

# トロイダル磁場コイル用電源

Development of power supply for Toroidal Magnetic Field coil excitation

青山 浩二※  
Kouji Aoyama  
河合 俊哉※  
Toshiya Kawai  
水野 秀則※  
Hidenori Mizuno  
白井 伸明※  
Nobuaki Shirai  
桑原 祐※  
Tasuku Kuwahara

## 1. はじめに

九州大学応用力学研究所では、超伝導磁場コイルを使用した強磁場プラズマ核融合実験装置（以下、TRIAM-1M）を用いて様々な実験を行い、その結果として11Tもの強磁場の発生や長時間のプラズマ維持成功など記録的な成果を挙げている。当社は、1980年代からTRIAM-1Mの各種コイルを励磁する電源を納めており、これらの成果に貢献してきた<sup>(1)</sup>。

2005年からは、新たな研究として新型プラズマ核融合実験装置（以下、QUEST）を用いた研究が計画された。この研究には、QUESTのトロイダル磁場コイル（以下、TFコイル）に大電流を連続通電する実験がある。今回、当社はTFコイルに通電するトロイダル磁場コイル用電源（以下、TFコイル電源）を開発し、納入した。本稿では、QUESTの概要とTFコイル電源の構成、電源の制御・保護機能等について紹介する。

## 2. QUESTの概要

TRIAM-1Mは、トカマクと呼ばれるプラズマ閉じ込め方式を採用した核融合実験装置である。トカマク型の装置は、プラズマをドーナツ状にまとめるためのTFコイルとプラズマを内周方向へ押し込めるためのポロイダル磁場コイル（以下、PFコイル）、円周方向のプラズマ電流を誘導するためのセンターソレノイドコイル（以下、CSコイル）からなっている。図1に概念図を示す。

QUEST (Q-shu University Experiment with Steady State Spherical Tokamak) は、プラズマを球に近づけた形状（プラズマ直径とプラズマの太さの比が1に近い）とする装置である。このようなプラズマを生成する核融合実験装置を球状トカマクと呼び、従来のトカマクと区別している。図2に概念図を示す。また、図3にQUESTの外観を、その主要緒元を表1に示す。

理論上、プラズマを太くするだけでプラズマの閉じ込めや長時間維持などの安定性が増し、低磁界でも高温高密度なプラズマを閉じ込めることが可能とされている。そのため、球状トカマクは、従来のトカマクに比べ磁界を造るコストを大幅に軽減できる。また、TFコイルの巻回密度が減るため、中性子で損傷した真空容器内壁の交換も簡単になるなど真空容器のメンテナンス性が向上する。その結果、装置の製造や維持のコストが格段に低下し、経済的な核融合発電炉の実現が期待される。

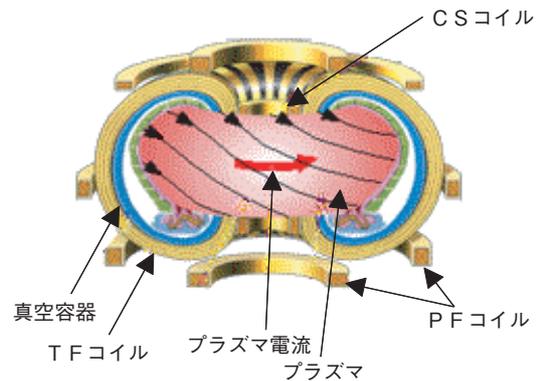


図1 従来トカマク概念図

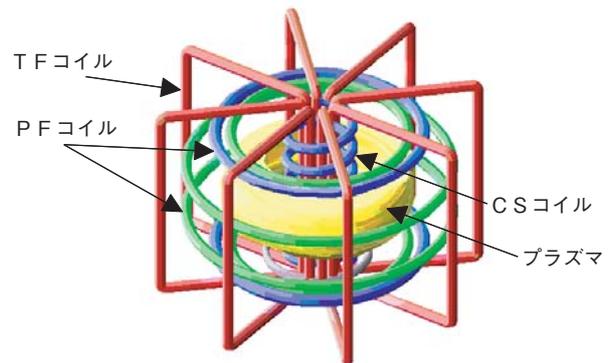


図2 球状トカマク概念図

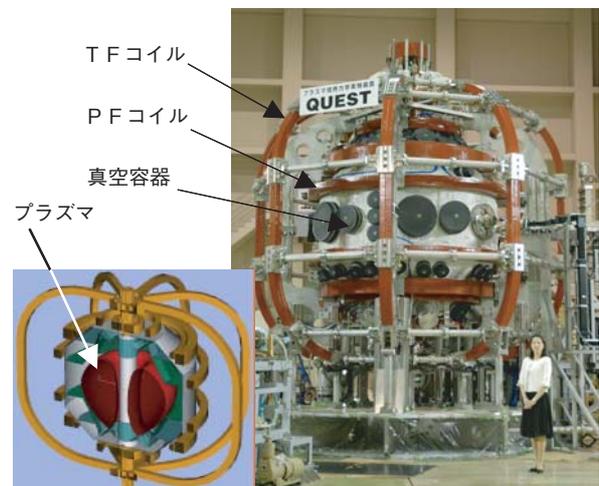


図3 QUESTの外観

提供元：九州大学応用力学研究所

※ 電力事業部 環境エネルギー技術部 パワエレG

表1 QUESTの主要諸元

諸元	仕様
プラズマの大半径	0.68m
プラズマの小半径	0.40m
真空容器半径	1.4 m
真空容器高さ	2.8 m
磁場強度	0.25T(テスラ)

### 3. TFコイル電源の構成

本機は、高圧受電部、変換器部、および制御部で構成されている。仕様を表2に示す。外観を図4に、単線接続図を図5に示す。

#### 3.1 高圧受電部

高圧受電部は、商用の高圧配電線系統から6.6kVを受電し、2つの変換器盤に交流電力を供給する。また、サイリスタの位相制御の基準となる同期信号を高圧回路から生成し、制御部へ送っている。

#### 3.2 変換器部

変換器部は、高圧受電部からの交流電圧を降圧し、それを整流して直流電圧に変換する。その構成は、変換器1盤、変換器2盤、および出力盤の3面となっている。これらはすべて列盤構成として、設置スペースの縮小を図った。

本機は、定格出力電圧が50Vと低いため、サイリスタの電圧降下(1~2V)が出力電圧に与える影響が大きい。その影響を小さくするため、基本回路構成を星型整流回路としてサイリスタの電圧降下を1素子分だけに抑えている。

変換器1盤、変換器2盤は、星型整流回路を2重化して6相整流回路を構成している。各変換器盤の変圧器は、2次電圧の位相を30°ずらしてあり、各変換器盤の出力を相間リアクトルを介して接続し、全体では12相整流となっている。そして、変換器1盤と変換器2盤の電流が同一になるようにそれぞれの変換器の電流を制御することにより、相間リアクトルの偏磁を防止し、相間リアクトルの小型化を図っている。

本機は、連続定格かつ大電流を実現するため、整流素子に通電容量が最大級のサイリスタ(最大定格5000A)を1相あたり4並列とし、全体で48個使用している。この場合、それぞれのサイリスタの電流分担を極力均一にすることが、外形・コスト面から非常に重要となる。

電流分担に影響を与える要素としては、サイリスタに流れる電流による磁場やサイリスタの電圧降下のアンバランス、変圧器からサイリスタに至る経路のインピーダンスのアンバランス、サイリスタを導通させる点弧タイミングのアンバランスなどがある。

電流による磁場の影響を小さくするために、サイリスタ配置、導体レイアウトは、物理的に極力対象となるよう

に構造設計を行なった。4並列するサイリスタは、電圧降下特性が同じになるように素子の選別を行なった。変圧器からサイリスタに至る経路のインピーダンスに大きな影響を与えるのは、変圧器の漏れインピーダンスである。その

表2 電源仕様

諸元	仕様
時間定格	連続
入力電源	3φ 6.6kV 60Hz
電力変換方式	2群2重星型接続サイリスタ 12相変換方式
冷却方式	水冷
定格出力電流	50kA
定格出力電圧	50V



図4 TFコイル電源外観

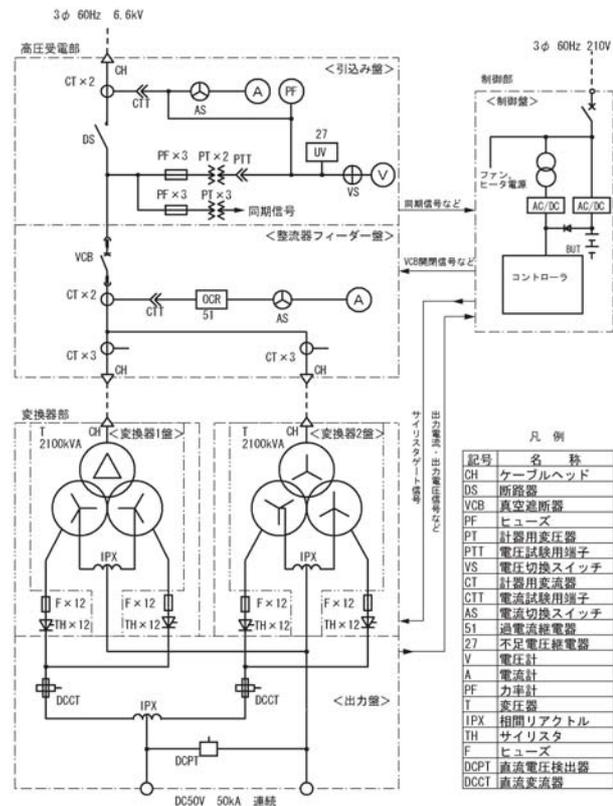


図5 単線接続図

ため、変圧器の設計には十分な検討を行い、漏れインピーダンスが同一になるような巻線構造としている。また、変圧器の製造工程の途中で、事前に低圧で短絡試験を行なうなどして、電流分担を測定し万全を期した。その変圧器内部構造を図6に示す。なお、変圧器には、星型整流回路を2重化する際に必要なリアクトルも内蔵している。

サイリスタの駆動には、当社の核融合用電源で実績のあるハイゲートドライブを採用し、サイリスタの点弧タイミングにばらつきが無くなるようにした。これにより、点弧失敗を防ぐ目的でサイリスタのアノードに挿入される可飽和リアクトルを省略することが可能となった。

さらに、サイリスタと導体を水冷方式として、変圧器2次端子からサイリスタへ至る回路をコンパクトにした。それによりサイリスタがオフする際に発生するサージ電圧も軽減されている。変換器の内部構造を図7に、4並列にしたサイリスタ電流分担の測定結果の代表例を図8に示す。

許容値の $\pm 10\%$ に対して、 $\pm 5\%$ 以下という十分な分流特性が得られた。

### 3.3 制御部

制御部は、全て制御盤に収納し、高圧受電部と変換器部からの検出信号を基に、本機の制御・保護を行なっている。



図6 変圧器内部構造



図7 変換器内部構造

出力電流30kA時

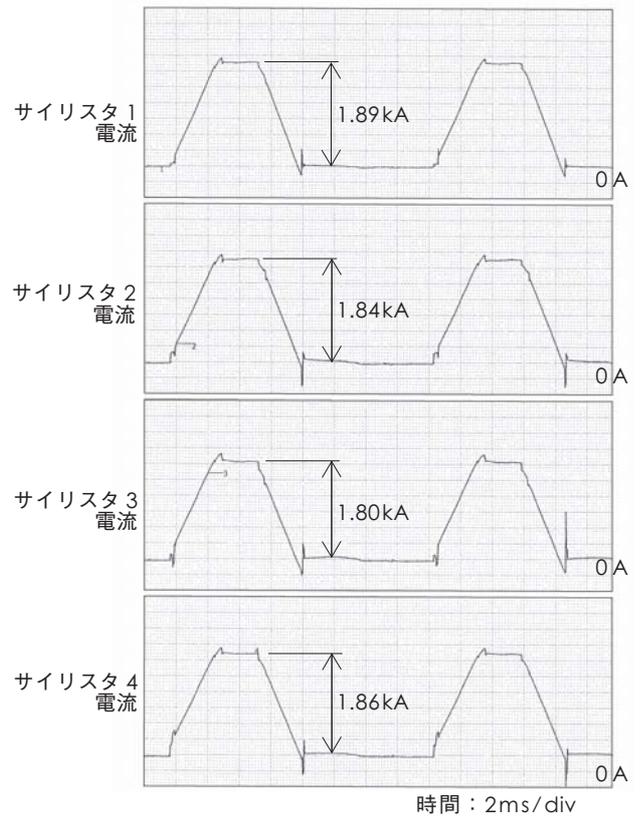


図8 サイリスタ電流分担測定結果

主な制御は、高圧受電部からの位相基準信号に同期してサイリスタを点弧させるタイミングをコントロール(位相制御)し、変換器の出力電圧を変化させる機能である。

主な保護としては、サイリスタの過電流や過熱の保護に加えて、コイルを負荷とする場合の独特の方式(後述)があり、信頼性を高めている。

制御部の構成は、機能ごとに標準化したユニットを採用しており、設計時間の短縮と低コスト化を図っている。制御部の各ユニットは、サイリスタに点弧信号を送るゲートアンプ、位相制御を行なう位相制御器、本電源の入力交流信号を受信・整形する交流検出ユニット、本電源の出力直流信号を受信・整形と電源各部の信号を出力するモニタユニットで構成されている。

## 4. TFコイル電源の制御・保護機能

### 4.1 制御機能

本機は、出力電圧制御と出力電流制御を備えており、様々な実験に対応可能としている。これらの制御には、当社製品で実績のある制御方式<sup>(1)(3)</sup>を採用し、安定性の高い性能を実現している。電圧制御と電流制御の切替えと出力指令は、本機で設定するばかりでなく、核融合実験設備全体を監視する制御室からも可能としている。

サイリスタ電源は、位相制御を行なうために入力の交流

電圧の位相を正確に把握しなければならない。そのために、当社が従来から使用している連続位相比較型PLLを用いたデジタル位相制御<sup>2)</sup>を今回も採用した。連続位相比較型PLLは、入力電源の歪みの影響を受けにくく、入力電源が停電した場合でも位相同期が継続可能なため、サイリスタの位相同期方式としては最適な方式である。

先に述べたように本機は2組の6相整流回路を相間リアクトルで接続した12相整流回路である。一般的には相間

リアクトルで接続した場合、電流のバランスが比較的良いが、本機では、さらにバランス性能を向上させるために変換器1盤、変換器2盤の電流を測定し、その差がゼロとなるようにフィードバック制御している。具体的には、各変換器の点弧角を微小に変化させて、各変換器に通電する電流が均一になるように制御している(群間電流補償)。制御部の仕様を表3に、制御ブロック図を図9に示す。

表3 制御部仕様

項目	仕様
位相制御方式	
同期位相基準	高圧6.6kV基準、停電対応式 電源周波数変化に即時に対応し、同期電圧喪失、電圧不足時においても一連の保護動作が完了するまで正常な位相基準を保つ
サイリスタゲート点弧パルス	ハイゲート高周波連続パルス
転流余裕角制御	交流入力電圧と直流出力電流をもとにした演算方式
リニアライザ	位相制御による制御非線形性を保証する
電圧/電流制御	
制御方式	出力電圧/出力電流フィードバック制御
群間電流補償	6相-6相間の電流不平衡を補償
内部設定	電流制御 電流設定範囲 : 0~50.0kA 勾配設定 : 0.1~99.9kA/min フラット時間設定 : 0.1~999.9sec 電圧制御 電圧設定範囲 : -50~50V フラット時間設定 : 0.1~999.9sec
外部指令	電流制御 指令値入力 : 0~20mA/0~60kA 電圧制御 指令値入力 : ±20mA/±100V

## 4.2 保護機能

本機の負荷はコイルなので、交流入力電源が停電した場合にも、コイルに蓄えられたエネルギーを放電させなければならない。そこで、停電時には高圧遮断器を遮断し、全てのサイリスタを点弧させて、コイル電流をサイリスタ-変圧器2次巻線-TFコイルと循環させて減衰させる方式を採用している。この方式は、サイリスタの電圧降下分と変換器の内部抵抗分でコイルエネルギーを消費し、電流を減衰させている(GAT保護方式<sup>3)</sup>)。

## 5. 試験結果

本機の工場試験結果を図10に示す。この試験は、本機の出力を短絡し、定格電流を通電した波形である。出力短絡という過酷な条件下でも、安定した電流を出力している。

## 6. あとがき

今回、開発し製作したTFコイル電源について紹介した。現在、九州大学ではTFコイル電源を使用する実験のための周辺整備中である。本電源の導入により、より高度なプラズマ実験が可能となり、研究の進展が期待される。

これらの電力変換技術は、核融合関係に止まらず、広い分野に適用可能であり、その成果を新分野にも応用し、当社製品分野の拡大をはかっていく所存である。

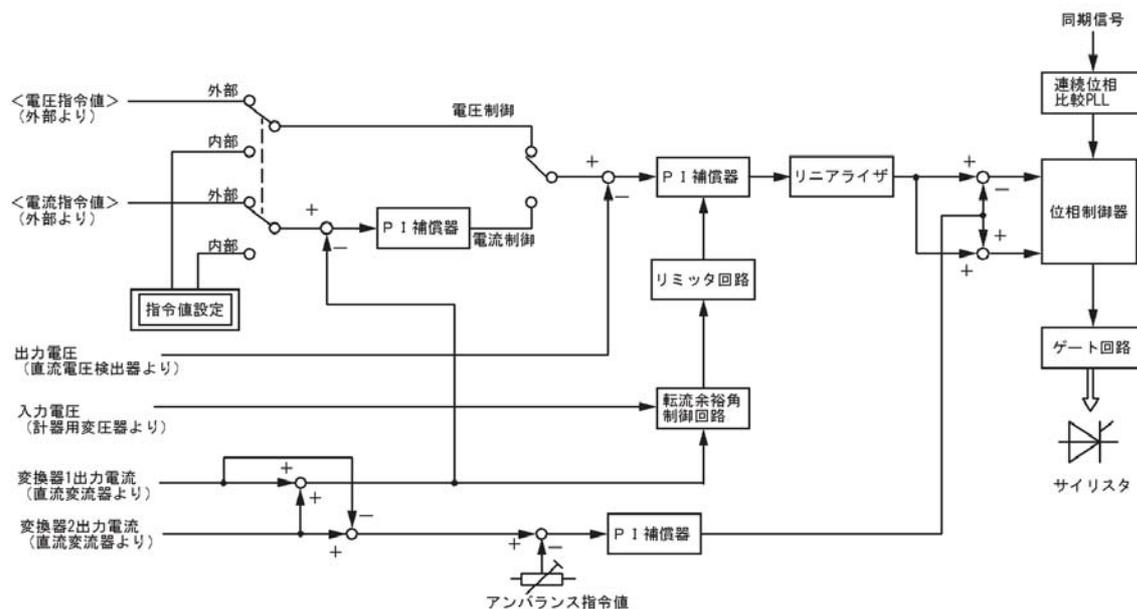


図9 制御ブロック図

最後に、本機の開発にあたって貴重な助言およびご協力いただいた九州大学の関係各位に厚く感謝の意を表す次第である。

## 参考文献

- (1) 佐藤、戸松、他：「核融合用100MVA級オーム加熱電源」愛知電機技報 No.12 (1991)
- (2) 青山、河合、他：「超伝導コイル励磁用パルス電源の開発」愛知電機技報 No.30 (2009)
- (3) 丹羽、佐藤、他：「大型超伝導コイル用電源システムの開発」愛知電機技報 No.17 (1996)

電流設定 50kA  
 勾配設定 99.9kA/min  
 フラット時間設定 30s

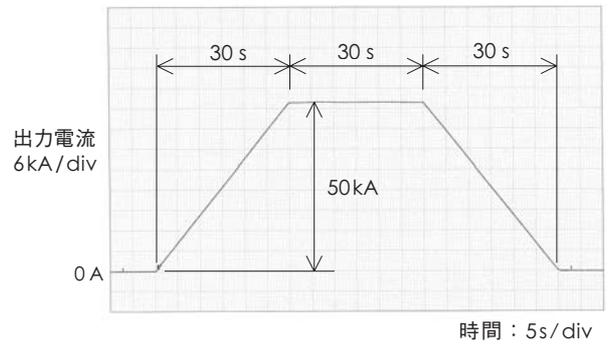


図10 定格電流通電試験結果