

## THE SPILL FEEDBACK CONTROL UNIT FOR THE J-PARC SLOW EXTRACTION

Shinya Onuma <sup>#A)</sup>, Koh-ichi Mochiki<sup>A)</sup>, Takuro Kimura<sup>B)</sup>, Toshikazu Adachi<sup>C)</sup>, Atsuyoshi Akiyama<sup>C)</sup>, Shigeru Murasugi<sup>C)</sup>, Ryotaro Muto<sup>C)</sup>, Hidetoshi Nakagawa<sup>C)</sup>, Jun-ichi Odagiri<sup>C)</sup>, Katsuya Okamura<sup>C)</sup>, Yoshihisa Shirakabe<sup>C)</sup>, Hirohiko Someya<sup>C)</sup>, Masato Tomizawa<sup>C)</sup>, Akio Kiyomichi<sup>D)</sup>, Hikaru Sato<sup>E)</sup>, Koh-ji Noda<sup>F)</sup>

<sup>A)</sup> Tokyo City University

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

<sup>B)</sup> University of Miyazaki

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

<sup>C)</sup> KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

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

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

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

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

<sup>F)</sup> NIRS

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

### Abstract

Proton beams accelerated by J-PARC main ring are delivered to Hadron Experimental Facility by using slow extraction and used to various nuclear and particles experiments. The uniformity of beam intensity in terms of time is requested for these proton beams to measure the each event on particular detectors and data acquisition systems certainly. In this study we have developed a new feedback control unit and softwares to carry out the constant beam extraction. We had preliminary experiments using a proto type feedback control device in HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) and achieved the big improvement in beam characteristics by the digital feedback control. The new feedback control unit was developed on the basis of preliminary experiments in HIMAC. Our new feedback control unit consists of analog input and output ports, digital input and output ports, two DSPs, a dual port memory to transfer feedback parameters between DSPs, SUZAKU-V and a FPGA. Two DSPs calculate the EQ and RQ magnets control signal and analyze the spectrum of spill signal at a time. Now we are optimizing feedback parameters and confirming the effect of the feedback control. This presentation shows the development status of our feedback control unit.

## J-PARC 遅い取り出しのためのスピルフィードバック制御装置

### 1. はじめに

J-PARC のメインリングでは、加速した陽子ビームを遅い取り出しによってハドロン実験施設へと供給する。供給された陽子ビームを 2 次粒子生成標的に当て、そこから発生した 2 次ビームを用いて原子核・素粒子物理学実験が行われる。陽子ビームが瞬間的に標的へと衝突すると、2 次ビームも瞬間的に増加してしまう。実験の計測システムやデータ収集システムの処理能力は有限であるため、データ収集効率が著しく下がり、陽子ビームの利用効率の低下を引き起こしてしまう。そこで、陽子ビームを利用する実験者からは、陽子ビームの取り出し量を一定とすることが求められている。

### 2. フィードバックシステム

スピルフィードバック<sup>[2]</sup>を行うシステムは、取り出し用 4 極電磁石(Extraction Q Magnet: EQ)および高速リップル除去用 4 極電磁石(Ripple q Magnet: RQ)の 2 種類の制御用電磁石と、制御用電磁石の励磁電流パターンを算出するスピルフィードバック制御装置によって構成される。フィードバック装置には、ビーム取り出し直後に設置されたビームモニタから得られるビーム取り出し量を示すスピル信号、メインリング内に設置されたビームモニタから得られるビーム残量を示すビームインテンシティー信号、フィードバック制御の開始と終了を指示するゲート信号を入力する。入力される 3 つの信号から EQ および RQ の励磁電流パターンを算出し、スピル制御を行う。また、中央制御棟とフィードバック装置は

Ethernet により接続し、遠隔操作を可能としている。J-PARC のスピルフィードバックシステムの構成を図 1 に示す。

次章よりスピル制御に用いる各機器についての詳細と開発の現状を記す。

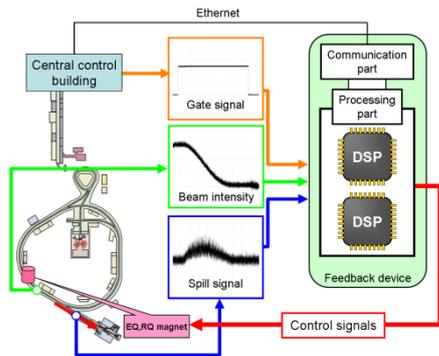


図 1 : J-PARC スピルフィードバックシステム構成

### 3. スピル制御用電磁石

フィードバックを行わずに陽子ビームの取り出しを行った場合には、取り出し量の時間構造であるスピルが山なりになってしまう。また、電力供給に起因する取り出し量の変動であるリップルも存在し、数百 Hz から数 kHz の高周波構造がスピルに生じてしまう。そこで、スピルを計測しフィードバックをかけることにより、スピルの平坦化を実現する。<sup>[3]</sup> EQ は励磁電流パターンを、取り出しの最初と最後が急勾配となるように調整することで、スピルの平坦化を図る。RQ では、EQ だけでは低減しきることのできない周波数の高いリップルの逆相をかけることで、さらに直流に近いスピル成形を行う。スピル制御を図 2、EQ、RQ の写真を図 3 の(a)、(b)に示す。

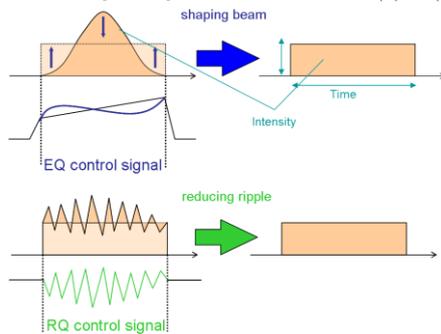


図 2 : EQ, RQ によるスピル制御



(a)EQ



(b)RQ

図 3 : EQ, RQ 設置写真

### 4. フィードバック制御装置

J-PARC で利用するフィードバック制御装置には、DSP チップ(TMS320C6713)を 2 つ、DSP 間のデータ転送を行うためのデュアルポートメモリ、Ethernet 用 CPU の SUZAKU-V410、ゲート信号、ビーム強度信号、スピル信号の入力に用いるアナログ入力とデジタル入力、2 つの EQ 電磁石と 1 つの RQ 電磁石の制御信号の出力に用いるアナログ出力とデジタル出力、データフローを管理し並列処理を行うための FPGA を搭載する。搭載する 2 つの DSP はそれぞれ電磁石の制御量演算とスペクトル解析の演算を行う。2 つの DSP を使用して同時に演算を行わせることで、リアルタイムで制御演算を行うことが可能となっている。Ethernet 用に搭載している SUZAKU には Linux が組み込まれているため、J-PARC の LAN 内でのデータ転送を行うソフトウェアである EPICS を利用することが可能となる。この EPICS を使用することで中央制御棟からのアルゴリズム変更やフィルタのパラメータ変更を可能とする。フィードバック制御装置の構成を図 4 に、写真を図 5 に示す。

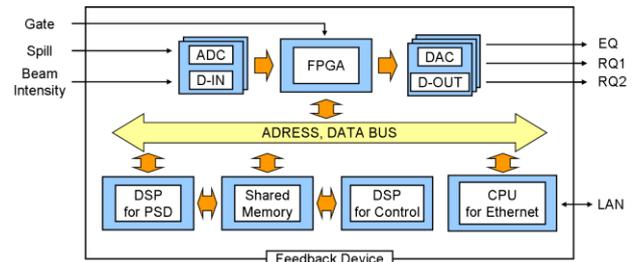


図 4 : フィードバック制御装置の構成



図 5 : フィードバック制御装置の写真

### 5. フィードバックアルゴリズム

フィードバックアルゴリズムは、大きく 3 つのステージに分けることができる。1 つ目は EQ の励磁電流パターンを算出するステージ、2 つ目は RQ の励磁電流パターンを算出するステージ、3 つ目はスピル信号のスペクトル解析を行うステージとなる。

ステージ 1 では、伝達関数と時分割ゲインを用いて EQ 制御演算を行う。ここで使用する伝達関数は、KEK-PS 時代に利用されていたアナログ伝達関数を s-z 変換によりデジタル伝達関数に変換したもの

である。図 6 にデジタル伝達関数のブロック図を示す。また、同時に使用する時分割ゲインは、スピルが山なりになってしまう傾向をもっていることから、ビーム残量に応じて出力信号にゲインをかけることによってマクロ成形を助ける役割を担う。ステージ 2 では、パラメータを動的に変化するフィルタと位相シフタによって RQ 制御演算を行う。スピル信号をフィルタに入力することでリップルの周波数のみを抽出し、位相シフタによって逆相にすることでリップルの低減を行う。ステージ 3 では、スピル信号のスペクトル解析を行うが、ここで利用するアルゴリズムは、当研究室の村田教授によって考案されたパワースペクトル密度分析(PSD)を使用する<sup>[4]</sup>。PSD によって得られる解析結果を用いて、ステージ 2 のフィルタのパラメータを変更する。フィードバック制御のアルゴリズムを図 7 に示す。

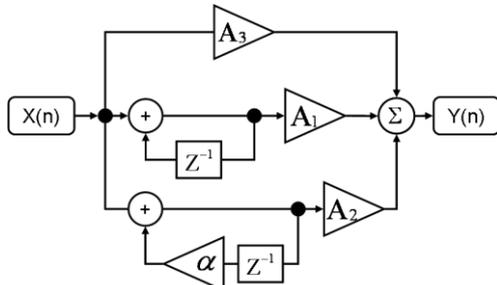


図 6 : デジタル伝達関数のブロック図

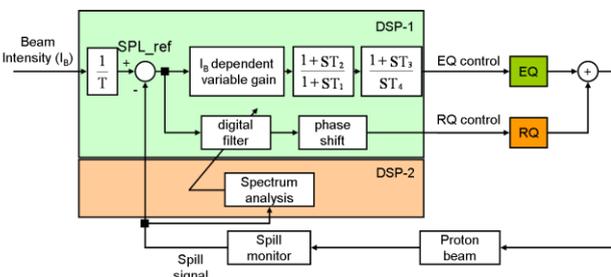


図 7 : フィードバック制御アルゴリズム

## 6. ビームコミッショニング

現在、J-PARC にて開発したフィードバック制御システムを利用したビームテストを行っている。制御装置とアルゴリズムの検証には下式にて求められるデューティーファクターを使用する。

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

デューティーファクターとは、ゲート時間中のビーム取り出し量の割合を表し、スピルの一様性を表す指標となる。図 8 にフィードバック制御を行わずに取り出しを行った場合と、図 9 にフィードバック制御を行った場合の結果を示す。フィードバックを行わない場合では、デューティーファクターは 2.8%

だったものが、フィードバック制御を行った場合には 11.8%まで上昇したことを確認できた。

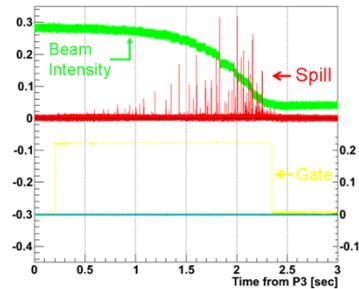


図 8 : フィードバック制御なし

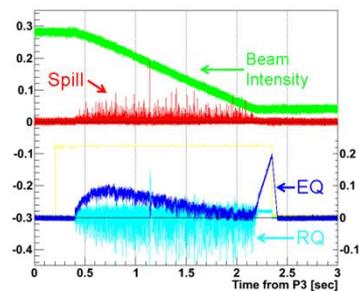


図 9 : フィードバック制御あり

## 6. まとめと今後の展望

2 つの DSP を搭載した、J-PARC スピル制御用フィードバック制御装置の開発が完了し、J-PARC にて運用試験を開始した。現段階で開発が完了している EQ 制御演算と RQ 制御演算を使用した結果として、デューティーファクターの改善を確認することができた。

今後は、さらなる EQ 制御演算のパラメータを最適化するとともに、パラメータが動的に変化するフィルタおよびスペクトル解析プログラムを開発し、2 つのプログラムを協調動作させることを目的とする。

次回の遅いビーム取り出しは、2010 年 10 月ごろを予定しており、プログラムの開発を完了させたいうえで効果の確認を行う予定である。

## 参考文献

- [1] M. Tomizawa et al., "Beam Commissioning of J-PARC Slow Extraction", these proceedings
- [2] T. Kimura et al., "Spill Feedback Control for the J-PARC Slow Extraction", these proceedings
- [3] A. Kiyomichi et al., "Beam Spill Control for the J-PARC Slow Extraction", proceedings of IPAC10 (THPEB022)
- [4] Y. Murata et al., "A New Method for Digital Power Spectrum Analysis", NIM A 108 (1973) 243.