

# SIMULATION CALCULATION OF LONGITUDINAL BEAM DISTRIBUTION IN J-PARC MAIN RING

Keigo Hara\*, Chihiro Ohmori, Tadashi Koseki, Yoichi Sato  
High Energy Accelerator Research Organization, KEK  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801 Japan

## Abstract

The J-PARC accelerator complex consists of 3 accelerators, a linear accelerator, a rapid cycle synchrotron (RCS) and a Main Ring (MR) synchrotron. Simulation calculation of longitudinal beam distribution in J-PARC Main Ring has been performed. The effect that RF voltage pattern, space charge, and beamloading gave was examined.

## J-PARC MainRing 縦方向ビーム分布に対するシミュレーション計算

### 1. はじめに

J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex)は大強度の陽子ビームを供給する加速器施設である。J-PARC 加速器群は 181 MeV まで加速する Linac, 3GeV まで加速する RCS, 30 GeV まで加速する MR の 3 種類の加速器で構成されている。本発表では MR に対して縦方向のビームシミュレーション計算を行った結果を示す。ビームシミュレーション計算は大きく分けて 3 種類行った。

その内容として (1) 現在 MR は 150kW 程度のビームを供給している。このインテンシティーのビームに対して空間電荷効果が引き起こすチューンシフト量を 5 種類の電圧パターンで計算した。(2) 加速空洞のインピーダンスによってビームが電圧を誘起する。現状のインテンシティーのビームが引き起こす電圧がビーム損失に与える影響を 4 種類の電圧パターンで計算した。(3)MR は将来的に MW ビーム運転を目指している。そのため手段の一つとして運転の繰返し周期を現在の 0.3 Hz より早める方法が検討されている。当初の加速電圧 280 kV で加速時間を現状の 1.9 sec からどの程度縮めることができるのかビーム損失によって評価した。また加速電圧を固定して加速時間を変えるのではなく、加速時間を 0.5 sec に固定しどの程度の加速電圧があればビーム損失を無くすることができるのか評価した。

### 2. シミュレーション条件

表 1 に全ての計算で共通なパラメーターを示す。ビームの縦方向の運動を計算するにあたっては、シンクロトロン振動の微分方程式、

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\Delta E}{h\omega_{revs}} \right) = \frac{eV}{2\pi h} (\sin \phi - \sin \phi_s) \quad (1)$$

$$\frac{d\Delta\phi}{dt} = h\omega_{revs} \frac{\eta}{\beta^2} \left( \frac{\Delta E}{E_s} \right) \quad (2)$$

の微分項に 1 週あたりの諸量の時間変化の差分を

$$\frac{d\Delta E}{dt} \simeq \frac{(\Delta E)_{turn}}{T_{revs}} \quad (3)$$

\* keigo.hara@kek.jp

$$\frac{d\Delta\phi}{dt} \simeq \frac{(\Delta\phi)_{turn}}{T_{revs}} \quad (4)$$

という関係を持ち込み計算している。ここで  $h$  はハーマニク数と呼ばれ周回周波数  $f_{revs}$  と加速高周波電圧の周波数  $f_{rf}$  を  $f_{rf} = hf_{revs}$  で関係付ける、 $e$  は素電荷、 $V$  は加速電圧の振幅である。

表 1: Main Parameter

Path of 50 GeV ring	1567.50 m
Injection Kinematic Energy	3 GeV
Extraction Kinematic Energy	30 GeV
Bending Radius	89.381 m
Momentum Compaction Factor	-0.001
Harmonic Number	9
Injection Time	0.04-0.12 s
Acceleration Time : 0.5-1.9 s	
	0.1 : parabola
	0.3-1.7 : linear
	0.1 : parabola

また空間電荷効果によって引き起こされる粒子の運動は、粒子同士の直接的な相互作用ではなく、粒子の空間分布からポテンシャルの形を決定し粒子が場から受けるローレンツ力を計算し粒子に反映させている。

### 3. 計算結果

3.1 RF 電圧パターンの違いによって空間電荷効果がチューンシフトに与える影響の違い

空間電荷効果によって引き起こされるチューンシフトの大きさは、ビームの分布が一樣としたとき、

$$\Delta\nu_{sc} = \frac{N_B r_p}{2\pi\epsilon_y \beta^2 \gamma^3 B_f} \quad (5)$$

と表される<sup>[1],[2]</sup>。ここで  $N_B$  は全電荷、 $r_p$  は陽子の古典半径、 $\epsilon_y$  は横方向のエミッタンスであり、 $B_f$  はバン

チングファクターで次のように定義される。

$$B_f = \frac{I_{average}}{I_{peak}} \quad (6)$$

RF 電圧パターンの違いによって空間電荷効果がチューンシフトに与える影響の違いを評価するにあたり、ここでは  $1/(\beta^2\gamma^3 B_f)$  の値を比較した。なぜなら実際のビームは一様な分布ではなく、式 (5) で表されるチューンシフトには分布関数に応じたフォームファクターを考慮しなければならないし、またエミッタンスの大きさにもよるので、純粋に縦方向が関与する値と思われるからである。

まず今回の計算のパラメーターを表 2 に示す。

表 2: 3.1 で使用しているパラメータ

RCS beam power	322 kW
RCS extraction fundamental RF voltage	150 kV
RCS extraction 2nd harmonics RF voltage	30 kV
MR injection fundamental RF voltage	80 kV
MR accelation fundamental RF voltage	200 kV
MR 2nd harmonics RF voltage	0 kV
Injection Time	0.04 s
Acceleration Time	1.9 s
	0.1 : parabola
	1.7 : linear
	0.1 : parabola

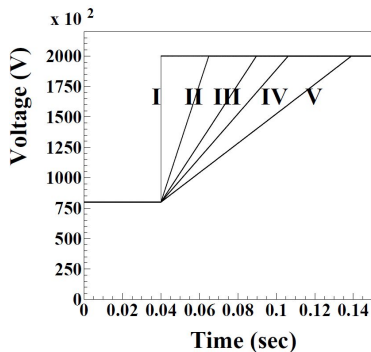


図 1: RF 電圧パターン

そして図 1 に RF 加速電圧パターンを示す。加速開始時に 200 kV まで上げてしまうパターン (I) から、0.025sec かけて上げていくパターン (II)、0.05sec かけて上げていくパターン (III)、0.075sec かけて上げていくパターン (IV)、0.1sec かけて上げていくパターン (V) までの 5 種類のパターンについて計算を行った。

図 2 が加速電圧パターン (I) で加速した場合の  $1/(\beta^2\gamma^3 B_f)$  の値である。待ち受けている 40 msec の間は 0.95 程度であった  $1/(\beta^2\gamma^3 B_f)$  の値が加速開始直後、加速電圧をあげると共に 0.145 程度にまではね上がっている。これは加速電圧が高くなったため、位相空

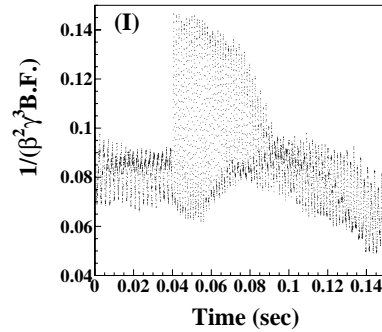


図 2: 加速電圧パターン (I) で加速した場合の  $1/(\beta^2\gamma^3 B_f)$ 。

間内のセパトリクスが運動量方向に広がりそれに伴い、粒子の分布も運動量方向に広がりピーク電流が増加したためと思われる。

表 3 に電圧パターンごとの  $1/(\beta^2\gamma^3 B_f)$  の最大値を示す。電圧の変化勾配が大きいほど  $1/(\beta^2\gamma^3 B_f)$  が大きくなっているのが見て取れる。ちなみにエミッタンスを  $54\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 、ビームの分布等によるフォームファクターを 2 とすると、パターン (I) の場合最大  $\nu_{sc} = 0.149$  となる。

表 3: 各電圧パターンの  $1/(\beta^2\gamma^3 B_f)$  最大値

電圧パターン	$1/(\beta^2\gamma^3 B_f)_{max}$
I	0.145
II	0.125
III	0.115
IV	0.11
V	0.105

### 3.2 ビームが誘起する電圧がビーム損失に与える影響

J-PARC の様に数百 kW から MW 級の大電流の加速器の場合、ビームが空洞などのインピーダンスを見たときに誘起される電圧の影響が無視できなくなる。ここでは加速空洞にビーム自身が誘起する電圧がビーム損失に与える影響を探ってみた。

まずビームの空間分布を高速フーリエ変換 (FFT) し、周波数成分を注出する。そして取り出した電流の周波数成分と空洞の持つインピーダンス成分の積をとることによってビームが誘起する電圧を算出した。ここで  $L, C, R$  の並列共振回路で表せるインピーダンス特性は、実際の空洞を測定したときの特性と非常に良く一致しているため、空洞のインピーダンスを  $L, C, R$  の並列共振回路であるとして扱った。こうして算出された電圧を加速電圧以外に新たにビームに感じさせ、ビーム損失がどのようなふるまいを示すがさぐってみた。

今回の計算に使用したパラメーターを空洞のインピーダンス特性も含めて表 4 にしめす。

図 3 に RF 電圧パターンを示す。パターン (I)-(IV)

表 4: 3.2 で使用しているパラメータ

RCS beam power	300 kW
RCS extraction fundamental RF voltage	60 kV
RCS extraction 2nd harmonics RF voltage	30 kV
MR injection fundamental RF voltage	80-120 kV
MR accelalation fundamental RF voltage	215 kV
MR 2nd harmonics RF voltage	26.7 kV
空洞共振周波数	1.7173 MHz
空洞 Impedance	1113.57 $\Omega$ Gap
Gap 数	17 Gap
空洞 Q 値	22.7
Injection Time	0.17 s
Acceleration Time	1.9 s
Number of macro particles	4680

では電圧を 80→215 kV にあげている。電圧を変化させる時間はそれぞれ 0.12→0.17(I)、0.12→0.22(II)、0.12→0.27(III) sec、そして加速開始と共に変化し始めるパターン (IV) は 0.17→0.27(IV) sec という時間をかけて加速電圧を上昇させている。パターン (V) では電圧を 120→215 kV に、0.12→0.27(V) sec 間の時間をかけて上っている。

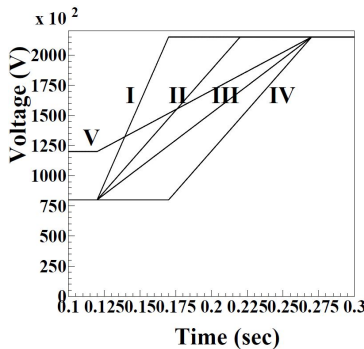


図 3: RF 電圧パターン

結果を図 4 に示す。パターン (I)-(IV) では 3,4batch が入射されたときに急激なビーム損失が起こっている。4batch 目では各パターンの違いが現れているが、これはその時点での加速電圧の差が聞いているため電圧が高いほどビーム損失は少ない。パターン (I),(II),(III) は最初の内は差があったものの、最終的なビーム損失量は同じになった。最初から高めの電圧で待ち受けていたパターン (V) はビーム起因による電圧の影響が相対的に少ないためビーム損失は少なかった。高めの電圧で運転することはビームが誘起する電圧がビーム損失に与える影響を軽減することができる。しかしながら 3.1 で述べたように不用意に電圧をあげるとバンチングファクターの低下をひきおこし横方向のビーム不安定性を引き起こす可能性がある。表 5 に各パターンと最終的なビーム損失量、 $1/(\beta^2\gamma^3 B_f)$  の最大値を示す。各パターンのなかで  $1/(\beta^2\gamma^3 B_f)$  の値をもっとも低く抑さえてい

るのはパターン (IV) である。これは電圧をあげ始めるのが加速開始と同じであり、バンチングファクターの低下を  $\beta, \gamma$  が上がることによって補っているためと思われる。加速開始前から電圧をあげているパターンで加速勾配が最も緩いパターン (V) よりもパターン (III) が  $1/(\beta^2\gamma^3 B_f)$  の値を低く抑さえられているのは、待ち受け電圧が低くバンチングファクターの値が低い状態から電圧をあげているためだと思われる。

パターン (I)、(II)、(III) の比較から言えることは、ビーム誘起電圧による最終的なビーム損失は電圧上昇勾配には依存しない。そのため 3.1 で述べたように横方向の不安定性を考慮すると電圧上昇勾配はゆるやかな方が望ましいと思われる。パターン (III)、(IV) の比較から、電圧上昇は加速開始前から始めた方がビーム誘起電圧による損失は少ないが、チューンシフト量は加速開始から電圧を上げた方が少ない。パターン (III)、(V) の比較から、待ち受け電圧が高い方がビーム誘起電圧による損失は少ないが、チューンシフト量は待ち受け電圧が低い方が少ないということである。

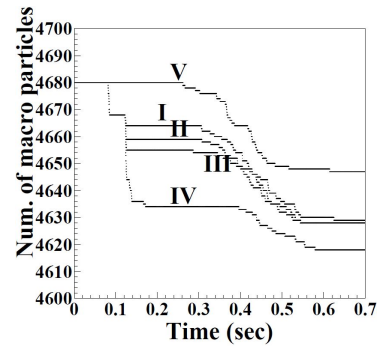


図 4: 各 RF 電圧パターンごとのビーム損失

表 5: 3.2 での計算結果

電圧パターン	loss(%)	$1/(\beta^2\gamma^3 B_f)_{max}$
I	1.1	0.122
II	1.1	0.112
III	1.1	0.108
IV	1.3	0.097
V	0.7	0.111

図 5 に実際のビーム損失を示す。見易いように図 4 に対して横軸は同じ scale で、縦軸は full range を 5 倍にしている。まず  $1/(\beta^2\gamma^3 B_f)$  の値との比較を行う。もっともビーム損失が多いパターン (I) の場合  $1/(\beta^2\gamma^3 B_f)$  の値はもっとも大きい値となっている。またもっともビーム損失が少ないパターン (III) は比較している 4 パターンのなかでは  $1/(\beta^2\gamma^3 B_f)$  の値がもっとも低い値になっている。パターン (V) の場合他の 3 パターンに比べ早い段階でビーム損失が起っている。これはパターン (V) は  $1/(\beta^2\gamma^3 B_f)$  の最大値こそパターン (II) と同程度であるが、待ち受け電圧が高いため初期の段階から

$1/(\beta^2\gamma^3 B_f)$  の値が高く他のパターンに比べてビーム損失が早く起りやすいと推測される。パターン (I)、(III) の中間であるパターン (II) はビーム損失も中間である。以上からビーム損失を減らすための 1 つの手段としてビームのマッチングを良くするなどしてパンチングファクターを改善することは、損失を減らすのに有効であると推測される。次にビーム誘起電圧の影響を考えてみる。ビーム誘起電圧が損失に顕著な影響を与え始めるのは 250 msec 程からであるが、図 5 を見る限りその影響は見られない。計算が過大評価しているかもしれないし、他の損失ですでにビームが落ちきってしまっているのかもしれない。

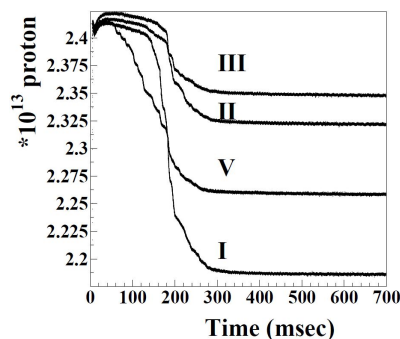


図 5: 実ビームのパターンごとのビーム損失

### 3.3 ビーム強度増強のための加速時間短縮

J-PARC MainRing ではビーム強度増強のための upgrade 手法として運転サイクルを早めることが検討されている。そこで縦方向からみてどの程度加速時間を短縮できるか、当初目標加速電圧 280 kV で計算してみた。RCS の入射エネルギーは 400 MeV、ビーム強度は現在までの検討結果で、MR で受け入れ可能なビーム強度 600 kW ととし<sup>[3]</sup>、待ち受け電圧は基本波 140 kV、2 倍高調波 95 kV(基本波にたいして 67%) である。表 6 に加速時間とビーム損失を示す。縦方向に関していえば、加速時間が 0.85 sec までなら問題ない範囲だと思われる。

表 6: 加速時間とビーム損失

加速時間 (sec)	loss(%)
1.1	0
0.85	0.0025
0.7	9.5
0.6	100

また upgrade 計画では現在の 0.3 Hz 運転から 1 Hz 運転にすることを目指している。そのために使用できる加速時間は 0.5 sec 程度である。加速時間を 0.5 sec に固定した時にビーム損失を低下させるのに必要な電圧を検討してみた。表 7 に加速電圧とビーム損失を示す。加速時間を 0.5 sec にまで縮めるには基本波電圧が 440 kV

以上が必要で、500 kV あれば縦方向に関するビーム損失はほぼなくなる。

表 7: 加速電圧とビーム損失

加速電圧 (kV)	loss(%)
380	29.2
410	2.6
440	0.08
470	0.025
500	0.015

## 4. まとめ

J-PARC MainRing において将来計画等を含む、縦方向ビーム分布に対するシミュレーション計算を開始した。今後は、実際のビームとの比較や、より現実的な効果を盛り込んだ計算を進めていこうと思っている。

## 参考文献

- [1] S. Y. Lee, Accelerator Physics, World Scientific, 1999
- [2] 町田慎二、空間電荷効果, OHO 2000
- [3] Y. Sato et al., this proceedings.