

# J-PARC メインリングにおけるビームダイナミクスシミュレーション：6 倍高調波 RF によるビーム大強度化への寄与

## BEAM DYNAMICS SIMULATIONS IN THE J-PARC MAIN RING: POSSIBLE CONTRIBUTIONS OF ADDING SIXTH HARMONIC RFS TO INCREASE THE BEAM POWER

佐藤洋一<sup>#</sup>, 原圭吾, 大森千広, 五十嵐進, 小関忠

Yoichi Sato<sup>#</sup>, Keigo Hara, Chihiro Omori, Susumu Igarashi, Tadashi Koseki

KEK/J-PARC

### Abstract

Beam dynamics simulations have been performed for the J-PARC Main Ring (MR). In order to increase the MR beam intensity, to compensate the space charge effect is going to be important. The compensation can be achieved with decreasing the beam peak current. The peak current can be partly controlled with the fundamental RFs and the second harmonic RFs in the MR and in the rapid cycle synchrotron (RCS), the upstream synchrotron of the MR. Adding sixth harmonic RFs in the MR may realize more precise control of the peak current. To discuss the beam power upgrade of the MR, we have to consider the hardware limitations to the bunch length and the beam loss, also. To extend the beam bunch length is an easy way to decrease the peak current. However, the bunch length is limited by the rising times of both the extraction kickers of the RCS and the injection kickers of the MR. The beam loss amount should be controlled within the limitation of the collimator systems. In this paper, we discuss the effect of the sixth harmonic RFs, and achievable beam intensity.

### 1. はじめに

J-PARC は LINAC、速い繰り返しシンクロトロン (RCS)、主リング (MR) の 3 つの加速器、および各実験施設からなる複合施設である。MR では最大 240 kW の 30 GeV 陽子ビームを T2K 実験に供給している。MR における設計出力 750 kW を目指したビーム増強計画では、全加速器の改造に加え、MR における空間電荷効果対策が重要となる。本稿では、エミッタンス増加抑制とビームロス軽減を目的とした MR RF 電圧の最適化と、ハードウェアからの制限も踏まえたビーム強度増強シナリオを、1D シミュレーション結果<sup>[1]</sup>を踏まえながら、2.5D シミュレーションを通して検討する。

RCS と MR の RF 電圧の操作で、バンチ長を伸ばしてバンチ内ピークカレントを下げ、空間電荷効果を緩和することが、ある程度出来る。しかしバンチ長は RCS 取出しキッカーと MR 入射キッカーのそれぞれの立ち上がり時間により制限される。ビーム強度増強には、バンチ長制限内で空間電荷効果を緩和し、ビームロスを RCS-MR 間輸送系 (3-50BT) と MR のそれぞれのコリメータ容量内に留める必要がある。MR RF 電圧の検討にあたり、MR で既に準備されている RF 基本波と 2 倍高調波に加え、6 倍高調波を増強した場合の効果を比較検討した。

以下、セクション 2 で MR ビーム強度増強方針と現在の課題を確認し、セクション 3 で 6 倍高調波を増強の効果と成立可能なビーム強度増強シナリオを検討、セクション 4 でまとめを行う。

### 2. MR ビーム強度増強方針と現在の課題

#### 2.1 MR ビーム強度増強の基本方針

現在のシャットダウン後、イオン源カレントの増強と、リニアック改良による RCS 入射エネルギー引き上げ (181 MeV から 400 MeV へ) が予定されている。それに伴い RCS ではバンチ当りの陽子数を、それまで利用運転していた  $1.2\sim 1.5E13$  protons per bunch (ppb) から段階的に引き上げ、 $4.1E13$  ppb (RCS 1MW に相当) を目指した調整が予定されている<sup>[2]</sup>。MR では、この増強後の RCS からのビームを、3-50BT<sup>[3,4]</sup> と MR でのロス量を抑えながら、なるべく多く受けてビーム強度を上げて行く。MR ではバンチ当り陽子数を増やして強度を上げる以外に、繰り返し時間の短縮によりビーム強度を上げる<sup>[5]</sup> 方針もあるが、現行の主電磁石では 2.4 s 繰り返し時間が最短である。1 Hz 運転を目指した新主電磁石の開発が進められている<sup>[6]</sup>。ただし本論文では 1 Hz 運転については扱わず、2.4 s 繰り返しでの MR ビーム増強への影響のみを議論する。

#### 2.2 空間電荷効果

バンチ当り陽子数の増加では空間電荷効果が問題となる。空間電荷効果の指標として、リング内の平均ビームカレントをピークカレントで割って定義した Bunching factor (BF) がある。リングでは、BF と空間電荷効果由来のチューン広がり  $\Delta \nu_{sc}$  とは逆比の関係がある<sup>[7]</sup>。そのため、空間電荷効果はビーム自体を広げるだけでなく、リングにおいては  $\Delta \nu_{sc}$  を広げるため、共鳴ラインにビームが掛かる危険性を増やす。そこでバンチ長を伸ばしてピークカレント

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

を下げれば、 $\Delta v_{sc}$  を下げられる。もちろん、より広いチューンオペレーションエリアがあれば良いが<sup>[8]</sup>、本稿では現在のオペレーションポイント近傍での議論に絞る。

### 2.3 RF 電圧操作による BUNCHING FACTOR 改善

RCS、MR ともに RF 基本波に加え 2 倍高調波も整備されているため、そのバランスをとることでそれぞれのリング内での周回ビームのバンチ長および BF をある程度操作出来る。RCS ではそのバランス取りによりエミッタンス増加の抑制とビームロスの軽減を実用化している<sup>[2]</sup>。MR においても 2 倍高調波導入による空間電荷効果の緩和を確認しているが<sup>[9]</sup>、2013 年 5 月までの < 240 kW 運転では空間電荷効果の影響が厳しくないこと、また以下に述べるキッカーシステム由来のバンチ長制限から、RF 基本波のみの運用で利用運転を行っている。

### 2.4 バンチ長を伸ばす時の課題

RCS から MR へのビーム輸送の際、RCS 取出システムと MR 入射システムを経由する。バンチ長を伸ばし過ぎると、それぞれのシステムのキッカーの立ち上がり時間中にビームが掛かってしまい、横方向エミッタンスの広がったビームになってしまう。バンチ間隔 600 ns に対し、現在の RCS 取出キッカーシステムは立ち上がり 400 ns のため、バンチ長 200 ns が上限となる<sup>[10]</sup>。一方、MR の入射キッカーシステムの立ち上がり時間は揺らぎも含めて、現在 420 ns となっている。そのため、周回ビームと入射ビームの平均バンチ長は 180 ns 以下でなくてはならない。MR 入射システムアップグレード後の 2014 年秋以降は、立ち上がり時間が 270 ns に短縮されるため<sup>[11,12]</sup>、周回ビームと入射ビームの平均バンチ長は 330 ns まで伸ばせる。RCS 取出キッカーからの制限から入射バンチ長を 200 ns とすれば、周回ビームバンチ長は 460 ns まで伸ばせる。

### 2.5 MR コリメータシステムの運用方針

MR ではロスをコリメータエリアに集中させることで、放射化の影響を局在化させている。MR アクセプタンスが 81pi mmmrad であることから MR コリメータを 50 pi ~ 65 pi mmmrad にすれば、十分にロスを局在化出来ると考えている。その上でコリメータエリア自体の放射化を抑えるべく全ロス量を抑制する。MR コリメータ容量は、2013 年のメンテナンスで、2 kW から 3.5 kW に増強される<sup>[13]</sup>。ロス量と残留線量の相関は現在スタディ中ということもあり<sup>[14]</sup>、当面は MR ロスを 1 kW 程度に留めた運用を予定している。

## 3. RF6 倍高調波導入の効果

### 3.1 シミュレーション条件

2.5D PIC コード SIMPSONS<sup>[15]</sup>による RCS 500 ~ 1000 kW のシミュレーションから、RCS 取り出し時に RF 操作によりビームのバンチ長を ~200 ns した場合、MR 入射直後のビームの BF は ~0.2 となること

が予想されている<sup>[2]</sup>。このうち、RCS 1MW (4.16E13 ppb) と RCS 800 kW (3.33E13 ppb) のシミュレーション結果のそれぞれのモデル粒子分布に対し、3-50BT のコリメータで 2.4s cycle で 1.2 kW のハローをカットしたものを、MR 入射直後の初期粒子のモデル分布として採用した。MR おける縦方向の 1D シミュレーション<sup>[1]</sup>と、2.5D PIC コード SCTR<sup>[16]</sup>を用いたシミュレーションを並行して行い、MR における RF 電圧の最適化を検討した。本稿では、このうち、MR の 2.5D ビームダイナミクスシミュレーションを中心に議論する。

MR 2.5D シミュレーションでは、アラインメントエラー、主電磁石 (偏向電磁石、4 極電磁石、6 極電磁石) の多極成分、に測定値を使用した<sup>[17,18]</sup>。チューンのオペレーションポイントとしては、現在使用中のエリア内で最適化し  $(nx, ny) = (22.43, 20.76)$  とした。このエリア近傍では  $nx+ny=43$  の和共鳴があるが、MR ではスキュー 4 極電磁石が 4 台整備されているため<sup>[19]</sup>、和共鳴を抑えた条件で計算した。

### 3.2 BUNCHING FACOR とエミッタンス、チューン広がりとの相関

MR 入射時のバンチ長制限 200 ns に対し、周回ビームバンチ長は 460 ns まで伸ばせることを生かすには、BF を入射直後の 0.2 から ~0.3 まで、なるべく早く引き上げることが重要となる。MR では、ビーム強度増強を目指す指針の一つとして、RF 基本波と 2 倍高調波の電圧操作でピークカレントを下げ、空間電荷効果の抑制を予定している。1D シミュレーションでは、さらに高次の高調波を使用した場合の BF 引き上げの可能性も検討され、入射直後の 4 極振動に伴って生じる BF の極小値の引き上げには 6 倍高調波の追加が最も有効であることがわかった<sup>[1]</sup>。その結果を受け、SCTR による 2.5 D シミュレーションでは、基本波と 2 倍高調波だけを用いた場合と、基本波、2 倍、6 倍高調波の組で用いた場合を比較した。Figure 1, 2, 3, 4 はそれぞれ、BF、ビーム生存率、水平方向 99%エミッタンス、水平方向 95%エミッタンスを、入射直後 10 ms に対して示す。ただし、MR コリメータ設定は 65pi mmmrad、ビーム強度は 4.16E13 ppb としている。6 倍高調波の追加導入による入射直後の BF 改善は、2.5D シミュレーションでも同様の結果が確認された。このとき合成 RF 電圧  $V_t$  は

$$V_t = V_0 \sin(h_0 \omega t) - V_{2nd} \sin(2h_0(\omega - \omega_s)t + \varphi_{2nd}) - V_{6th} \sin(6h_0(\omega - \omega_s)t + \varphi_{6th})$$

と表現され、 $\omega$  は周回周波数、 $\omega_s$  はシンクロナス粒子の周回周波数、 $h_0$  は harmonic number (=9)、 $V_0, V_{2nd}, V_{6th}$  は RF 基本波、2 倍高調波、6 倍高調波の電圧、 $\varphi_{2nd}, \varphi_{6th}$  は 2 倍高調波、6 倍高調波でのシン

クロナス粒子からの位相のずれとなっている。Fig. 1 - 4 の赤線の場合で、RF 基本波と 2 倍高調波だけを用い、 $(V_0, V_{2nd}) = (100 \text{ kV}, 70 \text{ kV})$ 、 $(\phi_{2nd}, \phi_{6th}) = (0, 0)$  とすると BF 極小値は 0.26 となる。一方、Fig. 1 - 4 の緑線の場合で、RF 基本波、2 倍高調波、6 倍高調波の組を  $(V_0, V_{2nd}, V_{6th}) = (100 \text{ kV}, 70 \text{ kV}, 35 \text{ kV})$ 、 $(\phi_{2nd}, \phi_{6th}) = (0, 0)$  にすると BF 極小値は 0.29 になっている。MR 入射後~2 ms での BF 極小は四極振動に対応している。この BF 変動に対して、MR コリメータ設定  $65\text{pi mmmrad}$  でのビーム生存率と、水平方向 99%エミッタンスは、同じタイミングで応答していることがわかる。水平方向 95%エミッタンスの応答は特にはない。鉛直方向エミッタンスも同様の傾向を示している。これはビームハローがコアよりも BF に対する応答性が高いことを示唆している。Figure 5 は、MR を現在のオペレーションポイント近傍(22.43, 20.76)で運転した場合で、RF6 倍高調波の有無のそれぞれの場合での BF 極小点でのチューン広がりを示す。チューン広がりの裾が半整数共鳴ラインに掛かっているため、BF 極小値の差が生存率の差につながっていると考えられる。

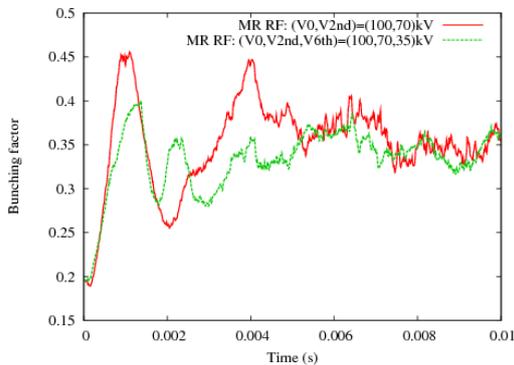


Figure 1: Bunching factors in the first 10 ms. The red line is for  $(V_0, V_{2nd}) = (100 \text{ kV}, 70 \text{ kV})$ , and the green line is for  $(V_0, V_{2nd}, V_{6th}) = (100 \text{ kV}, 70 \text{ kV}, 35 \text{ kV})$ .

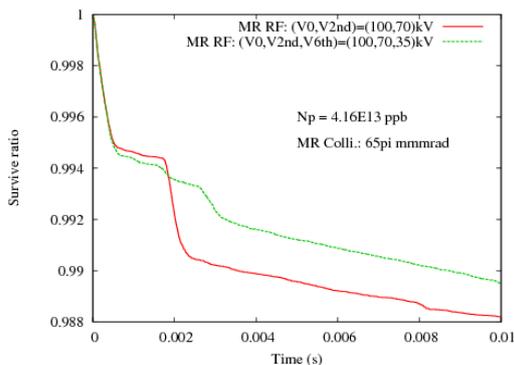


Figure 2: Survive ratio for the Fig. 1 conditions.

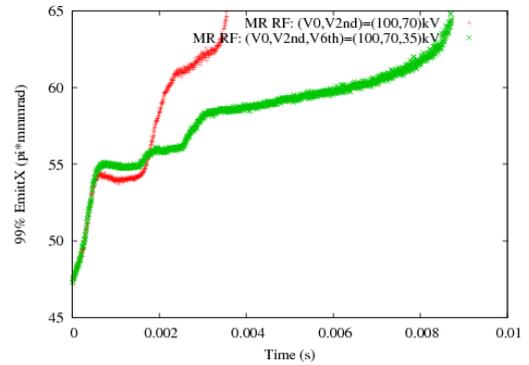


Figure 3: 99% horizontal emittance for the Fig. 1 conditions.

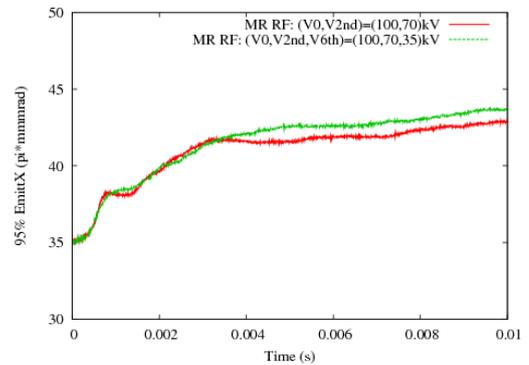


Figure 4: 95% horizontal emittance for the Fig. 1 conditions.

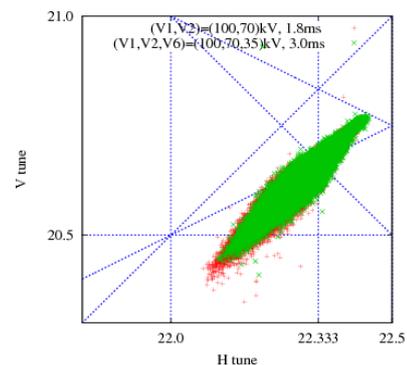


Figure 5: The tune spreads at the local bottoms of the bunching factors in Fig. 1. The red points are at 1.8 ms after the injection for  $(V_0, V_{2nd}) = (100 \text{ kV}, 70 \text{ kV})$ , and the green points are at 3.0 ms after the injection for  $(V_0, V_{2nd}, V_{6th}) = (100 \text{ kV}, 70 \text{ kV}, 35 \text{ kV})$ .

### 3.3 ビームロスとバンチ長の制限下での MR 大強度運転

2.4 s サイクル運転での MR ビームロス を 1 kW 程

度に収めるためには、 $3.33 \times 10^{13}$  ppb ビーム (RCS 800 kW) に対しては 2%ロス、 $4.16 \times 10^{13}$  ppb ビーム (RCS 1 MW) に対しては 1.5%ロスに留める必要がある。サブセクション 3.2 で見た、 $4.16 \times 10^{13}$  ppb ビームのケースでは 1.5%ロスに留めることが難しく、ここでは  $3.33 \times 10^{13}$  ppb ビームに対して議論する。

Figure 6 は、 $3.33 \times 10^{13}$  ppb ビーム入射に対し、MR を現在のオペレーションポイント近傍(22.43, 20.76)で運転、MR コリメータ設定を 65 pi mmmrad にした場合で、40 ms 毎の 4 回入射に対して、1 回目に入ったバンチのビーム生存率である。MR RF 設定はサブセクション 3.2 と同じく、RF 基本波と 2 倍高調波を適用した場合 (赤線)、RF 基本波、2 倍高調波、6 倍高調波を適用した場合 (緑線) を比較した。どちらの場合も、1 回目入射バンチは 3 GeV を保ったまま 120 ms 周回し、4 回目の入射後に 1.4 s かけて 30 GeV まで加速している。加速は、0.1 s スムージング加速、1.2 s 線形加速、0.1 s スムージング加速で構成している。ビームロス は線形加速までにはほぼ落ち着いている。4 回入射それぞれのロスを考慮すると、2 種類の RF 設定に対し、MR ~525 kW ( $3.33$  ppb) 運転でのビームロス は 6 倍高調波ありで 0.42 kW、6 倍高調波なしで 0.49 kW と予想される。ただし、RF 設定にはまだ最適化の余地があると考えている。Figure 7 は、6 倍高調波ありの場合で、MR コリメータ設定を 65pi mmmrad にした場合 (Fig. 5 緑線と同じ) と 60pi mmmrad にした場合 (水色線) との比較である。MR コリメータを 65pi mmmrad から 60pi mmmrad に絞ることで、MR ~525 kW ( $3.33$  ppb) 運転でのビームロス は 0.42 kW から 0.96 kW に増加する。コリメータ設定の判断基準はサブセクション 2.5 に示した。

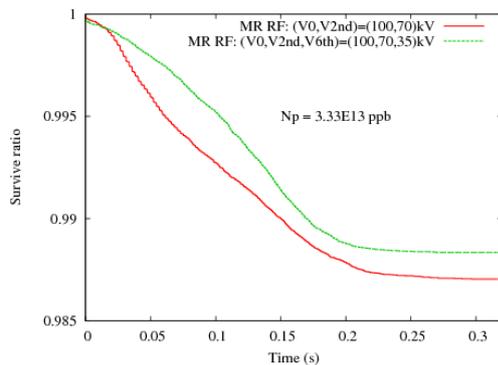


Figure 6: Survive ratio of  $3.33 \times 10^{13}$  ppb beams. During the 0.12 s injection at 3GeV, RF is set as  $(V_0, V_{2nd}) = (100 \text{ kV}, 70 \text{ kV})$  (red line), or  $(V_0, V_{2nd}, V_{6th}) = (100 \text{ kV}, 70 \text{ kV}, 35 \text{ kV})$  (green line). After 0.12 s, the beams are accelerated till 30 GeV in 1.4 s.

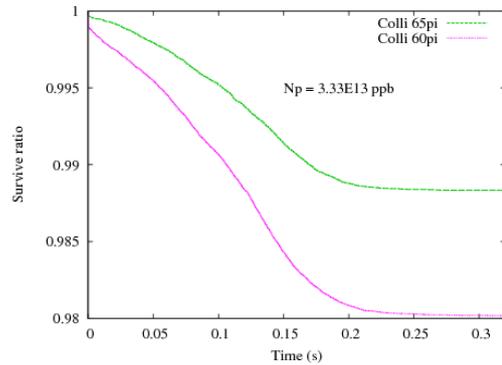


Figure 7: Survive ratio of  $3.33 \times 10^{13}$  ppb beams with different collimator settings. Green line is for 65 pi mmmrad, and purple line is for 60pi mmmrad.

MR 入射キッカーの立ち上がりの影響を受けるのは、キッカータイミングで入射するバンチと、その 40 ms 前に入射した周回バンチである。Figure 7 は、Fig. 6 の緑線  $(V_0, V_{2nd}, V_{6th}) = (100 \text{ kV}, 70 \text{ kV}, 35 \text{ kV})$  の場合での、縦方向エミッタンス図である。入射バンチ (赤点) と周回バンチ (緑点) の平均バンチ長が 320 ns となっていることから、アップグレード後の入射キッカーの立ち上がりはビームロスの要因とはならない。

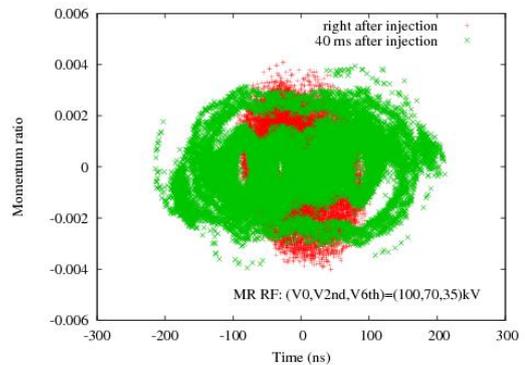


Figure 8: The longitudinal emittance plots right after the injection (red points), and the longitudinal emittance plots 40 ms after the injection (green points). Horizontal axis is the time in ns. Vertical axis is the momentum ratio to the 3 GeV beams. The MR RF voltages are 100 kV for the fundamental RF, 70 kV for the 2nd harmonic RF, and 35 kV for the 6th harmonic RF. The newly injected bunch has 210 ns long, and the circulating bunch has 430 ns long.

#### 3.4 MR 大強度運転での、その他の検討事項

以上のシミュレーションは、入射ビームが MR RF バケツ中心に正確なタイミングで入ったときのものである。しかし、実際 MR 運転においては、ビーム

ローディングの影響から、周回バンチ数が増える毎に中心位置がずれて入射される。RF システムにおけるビームローディング補償の結果<sup>[20]</sup>、MR 230 kW 運転では、入射タイミングのずれは 10~50 ns で収まっている。Figure 9 は、Fig. 6 緑線と同じ RF およびコリメータ設定に対し、入射タイミングを  $\Delta t = 0, 20 \text{ ns}, 40 \text{ ns}, 60 \text{ ns}$  ずらしたときの 3 GeV 120 ms でのビーム生存率である。仮に 8 バンチ全てが一様に  $\Delta t$  ずれたとすれば、MR 525 kW 運転でロス増加は、 $\Delta t = 20 \text{ ns}, 40 \text{ ns}, 60 \text{ ns}$  それぞれに対し、+100 W, +240 W, +450 W となる。この増加量は、RF パターンの最適化である程度抑制できると考えられるが、それは今後の課題である。また、RCS 取出し時の運動量設定の精度は  $1\text{E-}4$  (momentum ratio) であるが、その程度のずれは、ビームロスには 10 W 以下の影響に留まる。

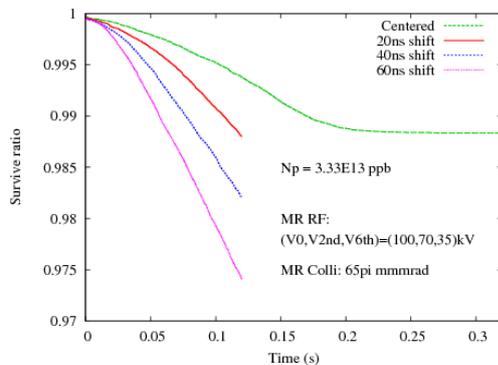


Figure 8: Survive ratio with different injection timing into a RF bucket. Green line is for centered injection, red line is for 20 ns shifted, blue line is for 40 ns shifted, and purple line is for 60 ns shifted.

サブセクション 3.3 での議論から、MR で  $3.33\text{E}13$  ppb、2.4 s サイクル、~525 kW 運転は可能と考えられる。しかし、同サイクルで > 600 kW 運転を目指すとなると、サブセクション 3.2 で議論したチューン広がりから、半整数共鳴ラインの影響を無視できない。RF 電圧の最適化や、6 倍高調波の追加である程度のロス抑制は期待できるが、それと並行して、新オペレーションエリアの開発が必要である。

主電磁石増強後 MR 1Hz 運転での加速時間~0.5 s に対応する RF 加速パターンは検討中であるが、ビームロス制限を満たす解をまだ得ていない。

#### 4. 結論

J-PARC MR におけるビーム強度の増強方針を検討するにあたり、入射システムのアップグレードの効果を最大限引き出すべく、RF によるバンチ長操作の影響を 2.5 D シミュレーションで検討した。とくに、1 D シミュレーションの結果である、RF 基本波と 2 倍高調波に加え、6 倍高調波を追加導入した場合の、入射直後の Bunching factor への操作性向上

の予見を受け、MR ビーム強度増強への利用を検討した。2.4 s 繰り返しでの  $3.33\text{E}13$  ppb、MR 525 kW 運転は、RF 基本波と 2 倍高調波のみでも成立し得るが、6 倍高調波の追加導入によりロスの軽減が期待できること、さらに強度を上げた  $4.16\text{E}13$  ppb では、6 倍高調波導入による入射直後の Bunching factor 引き上げが、ビームハローのエミッタンス増加の抑制に効果的であるという結果を得た。

なお、本研究は J-PARC 加速器グループの協力によって進められた。特に発知英明氏 (JAEA) には、我々の求めに応じて、種々の RCS シミュレーション結果を、MR シミュレーションにおける初期分布として提供していただいた。ここに改めて謝意を表したい。

#### 参考文献

- [1] K. Hara, et al., this proceedings.
- [2] H. Hotchi, et al., Proc. of IPAC'12, New Orleans, USA, 2012 (3918-3920); H. Hotchi, et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2012) 02B003; H. Hotchi, et al., Proc. HB2012, Beijing, China, 2012 (68-72).
- [3] H. Harada, et al., this proceedings.
- [4] M. Shirakata, et al., this proceedings.
- [5] T. Koseki, et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2012) 02B004.
- [6] Y. Kurumoto, et al., this proceedings; Y. Morita, et al., this proceedings; T. Shimogawa, et al., this proceedings.
- [7] S. Machida, <http://accwww2.kek.jp/oho/OHOTxt3.html>
- [8] K. Ohmi, A. Molodozhentsev, private communications.
- [9] Y. Sato, et al., Proc. HB2012, Beijing, China, 2012 (575-579).
- [10] J. Kamiya, et al., Applied Superconductivity, IEEE Transactions Vol. 16, Issue 2, 1362-1365.; H. Harada private discussions.
- [11] S. Fukuoka, et al., this proceedings.
- [12] K. Fan, et al., this proceedings.
- [13] M. Shirakata, et al., Proc. IPAC2011, San Sebastian, Spain, 2011 (3496-3498).
- [14] K. Satou, et al., this proceedings.
- [15] S. Machida and M. Ikegami, AIP Conf. Proc. 448, p73 (1998).
- [16] K. Ohmi, et al., Proc. PAC07, p3318 (2007).
- [17] M. Shirakata, et al., Proc. PASJ8, Tsukuba, Japan, 2011 (293 - 295).
- [18] K. Niki, et al., Proc. EPAC2006, Edinburgh, Scotland, 2006.
- [19] J. Takano, et al., Proc. PASJ9, Osaka, Japan, 2012 (391-393).
- [20] F. Tamura, et al., PRST-AB 16, 051002 (2013).