

## Development of Current Control System for Resonant Power Supply in the J-PARC RCS

Yasuhiro Watanabe<sup>1,A)</sup>, Norio Tani<sup>A)</sup>, Toshikazu Adachi<sup>B)</sup>, Susumu Igarashi<sup>B)</sup>, Hirohiko Somya<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirakata-shirane, Tokai-mura, Nakagun, Ibaragi, 319-1195

<sup>B)</sup> KEK

1-1 Oho, Tukuba-shi, Ibaragi, 305-0801

### Abstract

Current control system of resonant power supply has been developed for J-PARC rapid cycling synchrotron (RCS). This system consists of 16bit 100kHz A/D converter for current waveform digitizer, combination of 16bit 100kHz D/A converter and VME based special DO board for current pattern generator, and control PC. A/D and D/A converter synchronized 12MHz master clock of timing system for J-PARC.

### J-PARC RCS共振電源における電流制御系の開発

#### 1. まえがき

J-PARC Rapid Cycle Synchrotron (RCS) の主電磁石電源は、偏向電磁石電源1台、四極電磁石電源7台から構成されており、各電源のトラッキングを取るための電流制御が必要となる。電磁石の電流波形は図1に示すようにDCバイアスが重畳した25Hzの正弦波交流電流であり、電磁石はチョークトランス及び共振コンデンサから構成される共振回路を通して励磁する。本電源のチョークトランス、共振コンデンサは屋外に設置しており、外気温及び日射の影響を直接受け、特に共振コンデンサの静電容量は、周囲温度0~40 の変動で±1%変化する。これは、電源からみた共振回路のインピーダンスが変化することであり、交流成分の電流安定度に大きな影響を及ぼす。

一般的に、電源内部のフィードバックゲインが十分に大きく、電流の制御誤差、すなわち実際の電流波形と電流基準波形との差が十分に小さければ、電流基準波形を制御する必要はない。しかし、本電源の場合、電源内部のフィードバックゲインだけでは、先に述べた共振コンデンサの静電容量変化±1%という条件において、十分に電流制御誤差を小さくすることができず、目標とする電流安定度 $1 \times 10^{-4}$ が得られないため、電流基準信号の制御が必要となる。

本論文では、共振電源の交流電流成分安定化を目的とした電流フィードバックについて検討を行った。電源の出力電流波形をA/Dコンバータでデジタル値に変換して計算機に取り込み、周波

数解析により交流基本波成分(25Hz)を抽出して、交流振幅が一定となるように電流基準信号を調整することにより、電流フィードバック制御を行う。RCSの主電磁石の磁場測定用に製作した試験電源を用いて、連続12時間の通電試験を行い、電流フィードバックの効果を実証した。

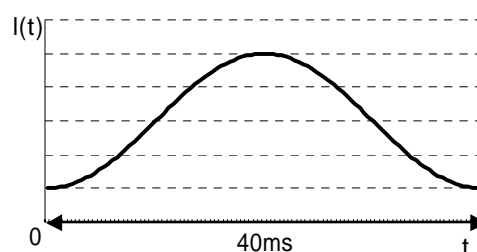


図1：電流パターン

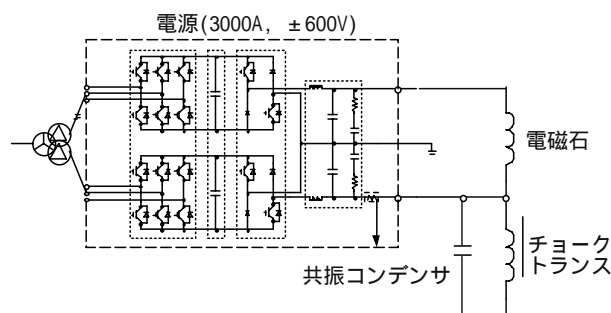


図2：電源システム構成

<sup>1</sup> E-mail: watanabe.yasuhiro@jaea.go.jp

## 2. 電源システム構成

図2に電源システム構成を示す。本システムに用いる電源は、RCSの偏向・四極電磁石の磁場測定用電源及び共振電源の試験用として、実機電源とは別に製作した。共振回路を構成するチョークトランス、共振コンデンサはそれぞれ実機偏向電磁石電源用のものを使用した。電磁石はインダクタンスが最大62mH（偏向電磁石）から最小24mH（四極電磁石QMC）と大きく異なることから、共振コンデンサのタップを切り替えることにより容量調整を行い、共振周波数が25Hzとなるように調整する。電源は、最大電圧 $\pm 600\text{V}$ 、最大電流3000A、電力容量300kW、IGBTを用いたパターン電源である。出力電流の基準信号はデジタル信号（16bit、サンプリング周波数100kHz）で取り合い、電源内蔵のD/Aコンバータでアナログ信号に変換している。出力電流は、電源内蔵の高精度DCCTによりフルスケール $\pm 10\text{V}$ のアナログ信号に変換している。

## 3. 電流制御システム構成

本電源の電流制御システムは、デジタル電流基準信号を作成するための専用DOボード及びCPUボードを含んだVME制御盤、出力電流、出力電圧信号をデジタル信号に変換するための16bit、100kHz A/Dコンバータ、A/D及びD/Aにクロック信号を供給するタイミング分配器、及び以上の装置をLAN経由で制御するための制御用PCから構成される。

J-PARCでは、すべての加速器システムが共通のマスタークロック（12MHz）により同期運転を行う。マスタークロックと電源制御のためのA/D、D/Aコンバータが非同期では十分な位相精度が確保できないので、タイミング分配器において、12MHzを100kHzに分周して、A/D及びD/Aコンバータに共通の100kHzのクロックを供給している。

専用DOボードは、内部に電流基準信号1サイクル分（4000点=100kHz/25Hz）のパターンメモリを32バンク持っており、LAN経由で制御用PCから書き込むことができる。パターンメモリの内容は、タイミングシステムから供給される100kHzに同期して出力され、パターンメモリの切り替え指令は、LAN経由で制御用PCから行われるが、25Hzのトリガ信号のタイミングで切り替わるようなロジックになっている。従って、切り替え前後のパターンメモリが連続的であれば、パターンデータは連続的となり、パターンメモリの切り替

えによる過渡的な信号が出力されないようにしている。

A/Dコンバータは、電源の出力電流、出力電圧を1秒間、100kHz/Sでサンプリングを行い、サンプリングしたデータをLAN経由で制御用PCに送る。制御用PCに取り込んだ出力電流、出力電圧波形は、周波数解析を行い、直流成分、25Hzの交流基本波成分、高調波成分の振幅と位相を求める。これらの値と電流設定値を比較し電流基準信号に反映させることにより、電流フィードバック系を構成している。負荷である共振回路の時定数が2秒程度であるため、フィードバックの周期は10秒に設定した。制御用プログラムは、Labviewを用いて作成した。

## 4. 実験結果

計算機による電流フィードバックの効果を確認するため、気温の変化が明確に分かる半日間（12時間）、朝9時から夜21時の間、連続通電を行い、電流安定度を測定した。また、コンデンサ温度との相間を調べるため、コンデンサを設置している付近の屋外温度とコンデンサの表面温度を同時に測定した。フィードバック制御は交流電流基本波成分（25Hz）の振幅のみとしたため、基本波成分の電流値のみを比較する。

図3にフィードバックを行わない場合の結果を示す。電流振幅は12時間の間に $1.8 \times 10^{-4}$ 変動しており、ほぼ屋外温度、コンデンサ温度に連動していることが分かる。図4にフィードバックを行った場合の結果を示す。電流変動は $6.3 \times 10^{-5}$ となり、温度依存が完全に抑制されていることが分かる。

図3と図4では電流値が異なっているが、これは、実験スケジュールの都合上、異なる負荷を用いており、設定電流が異なっているためである。負荷インピーダンスと電流値が異なることから単純に比較することはできないが、電流フィードバックによる効果は明確に現れていることが分かる。

コンデンサ温度は単器コンデンサの表面に熱電対を付けて測定している。コンデンサ表面温度は、基本的には屋外温度に連動しているものの、屋外温度とは異なっている。これは、コンデンサの表面温度は気温だけでなく日射による影響も受けるからであると、共振コンデンサは40台の単位コンデンサから構成されており、それぞれの設置場所により日射による影響が異なっているためと考えられる。

### 5. まとめ

本論文では、J-PARC RCS用共振電源の電流制御系について検討を行った。計算機による電流フィードバック制御を適用することにより、コンデンサの温度変化による交流成分の電流変動をほぼ完全に抑制することができた。

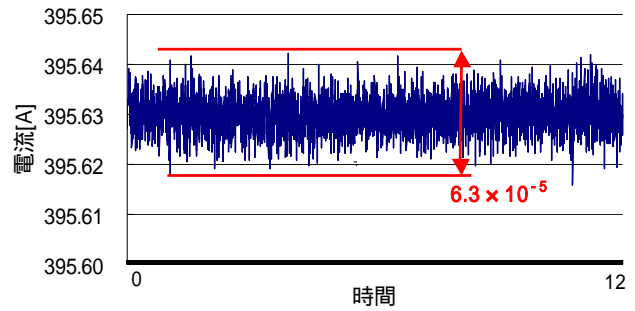
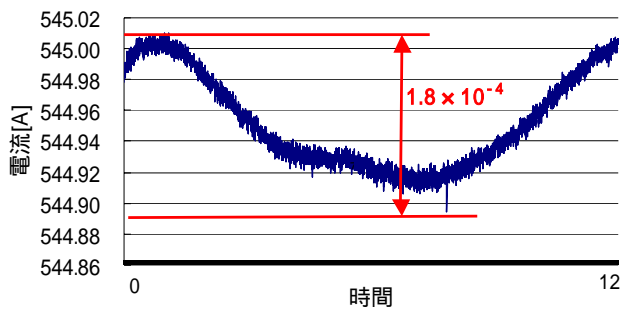
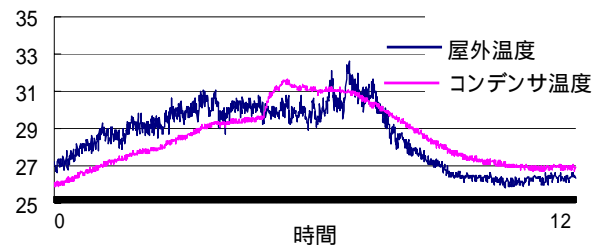
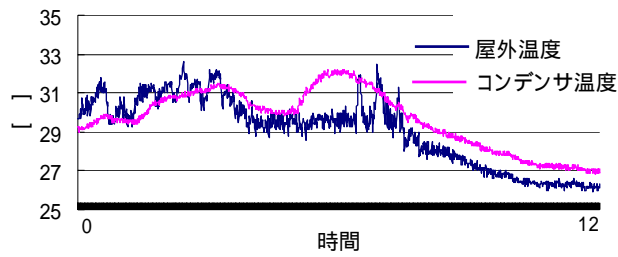


図3：フィードバック無しの場合  
 (上：温度変化，下：交流電流振幅)

図4：フィードバック有りの場合  
 (上：温度変化，下：交流電流振幅)