

J-PARC MainRing 高調波重畳による Bunching Factor の改善 THE BUNCHING FACTOR IMPROVEMENT BY SUPERPOSITION OF HIGHER HARMONICS

原圭吾 ^{*A)}、五十嵐進 ^{A)}、大森千広 ^{A)}、小関忠 ^{A)}、佐藤洋一 ^{A)}
Keigo Hara ^{*A)}, Susumu Igarashi ^{A)}, Chihiro Ohmori ^{A)}, Tadashi Koseki ^{A)}, Yoichi Sato ^{A)}
^{A)}High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

The J-PARC accelerator complex consists of 3 accelerators, a linear accelerator, a rapid cycle synchrotron (RCS) and a Main Ring (MR) synchrotron. To study for longitudinal beam dynamics of J-PARC Main Ring (MR), tracking calculation have been performed. Since Bunching Factor is a 0.2 (bunch length 200 ns) by limitation of extraction RCS kicker, simulation calculation to such distribution was performed. By adding higher order harmonics voltage in addition to a fundamental and secondary harmonics voltage showed that Bunching Factor can be higher.

1. はじめに

J-PARC は大強度の陽子ビームを供給する加速器施設である。本発表では linac、RCS、MR という J-PARC 加速器群の中で MR に関してビームシミュレーション計算を行った結果を示す。現在 RCS の出力が 800 kW (MR 530 kW 相当) になった場合を想定して MR での RF 電圧パターンについてシミュレーション計算を行っている。当初は RCS 取り出し時の Bunching Factor (B.F.) が必要とされている 0.3 (bunch 長 300 ns) の分布をもとに計算を行い良好な結果が得られていた。しかしながら現在の RCS の取り出しキッカーでは B.F. が 0.2 (bunch 長 200 ns) までが取出しの限界であるためこのような分布 (Fig. 1) に対してのシミュレーション計算を行った。

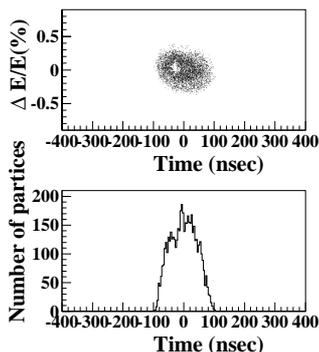


Figure 1: The longitudinal phase space distribution and the bunch shape at the MR injection

2. BUNCHING FACTOR 改善のための電圧操作

Table 1 に今回の計算のパラメーターを示す。

B.F. 改善のためにまずは基本波電圧だけでなく、二倍高調波電圧を加えてみた。そしてそれぞれの電圧、位相

Table 1: Main Parameter

Path of MR ring	1567.50 m
MR injection Energy	3 GeV
MR extraction Energy	30 GeV
MR repetition period	2.4 sec
RCS Beam Power	800 kW
Acceleration time	1.4 s
Injection time	0.12 s
Parabola time	0.1 s

を変化させ良い解がないか探ってみた。加える電圧 V_t は以下の式のようにあらわされる。

$$V_t = V_0 \sin h_0 \omega_{rev} t + V_{2nd} \sin(2h_0 \omega_{rev} t + \psi_{2nd}) \quad (1)$$

ここで V_0 、 h_0 は基本波の電圧、harmonic 数を表し、 ω_{rev} はシンクロトロン粒子の周回周波数である。また V_{2nd} 、及び、 ψ_{2nd} はそれぞれ二倍高調波電圧、シンクロトロン粒子からの位相のずれである。パラメーターとして $V_0=100$ kV、 $V_{2nd}=70$ kV、 $\psi_{2nd}=0$ で待ち受けした時に、B.F. を高くできた。しかしながら Fig. 2 を見ればわかるが、最初の 4 曲振動の後 (シンクロトロン周波数が約 300 Hz なので、四極振動の周期は約 0.0015 s となる。) の B.F. の落ち込みがひどい (~0.25)。このため Beam Loss が許容できないものになっていた。

基本波と二倍高調波の組み合わせでは B.F. の最初の落ち込みはこれ以上改善できなかったため、更に高次の高調波を重畳させてみた。具体的には式 1 の V_t に更に以下に表わされるような電圧を加える。

$$V_t = V_0 \sin h_0 \omega_{rev} t + V_{2nd} \sin(2h_0 \omega_{rev} t + \psi_{2nd}) + V_{high} \sin(h_{high} \omega_{rev} t) \quad (2)$$

ここで V_{high} は高次高調波の電圧、 h_{high} は harmonic 数である。

* keigo.hara@kek.jp

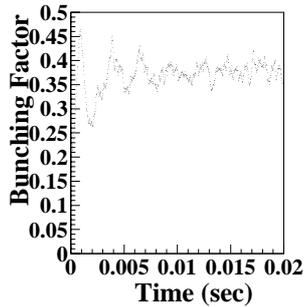


Figure 2: The simulation result of the Bunching factor. A fundamental and secondary harmonics voltage are added.

Fig. 3は $h_{high}/h_0=6$, $V_{high}=35$ kV の高次高調波を加えた時の B.F. である。入射時に B.F. が 0.2 なのは制約上変えようがないが、その後の B.F. は、ほぼ 0.3 以上であり、四極振動も収まっているのが見て取れる。

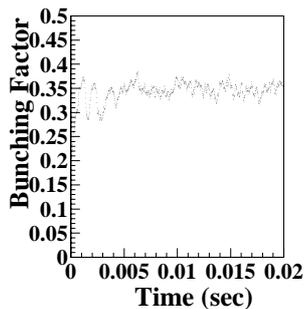


Figure 3: The simulation result of the Bunching factor. A fundamental, secondary harmonics and $h_{high}/h_0=6$ harmonics voltage are added.

Fig. 4 は基本電圧のみを加えた時、また Fig. 5 は基本波、二倍高調波、及び $h_{high}/h_0 = 6$ の高次高調波電圧を加えた時のビームのエミッタンスである。基本波電圧のみを加えた時は、取り出し時のビームエミッタンスは 6 eVs なのに対し、基本波、二倍高調波、及び $h_{high}/h_0 = 6$ の高次高調波電圧を加えた時のビームエミッタンスは 10 eVs をこえており大幅にエミッタンスを増加できていることが見て取れる。なおこの時二倍高調波、及び $h_{high}/h_0 = 6$ の高次高調波電圧は入射から 0.13 sec までは $V_{2nd} = 70$ kV、 $V_{high} = 35$ kV 加わっており 0.13 sec から 0.14 sec にかけて線形関数で 0 kV まで落としている。

Fig. 6 は基本波、及び、二倍高調波のみを加えた時 (式 1) の位相空間分布とそれを時間軸方向に射影した、バンチ波形である。入射してから 0.0015 sec 経った時点で、B.F. が最も低下している時のものである。二倍高調波を加えることでバンチ長の引き伸ばしはできているものの、その二倍高調波のため山が二つできている。そのためピーク電流が増加し B.F. の低下を招いている。

Fig. 7 は基本波、二倍高調波、及び $h_{high}/h_0 = 6$ の高次高調波を加えた時 (式 2) の位相空間分布とそれを時

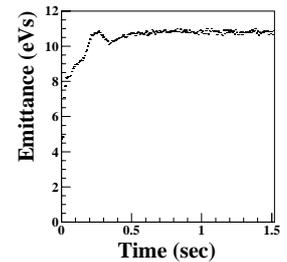
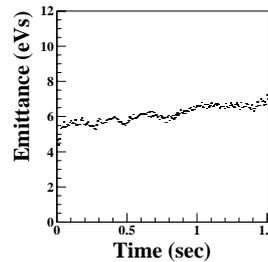


Figure 4: The simulation result of the emittance of a beam. A fundamental voltage and secondary harmonics voltage are added. The emittance of a beam is 5 eVs at the MR injection. Figure 5: The simulation result of the emittance of a beam. A fundamental voltage and secondary harmonics voltage are added. The emittance of a beam is 5 eVs at the MR injection.

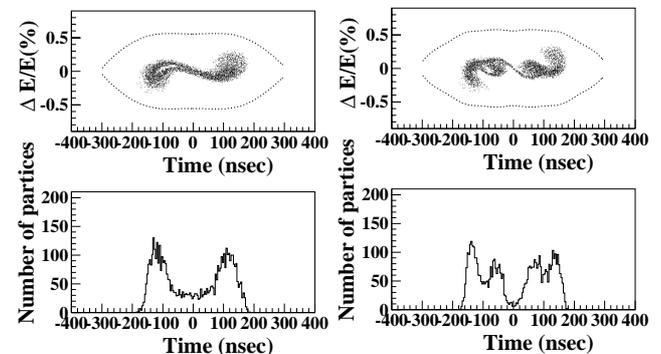


Figure 6: The longitudinal phase space distribution and the bunch shape. A fundamental, secondary harmonics voltage are added. Separatrix is shown as dashed line. Figure 7: The longitudinal phase space distribution and the bunch shape. A fundamental, secondary harmonics voltage are added. Separatrix is shown as dashed line.

間軸方向に射影した、バンチ波形である。入射してからの時間は先ほどと同じく 0.0015 sec 経った後のものである。二倍高調波によってバンチ長が引き伸ばされているのは Fig. 6 と同じだが $h_{high}/h_0 = 6$ の高次高調波が入ることにより Fig. 6 で形成されている山が平滑化されているのが見て取れる。これによりピーク電流が下がり B.F. を高く保つことができている。

Table 2 は $h_{high}/h_0 = 3-10$ の高次高調波を加えた時の B.F. の最低値を示している (入射時の B.F. の値は除く)。 $h_{high}/h_0 = 3, 4$ の時最も悪くなり、 $h_{high}/h_0 = 6$ を除けば $h_{high}/h_0 = 7, 10$ の時高い値を示している。

Fig. 8 は基本波、二倍高調波、及び $h_{high}/h_0 = 3$ の高次高調波を加えた時、また Fig. 9 は基本波、二倍高調波、及び $h_{high}/h_0 = 4$ の高次高調波を加えた時の位相空間分布とそれを時間軸方向に射影した、バンチ波形である。セパトリクスを見てもわかる様に、 $h_{high}/h_0 = 2$ の成分をより強めてしまっている。このため二山の成分が多くなりピーク電流を増やし B.F. を低いものにしてしまっている。これは h_{high}/h_0 の時数が低い場合や、 $h_{high}/h_0 = (2 \times \text{偶数})$ の場合、山の成分を強めてしまう

Table 2: Comparison of Bunching Factor

h_{high}/h_0	B.F.
基本波のみ	0.18
3	0.22
4	0.22
5	0.23
6	0.29
7	0.26
8	0.24
9	0.25
10	0.26

ため B.F. が低くなったと考えられる。また $h_{high}/h_0 = 8$ の場合に B.F. の局所的最小値になっているのもそのためと思われる。

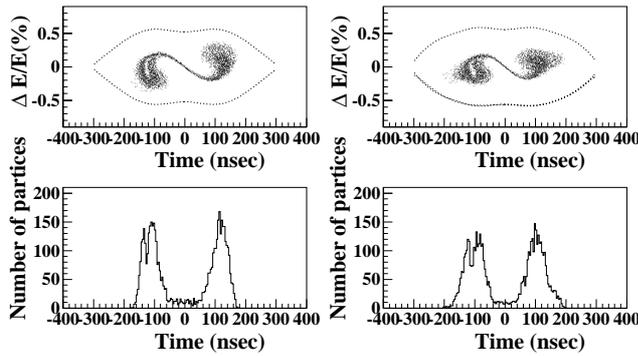


Figure 8: The longitudinal phase space distribution and the bunch shape. A fundamental, secondary harmonics and $h_{high}/h_0=3$ harmonics voltage are added.
 Figure 9: The longitudinal phase space distribution and the bunch shape. A fundamental, secondary harmonics and $h_{high}/h_0=4$ harmonics voltage are added.

Fig. 10 は基本波、二倍高調波、及び $h_{high}/h_0 = 7$ の高次高調波を加えた時、また Fig. 11 は基本波、二倍高調波、及び $h_{high}/h_0 = 10$ の高次高調波を加えた時の位相空間分布とそれを時間軸方向に射影した、バンチ波形である。 $h_{high}/h_0 = 7$ の場合、 $h_{high}/h_0 = (2 \times \text{偶数})$ ではないためある程度はピークが分散されており B.F. が高めになっている。 $h_{high}/h_0 = 10$ の場合ピーク電流が $h_{high}/h_0=6$ と同程度に抑えられている。このことから $h_{high}/h_0 = (2 \times \text{奇数})$ の時、ピーク電流を抑えられると考えられる。しかし $h_{high}/h_0 = 10$ の場合バンチの広がりが $h_{high}/h_0=6$ に比べて小さいので B.F. が他と比べて高いものの $h_{high}/h_0=6$ と比較すると低くなっている。

3. まとめ

基本波、二倍高調波、及び、高次高調波を加えることにより、たとえ B.F. が低い状態で入射しても、B.F. を高くすることができることが分かった。このことにより横方向を含めた計算でも Beam 損失が減らせることが分

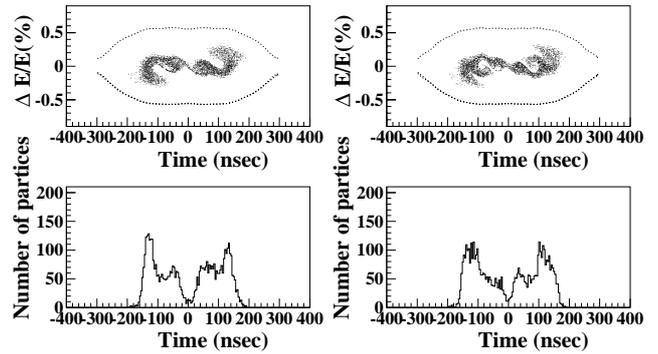


Figure 10: The longitudinal phase space distribution and the bunch shape. A fundamental, secondary harmonics and $h_{high}/h_0=7$ harmonics voltage are added.
 Figure 11: The longitudinal phase space distribution and the bunch shape. A fundamental, secondary harmonics and $h_{high}/h_0=10$ harmonics voltage are added.

かった [1]。

参考文献

- [1] Y. Sato et al., this proceedings.