

JT-60SAにおける高速プラズマ位置制御コイルによるプラズマ平衡制御の開発 Development of plasma equilibrium controller with fast plasma position control coil 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

垂直位置不安定性による垂直位置移動現象 (VDE) の制御はプラズマの高性能化に向け必要不可欠である。特に、高プラズマ閉じ込め、高プラズマ電流駆動に寄与する高楕円度プラズマは、VDEが発生しやすい。また、小規模なプラズマ電流崩壊、 β 崩壊や、L-Hモード遷移などが発生する際には、プラズマ形状、位置が急激に変化することで、VDEや水平位置移動現象 (HDE) が生じる。そのため、VDE、HDEの制御には高速位置制御が必要である。JT-60SAにおけるプラズマ平衡制御コイル群は10本の超伝導コイル群と2本の真空容器内常伝導コイル群より構成されており (図1)、超伝導コイル群はプラズマ電流制御、形状制御を行い[1]、低コイル時定数で、プラズマとの距離が近い位置に設置される真空容器内常伝導コイル群 (高速プラズマ位置制御コイル (FPPCコイル)) が高速位置制御を行う。本研究では、プラズマ電流崩壊に伴うVDEの制御性向上を図ることを目的に、FPPCコイルによる高速位置制御手法を、MHD平衡制御シミュレータ (MECS) を用いて開発・検証した。なお、MECSではJT-60SAの運転を模した制御系動作のシミュレーションができ、各誘導電圧、コイルの内部抵抗損を含め、プラズマ放電中のJT-60SAのコイル電圧指令値を決定できる。

JT-60SAでの位置・形状の制御周期は250マイクロ秒であり、MECSでも同じ制御周期とした。等磁束スキームにおける形状・位置の制御量はプラズマの形状・位置を規定する制御点上の磁束と最外殻磁気面の磁束の差分 $\Delta\phi$ とする。FPPCコイルによる高速位置制御では、FPPCコイルより近い制御点2点 (P7、P8) を選定し (図1)、位置変化を抑制するため $\Delta\phi$ の時間変化に応じた微分 (D) 制御を適応した。

制御量に対し適切にコイル電圧指令値を加えるには、誘導電圧、内部抵抗の電圧降下の効果を含めるのが適切であり、超伝導コイルのコイル電圧指令値はそのようにしている。しかし、FPPCコイルはコイル電圧指令値に対しコイル電流応答性が高いため、コイル電圧に誘導電圧

等の誤差が生じる場合には、悪影響が生じる。そのため、コイル電圧指令値に“内部抵抗の電圧降下を含めない”ことで、誘導電圧の誤差を内部抵抗で減衰させる工夫を施した。図2にFPPCコイルのコイル電圧指令値に電圧降下を含めた場合 (橙線) と、電圧降下を含めない場合 (赤線) を示す。電圧降下を含めた場合、誘導電圧の誤差によるコイル電流が蓄積されることで、制御時間が長くなるにつれて制御不能に陥る。対して、電圧降下を含めない場合は、内部抵抗が誘導電圧の誤差に対し減衰器として動作することで制御可能になる。

FPPCコイルによる制御性確認のため、超伝導コイル群では制御不能なプラズマ電流崩壊時において、FPPCコイルによるD制御 (図2赤線) と、FPPCコイル終端短絡した場合 (図2緑線) の比較を行った。プラズマ位置変化を示すプラズマ電流重心のZ方向の速度 (図2(d)) を見ると安定化効果のあるコイル終端短絡と比べて、D制御の方がプラズマ重心速度を抑制しており、急激な位置変化に対し、FPPCコイルの高速位置制御が有効に動作することが示された。

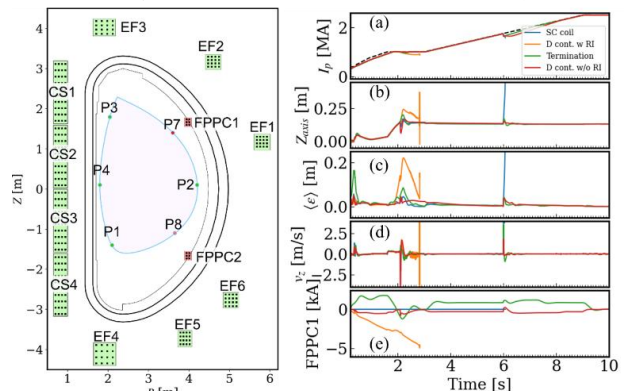


図1 (上記左図) ポロイダル断面上の超伝導コイル群 (緑)、FPPCコイル群 (赤)、各制御点の位置
図2 (上記右図) $t=6$ 秒でプラズマ電流崩壊が発生する際の、超伝導コイルによる制御、抵抗による電圧降下を含めたD制御、抵抗による電圧降下を含めないD制御、FPPCコイル終端短絡時の(a)プラズマ電流、(b)プラズマ電流重心Z位置、(c)最外殻磁気面と各制御位置の差の平均、(d)プラズマ電流重心Z方向速度、(e)FPPC1コイル電流の時間発展

[1] S. Inoue et al, *Nucl. Fusion*, **61** 096009 (2021)