

SPILL FEEDBACK CONTROL FOR THE J-PARC SLOW EXTRACTION

Takuro Kimura ^{#,A)}, Koichi Mochiki ^{B)}, Shinya Onuma ^{B)}, Toshikazu Adachi ^{C)}, Atsuyoshi Akiyama ^{C)}, Shigeru Murasugi ^{C)}, Ryotaro Muto ^{C)}, Hidetoshi Nakagawa ^{C)}, Jun-ichi Odagiri ^{C)}, Katsuya Okamura ^{C)}, Yoshinori Sato ^{C)}, Shinya Sawada ^{C)}, Yoshihisa Shirakabe ^{C)}, Hirohiko Someya ^{C)}, Kazuhiro Tanaka ^{C)}, Masahito Tomizawa ^{C)}, Akihisa Toyoda ^{C)}, Akio Kiyomichi ^{D)}, Hikaru Sato ^{E)}, Koji Noda ^{F)}

^{A)} University of Miyazaki

1-1, Gakuen Kibanadai-nishi, Miyazaki-shi, 889-2192

^{B)} Tokyo City University

1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo 158-8557

^{C)} KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

^{D)} SPring-8/JASRI

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

^{E)} Tsukuba University of Technology

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

^{F)} NIRS

4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8555

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 extraction magnets and feedback device were installed in September 2009, and spill feedback study has been successfully started from the beam time in October 2009. Here we report the operation status of magnets and latest study of beam commissioning with spill feedback system.

J-PARC 遅い取り出しにおけるスピルフィードバック制御

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^[1]。

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であるスピルが時間的に一様で安定であることが求められる。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。スピルフィードバックシステムはスピル制御用 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、2009 年 10 月から 2010 年 2 月まで行われた 30GeV のスピル制御実験で 1~2kW のビームの取り出しを行った。

2. スピル制御

物理実験を行う際、瞬間的にあまりに多くの粒子がやってきてしまうと、観測装置が飽和してしまい、個々の事象が区別できなくなることや、データ収集システムが測定したデータを保存する時間が確保できず、収集効率が著しく下がる。

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

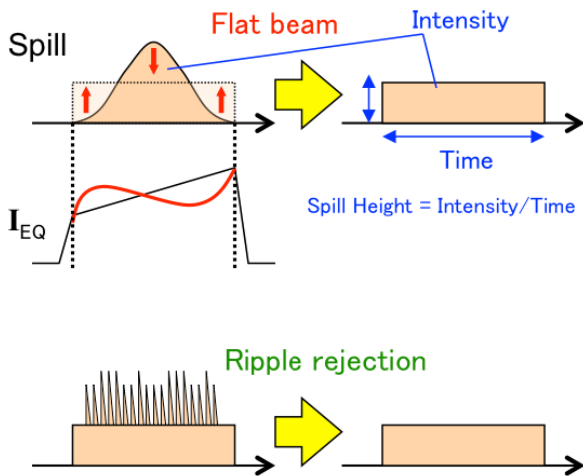


図1：EQ,RQによるスピル制御

ることで、振幅を増大させてビームの取り出しを行う。

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山なりになる。平坦なスピル構造を作るために、我々は、スピルの観測データをもとにEQ電磁石のフィードバック制御を用い、共鳴に近づく速度を制御する。一方で、スピル構造には電力系を起源とするリップルが存在する。我々はRQ電磁石を用いることでリップルの相殺を行う^[2]。EQとRQによるスピル制御の概略を図1に示す。

3. スピル制御用電磁石

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。我々はメインの4極電磁石を補助するように、スピル制御用4極電磁石を用いたスピル制御を行う。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はビームの平坦化を担う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えるよう設計している。RQは1kHz以上の高い周波数のリップル

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

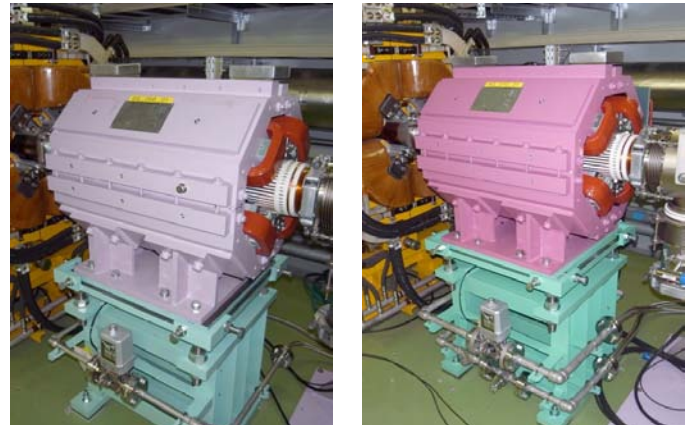


図2：EQ1及びRQ電磁石（左：EQ、右：RQ）

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、応答時間の速さを重視した設計を行っている^[3]。EQとRQの仕様を表1に示す。

EQとRQ磁石の性能はビームコミッションングで行われたチューン測定によってテストを行った。EQ磁石はフラットトップでDCまたは正弦波パターンで動作させ、チューン測定を行い、チューンシフトの値がデザインによく一致していることを確認した。また、RQは正弦波パターンでテストを行い、チューン測定可能な500Hzまでの追従性を確認した。

4. フィードバック装置

フィードバック装置^[4]はEQとRQ電磁石の励磁電流パターンの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

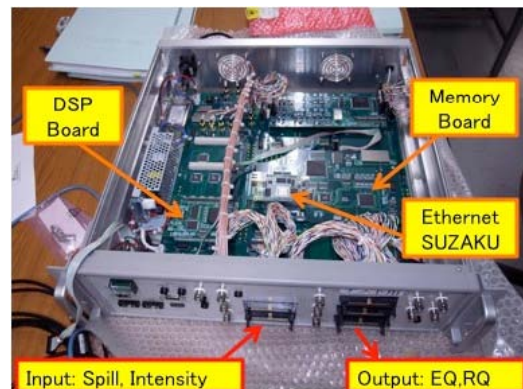


図3：DSPを使用したフィードバック装置

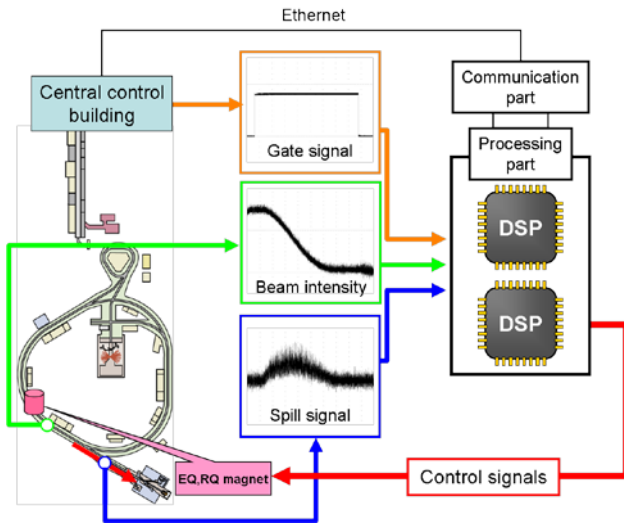


図4：フィードバックシステムの構成

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はフィードバック装置の信号処理を示す。

5. ビームコミッショニング

スピルフィードバックシステムは 2009 年 10 月から導入された。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。

同年 11 月より行われたスピルフィードバックシステムの試験は順調に始められた。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倍增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

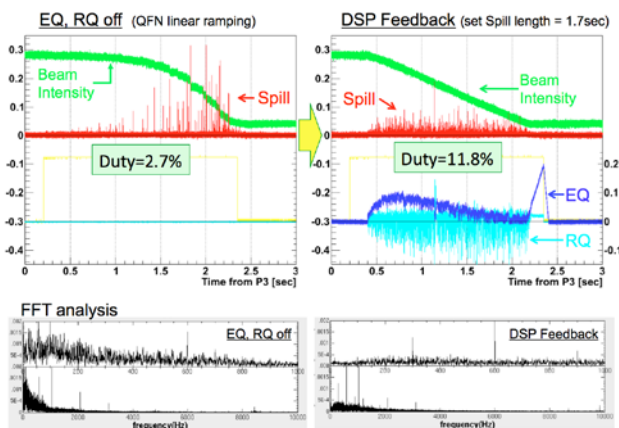


図5：ビームスピル構造及びFFT演算結果

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ることで平坦なスピル形状にすることに成功した。MR の B 及び Q 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 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、 $I(t)$ はスピルインテシティー、 T は取り出し時間を表す。フィードバック制御を行わない場合 Duty Factor は 2~3% である。フィードバック制御を用いると 11~12% に改善される。フィードバック制御において EQ はただスピル構造を平坦にするだけでなく、低周波のリップル除去の補助を行っている。フィードバック制御を行わない場合と行った場合のビームスピル及びその FFT スペクトルを図5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導入した。ビームコミッショニングにおいてスピルフィードバック制御は、うまく動作し、ビームスピル構造の改善に成功した。

また、秋からのビーム試験では、スピル構造を変化させる transverse RF^[5]の導入やフィードバックアルゴリズムの改良で Duty Factor のさらなる改善を目指す。

参考文献

- [1] M. Tomizawa, et al, "Beam Commissioning of J-PARC Slow Extraction", 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. Kiyomichi, et al, "Development of Spill Control System for the J-PARC Slow Extraction (II)" Proc. Particle Accelerator Society Meeting 2009, Tokai, Japan, August 2009
- [4] S. Onuma, et al, "The Spill Feedback Control Unit for the J-PARC Slow Extraction", These Proceedings
- [5] A. Schnase, et al, "Simulation of narrow-band longitudinal noise applied to J-PARC Main Ring", These Proceedings