

JT-60SAにおける超伝導及び真空容器内常伝導コイルの制御周波数分離による高速プラズマ位置制御

Fast plasma position control via control frequency separation of superconducting and in-vessel coils on JT-60SA

小島信一郎、井上静雄、宮田良明、浦野創、鈴木隆博

Kojima Shinichiro, Inoue Shizuo, Miyata Yoshiaki, Urano Hajime, Suzuki Takahiro

量研機構

QST

JT-60SAにおける実時間高速プラズマ位置制御のため、コイル電流応答性に応じ超伝導コイルと真空容器内常伝導コイルの制御周波数分離を行った。本発表では、周波数分離を施すことで従来の制御手法と比べ、高性能な高速プラズマ位置制御が可能になったことを示す。

トカマク型の核融合プラズマ運転の実現にはプラズマ電流・位置/形状の実時間制御が必要不可欠である。プラズマ形状制御では、プラズマ電流や安全係数を上げやすい高楕円度プラズマ形成を行うが、高楕円度であるほど垂直位置不安定性の成長率が高く、垂直移動現象を回避した制御が必要である[1]。JT-60SAでは高性能なプラズマを得るため、楕円度 $\kappa \sim 1.9$ を標準シナリオに設定しているが、コイル電流応答性の悪い超伝導コイルのみの制御では安定的に高楕円度プラズマを制御することは難しいことが分かっている[2]。さらに、超伝導コイルのコイル電源容量はプラズマ電流制御、プラズマ位置/形状制御で共有しているため、高楕円度プラズマは高プラズマ電流化に有効であるにも関わらず、プラズマ電流立ち上げ中の高楕円度プラズマの形成、維持はより困難になる。

そこで、真空容器内にコイル電流応答性の良い常伝導コイル:高速プラズマ位置制御(FPPC)コイルを導入し、超伝導コイルによる制御を補う。先行研究では、超伝導コイルとFPPCコイルにより、同じ制御対象を制御した場合、コイル電流応答性の違いから制御干渉が発生し制御が破綻する様子が見られている[3]。そのため、本研究では、超伝導コイルがプラズマ電流制御と比較的遅いプラズマ位置/形状制御を、FPPCコイルが高速プラズマ位置制御を行うよう、制御対象を周波数分離し、高速性に優れた制御を開発した。周波数分離のため、超伝導コイルが制御可能な高域周波数限界 f_{SCPF} を調べ、 $f > f_{SCPF}$ を超伝導コイルが、 $f < f_{SCPF}$ をFPPCコイルが制御するように有限インパルス応答フィルターによ

る低周波通過フィルターを作成した。そして、フィルター通過後の制御量 $\delta\psi_{slow}$ を超伝導コイルの制御に、フィルター通過後の制御量と元の制御量との差分 $\delta\psi_{fast}$ をFPPCコイルの制御に適用した。なお、制御可能な周波数領域 f_{SCPF} を調べる際、最外殻磁気面を指定する全制御点位置を正弦波的に垂直方向に揺らし、その追従性を周波数伝達関数として評価した。

プラズマ電流立ち上げ時、従来のFPPCコイルの制御ではプラズマ電流崩壊など無くとも、垂直位置移動現象により楕円度 $\kappa \sim 1.77$ までしか到達できなかったが、図1に示すように新たに開発した手法を適用することで楕円度 $\kappa > 1.92$ 、15%程度のプラズマ電流崩壊を伴う不安定な状況においてもプラズマ制御が可能になった。

本発表では、周波数伝達関数の評価手法、真空容器、安定化板の周波数特性、また、フラットトップ時の制御性についても評価し報告する。

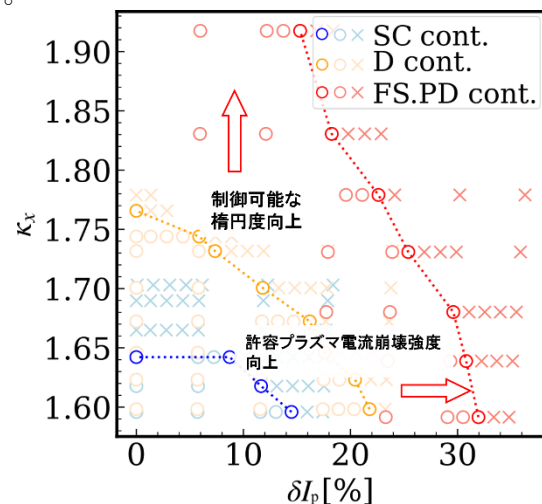


図1 到達楕円度と許容プラズマ電流崩壊強度。超伝導コイルのみの制御：SC cont.、従来のFPPCコイルの制御：D cont.、周波数分離した制御：FS. PD cont.

[1] A. Fukuyama et al 1975 *Jpn. J. Appl. Phys.* **14** 871

[2] S. Inoue et al 2020 *Nucl. Fusion* **61** 096009

[3] S. Kojima et al 2022 *Plasma Phys. and Control. Fusion* **64** 11