

J-PARC MR における横方向イントラバンチフィードバックの解析と高度化

ANALYSIS AND UPGRADE PLAN OF THE TRANSVERSE INTRA-BUNCH FEEDBACK SYSTEM IN THE J-PARC MR

外山 毅^{#, A), B)}, 岡田雅之^{A)}, 小林愛音^{A)}
Takeshi Toyama^{#, A), B)}, Masashi Okada^{A)}, Aine Kobayashi^{A)}
^{A)}J-PARC Center, KEK
^{B)}SOKENDAI

Abstract

In the J-PARC MR, according to the beam power upgrade over 100 kW, beam losses due to transverse collective beam instabilities had started to appear. We had introduced "bunch-by-bunch feedback" system in 2010. Continuing beam power upgrade over 250 kW again caused the transverse instabilities. We introduced "intra-bunch feedback" system in 2014. This has been suppressing those instabilities very effectively. But further beam power upgrade over 500 kW needs upgrade of "intra-bunch feedback" system. Overview and analysis of the present system is given as well as the upgrade paths.

1. はじめに

J-PARC MR では、ビーム強度増強（約 100 kW を超える付近）とともに横方向インスタビリティによるビームロスが最大ビームパワーを制限するようになったため、2010 年に横方向バンチ毎フィードバックを導入した[1]。その後のビーム強度増強に伴い（約 250 kW 前後）、再び横方向インスタビリティが問題となってきたため、2014 年に横方向イントラバンチフィードバックを導入した[2]。これにより、インスタビリティ抑制は大幅に改善したが、さらなるビーム強度増強により（約 500 kW 前後）、再度横方向インスタビリティが最大ビームパワーの制限要因の一つとなってきている。今後、ニュートリノ実験のために 1.3 MW 陽子ビームを安定に供給するためには、更なるビーム安定化が必要となる（ビームパワーは主リングサイクルに反比例する。1.3 MW への増強は、主リングサイクル短縮のための電源増強を含んでいる）。そのために、現在のフィードバックを使用・不使用時の、ビーム強度、バンチ数、クロマティシティと不安定性の関連性について議論する。そして今後のフィードバックの高度化の方策を提案する。

2. J-PARC MR における横方向ビーム不安定性

2.1 不安定性の概要

J-PARC MR のインピーダンスは、抵抗性壁、取り出し、入射キッカーなどの入出射機器であると考えられている (Fig. 1, 2)。これらによる横方向インスタビリティを抑え込みためには、ダンピングレートが 2000/sec 以上のフィードバックダンパーが必要であると考えられる[3]。

ここでは、単純化したシミュレーションおよび実

験による評価結果を述べる。

まず、インピーダンス源としては、直径 160 mm、厚さ 2 mm のステンレス SUS316L 製の円筒真空ダクト (MR 全周 1567.5 m に設置されていると仮定)、および速い取出しキッカー 5 台のみを考える。さらに詳細の検討は現在進行中である。

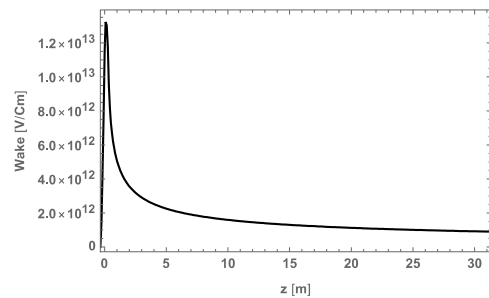


Figure 1: Resistive wall wake potential of the SUS316L vacuum duct, modeled with a cylindrical pipe of inner diameter 160 mm, thickness 2 mm, and length 1567.5 m.

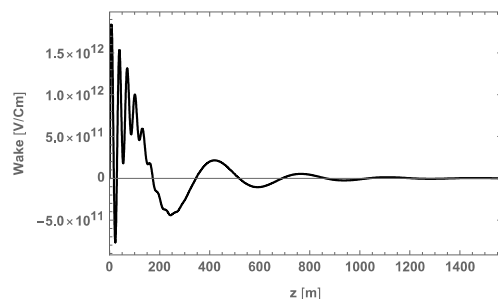


Figure 2: Wake model of the five fast-extraction kickers.

シミュレーションでは、横方向 1 自由度、縦方向 1 自由度、線形振動のみを考慮し、縦方向にウェークの変化に比べて十分小さいスライスを切って PIC

[#]takeshi.toyama@kek.jp

の手法で各マクロ粒子に働くウェーク力を評価した [4]。文献[2]で採用されている三角形の縦方向ビーム分布の重ね合わせでビーム形状を近似している。抵抗性壁[5]、速い取出しキッカーによる[6]、単位電荷三角形ビーム分布によるウェーク・ポテンシャルは、Fig. 1, 2 のようになる。このウェーク・ポテンシャルの減衰は十分早く、MR 1 周で約 1%にまで減衰するので、ここでは 1 周のウェークのみを考慮している。また、4 極ウェーク[7]の効果は考慮していない。

2.2 横方向イントラバンチフィードバック

現在のフィードバックダンパーの構成を Fig. 3、BPM を Fig. 4、Stripline kicker を Fig. 5 にそれぞれ示す。制御装置の基本的伝達関数はデジタル FIR フィルター

$$y[n] = g \sum_{k=0}^N b_k x[n-k]$$

となっている (iGp12 の標準 FIR フィルタ) [8]。ここで g はゲイン、 $x[n], y[n]$ はそれぞれ n ターン目の入・出力、 b_k は、 k ターン前の入力に掛けるフィルター乗数であり、

$$b_k = \sin(k\omega T_s + \Delta\phi) - \Delta$$

$$\Delta = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N \sin(k\omega T_s + \Delta\phi)$$

としている。N はフィルターのタップ数、 ω は周波数、 T_s はサンプリング時間 (MR 周回時間)、 $\Delta\phi$ は位相である。これらの FIR フィルターを各スライス毎に作用させる。m 番目のスライスについては

$$y_m[n] = g \sum_{k=0}^N b_k x_m[n-k]$$

と書ける。調整すべき変数は、タップ数、周波数、位相である。また、フィードバック系のオープンループゲインはビーム強度に比例することも考慮する必要がある。

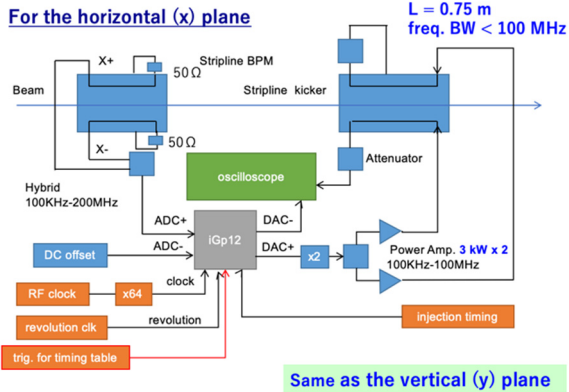


Figure 3: Schematic of the intra-bunch feedback system in the J-PARC MR.

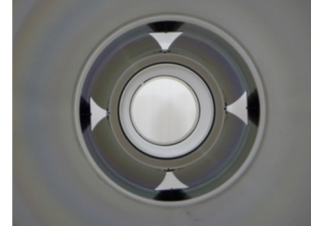


Figure 4: Tapered-coupler stripline BPM for the intra-bunch feedback system in the J-PARC MR.

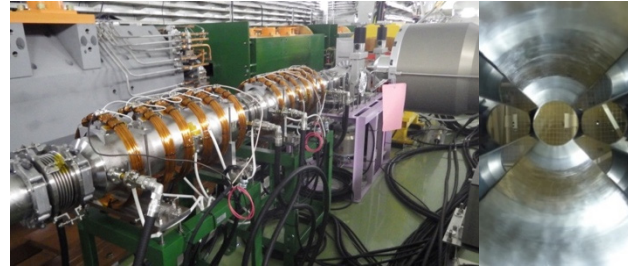


Figure 5: Stripline kickers for the intra-bunch feedback system in the J-PARC MR. The right photograph shows the vacuum side, DLC-coated electrodes and pipe wall.

2.3 実験による不安定性評価

J-PARC MR のインピーダンス 2019 年 1 月 23 日に MR の 3 GeV DC モードで行った実験のセットアップを Table 1 にまとめる。

Vertical intra-bunch feedback (FB) は常に ON とし、horizontal の intra-bunch FB は、8 bunch を入射後の K4+23ms まで FB ON とし、入射時の振動を減衰させ定常状態になるまで待った。その後 FB OFF とし、instability が起こった後、再び FB ON とし、growth, damping 時の BPM 差信号を測定した。その一例を Fig. 6 に示す。各周回毎の振動パワーを log scale で表示した。Figure 7 には実験中のビーム強度の推移を重ね書きした。150 ms 付近でビームロスが始まっているのは、FB OFF によりインスタビリティが成長したためである。

Table 1: Parameters of the Experiment	
Beam intensity	6.3E+13, 1.1E+14, 1.7 E+14, 2.3E+14
Tune (ν_x, ν_y)	(21.35, 21.44)
Chromaticity (ξ_x, ξ_y)	(-5.89, -7.89) "75% correction" (-0.16, -1.26) "95% correction"
Intra-bunch FB	Horizontal: ON - OFF - ON Vertical: ON
Synchrotron tune	0.0020 @180 kV

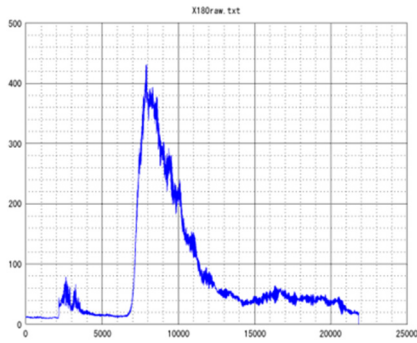


Figure 6: Growth and damping at the condition: $N_B=2.3E+14$, 95% ξ correction.

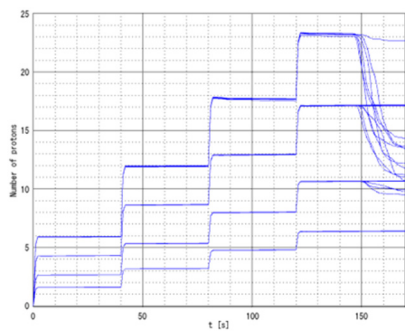


Figure 7: Beam intensity variation. Several shots are overlapped in the figure.

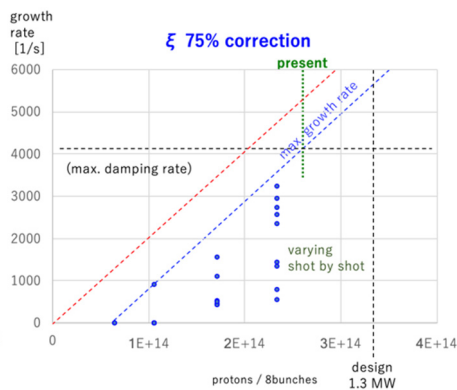


Figure 8: Growth rate measured with 75% ξ correction.

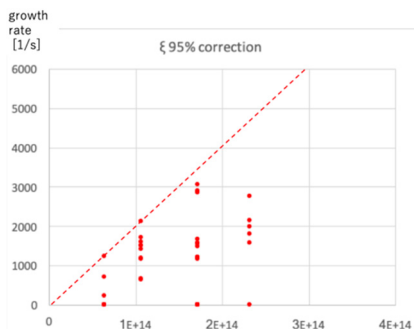


Figure 9: Growth rate measured with 95% ξ correction.

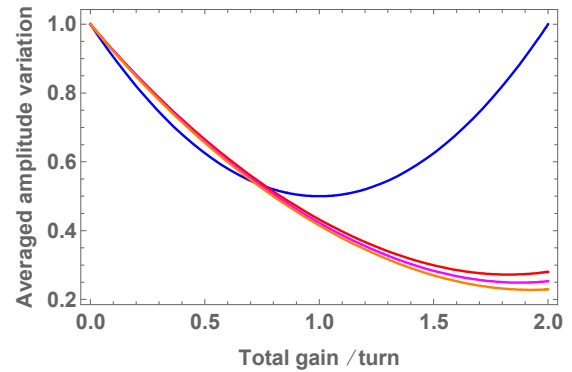


Figure 10: Averaged betatron amplitude variation with single (blue) or twin (red, magenta and orange) intra-bunch feedback systems. Curves with red, magenta and orange colors correspond to betatron tunes, 21.5, 21.25, 21.0.

クロマティシティ 75%補正、95%補正それぞれで、ビーム強度を変えて安定性を測定した結果を Fig. 8, 9 にまとめた。破線は、インスタビリティの最大増大率をつなぐ直線である。入射時の水平方向で約 $2.4E+14$ protons までは、現行の FB およびクロマティシティの調整により増大率 $\sim 4100/s$ までは抑制できている。

3. フィードバックシステムの高度化

将来計画として、1.3 MW へのビームパワー増強が考えられている[ref]。そのための 8 バunchのビーム強度は $3.3E+14$ protons である。前節で見たように、非線形電磁石の併用のもと、増大率 $\sim 4100/s$ までは抑制可能と考えられるが、さらに $3.3E+14$ protons に外挿すると、約 4 割増の増大率 $\sim 5600/s$ 程度を抑制することが必要となる。

現在検討している

- (1) イントラバunch・フィードバックシステムの 2 台体制
- (2) デジタル・フィードバックの基本周波数の高速化

について、以下に述べる。

3.1 2台システム

文献[8]で予備試験の結果が報告されており、一定の効果が認められた。2 台体制は、1 台システムでゲインを 2 倍にしたものと同等か、という疑問に関して、若干の考察を述べる。

MR 1 周でのベータトロン振動 (x, x') の振幅の減少の度合いを、 $0\sim 2\pi$ のベータトロン位相で平均化して比較する。各キッカーの場所では、そこでの x' に比例する補正キックを与えると仮定する。その比例係数をゲインとして、ゲインと平均振幅の関係を計算すると、Fig. 10 に示すように 1 台の場合は、ゲインを大きくしすぎる（蹴りすぎる）と返って減衰量が悪化してしまうが、2 台の場合は示した範囲では、ほぼ単調減少である。

今後、上記のシミュレーションを使って、さらに

詳細な検討を行う。

3.2 高速化

現在の処理周波数は加速 RF 周波数の 64 通倍である (107 - 110 MHz)。前述のシミュレーションでの結果では、この周波数では不安定が発生する (Fig. 11.a)。これを 2 倍の 128 通倍 (214 - 220 MHz) とすると十分な時間 (>100 ms) で安定である (Fig. 11.b)。今後さらに、粒子運動の非線形性 (空間電荷効果を含む)、複数バンチ、アナログ回路系の周波数特性、雑音の影響を考慮した詳細な検討が必要であるが、ここまでの範囲では、Fig. 12 で示したように、クロックの時間帯で同一キックを与えるので、最適値からズレた時間帯で不安定性が抑制できなくなると考えられる。同様な効果がバンチ毎フィードバックにおいて検討されている[9]。

さらに、ハードウェアの高度化：処理回路の高速化、キッカーの高速化が必要となる。高速・広帯域キッカーとしては、短尺のストリップラインキッカーを複数台並べる[10]、スロット[11]の可能性が

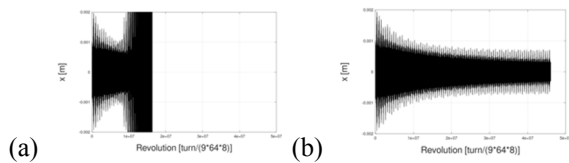


Figure 11: Stability vs processing clock frequency. Multiplication factors of 64 (a) and 128 (b) of the acceleration RF clock (simulation).

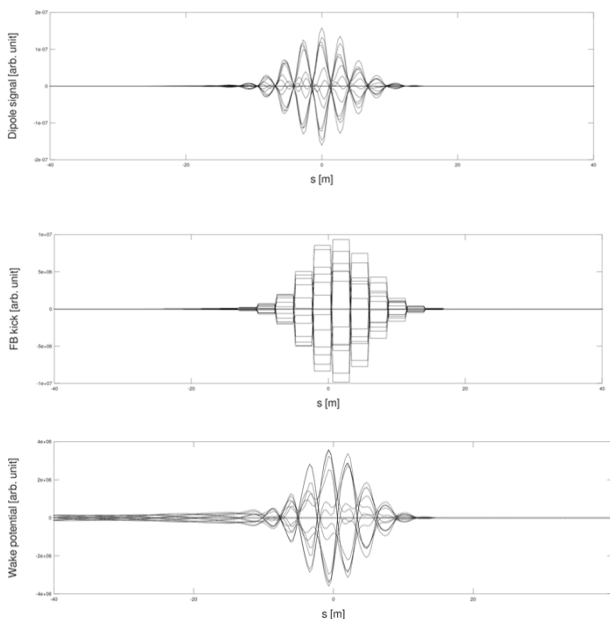


Figure 12: Dipole signals (upper), feedback kick signals (middle) and wake (lower) with the processing clock of 64 multiple of the acceleration RF clock, overlap of 13 turns (simulation).

4. まとめ

J-PARC MR のイントラバンチ・フィードバックで抑制されているインスタビリティの増大率を測定した。また、1.3 MW に向けたフィードバック・システムの高度化の方針：(1) 2 台システム化、および (2) 高速化 について検討した。今後、詳細な検討が必要である。

謝辞

ビームを使った実験では、ビームコミッションング、RF、電磁石電源の各グループの方々に、実験条件を整えていただきました。

参考文献

- [1] Y. Kurimoto *et al.*, "The bunch by bunch feedback system in J-PARC Main Ring", Proc. of DIPAC2011, p.482, 2011.
- [2] K. Nakamura *et al.*, "INTRA-BUNCH FEEDBACK SYSTEM FOR THE J-PARC MAIN RING", Proc. of IPAC2014, p.2786, 2014.
- [3] JHF Project Office, JHF Accelerator Design Study Report, KEK Report 97-16, (1997).
- [4] G. Sabbi, TRISIM user's guide, CERN SL/94-73(AP),1994.
- [5] Y. Shobuda and K. Yokoya, Phys.Rev.E66, 056501 (2002).
- [6] T. Toyama, private communication.
- [7] A. Kobayashi *et al.*, "The investigation on the time structure of the wake field at the J-PARC MR" in these proceedings.
- [8] M. Okada *et al.*, "DUALIZE OF INTRA-BUNCH FEEDBACK SYSTEM IN J-PARC MR", proc. of pasj2018, p.1044, 2018.
- [9] E. Kikutani, "POSSIBLE HEAD-TAIL OSCILLATION OF BUNCHES DUE TO A TRANSVERSE FEEDBACK KICKER", Particle Accelerators, 1996, Vol. 52, pp. 251-273.
- [10] T. Toyama *et al.*, "Improved Frequency Characteristics Using Multiple Stripline Kickers", IPAC2019.
- [11] L. Faltin, "SLOT-TYPE PICK-UP AND KICKER FOR STOCHASTIC BEAM COOLING", NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS 148 (1978) 449-455.