

LHD における MHD 研究とその課題

核融合研 榊原 悟

磁場閉じ込め装置における MHD 平衡、安定性は、経済的な核融合炉を実現する上で必要不可欠となるプラズマの高ベータ化を制限する要因であると考えられており、実験、理論の双方から精力的に研究が進められている。トカマクでは、MHD 不安定性による 限界の存在が実験において明らかにされており、その制御法の確立が大きな課題となっている一方、ヘリカル型装置では、理論的に 限界という概念は存在するものの、実験においてまだその兆候は観測されていない。ヘリカル型装置では、有限ベータ効果による配位変化による、いわゆる平衡 限界、及び圧力駆動型不安定性による安定性 限界が理論的に示唆されている。前者については、 β 値に伴う平衡電流の上昇によりプラズマ周辺部の磁場構造が乱れ、閉じ込めを劣化させる可能性が指摘されている。LHD における最近の実験では、高 β プラズマにおいても（磁気面の乱れが予測されている）周辺部に有意な圧力が存在しており、有意な閉じ込め劣化は観測されていない。ヘリカル型装置における安定性については、閉じ込め磁場形成にプラズマ電流を必要としないことから、電流駆動型不安定性は回避可能だが、プラズマ内部の圧力差に起因する不安定性に対する研究が重要視される。中でも LHD をはじめとするヘリオトロン配位は、径方向に単調増加となる回転変換分布 ($1/q$) を有し、複数の低次共鳴面を有する周辺領域が磁気丘配位となることから、大きな圧力勾配を有するプラズマ周辺部での抵抗性モードの閉じ込めに対する影響が高ベータプラズマ実現の鍵となる。これまでの LHD における実験では、 β 値及び圧力勾配上昇に伴う不安定性の成長が観測され、それらの飽和強度が磁気レイノルズ数に依存性を持つこと、また、 β 値がある閾値を超えた時に、これらの揺動が大きく成長しない（あるいは安定化される）現象などが観測されている。これらの揺動は放電中に大きな閉じ込め劣化を引き起こすような現象は観測されていないが、プラズマ中にペレット入射など何らかの擾乱、あるいは磁気シアを大きく低下させるプラズマ電流が存在する場合には、閉じ込めの劣化を導く場合がある。ペレット入射時には、プラズマコア部 ($1/2\pi = 1/2$) の共鳴面近傍に大きな圧力勾配が一時的に形成され、内部崩壊現象及び鋸波振動などが観測されている。また、プラズマ電流（大河電流）によるコア領域の磁気シアの低下が交換型モードを不安定化させ、プラズマ内部を大きく崩壊させる。本現象は、特に $1/2\pi = 1$ 共鳴面がシア低下の影響を大きく受けるプラズマ内部に存在する配位で顕著であり、 $1/2\pi = 1/2$ の場合 ($\beta/\beta \sim 10\%$) と比較して閉じ込め劣化が 50%以上と比較的大きい。このような現象は、回転変換分布がさらに高い配位ではより小さいプラズマ電流で発生しており、シア減少によるモード構造等について安定性解析を進めている。これらの実験的知見は、ヘリカル型配位における磁気シアの重要性、及び閉じ込め劣化を起こす程度にモード数依存性が存在することを示唆しており、ヘリカル型装置の運転領域の確立に有益な情報となる。さらなる重要な点は、閉じ込め磁場が内部電流に依存しないため、内部崩壊現象が電磁エネルギーの放出を伴わない事である。崩壊現象の後、再びプラズマが蘇る。本発表では、上記に挙げた MHD 現象の研究及び課題に加えて、安定性解析に重要となるプラズマ圧力非等方性に関する実験研究について紹介する。