

統合コード TOPICS を用いたプラズマ立ち上げ中の CS 磁束削減手法の検討

量子科学技術研究開発機構 若月琢馬

トカマク型核融合炉で電流駆動に用いられる中心ソレノイド(CS)の大きさは、核融合炉のプラズマ閉じ込め性能や装置全体のサイズに関係する重要な要素である。CS のサイズは一般的に、電磁誘導によってプラズマ電流を定格値まで立ち上げるために必要とされるポロイダル磁束の量によって決定される。それゆえ、プラズマ電流立ち上げ時の CS 磁束消費を削減することで、CS をスリム化した建設コストの低い経済的な核融合炉を実現できる可能性がある。

プラズマ電流立ち上げ時の CS 磁束消費は、外部誘導性の磁束消費(Ψ_{ext})、内部誘導性の磁束消費(Ψ_{int})、抵抗性の磁束消費(Ψ_{res})の3つの成分に分けることができる(図1)。 Ψ_{ext} 、 Ψ_{int} はそれぞれプラズマの外部、内部にプラズマ電流が生じさせる磁場のエネルギーに対応する磁束消費であり、 Ψ_{res} はプラズマの抵抗によるエネルギー散逸に対応する磁束消費である。プラズマ電流立ち上げ中に中性粒子ビーム入射(NBI)や電子サイクロトロン波(ECW)を用いた加熱・電流駆動を行うことで磁束消費を削減する手法を、TOPICS 統合輸送解析コードを用いて検討した。

NBI や ECW を用いて、プラズマ電流を超える非誘導電流駆動が行える場合、CS による電磁誘導を全く用いることなくプラズマ電流を立ち上げることが可能になる。そこで、JT-60SA において、NBI や ECW の入射法を最適化することで CS による電流駆動を行わずにプラズマ電流を立ち上げるシナリオを構築した。このシナリオの検討から、CS を用いないプラズマ電流立ち上げには通常のプラズマ立ち上げに比べて非常にゆっくりとしたプラズマ電流の立ち上げが必要になることが明らかになり、実際 JT-60SA でも 2.1MA までの立ち上げに、放電時間の上限と同程度の長さ(150 秒)が必要となることが明らかになった。また、このシナリオでは理想 MHD 安定性限界に非常に近い領域での運転が求められるため、導体壁による安定化効果が非常に重要になることも分かった。

続いて、原型炉において ECW による加熱を用いてプラズマ抵抗を減少させることで、CS 磁束消費を削減する手法についても検討した。電流ランプアップ中にプラズマ抵抗が減少すると抵抗性の磁束消費が削減できるが、同時にプラズマ電流の中心部への拡散が抑制されるため、電流立ち上げ後のプラズマの安全係数分布が変化する。安全係数分布はプラズマの閉じ込め性能や MHD 安定性と密接に関係する非常に重要なパラメータであるため、磁束消費の削減量と安全係数分布の定量的な関係について整理した。その結果、任意の安全係数の時間発展を実現するために必要な磁束消費の最小量を明らかにするとともに、その磁束消費を実現するための電子温度分布の求め方を明らかにした。この結果に基づいて原型炉の電流立ち上げ時の ECW 加熱分布の最適化を行い、20%程度の磁束消費削減が期待できることを示した。

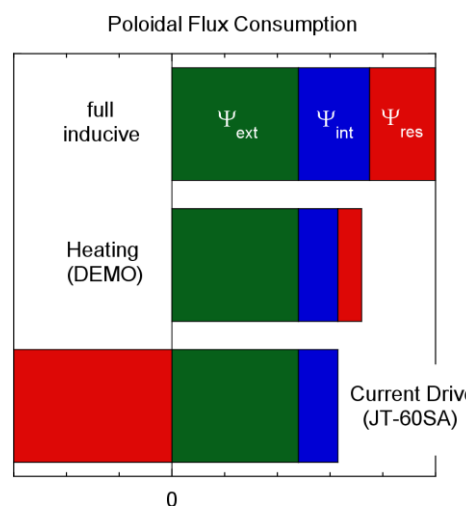


図1: CS 磁束消費の内訳と加熱・電流駆動による削減効果を表した模式図