

## Development of spill control system for the J-PARC slow extraction

Akio Kiyomichi<sup>1A)</sup>, Hidetoshi Nakagawa<sup>A)</sup>, Masahito Tomizawa<sup>A)</sup>, Toshikazu Adachi<sup>A)</sup>, Hirohiko Someya<sup>A)</sup>,  
Ryotaro Muto<sup>A)</sup>, Takeshi Ichikawa<sup>B)</sup>, Koh-ichi Mochiki<sup>B)</sup>, Hikaru Sato<sup>C)</sup>, Koji Noda<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

<sup>B)</sup> Musashi Institute of Technology

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

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

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

<sup>D)</sup> 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. Here we report the construction status of the spill control magnets and the development of the feedback system using Digital Signal Processor (DSP).

## 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

### 1. はじめに

J-PARCのメインリング(MR)では加速された陽子ビームを用いてハドロン実験及びニュートリノ実験が行われる。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。取り出しビームの時間構造をスピルと呼ぶが、特に実験側からはスピル波形が平坦で安定するよう求められている。安定したスピル波形の遅い取り出しビームを供給することを目的にスピル制御システムの開発を行っている。

### 2. スピル制御

J-PARC MRの遅い取り出しでは3次共鳴を利用した方法を採用している。3次共鳴の取り出しでは、6極電磁石の励磁により共鳴を励起してチューン( $\nu$ )を3次共鳴点(整数 $\pm 1/3$ 、J-PARCでは $\nu = 22.333$ )に近づける。これにより安定限界をこえた粒子は、ベータトロン振動の振幅が増大してリング外に取り出される。そして安定限界を徐々に小さくすることにより、振幅の大きい粒子からあたかも果物の皮をむくようにビームを取り出してゆき、約1秒にわたってゆっくりとビームを供給する<sup>1)</sup>。

取り出し時のチューン変化を一定にした場合、取

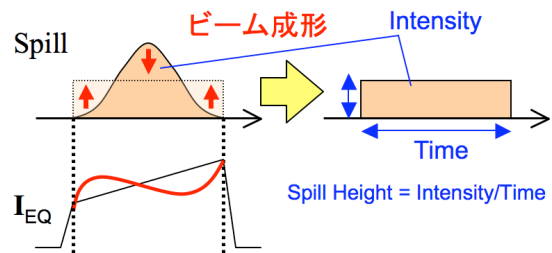


図1 スピル制御によるビームの時間構造調整

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。平坦なスピルを得るために、まずこのマクロな時間構造を成形する(図1上)。そして、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

<sup>1)</sup> E-mail: akio.kiyomichi@kek.jp

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。この高周波成分を除去することがもう一つの目的である(図1下)。

これらを実現するために、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装置から構成されるスピル制御システムを開発している。

### 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、メインの4極磁石群とは別に専用の4極電磁石を用意する。電磁石は取り出し用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。

EQ磁石はビームのマクロ成分の平坦化を担う4極電磁石である。スピル構造のマクロな成形を主目的として磁場勾配はMR通常の4極磁石の1/10程度とした、また1kHz程度までのリップル除去も行えるよう、鉄芯材料に0.1mmの薄い積層鋼板を用いて渦電流を極力減らす設計にしている。表1に基本パラメータを示す。

ボア半径	80 mm
ターン数	22
鉄心材料	ST-100 0.1mm
最大磁場勾配	2.60 T/m@301A
コア軸長	0.69 m
インダクタンス	8.8 mH
抵抗 (22°C)	80.3 mΩ

表1 EQの基本パラメータ

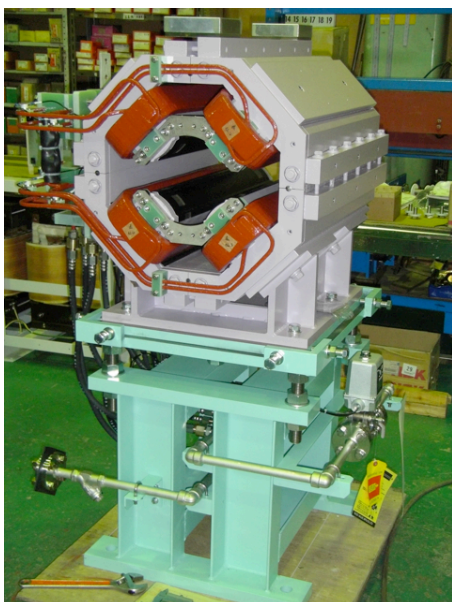


図2 EQ磁石の外観

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。仕様は現在策定中だが、EQと同形状で0.2T/m程度の磁場勾配、そして応答時間を重視した設計としている。

EQ磁石の1号機は平成20年7月に完成した。外觀写真を図2に示す。磁場測定などの性能試験を行い、また、メインリングの磁石のリップル測定結果を設計に反映させて、EQ磁石2号機とRQ磁石の製作を行う。

### 4. フィードバックシステム

EQおよびRQの励磁パターンを作るのがスピルフィードバックシステムである。フィードバック装置は構成回路の動作時間を決めるゲート信号、リングに設置したビームモニタから得られるビーム強度信号、取り出し直後に設置するスピルモニタからのスピル信号の3種類が入力となる。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(Spill Height = Intensity/Time)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。また、数百Hz~数kHz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3にスピルフィードバックのシステム構成図を示す。

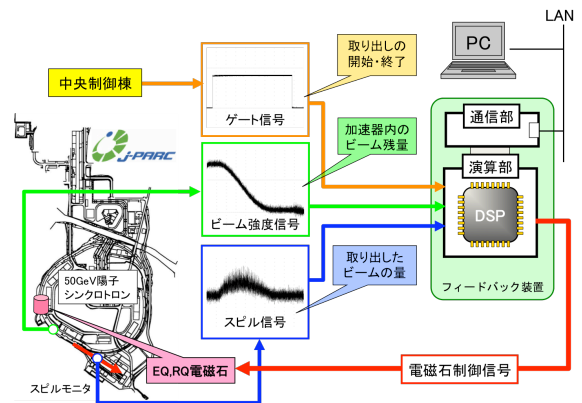


図3 スピルフィードバックシステムの構成

J-PARCの前身であるKEK-PSにおけるスタディにより、取り出しビームスピルを安定にするためには伝達関数に時間依存を持たせる必要があることが分かっている。具体的には取り出し時間の経過に応じてパラメータの最適化を行うことであるが、アナログ制御で行うことは難しい。これを実現するために高速のDSPを用いたデジタルフィードバックの開発を行い、KEK-PSではスピル制御の運用に大きな改善が見られた。J-PARCの遅い取り出しではこの経験を基にして、DSPを用いたデジタルフィードバックによるスピル制御システムの開発を進めている<sup>12,3)</sup>。

フィードバック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(C6713DSK)をベースに、まずJ-PARC用フィードバック装置の試作機を製作し、KEK-PSのアルゴリズムを移植した<sup>[4]</sup>。

データのAD変換はKEKオンライングループ開発のKEK-VME GPIOボードを採用した。GPIOボードはAD/DA変換・デジタルI/O・光転送といった各種ドータカードを2枚装着できるVMEボードであり、フィードバック装置の入出力部や電源へのデータ転送に用いる。DSPボードとはデジタルI/Oカードを介して接続する。これに加えてJ-PARCでは、遠隔操作によるパラメータ操作を実現するべく通信機能の追加を行う。通信用IOボードとして、LAN端子とFPGAを搭載し、OSにLinuxを搭載している小型CPUボードのSUZAKUを採用した。J-PARCの制御システムのベースとなるEPICSによる遠隔操作を行うよう開発を進めている。

DSPボードにデータ入出力用ボード及び通信ボードを組み合わせて開発機として製作した。この開発機を用いてソフトウェアの開発や放医研HIMACでのビームテストを実施している。この開発をベースに実運用の専用基板の製作に着手している。

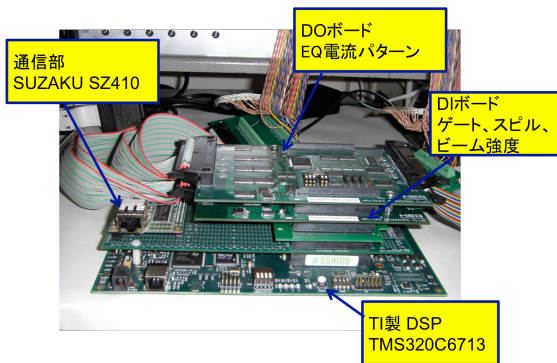


図4 フィードバック装置開発機

## 5. ビームテスト

DSPによるスピルフィードバック装置の検証を行うため、平成19年より数回にわたって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。HIMACはJ-PARCと同じ3次共鳴の遅い取り出しビームであり、J-PARCのEQに相当するQDS電磁石が用意されているため、フィードバック装置の試験環境として適している。

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。図5にテスト結果を示す。左図がフィードバック無し、右図がフィードバック運転時のスピル波形である。右図ではフィードバック出力であるQDSの励磁パターンも示している。この試験

ではリップル除去を行っていないので、高周波成分を無視したスピル波形を図の下部に示している。約1秒間の取り出しでフィードバックによるビームスピルの平坦化に成功し、DSPで構築したデジタルフィードバック装置が設計通り動作することを確認した。

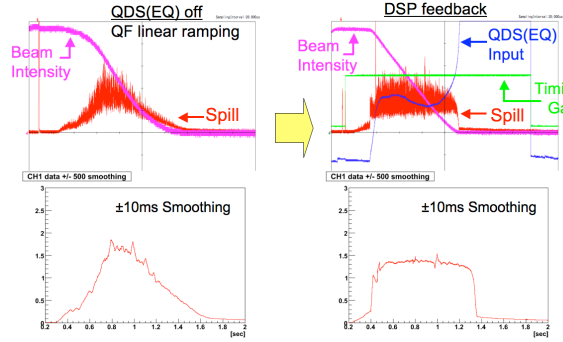


図5 HIMACでのスピル制御テスト結果

## 6. まとめと今後の展望

J-PARCの遅い取り出しビームのスピル制御のために、取り出し用4極電磁石とフィードバック装置の開発を行っている。DSPによるフィードバック装置は、HIMACにおいてその性能が確認された。

フィードバック装置は、遠隔操作のための通信部の開発と、実運用で用いる専用基板の設計・製作を行う。スピル制御用の4極電磁石(EQ,RQ)は平成21年夏のシャットダウン時にインストールして、平成21年秋のランよりスピル制御を実施したビームを供給する。これに向けてスピル制御用電磁石およびフィードバック装置の構築を行っていく。

## 参考文献

- [1] M.Tomizawa, et al, "Design and development for slow beam extraction from J-PARC main ring", Proceeding of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, August 1-3, 2007, 91-93
- [2] A.Kiyomichi, et al, "The research on the spill feedback using DSP for J-PARC", Proceeding of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, August 1-3, 2007, 410-412
- [3] H.Nakagawa, et al, "Development of a Signal Processing Board for Spill Digital Servo System for Proton Synchrotron", Proceedings of International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, Oct.15-19, 2007
- [4] T. Ichikawa, et al, "Study of spill feedback using DSP for the J-PARC slow extraction", These Proceedings.