

無電流ヘリカルプラズマの高 β 領域の探求について

Review of Exploration of High- β Regime in Net-Current-Free Helical Plasmas

山田弘司

核融合研

YAMADA Hiroshi

NIFS

プラズマの圧力と閉じ込め磁場圧力の比である β 値は炉心プラズマの性能を測るキーパラメータである。ベータ値の限界を決定するのはMHD平衡・安定性であると考えられており、これに関する線形理論は新古典拡散理論と並んで、プラズマ物理学にあって完成度の極めて高いものである。3次元であることが本質的なヘリカルプラズマにおいても実験・理論両面の最近の進展は目覚ましい。典型的な里程標として、昨年、LHDにおいて β 値を4%まで高めることに成功したことがあげられよう。ヘリカルプラズマは閉じ込めにトロイダル電流を必要とせず、電流駆動型のMHD不安定性、ひいてはディスプラシジョンのない定常性に固有の特長を持つが、高 β 化においても大きな進展が図られている。下図に過去20年間の無電流ヘリカルプラズマ実験における達成 β 値の変遷を示す。本講演では、これまでの無電流ヘリカルプラズマに関する高 β 化の実験研究を中心にレビューし、理論との対比によりその理解の進展を述べる。さらにこれらの知見を基盤として今後の高 β 領域の拡大について展望したい。

1980年代にHeliotron E($A_p=10.3$)において圧力分布の制御によって、2%までの有限 β 平衡配位が実現され、高アスペクト比の近似のもとでの圧力駆動型MHD不安定性の線形理論との対比が磁気丘配位での不安定性の発現に関して良い一致を見た。その後、ヘリオトロン系統の研究は低アスペクト比化の方向へ進み、ATF($A_p=7.4$)とCHS($A_p=4.8$)では、その自発的な磁気井戸形成の機構を生かした高 β 化が図られ、第2安定領域の形成や短波長極限での交換不安定性の十分条件を与えるメルシェ条件との符合についての議論が行われた。この時点で、磁気軸を相対的に内側に寄せ、粒子軌道と磁気面の一致を図ろうとすると、磁気丘の強調によってMHD安定性が損なわれるという常識に疑問を投げかける実験観測が得られた。そしてLHD($A_p=5.8$)の無衝突高温の無電流プラズマにおいて理想MHDの線形理論では不安定と予想される領域で β 値の伸長を図ることが可能であることが実証された。LHDの高 β 状態ではプラズマ中心部はシャフラノフシフトによる磁気井戸の自己形成によって交換型不安定性が安定化され、周辺部の磁気丘においては強い磁気シアと自発的な圧力分布の調整によって線形安定性が保たれている。また、圧力分布によっては周辺部で不安定性が閉じ込めを規定している現象も観測されており、さらに高い β を達成するにはその克服が必要であると認識されている。この他、運転領域の開拓という点で関連の深い磁気島のダイナミクス、密度限界と輸送についても議論するとともに、W7-ASなどの他のヘリカルプラズマ実験からの最近の理解を合わせて言及することにより、高 β 領域の探求に関わる無電流ヘリカルプラズマの実績と今後の課題を整理する。

