理解が必要である。

本論文は、以上の観点に立ち、高性能トカマク開発試験装置（JFT-2M）について、炉心プラズマ中不純物の挙動を分光法により研究した結果を述べている。以下に、著者の研究成果を列記する。

(1) 炉心プラズマの中心イオン温度が2～4 KeVとなった場合、不純物として鉄およびチタンを想定すると、発光スペクトル線は軟X線領域となる。これの測定のため、結晶分光器を設計・製作し、小型のX線光源を用いて性能の確認を行った。

(2) 能動的分光法である荷電交換再結合分光法をプラズマ中の完全電離炭素イオンおよび同水素イオンに適用し、イオン温度、プラズマのトロイダル回転速度、炭素不純物の空間分布の測定に成功した。

(3) イオンサイクロトロン周波数帯（ICRF）の高周波追加熱において、金属不純物の真空紫外域発光スペクトル（波長1～16ナノメートル）斜入射分光器で観測し、金属不純物がアンテナ付近から発生していることを明らかにした。高周波がアンテナ付近に作る定常電場が原因であることから、これを抑える励振方法を採用し、不純物低減に成功した。

(4) トカマクの追加熱時のエネルギー閉じ込め時間は、通常、ジュール加熱時より劣化する（L

モード)。しかし、ある条件のもとでは、追加熱中に閉じ込めの良好な状態（Hモード）に遷移することがある。著者は、両モードにつき、金属不純物を斜入射分光器で、軽元素不純物を荷電交換再結合分光法で観測し、これら不純物濃度の時間的推移とその空間分布を決定した。これにより、Hモードでは、プラズマ中の金属不純物のみならず軽元素不純物も濃度が増大することを初めて明らかにした。このような不純物の集中は、Hモード遷移によってプラズマ粒子の閉じ込めが改善される結果であることを示した。更に、Hモードのうちでも、Edge Localized Mode（ELMs）と呼ばれるHモード特有の不安定の発生している場合には、不純物濃度の増大が小さいことを明らかにした。

(5) 前項のHモードにおける不純物の集中を水素プラズマと重水素プラズマの場合で比較し、後者ではこの集中が一層強いことを示した。また、ペレットを入射したHモードでは不純物の集中が抑制されること、真空容器内壁に炭素板を取り付けると、金属不純物を低減でき、Hモードの持続に有効なことを示した。

これを要するに、著者は、JFT-2M トカマクプラズマにつき、イオン温度分布およびプラズマのトロイダル回転速度等のプラズマ状態と、そこにおける金属および軽元素不純物の空間分布、時間的推移を明らかにし、プラズマ中の不純物を低減する方策につき指針を与えている。これらは、トカマクプラズマに関する多くの新知見を含んであり、核融合炉工学に寄与することろ大である。よって著者は博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。