

ヘリカル型核融合発電炉の超伝導コイル電源システムを考える

力 石 浩 孝

現在運転している大型ヘリカル装置（LHD）を含めて磁場閉じ込め型の超伝導プラズマ実験装置では、プラズマを閉じ込める磁場を作るための超伝導コイルとそれに電流を供給する直流電源装置は基幹設備の一つです。将来の核融合炉プラントにおいても超伝導コイルと電源システムが重要な構成要素であることには変わりありません。では、その将来の核融合炉にはどんな直流電源が必要になるのでしょうか。それを考えるために、まずは将来の核融合炉ではどんな運転がされるか、現在稼働している実験装置とどんな違いがあるのか見てみます。

LHDでは様々な磁場配位の下でプラズマ実験を行うために、6対ある超伝導コイルそれぞれに直流電源装置をつなぎ、6対のコイル電流をそれぞれ個別に調節できる構成にしています。これらの電源は、朝に超伝導コイルへ電流を流し始め夕方に止める、という具合に実験日においては通電の開始と停止を繰り返しています。現在の電源構成では、磁気結合した6対のコイルでバランスを取りつつ運転するために、高度な運転制御が必要になること、コイルに異常が検出された時の保護動作では個別に抵抗で放電させるため、電流のバランスが崩れ、電磁力の不均衡や装置周辺の磁場の増加が起きるという難点があります。

これに対して、将来の核融合炉ではプラズマを閉じ込めるための磁場構造は既に最適化されていて、運転中の磁場は一通りに決まっています。超伝導コイルには年間を通じて一定の電流を流し続けることになります。これらを基にしてヘリカル型核融合炉に適した超伝導コイルと直流電源装置の組み合わせを考えると、現在のLHDとは大きく異なるものになるに違いありません。

では最初に、定常運転中のコイル電流について考えてみましょう。それぞれの超伝導コイルに必要な起磁力（電流値×コイルの巻き数）はコイルの位置や必要な磁場の形状、強さで決まります。それぞれのコイルで必要な起磁力は異なりますが、

巻き数を変えることにより、全てのコイルを同じ電流値で運転できるようになります。そうすると、全てのコイルを直列につないで一筆書きとし、たった一台の直流電源装置で電流を流すことが可能になります（図1）。このつなぎ方なら、直流電源装置間の干渉を考える必要はなく運転制御が楽になりますし、コイルの保護動作時にもコイル電流のバランスが確実に保たれます。

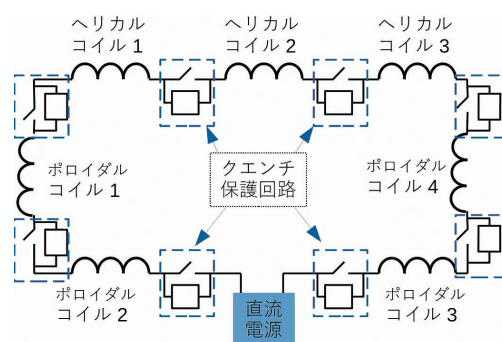


図1 ヘリカル型炉で検討中の一筆書きコイル接続の概要

と、一筆書きコイルは良いことづくめに見えますが、やはり課題もあります。

一つ目は、超伝導コイルに異常（クエンチ）が起きた時の保護です。全部のコイルを直列にしたため、電流を急激に下げようとすると両端の電圧は10万ボルト（V）を超える非常に大きなものになります。そこで、図1のように一筆書きコイルの途中途中に保護用の抵抗と直流遮断機からなるクエンチ保護回路を挿入します。これでコイルの電磁誘導による電圧上昇を隣接する保護抵抗での電圧降下で相殺し、回路全体の電圧が高くなることを防ぐ予定です。

二つ目は、核融合反応を立ち上げていく途中の磁場制御です。その際にはプラズマの状況に応じてコイルの起磁力を随時変える必要がありますが一筆書きコイルではそれはできません。そこで、超伝導コイルを定常運転用の磁場を作るメインのコイルと磁場調節用の補助コイルに分けることを考えています。補助コイルもメインのコイルと同様に巻き数を調節し電流をそろえて、一筆書きに

して一台の直流電源装置で通電します。例えばLHDの超伝導コイルをこのつなぎ方にすると図2のようになります。磁場構造を変えるために3対のポロイダルコイル（OV、IS、IVコイル）をメインコイルと補助コイルに分割しています。さて、補助コイルの電流を変えるとメインの一筆書きコイルにはどれくらいの電圧が誘導されるでしょうか。図2の接続で磁場制御時の電圧を計算してみるとメインコイル内では誘導電圧が相殺してほとんど電圧は発生しないことが分かりました。その結果から直流電源装置の総容量は現在のLHDコイル電源と比べると17分の1で済むことになります。

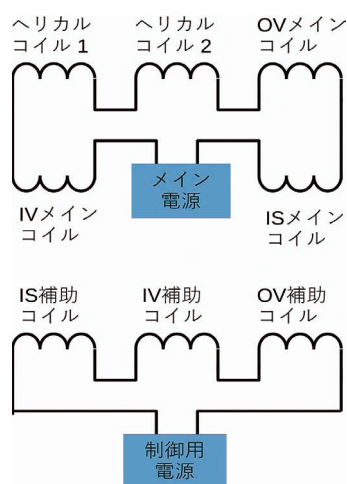


図2 超伝導コイルをメインコイルと補助コイルに分割して、それぞれを一筆書きにする

さあ、これでプラズマを点火して定常運転までたどり着きました。この後、核融合炉は最初に書いたように約1年間の連続運転に入り、超伝導コイルの電流は一定値を保ち続けます。このとき、超伝導コイルにかかる電圧は0.1V程度と予想しています。今LHDなどで使っている半導体を使った直流電源装置では、半導体素子での電圧損失が2V程度あります。つまり、定常運転中は電力の95%以上が直流電源装置で熱として失われ、少々もったいない気がします。そこで、定常運転中は0.1Vくらいの電圧に適した専用の直流電源装置に切り替えることを考えます。核融合炉の超伝導コイルのインダクタンスは100ヘンリー以上になると見積もられていますので、0.1V程度の低い電圧では電流は極めて緩やかにしか変化しません。このため、例えば5秒毎にON/OFFするような装置でも電流脈動が十分に小さい電源になります。その設計

例を図3に示します。半導体変換器で商用周波数の電源から10秒周期（0.1ヘルツ）の交流を作ります。これを、極低温の超伝導変圧器を使って低電圧大電流の交流に変換して整流器で直流にします。整流には高速な半導体スイッチを使う必要はなく機械的なスイッチで事足りますし、スイッチにかかる電圧は極めて低いので接点間のすきまは1ミリメートルもあれば十分です。すると、接点を動かすのにストロークは小さいけれども駆動電流が不要な圧電素子が使えそうです。そのようなものができるのか、実際に小さいスイッチを作ってみました（図4）。写真中の可動接点が上下してスイッチをON/OFFします。これを動作させて0.1秒以下でON/OFFできることを確認しました。

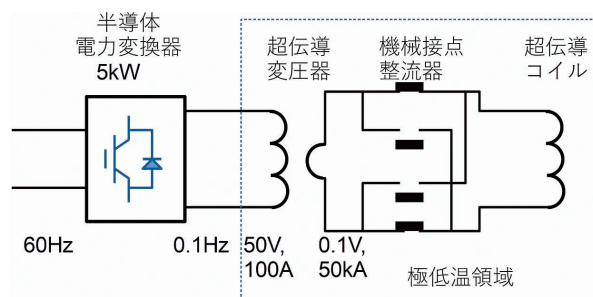


図3 機械接点整流器を使った極低電圧直流電源の概念図

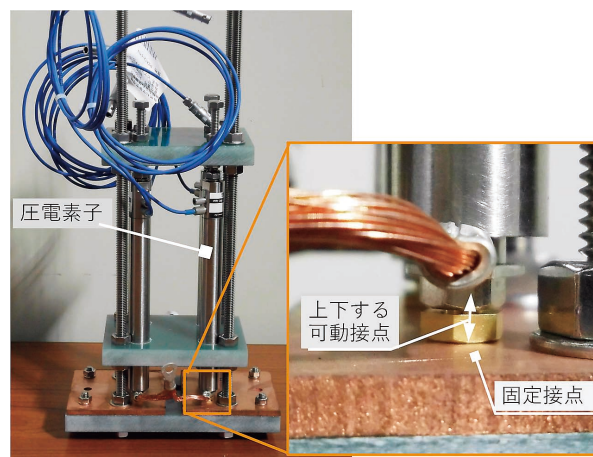


図4 試作した圧電素子で駆動するスイッチ（接点間のすきまは約30マイクロメートル）

ここで説明したコイルと電源の組み合わせや機械接点を使った極低電圧の電源で、核融合炉に必要な100kA級の超伝導コイルと電源のシステムを構築するには、まだ検討や検証が必要な事項は残っています。今後も従来の考えにとらわれない電力システムの検討を進めていきます。

（装置工学・応用物理研究系 准教授）