

トロイダル電流印加時の低磁気シアヘリオトロンプラズマ における交換型 MHD 不安定性の数値解析

エネルギー電磁流体工学グループ 渡邊研究室 富田秀昭

1 緒言

磁場閉じ込め式核融合炉では、外部コイルによって印加した磁場によって形成された磁場の容器により高温プラズマを閉じ込め、核融合反応を持続させる。しかし、プラズマが作る電場と電流が磁場容器を壊し、プラズマの崩壊を招くことがある。これを電磁流体力学的不安定性(MHD 不安定性)という。プラズマの崩壊は、発電の停止につながるため、MHD 不安定性の特性を明らかにすることが核融合発電炉の実現化のための大きな課題となっている。核融合実験装置の一つに大型ヘリカル装置(LHD)がある。LHD では、順方向トロイダル電流印可時の低磁気シア配位でロックトモード様不安定性が観測されている。この不安定性は、揺動の振幅が一定の前駆振動が発現した後に揺動が成長し、プラズマの崩壊をもたらすというものである。この不安定性の前駆振動の原因や崩壊現象の駆動機構は理論的には不明であった。本研究では、ロックトモード様不安定性の前駆振動発現時における支配的な不安定性の種類の同定と崩壊現象の駆動機構の解明のため、線形解析と非設計飽和過程の解析を行った。

2 解析手法と結果

線形解析

まず、線形解析の手法について説明する。本研究では、簡約化 MHD 方程式を用いて線形解析を行った。簡約化 MHD 方程式は、トロイダル電流分布 $\bar{j}_z$ 、圧力分布 $\bar{p}$ 、閉じ込め磁場 B_0 、閉じ込め磁場の曲率 κ 、抵抗 η を入力すると、成長率 γ 、静電ポテンシャル揺動 ϕ 、ポロイダル磁束分布 ψ 、圧力揺動 p が出力される。 $\bar{j}_z$ の分布、 $\bar{p}$ の分布、 B_0 、 κ については、ロックトモード様不安定性が発生したときに観測された分布と同様のものを用いた。 $\bar{j}_z$ 分布と $\bar{p}$ 分布を実験値と相似に固定して、トロイダル電流による中心の回転変換 l_{j0} と中心ベータ値 β_0 を変化させた空間 (l_{j0}, β_0) 上において、成長率 γ の抵抗 η に対する依存性 (テアリングモード: $\gamma \propto \eta^{0.6}$, 抵抗性交換型不安定性: $\gamma \propto \eta^{1/3}$, 理想モード: $\gamma \propto \eta^0$ であることが知られている)、テアリングモードの判定パラメータである Δ' 、理想交換型不安定性の判定パラメータである Ds 、及び静電ポテンシャル揺動 ϕ の構造の等高線を描いた (図1)。図1において実験で観測されたパラメータは、理想交換型不安定性が支配的な領域に属している。なぜなら、その領域において、 $\gamma \propto \eta^0$ に近い依存性を示していること、 ϕ 分布が偶構造であること、 Ds が正であるからである。したがって、実験で観測されたモードは理想交換型不安定性が支配的であると結論付けた。

非線形飽和解析

次に、非線形飽和解析の手法を説明する。理想交換型不安定性の非線形飽和状態は、プラズマの内部エネルギーと磁気エネルギーの和である系の総エネルギーが極小の状態に対応するため、変分原理に基づいてエネルギー最小状態を計算できる3次元 MHD 平衡解析コード VMEC を使用して評価した。具体的には、VMEC において、トロイダル周期性が無い条件下で最外殻の形状や磁気軸に初期揺動を与えて、収束解を求めることにより理想MHD 不安定性の非線形飽和状態を得た。ここで、VMEC の入力値としては $\bar{j}_z$ の分布、 $\bar{p}$ の分布、 B_0 、 κ が必要であるが、線形解析と同様のものを用いた。VMEC によって計算された初期平衡時の実空間での圧力分布を $p_0(R,Z)$ 、飽和時の圧力分布を $p_1(R,Z)$ とする。そして $\xi_r(R,Z) = \Delta p(R,Z)/(dp_0/d\rho)$ として計算した。ここで、 $\Delta p(R,Z) \equiv p_0 - p_1$ である。非線形飽和解析した結果、最も大きい径方向変位成分は $m/n=1/1$ 、 $\xi_{r11}(\rho)$ で、そのモード構造と線形解析された径方向変位分布を図2に示す。図2から、非線形飽和解析された径方向揺動変位のモード構造は、線形解析された径方向揺動変位のモード構造に比べて、モード幅が大きく広がることが分かった。

4 まとめ

簡約化 MHD 方程式を使って線形解析を行った結果、ロックトモード様不安定性の前駆振動発現時における支配的な不安定性の種類が理想交換型不安定性であることが分かった。また、理想交換型不安定性の非線形飽和解析をエネルギー原理に基づいて行った結果、線形解析された径方向揺動変位のモード幅よりも非線形飽和解析された径方向揺動変位のモード幅の方が大幅に広いことが分かった。しかし、プラズマ崩壊時のモード構造は再現できず、崩壊現象は理想交換型不安定性の飽和現象でない可能性が高い。

学会発表

第 35 回プラズマ・核融合学会年会、第 36 回プラズマ・核融合学会年会、日本物理学会第 74 回年次大会、24th Workshop on MHD Stability Control、第 27 回国際土岐カンファレンス

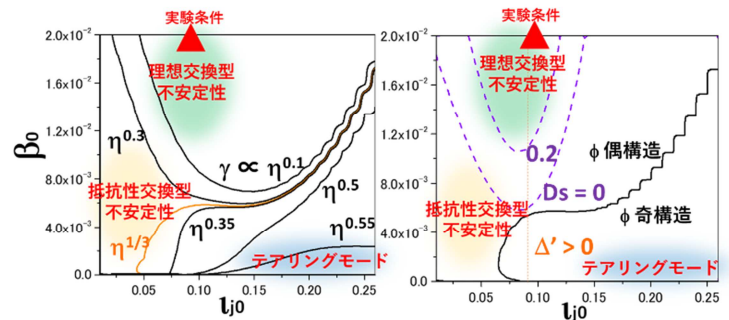


図1 (l_{j0}, β_0) 平面上の成長率 γ の抵抗 η に対する依存性の等高線(左) Ds, Δ', ϕ のモード構造の等高線 (右) 緑色の領域で理想交換型不安定性が支配的、黄土色の領域で抵抗性交換型不安定性が支配的、青色の領域でテアリングモードが支配的である。

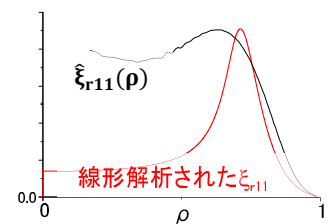


図2 非線形飽和解析された $\xi_{r11}(\rho)$ のモード構造と線形解析された径方向揺動変位