

流れのあるトカマクプラズマ中での強制磁気島の長時間挙動

Long term dynamics of the forced magnetic island in tokamak plasmas with the flow

石井 康友 [1]

Yasutomo Ishii[1]

[1] 原子力機構・PTSG

[1] PTSG,JAEA

トカマク型核融合プラズマでは、円環状に閉じた磁力線によりプラズマを閉じ込めているため、初期の磁場構造を変化させる磁気再結合とそれによる磁気島の発生は、プラズマ粒子・熱の閉じ込め性能を劣化させることが知られている。そのため、核融合プラズマでは、磁気島発生の抑制・制御は重要な研究課題の1つである。磁気島の発生原因は大きく分けて、ティアリング不安定性のように自発的な不安定性が原因となる場合と（自発的磁気島）、安定な共鳴面にたいする外部揺動が原因になる場合（強制磁気島）の2つに分けられる。通常、後者の過程により生成される強制磁気島は単独では安定であり、大きく成長することはない。しかしながら、高温トカマクプラズマでは、磁気島幅がある臨界値を超えると、ブートストラップ電流と呼ばれるトラス配位特有の電流により、初期には安定であった強制磁気島（種磁気島）が成長することが知られている。このような磁気島の成長機構は、新古典ティアリングモード（NTM）として知られている。また、核融合プラズマにはエネルギーが外部より注入されるため、トカマクプラズマは通常、磁力線方向に回転している。これまでの研究では、流れのあるプラズマ中では、外部揺動により磁気島が突発的に成長することが知られており、その臨界値のプラズマパラメータ依存性が詳細に調べられている。

本研究では、非線形MHDシミュレーションにより、流れのあるプラズマ中での強制磁気島の非線形過程を調べ、磁気島の急激な成長とそれに伴う構造変形による2次的磁気再結合が起こることを明らかにした。この過程は、突発的なNTMの発生を引き起こすと考えられる種磁気島の発生・成長過程として重要である。

本研究では、ポロイダル回転を含む、円柱配位の簡約化した抵抗性MHDモデルに対して、プラズマ表面のポロイダル磁束を時間変化させることにより、初期にティアリング安定な共鳴面（ $q=m/n=2/1$ ）に外側から磁場揺動を加えて、磁気島の強制的な生成・成長の過程を非線形シミュレーションにより調べた。従来の強制磁気島に関する理論・シミュレーション研究では、外部揺動として誤差磁場を考えていたため、外側から加えられる磁場揺動は非常に遅い時定数を持ち、共鳴面での散逸と釣り合うことが仮定されていた。本研究では、鋸歯状振動現象などのMHD現象に起因する外部揺動を考え、外部揺動の時定数、抵抗値、粘性係数の広範なパラメータ領域に対して非線形MHDシミュレーションを行った。その結果、これまで3領域に分けられると考えられていた強制磁気島の時間発展が、1) 4領域に分けられること、2) 磁気島の形状変形により局在化電流としての新たなエネルギー源が現れること、3) 低い抵抗値において、抵抗性効果（磁気再結合）が顕著になることを明らかにした。

強制磁気再結合はNTMにとって重要な種磁気島の発生・成長機構と考えられるが、本研究で見出された知見2)により、従来NTMの成長予測に用いられてきた修正Rutherford方程式に新たな不安定化項が付加される可能性がある。また、知見3)に示された2次的な磁気再結合は、初期に形成された磁気島のX-点近傍に2次的な磁気島を作り出すため、磁気島周辺のブートストラップ電流の分布が従来予測と比べて変化すると考えられる。これらのことから、流れのあるプラズマ中での強制磁気島の非線形成長の特性及び機構を解明するとともに、新たに得られた知見のトカマクプラズマに特有なNTMへの効果を調べる予定である。