

# J-PARC ハドロン実験施設における電磁石用電源電流監視システムの開発

## DEVELOPMENT OF CURRENT MONITORING SYSTEM FOR MAGNET POWER SUPPLY AT J-PARC HADRON EXPERIMENTAL FACILITY

上利恵三<sup>#</sup>, 里嘉典, 豊田晃久, 森野雄平, 秋山裕信  
Keizo Agari<sup>#</sup>, Yoshinori Sato, Akihisa Toyoda, Yuhei Morino, Hironobu Akiyama  
High Energy Accelerator Research Organization, KEK

### Abstract

A new current monitoring system of magnet power supplies at J-PARC Hadron experimental facility has been developed to work with a Programmable Logic Controller (PLC). The PLC consists of a sequence CPU, a Linux CPU, an A/D and an output modules at Hadron hall. The PLC monitors the DCCT current values of the power supplies about 20 quadrupole and 6 bending magnets. Beam operation automatically stops when the current values of the power supplies exceed respective thresholds. In addition, the noise of the current value was effectively suppressed with accessory moving-average filter of the A/D module. The current monitoring system has been successfully and stably operated since March 2011. This paper reports the current monitoring system of magnet power supply at the J-PARC Hadron experimental facility.

## 1. はじめに

Japan Particle Accelerator Research Complex (J-PARC) で加速器により 30GeV に加速された陽子ビームはハドロン実験施設[1](図 1)に輸送される。ハドロン実験施設では加速器から遅く取り出された陽子ビームを直流電源で通電した常伝導電磁石を使用し、偏向・収束・発散させ、スイッチヤードからハドロンホールにある二次粒子生成標的[2]やビームダンプ[3]まで導いている。現在(2017年7月)ハドロン実験施設内の電磁石用直流電源は1次ビームラインで 42 台を使用してビーム運転を行っている。

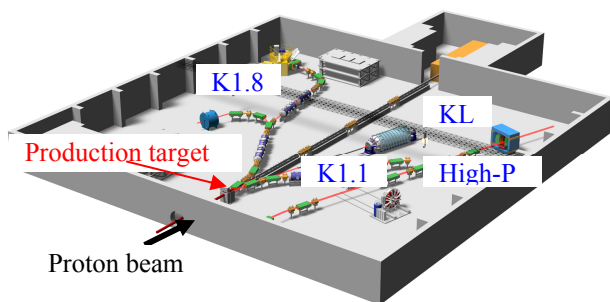


Figure 1: Illustration of Hadron experimental facility.

## 2. 電源監視システム

### 2.1 概要

現在ハドロン実験施設の 1 次ビームラインは加速器により加速された陽子ビームを取り出し、2 次粒子生成標的や現在建設中の High-P・COMET ビームラインへ導き実験に使用され、またそこで使用されなかった陽子ビームはビームダンプで吸収される。この 1 次ビームラインは

2017 年 6 月のビーム利用運転では 37kW で安定・安全に運用されている。

このビームラインでビーム軌道を調整する常伝導電磁石は直流電源によって通電される。この直流電源を安定・安全に運用することにより、安定したビーム軌道を保ち、物理実験を行う 2 次ビームラインへ安定的にビームを供給できる。

設定電流値の誤操作や急激な変動を検知するため、直流電源の電流値を監視するシステムを構築した。このシステムは Programmable Logic Controller (PLC) で構成され、ビームが加速器より取り出された直後のスイッチヤードと 2 次粒子生成標的やビームダンプが設置されているハドロンホールの 2 箇所で開催されている。これらの電流は電源とその制御システム間をアナログ通信している電源内部の DCCT より得られた値を取り込んでいる。

ハドロン実験施設は主に収束、発散、偏向電磁石を用いており、この中でビーム調整や連続運転時に電流値を変化させない電磁石電源の電流値をこのシステムで監視している。また各々の電流値はしきい値を 2 段階に設定され、1 段階目のしきい値を超えると警報音が鳴り、2 段階目のしきい値を超えると自動的にインターロック信号を出力し、ビーム運転が自動的かつ安全に停止する。しきい値は主に設定値に比べ 1 段階目では $\pm 0.8[\%]$ 、2 段階目では $\pm 1[\%]$ で設定しているが、電流値のノイズ、電源の製造会社、製造年、定格などの違いや運転電流値を解析することにより、しきい値の範囲を各々に適切に設定している。

### 2.2 PLC

電流監視システムには横河電機 PLC の FA-M3 シリーズを採用した。PLC はシーケンス CPU、Linux CPU、アナログ入力(A/D)、出力モジュールから構成される。シーケンス CPU は電流値の移動平均化処理、しきい値との比較し、Linux CPU[4]は得られた値・信号を EPICS レコード化し、また EPICS レコードを PLC に取り込み、A/D モ

<sup>#</sup> agari@post.kek.jp

ジュールは電流値を測定し、出力モジュールはインターロック信号を出力する。ハドロンホール使用した PLC モジュールの画像を図 2 に、モジュールの型番を表 1 に示す。

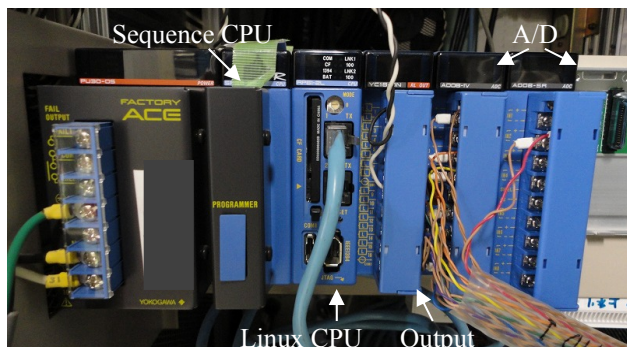


Figure 2: Photograph of the PLC at Hadron experimental hall.

Table 1: PLC modules

Sequence CPU	F3SP58-6S
Linux CPU	F3RP61-2L
A/D	F3AD08-1V
Output	F3YC16-0N

### 2.3 対象となる電源

今回対象となる電源は四重極電磁石 21 台、ビームを水平・垂直方向に偏向する H03AB、H05、V06AB、V14、T1 ターゲット付近の BS1、BS2 の 6 台、合計 27 台である。これらの電源はビーム運転時ほとんど設定電流値を変更しない。特に偏向電磁石の電流値が不意に変動することによりビーム軌道に大きな影響を与えるため対象となった。ステアリング電磁石は運転電流値が定格より低く、またビーム軌道の調整により頻繁に電流値を変更させるため、このシステムには組み込まれていない。

## 3. 電流測定

### 3.1 測定方法

今回は PLC の A/D モジュールを使用し、電源内部の DCCT により得られた電源の電流値を測定した。A/D モジュールの仕様は変換周期が  $1\text{ms} \times (\text{入力点数})$  で最大の入力点数は 8 点のため、 $10\text{ms}$  で全チャンネルの測定を行った。生信号ではノイズが大きく、またこのモジュールには移動平均フィルタを搭載していないため、全チャンネルに  $10\text{ms}$  周期、100 点の移動平均値を算出するラダーを作成した。

使用した電源はサイリスタ型直流電源で、出力可能な定格電力は  $135\text{kW}$  ( $90\text{V}$ - $1500\text{A}$ ) である。

測定した電流波形を図 3 に示す。設定電流値は  $1000\text{A}$  であった。赤色は電流の生信号、緑色は移動平

均化した信号の波形である。電流の平均値は共に  $998.8\text{A}$  であったが、RMS は生信号が 22.3、移動平均後が 9.2 と  $1/2$  以下になった。ノイズの低減が見られたため、対象となった全電源の電流値に移動平均化するラダーを適用した。しかし偏向電磁石の電源は急激な電流値の変動によりビーム軌道に多大な影響を与えるため、即応性を考慮に入れ生信号も測定し、しきい値も設けている。

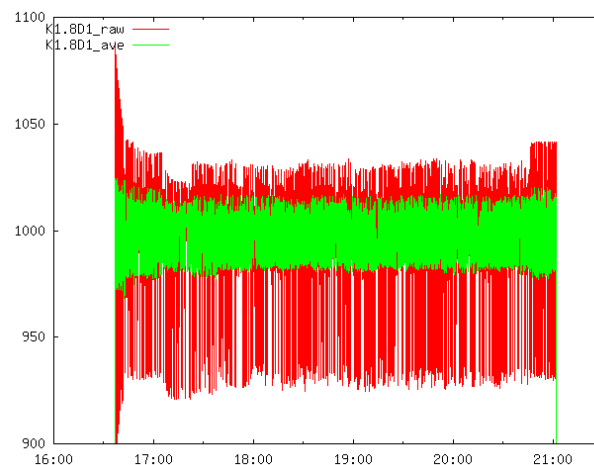


Figure 3: Trend graph of raw and average current values.

### 3.2 移動平均フィルタ

電流値の測定を行い、3.1 で示した移動平均を適用したが、スイッチヤードからハドロンホールに行くしたがってノイズが大きくなった。

そこで A/D モジュールを F3AD08-5R と交換し付属の移動平均フィルタを使用し、交換前後の電流値やヒストグラムを確認した。このフィルタの変換周期は  $20\text{ms}$ 、平均化数は 32 個に設定した。電流設定値は  $1080\text{A}$  であった。また使用した電源 3.1 で用いた物と同じである。

ラダーで自作した移動平均化した電流値の波形を図 4、付属の移動平均フィルタの波形を図 5 に示す。

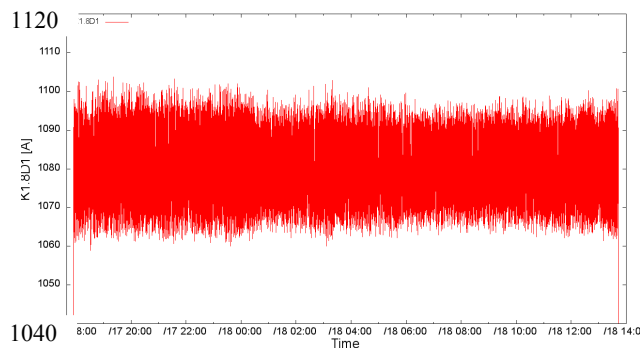


Figure 4: Trend graph of current value without accessory moving-average filtering.

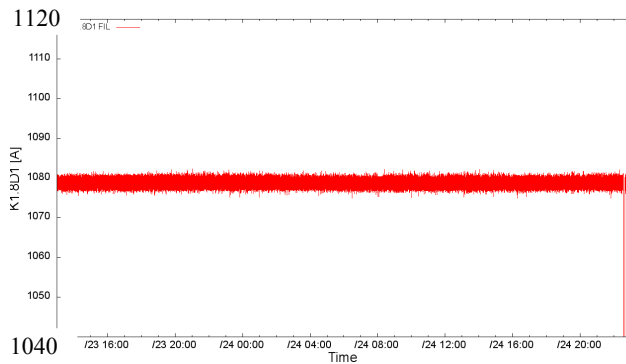


Figure 5: Trend graph of current value with accessory moving-average filtering.

ラダーで自作した移動平均化した電流値のヒストグラムを図 6、フィルタを設定した電流値のヒストグラムを図 7 に示す。

波形とそのヒストグラムから中心値はそれぞれフィルタなしで 1080[A]、ありで 1079[A]になったが、RMS はラダーの移動平均が 6.66 で、フィルタは 0.6947 でフィルタを使用することにより RMS が約 1/10 に低減された。フィルタでは変換周期を 20ms に設定したため、600Hz の電流リップル成分が解消されたと思われる。

上記よりノイズが解消することが確認できたため、移動平均フィルタ付属の A/D モジュールや 20ms 周期の自作のラダーにノイズが高いユニットから順次変更する予定である。

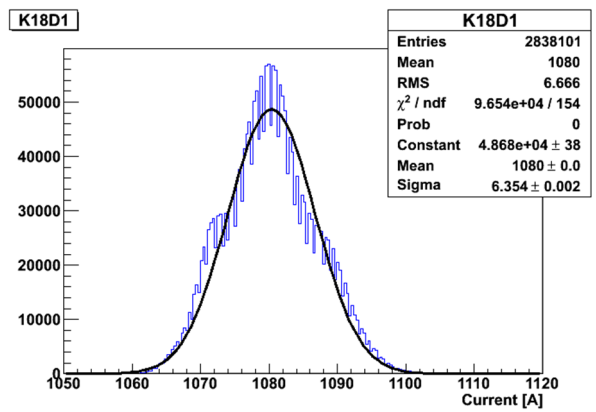


Figure 6: Histogram of current value without accessory moving-average filter.

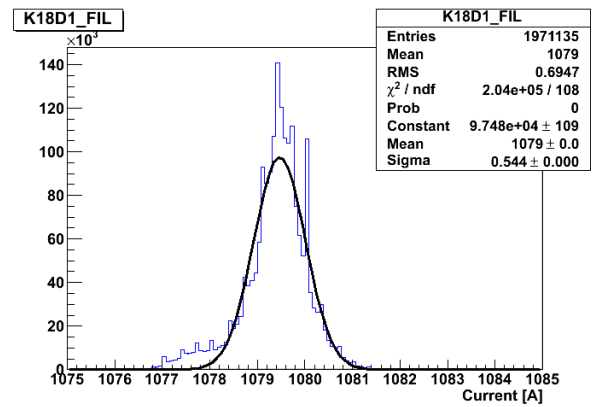


Figure 7: Histogram of current value with accessory moving-average filter.

#### 4. まとめ

J-PARC ハドロン実験施設で電磁石用直流電源の電流監視システムを構築した結果、以下の事がわかった。

- 電流監視システムは四重極電磁石 21 台、偏向電磁石 6 台、合計 27 台の電源電流を監視している。
- 電流値に 2 段階のしきい値を設定し、1 段階目では警報音が鳴り、2 段階目ではビーム運転が自動的かつ安全に停止する
- PLC のラダーで移動平均値を算出することにより、生信号に比べ 1/2 以下にノイズを低減させることができた。
- A/D モジュールを交換し、付属の移動平均フィルタを適用することにより、さらにノイズを約 1/10 に低減できることがわかった。
- PLC を用い電流監視システムが構築した結果、電源の電流値に急激な変動が発生した場合、加速器運転が自動的に安全に停止できるようになった。

#### 参考文献

- [1] K. Agari *et al.*, "Secondary charged beam lines at the J-PARC hadron experimental hall", Progress of Theoretical and Experimental Physics (PTEP), 2012.
- [2] H. Takahashi *et al.*, "Indirectly water-cooled production target at J-PARC hadron facility", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, September 2015, Volume 305, Issue 3, pp 803-809.
- [3] K. Agari *et al.*, "Development and Construction of The Beam Dump for J-PARC Hadron Hall", Proceedings of the 2nd International Particle Accelerator Conference (IPAC), San Sebastian, Spain, Sep. 4-9, 2011, pp 1608-1610.
- [4] EPICS Device and Driver Support for Yokogawa's F3RP61 website; <http://www-linac.kek.jp/cont/epics/f3rp61/>