

電磁石電流によるリアルタイムベータトロンチューン補正時の J-PARC Main Ring 遅い取り出しビーム品質の評価

EVALUATION OF SLOW-EXTRACTED BEAM QUALITY WITH REAL-TIME BETATRON TUNE CORRECTION USING MAGNET CURRENT AT J-PARC MAIN RING

栗本佳典*, 内藤大地, 下川哲司, 木村琢郎, 武藤亮太郎, 富澤正人, 岡村勝也
Yoshinori Kurimoto*, Daichi Naito, Tetsushi Shimogawa, Takuro Kimura, Ryotaro Muto,
Masahito Tomizawa and Katsuya Okamura
High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

J-PARC Main Ring (MR) is a high intensity proton synchrotron which accelerates protons from 3 GeV to 30 GeV. In J-PARC MR, the current ripple of their main magnet power supplies adversely affects the temporal flatness of slowly extracted spills. This is because these magnetic field errors vary the betatron tune, which must be precisely controlled to maintain the flatness of the spills. To solve this problem, we have proposed and built a system that corrects the betatron tune using the measured output current of the magnet power supplies. We measured the betatron tunes and the intensity of the extracted spills using the system. The results shows that the system can reduce the ripple of the betatron tune and the spill intensity especially at the frequencies around 100 Hz. In this paper, the details of the system and the experimental results are reported.

1. はじめに

主電磁石電源の出力電流精度は加速器の性能の維持に非常に重要な項目である。一方で、シンクロトロン加速器のように主電磁石を急峻に励磁するような場合、その主電磁石電源は電流だけでなく電圧定格も大きなものとなり、出力電流精度を維持するのが難しくなる。大強度陽子シンクロトロン J-PARC Main Ring (MR) では、より出力精度の良い主電磁石電源の研究開発および導入が精力的に進められている [1] [2] [3] ことに加えて、現行のビーム運転においても共鳴補正 [4] や、加速中の各時刻の光学測定による補正 [5] を積極的に行ってきた。後者の研究活動は特に速い取り出しの利用運転強度 500 kW 達成に多大なる貢献をした。しかしながら、遅い取り出しのビーム平坦度に関しては、依然として主電磁石電源の出力電流リップルによる性能低下が十分に改善されていないのが現状である。そこで、各主電磁石電源の電流リップルをリアルタイムで光学パラメタ（ベータトロンチューン）のずれに変換し、それを光学補正に用いるシステムの考案、設計および導入を行い、ベータトロンチューンのおよび遅い取り出しビーム強度の測定により本システムの有効性を評価した。

2. 主電磁石電流計測によるリアルタイム光学補正

遅い取り出しビームの平坦性は非常に重要である。なぜなら平坦性が悪いと多数の粒子が短時間内に局在し検出器のデータ取得能力を超え実験の効率を下げるからである。J-PARC MR ではベータトロンチューンを共鳴条件に近づけビームサイズを大きくし、エミッタンスの大きい粒子から徐々に取り出す手法で遅い取り出しを実現している。ベータトロンチューンとはリング内の

取束力の分布で決まる横方向振動（ベータトロン振動）のリング一周あたりの振動数のことである。ここではベータトロンチューンの制御が非常に重要になってくるが、主電磁石磁場に大きなリップルがあるとベータトロンチューンが変動するので取り出しビームに濃淡ができてしまう。J-PARC MR では、取り出しビーム強度の補正電磁石を使ったスビルフィードバックや高周波 RF 電場の印加などの手法がよい効果を挙げているが、主電磁石のリップルが 10^{-4} と大きいと、平坦度 $\frac{\langle I(t) \rangle^2}{\langle I^2(t) \rangle}$ ($I(t)$ はビーム強度) は 50% 程度 [6] と完全平坦時 100% に比べて非常に悪い。しかしながら、直接ベータトロンチューンを測定するにはビームを蹴る必要があり、これによりビーム損失が増える。したがって、1 ショットの測定は可能であるが測定と同時に連続運転を行うことはできない。そこで、我々は Fig. 1 のように偏向および四極電磁石の電流からベータトロンチューンの補正量を高速かつリアルタイムで計算し、その補正量を補正四極電磁石にフィードフォワードすることで直接ベータトロンチューンを補正するシステムの提案および実装を行い、2017 年夏に疑似信号を使ったシステムの動作確認を行った [7]。

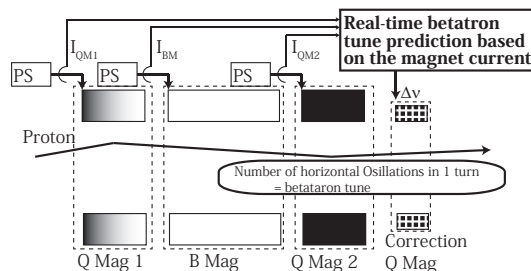


Figure 1: The overview of the proposed method.

* kurimoto@post.j-parc.jp

3. J-PARC MR の主電磁石電源の出力電流リップル

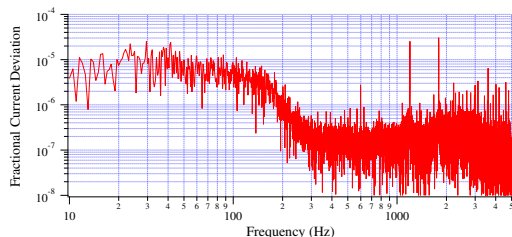


Figure 2: The FFT of the current deviation of the bending magnet power supply in J-PARC MR.

Figure 2 に J-PARC MR の偏向電磁石電源の出力電流偏差の FFT を示す。この図から分かるように電流リップルの主な成分は 600 Hz, 1200 Hz 等のスイッチング周波数成分と 100 Hz 以下の周波数成分とがある。スイッチング周波数成分は現在進めている新主電磁石電源では 2 kHz 以上になり、その周波数領域ではダクト等に発生する渦電流により電流リップルに比べて磁場リップルは 1/10 以下になることが分かっている。一方、200 Hz 以下はフィードバック制御やフィルタ定数の周波数特性が見える分布になっており、新主電磁石電源でも起こり得ることを想定する必要がある。このことから、リアルタイムでのベータトロンチューン補正が有効であるべき周波数帯域の当初の目標を 200 Hz 以下に設定した。

4. J-PARC MR におけるセットアップ

4.1 全体像

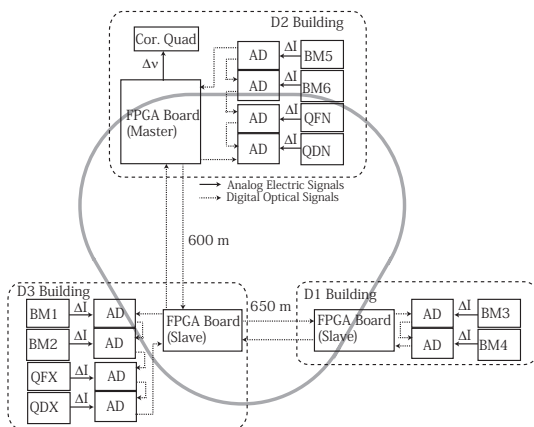


Figure 3: The setup of the proposed real-time optics correction system.

J-PARC MR では主電源は三つの建屋に設置されており、一方、補正四極電源は 1 つの建屋のみにあるので、必要な電源の電流偏差データをその建屋に長距離伝送する必要がある。そのため AD 変換回路で電流偏差をデジタル化し光通信で情報を送信する。建屋間の距離は数百

メートルであり、電源棟間の光ファイバー信号伝達時間は 10 μ s 以下と、補正対象の周波数 (200 Hz 以下) の時間スケールより十分小さく問題にならない。Figure 3 に実際のセットアップを示す。使用する電源はすべての偏向電磁石電源 (BM1 から BM6 の計六台) および四台の四極電磁石電源 (QFN, QDN, QFX および QDX) であり、各電源に専用の AD ボードを設置し、それぞれの電源棟に設置された FPGA ボードにデジタル値を送信する。これらの FPGA ボードは電源棟間のデータ転送を担当する。電源棟間の既設の光ファイバはすべて第三電源棟経由で第一電源棟および第二電源棟に敷設されているのに対して、補正四極電源は第二電源棟に設置されているため第一電源棟のデータは一度第三電源棟を経由する必要がある。

4.2 FPGA ボード

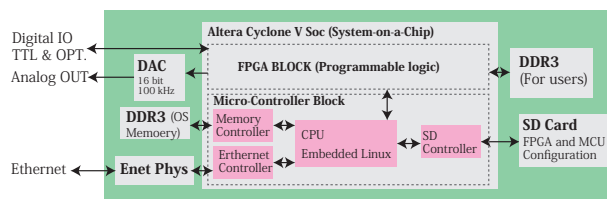


Figure 4: Conceptual block diagram of the developed FPGA board.

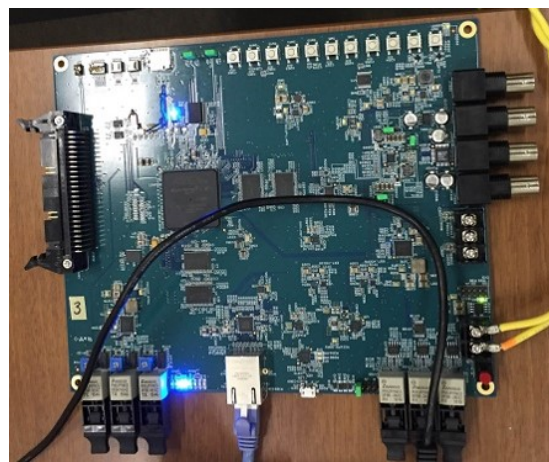


Figure 5: Picture of the developed board.

本 FPGA ボードは J-PARC MR で汎用的に利用できる基板として開発したもので、詳細は [8] で報告している。FPGA ボードのブロック図および写真をそれぞれ Fig. 4 と Fig. 5 に示した。本ボードの高度機能 IC として、プロセッサ、メモリコントローラ、周辺機器 (イーサネット、シリアルポートなど) と FPGA が一つに統合された System-on-chip (SoC) FPGA を採用した。本ボードは多目的の多数のデジタル IO ポートと 4ch のアナログ出力を搭載し、個々の SoC FPGA の設定は SD カードもしくはオンボードフラッシュメモリからロードされる。また、一つのギガビットイーサネットポートも搭載してお

り、ネットワーク経由でのコミュニケーションも可能である。

4.3 AD ボード

現行の主電磁石電源はデジタル制御を採用しているが、フィードバック用の電流偏差まではアナログ演算を行っており、このアナログ電流偏差信号を AD 変換して光学補正に利用する。AD ボードのブロック図および写真をそれぞれ Fig. 6 と Fig. 7 に示した。本ボード搭載の AD チップ (TI ADS8568) の分解能とチャンネル数はそれぞれ 16 ビットと 8 である。また、アナログ部にノイズを伝搬させないためデジタル入出力ポートはすべて光信号とした。さらに、AD チップ自身の持つ Daisy Chain による複数 AD チップ接続機能は本ボードでも使用可能で、実際に新主電磁石電源と本装置ともに Daisy Chain 機能を使用している。本装置では仕様の 100Hz の帯域に対して十分大きな 10 kHz で電流偏差信号をサンプリングする。

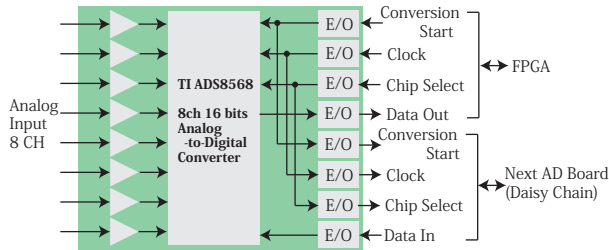


Figure 6: Conceptual block diagram of the developed AD board.



Figure 7: Picture of the AD board.

5. ベータトロンチューン補正

ビーム試験の第一段階として、遅い取り出しを行わずに取り出しエネルギー 30 GeV でのベータトロンチューンの測定を行った。具体的には、ストリップライン電極により励起されたコヒーレントな横方向振動をビーム位置モニターで 1 秒間測定し、800 μ s の時間フレーム毎の周

波数解析によりベータトロンサイドバンドの時間変化を求めた。Figure 8 に 1 フレーム分の周波数特性のグラフを示した。横軸は周回周波数で規格化しており、真ん中の 2 つのピークがベータトロンサイドバンドで、両端のピークは周回周波数に対応している。測定は本光学補正システムを適用した場合としない場合両方で行い、両者を比較した。

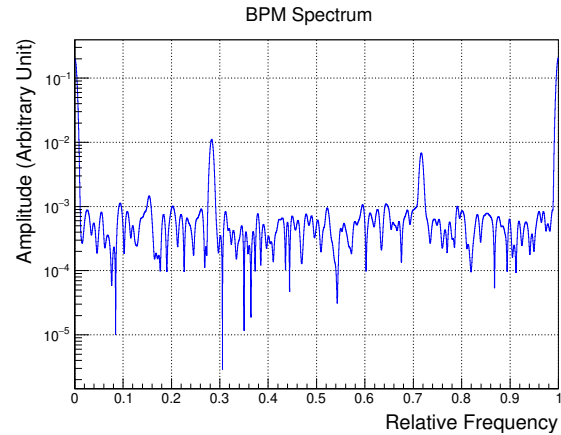


Figure 8: The frequency dependence of the transverse beam position during the betatron tune measurement for 0.8 ms time window. Two peaks close to 0.3 and 0.7 correspond to the betatron sideband. The frequencies are normalized by the revolution frequency.

5.1 ベータトロンチューンの補正量

一般的にベータトロンチューンのエラー ΔQ は、一次の摂動では以下のように各磁石のエラーの線形結合で記述できる。

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \Delta Q_{BM} + \Delta Q_{QM} \\ &= \frac{L_{SM}}{8\pi \sin \pi Q} \sum_i^{BM} \sum_j^{SM} \Delta \theta_{BM,i} K_{2,j} \\ &\quad \times \beta_j^{\frac{3}{2}} \beta_i^{\frac{1}{2}} \cos(-\pi Q + |\phi_i - \phi_j|) \\ &\quad + \frac{1}{4} \sum_i^{QM} \beta_i \Delta K_{1,i} L_{QM,i} \end{aligned}$$

ここで、右辺第一項 (ΔQ_{BM}) が偏向電磁石、第二項 (ΔQ_{QM}) が四極電磁石のエラーによるベータトロンチューンのずれである。 $\Delta \theta_{BM,i}$ は偏向電磁石 i の蹴り角のエラー、 β_i および ϕ_i はインデックス i で示される位置のベータ関数およびベータトロン位相を示す。前者の偏向電磁石のエラーは、まずそれにより六極電磁石中の中心軌道がずれ、その場合六極磁場に収束 (発散) の項ができるので、結果的にベータトロンチューンのずれの原因となる。したがって L_{SM} と $K_{2,j}$ はそれぞれ六極電磁石の長さ [m] と六極磁場の強さ [T/m^2] を表す。一方、四極電磁石はエラー ($\Delta K_{1,i}$ [T/m]) はそれ自身が直接ベータトロンチューンをずらす。 $L_{QM,i}$ [m] は四極電磁石の長さである。第二電源棟の FPGA ボードには任意

の係数（固定小数点数）で 10 の電流偏差の線形結合が計算できるように firmware を実装した。

5.2 実験結果

Figure 9 にチューンの時間変化を示した。赤が補正ありの場合で、黒が無しの場合に対応する。どちらのプロットも右肩上がりのゆっくりとした時間変動に速い周波数変動が重畳されているが、今回着目すべきは後者の速い周波数変動である。なぜなら、前者のゆっくりとした変動は主電磁石の電流では観測されていないため少なくとも本システムでは補正できない上に、変化量が非常に小さいので遅い取り出しビームの平坦性にあまり影響しないと考えられる。仮に影響した場合でも、主電磁石の電流パターンやその他の遅い取り出し機器の微調整で補正可能である。一方、問題となる速い周波数変動は本補正システムでいくらか改善していることが分かる。これをもう少し定量的に見るために、周波数ドメインでの比較を行ったのが、Fig. 10 である。こちらも、赤が補正ありの場合で、黒が無しの場合に対応する。この比較によると 100 Hz 付近のチューン変動が補正により最も減っており、その減少率は補正なしのときに比べて 1/3~2/3 程度になっている。一方、600 Hz などのスイッチング周波数成分のチューン変動は補正により逆に増えていることが分かる。高周波では磁場は電流に対して小さくなるし遅れも生ずる。しかし、本補正システムは電流を使っているのに対してビームは磁場から影響を受ける。これが補正により逆に 600 Hz の変動成分増やしている原因と推測できる。この測定では本システムの効果の周波数依存性を見るために、高周波で補正が逆効果になることは承知の上で意図的に補正の帯域を 1 kHz と広くとっている。FPGA ボードの firmware には帯域可変のデジタルローパスフィルタがすでに実装されているので、ビーム運転に最適化するため帯域を狭く変更することは容易である。

6. 遅い取り出しのスピル平坦性

本システムによりベータトロンチューンが補正できることが分かったので、実際に遅い取り出しを行い、取り出しスピルの平坦性の評価を行った。純粋に本システムの効果を見るため、まず、従来のスピル平坦化装置であるスピルフィードバックシステム [9] と Transverse RF [10] をオフしてビーム取り出しを行った。その後、本システムによる補正をオンにしたときのビーム取り出しも同様に行った。両者のスピル強度の時間変化の比較を Fig. 11 に示した。縦軸はスピルモニター [9] の信号で単位は任意だがスピル強度に比例すると考えてよい。赤が補正ありの場合で、黒が無しの場合に対応する。補正オンのときにピーク値が全体的に下がっているのが分かる。平坦度 $\frac{\langle I(t) \rangle^2}{\langle I^2(t) \rangle}$ ($I(t)$ はビーム強度) も実際、3.2% から 28.1% に改善している。次にスピルの周波数依存性の比較を Fig. 12 に示した。この比較によると、本システムは 100 Hz 付近のリプルを大幅に改善し、逆に 600 Hz あたりから悪化している。これはベータトロンチューン測定の結果ともコンシステントである。

本装置による平坦度 28.1% は利用運転時の 50% 前後 [6] に比べて良くないが、利用運転時の性能はスピル

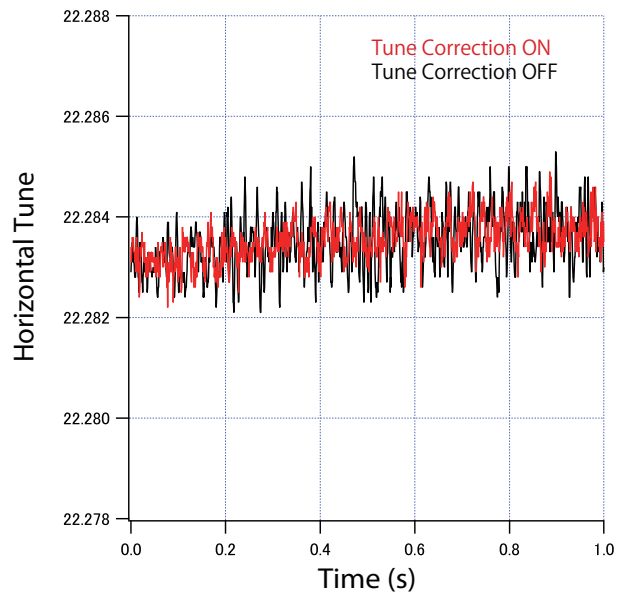


Figure 9: The betatron tunes as a function of time. The black line corresponds to the data without the correction while the red with the correction.

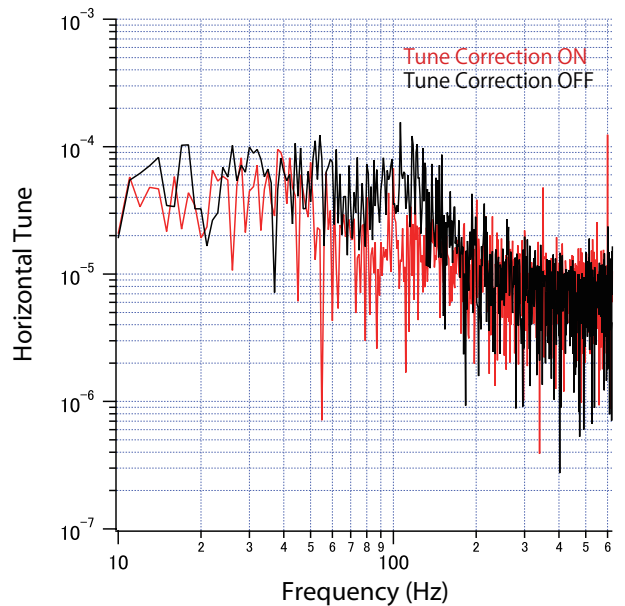


Figure 10: The betatron tunes as a function of frequency. The black line corresponds to the data without the correction while the red with the correction.

フィードバックシステムや Transverse RF の導入および反復的な調整の未到達した値であることを考慮しなければならない。ベータトロンチューンを補正する本装置は原理的にそれらの機器と共存可能であるし、本装置自身も帯域の最適化で改善の余地があることを今回の測定結果は示している。さらに、電流-磁場応答関数を現在測定中で、より高周波でも補正できるようになる可能性もある。

また、電流リップルを補正量としてスピル平坦度が改善したことは、スピル平坦度の悪さが電磁石電源の電流リップル起因であることが実験的に証明されたことと同値である。これがなされたのは J-PARC MR では初めてである。無論、ベータトロンチューンを最も大きく変動させるのは主電磁石であることは分かっていたのでほぼ間違いない予測ではあったが、主電磁石を OFF しての実験というのは不可能であったし、電流リップルをコントロールすることも非常に難しかった。今回の装置では 100 Hz 付近でのベータトロンチューンのリップルが 1/3~2/3 程度に減少させることに成功したが、現在製作およびインストール中 (2021 年度完成予定) の新主電磁石電源では同様の周波数帯の電流リップルが一桁程度減少することをすでに報告しており [1]、新主電磁石電源導入後のさらなるスピル平坦度向上も期待できる。

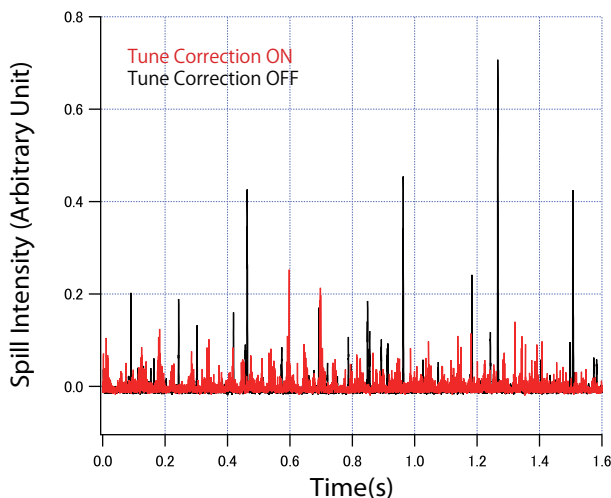


Figure 11: The spill intensity as a function of time. The black line corresponds to the data without the correction while the red with the correction.

7. まとめ

J-PARC MR では電磁石電源の出力電流リップルにより遅い取り出しビーム平坦性を悪くしている。そこで、私は偏向および四極電磁石の電流からベータトロンチューンの補正量を高速かつリアルタイムで計算するシステムを提案、構築した。本システムを導入したビーム試験では 100 Hz 付近の周波数帯のベータトロンチューン変動を 1/3~2/3 程度に低減し、それに伴い同じ周波数帯のスピル強度の変動も抑えることに成功した。スピル平坦度に関しては本装置単体で 3.2% から 28.1% まで改善した。今後は、現行利用運転のスピル平坦度 50% を超えることを目指して、本装置と現行のスピルフィードバック装置や Transverse RF が併用できる運転条件の探索を行いたいと考えている。また、本装置単体でも有効周波数帯域の最適化や電流から磁場の伝達特性をシステムに含めるなど、改善に取り組んでいく予定である。

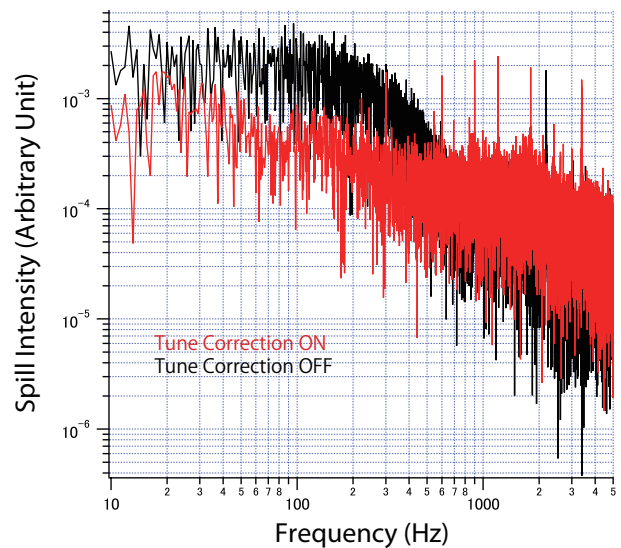


Figure 12: The spill intensity as a function of frequency. The black line corresponds to the data without the correction while the red with the correction.

謝辞

本研究では、AD ボードと絶縁アンプの配線作業を引き受けていただいたユニバーサルエンジニアリングの佐川隆さんに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] T. Shimogawa *et al.*, “First new power supply of main magnet for J-PARC main ring upgrade”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [2] Y. Morita *et al.*, Development of capacitor bank of J-PARC MR main magnet power supply for high repetition rate operation, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [3] Y. Morita *et al.*, “Stability test for power converters in high-powered operations for J-PARC MR main magnets”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A (in press). doi:10.1016/j.nima.2017.07.026.
- [4] S. Igarashi *et al.*, “Third Order Resonance Correction in J-PARC MR”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2015) 437–440.
- [5] Y. Kurimoto and K. Nakamura, “development and applications of a multi-purpose digital controller with a system-on-chip fpga for accelerators”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 840 (2016) 160–167. doi:10.1016/j.nima.2016.10.009.
- [6] M. Tomizawa *et al.*, “Present Status and Future Plans of J-PARC Slow Extraction”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2015) 70–74.
- [7] Y. Kurimoto, “Real-time Optics Corrections using Precise Measurement of the Current through Main Magnets”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2017) 1089–1093.
- [8] Y. Kurimoto, “A High Precision Power Supply For

PASJ2018 FROL11

Fast Pulse Current with a Digital Control System”,
IEEE Transactions on Applied Superconductivity(in press).
doi:10.1109/TASC.2016.2521443.

- [9] M. 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 (2012) 677–680.
- [10] 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 (2010) 1079–1081.