

## Study for longitudinal beam dynamics of J-PARC 50 GeV synchrotron.

Keigo Hara<sup>A)</sup>, Chihiro Ohmori<sup>A)</sup>, Masahito Yoshii<sup>A)</sup>, Masanobu Yamamoto<sup>B)</sup>,

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization  
1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

<sup>B)</sup> Center for Proton Accelerator Facility, Japan  
Atomic Energy Research Institute 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai,  
Ibaraki, 319-1195, Japan

### Abstract

To study for longitudinal beam dynamics of J-PARC MainRing(MR), the tracking calculation have been performed. We have examined two cases; one is the harmonic number 9 operation another is the harmonic number 18 operation. Both cases we can accelerate particles without serious losses in calculation. For RF cavity, these two operation mode can be switched by the subtle alteration.

## 大強度陽子加速器 (J-PARC) 50 GeV シンクロトロンの縦方向 に対するビームダイナミクスの研究

### 1. はじめに

J-PARC は、400 MeV 線形加速器、速い繰り返し (25Hz) のシンクロトロン (Rapid Cycling Synchrotron; RCS) と 50 GeV メイン・シンクロトロン (Main Ring; MR) で構成される。RCS のビームパワーは 1 MW、MR のビームパワーは 0.75 MW、RCS から取り出される 3 GeV ビームは、物質生命科学実験施設 (MLF) と MR に供給される。MR では、さらにビームを 50 GeV まで加速し、ニュートリノ実験や原子核素粒子実験にビームを供給する。本講演では、この加速器群のなかで最終段にあたる MR での、陽子の入射から加速終了までのビームダイナミクスを粒子追跡計算法にて検証した結果を述べる。

表 1 に高周波加速空洞に関するパラメータを示す。周波数の欄に harmonic 数に応じた周波数を示す。MR の harmonics 数は設計では 9 である ( $h = 9$ )。しかしながら運転開始初期では線形加速器のエネルギーが約 200 MeV と低いため RCS の 1bunch 辺りの陽子数が目標値の 6 割程になる。この条件下で MR のビーム強度を維持するために、MR のハーモニク数を  $h = 18$  にして、15 個のバンチを加速する代案が検討された。

表 1: Main Ring Parameter

Frequency(MHz)	
'fundamental	1.67~1.72( $h = 9$ )
'second	3.34~3.44( $h = 18$ )
RF harmonics	9 or 18
Peak accelerating voltage:	280 kV
Number of cavities	6+3(2nd)+1(spare)

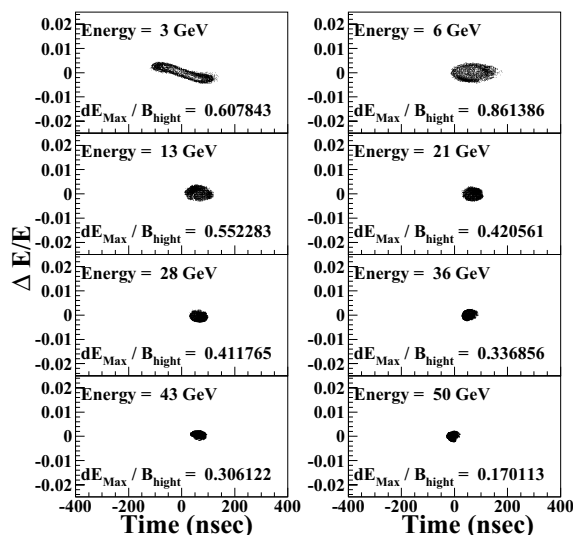


図 1: Harmonic 数が 9 で 50 GeV まで加速したときの、粒子の位相空間分布図。

### 2. $H = 9$ での計算結果

図 1 は  $h = 9$  を想定した時の粒子の位相空間での分布を示している。縦軸は運動量分布、横軸は時間を示している。加速終了までに粒子の loss は起こっていない。空洞の共振周波数は横方向の instability の観点から 1.72 MHz を仮定した。入射から加速終了まで加速電圧は終始 280 kV である。空間電荷効果<sup>[1]</sup>を考慮して基本波だけでなく高調波も重畳している<sup>[2]</sup>。MR では入射時の bunching factor ( $B.F. := I_{average} / I_{peak}$ ) は 0.3 以上が望ましい。図 2 に 2 次高調波まで含めた電圧をかけて加速したときの B.F. を示す。高調波を加えたことで B.F. が入射時に概ね 0.3 以上に保たれている。高調波成分は  $\phi_s$  (シンクロナス位相) の

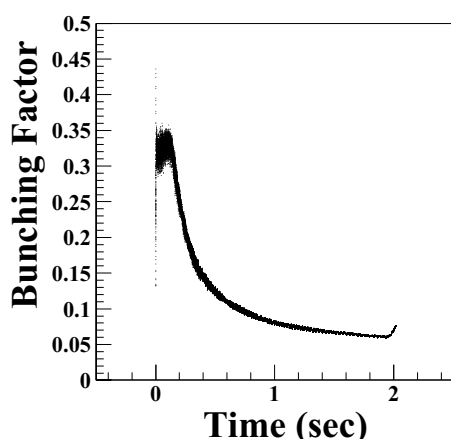


図 2: 電圧に 2 次高調波まで加えて加速したときの BunchingFactor。

周りで電圧の式を Taylor 展開して傾きをゼロにする解を選び加えている。具体的に書き下すと、 $\nu_s$  を 'Normalized rate of acceleration' として

$$V = \frac{e}{2\pi h} V_0 (\sin \phi + r \sin 2(\phi - \delta)) \quad (1)$$

$$\delta = \phi_s - \frac{1}{2} \arctan \frac{\tan \phi_s}{2} \quad (2)$$

$$\phi_s = \arcsin\left(\frac{4}{3}\nu_s\right) \quad (3)$$

$$r = \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{\nu_s^2}{3}} \quad (4)$$

となる。

### 3. $H = 18$ での計算結果

図 1 は  $h = 18$  を想定した時の粒子の位相空間での分布を示している。粒子の loss は 0.15 % 起こっている。 $H = 18$  運転が想定される初期の段階では 2 次高調波用の空洞は用意されていない予定である。そのため  $h = 9$  の時のように高調波を加えて B.F. の改善を図ることができない。幸なことに  $h = 18$  の場合には RCS とのバンチバケット間のマッチングが良いため待ち受け電圧を変えることで B.F. の改善が行える。図 4 に入射時の待ち受け電圧を 160 kV にしたときの B.F. を示す。基本波のみで B.F. を 0.3 以上にすることができる。その他 Loss を無くす為に加速のパターンを変えた計算や、線形加速器が 400 MeV (RCS が Full intensity) になったときの  $h = 18$  運転の計算なども行っている [3]。

### 4. 二つのモードの切り替え

$H = 9$  の時と  $h = 18$  の時では加速周波数が違うので、二つのモードを切り替えるためには加速空洞の共振周波数 ( $\sim 1/2\pi\sqrt{LC}$ ) を切り替えることが必要となる。現在の所我々は加速 Gap 部に取りつけられ

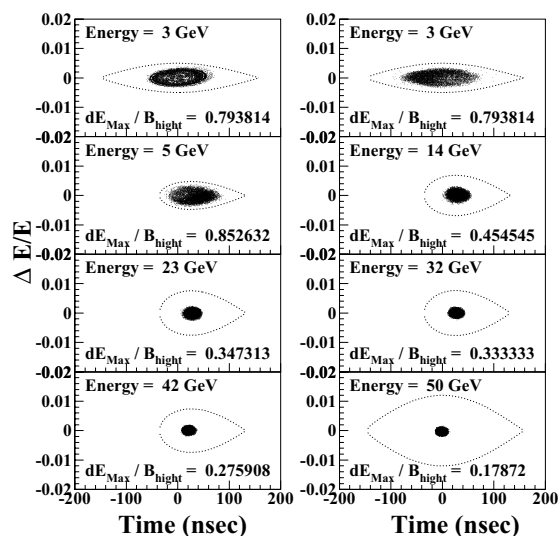


図 3: Harmonic 数が 18 で 50 GeV まで加速したときの、粒子の位相空間分布図

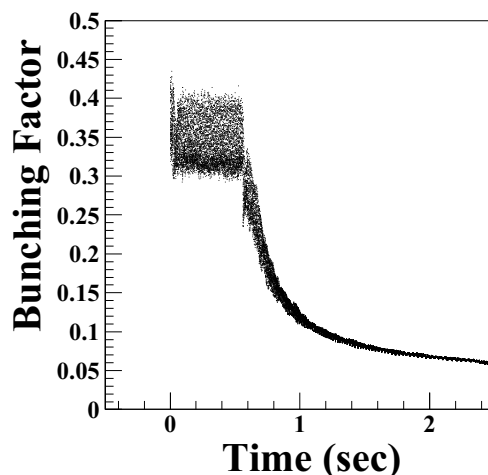


図 4: 待ち受け電圧が 160 kV、加速電圧が 280 kV で加速したときの BunchingFactor。

ているコンデンサーを脱着することで切り替えを行う予定である。 $h = 9$  から  $h = 18$  に切り替えるときにコンデンサーを引き抜く事になるのだが、単純にコンデンサーを引き抜くと空洞の Q-value ( $\sim CR/f_0$ ) が低下しインピーダンスのカーブはブロードなものになる。そのためビームが感じる空洞のインピーダンスの周波数成分が多くなり、その分ビームローディング電圧が大きなものになる。このビームローディング電圧に対して何の処置もおこなわない場合のビームのロス量を図 5 に示す。この結果はビームローディング電圧が一番きつと思われる 8 番目のバンチについて計算を行った場合である。待ち受け電圧は先ほど述べたように 160 kV である。最初の数 10 msec

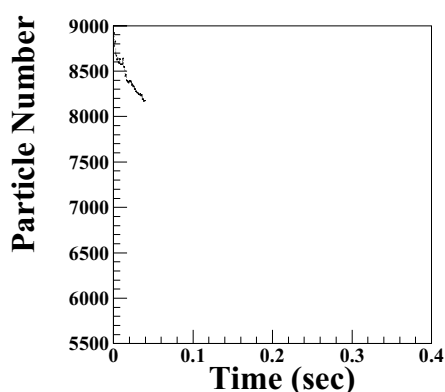


図 5: ビームローディング補償を行わないときの 8 番目に入射したバンチのビームロス

でまたたくまに粒子がロスしていくのが見て取れる。計算のなかでは 8919 個のマクロ粒子を使用しているので 892 個の粒子が無くなったならば約 10 %ビームを loss したことになる。

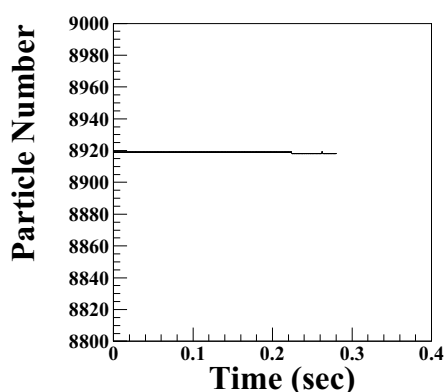


図 6: 基本周波数成分、及び、その両隣りの周波数成分を 10 分の 1 にまで補償した場合の loss 量

J-PARC RingRF ではこのビームローディング電圧が引き起こす、ビームの不安定性を取り除くために RF Feedforward 法の使用を予定している。RF Feedforward 法の原理は、ビーム電流成分  $I_b$  と全く逆位相の電流  $I_b$  を空洞に加えビームローディングの効果を消してしまう方法である<sup>[4]</sup>。図 6 にビームが誘起した電圧の内、基本周波数成分、及び、その両隣りの周波数成分 ( $h=17,18,19$ ) を 10 分の 1 にまで補償した場合の loss 量を示す。1 個のマクロ粒子が loss したので約 0.013 % loss したことになる。この結果は、空洞のモード切り替えをコンデンサーの脱着のみで行える可能性を示している。

## 5. 今後

CPU power の問題でビームローディングの補償までを含めた計算は入射時しか行っていないが、加速終了までの計算を行っている最中である。今後は 8 番目のバンチだけでなく他のバンチについても計算を行う。また beam loading の補償の割合を 5 分の 1 にするなど、もう少し補償の割合が悪い場合についても検討していく予定である。その他 feedback、電圧の error 等も計算に考慮していくつもりである。

## 参考文献

- [1] 町田慎二, “ラティス、空間電荷効果”, OHO 2000.
- [2] M Yamamoto, Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York, (1999) p863.
- [3] 原圭吾, 日本物理学会 2004 年秋期大会 (高知大)
- [4] E. Ezura, et al., Longitudinal Behavior of the Beam in KEK Booster, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. NS-26, No.3, 3538-3540, 1979.