

J-PARC 遅い取り出しにおけるスピル構造の研究

THE RESEARCH OF SPILL STRUCTURE FOR J-PARC SLOW EXTRACTION

木村琢郎^{#, A)}, 岡村勝也^{A)}, 白壁義久^{A)}, 下川哲司^{A)}, 富澤正人^{A)},
中川秀利^{A)}, 武藤亮太郎^{A)}, 柳岡栄一^{A)}, 清道明男^{B)}

Takuro Kimura^{#, A)}, Katsuya Okamura^{A)}, Yoshihisa Shirakabe^{A)}, Tetsushi Shimogawa^{A)}, Masahito Tomizawa^{A)},
Hidetoshi Nakagawa^{A)}, Ryotaro Muto^{A)}, Eiichi Yanaoka^{A)}, Akio Kiyomichi^{B)}

^{A)} KEK

^{B)} SPring-8/JASRI

Abstract

Slow extraction beam is extracted to the Hadron Experimental Facility from the Main Ring of J-PARC is used to the physical various experiments, such as elementary particles and atomic nuclear. It represents the time structure of the beam is removed and stabilize the flat spill has been determined from experimental side in particular. It is using the spill feedback system to where it reduces the ripple, to flatten the spill. Spill control system is composed of a feedback device that guides the excitation pattern of the magnet and spill control magnet.

The spill control system has been developed to make a uniform structure and decrease 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.

By will continue to improve the spill control algorithm using the DSP, how the structure of the spill or be improved, it reports the latest research results, such as improvements of spill control algorithm and operating status of the spill control magnet.

1. はじめに

J-PARC のメインリングからハドロン実験施設に取り出される遅い取り出しビームは、原子核や素粒子などの様々な物理実験に利用される^[1]。特に実験側からは取り出しビームの時間構造を表す、スピルを平坦で安定させることが求められている。そこでリップルを低減させ、スピルを平坦化するためにスピル制御システムを用いている。スピル制御システムはスピル制御用電磁石とその電磁石の励磁パターンを導くフィードバック装置で構成される。スピル制御用電磁石は、取り出し用4極電磁石(Extraction Q Magnet: EQ)及び高速リップル除去用4極電磁石(Ripple Q Magnet: RQ)の2種類で構成される。スピルモニタの信号から最適なEQ及びRQの励磁パターンを作り出すため、高速のDSPによる演算によって制御を行っている。DSPを用いたスピル制御アルゴリズムを改良していくことで、スピルの構造がどのように改善されるか、スピル制御用電磁石の動作状態及びスピル制御アルゴリズムの改良点など最新の研究結果を報告します。

2. 遅い取り出し

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でビームを30GeVに加速後の約2.6秒のフラットトップの区間で、ベータatron振動に主電磁石の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、主電磁石のみを用いた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、ビームのマクロなスピル構造は図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、EQ電磁石を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主電磁石電源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^[2]。EQとRQによるスピルの平坦化の概略をFigure 1に示す。

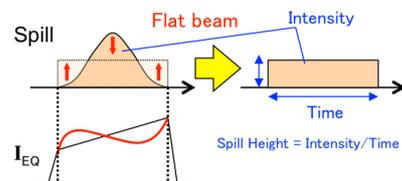


Figure 1: Flattening of the spill by EQ and RQ.

[#] kimurata@post.j-parc.jp

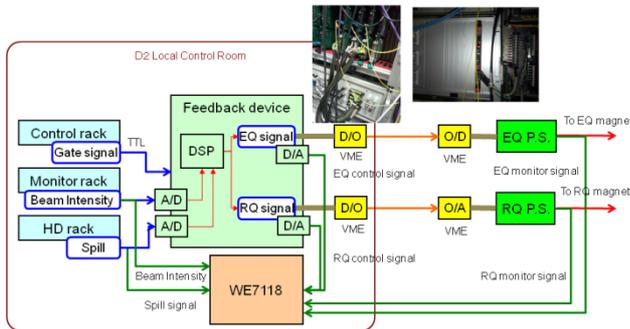


Figure 2: Spill Control System.

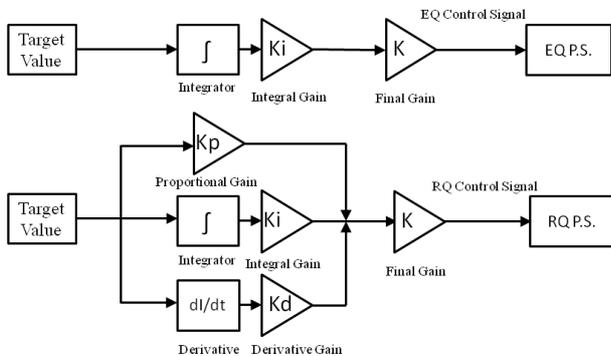


Figure 3: EQ and RQ Control Algorithm.

3. スピル制御システム

スピル制御システムはEQ、RQ電磁石とEQ、RQ電源及び、それらをスピルのモニタ信号から制御するフィードバック装置からなる。

現在は、遅い取り出しは6秒周期で運転している。フィードバック装置は100kHzサンプリングで動作し、動作する期間はゲート信号により決定する。フラットトップの開始のタイミングであるP3から2.6秒間ゲートは立ち上がるようになっている。ゲートが立ち上がると100ミリ秒間で、MRの周回ビームのビーム強度の測定とスピル信号のオフセット調整を行う。測定されたビーム強度はこれから2秒間でビームを一定に取り出すために必要なスピルの目標値が演算される。その後P3より300ミリ秒後よりEQ、RQの指令値の出力を開始しスピル信号が目標値どおりになるようフィードバック制御を行う。P3から2.6秒になるとゲートは立ち上がりフィードバック装置はEQ、RQの指令値を0にし、次のサイクルのゲートの立ち上がりを待つ。EQ、RQの制御信号は16bitのデジタル信号で出力され、D/O変換しD2電源棟のローカル制御室からD2電源棟内のEQ、RQ電源に光信号で送られO/D、O/A変換の後、各電源に指示値として入力される。

また、ビーム強度、スピル信号、EQ、RQ指示値、EQ、RQ電流出力はWEと呼ばれる測定器を用いて100kHzサンプリングで測定される。スピル制御シ

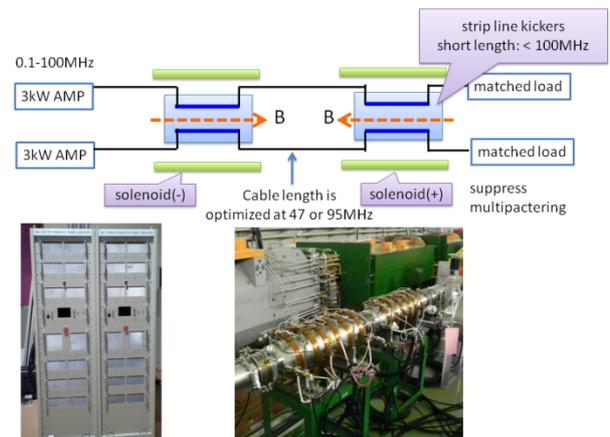


Figure 4: Transverse RF System.

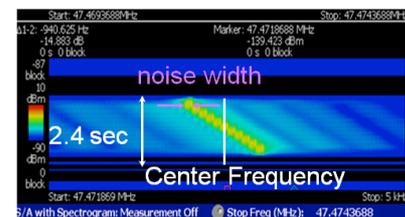


Figure 5: TRF Signal Generator Output.

ステムをFigure 2に示す。2013年1月から用いられている最新のEQ、RQの指令値を演算するアルゴリズムをFigure 3に示す。EQは積分項のみで制御しマクロなスピル構造が一定となるよう制御する。一方でRQではPID制御を用いている。比例項、微分項により速い応答性を実現し、主電磁石電源に起因するリップルを抑制する。また積分項を導入することでEQとの協調を図り制御している。

4. Transverse RF システム

EQ、RQを用いて遅い取り出しを行い。スピル構造の改善を行っているが、主電磁石電源に起因するリップルは非常に強い。そのためTransverse RF (TRF)を併用し、周回ビームを高周波電場によって横方向に振動させることによってリップルの影響の低減を図る^[3]。現在導入されているTRFシステムをFigure 4に示す。TRFシステムは2010年11月より試験的に導入され、スピル構造の改善を上げた。しかし、マルチパクタリングが発生し、真空を悪化させたため利用運転に使用できなかった。その後、ソレノイドコイルを巻くことで対策を行い。さらにアンプの増強、最も効果のある周波数の選定、周波数エッジを時間とともに段階的に変化させることで励起するチューンを変化させるなどの改良を行い、スピル構造を改善させる強力なツールの1つとなっている。TRFのシグナルジェネレータ出力をFigure 5示す。中心周波数は47.47159941MHzで100Hzの幅を持ち、0.2秒ごとの12段階で切り替わっている。

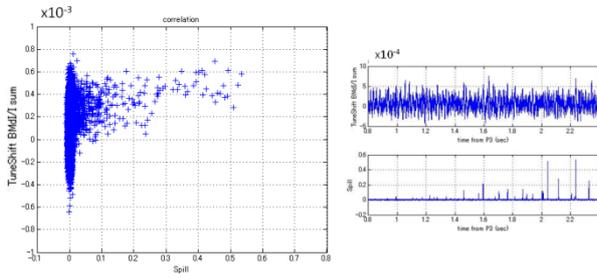


Figure 6: Correlation of BM ripple and spill.

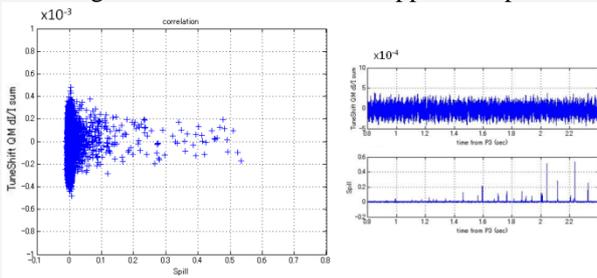


Figure 7: Correlation of QM ripple and spill.

5. 主電磁石電源リップルのスピル構造への影響

これまでスピル構造には、主電磁石電源に起因するリップルの影響が強くと述べてきた。そこで主電磁石電源の電流リップルとスピルの関係を調査した。調査方法は、スピル制御システムを停止し、主電磁石のみを用いた 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う。このときの偏向電磁石(BM)電源の全 6 台、四極電磁石(QM)電源の全 11 台の電流偏差とそのときのスピルの同時測定を行った。測定した BM、QM の電流偏差からチューン変化量を演算しスピルとの相関をプロットしたものを Figure 6, 7 に示す。この測定から QM に比べ BM のリップルによるチューン変動が大きく、スピルとも一定の相関を持っていると考えられる。この測定結果の解析を進め、各電源のリップルによるチューン変化をキャンセルできるようにスピル制御アルゴリズムに取り入れていくことを検討中である。

6. ビームコミッショニング

現在、遅い取り出しでは加速終了後の 2.63 秒のフラットトップを用いて 2.0 秒間の取り出し時間で行っている。スピル制御システム、TRF システムを併用することでスピルが一定になるように調整している。このとき、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 として以下を採用している。

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

Table 1: History of spill improvement

Spill Improvement	Spill structure	Duty
None (January 2010)	Macro structure consists mountain. There is a ripple with a focus on 600Hz and 50Hz	1~2%
Spill Control System (January 2010)	Macro structure approach to a flat rectangle .Effect of the ripple with a focus on 600Hz and 50Hz.	6%
Control algorithm improvement (January-February, October-November 2010)	Macro structure flatter rectangular. Duty was greatly improved.	17%
TRF trial operation (November 2010)	Macro structure flat rectangle further. Duty was further improved.	30%
TRF user operation (January-June 2012)	I was able to reproduce the situation before the earthquake. I would be possible to use user operation.	32%
New RQ P.S. install (February 2012)	In R & D machine Duty highest value (Study).	40%
T RF improvement. The PID control into the RQ control (December - 2012)	Improved by adjusting EQ control and PID control into the RQ control and search of the center frequency of the TRF.	45%

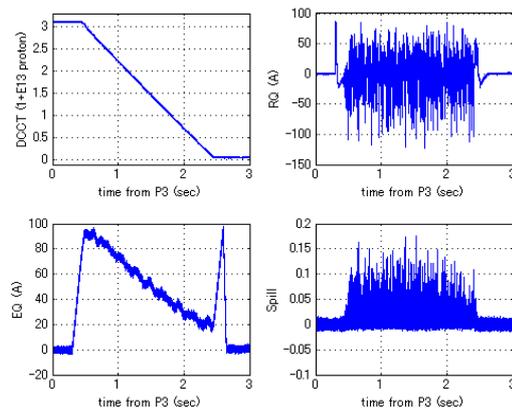


Figure 8: Beam Intensity, EQ Current, RQ Current and Spill Structure (with TRF).

ここで、 $I(t)$ はスピルのビーム強度、取り出し開始時間を 0 とし、 T は取り出し終了時間を表す。スピルが理想とする一様な矩形になったとき 100%となる。

これまで行ってきたスピル構造の改善の経緯を Table 1 に示す。スピル制御導入当初は、6%程度だった Duty が制御アルゴリズムの改良や TRF の導入などにより 45%程度まで改善することができた。2013 年 5 月の遅い取り出しでの周回ビームの強度、EQ 電流、RQ 電流、スピルを figure 8 に示す。

7. おわりに

J-PARC の遅い取り出しにおいて、EQ、RQ 用いたスピル制御システム、TRF システムの導入により EQ でスピルのマクロな構造を改善し、RQ と TRF によってリップルの影響を抑え Duty を大きく改善することができた。

しかし、スピル構造の改善はまだまだ十分とはいえない、現在行っている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の調査と解析により、スピル制御システムの改良や TRF システムの改良などにより 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”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Aug 8-11, 2012.
- [2] T. Kimura, et al, “The Research on The Spill Feedback Control for J-PARC”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, Aug 8-11, 2012.
- [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