

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	非軸対称コイルによるプラズマ垂直位置安定化に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	内藤 晋
Author(English)	Shin Naito
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12775号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:筒井 広明,林崎 規託,赤塚 洋,近藤 正聡,長谷川 純
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12775号, Conferred date:2024/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	融合理工学 原子核工学	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 (工学) Academic Degree Requested Doctor of
学生氏名： Student's Name	内藤 晋	審査員主査： Chief Examiner	筒井 広明

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx. 2000 Japanese Characters)

核融合発電炉の最有力候補と目され、世界中で研究開発が行われているトカマクは、プラズマ断面の縦長化によるプラズマの高圧力化、閉じ込め改善に伴い、その垂直位置が不安定になるという問題を抱えている。通常、縦長断面プラズマの垂直位置変位は、位置のフィードバック制御やプラズマ周辺への導体壁の設置といった手法により抑制されている。しかしこれら手法により位置変位が抑制できるプラズマの縦長度 κ には上限が存在し、高 κ 化によるプラズマの高性能化が阻まれている。さらに、上記手法により垂直位置変位が抑制された系でも、垂直位置が本質的に不安定平衡の状態にあることには変わりなく、制御の失敗や MHD 不安定性に起因する位置の不安定化により、プラズマが炉壁に衝突する可能性が常に存在する。上記手法以外に不安定な垂直位置を安定化する手法として、軸対称なトカマクプラズマに非軸対称磁場を印加する手法が知られている。この手法では垂直位置を安定平衡の状態にできるため、制御による位置変位の抑制なしに垂直位置を安定な状態に保つことが出来る。加えて、位置制御と併用すれば既存装置より高い κ の実現も可能である。一方、非軸対称磁場の印加に主として用いられるヘリカルコイルは、トーラス中心を通りなおかつ装置全体を覆うため、設置により装置サイズを著しく大型化し、商業的に魅力的なコンパクトかつ高出力な装置の成立を阻害してしまう。

以上の問題を解決すべく、著者所属研究室で単純かつ非軸対称な形状で、装置を大型化しない複数のサドルコイルが生成する非軸対称磁場により、プラズマ垂直位置を安定化する手法が提案された。本論文での研究は、このサドルコイルが生成する非軸対称磁場(サドルコイル磁場)の性質を多角的に検討し、垂直位置の安定化効果を持つか否かの検証、及びその性質の詳細の理解を目的に行われた。本論文の内容は以下の通りである。

第 1 章「序論」ではトカマクの概要や垂直位置不安定性、さらに上記の非軸対称磁場印加についての概略を記述し、非軸対称磁場による垂直位置安定化の有効性について述べた。

第 2 章「サドルコイルが生成する非軸対称磁場」では磁力線追跡により、サドルコイルの生成する非軸対称磁場とトロイダル磁場との合成磁場(以下、サドルコイル磁場と呼称)の磁力線構造が調べられた。結果サドルコイル磁場は、ポロイダル方向への射影で、軸対称垂直磁場における n -index が正となる磁場に似た湾曲した磁力線構造を取ることが確認された。さらに磁力線方向に積分平均を取り求めた磁力線平均磁場の計算により、サドルコイル磁場は垂直位置安定化に寄与する可能性がある、磁力線方向の水平磁場成分を持つことを明らかにした。またサドルコイル磁場に適切な軸対称ポロイダル磁場を重畳すれば、閉磁気面の生成が可能であることを示した。

第 3 章「トカマク実験装置 PHiX」では、サドルコイル磁場を用いた実験を行うために、小型トカマク装置 PHiX への新規設計されたサドルコイルの組み込みや新たな干渉計視線の導入、プラズマ放電特性の改善、ノイズ対策等を行った。加えて、フラックスループ信号の差分を用いた相関係数積法によるプラズマ位置推定法を確立し、放電ごとのプラズマ位置推定を可能にした。

第 4 章「PHiX でのサドルコイル実験」では、以上の装置に関連した改良を基にトカマク放電実験を行い、サドルコイル磁場の垂直位置安定化効果を検証した。結果、サドルコイル磁場による垂直位置安定化効果を実験的に確認した。さらに、その垂直位置安定化効果はサドルコイル電流の 2 乗に比例することを明らかにした。

第 5 章「VMEC を用いた 3 次元非軸対称 MHD 計算」では、サドルコイル磁場が印加された平衡がどのような磁気面形状を取るかを、3 次元 MHD 平衡計算コード VMEC により検討した。VMEC により計算された平衡から、サドルコイル磁場により磁気面形状だけでなく磁気軸位置も非軸対称変形することを明らかにした。さらに実験中垂直位置が安定化され、プラズマ中心が真空容器中心に維持され続けた放電の平衡を推定し、それらの平衡がトロイダル平均で縦長断面の平衡であった可能性を指摘した。またサドルコイル磁場は、トカマクの持つ本来の磁場分布を変調し、高エネルギー粒子閉じ込めや新古典輸送の劣化をもたらすことを明らかにした。

第 6 章「TERPSICHORE による線形 MHD 安定性解析」では、VMEC で計算された平衡を、3 次元線形理想 MHD 安定性計算コード TERPSICHORE を用いて解析し、線形理想 MHD 方程式から予測されるサドルコイル磁場の垂直位置安定化効果を調べた。計算結果は、サドルコイル磁場の垂直位置安定化効果を支持した。加えて、実験でも確認されたように、垂直位置の線形成長率がサドルコイル電流の 2 乗に対しおおよそ線形で減少する現象が確認された。

第 7 章では、全体の総括を述べた。

以上の実験、数値計算両者の結果から、サドルコイルの生成する非軸対称磁場は、垂直位置不安定かつ縦長

断面のトカマクプラズマの垂直位置を安定化する効果を持つと結論付けられた。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)

Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of Graduate major in	融合理工学 原子核工学	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	内藤 晋		審査員主査： Chief Examiner	筒井 広明	

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

A Tokamak, considered as the primary candidate for fusion power reactors, faces an issue where its vertical position becomes unstable due to the elongation of the plasma cross-section that contributes to increasing plasma pressure and improving confinement. A method to stabilize an unstable vertical position by applying a non-axisymmetric magnetic field to a tokamak plasma is known, but the helical coils mainly used to generate the non-axisymmetric magnetic field increase the size of the device. In order to solve the above issue, this study examines whether the vertical position of the plasma can be stabilized by the non-axisymmetric magnetic field generated by multiple saddle coils, which have a simple and non-axisymmetric shape and do not enlarge the device.

The vertical position stabilizing effect of the saddle coils was verified both experimentally and numerically. On the experimental side, to enable below experiments, the small tokamak device PHiX was modified and a new method was introduced to enable measurement of the plasma position. Tokamak experiments were performed in PHiX after those modifications, and the vertical position stabilizing effect due to the saddle coil magnetic field was experimentally confirmed. Furthermore, it was found that the vertical position stabilization effect was proportional to the square of the saddle coil current.

On the numerical side, a three-dimensional equilibrium calculation of the plasma was performed using the VMEC code to investigate the effect of the saddle coil magnetic field on the flux surface shape. Those VMEC results suggested that the equilibrium whose vertical position was stabilized in the experiment had an elongated cross-section in toroidal average. In addition, the results of ideal MHD calculations with the TERPSIHCORE code also reproduced the experimental results.

Both experimental and numerical results led to the conclusion that the non-axisymmetric magnetic field generated by the saddle coils effectively stabilizes the unstable vertical position of a tokamak plasma with an elongated cross-section.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).