

## Longitudinal Particle Simulation of J-PARC RCS for 400 MeV injection

山本昌亘<sup>1\*</sup>、絵面栄二<sup>3</sup>、長谷川豪志<sup>2</sup>、原圭吾<sup>2</sup>、野村昌弘<sup>1</sup>、大森千広<sup>2</sup>、  
シュナーゼアレクサンダー<sup>1</sup>、島田太平<sup>1</sup>、高田耕治<sup>3</sup>、高木昭<sup>2</sup>、田村文彦<sup>1</sup>、戸田信<sup>2</sup>、  
吉井正人<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JAEA J-PARC センター、<sup>2</sup>KEK J-PARC センター、<sup>3</sup>KEK

### Abstract

The scheduled injection energy upgrade of J-PARC RCS aims to reduce the space charge tune shift while increasing the beam intensity. The acceleration pattern should be optimized so that the rf bucket has enough margin under the heavy beam loading and the space charge effect. We describe the particle tracking simulation for the injection energy upgrade.

## J-PARC RCS における 400MeV 入射での縦方向シミュレーション

### 1. INTRODUCTION

J-PARC Rapid Cycling Synchrotron (RCS) は、生命物質科学実験施設 (MLF) 及び Main Ring (MR) へのビーム供給を開始しており、ビーム強度向上を目指した加速器のビームスタディも進行中である<sup>[1,2]</sup>。現在は 181 MeV 入射エネルギーにて、MLF には  $1.0 \times 10^{13}$  ppp、MR には  $2.5 \times 10^{13}$  ppp のビームを供給しているが、当初の設計値である 1 MW ビームパワー ( $8.3 \times 10^{13}$  ppp) を目指すために<sup>[3]</sup>、入射エネルギーを 400 MeV にアップグレードする計画が進んでいる。400 MeV 入射時の RCS の運転パラメーターを表 1 に載せる。

Injection energy	400 MeV
Extraction energy	3 GeV
Number of particles	$8.3 \times 10^{13}$ ppp
Harmonic number	2
Repetition rate	25 Hz
Acceleration period	20 ms
RF Frequency range	1.228~1.672 MHz

表 1: J-PARC RCS のパラメーター。

400 MeV 入射時には、現状の 181 MeV 入射時とは違った縦方向エミッタンスのビームを加速することとなり、それに合わせて加速電圧パターンも調整することになる。

入射領域においては空間電荷効果を抑えるために 2 倍高調波、運動量オフセット、2 倍高調波位相スweepを導入しパンチングファクターを大きくしている<sup>[4]</sup>。さらに、Sin 波で変化する偏向磁場の下でマルチターン入射を行っていることなどから、縦方向エミッタンスの値を解析的に見積もることは困難である。このため、粒子トラッキングコードによってビームエミッタンスを求めていくことになる。

大強度陽子ビームを加速する RCS においては、特にビームローディングによりビームエミッタンスが

増大するため、加速電圧パターンの設定にも注意が必要である。本報告では、粒子トラッキングコードの計算結果を元に、400 MeV 入射時の加速電圧パターンについて述べる。

### 2. 加速電圧パターンとビームエミッタンス

J-PARC RCS においては、Linac で加速されたマクロパルスに 306 ターンかけてマルチターン入射を行う。Linac のマクロパルスは RCS での入射時のビームロスを防ぐためにチョッピングされており、中間パルスとして切り分けられて RCS に入射される。RCS RF の 1 波長と中間パルス長の比はチョッピングファクターとして表され、400 MeV 入射時にはチョッピングファクター 53.3 % が必要である。これは、RCS 入射時に 435 ns のパンチ長となる。このチョップされた中間パルスが RF バケツの中で回転を始め、RCS での縦方向ビームエミッタンスが形成される。RCS の加速途中のビームエミッタンスは、加速電圧が断熱的な変化を行う限りにおいては、この入射時のビームエミッタンスの値から変化しない<sup>[5]</sup>。

400 MeV 入射での加速電圧パターンを設定するために、縦方向ビームエミッタンス  $\epsilon_L$  が 4 ~ 5 eVs で、運動量座標軸上でのバケツ高に対するビームエミッタンスの占める割合である運動量フィリングファクター  $P_f$  が 8 割程度となる加速電圧パターンを作成した。図 1 に  $\epsilon_L$  を (a) 5 eVs と (b) 4 eVs、 $P_f$  を 82 % に設定した場合の加速電圧パターンを載せる。点線は、 $\epsilon_L$  を加速全域にわたって 5 eVs に保った場合の加速電圧パターンであるが、この場合取り出し電圧が低くなりすぎてビーム損失を招くので、181 MeV 入射時のビーム試験での経験から取り出し電圧を 150 kV に設定する。

ビームの素性を知るために、まずはビームローディングや空間電荷効果といった断熱的でないものについては除外してシミュレーションを行った。図 2 にシミュレーション結果を載せる。シミュレーションにおいては、入射領域において 2 倍高調波を基本波に対して 80 % の振幅で重畳し、運動量オフセットを -0.2 % 導入している。さらに、入射直後のパンチン

\* masanobu.yamamoto@j-parc.jp

グファクターを改善するために、2倍高調波の位相スイープを行っている<sup>[6]</sup>。2倍高調波については図1にあるように、1msまでは80%に保ち、その後2msにかけてゼロに戻している。図2にあるように $P_f$ の計算値はその区間だけ減少している。また、取り出し電圧を150kVに設定しているため、加速電圧が最大になる7ms付近から $P_f$ の値は徐々に減少している。 $\varepsilon_L$ の計算値については、加速電圧が断熱的に変化しているため、加速全域にわたってほぼ一定の値をとっている。

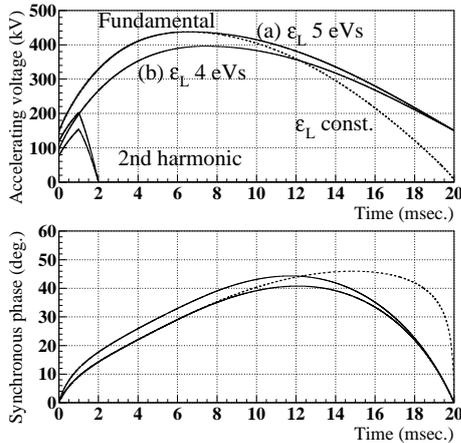


図1: (a) 太い実線は $\varepsilon_L = 5$  eVs 設定、(b) 細い実線は $\varepsilon_L = 4$  eVs 設定の場合の加速電圧とシンクロナス位相。 $P_f$ は82%設定にし、取り出し電圧150kVに合わせている。点線は、 $\varepsilon_L$ を加速全域にわたって5eVsに保った場合。

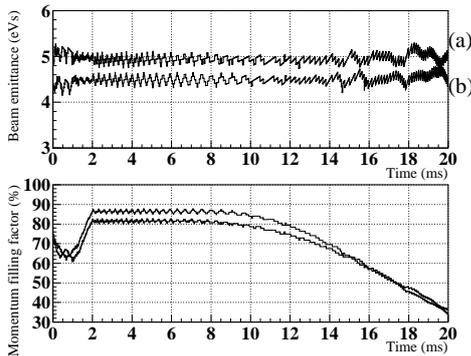


図2: (a) 太い実線は $\varepsilon_L = 5$  eVs 設定、(b) 細い実線が4eVsに設定した加速電圧パターンでの、 $\varepsilon_L$ と $P_f$ のシミュレーション結果。

表2にシミュレーション結果のまとめを載せる。(a)の場合は、設定した $\varepsilon_L$ 、 $P_f$ に近い値が計算したビームでも得られているが、(b)については設定した $\varepsilon_L$ 、 $P_f$ よりも大きな値となっている。

	設定値		計算値	
	$\varepsilon_L$	$P_f$	$\varepsilon_L$	$P_f$
(a)	5.0 eVs	82 %	5.0 eVs	81 %
(b)	4.0 eVs	82 %	4.5 eVs	86 %

表2: シミュレーション結果のまとめ。

### 3. 大強度ビーム加速

ビームローディングと空間電荷効果を考慮したシミュレーション結果が、図3である。粒子数が $8.322 \times 10^{13}$  pppの1MW相当のビームで、ビームローディングについては、RF周波数の基本波、及び2倍高調波成分についてはFeedforwardにより完全に補償されているものとしている。(a) 太い点線は参照のために載せた $\varepsilon_L = 5.0$  eVs 設定で、ビームローディング無し、空間電荷効果無し (d)  $\varepsilon_L = 5.0$  eVs 設定でビームローディング及び空間電荷効果あり、(e)  $\varepsilon_L = 4.0$  eVs 設定でビームローディング及び空間電荷効果ありのシミュレーション結果である。

加速後半にかけて大きなエミッタンス増加が起きていることが分かる。特に(e)の $\varepsilon_L = 4$  eVs 設定では $P_f$ が100%を超えており、パケツからビームがこぼれていることを示している。(d)の $\varepsilon_L = 5$  eVs 設定でも8msから12msにかけて $P_f$ が100%に近づくところもあり、(d)の加速電圧パターンよりも電圧が低い場合には、1MWビームを加速することは難しいことを示している。

現状のRCSのRFシステムでは、加速空洞11台で約400kVを発生しており<sup>[7]</sup>、現状のシステムで実現可能な加速電圧パターンは $\varepsilon_L = 4$  eVs 設定である。 $\varepsilon_L = 5$  eVs 設定に必要な440kVを可能にするためには、もう一台加速空洞を追加することが必要不可欠である。

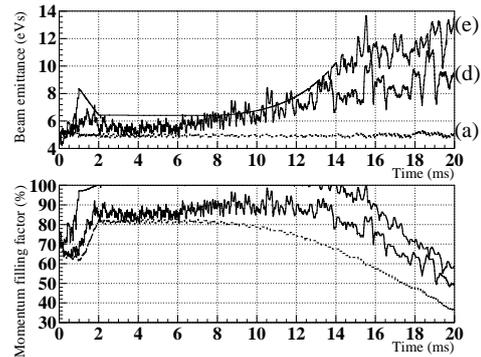


図3: (a)  $\varepsilon_L = 5$  eVs 設定で、ビームローディング、空間電荷効果無し、(d)  $\varepsilon_L = 5$  eVs 設定で、ビームローディング、空間電荷効果あり、(e)  $\varepsilon_L = 4$  eVs 設定で、ビームローディング、空間電荷効果ありのシミュレーション結果。

### 4. 取り出し電圧

図1で示した通り、 $\varepsilon_L$ を加速全域にわたって一定に保った場合、元々取り出し電圧は数kVという非常に小さな値になる。しかし、図3を見ても明らかのように、ビームローディングや空間電荷効果がある場合には、加速後半でエミッタンスの増大が起き、取り出し電圧を上げざるを得ない。ただし、取り出し電圧を下げた方が、よりフラットなパンチを形成できてパンチングファクターを上げるには都合がよい

ので、エミッタンスの増大がある中で取り出し電圧を下げる手法について計算を行った。

図4に計算に使用した加速電圧パターンを示す。(a) 太い実線は参照のために載せた  $\varepsilon_L = 5$  eVs 設定で取り出し電圧 150 kV の場合、(f) 太い点線は取り出し電圧 60 kV の場合、(g) 細い実線は (a) の場合の最大加速電圧を 12 ms まで保って、そこから取り出し電圧 60 kV に向けて下げていった場合である。

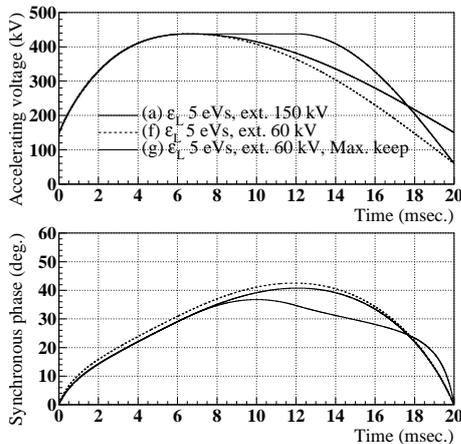


図4: (a) 太い実線は  $\varepsilon_L = 5$  eVs 設定、取り出し電圧 150 kV、(f) 太い点線は  $\varepsilon_L = 5$  eVs 設定、取り出し電圧 60 kV、(g) 細い実線は  $\varepsilon_L = 5$  eVs 設定、最大加速電圧を 12 ms まで保持し、取り出し電圧 60 kV。

図5にシミュレーション結果を載せる。取り出し電圧を単純に 60 kV に下げた (f) の場合は、加速後半で  $P_f$  が 100% を超えるところがあり、ビーム損失を招くことを示している。これに対して、最大加速電圧を 12 ms まで保った後に 60 kV に向けて下げていく (g) の場合は、元々バケツに余裕がなかった 8 ms から 16 ms にかけて  $P_f$  が大幅に改善されており、ビーム損失無く取り出し電圧を下げることを示している。

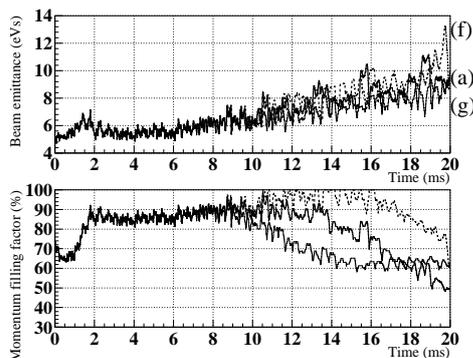


図5: (a) 太い実線は  $\varepsilon_L = 5$  eVs 設定、取り出し電圧 150 kV、(f) 太い点線は  $\varepsilon_L = 5$  eVs 設定、取り出し電圧 60 kV、(g) 細い実線は  $\varepsilon_L = 5$  eVs 設定、最大加速電圧を 10 ms まで保持し、取り出し電圧 60 kV した場合のシミュレーション結果。

RCS で取り出し後、MR にビームを渡す際、パンチングファクターを上げることが求められており、RCS の取り出し付近 1 ms において 2 倍高調波を再度基本波の 80% の割合で加えた場合、(a) のパターンではパンチングファクターは 0.3 なのに対し、(g) の場合は 0.35 まで改善することができる。

## 5. SUMMARY

J-PARC RCS で予定されている入射エネルギーの 400 MeV 化について、縦方向粒子トラッキングコードを使ってビームエミッタンスの振る舞いを計算した。主にビームローディングの影響で、加速後半に大きなエミッタンス増加が起こるため、 $8.3 \times 10^{13}$  ppp の粒子を加速するためには  $\varepsilon_L = 5$  eVs 設定の加速電圧パターンが必要であり、最大加速電圧を 440 kV 程度にする必要がある。また、加速後半ではビーム損失を抑えるために電圧を上げる必要があるが、取り出し時の電圧を下げる場合には、最大加速電圧を保ったパターンを使うとビーム損失無く加速でき、取り出し時のパンチングファクターも改善できる。

## 参考文献

- [1] H. Hotchi *et al.*, "Beam commissioning of the 3-GeV rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex", Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 040402 (2009)
- [2] H. Hotchi *et al.*, "High Intensity Beam Operations in the J-PARC 3-GeV RCS", Proc. of IPAC'10, p.624, 2010
- [3] The Joint Project Team of JAERI and KEK, "The Joint Project for High-Intensity Proton Accelerators", JAERI-Tech 99-056 or KEK Report99-4, 1999.
- [4] F. Tamura *et al.*, "Longitudinal painting with large amplitude second harmonic rf voltages in the rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex", Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 041001 (2009)
- [5] M. Yamamoto *et al.*, "Simulation of Longitudinal Emittance Control in J-PARC RCS", Proc. of IPAC'10, p.1940, 2010
- [6] M. Yamamoto *et al.*, "Simulation of longitudinal beam manipulation during multi-turn injection in J-PARC RCS", Nucl. Instr. and Meth. A 621 (2010) p.15
- [7] M. Yoshii *et al.*, "Recent Status and Future Plan of J-PARC MA Loaded RF Systems", Proc. of IPAC'10, p.615, 2010