

# J-PARC MR におけるビーム強度増強についての検討

## STUDY ON THE BEAM INTENSITY UPGRADE OF J-PARC MR

五十嵐進<sup>#,A)</sup>, 大見和史<sup>A)</sup>, 佐藤洋一<sup>A)</sup>  
Susumu Igarashi<sup>#,A)</sup>, Kazuhito Ohmi<sup>A)</sup>, Yoichi Sato<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup>High Energy Accelerator Research Organization

### Abstract

Upgrade schemes for the beam intensity of the main ring (MR) of Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) have been studied with simulations. MR delivered 30 GeV proton beams with the beam power of 500 kW at maximum to the neutrino facility in the recent operation. The number of accelerated protons was  $2.61 \times 10^{14}$  protons per pulse (ppp). The upgrade plan is promoted for the beam power of 1.3 MW with the faster cycling of 1.16 s from the present cycle time of 2.48 s. Upgrades of the magnet power supplies and RF system are in progress for the faster cycling. Furthermore the intensity upgrade to  $3.3 \times 10^{14}$  ppp is necessary. The beam loss reduction is important in high intensity accelerators to avoid the residual radiation. The high intensity operation has been simulated with taking the space charge effects into account. The simulations were performed for the present beam intensity to reproduce the present status of the beam loss and further for the target beam intensity to estimate the beam loss. We studied the structure resonances as the causes of the beam loss. Possible operation tunes are then explored for better beam survivals.

### 1. はじめに

大強度陽子加速器施設(J-PARC)の主リング(MR)のビーム強度増強について、シミュレーションによる検討を行った。MRのビームパワーは Fig. 1 に示すように漸次増強を行っており、最近のランでニュートリノ実験のための速い取り出し(FX)モードで最大 500 kW のビームパワーで 30 GeV の陽子を供給した。繰り返し周期は 2.48 s で、取り出し時の陽子数は  $2.61 \times 10^{14}$  protons per pulse (ppp) としている[1]。

繰り返し周期を 1.32 s とすることで MR の現状の設計値 750 kW を超えるビームパワーを目指し、電磁石電源、高周波加速空洞、入出射機器の増強を行っている。

ニュートリノ振動実験 T2K で CP 対称性の破れの測定のため更なるビームパワーの増強を目指し、1.3 MW とすることを検討している[2]。繰り返し周期は 1.16 s とし、取り出し時の陽子数は  $3.3 \times 10^{14}$  ppp とし、目標を達成することを考えている。繰り返しを速くし、ビーム強度を増やすため、高周波加速空洞、コリメータなどの増強の検討が行われている。それに加えて、加速陽子数を 30 % ほど増やす必要がある。

大強度陽子加速器ではビームロスによる機器の放射化が大きな問題で、ビームロスの低減がビーム強度増強において重要となっている。現在のビーム強度でのビームロスについてシミュレーションで再現性を確認し、将来のビーム強度でのビームロスの予想を行った。ビームロスの原因としてベータatron 振動における構造共鳴の影響を考慮して、ビームロスの低減について検討した。シミュレーションは空

間電荷効果を考慮した粒子トラッキングプログラム SCTR[3]を用いた。

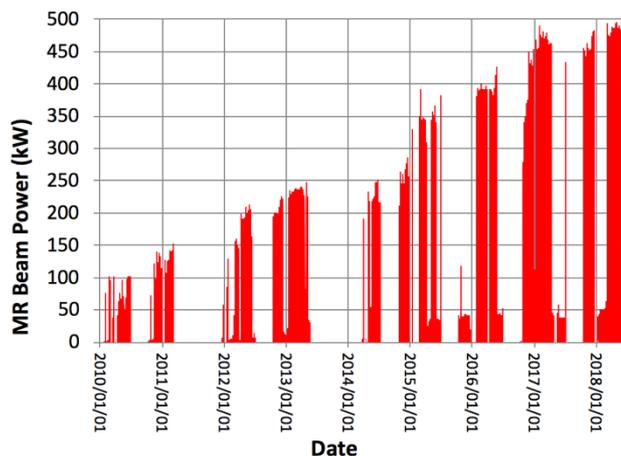


Figure 1: History of MR beam power since 2010.

### 2. FX オペレーションの現状

FX モードでは、8 バンチの 3 GeV の陽子ビームを 4 回に分けて 0.13 s 間に MR に入射する。1.4 s かけて 30 GeV まで加速し、ニュートリノビームラインへ 1 ターンで取り出す。Figure 2 にビームパワー 504 kW のショットのビーム強度を示す。取り出し時の陽子数は  $2.61 \times 10^{14}$  ppp で、ビームロスは 700 W となっていた。約 1.5% のビームをロスしていることになる。コリメータによりビームロスは概ねコリメータエリアに局在化できている。ロス量はコリメータの容量の 2 kW 以下に収まっている。

<sup>#</sup>susumu.igarashi@kek.jp

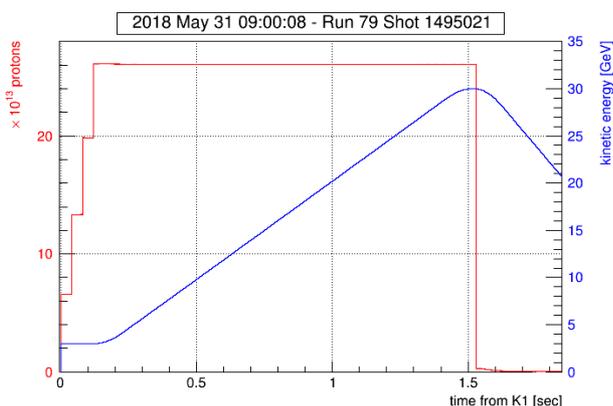


Figure 2: Beam intensity (shown in red) for a user-operation shot of the beam power of 504 kW as a function of the cycle time.

### 3. 入射ビームのエミッタンス

#### 3.1 横方向エミッタンス

シミュレーションの初期分布として使用するために、ビーム強度  $1.38 \times 10^{13}$  protons per bunch (ppb) から  $3.93 \times 10^{13}$  ppb までの入射ビーム分布を測定した。3-50BT でのビームプロファイルを 10 台のマルチリボンプロファイルモニタ(MRPM)と 1 台のオプティカルトランジションモニタ(OTR)で測定した。MRPM#1 はバイアスが規定の値まで上がらず、今回はデータを使用しないこととして、他の MRPM 9 台と OTR 1 台の結果を使用した。分布は概ねガウス分布となっており、ガウス関数でフィットした。SAD[4]を使い、水平方向および垂直方向のビームサイズ 10 箇所での測定から、3-50BT の始点であるパルスバンドでのツイスパラメータ ( $\alpha_x, \beta_x, D_x, D'_x, \alpha_y, \beta_y$ ) とビームエミッタンス ( $\epsilon_x, \epsilon_y$ ) を求めた。その結果を Fig. 3 に示す。

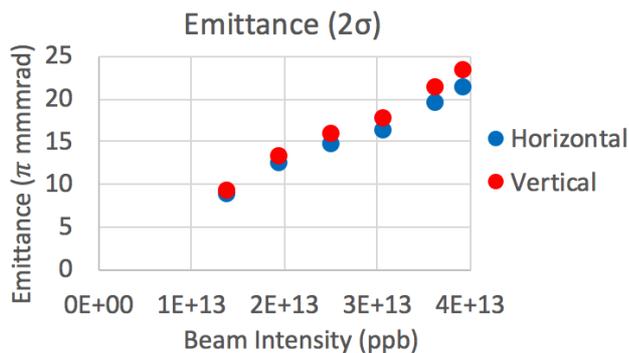


Figure 3: Horizontal (blue circles) and vertical  $2\sigma$  emittances (red circles) of the injection beam as a function of the beam intensity.

大強度になるほど水平・垂直ともにエミッタンスが増大することが分かる。2.48 s 周期での 470 kW 運転では  $3 \times 10^{13}$  ppb の粒子数であり、そこでの水

平・垂直エミッタンス( $2\sigma$ )は  $17\pi$  mm mrad と  $18\pi$  mm mrad となっている。また、将来の 1.16 s 周期での 1.3 MW 運転では  $4 \times 10^{13}$  ppb の粒子数であり、そこでの水平・垂直エミッタンスは  $21\pi$  mm mrad と  $23\pi$  mm mrad となっている。

#### 3.2 縦方向分布

ウォールカレントモニタを使って、入射時の縦方向分布を測定した。Figure 4 に入射直後から 20 ms の間のバンチングファクターを示す。この測定ときは、基本波 RF を 155 kV とし、2 次高調波を 110 kV としていた。入射直後のバンチングファクターは 0.2 で、その後 0.3 程度となっている。

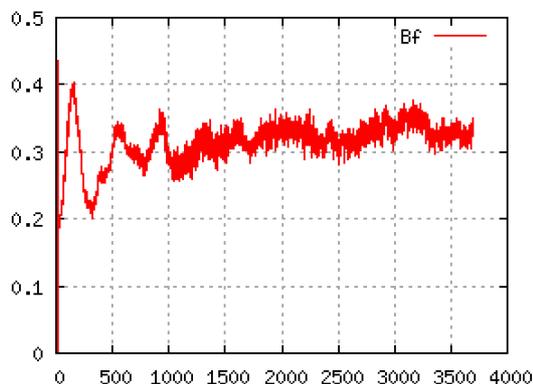


Figure 4: Bunching factor as a function of the turn number. The turn of 4000 corresponds approximately to 20 ms.

### 4. 現状のシミュレーション

空間電荷効果を考慮したシミュレーションを行い、470 kW でのオペレーションの再現性を確認した。入射ビームの分布としては前セクションでの結果に基づき、水平・垂直方向ともに  $2\sigma$  エミッタンスとして  $16\pi$  mm mrad とした。また、縦方向はバンチングファクターを 0.2 とした。

Figure 5 に 470 kW 相当の 2 バunch を K1 タイミングで入射したビームサバイバルの実測値と、空間電荷効果を考慮したシミュレーションプログラム SCTR の計算結果を示す。この計算では、偏向・四極・六極電磁石のばらつき、多極成分、設置誤差について磁場測定結果などを基にしたものを使用している。また、毎ターン全ての粒子のエミッタンスを確認し  $60\pi$  mm mrad を超えた場合にはロスとしている。双方とも約 98% のサバイバルとなっており、概ね一致している。ただし、より正確な比較のためには、以下に述べる 2 点について検討が必要となる。

1. 入射直後に少しの入射エラーを種として横方向のコヒーレント振動が観測されている。その振動は、イントラバンチフィードバックシステムにより概ね抑制されているが、少し残っており、それにより横方向分布が少し増えていると考え

られる。その効果は SCTR 計算には考慮されておらず、ビームサバイバルは実際には少し悪くなると考えられる。定量的な評価のためには、コヒーレント振動が収まった後の横方向分布を、今後測定する必要がある。

- 470 kW の実測値については共鳴補正を行っており、共鳴補正を行っていない SCTR 計算値と比べると、実測値のサバイバルが良いはずである。ただし、共鳴補正も全ての共鳴について補正している訳ではなく、完全に補正出来ている訳ではないので、共鳴補正の効果を定量的に評価できていない。

1.3 MW 相当ビームについてのシミュレーション結果を Fig. 5 に示す。入射ビームの分布としては前セクションでの結果に基づき、水平・垂直方向ともに  $2\sigma$  エミッタンスとして  $24\pi$  mm mrad とした。また、縦方向はバンチングファクターを 0.2 とした。ビームロスが 5% 以上となっており、実用的にオペレーション可能な状態にはなっていない。

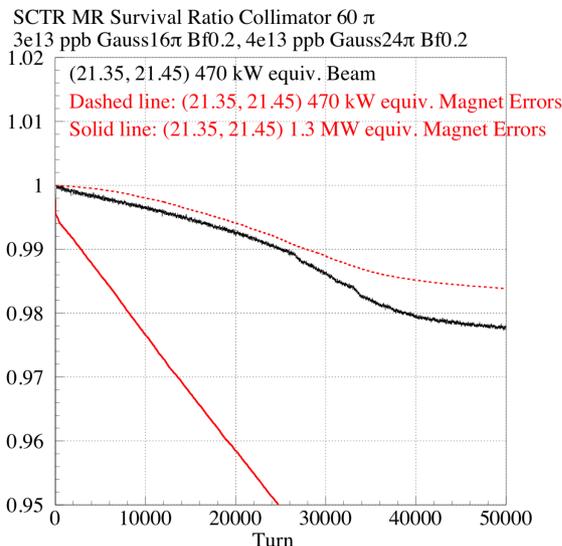


Figure 5: The measured beam survival for 1-batch beam of 470 kW equivalent (black line), simulation results of 470 kW equivalent beam (red dashed line) and simulation results of 1.3 MW equivalent beam (red solid line) for the working point of (21.35, 20.45). Simulation results with magnetic field errors and magnet alignment errors are shown.

470 kW 相当の 200000 個のマクロ粒子に、水平方向・垂直方向の Courant-Snyder Invariant ( $2J_x, 2J_y$ ) がともに  $8.1\pi \sim 81\pi$  mm mrad の 10 個のテスト粒子を加え、SCTR シミュレーションを 1000 ターン行った。周回ごとに ( $2J_x, 2J_y$ ) をプロットしたものを Fig. 6 に示す。 $2J_x + J_y$  がほぼ一定となっている粒子が見られ、また、 $2J_x + 2J_y$  がほぼ一定となっている粒子が見られる。構造共鳴  $v_x - 2v_y = -21$  と  $2v_x - 2v_y = 0$  の影響と考えられる。MR ではコリメータを使い  $60\pi$  mm mrad 程度のアパーチャーとなっており、水

平方方向と垂直方向の結合共鳴は、ビームロスを起こすと考えられる。構造共鳴の影響のないチューンを選ぶことにより、ビームロスを減らす運転条件を探す。

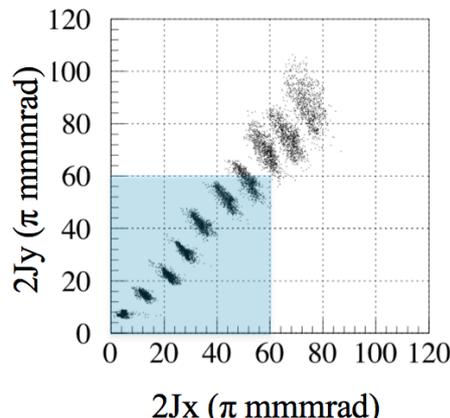


Figure 6: Simulation results of footprints of 1000 turns of ten test particles for the horizontal and vertical actions with SCTR at the working point of (21.35, 21.45).

## 5. 新しい運転チューンの探索

ビームパワーが 400 kW 程度までは FX オペレーションのワーキングポイントを (22.40, 20.75) としていた。スキュー四極電磁石を用いて非構造共鳴  $v_x + v_y = 43$  を補正することなどによりロス低減を行っていたが、空間電荷効果によるチューンの広がりや構造共鳴  $v_x + 2v_y = 63$  を横切るようなビーム強度となり、ワーキングポイントを (21.35, 21.45) とするようになっている。

Figure 7 に 3 次までの構造共鳴と、整数、半整数、線型結合の非構造共鳴を示す。共鳴の影響の少ないと考えられる場所として (21.35, 20.45) と (22.35, 22.45) が挙げられる。このうち (21.35, 20.45) について、前のセクションのようにテスト粒子シミュレーションを行った。その結果、高次ではあるが、6 次の構造共鳴  $2v_x - 4v_y = -39$  があり、少しチューンをずらし、(21.40, 20.45) の方が共鳴の影響を小さくできた。また 4 次の構造共鳴  $4v_y = 81$  も、六極電磁石の高次効果であれば、八極電磁石で共鳴補正ができることが分かった。

Figure 8 に、10 個のテスト粒子の ( $2J_x, 2J_y$ ) についての 1000 ターンの分布を示す。構造共鳴  $v_x - 2v_y = -21$  と  $2v_x - 2v_y = 0$  の影響は見られない。  $4J_x + 2J_y$  がほぼ一定となっている粒子が見られ、  $2v_x - 4v_y = -39$  の影響と考えられるが、  $80\pi$  mm mrad 以上のところでの共鳴となっている。  $60\pi$  mm mrad 程度のところでの結合共鳴は見られず、動的アパーチャーの低減はない状態となっている。

1.3 MW 相当ビームについてのシミュレーション結果を Fig. 9 に示す。入射ビームの分布としては前セクションでの結果に基づき、水平・垂直方向ともに  $2\sigma$  エミッタンスとして  $24\pi$  mm mrad とした。また、縦方向はバンチングファクターを 0.2 とした。

この計算では、電磁石のばらつき、および設置誤差を導入していない。共鳴補正が完全にできている状態での、理想を示している。(21.35, 21.45) については 5%以上のロスが見られるが、(21.40, 20.45) については 2%程度のロスとなり、改善している。

入射の 4 batch (K1~K4) のうち、K1 ビームのロスが他の batch より多いことが分かっており、K1 ビームのロスが 2% の場合には、4 batch 入射の時は 1.5%程度となる。つまり 1.3 MW 運転時に 2 kW ロスが見込まれる。将来コリメータの増強も計画しており、容量を現在の 2 kW から 3.5 kW とすることを計画している[2]。その場合、見込まれるロス量はコリメータ容量以下となっている。

## 6. まとめ

J-PARC MR の FX モードで、最大 500 kW のビームを供給した。その時の加速陽子数は、 $2.61 \times 10^{14}$  ppp であった。将来ビームパワーを 1.3 MW とする計画があり、繰り返しを現在の 2.48 s から 1.16 s とすると共に、ビーム強度を約 30% 増しの  $3.3 \times 10^{14}$  ppp とすることを目標としている。空間電荷効果を考慮したシミュレーションを行い、現在のチューン (21.35, 21.45) より (21.40, 20.45) の方が構造共鳴の影響が少なく、ビームロスの低減が期待できる。今後、実際のビームを使ってスタディを行い、目標のビーム強度を目指す。

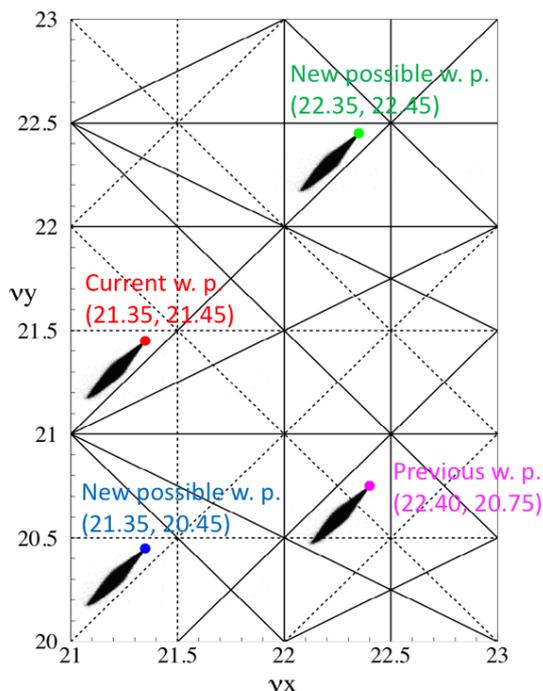


Figure 7: Structure resonances of up to third order (solid lines) and non-structure resonances of half integer and linear coupling resonances (dashed lines). Space charge tune spread shown for the working points of (22.40, 20.75), (21.35, 21.45), (21.35, 20.45) and (22.35, 22.45) for the beam power of 380 kW.

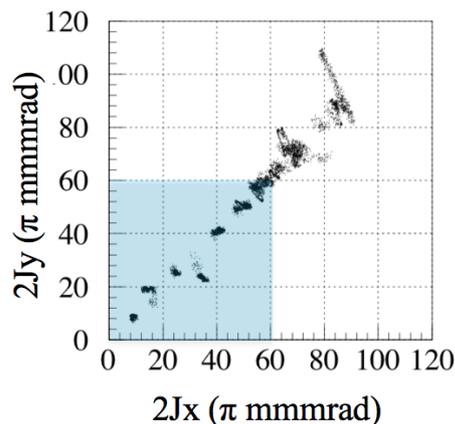


Figure 8: Simulation results of footprints of 1000 turns of ten test particles for the horizontal and vertical actions with SCTR at the working point of (21.40, 20.45).

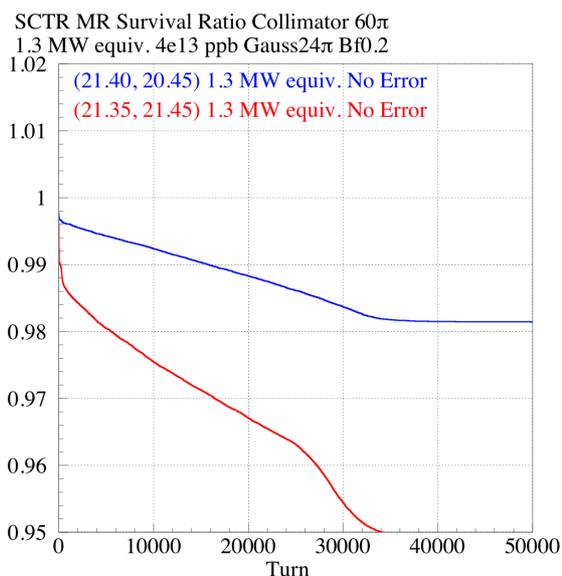


Figure 9: Simulation results of the beam survivals of 1.3 MW equivalent beam for the working point of (21.35, 21.45) (red line) and simulation results for the working point of (21.40, 20.45) (blue line). Simulation results without magnetic field errors and magnet alignment errors are shown.

## 参考文献

- [1] S. Igarashi, “High-Power Beam Operation at J-PARC”, Proceedings of the 61st ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (HB’18), Daejeon, Korea, Jun. 2018, paper TUA2WD02.
- [2] T. Koseki, “Upgrade Plan of J-PARC MR – Toward 1.3 MW Beam Power”, Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conf. (IPAC’18), Vancouver, BC, Canada, May. 2018, paper TUPAK005.
- [3] K. Ohmi *et al.*, “Study of Halo Formation in J-PARC MR”, Proceedings of the 22nd Particle Accelerator Conf. (PAC’07), Albuquerque, NM, USA, Jun. 2007, paper THPAN040, pp. 3318-3320.
- [4] <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>