

# THE RESEARCH ON THE SPILL FEEDBACK Control FOR J-PARC

Takuro Kimura <sup>#,A)</sup>, Shigeru Murasugi <sup>A)</sup>, Ryotaro Muto <sup>A)</sup>, Hidetoshi Nakagawa <sup>A)</sup>, Katsuya Okamura <sup>A)</sup>,  
Yoshihisa Shirakabe <sup>A)</sup>, Masahito Tomizawa <sup>A)</sup>, Eiichi Yanaoka <sup>A)</sup>, Akio Kiyomichi <sup>B)</sup>, Hikaru Sato <sup>C)</sup>,  
Tetsushi Simogawa <sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

<sup>B)</sup> SPring-8/JASRI

1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

<sup>C)</sup> Tsukuba University of Technology

4-3-15, Amakubo, Tsukuba City, Ibaraki 305-8520

<sup>D)</sup> Saga University

1 Honjo-machi, Saga, 840-8502

## Abstract

The slow extraction beam from J-PARC Main Ring (MR) to Hadron Experimental Facility (HD-hall) is used for various experiments of nuclear and particle physics. The uniform structure and low ripple noise are necessary for the spills of the slow extraction.

The spill control system has been developed to make a uniform structure and small ripple. It consists of the extraction quadrupole magnets and feedback device. The extraction magnet consists of two kinds of quadrupole magnets, EQ which make uniform beam and RQ which reject the high frequent ripple noise. The feedback system, which is using Digital Signal Processor (DSP), makes a control pattern for EQ and RQ from spill beam monitor.

The new RQ power supply installed in January 2012, and spill feedback study has been successfully started from the beam time in February 2012. Here we report the operation status of magnets and latest study of beam commissioning with spill feedback system.

## J-PARCにおけるスピルフィードバック制御に関する研究

### 1. はじめに

J-PARCのメインリング(MR)で加速された陽子ビームを用いることで、ニュートリノ実験及びハドロン実験が行われている。中でも遅い取り出しビームはハドロン実験施設に供給され、原子核や素粒子の様々な物理実験に利用される<sup>[1]</sup>。

物理量の計測を正確に行うためには、取り出しビームの時間構造を表すスピルが時間的に一様で安定であることが事件側から求められている。そこでスピルフィードバック制御を用いることにより一様で安定な取り出しビームをHD-Hallへ供給することを試みている。スピルフィードバックシステムは2種類のスピル制御用4極電磁石とフィードバックデバイスから成る。

2009年1月に行われた、最初の遅い取り出しの実験で30GeVの陽子ビームをHD-Hallのターゲットへとビームを供給することに成功した。スピルフィードバックシステムは2009年9月に導入され、2012年6月には6kWの30GeVの陽子ビームを利用運転としてHD-Hallへ供給することに成功した。

### 2. スピル制御

J-PARC MRでの遅い取り出しは $Q_x=22.333$ の3次共鳴を利用している。MRの加速の後に、ビームは約2.6秒のフラットトップの区間で、ベータatron振動にメイン4極電磁石を用いて共鳴を励起することで、振幅を増大させてビームの取り出しを行う。

しかし、1次関数のような直線的なチューン変化によって遅い取り出しを行った場合ビームのスピル構造は図1の左上に示すように山なりの形状になってしまう。このような山なりの形状では、物理実験を行う際に、データ収集の時間効率が著しく低下してしまう。

そこでデータ収集の時間効率の良い平坦なスピル構造を作るために、スピルの観測データをもとに、後述するEQ電磁石をフィードバック制御することで共鳴に近づく速度を制御し、一方でスピル構造に存在する電力系を起源とするリップルをRQ電磁石を用いることで相殺することでより平坦なスピル構造に補正する<sup>[2]</sup>。EQとRQによるスピル制御の概略を図1に示す。

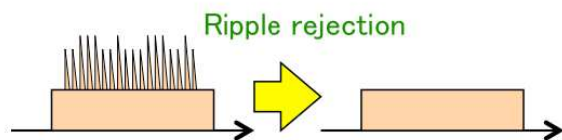
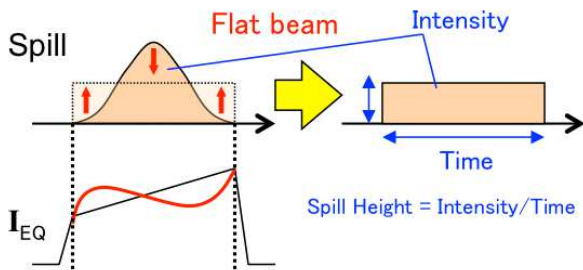


図 1 : EQ,RQ によるスピル制御

### 3. スピル制御用電磁石と電源

フラットトップでスピル制御用 4 極電磁石を使用することで、チューンの微調整を行い、スピル構造を制御することが可能となる。メインの 4 極電磁石を補助するように、スピル制御用 4 極電磁石を用いることでスピル制御を行う。スピル制御用電磁石は 2 台の EQ と 1 台の RQ で構成される。それらは 2009 年 9 月にインストールを行った。図 2 で EQ と RQ の写真を示す。

2 台の EQ はスピルのマクロな構造の平坦化を担う 4 極電磁石である。スピル成形に必要なスペックとして、磁場勾配は 2.60T/m、高速な応答性を得るために渦電流を極力減らすよう鉄芯材料は 0.1mm の薄い積層鋼板を用いて数百 Hz のリップル除去も行うよう設計している。RQ は高い周波数のリップル成分を相殺するための 4 極電磁石である。ビーム成形は行わずリップル除去のみを目的とする。磁場勾配は 0.94T/m 程度で、時間応答の速さを重視した設計を行っている。EQ と RQ の仕様を表 1 に示す。またスピル制御を行う EQ 電源は出力電流-5A~340A、出力電圧-260V~260V、制御方式は電流制御とスピルのマクロな構造を補正するため、ゆっくりとした時間応答に対応した仕様になっている。RQ 電源は出力電流 175Arms、出力電圧 180Vrms、周波数帯域 10Hz~10kHz、制御方式は電流制御とリップル除去のみを目的とする時間応答の速さを重視した仕様になっている。しかし、上記の RQ 電源のスペックでは出力電圧の限界からリップルの高周波成分を相殺するために十分な性能を確保できていなかった、そこで 2012 年 1 月に出力電圧の性能を向上させた新 RQ 電源を開発した。制御方式を電流制御から電圧制御に切り替えることにより出力電圧の性能向上を図った結果、新 RQ 電源は出力電流 75Arms、出力電圧 400Vrms、周波数帯域 40Hz~10kHz となっている。この新 RQ 電源の導入によりスピル構造のさらなる改善がみられたことは後述する。

表 1 : EQ 及び RQ スペック

	EQ	RQ
Core Material	0.1mm thick lamination steel	
Bore Radius	80mm	80mm
Magnet Length	0.62m	0.62m
Coil Turn Number	22	6
Field Gradient	2.60T/m@301A	0.94T/m@400A
Inductance	8.8mH	0.65mH
Resistance	80.3mΩ	11.25mΩ

表 2 : EQ, RQ 及び新 RQ 電源定格及び性能

	EQ 電源	RQ 電源	新 RQ 電源
出力電圧	-260V~260V	180Vrms	400Vrms
出力電流	-5A~340A	175Arms	75Arms
周波数帯域	—	10Hz~10kHz	40Hz~10kHz
制御方式	電流制御	電流制御	電圧制御

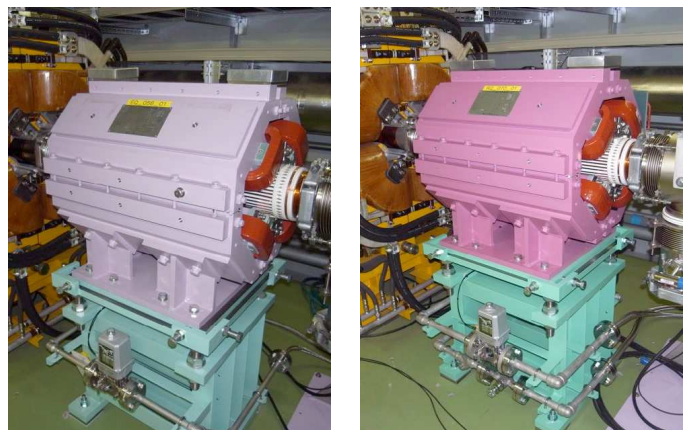


図 2 : EQ1 及び RQ (左 : EQ, 右 : RQ)

### 4. フィードバック装置

フィードバック装置は EQ と RQ 電磁石の励磁電流パターンを制御を行うものである。フィードバック装置は 2 台の DSP チップ、その 2 台の DSP 間のデータ転送を行うデュアルポートメモリ、Ethernet 用 CPU として使用される SUZAKU-V410、ゲート信号入力、ビームインテンシティー信号入力、スピル信号用アナログ入力及びデジタル入力 2 台の EQ 電磁石及び RQ 電磁石制御信号出力用アナログ出力及びデジタル出力、データ出力を管理し並列処理を行うための FPGA で構成される。図 3 は DSP フィードバック装置を示す。2 台の DSP はそれぞれスピルフィードバック演算とパワースペクトル解析を担う。入力信号はスピルゲート、ビーム強度、及びスピル信号からなる。EQ フィードバックループにおいて、スピル信号を用いて取り出し量が調整される。数 kHz までの高周波リップルに関しては、RQ フィードバックループで、逆位相信号によって相殺される。図 4、5 はフィードバック装置の信号処理及びフィードバック制御のアルゴリズムを示す。

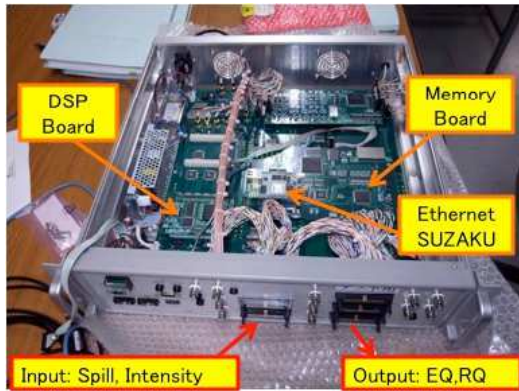


図 3 : DSP を使用したフィードバック装置

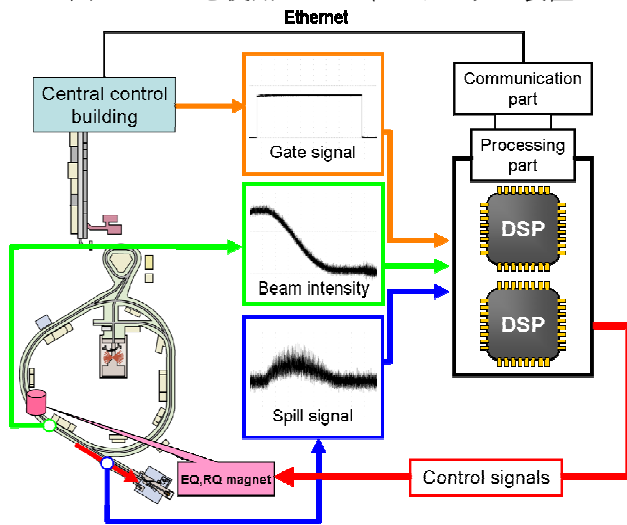


図 4 : フィードバックシステムの構成

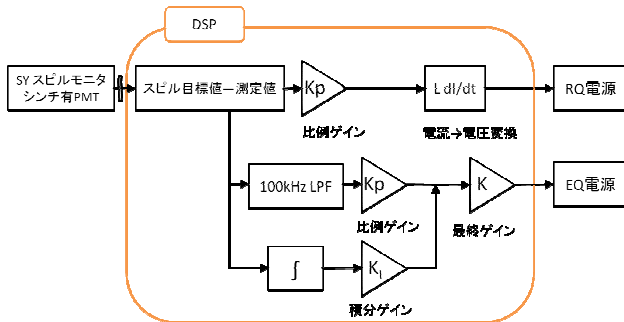


図 5 : フィードバック制御アルゴリズム

## 5. ビームコミッションング

遅い取り出しは加速終了後の 2.63 秒のフラットトップを用いて 1.5~2.0 秒間の取り出し時間で行われる。

ビームスピル観測はプラスチックシンチレータ付きの光電子増倍管を遅い取り出しのビームラインに設置することで行われている。ビームの取り出しの形状はフィードバック制御を用いない場合は山なりの形状となる。スピルフィードバック制御を用い

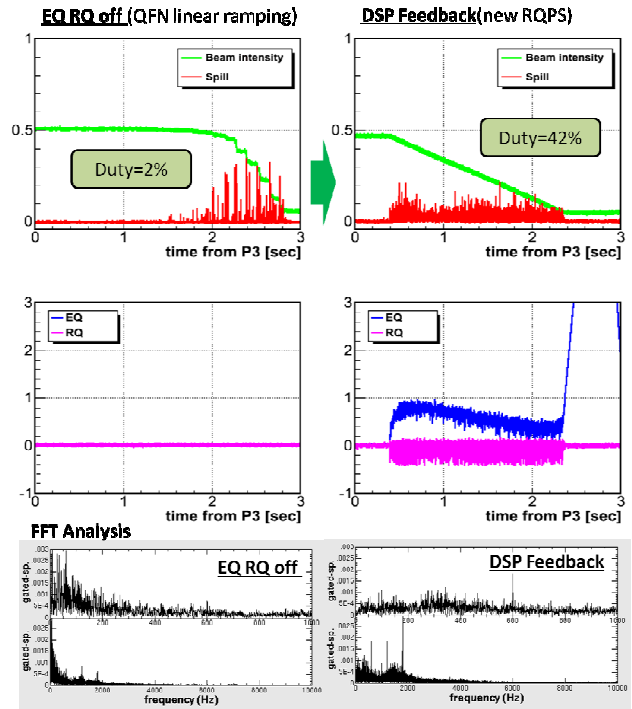


図 6 : ビームスピル構造及び FFT 演算結果

ることでスピル形状を改善することに成功した。

しかし MR の B 及び Q 電磁石電源（主電磁石電源）に由来する大きなリップルは取り出し時にも存在する。これはスピルに大きなスパイク状の構造を持たせてしまい、物理実験の効率を悪くしてしまう。

スピルの形状がどれだけ理想的になっているか評価するために、スピルの Duty Factor として以下を採用する

$$Duty Factor = \frac{\left[ \int_0^T I(t) dt \right]^2}{\int_0^T dt \cdot \int_0^T I^2(t) dt}$$

ここで、 $I(t)$  はスピルのビーム強度、 $T$  は取り出し時間を表す。スピルが理想とする一様な矩形になったとき 100% となる。

ビームスピルの観測はプラスチックシンチレータ付きの光電子増倍管を遅い取り出しのビームラインに設置することで行われている。ビームの取り出しの形状はフィードバック制御を行わない場合 Duty Factor は 2% 程度である。スピルフィードバック制御及び Transverse RF<sup>[3]</sup> の導入を行うと Duty Factor は 26% 程度に改善される。さらに 2012 年 2 月に試験的に導入された新 RQ 電源を用いると Duty Factor は 42% までに改善された。しかし、電源の安定性などの問題により利用運転での運用はできなかった。同年 6 月、安定性を向上し、利用運転での運用を行ったが Duty Factor は 31% 程度に留まっており、試験運用時の Duty Factor を再現できておらず、原因を調査中である。

新 RQ 電源を用いてフィードバック制御を行った場合と行わない場合のビームスピル及びその FFT スペクトルを図 6 に示す。

また、これまでに行われたビームコミッショニングにより EQ ではビームのマクロな構造の成形と 50Hz を中心とした低周波のリップル除去する RQ の補助的役割を行い、RQ で 600Hz を中心とした高周波のリップル除去を行うことが効果的である事が確認された。それらビームスピル改善の経緯を表 3 に示す。

## 6. おわりに

J-PARC の遅い取り出しのスピル制御に、EQ、RQ のフィードバック制御アルゴリズムを用いることでビームコミッショニングに取り出しビームのスピル構造の改善に成功した。

しかし、取り出しビームのスピル構造の改善はまだまだ十分とはいえない、今後 RQ 電源のさらなる性能向上や取り出しビームのスピル構造と主電磁石電源に起因するリップルの関係性を調査し、効果的な対策をみだすことにより Duty Factor のさらなる改善を目指す。

## 参考文献

- [1] M. Tomizawa, "Approach for High Intensity Slow Extraction from J-PARC Main Ring", These Proceedings.
- [2] A. Kiyomichi, et al, "Beam Spill Control for the J-PARC Slow Extraction"Proc. of International Particle Accelerator Conference (IPAC'10), Kyoto, Japan, May 2010
- [3] A. Schnase, et al, "Simulation of narrow-band longitudinal noise applied to J-PARC Main Ring", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010

表 3 : ビームスピル改善の歩み

スピル改善手法	備考	Duty
FB 制御なし	マクロな形状は山なり 50Hz や 600Hz を中心としたリップルがある	2%
初期の スピル FB 制御 (2010 年 1 月)	マクロな形状は 平坦な矩形に近づく 50Hz や 600Hz を中心としたリップルの影響あり	6%
スピル FB 制御 アルゴリズムの 追加開発 (2010 年 1~11 月)	マクロな形状は より平坦な矩形 Duty は大きく改善した	17%
スピル FB 制御 + Transverse RF (2012 年 1~2 月)	震災前の状況の再現 Transverse RF を 併用した利用運転が可能	26%
スピル FB 制御 (新 RQ 電源) + Transverse RF (2012 年 2 月)	Duty はさらに大きく改善 新 RQ 電源での 利用運転はできなかった	42%
スピル FB 制御 (新 RQ 電源) + Transverse RF (2012 年 6 月)	新 RQ 電源の安定化 同年 2 月の最高 Duty の 再現はできなかった	31%