

氏 名	ふる かわ まさる 古 川 勝
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学 位 記 番 号	エ ネ 博 第 32 号
学位授与の日付	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
研究科・専攻	エ ネ ル ギ ー 科 学 研 究 科 エ ネ ル ギ ー 基 礎 科 学 専 攻
学位論文題目	Localized pressure-driven MHD instabilities in reversed-magnetic-shear tokamaks (負磁気シアトカマクにおける局所圧力駆動型 MHD 不安定性)
論文調査委員	(主 査) 教 授 若 谷 誠 宏 教 授 近 藤 克 己 教 授 佐 野 史 道

論 文 内 容 の 要 旨

核融合プラズマの重要な研究課題は定常化であり、トカマクプラズマにおいてはブートストラップ電流の割合を高くすることが必須である。そのためには負磁気シア配位で高ベータプラズマを安定に閉じ込めなければならない。また、良好な閉じ込めを保持するためにはプラズマ流も不可欠である。本論文はこのような研究が進められている現在の負磁気シアトカマク装置において発生する MHD 不安定性を理論的に解明すると同時に、より先進的なトカマクを設計するための物理基盤を確立することをめざして、高ベータプラズマの平衡と局所安定性を論じた結果をまとめたもので、7章と附録からなっている。

第1章は序論で、磁気核融合の代表例としてトカマク装置を示した後に、現在注目されている負磁気シア配位について説明している。負磁気シアトカマクの特徴は、内部輸送障壁の形成により速度シアのあるプラズマ流が存在することであり、これがプラズマの高ベータ化にどのような影響を与えるかを解明することが重要であることを論じている。さらに、本論文における理論研究の手法を示した後、各章の構成を述べている。

第2章では、本研究で用いた電磁流体 (MHD) モデルについて、まず基礎方程式を導入した後、MHD 平衡と安定性の理論解析について論じている。本論文の関心は、トロイダル方向のプラズマ流が平衡と安定性に与える影響にあるので、MHD 平衡方程式はプラズマ流を考慮して導出している。また、トカマクの高ベータ化をさまたげる重要な不安定性であるバルーニングモードについても、プラズマ流の影響を矛盾なく含む定式化を示している。

第3章では、トロイダル方向のプラズマ流が MHD 平衡に与える効果を具体的な計算例を用いて論じている。MHD 平衡を特徴づける物理量としてシャフラノフシフトに着目し、解析的表示においてシャフラノフシフトがマッハ数の自乗に比例している項と速度シアに比例する項からなることを示した。また、プラズマ圧力が磁気面上で一定にならず、磁気軸と圧力中心がずれることを示した。特に、低アスペクト比トカマクではマッハ数が0.2-0.3の流れでも影響があることも示している。

第4章では、低アスペクト比の負磁気シアトカマクにおける理想インターチェンジモードの安定性を論じている。特に、インターチェンジモードの安定化には、非円形断面効果が有効であることを示した。低アスペクト比の D 型断面負磁気シアトカマクでは、中心ベータ値が50%で安全係数 q の最小値 ($q_{\min}$) が2以下を達成できることも示した。ただし、負磁気シアの高ベータプラズマでは、等磁気圧面が閉じず、高エネルギー粒子の閉じ込めが正磁気シア配位に比べて良くないことも示されている。

第5章では、負磁気シアトカマクにおける抵抗性インターチェンジモードの安定性を論じている。 $q_{\min}$ が1以上であれば理想インターチェンジモードはすべて安定化されるが、 $q_{\min}$ より内側の領域で抵抗性インターチェンジモードが不安定になることを示した。抵抗性インターチェンジモードに対しても、断面変形効果は有効であり、特に楕円変形が安定化をもたらすことを示した。物理的には、抵抗性インターチェンジモードは、Pfirsch-Schlüter (P-S) 電流が大きいと不安定にな

るが、楕円変形はP-S電流を減らすと同時に磁気井戸を深くするので安定化効果が生じる。JT-60U トカマクの負磁気シア配位の抵抗性インターチェンジモードによるベータ限界は、実験値より低いことが示され、この差異を説明するため、プラズマ流の速度シアによる安定化効果の存在が指摘されている。

第6章では、トカマクのベータ限界値を決める理想バルーニングモードに対するトロイダル流の効果を調べた結果を論じている。トロイダル方向のプラズマ流を含む平衡解は第2章で述べられた新しいMHD平衡コードによって求め、バルーニングモードの安定性は初期値問題を数値的に解いて調べている。速度シアのあるトロイダル流は、磁力線の曲率の悪い部分と良い部分を平均化する効果を持つために、バルーニングモードの摂動エネルギーは、指数関数的に成長するのではなく、周期的な振動が重畳されることを示した。そのために、マッハ数の低い流れでも成長率を下げる効果が大きいことを示した。剛体回転に対応するプラズマ流の場合は、磁力線の曲率の平均化は起こらず、遠心力による圧力勾配の変化によって安定性が決まる。そのため、ベータ値が低い領域ではより不安定になるが、ベータ値の高い領域では、第2安定領域のように成長率が小さくなることが示された。JT-60Uの負磁気シア配位におけるバルーニングモードの安定性は、 $q_{\min}$ より内側領域では中心ベータ値が10%でも安定であるが、 $q_{\min}$ より外側領域では、8%で不安定になる。しかし、マッハ数が、0.3程度になると速度シア効果により、成長率は十分に小さくなることを示し、トロイダル流のある負磁気シア配位の良好な安定性を明らかにした。

第7章では、本論文で得られた主要な結果のまとめと今後の課題が示されている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、高性能定常運転トカマクをめざした負磁気シア配位の高ベータ化に不可欠なMHD平衡と安定性の理論的研究の成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 負磁気シアトカマク実験では、マッハ数0.2-0.3程度のトロイダル方向のプラズマ流を観測しているので、トロイダル流のあるMHD平衡を計算できるコードを新たに開発して、平衡特性を調べた。マッハ数が0.3以下では、プラズマ圧力分布が平坦な場合を除いて、MHD平衡に与える影響は大きくないが、低アスペクト比トカマクでは無視できないことを示した。

2. 低アスペクト比トカマクは、核融合炉の小型化から注目されていて、高ベータプラズマを得やすい特徴がある。低アスペクト比トカマクにおける負磁気シア配位の平衡特性と理想MHDモデルによるインターチェンジモードを解析し、低アスペクト比D型断面トカマクでは平均ベータ値が50%の安定な配位が存在することを示した。

3. JT-60U装置における負磁気シア配位は、 $Q(= \text{核融合出力} / \text{加熱入力}) > 1$ を実現できる可能性を示しているが、MHD揺動が発生し、閉じ込めが悪化する場合がある。この揺動は抵抗性インターチェンジモードに起因することを示したが、実験値より低いベータ値で不安定になることから、プラズマ流による安定化効果が重要であることを指摘している。また、プラズマ断面変形や安全係数分布の整形により抵抗性インターチェンジモードは回避できることも示した。

4. トカマクのベータ限界値を与える不安定性としてはバルーニングモードが重視されている。負磁気シア配位では、トロイダル流により安定性が改善している可能性があるため、理論解析を行い、トロイダル流がバルーニングモードに与える影響を解明した。シア流の場合には、MHDモードでありながら、指数関数的成長はせずに周期的な振動を伴って成長することを示した。この効果は磁力線の曲率の平均化に対応し、安定化に寄与することも示した。特別な場合として、剛体回転流の場合のバルーニングモードの安定性解析を行い、低ベータ領域ではシャフラノフシフトの増大による不安定化効果があることを示した。

以上のように、本研究は負磁気シアトカマクに基づく核融合炉の物理設計に不可欠な高ベータ化に対して、最適なアスペクト比とプラズマ断面形状をトロイダルプラズマ流の影響を考慮して解析する方法を確立し、同時に最新のトカマクの実験解析を試みたものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成13年2月2日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。