

氏名	いな がき しげる 稲垣 滋
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成9年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）原子核工学専攻
学位論文題目	ヘリアックプラズマにおける電極バイアスによる閉じ込め特性の改善に関する研究
指導教官	東北大学教授 渡辺 博茂
論文審査委員	主査 東北大学教授 渡辺 博茂 東北大学教授 戸田 三郎 東北大学教授 佐藤 徳芳 東北大学助教授 北島 純男

論文内容要旨

核融合炉の実現には良好なプラズマ閉じ込め特性が必要である。しかし、全てのプラズマ閉じ込め装置において、予測のつかない原因でプラズマが逃げてしまう現象が観測されており、核融合炉として十分な閉じ込め特性はいまだ達成されていない。現在、この異常損失の理解と抑制とがプラズマ閉じ込め研究の中心課題となっている。

最近のトカマクプラズマでは H モードと呼ばれる閉じ込め改善モードが発見された。この H モードの研究から、異常損失の問題が徐々に整理されてきた。特に径方向電場が異常損失の抑制に重要な役割を担っていることが明らかになってきた。今後はこの径方向電場を制御し、より良好な閉じ込め特性を達成することが必要であると考えられる。本研究は径方向電場を制御し、プラズマ閉じ込め特性を改善する事、径方向電場と閉じ込め特性との関係を実験的に明らかにする事を目指したものである。

第1章 序論

序論では、本研究の背景、目的について述べている。

まず、トカマクでの H モードプラズマの理論的、実験的研究から径方向電場が重要な物理量であると

認識されていることを述べた。次にヘリカル系の装置に関しては、一部の装置では H モードが観測されているが、装置に固有の条件があり、ヘリカル系の装置全体で H モードが共通の現象であるとは言い難い事を指摘した。そしてヘリカル系での径方向電場とプラズマ閉じ込めの関係を明らかにすることは、ヘリカル系の閉じ込めの改善、及びトーラス型装置の閉じ込め特性の理解という点で非常に重要であると考え、ヘリカル系の装置である東北大学ヘリアック装置 (TU-Heliac) に着目した。TU-Heliac において、径方向電場を誘起することによってヘリアックプラズマの閉じ込め特性を改善する事、及び径方向電場と閉じ込め特性の関係を明らかにする事を本研究の目的とした。トカマクにおける径方向電場制御法の一つとして、プラズマ中に挿入した電極をバイアスする実験が行われており、この電極バイアス実験で H モードが達成されている。そこで TU-Heliac においても電極によって径方向電場を制御し、ヘリカル系における電極バイアス実験の有効性を実証する事とした。

第 2 章 実験装置

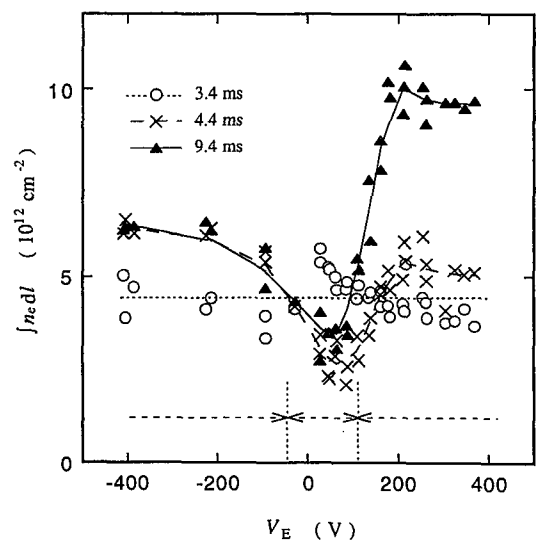
本章では、東北大学ヘリアック装置 (TU-Heliac)、電極バイアス実験で用いた電極、電極バイアス実験の方法、及び主な計測装置について説明している。TU-Heliac は大半径 48 cm、プラズマ半径 6.6 cm の小型標準ヘリアックである。TU-Heliac ではプラズマ中に挿入した球電極 (直径 8 mm、ステンレス製) と真空容器との間に矩形の電圧 (最大 ± 400 V) を印加している。電圧を印加していない場合は、電極は浮動電位にある。

第 3 章 電極バイアス実験における線電子密度の改善

本章では、電極をバイアスした場合のプラズマの変化を線電子密度 $\int n_e dl$ の変化で議論した。図 1 に示したように線電子密度の変化は電極バイアス V_E に依存する事が明らかになったので、特徴的な以下の三つの領域に分けて議論することとした。

(1) $V_E > 100$ V

電極をバイアスする前と比較して、線電子密度は最大



線電子密度変化の電極バイアス依存性

電極は 3.75 ms でバイアスしている。よって 3.4 ms では電極は浮動電位にある。

図1

で2倍増加、

(2) $100 \text{ V} > V_E > -40 \text{ V}$

線電子密度は最大で50%減少、

(3) $V_E < -40 \text{ V}$

線電子密度は最大で30%増加、

ここで-40 Vは電極をバイアスする前の電極の浮動電位である。

第4章 線電子密度が改善された場合の閉じ込め特性の変化

本章では、線電子密度が約2倍増加する放電（第3章参照）において、閉じ込め特性の変化について述べた。 $V_E = 200 \text{ V}$ の場合に、線電子密度の急峻化、及びイオン飽和電流と浮動電位の揺動レベルの減少を観測し、これから粒子の閉じ込めが改善された事を示唆した。この時、強い正の径方向電場、及び大きなイオン反磁性方向のフローが形成されていることを明らかにした。さらに、径方向電場が形成されるのはバイアス印加後0.5 ms以内であり線電子密度が増加し始める時間よりも早いことから、径方向電場の形成が線電子密度増加の結果ではなく、むしろ原因であることを指摘した。また、揺動の抑制はフローに大きなシアーが形成される領域で観測されたことから、理論で予測されるシアーフローによる揺動の抑制の可能性を指摘した。

第5章 径方向電場の閉じ込め特性に対する影響

本章では、線電子密度が減少する、あるいは大きく増加しない電極バイアス条件における径方向電場の挙動を述べ、線電子密度が大きく増加する場合（第4章参照）と比較することにより、径方向電場と閉じ込め特性の関係を議論した。第3章で示した三つの領域について、それぞれの領域で代表的な電極バイアス（ $V_E = 200 \text{ V}$, 60 V , -400 V ）で実験を行い径方向電場と揺動レベルの変化を比較した。その結果、強い径方向電場は $V_E = 200 \text{ V}$ の場合にのみ形成され、他のバイアス（ $V_E = 60 \text{ V}$, -400 V ）では径方向電場はほとんど変化していない事を明らかにした。さらに、強い径方向電場が形成された場合のみ揺動レベルの抑制が観測されることを指摘した。これから揺動の抑制による線電子密度の改善には、強い径方向電場を駆動する必要があることを明らかにした。

第6章 電極条件、及びターゲットプラズマに対する依存性

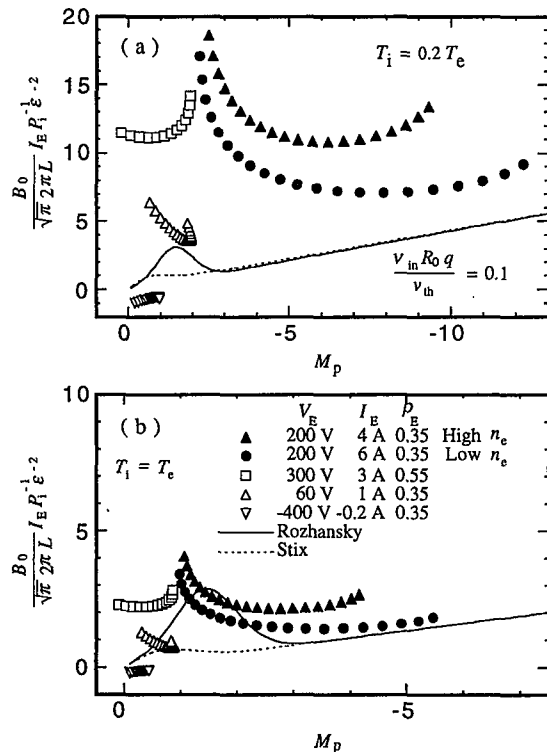
本章では、径方向電場の形成、及び線電子密度の変化は電極の運転条件やターゲットプラズマの状態にどのように依存するかについて述べた。まず電極のプラズマ挿入位置に対する依存性について述べた。電極に 200 V 印加してプラズマから徐々に抜くと、ある位置から突然線電子密度は増加しなくなることを観測し、この線電子密度が増加しない領域では、径方向電場はほとんど変化していないことを明らかにした。次に注入中性粒子密度を増加させ、ターゲットプラズマの電子密度、電子温度、中性粒子密度を変化させた場合について述べた。注入中性粒子密度を増加させた場合、電子密度、電子温度、中性粒子密度は独立には変化しないが、ある値以上の中性粒子を注入した場合、線電子密度は増加しなくなることを確認した。以上のことから、電極をバイアスすることで強い径方向電場を形成するには、電極印加電圧、電極挿入長、そしてターゲットプラズマがある条件を満たさなければならない事を明らかにした。

第7章 イオン粘性

本章では、第6章で示された「強い径方向電場を駆動するための条件」を「電極電流によるプラズマフローの駆動力は、新古典平行イオン粘性とイオンと中性粒子との荷電交換反応によってダンピングする。」というモデルで議論した。このモデルは一流体方程式を基礎とし、軸対称プラズマでは以下の方程式で表される。

$$\frac{I_E B_0}{2\pi L \pi p_i \epsilon^2} = -f(M_p) - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1 + 2q^2}{q^2} \frac{v_{in} R_0 q}{v_{th}} M_p \quad (1)$$

ここで I_E は電極電流、 B_0 は磁気軸の磁場、 L は磁気軸の長さ、 p_i はイオン圧力、 ϵ はトロイダルリップル、 q は安全係数、 R_0 は装置の大半径、 v_{in} はイオンと中性粒子の荷電交換反応の実効衝突周波数、 v_{th} はイオンの熱速度、 M_p はポロイダルマッハ数であり、イオン粘性のポロイダルマッハ数依存性を示す無次元関



フローのダンピング力のポロイダルマッハ数依存性

図2

数 $f(M_p)$ としては Rozhansky らの式 $f(M_p) = M_p(1 + 2M_p^2 + 2M_p^4)\exp(-M_p^2)$ 及び Stix の式

$$f(M_p) = M_p \left(\exp(-M_p^2) + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{v_{ii} R_{qj} / v_{in}}{M_p^2 + 1} \right)$$

を用いた。ここで v_{ii} はイオンの衝突周波数である。TU-Heliac は非軸対称系であり多くの磁場フーリエ成分を含んでいるが、本研究ではトロイダルリップルのみを考慮し非軸対称成分は無視した。図 2 (a) はイオン温度 T_i を電子温度 T_e の 0.2 倍と仮定した場合の、図 2 (b) は $T_i = T_e$ と仮定した場合の、実験的に求めた式 (1) の左辺の M_p 依存性である。実線と点線は式 (1) の右辺をそれぞれ Rozhansky らの式、Stix の式で評価したものである。この図から新古典理論と一致する点として以下の点があげられる。

- (1) $M_p \sim -1$ 付近で、フローのダンピング力は極大値を持つ。
- (2) M_p が大きな領域では、ダンピング力はイオンと中性粒子との荷電交換反応が支配的である。

第 6 章で示した強い径方向電場を駆動するための条件の中で、電極の運転条件については、このプラズマフローのダンピング力が極大値を持つことで定性的に説明した。

第 8 章 結論

本章では、本研究で得られた新たな結論を列記した。その結論を以下に示す。

- (a) ヘリアックプラズマ中に挿入した電極に 100 V 以上の電圧を印加することにより、強い径方向電場を駆動し、ヘリアックプラズマの線電子密度を 2 倍に増加させた。
- (b) シアーフロー領域でイオン飽和電流と浮動電位の揺動レベルは減少し、強い密度勾配が形成する。これは「シアーフローによる揺動の抑制」理論と定性的に一致する。
- (c) 強い径方向電場を駆動するには電極印加電圧、電極挿入長がある条件を満たさなければならない。
- (d) 実験的に求めたプラズマフローのダンピング力のトロイダルマッハ数依存性は、新古典理論と定性的に一致する。

審査結果の要旨

核融合炉を実現するためには、良好な閉じ込め特性を持った高ベータ値の炉心プラズマ得ることが最重要課題の一つである。

本論文は、ヘリカル磁気軸ステラレーター（ヘリアック）に於て、プラズマ中に挿入した電極にバイアスを与えることによって、径方向電場を形成、制御し閉じ込め特性の改善をはかると共に、径方向電場に伴って生じるプラズマのポロイダル方向の流れと新古典論による粘性との関連を明らかにしたもので、全編8章よりなる。

第1章は序論で、論文の背景、研究目的及び構成等について述べている。

第2章では研究の対象とするプラズマを生成する東北大学ヘリアック装置、及び計測系等が記述されている。

第3章では電極バイアス実験における条件とプラズマの線電子密度に対するバイアス電圧の依存性が述べられている。

第4章では、線電子密度が増加した場合閉じ込め特性の変化を論じ、電子密度の急峻化、ポロイダル方向フローシアアの形成、フローシアア領域の揺動の抑制などの現象が生じ、プラズマの閉じ込め特性の改善が行われている事を明らかにしている。

第5章では、電極バイアス電圧値を変化させた場合、100 V 以上と、それ以下の正バイアスの場合、負のバイアスの場合と三つの領域でプラズマの閉じ込め特性に変化があり、その要因等について論じている。

第6章では、電極の挿入位置を変化させた場合のプラズマの閉じ込め特性を論じている。

第7章では、プラズマ閉じ込め特性の改善の主要因である径方向電場の形成機構について検討している。新古典論のイオン粘性を導入することにより、「電極電流によるフロー駆動力とイオン粘性とイオン-中性粒子の相互作用によるフローの減衰力とが釣り合うように決まる」ことを明らかにした。

第8章は結論であり、本研究の成果をまとめている。

以上要するに本論文は、プラズマの閉じ込め特性の改善には、プラズマ中に径方向電場の形成が不可欠である事を明確にすると共にその形成の機構を明らかにしたものであり、原子核工学、特にプラズマ・核融合工学の発展に寄与することが少なくない。よって本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。