

Simulation of optimization for rf capture at J-PARC MR by using controlled longitudinal emittance blow-up in RCS

Masanobu Yamamoto^{*A)}, Eizi Ezura^{B)}, Keigo Hara^{B)}, Katsushi Hasegawa^{B)}, Masahiro Nomura^{A)}, Chihiro Ohmori^{B)}, Alexander Schnase^{A)}, Taihei Shimada^{A)}, Akira Takagi^{B)}, Koji Takata^{B)}, Fumihiko Tamura^{A)}, Makoto Toda^{B)}, Masahito Yoshii^{B)},
^{A)}Japan Atomic Energy Agency, 2-4, Shirakata-shirane, Tokai village, Ibaraki, 319-1195
^{B)}KEK, 1-1, Oho, Tsukuba city, Ibaraki, 305-0801

Abstract

In J-PARC RCS, longitudinal beam emittance at the extraction should be optimized to avoid the beam loss after MR injection. In order to match the longitudinal emittance shape between the RCS and the MR, it is desirable to enlarge the longitudinal emittance in the RCS. We have performed the particle tracking simulation for the controlled longitudinal emittance blow-up in the RCS and the MR injection.

J-PARC RCS における縦方向エミッタンス増大操作を用いた MR RF 捕獲の最適化のシミュレーション

1. はじめに

J-PARC 3 GeV RCS は現在、物質生命科学実験施設及び後段の MR に向けて、181 MeV 入射にて 2.5×10^{13} ppp (25 Hz 繰り返しで 300 kW 相当) のビームを供給している。ビームパワーをさらに増強するために、2013 年に入射エネルギーを 400 MeV に上げることが予定されており^[1]、これによって設計値である 8.3×10^{13} ppp (25 Hz 繰り返しで 1 MW 相当) を目指すことが可能となる。

MR にビームを供給する際には、MR の入射領域での空間電荷効果によるビーム損失を抑えるために、RCS から取り出すビームはパンチングファクターを大きくしておく必要がある。しかし、これまでの RCS と MR の縦方向ビームトラッキングの結果より、RCS の取り出しでパンチングファクターを大きくしようとするときビームエミッタンスが扁平になってしまい、MR の入射パケツでうまく受け取るパラメータを探しづらいことが分かっている^[2]。これは、RCS のビームエミッタンスが MR の RF パケツに対して小さいことが原因として考えられる。

RCS の加速電圧パターンは加速後半で十分な余裕があり^[2]、その際にエミッタンスを制御の下で増大させることができれば、MR でうまく受け取れる RF パケツを探ることができると考えられる。RCS においてエミッタンス増大を計算した最近の結果では、位相変調^[4, 5, 6]や Chirikov resonance overlap^[7]を用いて RCS の加速後半の数 ms 程度でもエミッタンスを十分に増大させられることが分かっている^[3]。

この報告では、RCS においてエミッタンスを増大させ、その上でパンチングファクターを改善して MR に入射した場合について述べる。

2. RCS でのエミッタンス増大操作

RCS の加速電圧パターンは、ビームエミッタンスが 5 eVs のビームが、Momentum filling factor が 82 % になるように設計されている^[2]。図 1 にビームローディングや空間電荷効果が無い場合の加速時の各種パラメータ

を載せる。加速後半で Momentum filling factor が下がってきているのは、加速後半で電圧の設定を少し高めに行っているからである。これは、Momentum filling factor の値を保ったままだと、加速電圧が低くなりすぎエミッタンスが断熱的な変化をしなくなるので、それを避けるためである。

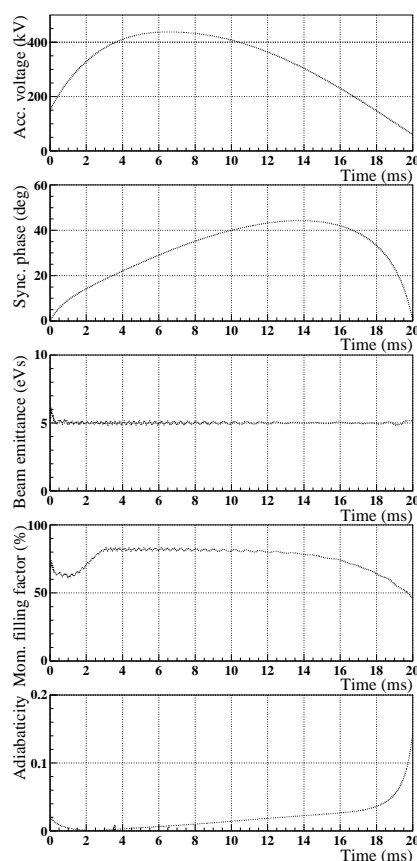


図 1: RCS の各種パラメータの時間変化

この加速後半に設けた RF パケツの余裕を使って、エミッタンスの増大操作をすることが可能である。エミッタンスの増大操作には位相変調や Resonance overlap が

* masanobu.yamamoto@j-parc.jp

あるが、RCSの加速後半の条件でシミュレーションをしたところ、増大の早さには両者に間にそれほど大差はなく、位相変調の方が少ない電圧で可能なことが分かっている[3]、ここでは位相変調の場合についてのみ述べる。位相変調を行う際に、粒子にかかる全電圧 V_t は以下のように表される。

$$V_t = V_0 \sin h_0 \omega_{\text{revs}} t + V_b \sin(h_b \omega_{\text{revs}} t + \psi(t) + \psi_b) \quad (1)$$

ここで V_0 と h_0 は、基本となる加速電圧の振幅とハーモニック数、 ω_{revs} はシンクロン粒子の周回周波数である。これに対して V_b と h_b は位相変調のための電圧を発生する高調波空胴の電圧とハーモニック数であり、その位相は以下のように変調される。

$$\psi(t) = \Delta\phi_{\text{mod}} \sin \omega_{\text{mod}} t \quad (2)$$

ここで $\Delta\phi_{\text{mod}}$ は位相変調の大きさであり、 ω_{mod} は変調の周波数である。位相変調には ω_{mod} に関して大きく分けて二つの領域があり、 $\omega_{\text{mod}}/\omega_s < 5$ の場合を'resonant領域'[4]、 $\omega_{\text{mod}}/\omega_s > 10$ の場合を'noise領域'[5,6]と呼んでいる。RCSの場合、resonant領域においてエミッタンスがきれいに増加することが計算により分かったので[3]、以下、resonant領域についてのみ述べる。

図2は、位相変調が無い場合のRCSの取り出しでのエミッタンスとパンチ波形である。位相空間に示した楕円は5 eVsのエミッタンスを表す。これに対して、図3は $h_b/h_0 = 20$ の位相変調を加えた場合、図4は $h_b/h_0 = 30$ の位相変調を加えた場合である。変調周波数に関しては $\omega_{\text{mod}}/\omega_s = 4$ を使用しており、RFバケツに余裕のできる16 msから加え始めている。図3と図4において位相空間に示した楕円は10 eVsのエミッタンスを表す。このように、位相変調を用いて4 msという短時間でエミッタンスを増大させることができている。ちなみにこれらの計算では、位相変調によるエミッタンス増大の効果を単純に比較するために、ビームローディングや空間電荷効果は考慮していない。

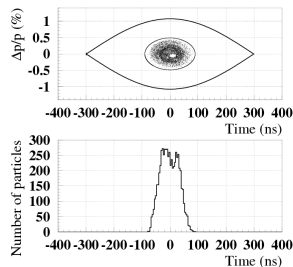


図2: 位相変調が無い場合のエミッタンスとパンチ波形

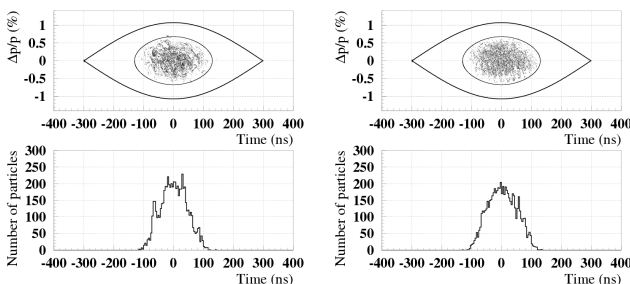


図3: $h_b/h_0 = 20$ の位相変調を加えた場合

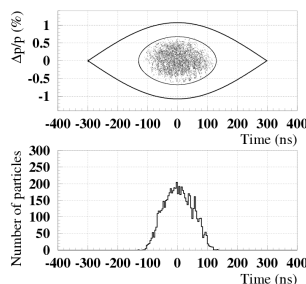


図4: $h_b/h_0 = 30$ の位相変調を加えた場合

位相変調として加えた電圧振幅と位相振幅の条件を表1に、高調波空胴の電圧とエミッタンスの変化の様子を図5に載せる。図5において実線は $h_b/h_0 = 20$ の場合を、点線は $h_b/h_0 = 30$ の場合を示す。 $h_b/h_0 = 20$ の場合の方が、 $h_b/h_0 = 30$ の場合に比べて約半分の電圧で同じだけエミッタンスを増やすことができているが、図3と図4を比べて分かる通りパンチ波形としては $h_b/h_0 = 30$ の方が滑らかである。

表1: 位相変調の計算条件

	h_b/h_0	Bucket height	$\Delta\phi_{\text{mod}}$
図3	20	0.19 %	180 deg.
図4	30	0.21 %	180 deg.

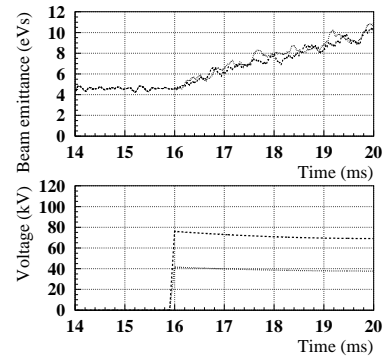


図5: 高調波空胴の電圧とエミッタンス

位相変調によってエミッタンス増大させた上で、さらにパンチングファクターを改善するために、2倍高調波を取り出し付近で加える計算を行った。ここからの計算では、RCSにおいて 5.0×10^{13} ppp (25 Hz 繰り返して600 kW相当)のビームを加速しているとして、ビームローディングと空間電荷効果を考慮に入れている。なおビームローディングについては、Feedforwardによる補償[8]で $h = 2, 4$ の成分については完全に消されているものとしている。

図6と図7については、 $h_b/h_0 = 20$ と $h_b/h_0 = 30$ のそれぞれについて2倍高調波を50%まで加えた場合で、図8と図9については、2倍高調波をさらに80%まで加えた場合である。図6と図8から分かるとおり、 $h_b/h_0 = 20$ についてはまだ、高調波空胴の電圧による細かなピーク構造が残ってしまって滑らかなパンチ形状ではないので、 $h_b/h_0 = 30$ の位相変調を使う方が良いと考えられる。

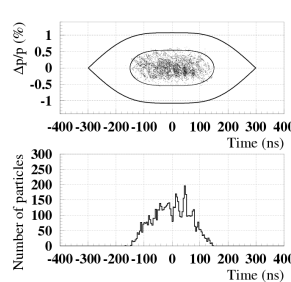


図6: $h_b/h_0 = 20$ の位相変調で、2倍高調波を50%まで加えた場合

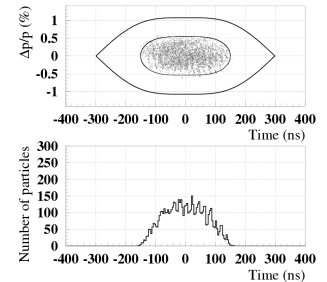


図7: $h_b/h_0 = 30$ の位相変調で、2倍高調波を50%まで加えた場合

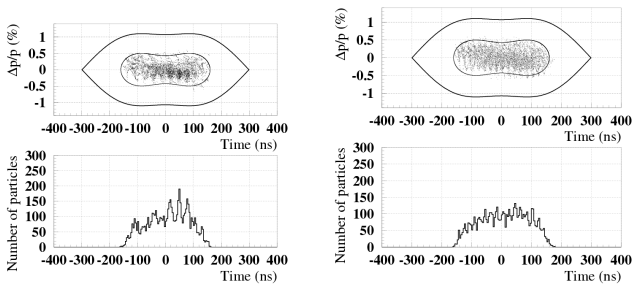


図 8: $h_b/h_0 = 20$ の位相変調で、2 倍高調波を 80 % まで加えた場合

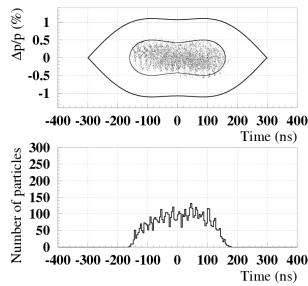


図 9: $h_b/h_0 = 30$ の位相変調で、2 倍高調波を 80 % まで加えた場合

ちなみに、図 10 と図 11 に位相変調を加えずに 2 倍高調波だけを加えてパンチ形状をなだらかにした計算結果を載せてある。図 10 は 2 倍高調波を 50 % まで、図 11 は 80 % までそれぞれ加えている。この場合、位相空間上では非常に扁平なエミッタンスとなっていることが分かる。

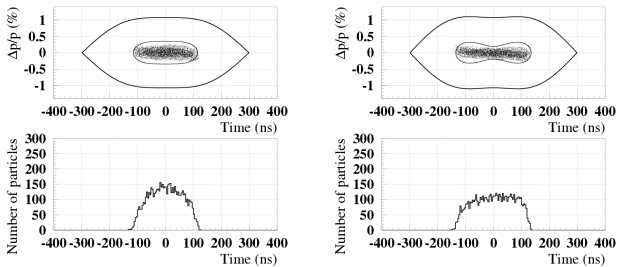


図 10: 位相変調無しで 2 倍高調波を 50 % まで加えた場合

図 11: 位相変調無しで 2 倍高調波を 80 % まで加えた場合

3. MR 入射と加速

MR の加速電圧は、最大 280 kV となっている [9]。MR においては、図 12 のように 40 ms おきに RCS から 2 パンチが 4 回、計 8 パンチが入射される。その間 MR の磁場は一定に保たれ、最後のパンチが入射した 50 ms 後に磁場がパラボラ曲線でランピングしていく。

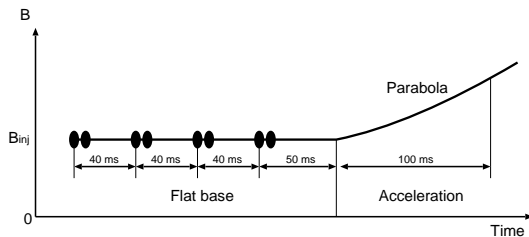


図 12: MR の磁場と入射タイミング

図 13 に、ビームローディングや空間電荷効果が無い場合の各種パラメータの時間変化を載せる。ビームエミッタンスは最大 10 eVs を想定しており、Momentum filling factor は加速開始直後のパラボラの部分で 80 % 程度となる。MR で待ち受け電圧を設定する際には 280 kV よりも低い電圧を設定してもよいが、加速開始時にはバ

ケツ高を確保するために、電圧を上げておく必要があることに注意しなければならない。

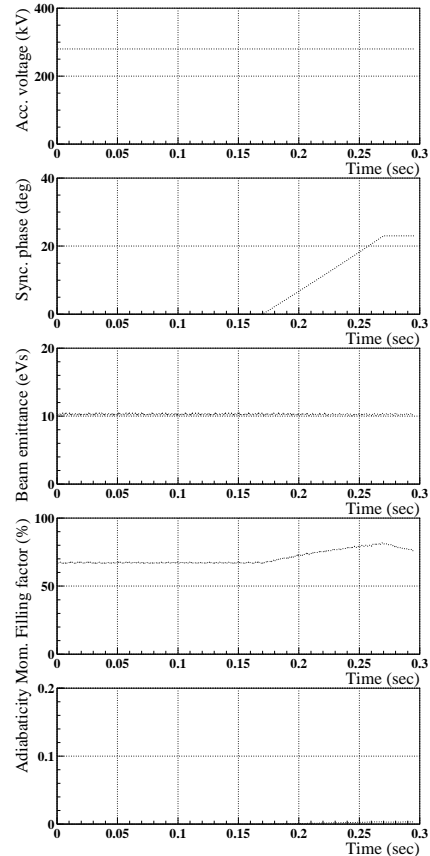


図 13: MR の各種パラメータの時間変化

以上のような条件の下で、前節で得られた RCS のビームを MR に入射して、加速開始直後までのシミュレーションを行った。MR のハーモニック数は 9 でそのうち 8 個の RF パケツにビームを入射し、ビームローディングや空間電荷効果も考慮している。なおビームローディングに関しては、Feedforward による補償 [10] で $h = 8, 9, 10$ の成分については完全に消されているものとしている。

図 14 と図 15 は、RCS で $h_b/h_0 = 30$ の位相変調を用いてエミッタンスを増大させたのちに MR に入射した場合の、MR でのパンチングファクターの変化である。図 14 は入射直後の 10 ms について拡大表示したもので、図 15 は加速開始直後のパラボラの部分までを表示したものである。図中の一番上の太い線は RCS の取り出しで 2 倍高調波を 80 % まで加えた場合、真ん中の点線は 50 % まで加えた場合、一番下の細い線は 2 倍高調波を加えなかった場合である。MR での RF のパラメータは表 2 に示してある。

図 14 から分かる通り、RCS の取り出しで 2 倍高調波を 80 % かけたものについては MR に入った後もパンチングファクターが 0.32 以上を保っており、2 倍高調波を 50 % かけたものでも 0.27 以上となっている。これは、RCS のエミッタンスを MR の RF パケツがうまく捕まえていると言える。なお、2 倍高調波をかけなかったものについては、0.22 以上となっている。また、MR の電圧は 280 kV で固定しているため、図 15 から分かる通

り、加速を開始した後もバンチングファクターは緩やかに下がっていくだけである。

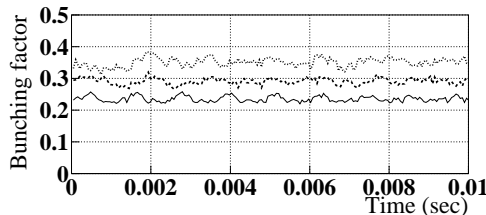


図 14: RCS でエミッタンスを増大させた場合の MR 入射直後のバンチングファクターの変化

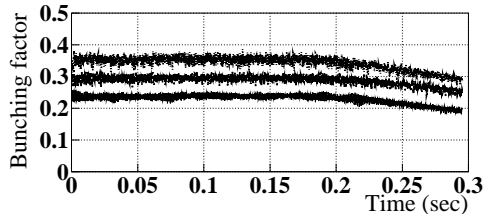


図 15: RCS でエミッタンスを増大させた場合の MR 加速開始直後までのバンチングファクターの変化

表 2: MR RF の計算条件 (RCS でエミッタンス増大あり)

	基本波	2倍高調波
図 14, 15 の一番上の太線	280 kV	70 %
図 14, 15 の真ん中の点線	280 kV	40 %
図 14, 15 の一番下の細線	280 kV	0 %

これに対して図 16 と図 17 は、RCS ではエミッタンスの増大を行わずに MR に入射した場合の、MR でのバンチングファクターの変化である。図 16 は入射直後の 10 ms について拡大表示したもので、図 17 は加速開始直後のパラボラの部分までを表示したものである。図中の上の太線は RCS の取り出しで 2 倍高調波を 80 % まで加えた場合で下の細線は 50 % まで加えた場合である。MR での RF のパラメータは表 3 に示してある。ただし、基本波電圧については、入射の終わった 0.12 ~ 0.17 sec にかけて 280 kV に電圧を上げている。

図 16 から分かる通り、RCS の取り出しで 2 倍高調波を 80 % かけたものについては MR に入った後に MR RF パケツとのマッチングが悪く一旦バンチングファクターが 0.27 程度まで下落する。2 倍高調波を 50 % かけたものでは概ねマッチングが取れているもののバンチングファクターが 0.25 を下回ることもある。また、加速が始まる前に電圧を 280 kV まで上げているため、図 17 から分かる通り、加速開始前にバンチングファクターが 0.25 より小さくなってしまふ。

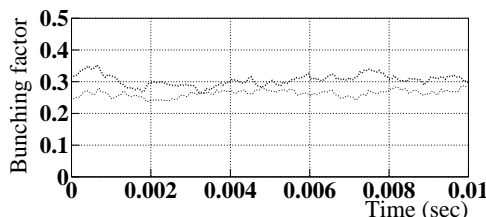


図 16: RCS でエミッタンスを増大させない場合の MR 入射直後のバンチングファクターの変化

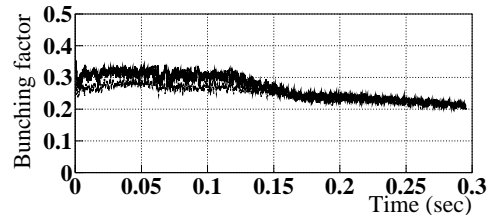


図 17: RCS でエミッタンスを増大させない場合の MR 加速開始直後までのバンチングファクターの変化

表 3: MR RF の計算条件 (RCS でエミッタンス増大なし)

	基本波	2倍高調波
図 16, 17 の上の太線	70 kV	70 %
図 16, 17 の下の細線	150 kV	60 %

以上のことから、RCS においてエミッタンス増大操作をした上で 2 倍高調波をかけて MR に入射をすると、MR RF パケツとのマッチングがよく、さらに加速開始時にもバンチングファクターを落とさずに済むことが分かった。

4. まとめ

J-PARC RCR と MR について、粒子トラッキングコードを用いてシミュレーションを行った。RCS において、加速後半に位相変調を用いてエミッタンス増大操作を行い、その上で 2 倍高調波をかけてバンチングファクターを改善して MR に入射すると、MR RF パケツとうまくマッチさせることができ、MR 入射後もバンチングファクターを保ったまま加速に入れることが分かった。

参考文献

- [1] N. Hayashi *et al.*, "Injection Energy Recovery of J-PARC RCS", Proc. of IPAC'11, p.2730, 2011
- [2] M. Yamamoto *et al.*, "Simulation of Longitudinal Emittance Control in J-PARC RCS for 400 MeV injection", Proc. of IPAC'11, p.607, 2011
- [3] M. Yamamoto *et al.*, "Simulation of controlled longitudinal emittance blow-up in J-PARC RCS", Proc. of IPAC'12, 2012
- [4] V.V. Balandin *et al.*, "The Resonant Theory of Longitudinal Emittance Blow-up by Phase Modulated High harmonic Cavities", Part. Acc., Vol. 35, p.1, 1991
- [5] D. Boussard, "The RF Noise Theory Applied to the PS Longitudinal Controlled Blow-up", CERN SPS/ARF/Note 85-7, 1985
- [6] J.M. Kats, "Particle Longitudinal Diffusion Produced by a High Frequency Cavity, Proc. of 1987 PAC, p.1281, 1987
- [7] B.V. Chirikov, "A Universal Instability of Many-Dimensional Oscillator Systems", Physics Reports 52 No.5 (1979) p.263-379
- [8] F. Tamura *et al.*, "Multiharmonic rf feedforward system for beam loading compensation in wide-band cavities of a rapid cycling synchrotron", Phys. Rev. ST Accel. Beams 14, 051004 (2011)
- [9] M. Yoshii *et al.*, "The status of J-PARC Ring RF Systems", Proc. of IPAC'12, 2012
- [10] F. Tamura *et al.*, "Commissioning of multiharmonic feedforward system for J-PARC MR", WELR07, in these proceedings (2012)