

## J-PARC Main Ring における大強度運転

### HIGH POWER BEAM OPERATION OF THE J-PARC MAIN RING

佐藤洋一<sup>#,A)</sup>, 五十嵐進<sup>A)</sup>, 白形政司<sup>A)</sup>, 高野淳平<sup>A)</sup>, 山田秀衛<sup>A)</sup>, 山本昇<sup>A)</sup>, 小関忠<sup>A)</sup>,  
原田寛之<sup>B)</sup>, 田村文彦<sup>B)</sup>, 大見和史<sup>A)</sup>, 佐藤健一郎<sup>A)</sup>, 橋本義徳<sup>A)</sup>, 外山毅<sup>A)</sup>, 手島昌己<sup>A)</sup>, 岡田雅之<sup>A)</sup>,  
大森千広<sup>A)</sup>, 中村衆<sup>A)</sup>, 杉本拓也<sup>A)</sup>, 石井恒次<sup>A)</sup>, 魚田雅彦<sup>A)</sup>, 原圭吾<sup>A)</sup>, 發知英明<sup>B)</sup>, 山本昌亘<sup>B)</sup>  
Yoichi Sato<sup>#,A)</sup>, Susumu Igarashi<sup>A)</sup>, Masashi Shirakata<sup>A)</sup>, Junpei Takano<sup>A)</sup>, Shuei Yamada<sup>A)</sup>, Noboru Yamamoto<sup>A)</sup>,  
Tadashi Koseki<sup>A)</sup>, Hiroyuki Harada<sup>B)</sup>, Fumihiko Tamura<sup>B)</sup>, Kazuhito Ohmi<sup>A)</sup>, Kenichirou Satou<sup>A)</sup>, Yoshinori  
Hashimoto<sup>A)</sup>, Takeshi Toyama<sup>A)</sup>, Masaki Tejima<sup>A)</sup>, Masashi Okada<sup>A)</sup>, Chihiro Ohmori<sup>A)</sup>, Shu Nakamura<sup>A)</sup>, Takuya  
Sugimoto<sup>A)</sup>, Koji Ishii<sup>A)</sup>, Masahiko Uota<sup>A)</sup>, Keigo Hara<sup>A)</sup>, Hideaki Hotchi<sup>B)</sup>, Masanobu Yamamoto<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> KEK / J-PARC, <sup>B)</sup> JAEA / J-PARC

#### Abstract

The J-PARC main ring (MR) provided high power proton beams of 220~240 kW to the neutrino experiment. The J-PARC linac output energy was upgraded from 181 to 400 MeV in 2014 operation. Several improvements and upgrades were also performed and newly utilized in the MR. Especially, to reduce beam losses, the improvement of the injection kickers and applying the transverse intra-bunch feed-back system were very effective. To localize beam losses in the collimator area, beam duct replacement and RF voltage modification were effective. Fall 2014, the ion source current will be upgraded from 30 to 50 mA, and we seek over 300 kW operation in the MR. For the high power operation, we checked the capability of using 2nd harmonic RF cavities, and sum resonance correction. In this presentation these commissioning procedures and beam dynamics simulations are shown, and our upgrade plan is discussed.

#### 1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) は H<sup>-</sup>リニアック (LINAC)、速い繰り返しりの 3 GeV シンクロトロン (RCS)、遅い繰り返しりの主リング (MR)、3つの実験施設から成り立っている。LINAC では H<sup>-</sup>ビームを、2013 年夏までは 181 MeV まで加速し、2014 年からは 400 MeV まで加速して、RCS に 0.5 ms かけて多周回で入射している<sup>[1]</sup>。RCS で蓄積・加速した 3 GeV の大強度陽子ビームは、物質生命科学実験施設 (MLF) での中性子と  $\mu$  粒子生成に利用され、また MR の入射ビームとしても利用されている。MR では、3 GeV の陽子ビームを 30 GeV まで加速後、2 つの手法で取出している。速い取出し法 (Fast Extraction, FX) での出射ビームはニュートリノ実験施設で T2K 実験に利用され、遅い取出し法 (Slow Extraction, SX) での出射ビームはハドロン実験施設で利用されている。実験期間に応じて FX と SX を切り替えて運転している。このうち、FX 出射では 2013 年から 2014 年春までに 220~240 kW の陽子ビームが実験に利用された。Figure 1 は MR FX 240 kW 運転における粒子数の積み上げと粒子エネルギーの典型的なパターンを示す。3 GeV で 2 バンチ毎の入射を 40 ms 置きに 4 回行ったあと、パラボラ加速と線形加速を組み合わせ 1.4 s かけて 30 GeV まで加速して取出している。2013 年 5 月までのビーム運転では、2012 年までに採用した、バンチ毎の横方向フィードバック、ビームローディング補償、加速開始時のチューン変動を抑えるための主電磁石の調

整、ビーム不安定性による横方向振動を抑制するための 6 極電磁石によるクロマティシティ補正パターンの調整、コリメータバランスの最適化といった運転指針<sup>[2]</sup>を基本に、ビーム強度を上げるために、繰り返し周期を 2.48 s に短縮した。2013 年のシャットダウン期間で MR ではコリメータ容量を 2 kW から 3.5 kW に増強、入射キッカーの改良、コリメータ近傍と Dispersion Peaks のダクトのチタン化を実行した。2014 年の MR FX 運転では、LINAC エネルギー引き上げに伴う上流条件の変更に対し、これらの増強点の利用、バンチ内振動抑制を可能とする横方向フィードバックの新規導入をしながら、機器放射化の抑制のためコリメータへのビームロス局所化と、ビームロスの平均値を 600 W 以下に抑えることを指針とした。また、2014 年シャットダウン期間に予定されている LINAC のピーク電流値の 30 mA から 50 mA への増強に対応すべく、和共鳴補正の効果確認、2 倍高調波 RF 導入によるビーム幅抑制効果の確認も行った。本稿ではこれらの FX 調整のビームロス抑制、局在化について述べるとともに、今後のビーム強度の増強について議論する。

#### 2. ビームロス抑制とロス局在化

##### 2.1 2014 年春での新運用点

MR 入射キッカーの立下りと反射波は、周回ビームを横方向に蹴ることで入射時のロスの主要因となっている。入射キッカー本体の改良<sup>[3]</sup>と、横方向へのバンチ毎フィードバック (BBFB) およびバンチ内フィードバック (Intra-BFB) <sup>[4,5]</sup>の適用により入射時のロスが大きく軽減された。

<sup>#</sup> yoichi.sato@j-parc.jp

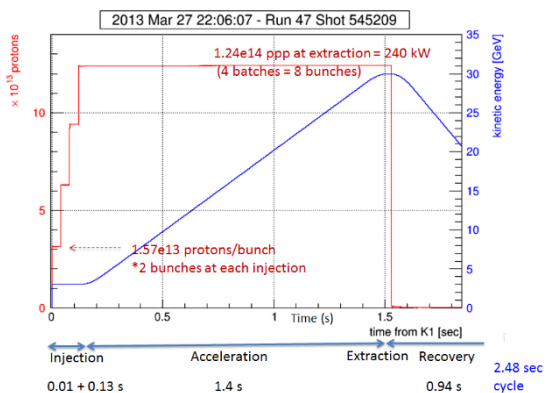


Figure 1: Typical operation status of MR Fast Extraction. The red line is accumulated proton numbers and the blue line is the kinetic energy pattern in a 2.48 s cycle.

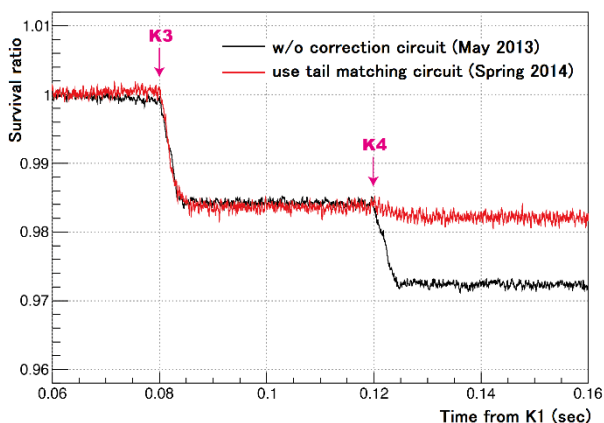


Figure 2: Effect of the injection kicker improvement on the beam intensity. K1 injected bunches are kicked by the reflection pulse part of the injection kicker field at K3, and by its tail part at K4. The tail matching circuit has been adopted since March 2014, and it reduced beam losses at K4.

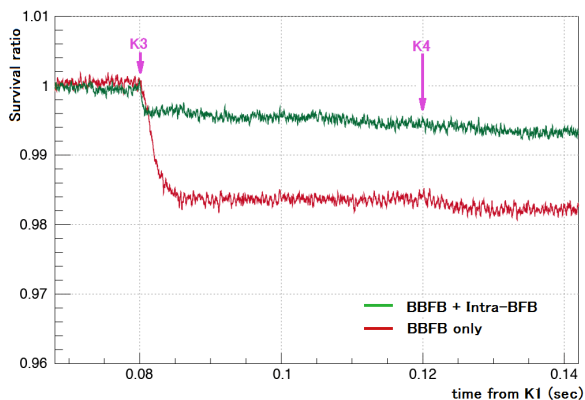


Figure 3: Effect of the transverse feed-back systems on the beam intensity. The red line shows for using the bunch-by-bunch feed-back only, and the green line shows for adding the intra-bunch feed-back system. The red line is the same as the red line in Fig. 2.

Figure 2 は、入射キッカー改良の前後で、リング内に設置された電流モニターDCCT で測定したビーム生存率を比較したものである。計 4 回の入射タイミングを順に K1, K2, K3, K4 と呼ぶ。K1 で入射したビームは、K3 で反射波由来のロスを生じ、K4 で立下り由来のロスを生じている。入射キッカーで新たにマッチング回路を追加した結果、K4 でのロスが大きく改善されたことがわかる。入射キッカー反射波対策としては、現在補助キッカーを新規開発し 2015 年中の導入を目指している<sup>[3]</sup>。

Figure 3 は、2012 年から用いている BBFB に加え、Intra-BFB も合わせて適用したときのビーム生存率である。入射キッカーの条件は新マッチング回路追加後のものである。Intra-BFB の適用で K3 ロスが大きく改善された。これは入射キッカー反射波に乗った周回ビームの、バンチ内での横方向の歪みが Intra-BFB により効率よく補正された結果と考えられる。

Intra-BFB は元々ビーム不安定性対策として導入された。この効果は、Intra-BFB 導入後に、6 極電磁石による補正を強めて、待ち受け時間におけるクロマティシティを導入前の  $\sim -4$  から  $\sim -1$  に引き上げても、ビーム不安定性を引き起こさずにロス軽減調整が可能になったことで確認されている。2014 年秋からは、加速中も含めた、チューンパターン、クロマティシティ補正パターン、Intra-BFB 設定の最適な組み合わせ探索を行い、ロスの最小化を目指す。

2014 年春には MR でのビーム位置モニター (BPM) の全台数 186 台に対し、beam-based alignment (BBA) が完了した。その結果、高精度の COD 補正が可能となり、ロス軽減に寄与している<sup>[6]</sup>。

RCS では、横方向ペイント入射エリアとして  $100 \pi \text{ mm mrad}$ ,  $50 \pi \text{ mm mrad}$  の調整を行い、MR へのロスに寄与することが確認された。今回は低ロスであった後者を選んだが、ビーム強度が上がるとともに最適なペイント入射エリアは変化すると考えられ、その都度の最適化を行う。

RCS と MR を繋ぐ輸送ラインである 3-50BT では、コリメータエリアの Achromatic 調整による、MR と 3-50BT ロスのバランス化、3-50BT から MR への Dispersion 漏れの補正を 2014 年春から調整を始めた。秋以降に Twiss マッチングも含めた本格調整を行う<sup>[7,8]</sup>。

## 2.2 2014 年春でのビームロス局在化

MR は上流から、コリメータエリアを含む入射直線部 Ins A とその下流アーク部 Arc A、SX エリアを含む直線部 Ins B とその下流アーク部 Arc B、RF 空洞と FX エリアを含む直線部 Ins C とその下流アーク部 Arc C から構成される。ビームロスの局所化が規定されているコリメータエリアとその直下の Arc A 上流側だけでなく、Arc A 下流側、Arc B、Arc C の Dispersion Peaks でも残留線量が高いことが 2013 年春までの運用の課題となっていた<sup>[9]</sup>。そのため放射化抑制を目的として、2013 年シャットダウン期間に、コリメータエリアとその下流に加えて、全周の各 Dispersion Peak 近傍の 6 極電磁石とその両隣の 4

極電磁石のダクトを SUS 製からチタン製へ交換した。特に Dispersion Peaks 近傍のダクトは素材を変えるだけでなく、水平方向口径を 130 mm から 142 mm に広げた<sup>[10]</sup>。また、リングコリメータの台数を 4 台から 7 台に増強した。

2014 年春ではセクション 2.1 で述べたビームロス抑制が成功裏に進んだため、その後ビームロスを 100 W 程度引き上げることを許容した上で、ビームロス局在化調整を進めた。まず、リングコリメータの最適化を進めたが、システム的大幅な変更に対して、調整時間が限られたため、調整途上となっている。今後実験を再現したシミュレーションから最適解を得るべく検討中である。

次に考えたのは RF 電圧操作の可能性である。リング内のロス分布の時間構造を調査すると、加速初段のパラボラ加速から線形加速に移行した時間帯で Arc 部にロスがあることがわかった。この時間帯では、RF bucket の momentum filling factor がピークを迎えることから、longitudinal beam emittance を小さくすべく、加速時の最大 RF 電圧を 280 kV のままにした上で、待ち受け時 3 GeV での RF 電圧を 160 kV から 180 kV に引き上げた。その結果入射時のロスは RCS とのミスマッチが増大したため、20 W 程度増加したが、加速中ロス量は同程度のままロスの Ins A, Arc A 上流への局在化に成功した。なお、同時時間帯は、チューン補正、ビーム不安定性抑制のためにクロマティシティを  $\sim -1$  から  $\sim -2$  に変更するなど、複合的要素が多い。Figure 4 は、2014 年 5 月までと 2014 年 6 月から採用した RF 電圧パターン。Arc 部でのロス信号の和の時間構造は、RF 電圧パターン変更前のものが Fig. 5、変更後は Fig. 6。Fig. 7 は RF 電圧パターン変更前後での、Dispersion Peak 近傍でのロストレンドを示す。

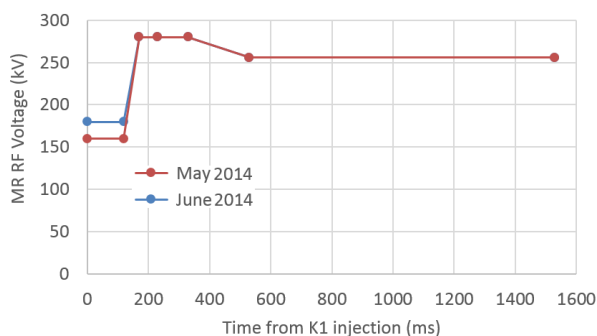


Figure 4: RF voltage pattern in May 2014 and June 2014. The patterns were switched at 2014/05/30 16:00.

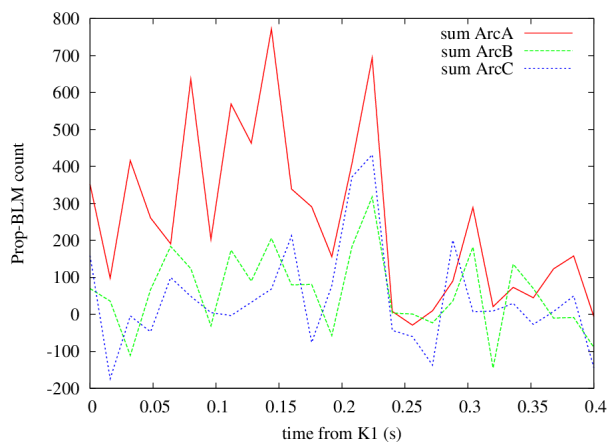


Figure 5: The time structure of beam loss at each arc in May 2014. The counts of BLMs are summed in each arc.

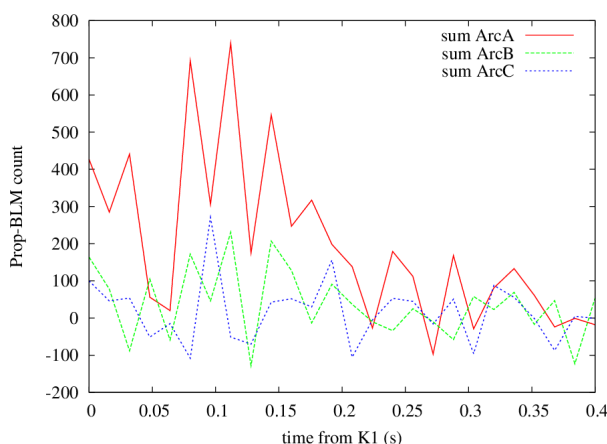


Figure 6: The time structure of beam loss at each arc in June 2014. The counts of BLMs are summed in each arc.

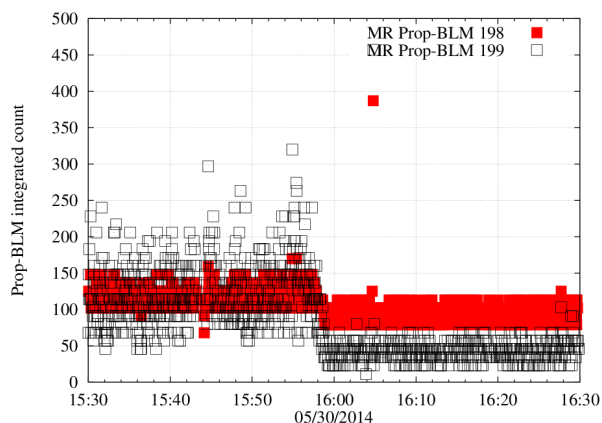


Figure 7: Trend of the time integrated BLM count around a dispersion peak in Arc C before and after switching the RF voltage pattern at  $\sim 16:00$  05/30/2014. BLMs at other dispersion peaks also show the similar change.

Table 1: Radioactive at dispersion peaks: measured at 2 weeks after FX operations in 2013 and 2014.

Magnet name	May 2013	July 2014
QFX054 in Arc A	250 $\mu$ Sv/h (SUS)	28 $\mu$ Sv/h (Ti)
QFX098 in Arc B	1.0 mSv/h (SUS)	30 $\mu$ Sv/h (Ti)
QFX198 in Arc C	460 $\mu$ Sv/h (SUS)	40 $\mu$ Sv/h (Ti)
BM130 in Arc B	200 $\mu$ Sv/h (SUS)	130 $\mu$ Sv/h (SUS)

Table 1 は FX~220 kW 運転終了から約 2 週間経った Dispersion peaks (3 m at 3 QFXs, -1.2 m at BM130) での残留線量の 2013 年 5 月と 2014 年 7 月の比較である。QFX、BM130 ともに残留線量の大幅な低減が見られる。QFX についてはダクトのチタン化および水平方向の口径拡張の影響、2013 年春までの放射化履歴、RF 電圧操作の全てが複合した結果である。BM130 に関してはダクトを変更していないため、2014 年春の運用で放射化の抑制ができたと言える。ダクトチタン化の評価は、今後も真空グループ、モニターグループ、コミッションンググループで検討を進めていく。

### 2.3 2014 年秋以降の運用方針

上流から来るバンチあたりの粒子数が 2014 年春より 6 割増しになることから、空間電荷効果由来の incoherent tune spread への対策が必要となる。対応策としては、2 倍高調波 RF 導入による bunching factor の早い引き上げでの tune spread 抑制<sup>[11]</sup>、共鳴ラインの補正、そして現在の tune operating point よりも広いチューナビリティを持つ operating point の探索を実験とシミュレーションの両方から継続的に行う。

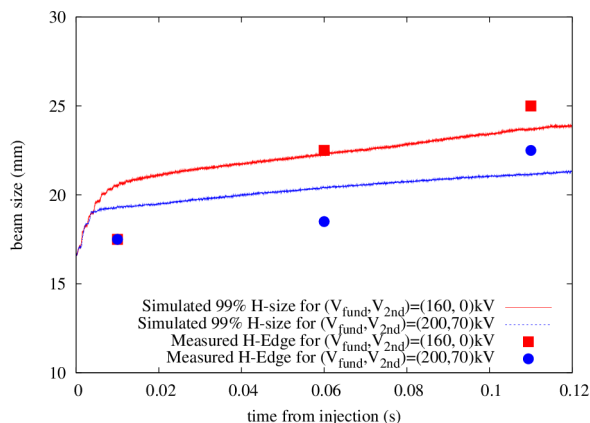


Figure 7: Beam edge horizontal radii for fundamental harmonic RF only ( $V_{fund} = 160$  kV) and for adding 2nd harmonic RF ( $V_{fund} = 200$  kV,  $V_{2nd} = 70$  kV). Solid lines are simulated 99% radii, and plots are measured beam edge with the flying wire.

Figure 7 は 2 倍高調波 RF を導入した場合のビームサイズ抑制効果を 2014 年春に確認したものである。入射からの 3 時点において、リング内に設置した f

flying wire profile monitor により測定された 20 ms 平均の水平方向ビームファイルの裾幅 (点) と空間電荷効果を含む多粒子シミュレーションからの 99% エミッタンスのビーム幅 (実線) の 2 倍高調波導入有無に対する傾向は、シミュレーション条件が測定条件とは完全に一致しているわけではないが概ね一致している。なお、RCS の取り出し RF 電圧と MR RF 電圧のバランスには最適化の余地がある。2014 年秋以降、2 倍高調波 RF の利用運転での採用を検討しているが、この場合周回ビームのバンチ長が~200 ns から 400 ns 近くまで伸びるため、入射キッカーの立ち上がり時間の高速化を要求する。2014 年春までに、立ち上がり時間への要求を満たす入射キッカー調整条件は整備済だが<sup>[3]</sup>、この調整は反射波の増加が同時に見込まれるため、補助キッカー導入以前に利用運転に採用できるか否かは Intra-BFB の効果を見て決めることになる。

共鳴ラインの補正のツールとしては、和共鳴に対してはスキュー4 極電磁石、三次共鳴に対しては 6 極電磁石による補正を検討している。2014 年春までのビーム強度では利用運転に採用する必要はなかったものの、和共鳴補正は加速時でも可能なことを確認している<sup>[12]</sup>。また、ビーム不安定性抑制のため 8 極電磁石を用意し、秋以降に調整を予定している<sup>[13]</sup>。

### 3. まとめ

2014 年春に、MR 入射キッカーの改良によるキッカー電流波形立下りの高速化、バンチ内横方向フィードバックの導入は、ロス抑制に大きな効果があった。またビームロスのコリメータエリア局所化と放射化抑制を進めることが出来た。今後のイオン源カレント増加に対応すべく、今までの運用方法に加え、共鳴補正、2 倍高調波 RF の導入、tune operating point の新領域探索を進め、秋からの運転で ~300 kW 運転を目指す予定である。

### 参考文献

- [1] T. Koseki, et al., in this proceedings, FSP010.
- [2] Y. Sato, et al., proc. pasj9, Osaka, Japan, 2012, p. 16.
- [3] T. Sugimoto, et al., in this proceedings, SUOL04.
- [4] K. Nakamura, et al., in this proceedings, SAOM03.
- [5] Y. H. Chin, et al., in this proceedings SAOM05.
- [6] T. Toyama, et al., in this proceedings, SAP088.
- [7] H. Harada, et al., proc. the 2<sup>nd</sup> J-PARC symposium, Tsukuba, Japan, 2014.
- [8] Y. Sato, et al., proc. the 2<sup>nd</sup> J-PARC symposium, Tsukuba, Japan, 2014.
- [9] K. Satou, et al., proc. the 2<sup>nd</sup> J-PARC symposium, Tsukuba, Japan, 2014.
- [10] M. Uota, et al., private communication.
- [11] F. Tamura, et al., private communication.
- [12] J. Takano, et al., proc. the 2<sup>nd</sup> J-PARC symposium, Tsukuba, Japan, 2014.
- [13] S. Igarashi, et al., in this proceedings, SAP013.