

Development of Spill Control System for the J-PARC Slow Extraction (II)

Akio Kiyomichi^{1A)}, Toshikazu Adachi^{A)}, Koh-ichi Mochiki^{B)}, Shigeru Murasugi^{A)}, Ryotaro Muto^{A)},
 Hidetoshi Nakagawa^{A)}, Koji Noda^{D)}, Junichi Odagiri^{A)}, Katsuya Okamura^{A)}, Shinya Onuma^{B)},
 Hikaru Sato^{C)}, Yoshinori Sato^{A)}, Shinya Sawada^{A)}, Yoshihisa Shirakabe^{A)}, Hirohiko Someya^{A)},
 Kazuhiro Tanaka^{A)}, Masahito Tomizawa^{A)}, Akihisa Toyoda^{A)}, Eiichi Yanaoka^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} Tokyo City University

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

^{C)} Tsukuba University of Technology

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

^{D)} National Institute of Radiological Science

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

Abstract

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) is a new accelerator facility to produce MW-class high power proton beams at both 3GeV and 50GeV. The Main Ring (MR) of J-PARC can extract beams to the neutrino beam line and the slow extraction beam line for Hadron Experimental Facility. The slow extraction beam is used in various nuclear and particle physics experiments. A flat structure and low ripple noise are required for the spills of the slow extraction.

We are developing the spill control system for the slow extraction beam. The spill control system consists of the extraction quadrupole magnets and feedback control device. Here we report their construction status.

J-PARC遅い取り出しビームにおけるスピル制御システムの開発 (2)

1. はじめに

J-PARCのハドロン実験施設ではMRリングからの遅い取り出しビームを利用し原子核物理や素粒子物理の実験が行われる。取り出しビームの時間構造であるスピルを平滑化するために、スピル制御用四極電磁石とフィードバック制御装置で構成するスピル制御システムを開発している。

2. スピル制御

物理のカウンター実験では、瞬間的な大量ビームを受けると、多重ヒットによる不感時間を引き起こしデータ収集効率が著しく下がる。効率の良い実験のために平坦で安定したスピル構造のビームが求められている。

J-PARC MRの遅い取り出しでは3次共鳴を利用して、約1秒かけてゆっくりビームを取り出す¹⁾。取り出し時のチューン変化を一定にした場合、取り出されたビームのスピル波形はベータトロン振動振幅のばらつきを反映したガウス分布に近い形となる。

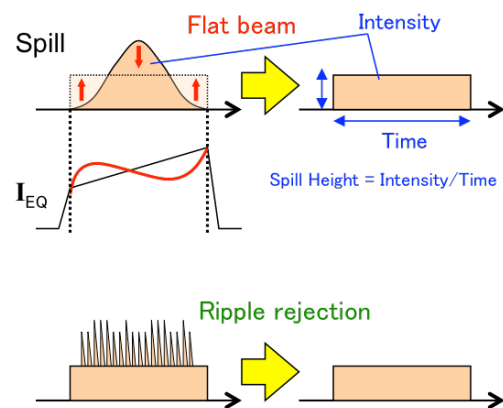


図1 スピル制御によるビームの時間構造調整

また、リングの磁場には電力系を起源とするリップルが存在するため、スピル波形には数百Hzから数kHzの高周波構造が乗る。マクロな時間構造の成形(図1上)および高周波成分の除去(図1下)を行うために、スピル制御用4極電磁石とその励磁パターンを与えるフィードバック制御装置を開発した。

¹⁾ E-mail: akio.kiyomichi@kek.jp

3. スピル制御用4極電磁石

取り出し時のチューン変化に対して、その強弱を調整することによりスピルの制御を行う。フィードバックによる微調整を行うために、取り出し用4極電磁石(Extraction Q Magnet: EQ) 2台と高速リップル除去用4極電磁石(Ripple Q Magnet: RQ) 1台からなるスピル制御用4極電磁石を製作した。

EQ磁石はスピルのマクロ成分の平坦化を担う4極電磁石である。RQ磁石はリップル除去に特化した4極電磁石であり、特に数百Hz以上の高い周波数成分の除去を担う。表1にEQ、RQの基本パラメータを示す。EQ、RQ共に、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た。また、磁極間隙間にいる真空ダクトはセラミックダクトを使用する。RQではさらなる渦電流損の低減のために、鉄心の両端にスリット加工を追加し、コイルは互いに絶縁したホローコンダクタを2本並列にして転位させながら巻いた。

	EQ	RQ
鉄心材料	ST-100 0.1mm	
ボア半径	80mm	
コア軸長	0.62 m	0.62 m
コイルターン数	22	6
最大磁場勾配	2.60 T/m @301A max	0.94T/m @400Amax
インダクタンス	8.8 mH	0.65mH
抵抗 (22°C)	80.3 mΩ	11.25 mΩ

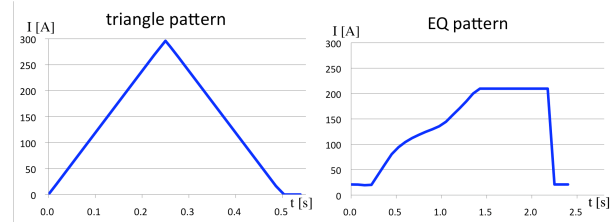
表1 EQ、RQ の基本パラメータ



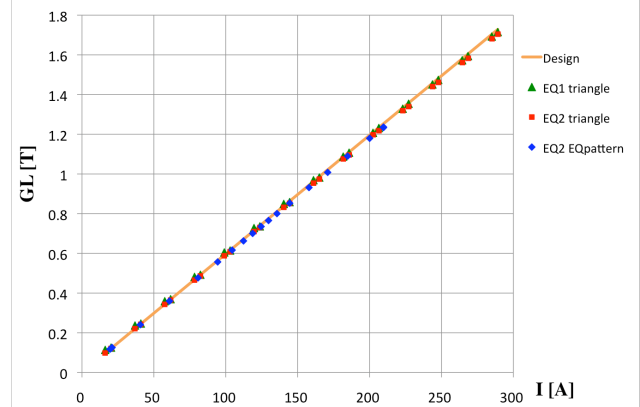
図2 RQ磁石の外観と転移型コイル

EQ磁石2台とEQ電源は2008年度に完成し、磁場測定などの性能試験を進めている。RQ磁石およびRQ電源は今年度の製作で、RQ磁石は7月末に完成した(図2)。RQ電源は9月に完成する。

EQ磁石はハーモニックコイル^[2]を用いて、磁場測定を行った。2種類の入力パターンに対する電流依存性を測定し、入力電流に対して良い線形性を確認した(図3)。



a) Input current (triangle pattern and typical EQ pattern)



b) x-axis: Input current [A], y-axis: Field Gradient [T]
Point: measured values, Line: design values

図3 EQ磁石の磁場測定

4. フィードバックシステム

スピルフィードバック制御装置はEQおよびRQの励磁パターンを与えるもので、DSPを用いたデジタルフィードバックによる制御システムとして開発を進めている^[3,4]。

入力信号は取り出し時間を決めるゲート信号、リングに設置したDCCTから得られるビーム強度信号、取り出し直後に設置したスピルモニタからのスピル信号からなる。スピル信号は遅い取り出しビームラインの加速器側とハドロンホール側を仕切る真空遮蔽膜からの散乱粒子をロスモニタで計測して作る。取り出し直前の周回ビーム強度と取り出し時間から理想のスピル強度を求め、それが維持できるようにEQにフィードバックをかけてスピルの平坦化を行う。数百Hz~数千Hzといった高い周波数成分に対しては、その逆位相の信号をRQに与えてリップル除去を行う。図4にスピルフィードバックのシステム構成図を示す。

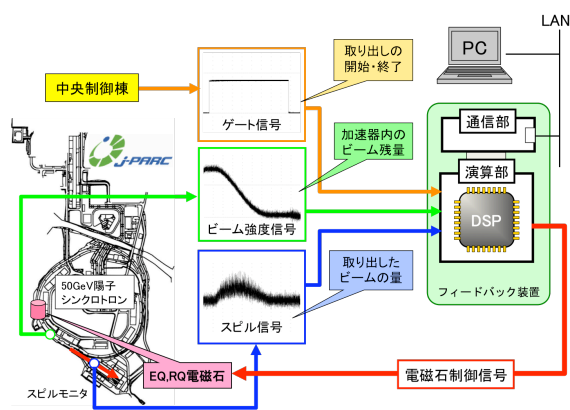


図4 スピルフィードバックシステムの構成

スピルフィードバック制御装置の心臓部であるDSPボードは高速32ビット浮動小数点演算DSPを搭載したTI社のTMS320C6713を採用した。このチップを搭載したDSPキットをベースにし開発機による試験を重ね、実運用用の専用基板を設計・製作した。図5に完成したスピルフィードバック制御装置を示す。基板は2つのDSPボード・デュアルポートメモリ・LANボードからなり、FPGAを介して接続している。入出力は16ビットTTL信号でKEK-VMEと接続し、KEK-VMEのGP-IOボードにてAD変換・光転送を行う¹⁾。

2つのDSPはそれぞれフィードバック演算と周波数解析を担う。デュアルポートメモリは2つのDSPおよびLANボードと接続し、波形データの共有やパラメータ変更を行う。当初は1つのDSPでフィードバック演算のみを行うが、将来の開発要素として、2つ目のDSPで波形の逐次周波数解析を行いパラメータ選択の自動化を図る予定である。

LANボードはEthernetと組み込みLinuxを搭載した小型CPUボードであるSUZAKUを採用した。J-PARCの制御システムのベースであるEPICSによる遠隔操作を行うよう開発を進めている。

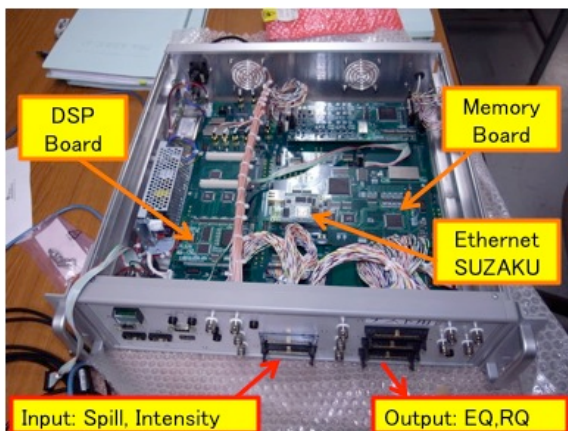


図5 スピルフィードバック制御装置

5. ビームテスト

スピルフィードバック制御装置の検証を行うため、J-PARCと同じ3次共鳴の遅い取り出しビームを有する放射線医学総合研究所の重粒子がん治療用加速器HIMACにおいてビームテストを実施した。

取り出し時のチューン変化を一定とし、フィードバックをオフの場合とオンにした場合でスピルの計測を行った。EQアルゴリズムのフィードバックによりスピルの平坦化に成功した(図6左)。HIMACにはRQ磁石が無いため、完全なリップル除去は難しい。そこで特定の周波数のRQ信号に対する変化をFFTアナライザにより確認した。RQアルゴリズムによるフィードバックとしてリップルの主成分である600Hzの除去信号を入力し、その減少効果を確認できた(図6右)。

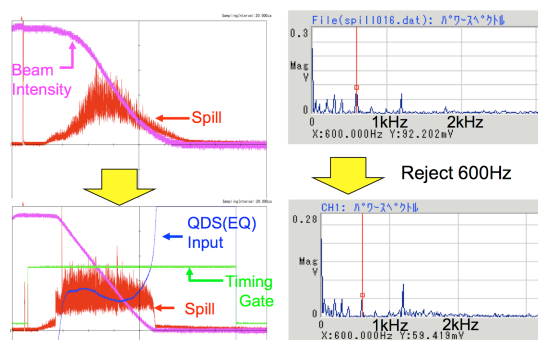


図6 HIMACでのスピル制御テスト結果

6. まとめ

J-PARCの遅い取り出しビームのスピル制御のために、スピル制御用4極電磁石(EQ, RQ)とフィードバック制御装置を開発した。機器の検証を重ね、今夏にインストールを行う。2009年秋以降の遅い取り出しランよりスピル制御運転を実施する。

参考文献

- [1] M. Tomizawa, et al, "Slow Extraction from J-PARC Main Ring", These proceedings.
- [2] T. Adachi, et al, "Dynamic Field Measurement using a Harmonic Coil", Proc. of the 3rd Annual Meeting of PASJ, Sendai, August, 2006, 630-632
- [3] T. Ichikawa, et al, "Study of spill feedback using DSP for the J-PARC slow extraction", Proc. of the 5th Annual Meeting of PASJ, Higashihiroshima, Aug. 2008, 328-330
- [4] A. Kiyomichi, et al, "Development of spill control system for the J-PARC slow extraction", Proc. of the 5th Annual Meeting of PASJ, Higashihiroshima, Aug. 2008, 331-333. Proc. of Particle Accelerator Conference (PAC09), Vancouver, May 2009.