京都工芸繊維大学

氏　　名	いけぞえ　りゅうや **池添　竜也**
学位(専攻分野)	博　士（学術）
学位記番号	博甲第　５５６　号
学位授与の日付	平成 22 年 3 月 25 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	工芸科学研究科　設計工学専攻
学位論文題目	**RFP プラズマの MHD 特性に対する低アスペクト比化の効果**
審査委員	(主査)教授　政宗貞男 教授　林　康明 教授　松野謙一 准教授　比村治彦 兵庫県立大学教授　永田正義

論文内容の要旨

本論文は核融合プラズマ閉じ込め方式の一つである逆磁場ピンチ（RFP）のアスペクト比（トーラスプラズマの大半径と小半径の比）を極限的に低くした場合のMHD（巨視的）不安定性の振る舞いに関する実験的研究をまとめたものである。

第1章では、RFPのプラズマ閉じ込めの原理を概観し、RFPプラズマ中の巨視的（MHD）不安定性の基本的性質をまとめた後、特に最近10年間の研究成果と今後の重要研究課題を整理して、低アスペクト比RFP研究の意義づけを行っている。RFPはトーラスの大円周方向に外部から印加する弱いトロイダル磁場と、トロイダル方向に誘導起電力を与えて流す大きなプラズマ電流がつくるトーラス小円周方向のポロイダル磁場との重ね合わせで、特にねじれが強くプラズマ周辺部でトロイダル磁場が中心部に対して逆転する。このような磁場分布の自己形成・自己維持には、プラズマ中に成長する巨視的な不安定性（MHD不安定性）が重要な役割を果たすが、一方でこのMHD不安定性は磁気面を破壊して磁気カオスを引き起こし、プラズマ性能劣化の原因ともなる。近年、磁気カオスを回避するためのプラズマ制御法の研究が精力的に進められている。トーラスの大半径と小半径の比（アスペクト比）を低くすれば磁気カオスを回避できる可能性があり、RFPにおけるアスペクト比の最適化が重要な研究課題となっている。

第2章では研究の対象となった実験装置（RELAX）と本研究に関連する計測装置の概要を説明している。RELAXではプラズマ電流I_p<100kA，電子温度T_e<100eV，電子密度n_e～10^{19}m^{-3}，放電持続時間～2 msの低アスペクト比（A=2）RFPプラズマが生成されている。

第3章および第4章では、低アスペクト比RFPプラズマの放電特性を詳細に調べ、安定な放電でRFP配位を実現できる領域と、その領域におけるMHD不安定性の振る舞いを明らかにしている。RFPプラズマの放電領域は、外部トロイダル磁場に対してどれだけプラズマ電流を流すかの指標であるピンチパラメータΘと、プラズマ端でのトロイダル磁場反転の指標である反転パラメータFの2つの無次元量（Θ，F）領域で表現される。低アスペクト比RFPプラズマは（Θ，F）空間において、従来の中～高アスペクト比RFPプラズマよりもより広い運転領域を占める。Fの領域に特徴があり、非常に深い反転（F～-1）および非常に浅い反転（F～0）の領域で安定放電が可能である。それぞれの領域におけるMHD不安定性の特徴もFにより整理できる。浅い反転の領域ではプラズ

マ中心付近の磁力線と同じピッチをもつMHD不安定性が選択的に成長したRFP磁場配位が形成されやすい。深い反転の領域ではMHD不安定性の波数（モード）スペクトルが広がって、振幅も低下する。平衡再構成コードを用いた解析を行い、これら2つの領域におけるプラズマ内部磁場分布の違いによって、上記のMHD不安定性の特徴を説明している。さらに、プラズマの密度と温度の指標である軟X線放射強度はこれらの領域における放電で強くなり、閉じ込め性能の改善が示唆されることを示しており、RFPの低アスペクト比化によって、閉じ込め性能改善を示唆する新しいPFR配位の領域を見出している。

第5章ではMHD不安定性の非線形現象の解析を行っている。RFPでは、その磁場分布の特徴を反映して複数のMHD不安定性の共鳴面（磁力線に沿って不安定性の位相が一定となる磁気面）が近接するので非線形相互作用が起こりやすい。RELAXの低アスペクト比RFPプラズマにおいて上記2つの放電領域における非線形MHD現象の解析を行った。解析対象としたのは、多数のMHD不安定性の位相が特定の場所で一致する位相ロック現象と位相ロックする場所が空間的に固定されるロックトモード、および、トロイダル磁場が増加するRFPダイナモ現象である。反転が浅いRFPプラズマではロックトモードが発生しやすく、トロイダル磁場の生成はその場所から起こってトーラス全体に伝搬する。一方、反転が深い放電では位相ロックが特定の場所に固定される状態は解除されて、位相ロックした領域が回転するか、または位相ロック自体が解除される。位相ロック現象の2つの領域における発現の違いは、2つの領域における低アスペクト比RFP磁場配位の違いを反映したMHD不安定性の振る舞いの違いによるものである。一方RFPダイナモ現象は、生じるトロイダル磁束量に違いはあるが、中アスペクト比（A～3－4）のRFPにおけるダイナモ現象と本質的には同じであると結論している。

以上、本研究では低アスペクト比RFPのMHD不安定性の振る舞いに対する低アスペクト比化の効果を実験的に初めて明らかにし、低アスペクト比RFP配位で新しい閉じ込め改善領域を見出せる可能性を示している。

論文審査の結果の要旨

本博士申請論文は核融合プラズマの基礎研究に関するものであり、アスペクト比が特に低く球状に近いプラズマ生成が可能な実験装置 RELAX において、巨視的（MHD）不安定性の挙動に対するアスペクト比の効果を詳細に調べている。RFP 磁場配位は自己組織化された磁場配位を核融合に応用する例であるが、自己組織化のダイナミクスを支配する抵抗性 MHD 不安定性を制御して磁気カオスをいかに避けるかがプラズマの高性能化にとって重要な課題である。この課題に対する回答を与える可能性のあるのが低アスペクト比 RFP 配位である。申請者は本論文において、低アスペクト比 RFP の実験的研究を世界に先駆けて行い、重要な成果をあげている。低アスペクト比 RFP の運転領域（磁場配位の自由度）は RFP プラズマの強い自律性により規定されるが、低アスペクト比 RFP ではこの領域が従来の中 - 高アスペクト比 RFP に比べて広がること、および拡がった領域においてもなお、RFP プラズマとしての自律性が保たれることを見出した。これは低アスペクト比 RFP 配位においては MHD 不安定性の非線形相互作用が抑制されて RFP ダイナモ作用も弱くなることを意味している。RFP のプラズマ性能改善のために磁気カオスを避けるという点で興味深く、また今後のプラズマ性能改善に対して発展性のある２つの特徴的領域の存

在を明らかにした成果は重要である。プラズマ周辺部のトロイダル磁場の反転が弱い領域では、単一の MHD 不安定モードが準周期的に成長し、このモードに付随する磁場構造の変化により磁気カオスを避けられる可能性があることを示している。一方、プラズマ表面のトロイダル磁場反転が強くなると、磁場の揺らぎ（不安定性の振幅）が減少してプラズマ性能が改善されることを示唆する結果を得ている。これら 2 つの領域が出現する機構について、プラズマ内部の磁場分布・電流分布の違いに基づいて考察している。さらに、これら 2 つの領域においては、特に MHD 不安定性の非線形結合の結果として発現する不安定モード間の位相ロックの度合いに違いがあり、それが不安定性の振幅の違いで説明可能であることを示している。低アスペクト比 RFP における実験的研究として先駆的な内容であり、プラズマ性能改善に発展する可能性のある２つの領域を見出し、それぞれの領域における MHD 不安定性の振る舞いを特徴づけたことは重要な成果である。

申請論文の各章の内容は、査読制度が確立された以下の学術雑誌に掲載されている。いずれも申請者が筆頭著者である。

1. R.Ikezoe, T.Onchi, K.Oki, A.Sanpei, H.Himura, S.Masamune, "Quasi-periodic growth of a single helical instability in a low-aspect-ratio RFP", Plasma Fusion Res. 3, 029-1-029-3 (2008).
2. R.Ikezoe, T.Onchi, K.Oki, A.Sanpei, H.Himura, S.Masamune, "Characterization of MHD behavior in a low-aspect-ratio RFP", J. Plasma Fusion Res. SERIES Vol.8, pp.1031-1035 (1009).

以上のように本論文の内容は十分な新規性と独創性を有している。さらに核融合エネルギー科学における学術的価値も高く、博士論文として優秀であることを審査委員全員が一致して認めた。