

Title	強ミラー磁場中の磁場反転配位(FRC)プラズマの2次元平衡に関する理論的研究
Author(s)	鈴木, 敬久
Citation	大阪大学, 2001, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.11501/3184429">https://doi.org/10.11501/3184429</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏名	すずき 敬久
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	第 16249 号
学位授与年月日	平成13年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 工学研究科原子力工学専攻
学位論文名	強ミラー磁場中の磁場反転配位 (FRC) プラズマの2次元平衡に関する理論的研究
論文審査委員	(主査) 教授 岡田 成文  (副査) 教授 高橋 亮人 教授 堀池 寛 教授 山本 幸佳

### 論文内容の要旨

本論文は環境適合性の高い核融合炉を構成できる可能性を持つ磁場反転配位 (FRC) プラズマの平衡について理論的に研究するための Grad-Shafranov (G-S) 方程式の数値解法を確立し、閉じた磁場配位を実現するための条件を含む平衡に対するミラー磁場の効果を明らかにしたものである。本論文は全体で6章から構成されている。

第1章では、本研究を着手するに至った背景と動機及び研究目的について述べ、本論文の構成を説明している。

第2章では、本研究の対象となる FRC プラズマの概要について述べ、その平衡の諸性質について述べている。また FRC プラズマのような軸対称磁場閉じ込め方式プラズマの理想 MHD 平衡を記述する G-S 方程式が自由境界を含む非線形の偏微分方程式であり、その解は一意的には求められず、扱うのが非常に困難であることについて解説している。

第3章では FRC プラズマの平衡解を求めるための G-S 方程式の数値解法と独自に開発した2次元平衡計算コードについて述べている。このコード中では、第2章で述べた G-S 方程式の解を得る場合の困難さを解決するために非線形固有値問題を適用し、唯一の自明でない解を得られるようにしている。また強いミラー磁場の影響下においても計算が行えるように、境界条件によるミラー磁場の導入を行っている。これに対応するために一般曲線座標系上で扱うことが出来る共変な形式の G-S 方程式を導き出し、さらに境界に適合した計算格子を楕円型格子生成法により得るといった工夫を行っている。

第4章では、FRC 端部の強いミラー磁場が FRC プラズマの平衡に及ぼす効果に関し、開発した平衡コードにより得られた結果に基づいて示している。FRC プラズマのセパトリックスの形状がミラー磁場により、楕円形であった物からレストラック形の形状に変化することから、FRC の平衡は外部の磁場分布の変更により大きく変化することを示している。またプラズマ長はミラー磁場によって制限を受けていることを見出し、ミラー磁場による平衡形状制御の可能性についても言及している。この計算による結果は FRC プラズマの軸方向圧縮実験と比較され、これらがミラー磁場によりセパトリックス長を制限するという点で一致していることから、FRC プラズマのグローバルな平衡を MHD 的に評価する事の妥当性について考察を行っている。さらにここでは強いミラー磁場の影響を受けた FRC プラズマの平衡を維持する電流がセパトリックスにおいて非常に鋭いピークを持つことについても述べ、このような条件下において収束解を得るためにどの程度の格子点の引き寄せを行えば十分であるかを経験的に示している。

第5章では、セパトリックス外に厚い周辺プラズマ層が存在する場合の平衡とそれへの強いミラー磁場の影響についての研究結果を述べている。まずミラー磁場のない場合、周辺層の厚みが臨界値を越えると、 $\psi = 0$ 面（セパトリックス面）が $z$ 軸方向に開く事を示している。次に十分に強いミラー磁場を加えた場合、いかに周辺層の厚みを増しても $\psi = 0$ 面が軸方向に開かないことを述べている。またミラー比 $R_m$ と周辺プラズマ層の厚み $\delta$ の関数として閉じた $\psi = 0$ 面が得られる領域を定量的に求めている。さらにこの章で大きな周辺プラズマ圧力を持つFRCプラズマについて実測された磁場分布と計算結果との比較を行い、ここで行った解析が妥当であることを述べている。

第6章では、本研究で得られた知見について総括を行っている。

## 論文審査の結果の要旨

制御熱核融合は、資源の枯渇や有害な燃焼生成物の発生に問題の有る化石燃料に代わるエネルギー源としての可能性を持っており、様々な磁場閉じ込め方式によって研究が進められている。これらの方式では、磁場反転配位（Field Reversed Configuration : FRC）を除いて多くの場合プラズマを安定に保持するために、閉じ込め磁場圧力に対して $1/10$ 程度の圧力のプラズマしか保持できない。このため、重水素-三重水素（D-T）の核燃焼を維持するのに10メートルのオーダーの大きさを持つ構造物内に5テスラ以上の磁場を発生させる必要がある。一方FRCは閉じ込め磁場圧力と同圧力を持ったプラズマを保持できるため、D-T炉と同程度の磁場強度でより高温・高密度が必要な重水素-ヘリウム3（D- $^3\text{He}$ ）燃料を用いることができる。D- $^3\text{He}$ ではD-Tに比し中性子発生を格段に少なくできるためFRCにより環境適合性の高い核融合炉を構成することが期待されている。本論文では、プラズマ閉じ込めにとって最も基本的な平衡に関して、FRCプラズマについて2次元磁気流体平衡に対する閉じ込め用ミラー磁場の影響の研究を行っており、次のような成果を得ている。

- 1) 円筒対称な磁気流体平衡を記述するGrad-Shafranov方程式に必要なコーシー条件である圧力分布関数として妥当なものを選ぶことによりこの中のパラメータを選ぶことによって、解の断面形状として今まで知られている2つの両極である楕円形状とレーストラック形状を実現している。
- 2) 解の境界に適合する曲線座標を用い座標変換により矩形領域に矩形メッシュを生成させ、又物理量の勾配が大きい部分にメッシュを集中させることにより精度よくGrad-Shafranov方程式を解けることを示し、更に、メッシュをいかに集中させるかについての経験的指針を与えている。
- 3) 自由境界を含む非線形偏微分方程式であるFRCプラズマに対するGrad-Shafranov方程式上に非線形固有値問題を設定し、大域的な束縛条件を課すことにより一意的な解を得られるようにしている。
- 4) これらの工夫によりレーストラック断面形状を持った解は楕円形の形状の解よりもセパトリックス上で大きな勾配を持ち、電流分布は鋭いピークを持つことを明らかにしている。
- 5) ミラー磁場を大きくすることにより解の断面形状はレーストラック形となり、又電流分布のセパトリックス上での先鋭化も増大することを示している。
- 6) セパトリックス外に周辺プラズマ（シース）が存在する場合、このシース巾によってはセパトリックスが軸方向に開いてしまうこと、又これをミラー磁場により閉じさせられることを示し、更に現実的なシース巾に対してはミラー比が2程度で良いことを明らかにしている。

以上のように、本論文は物理量の急勾配や鋭いピーキングを有するFRCプラズマの平衡の数値解を得る手法を確立し、これを駆使してFRCプラズマの磁気流体力学的平衡に関する知見を拡大し、更に将来安定性などの研究を進めていくのに有用な基盤を提供しており、核融合プラズマ研究の発展に寄与するところが大である。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。