

氏名(本籍地)	水口 正紀 ( 鹿児島県 )
学位の種類	博士 ( 理学 )
学位記番号	博 甲 第 6792 号
学位授与年月日	平成26年 3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	Study of potential formation and low frequency fluctuations in the GAMMA10 tandem mirror (GAMMA10 タンデムミラーにおける電位形成と低周波揺動に関する研究)

主査	筑波大学教授	理学博士	坂本 瑞樹
副査	筑波大学教授	工学博士	今井 剛
副査	筑波大学教授	工学博士	中嶋 洋輔
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	吉川 正志

## 論 文 の 要 旨

本論文は、タンデムミラー型装置 GAMMA10 において、①電子サイクロトロン加熱(ECH)印加に伴う閉じ込め電位形成による電位制御、②エンド部ターゲットプレート接地抵抗替えによる電位制御の2種類の能動的電位制御法を用いて、プラズマ中の径方向電位形成と低周波揺動の振る舞いについて明らかにしたものである。

GAMMA10 はタンデムミラー型プラズマ閉じ込め装置であり、中央部から順に、セントラル部、アンカー部、バリア部、プラグ部、エンド部で構成されている。装置両端のプラズマガンによって種プラズマが生成され、イオンサイクロトロン加熱(ICH)によってプラズマが維持される。プラズマは磁気ミラーにより閉じ込められるが、速度空間のロスコーンに入り込んだ粒子はミラー磁場を通り抜けてエンド部へと損失してしまう(端損失)。この端損失を防ぐためにプラグ部に電子サイクロトロン加熱(ECH)を行い、正の閉じ込め電位を形成してセントラル部プラズマの閉じ込めの改善がなされる。セントラル部の電位と電位揺動及び密度揺動の計測には、それらの同時計測が可能な金中性粒子ビームプローブ(GNBP)が用いられた。GNBPの較正実験を通して電位計算式の導出及び誤差の評価が行われ、計測電位の誤差として $\pm 15$  V という値が得られた。

ICHによって維持されているプラズマにおいて観測された 10 kHz 付近のドリフト型揺動が、ECH(200 kW)印加により抑制される結果が得られた。このプラズマに対して GNBP で計測した電位分布及び揺動分布を詳細に解析した結果、ECH 印加前後でセントラル部中心電位が約 200 V から約 400 V に上昇すること、径方向電位分布が下に凸から上に凸の形状に変化すること、径方向電場が負から正に変化することが明らかとなった。ECH 印加時における  $E \times B$  ドリフトは、反磁性ドリフトと逆方向に回転していた。ECH 印加によるセントラル電位の上昇は、プラグ部に正の閉じ込め電位が形成され、セントラル部からの端損失イオンが減少することに起因している。揺動抑制に重要な役割を果たす径方向電場シアは、揺動

抑制時において GNBП の計測範囲  $R = 0 \sim 14$  cm では非常に小さいことが分かった。このことから、揺動抑制には  $R = 14$  cm より外側の電場シアが効いている可能性が示唆された。

次に、GAMMA10 エンド部に設置したターゲットプレートの材質や接地抵抗を変化させることによるセントラル部プラズマ電位制御実験において、電位形成、低周波揺動の振る舞いについて詳細な計測及び解析が行われた。ターゲットプレートは西エンドコイルの出口から 543 mm エンド側の位置に挿入された。プレートは半径 50 mm の円形で、磁束管に沿ってセントラルに投影した場合、その投影範囲は半径 41 mm の円となる。ターゲットの二次電子放出係数の違いが電位形成に与える影響を調べるため、ターゲットには二次電子放出係数の異なる 2 種類の材質（カーボン及びタングステン）が用いられた。接地抵抗値 280 k $\Omega$ （浮遊状態）の時、ECH (50 kW) 印加時におけるターゲットプレート電位は、カーボンターゲットの方がタングステントargetより負に深く沈むことが分かった。この違いは、ECH 印加時（電子温度 600 ~ 800 eV 程度）ではタングステンの実効的二次電子放出係数がカーボンよりも 0.3 ~ 0.4 程度大きいことに起因していることが示された。カーボンターゲットとタングステントargetの電位は大きく違うが、セントラル部のプラズマ電位は両者のターゲット挿入時に違いは見られなかった。これは、エンド部におけるプラズマ電流に対してターゲットに流れる正味電流が非常に小さいため、ターゲット電位の変化がプラズマに与える影響は小さいことに起因している。

ターゲットプレートの接地抵抗を 280 k $\Omega$  から 80  $\Omega$  に低下させると、ECH 印加時間帯においてセントラル電位が平坦な分布から大きく上に凸の分布に変化することが明らかとなった。これは、ターゲットプレートからアースへの電氣的抵抗が小さくなることによってプレートに流れ込む端損失電子が増加し、閉じ込め電位が上昇したことに起因していることが示された。セントラル電位の上昇量は、磁力線に沿ったターゲット板のセントラル部での投影領域  $R = 0 \sim 4$  cm で特に大きく、約 190 V から約 350 V に上昇し、ターゲット投影領域ではほぼ平坦、その外側  $R = 4 \sim 9$  cm で急峻な電位分布（約 13 V/cm）が形成されていることが明らかとなった。この時の、セントラル部における電位揺動及び密度揺動を解析した結果、13 kHz 付近に特徴的な揺動が観測された。ターゲット電位でも同じ周波数帯の揺動が観測されており、セントラル部からエンド部にかけて揺動の相関があることが示された。今回観測された揺動には、①電位揺動強度は電場が最大となる領域  $R = 4 \sim 9$  cm で最大を示すこと、②密度揺動強度は電位分布が比較的平坦なターゲット投影範囲  $R = 0 \sim 4$  cm で最大を示すこと、③電位揺動、密度揺動共に  $R = 11$  cm より外側では観測されないこと等のこれまで観測されてきた揺動とは異なる新しい特性を持った揺動であることが分かった。

## 審 査 の 要 旨

〔批評〕

プラズマの閉じ込め研究において、プラズマ中で発生する揺動の振る舞いを理解することは重要な課題である。この論文では、タンデムミラー型装置 GAMMA10 を用いて、①プラグ部への電子サイクロトロン加熱 (ECH) による径方向電位制御と②エンド部でのターゲット板接地抵抗替えによる径方向電位制御の 2 種類の手法を用い、金中性粒子ビームプローブ (GNBP) による径方向電位分布の詳細な計測を実施することで、径方向電位形成と低周波揺動の振る舞いについての研究がまとめられている。プラズマの径

方向全領域で発生したドリフト型揺動がプラグ部への ECH 印加によりノイズレベルまで抑制されたときに、正の径方向電場が形成されたことが示された。また、GAMMA10 エンド部に設置したターゲット板の接地抵抗値を 280 k $\Omega$  (浮遊電位状態)から 80  $\Omega$  に低下させ、プラグ部に ECH (50 kW) 印加を行うことで、セントラル部に電位上昇を引き起こした。径方向中心での電位は約 190 V から約 350 V に上昇し、磁力線に沿ったターゲット板のセントラル部での投影領域でほぼ平坦、その外側で急峻な電位分布 (約 13 V/cm) が形成されていることが明らかとされた。さらに、ターゲット板のセントラル部投影領域にのみ低周波 (約 13 kHz) の密度揺動が観測され、投影領域の内側では密度揺動が強く、その外側の電位勾配の急峻な領域では電位揺動が強く観測されること等を明らかにし、これまで観測されてきた揺動とは異なる特性を持った揺動が発生することが今回新たに示された。また、学位論文審査における質問に対する的確な回答が得られた。

#### 〔最終試験結果〕

平成 26 年 2 月 18 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

#### 〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士 (理学) の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。