

パルスベンド補正コイル電源の制御システム

EPICS BASED CONTROL SYSTEM OF PULSE BEND CORRECTION COIL

佐藤健一、山田秀衛、上窪田紀彦、高野淳平、白形政司

Kenichi Sato*, Shuei Yamada, Norihiko Kamikubota, Junpei Takano, Masashi Shirakata

J-PARC center / KEK (Tokai campus)

Abstract

The pulse-bend magnet in J-PARC 3-50BT has the residual magnetic field, slightly after it has sent protons to MR. Due to this effect, we can not supply protons to the MLF, during three 25Hz-cycles. A correction coil and its custom made power-supply were introduced in order to cancel out the residual magnetic field. We have constructed an EPICS-based control systems for this correction coil power supply. The control system have four components: (1) a PLC controller with a Linux CPU and I/O modules, (2) a commercial function generator, (3) a custom made power-supply to drive coil current, and (4) a timing module to provide proper trigger signals. A pattern waveform, delivered from a function generator, is used to drives the customized power supply. We have examined basic functionalities of the control system during beam studies in May and in June 2014, and confirmed its availabilities, namely status monitoring and operation controls. However, we found some problems in interlock signals of the power-supply. We will improve the system toward the next operation from this autumn.

1. はじめに

J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) は日本原子力研究開発機構 (JAEA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が共同で計画及び運営を行っている大強度陽子加速器施設である。リニアック、3GeV シンクロトロン (RCS: Rapid Cycling Synchrotron)、50GeV シンクロトロン (MR: Main Ring) の3つの加速器で構成されており、MR は2008年にビーム運転を開始した^[1]。J-PARC は物質・生命科学実験施設 (MLF)、ハドロン実験施設 (HD)、ニュートリノ実験施設 (NU) の3つの実験施設からなる複合施設である^[2]。Figure 1 に J-PARC の航空写真を示した。Figure 1 には各加速器の位置と実験施設の位置関係も示してある。

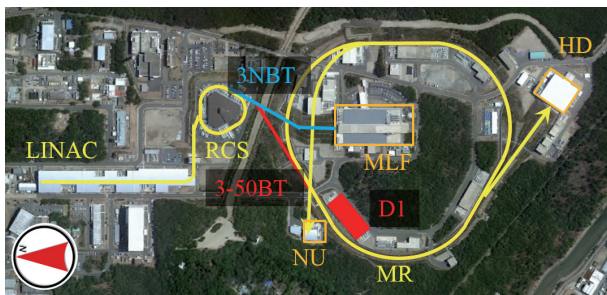


Figure 1: An aerial photo of J-PARC.

3-50BT は RCS と MR を結ぶビームラインであり、RCS と MLF を結ぶビームラインの 3NBT の途中から分岐している。この分岐点すなわち 3-50BT の最上流にあるのがパルスベンド電磁石であり、RCS から取り出された MLF 行きの陽子ビームを無理やり MR 側に振り分ける磁場を発生させる装置である。Figure 2 は 3NBT におけるパルスベンドの位置と 3-50BT の最上流であることを示した図である。

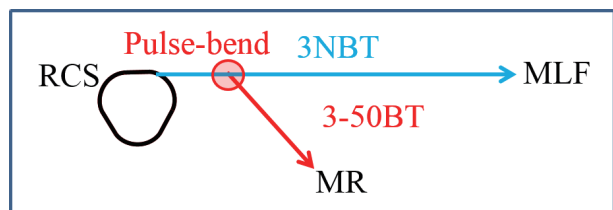


Figure 2: The layout of 3-50BT.

2. パルスベンドの残留磁場

パルスベンドは RCS から取り出される 25Hz 繰り返しの内、MR へ連続4サイクルを振り分け、残りを MLF に供給している。しかし、パルスベンド電磁石には若干の残留磁場が残るため^[3]、MLF へのビーム供給が MR 振り分けた直後の連続3サイクル分停止している。

Figure 3 はパルスベンド電磁石のタイミング構造を示している。赤色の円がパルスベンド電磁石の励磁 (紫線) によって MR4 発分振り分けられている。しかし、立ち下がり時の残留磁場 (橙) によって振り分けられた直後の MLF 行きのビーム供給は停止している。Figure 3 では2発分の長さのみ描いているが、実際には指数関数的に磁場が続く。また、P0 は MR の主電磁石パターン開始のタイミングを表し、K1 から K4 までは MR への4回の入射タイミングを表す。K5 から K8 は MR へ入射しないため本来は存在しないが、続き番号を強調するために便宜上用いている。

この残留磁場を打ち消すことは、ビーム供給の停止期間を設ける必要がなくなるため、MLF へのビーム供給の効率上昇につながる。高効率の MLF ビーム供給を実現するために、残留磁場を打ち消すパターン磁場を発生させるパルスベンド補正コイルが導入された。このパルスベンド補正コイルの電源を制御するために、制御システムを EPICS ベースで構築した。

J-PARC では、加速器制御に EPICS(Experimental Physics and Industrial Control System) と呼ばれるツールキットを用いている^{[4][5]}。EPICS ベースの制御シス

*kenichi.sato@j-parc.jp

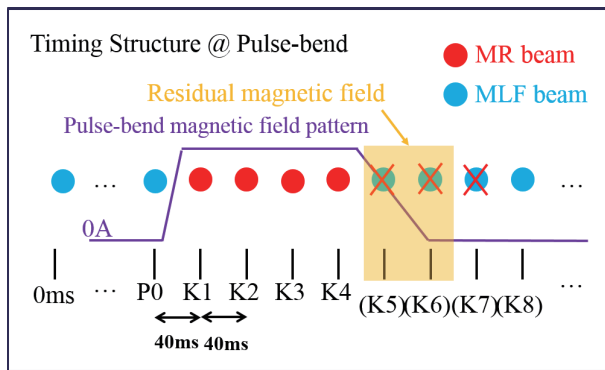


Figure 3: Timing structure at pulse-bend.

テムを構築することで、短期間の開発および低コスト化を狙った。

3. 制御システムの構成機器

本制御システムは以下に示す機器で構成される。

- Linux 搭載の PLC コントローラ (F3RP61-2L) および I/O モジュール (YOKOGAWA)^{[6][7]}、EPICS IOC(Input Output Controller) を立ち上げシステム全体をまとめる。
- ファンクションジェネレータ (Tektronix AFG3051C)、F3RP61-2L 上で動作している EPICS シーケンサにより作製したパターンを電源へ出力する。
- パルスバンド補正コイル用カスタマイズ電源 (エヌエフ回路設計ブロック KIT54552)、本体の制御端子と PLC I/O モジュールがハードワイヤで接続されている。
- Timing 信号用 NIM モジュール (林栄精器 RPN-1110)、PPS 許可信号を Gate にしたトリガ信号を光から電気に変換・分配する。

各機器は MR 第 1 電源棟 (D1) に設置されたカスタマイズ電源ラック内のスペースに設置している。本制御システムを構築する機器をラックに収めた写真を Figure 4 に示す。図の左側は右側のラックの全体写真を拡大したものであり、本システムに関わる装置は左側に集約されている。また、ラック全体でいうと本システムより上部部分がアンプ部、下部分が DCPS 部である。

また、本制御システムにおける機器間配線の関係図を Figure 5 に示す。上側は D1 のラック内部、下側は 3-50BT のトンネル内部を表す。まず (a)PLC モジュールの内 F3RP61-2L が制御ネットワークと接続され、本システムをアクセスするための通信窓口を作る。(b)AFG3051C は F3RP61-2L の 2nd ポートと Ethernet で接続され、生成したパターンを (c)KIT54552 の「Signal Input」に入力する。また、(c)KIT54552 は状態監視および制御の信号のため (a)PLC の I/O モジュールとハードワイヤで接続されている。(d) はトリガ信号を光信号で受信し、電気信号に変えて (b) と (c) に分配している。他にも、(c)KIT54552 は電源であるため、3-50BT トンネルに置いてあるパルスバンド補正コイルの本体に電流を流す。

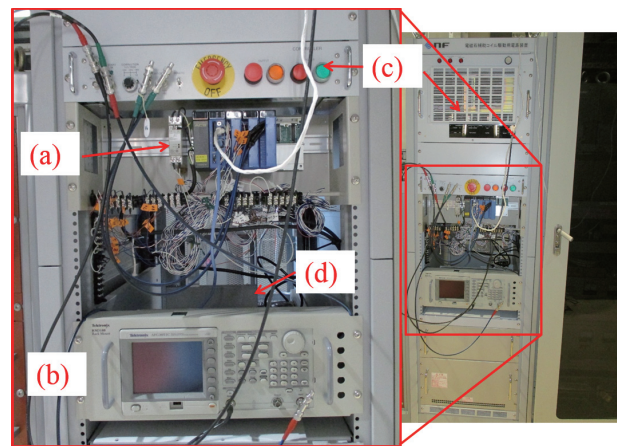


Figure 4: The photo of rack layout.

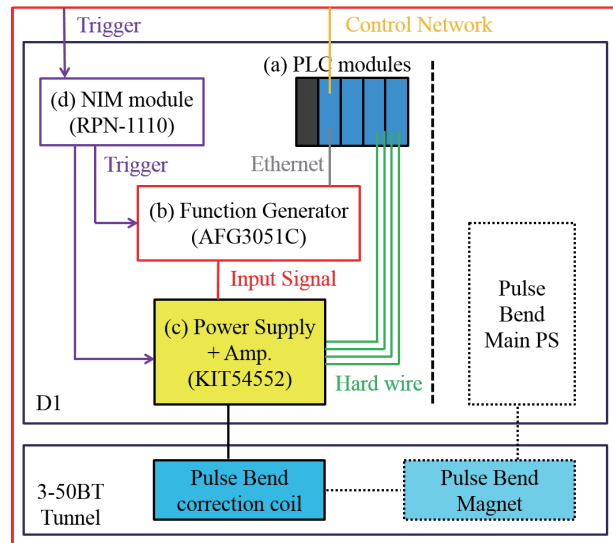


Figure 5: The control system layout of pulse-bend correction coil.

4. 各機器の制御について

4.1 PLC コントローラおよび I/O モジュールの制御

本制御システムにおける F3RP61-2L は EPICS IOC を立ち上げる。F3RP61-2L は CPU/Linux モジュールであり、J-PARC MR では起動時に IOC の設定が自動的に NFS を使って読み込んで使用する^[8]。本制御システムでパルスバンド補正コイル電源を制御するために使う PLC モジュールの種類を Table 1 に示す。

Table 1: Selection of PLC I/O Modules

Slot	Category	Model
1	CPU	F3RP61-2L
2	Din	F3YC08-0C
3	Dout	F3XD16-3F
4	ADC	F3AD08-5R
-	bus	F3BU06-0N
-	power-supply	F3PU10-0S

これらの I/O モジュールはハードワイヤで電源に接続されており、操作・状態監視用の信号が流れる。また、F3XD16-3F を駆動させるために外部電源が別途必要である。

4.2 AFG3051C の制御

ファンクションジェネレータである AFG3051C は、F3RP61-2L によって制御される。Ethernet 上で VXI-11 プロトコル^[9] によって操作される。VXI-11 プロトコルとは計測器を TCP/IP 経由による操作を可能にするプロトコルである。内部的には GPIB ポートの使用を想定しているが、GPIB のコマンドを LAN ポートで使うことでリモートコントロールを行うことができる。本システムは EPICS による制御を行うため、EPICS レコードと GPIB のコマンドを対応させるデバイスサポートを用いた。適当な EPICS レコードにチャンネルアクセスすれば、F3RP61-2L が GPIB のコマンドに変換する。また、パルスベンド電磁石はパターン運転を行う。パターン波形は中央制御棟にある IOC が作成し、制御ネットワークを介してファンクションジェネレータに波形の waveform データを送っている。これは MR における主電磁石のパターン生成と同じ仕組みである。

4.3 KIT54552 の制御

KIT54552 はエヌエフ回路設計ブロックによるカスタマイズ電源の製品であり、パルスベンド補正電源を動作させるためのシーケンスが組まれている。KIT54552 は 1 つのラックに収まった製品であり、DCPS 部、アンプ部、コントローラ部があるが、制御に用いるのはコントローラ部のみである。コントローラ部の前面にはボタンがついており、緊急停止ボタンと Power ON/OFF、Output On/Off などがある。また、リモートとローカルを切り替えるトグルスイッチもついており、ローカルにするとリモート操作を受け付けられない状態になる。

本システムはファンクションジェネレータからの電流指令を必要とする。電流指令は中央制御棟の IOC が作成した電磁石のパターンの waveform を展開することで作成している。出力した電流波形の readback は ADC モジュールである F3AD08-5R へ入力する。

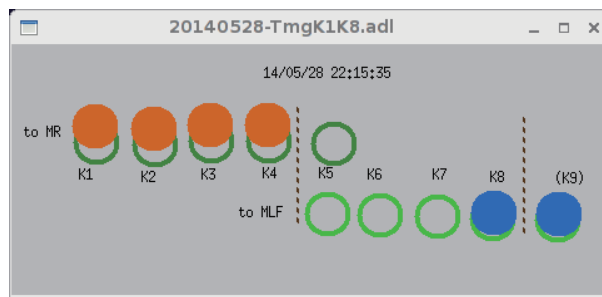
4.4 RPN1110 で変換する信号

本システムには「トリガ信号」と「PPS 許可信号」の 2 種類のタイミング信号が必要である。トリガ信号は J-PARC MR サイクル開始のタイミングを正確に合わせるためのタイミング信号である。PPS 許可信号は PPS(Personal Protection System) の安全が保たれている状態のときのみ許可を出す信号で、もともとパルスベンド電磁石は PPS に関わる機器であるため^[10]、本システムにも必要な信号である。

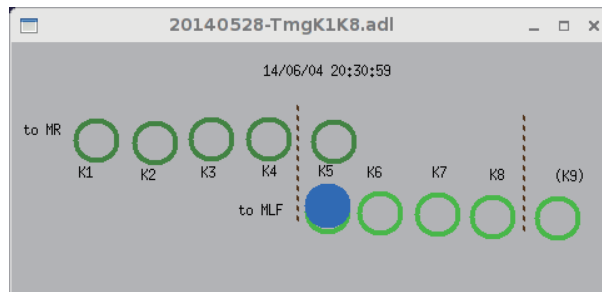
本システムでは 2 つの信号の AND を取った光信号を生成し、現場ラック内にある RPN1110 にて o/e 変換を行う。また、トリガ信号は AFG3051C と KIT54552 の両方で必要になるため、信号の分配をする役割も担う。

5. 制御システムの動作確認

本制御システムは 2014 年 4 月 29 日の通電試験に間に合うように構築された。5 月の試験運用で、制御シス



(a) Before MR&MLF study (as usual).



(b) During MR&MLF study.

Figure 6: Difference of normal mode and MR&MLF study mode of beam bunches.

テムのうち操作に関わる部分の操作・状態監視に関する動作は確認された。ただし、リモート/ローカルの判別信号が無いことや、インターロック系などの課題は残っている。

その後、3 回のスタディが 5 月 28 日、6 月 4 日、6 月 11 日に行われ、補正電源を使った MR と MLF の合同スタディが行われた。このスタディによってパルスベンド補正コイルの効果が確認された^[11]。

Figure 6(a) はスタディの直前、それまでの MR サイクルで RCS からのビームバンチを入れた状態であり、Figure 6(b) に示したのは K5 タイミングのみにビームバンチを入れた状態である。

今後の予定として、2014 年秋からの利用運転に用いることを目指す。

参考文献

- [1] T. Koseki, et al., "Beam Commissioning and Operation of the J-PARC Main Ring Synchrotron", Progress of Theoretical and Experimental Physics (PTEP) 2012, 02B004, 10.1093/ptep/pts071.
- [2] 日本物理学会誌 2011 年 1 月 (vol. 66 no. 1), 「小特集 大強度陽子加速器施設 J-PARC~その実現まで~」
- [3] K. Koseki, M. Tawada, H. Nakayama, M. Shirakata and K. Okamura, Proceedings of EPAC, Jun. 26-30, 2006, TU-PLS106, 1747 (2006).
- [4] N. Kamikubota, et al., "J-PARC Control toward Future Reliable Operation", ICALEPCS 2011, Grenoble, France, Oct. 10-14, 2011, MOPMS026, pp. 378-381.
- [5] <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [6] <http://www.yokogawa.co.jp/rtos/rtos-index-ja.htm>
- [7] J.-I. Odagiri, et al., "Application of EPICS on F3RP61 to Accelerator Control", ICALEPCS 2009, Kobe, Japan, Oct. 12-16, 2009, THD005, pp. 916-918.

- [8] H. Nemoto, et al., "IOC Surveillance System for J-PARC MR Control", PASJ Annual Meeting in Osaka, Japan, Aug. 8-11, 2012, WEPS118, pp. 745-748.
- [9] <http://www.vxibus.org/>
- [10] Y.Takeuchi, "Personal Protection System of Japan Proton Accelerator Research Complex", ICALEPCS 2003, Gyeongju, Korea, Oct. 13-17, 2003, WP517, pp. 404-406.
- [11] J.Takano et al., "Residual Field Correction of Pulsed Bending Magnet", The 2nd International Symposium on Science at J-PARC, Tsukuba, Japan, Jul. 12-15 2014, in press.