

## J-PARC MRにおける高繰り返しビーム試験結果 RESULTS OF HIGH REPETITION BEAM COMMISSIONING IN J-PARC MR

安居孝晃<sup>\*,A)</sup>, 佐藤洋一<sup>A)</sup>, 發知英明<sup>A)</sup>, 五十嵐進<sup>A)</sup>, 石井恒次<sup>A)</sup>, 岩田宗磨<sup>A)</sup>, 魚田雅彦<sup>A)</sup>, 大越隆夫<sup>A)</sup>, 大見和史<sup>A)</sup>, 大森千広<sup>A)</sup>, 岡田雅之<sup>A)</sup>, 岡村勝也<sup>A)</sup>, 織井安里<sup>A)</sup>, 門脇琴美<sup>A)</sup>, 上窪田紀彦<sup>A)</sup>, 木村琢郎<sup>A)</sup>, 久保田親<sup>A)</sup>, 栗本佳典<sup>A)</sup>, 小林愛音<sup>A)</sup>, 佐々木知依<sup>A)</sup>, 佐藤健一<sup>A)</sup>, 佐藤健一郎<sup>A)</sup>, 佐藤吉博<sup>A)</sup>, 芝田達伸<sup>A)</sup>, 嶋本眞幸<sup>A)</sup>, 下川哲司<sup>A)</sup>, 白形政司<sup>A)</sup>, 杉本拓也<sup>A)</sup>, 杉山泰之<sup>A)</sup>, 高野淳平<sup>A)</sup>, 瀧山陽一<sup>A)</sup>, 手島昌己<sup>A)</sup>, 富澤正人<sup>A)</sup>, 外山毅<sup>A)</sup>, 中村剛<sup>A)</sup>, 仁木和昭<sup>A)</sup>, 橋本義徳<sup>A)</sup>, 長谷川豪志<sup>A)</sup>, 原圭吾<sup>A)</sup>, 松本教之<sup>A)</sup>, 松本浩<sup>A)</sup>, 三浦一喜<sup>A)</sup>, 武藤亮太郎<sup>A)</sup>, 村杉茂<sup>A)</sup>, 森田裕一<sup>A)</sup>, 柳岡栄一<sup>A)</sup>, 山田秀衛<sup>A)</sup>, 山本昇<sup>A)</sup>, 楊敏<sup>A)</sup>, 吉井正人<sup>A)</sup>, 島田太平<sup>B)</sup>, 菖蒲田義博<sup>B)</sup>, 田村文彦<sup>B)</sup>, 島山衆一郎<sup>B)</sup>, 野村昌弘<sup>B)</sup>, 山本昌亘<sup>B)</sup>, 浅見高史<sup>A,C)</sup>, 小関忠<sup>A,C)</sup>  
Takaaki Yasui<sup>\*,A)</sup>, Yoichi Sato<sup>A)</sup>, Hideaki Hotchi<sup>A)</sup>, Susumu Igarashi<sup>A)</sup>, Koji Ishii<sup>A)</sup>, Soma Iwata<sup>A)</sup>, Masahiko Uota<sup>A)</sup>, Takao Oogoe<sup>A)</sup>, Kazuhito Ohmi<sup>A)</sup>, Chihiro Ohmori<sup>A)</sup>, Masashi Okada<sup>A)</sup>, Katsuya Okamura<sup>A)</sup>, Asato Orii<sup>A)</sup>, Kotomi Kadowaki<sup>A)</sup>, Norihiko Kamikubota<sup>A)</sup>, Takuro Kimura<sup>A)</sup>, Chikashi Kubota<sup>A)</sup>, Yoshinori Kurimoto<sup>A)</sup>, Aine Kobayashi<sup>A)</sup>, Tomoi Sasaki<sup>A)</sup>, Kenichi Sato<sup>A)</sup>, Kenichirou Satou<sup>A)</sup>, Yoshihiro Sato<sup>A)</sup>, Tatsunobu Shibata<sup>A)</sup>, Masayuki Shimamoto<sup>A)</sup>, Tetsushi Shimogawa<sup>A)</sup>, Masashi Shirakata<sup>A)</sup>, Takuya Sugimoto<sup>A)</sup>, Yasuyuki Sugiyama<sup>A)</sup>, Junpei Takano<sup>A)</sup>, Yoichi Takiyama<sup>A)</sup>, Masaki Tejima<sup>A)</sup>, Masahito Tomizawa<sup>A)</sup>, Takeshi Toyama<sup>A)</sup>, Takeshi Nakamura<sup>A)</sup>, Kazuaki Niki<sup>A)</sup>, Yoshinori Hashimoto<sup>A)</sup>, Katsushi Hasegawa<sup>A)</sup>, Keigo Hara<sup>A)</sup>, Noriyuki Matsumoto<sup>A)</sup>, Hiroshi Matsumoto<sup>A)</sup>, Kazuki Miura<sup>A)</sup>, Ryotaro Muto<sup>A)</sup>, Shigeru Murasugi<sup>A)</sup>, Yuichi Morita<sup>A)</sup>, Eiichi Yanaoka<sup>A)</sup>, Shuei Yamada<sup>A)</sup>, Noboru Yamamoto<sup>A)</sup>, Min Yang<sup>A)</sup>, Masahito Yoshii<sup>A)</sup>, Taihei Shimada<sup>B)</sup>, Yoshihiro Shobuda<sup>B)</sup>, Fumihiko Tamura<sup>B)</sup>, Shuichiro Hatakeyama<sup>B)</sup>, Masahiro Nomura<sup>B)</sup>, Masanobu Yamamoto<sup>B)</sup>, Takashi Asami<sup>A,C)</sup>, Tadashi Koseki<sup>A,C)</sup>

A) KEK

B) JAEA

C) The University of Tokyo

### Abstract

Beam commissioning with a circulating period of 1.36 s was performed in the main ring synchrotron (MR) of Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC). To realize the high repetition operation, we are upgrading the power supplies of the main magnets, RF system, septum magnets for fast extraction, machine protection system, and collimator system. After optics tuning, the beam was well controlled with an intensity of  $2.7 \times 10^{13}$  protons per bunch during the beam injection period. It corresponded to a beam power of 740 kW considering the beam survival ratio. Split quadrupole families caused resonance enhancement, resulting in beam losses. Further beam loss reduction is planned by increasing the trim coils of quadrupole magnets and recovering the symmetry of the accelerator.

### 1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の主リング (MR) [1] では、長基線ニュートリノ振動実験 (T2K) [2] に向け、速い取り出し (FX) で 30 GeV の大強度陽子ビームを供給している。FX 利用運転におけるビーム強度は 515 kW に達し、特にパルスあたり粒子数は  $2.66 \times 10^{14}$  protons per pulse (ppp) を誇り、これは世界最大である。より高統計の物理実験を可能とするために、MR ではさらなるビーム強度目標として FX 利用運転 1.3 MW 計画を打ち出した [3]。大強度化計画はビームの高繰り返し化、高周波加速空洞の増強、そしてビーム損失の低減・局在化を段階的に行うことを予定している。この中の最重要事項が加速器全体の高繰り返し化への対応であり、特に電磁石電源は新電源開発を経て 2021 年度に入れ替えた。これまでの繰り返し周期は 2.48 s であったが、2022 年 6

月からは 1.36 s 周期の FX ビーム試験を開始した。本プロシーディングスでは初の高繰り返しビーム試験結果について記述する。

### 2. アップグレード内容

MR では同一電源によって通電されている電磁石の組をファミリーと呼称している。偏向電磁石は 6 つの電磁石電源を用いて通電しているが (つまり 6 ファミリー)、全ての偏向電磁石電源をコンデンサバンクと共に新規製作・導入した。

四極電磁石については、2021 年までは加速器の直線部は 7 ファミリー、曲線部は 4 ファミリーで通電しており、同一ファミリーの四極電磁石は加速器の 3 回対称性を保つように設置されていた。今回のアップグレードにおいて、曲線部の四極電磁石のうち 2 ファミリーに関してはコンデンサバンクと共に電源の新規製作を行ったが、残りの 2 ファミリーについてはファミリーの分割を行い旧偏向電磁石電源を再利用することで大幅な経費の

\* takaaki.yasui@kek.jp

節約を実現した。ファミリー分割はケーブル配線の都合上 3 回対称性を満たさない形で行われたため、ビーム光学系の自由度としては従来通り 4 のままであるが曲線部のファミリー数は 6 に増えた。直線部についても四極電磁石電源の入れ替え・ファミリー分割が行われ、直線部のファミリー数は 10 となった。

六極電磁石に関しては、逆にファミリー結合を行い 2 ファミリーとなった。結合ファミリーの電磁石電源は新規製作し、さらにより低い電流値でも安定して通電できるようにすることで、クロマティシティの操作性を向上させビーム不安定性への対処能力を高めた。電磁石電源のアップグレードの詳細・通電試験結果については本学会の三浦氏の発表を参考にされたい [4]。

主電磁石電源以外にも様々な機器がアップグレードされている。LLRF 制御システムは、これまでは RF フィードフォワードを用いてビームローディング補償を行っていたが、縦方向バンチ結合不安定性を抑えるために新たにベクトル空胴電圧フィードバックを用いた次世代 LLRF 制御システムを開発・導入した [5]。MR のハーモニック数は 9 であり、旧システムで制御できるハーモニクスは 8-10 であったが、新システムでは新たに 6-12 のハーモニクスを制御できるようになる。

FX 用セプタム電磁石は、これまで漏れ四極磁場がビーム光学系の 3 回対称性を崩す原因として問題視されていたため、内部シールド(ダクト型の純鉄シールド)を導入した新しいセプタム電磁石に入れ替えた [6, 7]。

またこれらの機器のアップグレードに合わせて Machine Protection System (MPS) の新システムの導入も進めている [8]。Beam Position Monitor (BPM) を始めとするモニターは更新されていないが、今回新たに 1.36 s 周期に対応させた。さらに 2022 年夏にはコリメータを増強し 1 周で受け持つ位相空間上の範囲を広くすることでビームロス局在化効率を上昇させた。これによりコリメータ数は 4 から 6 になり、また 2023 年夏にはもう 1 台追加することでコリメータ容量は今までの 2.0 kW から最終的には 3.5 kW に増強される予定である [9]。

### 3. ビーム試験・結果

ビーム試験は入射運動エネルギーである 3 GeV の範囲で行った。利用運転においては入射後 130 ms の間に 40 ms 間隔で 1 度に 2 バンチのビームを計 4 回入射するが、本試験においてはビーム光学系のビーム電流依存性 (bunch train tune shift) の影響を切り分けて議論するために 2 バンチのビームを 220 ms 周回させることでビーム評価を行った。

#### 3.1 ビーム光学系調整

ビームロス調整に先立ち、まずは  $1.2 \times 10^{12}$  protons per bunch (ppb) の弱強度でビーム光学系をモデルに合わせ込んだ。モデルのチューンは  $(\nu_x, \nu_y) = (21.35, 21.43)$  であるが、チューンメータで測定した結果は

$$\nu_{x,\text{meas.}} = 21.3526 \pm 0.0033,$$

$$\nu_{y,\text{meas.}} = 21.4313 \pm 0.0039$$

であり、良い精度でモデルに合わせこめていることを確認した。ここでのチューンのエラーは主電磁石電源の電流リップルに由来すると考えられる。

ビームの毎週の横方向二極振動を 512 周分フーリエ解析することにより、加速器全周のベータトロン関数も測定した (Fig. 1)。モデルに対する測定ベータトロン関数の割合  $\beta_{u,\text{meas.}}/\beta_{u,\text{model}}$  ( $u = x, y$ ) の全位置での標準偏差は

$$\left(\text{RMS}\left[\frac{\beta_{x,\text{meas.}}}{\beta_{x,\text{model}}}\right], \text{RMS}\left[\frac{\beta_{y,\text{meas.}}}{\beta_{y,\text{model}}}\right]\right) = (3.5\%, 2.5\%)$$

であり、アップグレード前と変わらない精度にまで追い込むことに成功した。BPM による毎週のビームの位置の測定精度は 300  $\mu\text{m}$  程度であり、ベータトロン関数測定における 3% エラーは BPM の測定精度で説明で

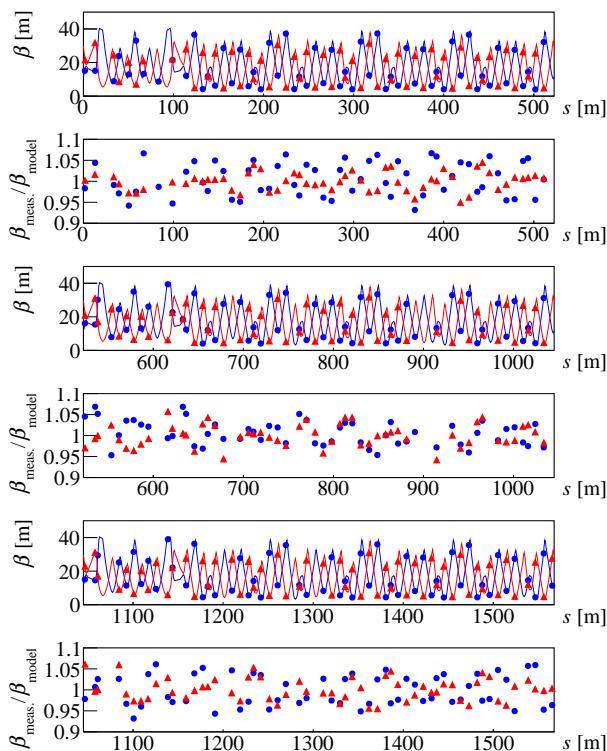


Figure 1: Betatron functions and ratios of measured to model betatron functions. The blue circles and red triangles show horizontal and vertical measured results, respectively. In first, third, and fifth panels, the blue and red lines represent horizontal and vertical model betatron functions, respectively.

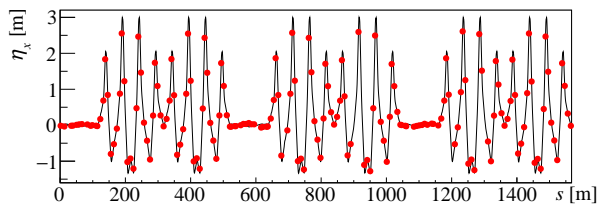


Figure 2: Measured (red circles) and model (the black line) dispersion functions.

きる。これとは別に、MR では閉軌道を測定する際には 1 ms 間の信号を平均化処理することで BPM の測定精度を 20–30  $\mu\text{m}$  にまで向上させている (通称 COD モード)。より高精度に、かつ加速後のベータatron関数を取り出し運動エネルギーの 30 GeV まで効率的に測定するために、ステアリング磁石と組み合わせて、COD モードを用いた別のベータatron関数測定手法が検証された [10, 11]。またベータatron関数測定を通じて新しい FX 用セプトム電磁石では漏れ四極磁場が従来の 1/10 以下にまで抑えられていることを確認した [6]。

ディスページョン関数測定も COD モードを用いて行い (Fig. 2)、測定値がモデルに良く合っていることを確認した。J-PARC MR の曲線部は achromat なビーム光学系を採用しており、測定した直線部のディスページョン関数は  $|\eta_{x,\text{straight}}| < 65 \text{ mm}$  と十分小さいことを確認した。

### 3.2 偏向電磁石電源由来のリップル評価

研究開発を経て新しい偏向電磁石電源では、30 GeV フラットトップにおける電流偏差の 200 Hz 以下の周波数成分を従来の約 1/10 に抑えている [12]。この効果を検証するために COD モード (1 ms 平均) で 220 ms の水平方向のビーム位置を取得し、フーリエ解析した。解析にはディスページョン関数大きい (モデル値で 2.6 m) 位置にある BPM のデータを使用した。Figure 3 がフーリエスペクトルを図示したものである。旧電源による結果 (青線) に比べ、新電源 (赤線) では 80–220 Hz の周波数のリップルが抑えられていることが分かる。80 Hz 以下の周波数についても調整が進めばリップルを抑えられることが期待される。340 Hz 近傍に現れているスペクトルはシンクロトロン振動数に対応しており、ビームの縦方向の二極振動の振幅に依存するため、必ずしも新旧電源の電流リップルの違いを表さない。

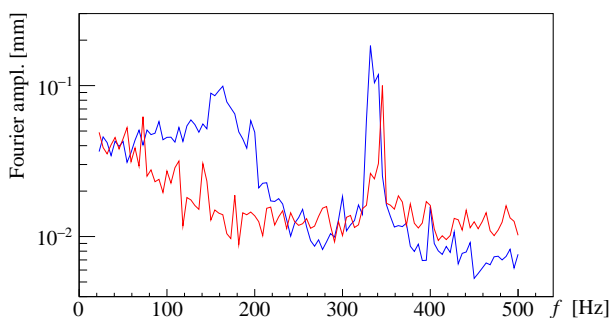


Figure 3: Fourier spectra of horizontal beam positions obtained every 1 ms by BPMs at high-dispersion positions. The blue and red lines represent the results before and after the upgrade, respectively.

### 3.3 ビームロス調整

繰り返し周期が短くなることに対応して加速時のシンクロナス位相を大きくする必要があるので、RF 空洞の陽極電源への負荷が制約となり、2022 年現在では最大周回粒子数は 8 バンチで  $1.8\text{--}2.0 \times 10^{14}$  ppp と試算されている。MR では RF システムの段階的なアップグレードを計画しており、将来的には  $3.3 \times 10^{14}$  ppp の強度の

ビームの加速能力を持つようになる。ビームロス調整は利用運転強度を念頭に置き、2 バンチで  $5.4 \times 10^{13}$  ppp の強度で行った。

MR では加速器の 3 回対称性を微調整するために 3 つの四極電磁石の補正コイルをそれぞれ独立電源で通電している。また、2 つの 3 次非構造共鳴  $3\nu_x = 64$ ,  $\nu_x + 2\nu_y = 64$  を同時補正するために 4 つの六極電磁石の補正コイルをそれぞれ独立電源で通電している。大強度調整の結果、3 次非構造共鳴補正に必要な六極補正コイルによる励磁量はアップグレード前と比較して有意な差はなかった。このことは 3 次非構造共鳴の励起源となる六極磁場量がアップグレード前後でほとんど変化しなかったことを示している。補正磁場の調整に加え、ビームロスを最小化するように入射 Twiss 調整も行った。

Figure 4 の赤線は direct-current current transformer (DCCT) で測定した調整後のビーム生存率である。ビーム入射期間 (130 ms) のビームロスは約 2% であり、これまでの利用運転時のロス (約 1%) と比べると若干悪化している。しかしながら、ビームロスは Fig. 5 に示されるようにコリメータエリアに良く局所化されており、かつ利用運転開始までにはコリメータシステムがアップグレードして許容ロスが 2.0 kW から 3.5 kW に増強することを踏まえれば、利用運転パラメータとして許容できる。ロスも考慮すればこの強度は 740 kW 運転に対応

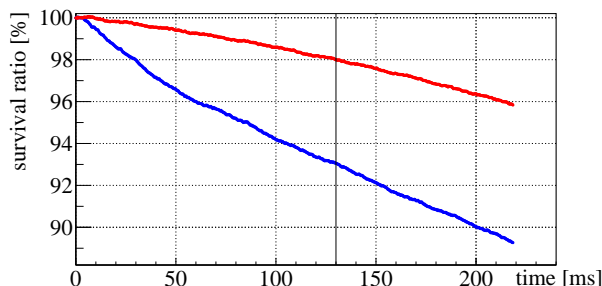


Figure 4: Beam survival before (blue) and after (red) adjusting split quadrupole families measured by the DCCT.

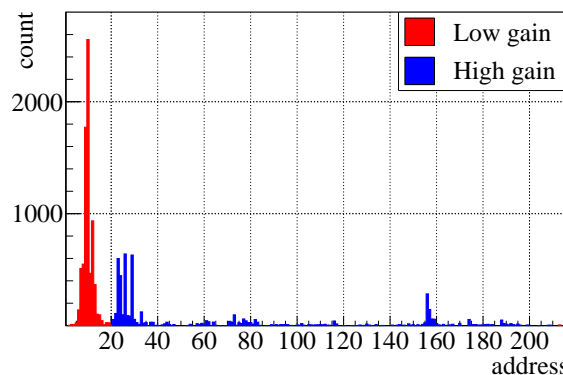


Figure 5: Beam loss counts measured by proportional beam loss monitors during 220 ms. The horizontal axis denotes the address assigned based on the positions of the quadrupole magnets. The gains of proportional beam loss monitors at collimating area (red bars) were 8 times smaller than those at non-collimating area (blue bars).

し、MR のデザイン値である 750 kW とほぼ同等である。

## 4. 加速器の対称性と空間電荷共鳴

### 4.1 3 回対称性の悪化のビームロスへの影響

今回のビーム調整において過去よりロスが増えてしまった原因は、四極電磁石電源のファミリー分割による加速器の 3 回対称性の悪化にある。実際に 3 回対称性の悪化の影響は、影響の大きい曲線部の分割ファミリー調整前後のビーム光学系を比較することで確認することができる。

Figure 6 は曲線部の分割ファミリー調整前 (青三角) と後 (赤丸) の MR の 3 つの曲線部の位相進みを測定した結果である。位相進みはビームの毎週の二極振動を曲線部の端にある BPM で測定し、フーリエ解析をすることで得た。分割ファミリー調整前は  $x, y$  方向とも各曲線部の位相進みに大きなばらつきがあることが分かる。位相進みから計算した分割ファミリー間の磁場のずれは 0.5% となった。そして調整後は、調整前と比較するとばらつきは大きく改善されており、ファミリー間の磁場ずれも 0.1% と試算された。

それぞれのビーム光学系においてビーム生存率を測定した結果が Fig. 4 である。両光学系とも補正磁場の調整や入射 Twiss 調整をそれぞれ行ったが、対称性が悪い光学系 (青) ではビーム入射期間 (130 msec) のビームロスが約 7% であり、対称性改善後 (赤) の 3 倍以上もロスするという非常に悪い結果となった。

改めて Fig. 6 を見ると、調整後のビーム光学系 (赤) においても、曲線部の位相進みに統計的に有意なばらつきがあることが分かる。このばらつきを抑えるべく調整を進めることによりこれまでの利用運転時と同程度にまでビームロスを減らせると期待できる。ファミリー間のばらつきが小さくなるにつれ個々の磁石のばらつきの影響も無視できなくなってくる。FX 用セプトム電磁石による漏れ四極磁場は大幅に抑えられたものの、こうした分割ファミリーによる 3 回対称性の悪化や bunch train tune shift 対策として、より多くの四極磁石で補正磁場をかけるためのハードウェアの整備は必要不可欠である。

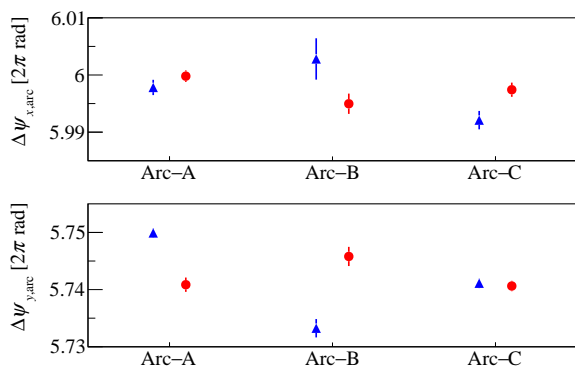


Figure 6: Horizontal (top panel) and vertical (bottom panel) measured phase advances of the arc sections with the beam optics before (blue triangles) and after (red circles) adjusting split quadrupole families. The error bars represent rms of 10 data.

### 4.2 3 回対称性の悪化と共鳴

対称性が悪化してビームロスが増えてしまうのは共鳴が強化されるからである。一般にこの際強化されるのは対称的な共鳴源によって励起される非構造共鳴である。MR における対称的な共鳴源としては六極磁石 (高次項も考えれば偏向磁石も) による六極磁場と空間電荷効果がある。このうち六極磁場によって励起される非構造共鳴に関しては前述の通り我々は既に 4 ヶ所で補正六極磁場を与えて補正する機構を備えているが、空間電荷によって励起される非構造共鳴に関しては 3 ヶ所で補正四極磁場を与えるしか手段がなく対策が不十分である。

Figure 7 はシミュレーションによって得たビームのチューン拡がりに関連する共鳴を最大 4 次まで描いたものであり、空間電荷が励起する非構造共鳴は赤線で示されている。これより 3 本の共鳴 (図中 ABC) がチューン拡がりに交差していることが分かる。また  $y$  方向のチューンを上げるとロスが増加することから共鳴 D の影響も大きいと考えられている。共鳴の強さは複素数で表されるので、4 本の共鳴の補正を行うには原理的に 8 ヶ所で補正四極磁場を与える必要がある。もちろんより高次の共鳴を考えればその分与えるべき補正磁場の数は増える。

補正コイル通電による共鳴の補正可能性について、Resonance Driving Term (RDT) [13] を用いて 4 次の共鳴として検証した。ビーム条件としては  $2.7 \times 10^{13}$  ppb の強度のビームを想定し、エミッタンスを  $x, y$  方向とも  $4\pi$  mm mrad、線電荷はピーク値を採用し  $3.9 \times 10^{11}$  m<sup>-1</sup> とした。ビーム光学系としては Fig. 6 の分割ファミリー調整後 (赤) の位相進みを再現するように磁石設定を調整

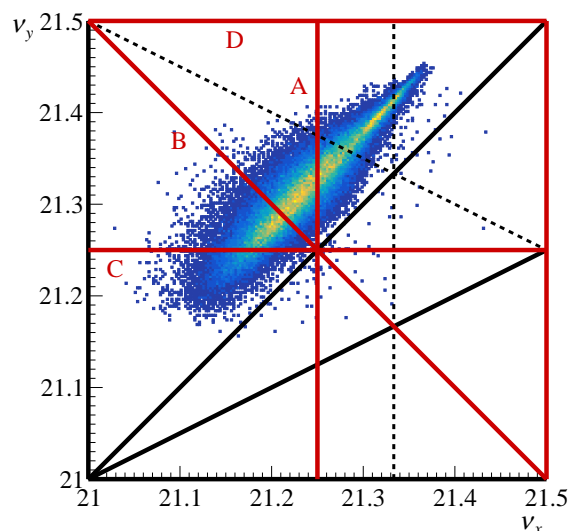


Figure 7: Simulated tune spread distribution of the  $3.2 \times 10^{13}$ -ppb beam and resonance lines. The individual tunes were calculated using the phase advances from the 4999th to 5000th turn. The red lines represent space-charge-induced nonstructure resonances up to fourth order and the black lines show other major resonances.

した。補正磁場を適用しない場合、各共鳴の RDT は

Resonance A ( $4\nu_x = 85$ ):  $|G_{4,0,85}| = 27.98 \text{ m}^{-1}$   
 Resonance B ( $2\nu_x + 2\nu_y = 85$ ):  $|G_{2,2,85}| = 4.73 \text{ m}^{-1}$   
 Resonance C ( $4\nu_y = 85$ ):  $|G_{0,4,85}| = 11.45 \text{ m}^{-1}$   
 Resonance D ( $4\nu_y = 86$ ):  $|G_{0,4,86}| = 15.32 \text{ m}^{-1}$

であった。補正用電源の性能としては現在インストールされているものと同程度の性能を仮定し、四極磁場  $K_1L$  の設定精度を  $1 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$  とした。例えば今より 1 台増やして 4 台体制で 2 本の共鳴 AB を同時補正する解を計算したところ、補正磁場適用後は

$$|G_{4,0,85}| = 0.020 \text{ m}^{-1} \quad (0.07\%)$$

$$|G_{2,2,85}| = 0.041 \text{ m}^{-1} \quad (0.86\%)$$

と両共鳴の RDT を 1% 以下に抑えられることが確認された。また 6 台体制で 3 本の共鳴 ABD を同時補正する解も求まり、補正磁場適用後は

$$|G_{4,0,85}| = 0.124 \text{ m}^{-1} \quad (0.44\%)$$

$$|G_{2,2,85}| = 0.047 \text{ m}^{-1} \quad (0.99\%)$$

$$|G_{0,4,86}| = 0.031 \text{ m}^{-1} \quad (0.20\%)$$

とこの場合も 3 本の共鳴の RDT を 1% 以下に抑えられることが分かった。

## 5. 結論・今後の展望

J-PARC MR では FX 利用運転 1.3 MW 計画のため、2021 年度に主電磁石電源をはじめとするハードウェアの大幅なアップグレードを行い、2022 年 6 月に長期シャットダウン明け初の 1.36 s 周期の高繰り返しビーム試験を行った。光学系調整によりチューンやベータトロン関数、ディスパージョン関数など基本的なパラメータはシャットダウン前と同程度の精度で再現することができた。また新偏向電磁石電源では電流偏差の 200 Hz 以下の成分を抑えることに成功しているが、この効果をビームベースでも確認することができた。新電磁石電源構成では一部の四極電磁石ファミリーが分割されており、加速器の 3 回対称性が悪化しビームロスの増加を引き起こす結果となった。分割ファミリー調整前は  $2.7 \times 10^{13}$  ppb の強度でビーム入射期間に約 7% ものビームロスを起こしていたが、調整後は約 2% にまで減少した。ビームロス局在化は非常に良好で、コリメータシステムのアップグレードも考慮すれば加速器としてこの強度での運転を許容できる。1.36 s 周期では 740 kW 運転に対応するため、740 kW 運転に必要な光学検証が済んだと言えよう。分割ファミリー調整前後の 3 回対称性は加速器の曲線部の位相進みの測定でも確認することができた。調整後の位相進みにも有意なばらつきが残っており、さらなる調整の余地を示唆している。ばらつきを抑える方法としては四極補正磁場を複数箇所と与えることが有効であり、ハードウェアの準備を進めている。3 回対称性が確保されることにより、非構造共鳴を抑えることができビームロスの減少が期待できる。

2022 年度以降は段階的に RF システムを増強することが計画されている。現在は基本波空洞が 7 台・2 倍高調

波空洞が 2 台であるが、最終的には基本波空洞を 11 台にまで増やしより多くの粒子を積めるよう整備を進めている。ビームロス削減のための研究も進められており、複数の構造共鳴を補正・抑制する新たな光学系 [14, 15] を利用運転に適用すべく準備が進められている。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、J-PARC 加速器グループをはじめとする J-PARC センター構成員の全員に多大なご協力を頂いたことに感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] T. Koseki *et al.*, “Beam commissioning and operation of the J-PARC main ring synchrotron”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2012**, 02B004 (2012). doi:10.1093/ptep/pts071
- [2] The T2K Collaboration, “Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations”, *Nature* **580**, 339–344 (2020). doi:10.1038/s41586-020-2177-0
- [3] S. Igarashi *et al.*, “Accelerator design for 1.3-MW beam power operation of the J-PARC main ring”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2021**, 033G01 (2021). doi:10.1093/ptep/ptab011
- [4] K. Miura *et al.*, “J-PARC MR 高繰り返し化に向けた主電磁石電源のアップグレード”, in *Proc. PASJ'19, Online, October 2022*, TUP039.
- [5] Y. Sugiyama *et al.*, “J-PARC MR 次世代 LLRF 制御システム”, in *Proc. PASJ'19, Online, October 2022*, WE0B07.
- [6] T. Shibata *et al.*, “J-PARC MR の速い取り出し用新セプタム電磁石の漏れ磁場軽減対策”, in *Proc. PASJ'19, Online, October 2022*, FROB12.
- [7] S. Iwata *et al.*, “J-PARC MR 速い取り出し用新セプタム電磁石のインストール”, in *Proc. PASJ'19, Online, October 2022*, FRP006.
- [8] T. Kimura, “J-PARC 新 MR-MPS ユニットの開発と導入”, in *Proc. PASJ'19, Online, October 2022*, THP010.
- [9] M. Shirakata *et al.*, “J-PARC 主リングのビームコリメータ 7 台体制”, in *Proc. PASJ'19, Online, October 2022*, THP017.
- [10] T. Asami *et al.*, “J-PARC 主リングにおける COD 応答を用いた高精度 Optics 測定”, in *Proc. PASJ'19, Online, October 2022*, FROA03.
- [11] M. Tomizawa *et al.*, “J-PARC メインリングの光学補正ツールの開発”, in *Proc. PASJ'19, Online, October 2022*, THP004.
- [12] T. Shimogawa *et al.*, “New power supply of main magnets for J-PARC main ring upgrade”, in *Proc. IPAC'19, Melbourne, Australia, May 2019*, pp. 1266–1268. doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPMP016
- [13] S. Y. Lee *et al.*, “Emittance growth mechanisms for space-charge dominated beams in fixed field alternating gradient and proton driver rings”, *New J. Phys.* **8**, 291 (2006). doi:10.1088/1367-2630/8/11/291
- [14] T. Yasui *et al.*, “Beam optics for the compensation of third-order structure resonances”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2022**, 013G01 (2022). doi:10.1093/ptep/ptab146
- [15] T. Yasui, “Evaluation and compensation of betatron resonances for high-intensity proton synchrotrons”, Doctoral dissertation, The University of Tokyo (2020).