

氏 名 高 橋 龍 吉

学位（専攻分野） 博士(工学)

学 位 記 番 号 総研大乙第39号

学位授与の日付 平成9年3月24日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学 位 論 文 題 目 ヘリオトロンE装置における真空磁気面および不整磁場に関する
研究

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 松岡 啓介
教 授 須藤 滋
教 授 本島 修
教 授 渡邊 二太（核融合科学研究所）
教 授 佐野 史道（京都大学）

トカマク装置がプラズマ中の電流によって磁気面を作るのに対し、ヘリオトロン装置においては、ヘリカルコイルと垂直磁場コイルによって高回転変換、高シアーを特徴とする磁場配位が形成される。この特徴的な磁場配位はプラズマの安定化には有効に作用するが、種々のモードの不整磁場と共鳴しやすい有理面をその閉じこめ領域に内包する。有理面と共鳴した不整磁場によって磁力線は乱され、場合によっては磁気島を形成する。この磁気島は粒子損失を増大させ、プラズマの加熱や閉じこめを悪化させる。また、現実的には製作誤差の全く存在しない理想的な装置を建設する事は不可能であること、装置本体の回りにはプラズマ加熱装置や計測装置の磁気シールドとして多量の磁性体が持ち込まれること等から、実験装置は不整磁場の発生しやすい状況下に置かれる。ヘリオトロン装置ではプラズマの存在しない真空磁気面が存在するため、これを実験的に測定する事が可能である。従って、ヘリカルシステムの基本である真空磁気面を精度良く把握すること、これに及ぼす不整磁場の影響を調べることはヘリオトロンプラズマの理解のために非常に重要である。また装置製作の精度は建設コストと期間に、磁性体の配置は加熱装置や計測装置の設置法にも密接に関連し、工学的にも重要である。また、万一発生した磁気島の補正法を示し、その有効性を実験的に検証することも非常に重要な課題である。

本研究は、ヘリオトロンE装置を具体的な研究対象として、真空磁気面とこれに及ぼす不整磁場の影響を実験と数値計算によって調べたものである。

本論文は6章からなり、各々の章において以下のことを述べている。

第1章では、まず制御熱核融合研究の概要を示し、次に独自の進展を遂げてきたヘリオトロン研究の経緯を説明し、最後に本研究の目的と意義について述べる。

第2章では、本研究で真空磁気面の数値計算に用いたヘリオトロン磁場計算法に触れヘリオトロン磁場の特徴を述べた後、本研究の対象となったヘリオトロンE装置を本体、加熱装置、計測システムを中心に説明する。最後に、本研究で用いた真空磁気面の計測法の概略について説明する。

第3章では、ヘリオトロンE装置の真空磁気面を数値計算によって示す。まず不整磁場の全く存在しない理想的な真空磁気面を示す。この後、地磁気（水平成分；0.31G、垂直成分；0.34G）を模擬した不整磁場が存在する場合に、ヘリオトロンE装置の500G運転時には回転変換 $\epsilon=1.0$ の有理面に $m=1$ 、 $n=1$ のモードで約5cmの最大幅を有する磁気島が形成されることを数値計算で示す。この磁気島形成には、運転磁場に対して 6.2×10^{-4} の不整磁場である地磁気の水平成分（0.31G）が本質的である。従って、低磁場運転時に真空磁気面を測定する場合には、地磁気の影響を十分考慮する必要がある。次に、局所的に配置した円形の補正コイルによるこの磁気島の補正法を具体的に示す。

第4章では、ヘリオトロンE装置の真空磁気面の測定結果を示す。実験は装置の制約によって250G～1kGの低磁場運転に制限された。ここでは、ビーム・プローブ法、ダイオード法及びビーム・蛍光法の3種類の実験手法を用いて行った。まず、 $\epsilon \leq 1.0$ の領域を測定対象としたビーム・プローブ法による実験結果を示し、 $\epsilon=0.5$ 、1.0で磁気島が存在することを示す。次に、ダイオード法を用いて行った、真空磁気面の長軸に

沿った一次元の測定結果が示される。ここでは、最外殻磁気面の長軸半径を実験的に決定し、その実験結果は数値計算結果と良く一致する事を示す。この後、本研究を通じて新しく開発したビーム・蛍光法を用い、全磁気面領域を測定対象として行った実験結果を示す。ここでは、 $m=1$ 、 $n=1$ 及び $m=2$ 、 $n=1$ の磁気島等の写真を示す。また、これら3種類の手法による何れの実験においても、磁性体の誘導磁場の影響を調べた結果についても言及する。また $\epsilon=1.0$ の有理面に現れた磁気島に対して、第3章で示した補正方法を適用し、補正の効果がある事を実験的に検証する。この章の最後ではこれら3つの実験手法による測定結果を対比し、実験条件等とあわせて総合的に考察する。測定された $\epsilon=1.0$ の磁気島は、かなりの部分は地磁気によって引き起こされているものである。しかしながら、実験結果はこれ以外に不整磁場成分が存在する事を示し、それらがNBI装置の磁性体シールドの誘導磁場によって引き起こされている可能性を指摘する。また、ポロイダルコイルの製作精度内での変形などによる効果についても考察した。一方、 $m=2$ 、 $n=1$ の磁気島が明確に存在することより、磁気軸近傍で回転変換が0.5より小さいことが実験的に明らかになったが、この点については一様電流を用いた磁場計算によって確認した。

第5章では、ヘリオトロンE装置の漏れ磁場を低減する方法を提言する。現在のヘリオトロンE装置では漏れ磁場の垂直磁場成分が大きく、2T運転時にトーラス中心から5mで約300G、10mで約50Gに達する。プラズマ加熱や計測装置の磁性体シールドはこの領域に配置されている。ここでは垂直磁場コイルを改造することにより、磁性体シールド位置での漏れ磁場を約1/10に低減できる事を示す。これによって、磁性体の誘導磁場による不整磁場発生を抑制できる。

第6章では本研究で得られた結果をまとめ、また今後の課題等を示した。

論文の審査結果の要旨

本学位論文は、ヘリオトロンE装置の真空磁気面測定に関するものである。ヘリカル型のプラズマ閉じ込め装置では、外部コイル導体によって閉じ込め磁場が形成されるため、コイルの製作・設置精度はもとより周辺機器からの不整磁場の低減に細心の注意が払われている。

高橋君は、磁気面計測を3種類の手法、ビーム・プローブ法、ダイオード法、ビーム・蛍光法を用いて行った。これらのうち、ビーム・蛍光法は本研究において新たに開発されたものである。主な結果は、以下の通りである。

1) 真空磁気面に関する従来の計算からは中心の回転変換角 ϵ は0.5よりも大きく、 $m=2/n=1$ のモードの磁気島は存在しないはずであったが、実際には磁気島が存在した。このため、ヘリカルコイルの巻線則に考察を加えた結果、中心の ϵ は0.5よりも小さいことを計算により示し実験結果をうまく説明できた。

2) トロイダル磁場に対して 6.2×10^{-4} の割合の水平方向に一様な不整磁場が存在する場合、計算では $\epsilon=1$ の有理面に最大幅約5cmの $m=1/n=1$ の磁気島が形成される。実験での磁気島の幅は地磁気を用いた計算値の1.3倍であった。この原因として種々の要因を検討した結果、中性粒子入射装置の磁気シールドなどの磁性体の存在による不整磁場が主なものであることが分かった。

3) $m=1/n=1$ の磁気島の幅は、補正コイル(トロイダル方向に180度離れて装置主半径位置の上下に設置された2対の円形コイル)によって減少させることを実験的に示した。

4) 磁性体の存在による不整磁場は、装置からの漏洩磁場を減少させれば、減少する。このため、装置からの漏洩磁場が少なくなるように、コイル系全体としての2重極モーメントが最小となるようなトロイダルコイル系を考案した。

本論文において述べられている内容、即ち、ビーム・蛍光法の開発、 $m=2/n=1$ 磁気島の考察、磁気島の補正、漏洩磁場の低減は、その後の磁気面計測及びヘリカル装置設計に重要な寄与を果たしている。従って、本論文は学位論文としてふさわしい学術内容を持っていると認められる。

高橋君の学位論文に関して、専門分野、基礎分野について口述により学力を確認した。磁気面の測定技術、真空磁気面の計算、ヘリカル磁場構造などについて広範囲の質問に的確に答えた。これにより、学位を与える上で十分な知識を有するものと判断できた。また、英文論文(top author)を4編発表している。質疑応答の結果、英語についての学力も十分であると認められた。