

## J-PARC 50GeV-MR 電磁石電源について

武藤正文、五十嵐進、加藤直彦、久保忠志、佐藤皓、末野毅、竹内康紀、  
千葉順成、中川秀利、仁木和昭、森義治、柳岡栄一  
高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

### Abstract

Production of a power supply system for the 50GeV-MR magnets of the Japan Particle Accelerator Complex (J-PARC) is in progress. The power supply system consists of 1-set (6-unit constitution) for 96 bending magnets, 11 power supplies for 11 families of 216 quadrupole magnets, 3 power supplies for 3 families of 72 sextupole magnets and 186 power supplies (divided into 3-set) for 186 correction magnets. All the power supplies, mentioned above, are pattern power supplies with a normal period of 3.64 second, and all the converters of power supplies consist of IGBT (or IEGT).

The paper shows the configuration, key features of the power supply system and the situation of production. In addition, a power supply system for magnets of the beam transport line for injection from the 3-GeV synchrotron is described.

### 1 はじめに

現在日本原子力研究所東海事業所の南地区に於いて J-PARC 50GeV シンクロトロン主リング (MR) の建設が進められている。MR は三つの直線部と三つのアーク部から成り、概略三角形をした周長約 1567m のリングである。各直線部にはリング内周側に電源棟が付置され、軌道電磁石電源をはじめ 50GeV-MR で必要な全ての機器の電源がこれらの電源棟に収納される。

電磁石電源は偏向電磁石用 1 式 (6 ユニット構成)、四極電磁石用 11 式、六極電磁石用 3 式と軌道補正電磁石用 186 台 (3 セット構成) から構成される。全ての電源は台形波励磁が可能なパターン電源であり、電源の変換器は全て IGBT (又は IEGT) で構成される。50GeV リングは当初 40GeV で運転されるが、運転開始後早期に 50GeV へ増強される。このため電磁石電源も当初は 40GeV 対応とし、50GeV 運転計画に合わせ電源の増強を行う予定である。

偏向電磁石・四極電磁石及び六極電磁石の各電源は平成 14 年度より 3 年間の計画で製作が進められている。現在 IGBT 変換器等のモジュール試験をはじめ制御盤等盤単体の工場試験が行われており、これらの内の何台かは近々電源として列盤の組立が完了しいよいよ模擬負荷試験に入る段階である。一方軌道補正電磁石及びビーム入射路電磁石の電源は平成 14 年度にすでに製作が完了している。

報告では上記各電源の定格の概要・構成、主な特長及び製作の状況について述べる。又ビーム入射路電磁石電

源についても概要を述べる。

### 2 全体の構成と各電源

#### 2.1 全体構成 [1]

50GeV-MR に設置される軌道電磁石は、偏向電磁石 96 台、四極電磁石 216 台、六極電磁石 72 台、軌道補正電磁石 186 台である。これらの電磁石は標準周期 3.64 秒の台形波で励磁される。偏向電磁石は一式の電源で励磁されるが、出力電圧が大きくなり過ぎるため電源を 6 ユニットに分割し一方偏向電磁石も六つのグループに分け負荷と電源ユニットとをループ状に交互に接続する。電源各ユニットの出力の midpoint を仮想アース点とすることで電源の出力最大電圧を所要電圧の 1/12 にすることが出来る。制御はマスターとなるユニットから全ユニットを統括して行う。

216 台の四極電磁石は 11 のファミリーに分けられ、個々独立の電源で励磁される。このため四極電磁石電源は 11 台となる。又 72 台の六極電磁石は三つのファミリーに分けられ、同様に 3 台の独立した電源で励磁される。

一方 186 台の軌道補正電磁石はすべて独立に運転されなければならない。このため 186 台のパターン運転が必要な電源が必要となる。

以上の電源は、所要電力の合計が大凡等しくなるような三つの組み合わせに分けられ三つの電源棟にそれぞれ配置される。又ビーム入射路電磁石電源は 3GeV からのビーム入射直線部付置の電源棟に一括収納される。

三電源棟に分散配置された軌道電磁石電源は軌道補正電磁石電源を除き、D3 電源棟に置かれた電磁石電源専用の制御用 WS をメインとして全てこの WS から制御される。中央からの電源制御も全てこの WS を通して行われる。軌道補正電磁石電源及びビーム入射路電磁石電源は各々中央から直接制御される。

偏向電磁石・四極電磁石・六極電磁石の電力は、同じくリング内周に設置される 50GeV 特高変電所より 22kV で配電される。このうち六極電磁石電源と所要電力量の小さい四極電磁石電源の一部の電力は、電源棟ヤードにて 22kV から 6.6kV に降圧して供給される。一方軌道補正電磁石電源とビーム入射路電磁石電源の電力は 50GeV 特高変電所から直接 6.6kV で受電する。

#### 2.2 電源の構成

電源の構成は、電源容量の規模に応じ変換器モジュールの組み合わせが多少異なる以外、偏向電磁石・四極電磁石・六極電磁石とも基本的に全て同様である。図 1 に

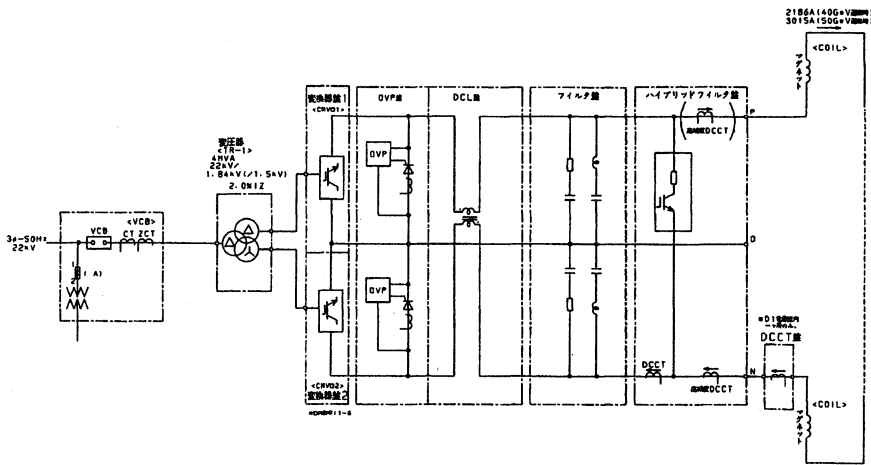


図 1：電源基本構成

その基本構成図を示す。軌道補正電磁石電源については次章で述べる。図では負荷の接続と電源とが 1 対となっているが、偏向電磁石電源では電源ユニットと負荷が交互に接続される。

図左より受電盤と変圧器は各電源毎に対応し電源棟ヤードに設置される。

電源の最も要となる変換器モジュールは IGBT 又は IEGT によって構成される。どちらが使用されるかは電源の電力規模によっているが、本電源ではピーク出力 2MW 以上の電源では IEGT が使用されている。全ての電源の変換器はこれら自励式の電圧駆動形変換素子で構成され、よって電源自身で効率 1 運転の制御が可能であり基本的に無効電力を発生しない事が本電源の大きな特徴である。

フィルター盤はパッシブフィルター及び同調フィルターで構成される。同調フィルターは現在までの解析で 100Hz 及び 600Hz の 2 種類で構成される予定であるが、最終的には実装試験で決められる。

OVP 回路は、電源又は更に上位での故障時に負荷に蓄えられた電力を安全に吸収するためのもので、故障時に上位の VCB (遮断器) が開く前に動作しなければならない。時間的には故障検知から数 ms 程度で動作することが要求される。

ハイブリッドフィルター (HF) は中程度の規模の IGBT と純抵抗で構成される。図では一回路のみが示されているが、電源の規模により実際には 4 回路又は 8 回路並列で構成される。一回路のスイッチング周波数は 2kHz、よって等価リップル周波数は 8kHz 又は 16kHz となる。

この回路の動作原理は以下の様である[2]。HF 回路は IGBT のゲート時間を制御することにより上流の変換器側から見て可変抵抗の如くに作用する。この時 HF の抵抗器の抵抗値をうまく選ぶことにより、変換器側と負荷電磁石及び HF とのインピーダンスの大小関係で変換器から伝搬してくるリップル成分を負荷側の電磁石まで伝搬させずに HF 回路にバイパス (吸収) させることが可能となる。更に HF に流れる電流に負荷定格の数%程度の余裕を持たせれば、その範囲内でリップルの制御だけでなくパターン追従性の制御も可能となる。本電源では実際にそのように検討されている。

いわゆる直列接続型のアクティブフィルターではその結合トランスに主回路の電流がそのまま流れるため、大

きなトランスとリップルを打ち消すための電力増幅器を必要としたが、HF ではこの回路に流れる電流は定格電流の数%の程度ですみ (但し電圧は定格電圧がそのまま印加される)、またこの回路を駆動するための電源を要しないので非常にコンパクトとなる。

この方式は本電源で初めて実用化されるもので、本電源にとっても大きな特徴点である。

現在電源三相ラインの電圧不平衡・位相不平衡・瞬時電圧変動等の条件を仮定しながら、パターン追従性、リップル、安定度等のシミュレーション解析が進められている。

### 2.3 電力定格及び電力変動

偏向電磁石・四極電磁石及び六極電磁石電源の電力概要を表 1 に示す[1]。表に見られるようにパターン運転のピーク電力とその変動は極めて大きい。50GeV 運転時にはこれらの電源を直接商用電力ラインに接続することは不可能で、電力の変動を吸収・平準化する電力システムが必要である。現在可変速フライホイール発電システムの導入が検討されている[1][3]。

表 1：励磁電流とパターンピーク電力

	最大電流 (A)	パターンピーク電力 (MW)			
		40GeV 運転		50GeV 運転	
		+	-	+	-
BM	3015	43.2	-30.4	73.5	-53.7
QM	*1507	16.3	-6.6	31.7	-12.5
SM	660	1.5	0.0	1.8	0.0
計		61.0	-37.0	107.0	-66.2
電力変動幅		98.0		173.2	

\*QDSのみ1654A

一方 40GeV 運転時には、東電による解析の結果電磁石電源を商用ラインに直接接続する事がほぼ可能であることが得られている。

### 3 補正電磁石電源及びビーム入射路電磁石電源

補正電磁石電源及びビーム入射路電磁石電源は、前者はパターン電源であり後者が直流電源であるという点で大きく異なっているが、電源の構成として共通の思想で作られている。図 2 に補正電磁石電源を例に回路構成の詳細を示す。

補正電磁石電源は 186 台の電磁石の全てに同一定格のパターン電源が用意される。しかしその全てを入力コンバータ (IGBT で構成される) を含む独立の電源として製作する事は価格的にも大きな負担となる。補正電磁石電

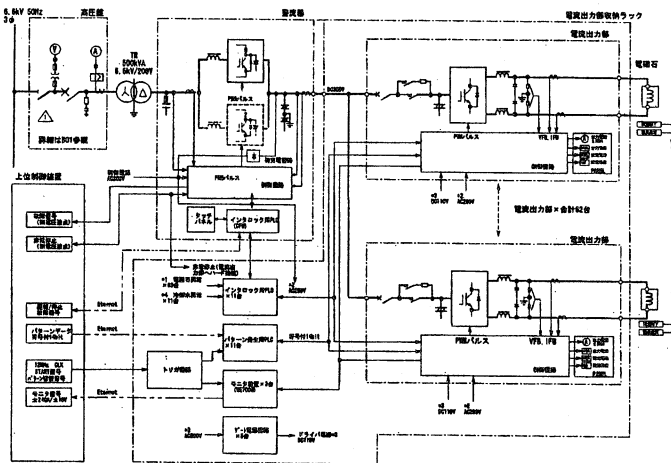
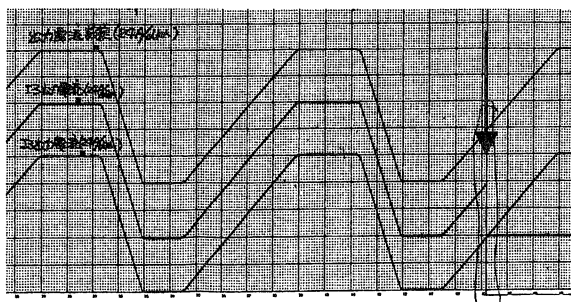


図 2: 補正電磁石電源詳細図 (1セット分)

源は三電源棟に 62 台分ずつ配置される。そこで本電源では電源棟毎に 62 台分の入力コンバータの部分を一機に統括し、それに対し 62 台の電流出力部を全て並列に接続する事にした。統合コンバータ部からは負荷に必要な量の直流電力が供給され、各電流出力部では上位からのパターン指令により個々独立に電流波形を制御出来るようになっている。図 2 で中央上部の整流器の部分が統合コンバータ部であり、図中右側上下に電流出力部が示されている。ここに 62 台並列に接続される。

電流出力部の定格はパターン出力でピーク電流 240A、ピーク電圧 70V、ピーク電力 17kW で 62 台全て同一である。これに対し統合コンバータ部の入力、全ての電流出力部が同時に定格で運転されることはないとの判断で所要ピーク電力の半分を目処に 500kVA とした。すなわち全電源を個別とする場合に比べ受電容量の軽減が図られている。

補正電磁石は磁場の調整が運転中にも個々に行われるが、この時他の補正電磁石に影響があってはならない。図 3 に同じコンバータ部に接続する 2 台の電流出力部間の影響の様子を示す。2 台がパターン運転中に 1 台の電流を瞬時にゼロにしたとき (矢印の位置。故障等に相当) にも、他方の電流に変動が無い事が示されている。



コンバータ個別電源組合せ - 個別電源 2台運転 (13 運転 → 停止) 73 図表

図 3: パターン出力波形

ビーム入射路電磁石電源は、偏向電磁石用 5 台、四極電磁石用 27 台及び軌道補正電磁石用 14 台とからなっている。これらは全て直流運転されるが、電源の台数が多い事からこの構成も上記の補正電源と同じ方式を採用した。コンバータ部の作り易さ等を考慮し、ビーム入射路電磁石電源全所要電力の 2MW を 3 セットに分割した。1 セット分の電力容量は 750kVA となっている。

補正電磁石電源もビーム入射路電磁石電源も入力コンバータは全て IGBT を使用し、力率 1 制御と高調波電流の高次数化を図っている。

#### 4 電磁石電源の制御

偏向電磁石・四極電磁石及び六極電磁石の電源は D3 電源棟に置かれた専用の WS で統括して制御される。中央との交信はこの WS を通して行われ、ローカル/リモートの切り換えもこの WS 上で行う。ローカルを指定すると偏向・四極及び六極電磁石電源の操作は全てこの WS から行なう。但しローカルモードでも運転のステータスは全て中央制御に伝達される。

中央制御と現場電源間との通信は、イーサネットと数種類の個別接続で行われる。パターンデータ、運転指令、ステータス表示、故障内容通信等高速性を必要としない全ての通信はイーサネットで、一方パターンスタート用マスタートリガー、12MHz 基準クロック、MPS・PPS 用インターロック信号等は専用の光又はハードワイヤーで通信される。イーサネットの通信には EPICS が使用される。

パターンデータ (PTD) は中央制御より全 15 電源分のデータが、1ms 刻みの磁場 PTD として WS に送信される。WS では磁場 PTD から電流 PTD に変換し当該電源に転送するほか、15 電源分を 1 セットとして 16 セット以上の PTD を保存する事が出来る。WS から転送された PTD は各電源の PM-CPU に於いて更に 10 $\mu$ s の電流 PTD に展開され PM-CPU 内の保存メモリーに保存される。保存メモリーには 16 パターン分まで保存が可能で、保存メモリーから制御メモリーへの書き込みは 1 パターンの運転中に全電源一斉に行う事が出来る。例えば複数パターンの交互運転のような場合、予め作られた PTD を順次保存メモリーから制御メモリーに書き込む (書き換え) 事で行う。

電流制御にはこの制御メモリー上の PTD が使用される。

#### 参考文献

- [1] KEK Report 2002-13 (J-PARC 03-01), ACCELERATOR TECHNICAL DESIGN REPORT FOR J-PARC, March 2003.
- [2] E. Ikawa, *et al.*, Proceedings of the 13th Symposium of Accelerator Science and Technology, Osaka, Oct. 29-31, 2001.
- [3] M. Muto *et al.*, On the Power Supply System of the JHF 50-GeV Main Ring Magnets, KEK Report 98-14 (JHF 98-5), Feb. 1999.