

報告番号	甲 第 13625 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 局所ヘリカル磁場コイルによるトカマクプラズマの位置安定化に関する研究
(Study on stabilization of position of tokamak plasma with local helical magnetic field coils)

氏 名 安田 幸平

論 文 内 容 の 要 旨

トカマク型核融合炉ではプラズマ位置不安定性やディスラプション(プラズマ閉じ込めの崩壊現象)による熱負荷や電磁力による炉内機器の損傷が問題となる。特に、縦長断面トカマクはベータ値(プラズマを閉じ込める印加磁気圧に対するプラズマ圧力の比)を高くできるなどトカマク方式に必須なものであるが、垂直移動現象(Vertical Displacement Event:VDE)を伴う垂直位置不安定配位である。楕円度を上げるほどプラズマ性能は向上するが垂直位置はより不安定になり、到達できる楕円度は垂直位置不安定性で制限される。位置制御の手法として、高速制御軸対称コイルによるプラズマ位置のフィードバック制御や導体壁に流れる渦電流による壁安定化効果が一般的であるが、一方で外部ヘリカル磁場印加が位置安定化に効果的であり、特に連続巻きヘリカル磁場コイルを用いた実験で高楕円度プラズマにおいても垂直位置安定化が報告されている。実用上は連続巻きコイルより配置・形状が簡易的でトカマク装置への適用が容易な「局所ヘリカル磁場コイル」が望ましく、その安定化効果も報告されている。しかし、特に局所コイルによる縦長断面トカマクにおける垂直位置安定化の実験的検証は例が少なく、位置安定化に必要なヘリカル磁場の条件は明らかではない。本研究の目的は、トカマク・ヘリカル混成装置 TOKASTAR-2 を用いて、局所ヘリカル磁場コイルによる位置安定化を実験的に検証することである。TOKASTAR-2 は大半径外側に設置された側面平行四辺形コイルと上下に設置された上下扇型コイルで構成される分割された局所コイルを有する点が特徴である。本研究では、(1)既存局所ヘリカルコイルによる水平位置安定化実験、(2)既存局所ヘリカルコイルによる垂直位置安定化実験、(3)新規

局所ヘリカルコイルの設計・製作、(4)新規局所ヘリカルコイルによる垂直位置安定化実験を実施した。本論文は全8章で構成される。

第1章では、トカマクプラズマの位置制御の概要、ヘリカル磁場による位置安定化に関する先行研究等について説明し、本研究の目的を述べた。

第2章では、TOKASTAR-2装置の磁場コイル系などについて説明した。本研究で新たに導入した垂直磁場のトロイダル方向分布を計測するトロイダル磁気プローブについても述べた。

第3章では、既存局所ヘリカルコイルを用いた円形断面トカマクにおける水平位置安定化実験について述べた。トロイダル方向に並べた磁場計測器と磁束ループの外部磁気計測でプラズマ位置形状推定を行うフィラメント電流近似法を用いた解析コードを開発した。プラズマ電流の6倍程度の非常に大きい渦電流がある状況下での位置形状の推定を確立した。垂直磁場をスキャンし、ヘリカル磁場ありなしでプラズマ水平位置を比較した。垂直磁場がやや弱い磁場配位では、水平位置不安定とされる垂直磁場の decay-index が 1.5 以上の領域が径方向外側で広く現れる。その磁場配位では径方向外側でプラズマが生成され水平位置が振動する現象が観測されたが、ヘリカル磁場により抑制され、水平位置が安定化されることを明らかにした。先行研究では、大半径外側とプラズマ上下を通るコイルである semi-stellarator windings での水平位置安定化が報告されたが、より簡易的な側面平行四辺形コイルのみで水平位置安定化が可能であることを明らかにした。

第4章では、既存局所ヘリカルコイルを用いた縦長断面トカマクにおける垂直位置安定化実験について述べた。プラズマの上下に設置した軸対称コイルである SC(Shape Control)コイルを新たに用いて、VDE が発生する垂直位置不安定な縦長断面トカマクを生成する実験を行った。ヘリカル磁場を印加しない場合、VDE の向きが VDE 前の垂直位置に依存する、SC コイル電流が低い場合で垂直位置を赤道面付近に調整すると VDE が発生しない、といった基礎的な性質を示した。ヘリカル磁場を印加し、垂直位置への効果を調べた。しかし、これらの特性に大きな変化は見られず、VDE は解消されなかった。SC コイル電流を低く、ヘリカルコイル電流を高くしても VDE 抑制について明確な効果は得られなかった。これらの結果から既存ヘリカルコイルは垂直位置安定化への効果はないと結論付けた。

第5章では、位置安定化をもたらすと考えられるヘリカル磁場が生成する実効的な垂直・水平磁場の評価について述べた。ヘリカル磁場による垂直位置安定化は、ヘリカル磁場が生成する赤道面上下で逆向きの実効的な水平磁場 B_r^{eff} のローレンツ力による復元力によって達成されると考えられている。そこで、既存ヘリカルコイルが垂直位置安定化に有効でない理由を調べるために、ヘリカル磁場においてトロイダル方向に周回する磁力線に沿った磁場の平均値として実効的な水平磁場を評価する磁力線追跡計算コードを開発した。既存コイルによる実効水平磁場は復元力として働く赤道面上下で逆向き分布とならず、SC コイル等が生成する垂直位置不安定化させる水平磁場と比べて磁場強度が非常に弱いことを明らかにした。磁場分布の改善のためには新規コイルが必要であると結論付けた。

第6章では、垂直位置安定化のための新規局所ヘリカルコイルの設計・製作について述べた。プラズマ上下に2個ずつ設置した三角形コイル(Upper and Lower Triangular:ULT コイル)を設計した。ULT コイルは径方向を横切る斜めのコイル部を持つ点の特徴であり、トロイダル磁場と水平磁場を両方生成し、トロイダル磁場を変調することで実効的な水平磁場を生成することができる。その実効水平磁場は、赤道面の上下で逆向きの分布で、コイルに近づくほど(赤道面から離れるほど)急激に強くなるため、垂直位置安定化への効果が期待される。他の機器と干渉しない範囲で実効水平磁場が最大となるようにそのコイル形状を決定した。さらに、軸対称コイルでは実現できない実効水平磁場が ULT コイル電流の2乗に比例する性質や、側面平行四辺形コイル等と組み合わせることで、既存コイル系では困難であった磁気軸が赤道面にあり、かつ回転変換(磁力線のねじれ具合を表す指標)がより強い真空閉磁気面を生成できることを示した。

第7章では、ULT コイルとトロイダル磁気プローブを設置した装置改造後の実験について述べた。トロイダル磁気プローブを用いた磁気計測により、ULT コイル磁場印加によるトロイダルモード数 $n=1$ の磁場構造が見られ、ULT コイル電流が高くなると $n=1$ の磁場振幅も高くなることを示した。ULT コイルを用いて縦長断面トカマクにおける垂直位置への効果を調べた。ULT コイル磁場印加により、垂直磁場の decay-index がより負になり VDE しやすい水平位置内側や垂直位置が赤道面から離れた位置でも VDE が抑制され、VDE が発生しないプラズマ位置の領域が広がることを明らかにした。さらに、断面を縦長にする SC コイル電流が高くなるとその領域が狭くなり、ULT コイル電流が高くなると広がった。つまり、垂直位置不安定化させる SC コイルが生成する水平磁場と、垂直位置安定化させる ULT コイルが生成する実効的な水平磁場との兼ね合いで VDE の発生条件が決定される。

定量的評価として、約 850 の全放電で評価した、SC コイル磁場を含む軸対称コイルによる水平磁場の垂直方向微分 $\partial B_r / \partial Z$ と ULT コイルによる実効的な水平磁場の垂直方向微分 $\partial B_r^{\text{eff}} / \partial Z$ を用いて VDE 発生条件つまり垂直位置安定化条件を整理した。 $\partial B_r / \partial Z$ が高く $\partial B_r^{\text{eff}} / \partial Z$ が低い場合、つまり SC コイル磁場が強く ULT コイル磁場が弱い場合、VDE が発生しやすい傾向が見られた。垂直位置安定化条件として、軸対称磁場の $\partial B_r / \partial Z$ のおおよそ数分の1程度の $\partial B_r^{\text{eff}} / \partial Z$ のヘリカル磁場を印加すると VDE が抑制されることを明らかにした。また、ULT コイル磁場印加トカマクの VDE 放電における、VDE 成長率への ULT コイル磁場の効果も調査した。成長率は、 $\partial B_r / \partial Z$ が高いほど増加し、 $\partial B_r^{\text{eff}} / \partial Z$ が高いほど減少することを示し、ULT コイル磁場印加トカマクで VDE が発生したとしても VDE 成長率を減少させるつまり VDE を緩やかにできることを明らかにした。

最後に、先行研究の連続巻きヘリカルコイル等との比較のために、連続巻きコイル等が生成する実効的な水平磁場を計算した。連続巻きコイルの実効水平磁場は ULT コイルが生成する磁場と同様な分布となり、逆に言えば ULT コイルは垂直位置安定化を示した連続巻きコイルと同様な実効的な水平磁場を生成することができ、垂直位置安定化に必要なコイルを簡略化することができたと言える。連続巻きコイルを用いた先行研究ではヘリカル磁場

の真空閉磁気面の回転変換を指標として垂直位置安定化効果が整理された。実効磁場による整理は ULT コイルのような真空閉磁気面を生成しないヘリカルコイルにおいても適用可能であり、本研究では実効水平磁場を指標として垂直位置安定化効果を整理できることを実験的に示した。以上、プラズマ上下のみに設置した三角形形状の簡易的な局所コイルで縦長断面トカマクの垂直位置安定化が可能であることを実証した。

第 8 章では、総括としてまとめと今後の課題を述べた。

以上のように本研究では、ヘリカル磁場のトカマクプラズマ位置への効果に関連して、安定化をもたらすと考えられる実効水平・垂直磁場の評価に基づき、側面平行四辺形コイル磁場印加による水平位置安定化、及び新規に設計・製作した上下三角形コイル磁場印加による垂直位置安定化を実証した。さらに実効水平磁場を指標とした垂直位置安定化条件を明示した。これらの成果は、位置安定化のためのヘリカルコイルの簡略化の可能性を示すとともに、トカマクプラズマの位置形状制御研究に新たな知見を与え貢献するものである。