

ヘリオトロン型核融合閉じ込めプラズマでのMHDダイナミクス

MHD Dynamics in Heliotron Fusion Plasmas

市口 勝治^{1*}

Katsuji Ichiguchi^{1*}

¹核融合科学研究所

¹National Institute for Fusion Science

制御熱核融合の実現を目指して、多くの努力がなされてきている。磁場を用いた核融合閉じ込め方式の中で、ヘリオトロン方式は最も効果的な閉じ込め方式の一つであり、閉じ込められているプラズマの研究が精力的に続けられている。本研究では、このヘリオトロン閉じ込め装置に閉じ込められたプラズマのMHD的挙動に対する数値シミュレーションの結果を報告する。

核融合プラズマでは、できるだけ摂動のない状態が望ましい。従って、解析の手順は、力学的平衡状態を考え、その周りでの線型解析を行い、線型不安定な場合に、非線型ダイナミクスを追跡する。MHDの線型理論に基づくと、線型不安定性は、プラズマ中を流れる電流によって引き起こされる電流駆動型モードと、プラズマ圧力分布の勾配によって引き起こされる圧力駆動型モードに大別される。ヘリオトロンプラズマでは、閉じ込めに必要な磁場は外部コイルによって生成されるため、プラズマの平衡を達成するためにプラズマ中に大電流を流す必要がない。そのため、電流駆動型モードは不安定になりにくい。一方、大容量のプラズマを閉じ込めると、プラズマ圧力は高くなり、勾配も大きくなる。従って、圧力駆動型モードが不安定になる可能性がある。

ヘリオトロン閉じ込め装置の中で最も代表的な装置は、核融合科学研究所のLHD装置である。この装置では、1対2本のヘリカルコイルと3対6本のポロイダル磁場コイルによって閉じ込め磁場が構成される。これらのコイルに流す電流を変化させることによって、様々な磁場配位を生成することができる。閉じ込めプラズマの性能を示す指標の一つとして、ベータ値が存在する。これは、閉じ込め磁気圧に対するプラズマ圧力の比で定義され、これが大きいほど小さな磁場で多くのプラズマが閉じ込められることになる。近年、LHDでの高ベータ実験においては、ある磁場配位において体積平均ベータ値として5%を達成した。これは、将来の核融合炉の経済性を考えたときに、必要となる値である。ところが、この磁場配位でのプラズマのMHD平衡は、圧力駆動型モードの一つである交換型モードに対して不安定であることが予想されていた。従って、なぜ、線型不安定な磁場配位において安定なプラズマが高ベータまで存在するのかということが、問題となる。そこで、この問題を解決するために、簡約化MHD方程式に基づいて、非線型ダイナミクス数値シミュレーションコード、NORMを開発した。

しかし、LHDプラズマでは、ベータ値が上昇するにつれて、平衡状態が変化し、その線型安定性も変化する。従って、このような状況での安定性を矛盾なく取り扱うためには、ベータ値上昇の効果を含めた解析が必要となる。そのためには、平衡量及び摂動量の両方に対してベータ値上昇の効果を取り入れなければならない。ところが、平衡量は、輸送の時間スケール(10ms程度)でゆっくり変化するのに対し、摂動量はアルベン時間(1 μ s程度)の早い時間スケールで変化する。従って、両者の時間スケールの間には、100,000程度の大きな差がある。そこで、このマルチスケール問題を取り扱うために、数値解析スキームも開発してきた。基本的なアイデアとしては、ある一定時間区間において非線型ダイナミクス計算と平衡計算を交互に繰り返すというものである。ダイナミクス計算にはNORMコードを用い、平衡計算には、ORNLで開発されたVMECコードを用いる。平衡計算を行う際には、ダイナミクス計算で得られた圧力分布の変形効

果とベータ値の上昇効果の両方を取り入れる。特に、最近、背景圧力散逸効果と連続圧力供給効果を含めることができるように改良した。

このマルチスケールシミュレーションスキームを、LHDの高ベータプラズマに適用した。真空に近い状態からベータ値を上昇させていくと、低ベータにおいて不安定モードが成長する。しかし、駆動力が弱いためすぐに飽和する。この飽和現象のために、このモードが生じた領域において圧力分布に局所的な平坦構造が形成される。この領域では、圧力勾配が低減されるため、不安定性の駆動力も小さくなる。ベータ値が上昇するときは、ある程度子の構造が保たれる。従って、高いベータ値においても不安定性の駆動力が低減されることになる。ベータ上昇過程においては、このような局所平坦領域は複数個形成され、全体としての崩壊現象を免れていることがわかった。すなわち、プラズマ自身によって、圧力分布が自己組織化され、高ベータ領域への安定な経路を形成していることが得られた。つまり、この状況が、線型不安定領域でのLHDプラズマの良好な放電のメカニズムであると考えられる。

キーワード:核融合プラズマ,電磁流体力学,ヘリオトロン,数値シミュレーション,圧力駆動型モード

Keywords: Fusion Plasma, MHD, Heliotron, Numerical Simulation, Pressure Driven Mode