

核融合工学部会セッション

JT-60SA プロジェクトの現状
Status of JT-60SA Project

(4) 電源システムと高周波加熱装置

(4) Coil Power Supply and RF Heating System for JT-60SA

*高橋 幸司¹, JT-60SA チーム¹¹量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー部門 那珂核融合研究所

1. はじめに

JT-60SA 計画の目的は、ITER への支援研究と原型炉に向けた ITER の補完研究であり、臨界条件クラスのプラズマや高圧カプラズマを長時間維持する実験などが行われる。どの実験においても、まずプラズマを着火させ、所定の電流まで立ち上げ、そして磁場によって安定に閉じ込めつつ加熱する。そのために必要な機器が、コイルに電流を供給する電源システムと高周波加熱装置である。

2. 電源システム

JT-60SA 電源システムは、水力発電所一基分の出力に相当する約 250 MVA もの大電力を制御する。前装置である JT-60U 電源機器を有効に再利用し、欧州が開発した直流電源機器を組み合わせた大型電源設備であり、交流電源システムと直流電源システムに分類され、JT-60SA の超伝導化されたトロイダル磁場コイルおよびポロイダル磁場コイルに直流電力を供給する。交流電源システムは、1 枚 106 トンのフライホイールを 3 枚搭載した大型電動発電機（容量 400 MVA、蓄積エネルギー：2.7 GJ、回転子重量：895 トン）などで構成され、必要な交流電力を直流電源システムに供給する。直流電源システムは大きくトロイダル磁場コイル電源とポロイダル磁場コイル電源に分類される。トロイダル磁場コイル電源は、定格電圧±80 V、定格電流 25.7 kA のサイリスタ変換器と 3 台のクエンチ保護回路(QPC)で構成される。トロイダル磁場コイルは 18 本あり、6 本に対し 1 台の QPC が設置されている。QPC は超伝導コイルがクエンチ(超伝導から常伝導に遷移)した場合に、コイルのエネルギーを自身の抵抗で急速に消費させコイルを保護する重要な機器である。QPC は、機械スイッチと半導体スイッチ双方の長所を利用したハイブリッドスイッチにより直流電流を遮断し、抵抗に転流させる。また、バックアップのため爆薬により電流を遮断するパイロブレーカも搭載する。ポロイダル磁場コイルは中心ソレノイド 4 本(CS1, CS2, CS3, CS4)と平衡磁場コイル 6 本(EF1, EF2, EF3, EF4, EF5, EF6)で構成されており、各コイルに対し独立した電源回路をもつ。ポロイダル磁場コイル電源は、プラズマ実験中に定常的に運転されるベース電源(定格電圧±1 kV 程度、定格電流±20 kA)、プラズマ着火/立ち上げ時にコイルに高電圧(最大 5 kV)を印加するスイッチングネットワークユニット(SNU)あるいは JT-60U の電源を再利用して構成したブースタ電源および QPC で構成される。ベース電源は、±5 kA のサイリスタ変換器 4 台で構成され、プラズマの制御に必要な 4 象限運転が可能であり、かつ電流ゼロ付近では円滑な電流ゼロクロス制御を実現するために循環電流を変換器間に流す。CS1, CS2, CS3, CS4, EF3, EF4 に用いられる SNU は、主回路電流をハイブリッドスイッチにより電流を遮断して自身の抵抗に転流させることで発生する電圧をコイルに印加する機器であり、主にプラズマ着火で必要とされる急峻な電流変化を実現する。一方、EF1, EF2, EF5, EF6 に用いられるブースタ電源は短時間定格のサイリスタ変換器で構成され、SNU に比べ制御性が高いことから、主にプラズマ着火立ち上げ時の形状制御に用いられる。プラズマ実験運転では、上記に示す計 34 台の直流電源機器が同時かつ統括的に制御され、所望するプラズマ生成および制御のために各コイル電流を制御する。

3. 高周波電源装置

JT-60SA 高周波加熱装置は、82GHz、110GHz、138GHz の 3 周波数で 1MW 出力のマイクロ波発生装置(ジャイロトロン)、そのマイクロ波出力を真空容器ポートまで伝送する長さ 60m~80m の導波管型伝送系、真空容器ポートに設置するマイクロ波入射アンテナ(通称:ランチャー)によって構成される。ジャイロトロンでは電子ビームを超伝導磁石の作る強磁場中にある空洞共振器まで加速させ、そこで電子ビームの回

転エネルギーをマイクロ波に変換し、モード変換器を経た後にガウス分布状のマイクロ波ビームを出力する。3周波数マイクロ波の同一方向出力を実現させるモード変換器を開発し、82GHz、110GHz、138GHzで1MW出力を達成した。また、110GHzと138GHzでは1MW-100秒出力が必要とされ、そのためにジャイロトロン出力窓には低誘電損失と高熱伝導率の特性を有する人工のダイヤモンドディスクを採用している。ジャイロトロンから出力されたマイクロ波ビームは導波管型伝送系に結合させるが、できる限り低損失で長距離伝送させる必要がある。そのために、光ファイバーにおける基本伝播モード(LP01)と同じモードを励起させて伝送する円形コルゲート導波管を用いている。導波管の他に、伝送路を曲げるためのマイターバンドや偏波を制御する偏波器、伝送パワーを測定するダミーロードなどから成る。伝送系内の放電を抑制するために真空雰囲気にするが、トカマク真空環境と切り離すために人工ダイヤを採用した真空窓(トラス窓と言う。)を真空ポート直前に設置する。真空ポートに設置するアンテナは、伝送系と接続する導波管とその導波管出口付近に設置される可動ミラーから構成され、可動ミラーを動かすことにより、マイクロ波ビームをプラズマの必要な位置へ自在に入射することができる。

統合コミッションニング時には、3周波数システムと110GHzシステムが稼働し、どちらもジャイロトロン出力で1MW-1秒を達成した。また、トロイダルコイルのコミッションニング(25.7kA通電試験)と共に82GHz、約0.8MWのマイクロ波パワーを真空容器に入射し、ECRプラズマ着火に成功した。今後は2回の増力計画を経て、9機の3周波数1MW-100秒ジャイロトロン、9系統の伝送系、4機の入射角可変アンテナを整備する。

*Koji Takahashi¹ and JT-60SA team¹

¹National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, Naka Fusion Institute