

ヘリオトロン配位におけるプラズマ電流の位置付け

Role of Plasma Current in Heliotron

渡邊清政

核融合科学研究所

WATANABE Kiyomasa Y.

National Institute for Fusion Science

ヘリオトロン装置は閉じ込め磁場の生成にトロイダル電流を必要としない。しかしながら、実際のヘリオトロン実験では、無電流運転を基本とするが、トカマクと同様、オーミック電流駆動、ビーム電流駆動(NBCD)、ECRF 電流駆動(ECCD)が行われ、トロイダル電流が実験の自由度を増加させる制御ノブ(パラメータ)の一つとして扱われる場合がある。

ヘリオトロン装置でトロイダル電流値が真空磁場の作る回轉變換に比べて十分小さい時は、トロイダル電流そのものが平衡、安定性に直接影響を与える例は少ない。しかしながら、MHD 平衡の変更を通して、安定性や閉じ込め性能に影響を与える可能性が指摘されており、実験的にもそれを裏付ける結果が得られている。例としては、トロイダル電流の交換型不安定特性への影響が挙げられる。回轉變換を増加させる方向に流れるトロイダル電流(順方向電流)は、シャフラノフシフトを抑制し有限ベータにおける磁気井戸の形成を妨げる効果がある。また、ヘリオトロン装置の典型的な回轉變換分布はプラズマ中心から周辺に向かって単調に増加していくので、特に、ピークな順方向電流では磁気シアが下がり、磁気井戸形成の抑制効果とあわせて、交換型不安定モードを不安定化する。逆方向電流では、上記と逆のことが起こり、交換型不安定モードを安定化することが、理論的に予測されている。実験的には、ヘリオトロン DR のトロイダル電流印加実験において、順方向電流が増大するにつれて到達ベータ値が減少する現象が観測されている。一方、LHD では、逆方向電流運転時にコア領域の有理面近傍で観測された最大の圧力勾配が、無電流運転時のそれに比べて大きいという結果が観測されている。別の例としては、発生機構は明確ではないが、順電流運転時の CHS での H モード観測が挙げられる。上記のような側面から考えると、ヘリオトロン装置におけるプラズマ電流は、磁気軸や磁気面形状制御と並ぶプラズマ性能向上のための制御ノブと位置付けることができる。

もう一つの考え方として、ヘリオトロン装置におけるプラズマ電流は、MHD 現象の物理機構解明のための制御ノブと位置付けることができる。例としては、圧力駆動型不安定性の飽和状態と電流駆動型不安定性の飽和状態の違いの解明が挙げられる。理想線形モードを例にとってみると、圧力駆動型モードはトロイダルモード数 n が大きいほど大きな成長率を持つが、小半径方向のモード幅は小さい。一方、電流駆動モードは、トロイダルモード数 n が小さいほど大きな成長率を持ち、小半径方向のモード幅も大きい。無トロイダル電流運転時の圧力駆動モードが支配的な場合と大トロイダル電流運転時の電流駆動モードが支配的な場合のプラズマの振舞いの相違の研究を行うことにより、不安定駆動源による非線形飽和状態の違いを実験的の面から調べる可能性がある。LHD のこれまでの無(小)電流実験結果として、低 n 理想 MHD 不安定予測をかなり超えた運転領域では、局所崩壊現象は観測できるが、巨視的な崩壊現象は観測されていない。一方、電流駆動モードが支配的な不安定予測領域でのプラズマ特性の研究は今後の重要な研究課題の一つである。別の例として、プラズマ電流により作られる閉じ込め磁場と真空磁場の比率を変える実験により、不安定性が起こったとき電流分布の変化に伴う平衡の変化に起因したプラズマの応答の研究を挙げることができる。トカマクの場合、MHD 不安定性の発生はトロイダル電流経路の大幅な変更につながりやすく、不安定性発生後のプラズマの応答は劇的な場合が多い。ヘリオトロンでの上記の実験結果とトカマクでのプラズマ特性の比較は興味深い。

LHD は放電時間がこれまでの中型ヘリオトロン装置に比べて格段に長く、強力な NBI を備えているので、1keV を超えるプラズマで大トロイダル電流運転が可能である。実際、LHD ではビーム駆動型の大トロイダル電流が観測されており、電流による回轉變換角の磁気軸での変化分は最大、 $\Delta \iota \sim 0.5 @ 1.5T$ に達している(但し、電流分布が $(1-p^2)^2$ を仮定した場合)。現在、進められている LHD 実験の第 6 サイクルでは、電流による回轉變換角の変化分が磁気軸で $|\Delta \iota| > 0.75 @ 1 \sim 1.5T$ の実験が提案されている。期待する高電流が達成できれば、順方向電流駆動時には電流駆動 MHD モードと圧力駆動モードの比較の実験が、逆方向電流駆動時にはポロイダル磁場反転実験等が行える。後者の実験は JT-60 で観測された電流ホール(ポロイダル磁場ゼロ)の結果の関連としても興味深い研究テーマである。

講演では、上記のような観点からヘリオトロンにおけるトロイダル電流の位置付けとトロイダル電流制御及び回轉變換制御の有用性について議論する。トカマクやヘリオトロン以外のヘリカル装置(例えばヘリアス)との相関についても触れる予定である。