

Longitudinal Particle Simulation for J-PARC RCS

山本昌亘^{1*}、穴見昌三³、絵面栄二³、長谷川豪志¹、原圭吾²、堀野光喜⁴、野村昌弘¹、大森千広²、
シュナーゼアレクサンダー¹、島田太平¹、鈴木寛光¹、高田耕治³、高木昭²、田村文彦¹、戸田信²、
吉井正人²

¹JAEA J-PARC センター、²KEK J-PARC センター、³KEK、⁴日本アドバンステクノロジー

Abstract

The beam commissioning has been started at the J-PARC RCS. Some longitudinal bunch gymnastics has been tested toward the high intensity operation. It is necessary to increase the bunching factor because space charge effect is large around the injection. The comparison between the beam test result and the particle tracking simulation is described.

J-PARC RCS 縦方向シミュレーション

1. INTRODUCTION

J-PARC Rapid Cycling Synchrotron (RCS) は 2007 年 9 月にビームコミッショニングを開始し、所定の 3GeV までの加速及び取り出しに成功した。ビーム強度を上げるための試験も行われており、大強度ビームを加速する際の入射時の空間電荷効果を抑えることもその一つである。

RCS では、前段の Linac で加速された 181 MeV の負水素イオンを、荷電変換フォイルを通して陽子に変えて入射をしている^[1]。現状、負水素イオン源から取り出されるビーム強度は最大 30 mA であり、RCS で加速するのに必要な粒子数を得るために、マルチターン入射を行っている。

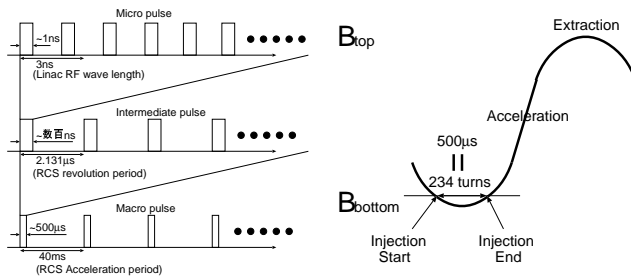


図 1: Linac と RCS のビームの関係。

図 2: RCS 加速周期の中のマルチターン入射。

図 1 に Linac で加速されるビームと RCS に入射されるビームの関係を示す。RCS のハーモニックナンバーは 2 で、そのうち 1 つのバケツにバンチが入射されているときの模式図である。Linac では、324 MHz の RF の波長にあった Micro pulse が加速され、RCS へ入射される際には、その Micro pulse の一群をチョッパーで RCS の RF バケツに合う幅の Intermediate pulse にして入射している。Linac は、Intermediate pulse の一群である Macro pulse を最大 500 μ s 幅まで加速でき、図 2 にあるように、RCS の周回で数えると、入射開始から入射終了まで最大 234 周にわたってマルチターン入射が行われる。

* masanobu.yamamoto@j-parc.jp

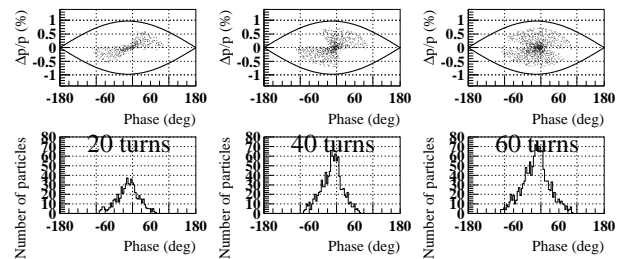


図 3: 待ち受けバケツと Intermediate pulse。

図 3 に、RCS 入射時の待ち受けバケツと Intermediate pulse の関係を示す。この場合は基本波のみで、バケツの中心に Intermediate pulse を入射した場合である。マルチターン入射の回数を重ねるごとに、先に入ってきた Intermediate pulse は位相空間内でシンクロトロン運動を行い回転をするが、後から入射された Intermediate pulse との重なりによって、バケツの中心部に非常に電荷密度の高い部分ができ、バンチングファクターが小さくなってしまう。RCS の入射付近では陽子はまだ光速の半分程度で、空間電荷効果が強く現れる領域である。このため、バンチングファクターは、可能な限り大きくしなければならない。

マルチターン入射時のバンチングファクターの改善を目指して、縦方向において可能な手法を、これまで粒子トラッキングによるシミュレーションによって検討してきた。実際のビーム試験結果と比べることで、シミュレーションの有効性について検証する。

2. BUNCH MANIPULATION AT INJECTION

バンチングファクターを高くする手法としては、基本波に 2 倍高調波を重畳する方法がある。図 4 に、各種 Gap 電圧をかけたときの電圧波形とポテンシャルを示す。

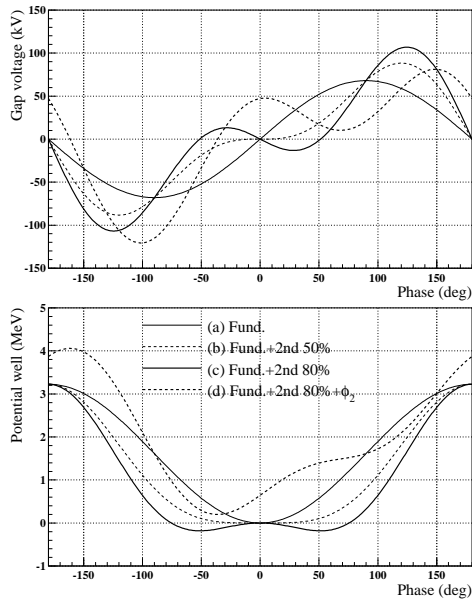


図 4: 2 倍高調波と位相オフセットがある場合のポテンシャル。

細い実線 (a) は基本波のみの場合で、細い点線 (b) が基本波に 2 倍高調波を 50 % 重畳した場合である。(b) の場合の方が、バンチ波形を平滑化でき、電荷密度を抑えることができる。(c) は、2 倍高調波を 80 % 重畳した場合で、このときにはバケツの中心の左右に二つ谷ができてしまい、ポテンシャルの形が平滑でなくなるが、マルチターン入射においては $\Delta p/p$ の小さな粒子がバケツの中心に集まらず、さらにポテンシャルの低い左右の谷に落ちていき、電荷密度を下げることが期待される。

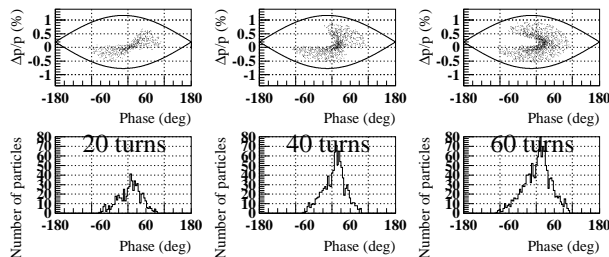


図 5: 運動量オフセット入射。

さらにバンチングファクターを大きくする手法としては、図 5 のように、運動量方向にオフセットを設けてマルチターン入射を行うことが考えられる [2]。このようにすることで、バケツ中心付近の $\Delta p/p$ の小さな粒子を周辺部に追い遣ることができる。運動量方向のオフセットは、偏向磁場と入射ビームのエネルギーが合っている状態で、RF 周波数にオフセットを加える方法で実現できる。

しかし、運動量オフセットを設けた場合、入射直後にビームが一度バケツの片側に片寄ってしまう状態

ができるため、その時点でのバンチングファクターは小さくなってしまふ。これを改善するために、図 4 の (d) にあるように 2 倍高調波のゼロクロスと基本波のゼロクロスをお互いに ϕ_2 だけずらしておいて、入射直後においては、ポテンシャルの一方の谷の方へ粒子が集まりやすいようにする手法を考案した。

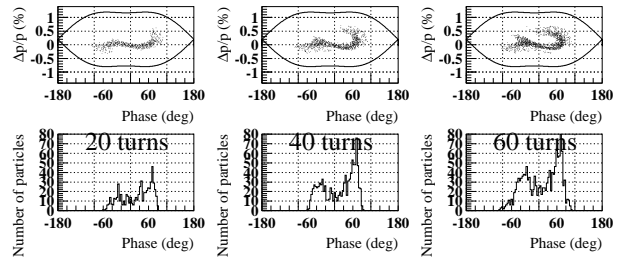


図 6: 2 倍高調波 80 % + 運動量オフセット入射。

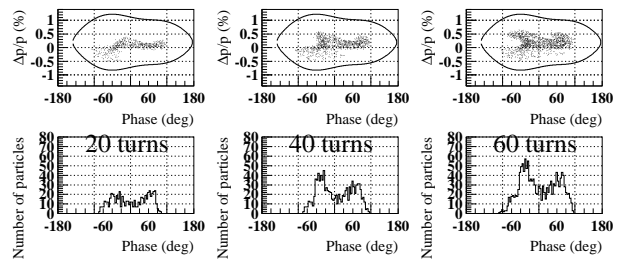


図 7: 2 倍高調波 80 % + 運動量オフセット入射 + 2 倍高調波位相オフセット。

図 6 に 2 倍高調波 80 % と運動量オフセットを加えた場合を、図 7 に 2 倍高調波位相オフセットを設けた場合のシミュレーションの結果を示す。図 6 のような対称なポテンシャルの場合には、ビームをバケツ中心の下側に入れたときは、ビームはバケツの右側に集まりやすくなってしまふが、図 7 のように 2 倍高調波オフセットを設けて左側のポテンシャルの谷にビームが集まり易いようにしておけば、バケツ中心の下側に入れたビームの中で、バケツの左側のみシンクロトロン振動を始めるものも多く現れ、結果として電荷密度の高い部分が現れるのを抑えることが期待される。

図 8 に、入射時のバンチングファクターについて、ビーム試験での測定結果とシミュレーションによる計算結果の比較を示す。このビーム試験においては加速は行われず、磁場が一定の条件でマルチターン入射が行われており、シミュレーションの結果もそれを模擬している。Macro pulse は 500 μ s、Intermediate pulse は 560 ns で、横軸はターン数を示しており、234 ターンでマルチターン入射が完了している。イオン源のビーム強度は 5 mA であるので、RCS には 4×10^{12} ppp の粒子が入射されることになる。

測定結果とシミュレーションの結果を比較すると、全体として、マルチターン入射中のバンチングファクターはシミュレーションでも良く再現できている。

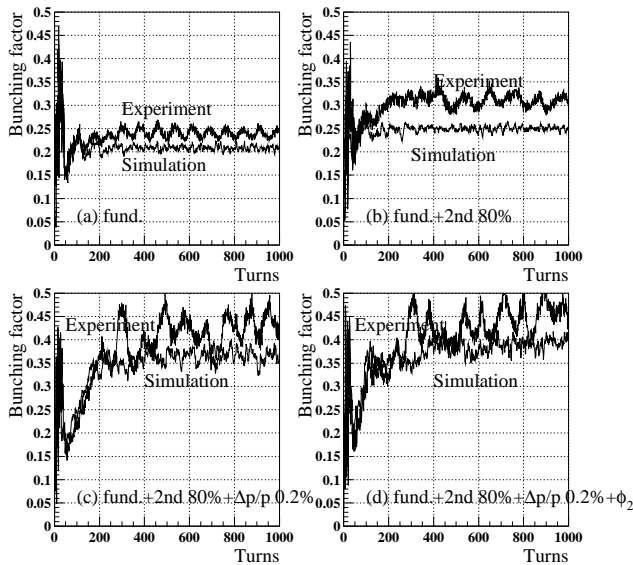


図 8: バンチングファクターのビーム試験結果とシミュレーションの比較。

しかし、入射終了後については、測定結果ではバンチングファクターが大きく変動しており、シミュレーションでの再現は検討課題である。

図 8 のビーム試験の結果から入射終了後しばらくたってからの測定結果で見ると、バンチングファクターは以下の通りである。

- | | |
|--------------------------------|---------|
| (a) 基本波のみ | 0.25 程度 |
| (b) (a)+2 倍高調波 80 % | 0.3 程度 |
| (c) (b)+ $\Delta p/p = -0.2 %$ | 0.4 程度 |
| (d) (c)+2 倍高調波位相オフセット 60 度 | 0.45 程度 |

(a) から (d) にいくに従って徐々にバンチングファクターが改善しているのがわかる。

入射直後のバンチングファクターの落ち込みについては、2 倍高調波の位相オフセットを導入した (d) と導入していない (c) とを比較すると、最も値の低い谷の部分でも若干改善しており、さらに (d) の場合はその後のバンチングファクターの回復が早まっていることがわかる。その様子をチューンシフトの観点から見たのが、図 9 である。J-PARC RCS では、マルチターン入射時に横方向ペインティングも行うことになっており、図 9 では、現状ビーム試験が行われている例として、入射終了時に $100\pi\text{mmrad}$ (設計値は $234\pi\text{mmrad}$) までペインティングを行った際のチューンシフトの値を示してある。これからわかるように、チューンシフトの値が一番きついのは、横方向エミッタンスが小さくバンチングファクターも小さい入射直後である。

現時点では、磁場が一定の条件でのビーム試験の結果しかないが、加速した場合のビーム試験が次の RCS 運転時に予定されており、今回同様、2 倍高調波、運動量オフセット、2 倍高調波位相オフセットを組み合わせる最適な条件を見つけることになる。

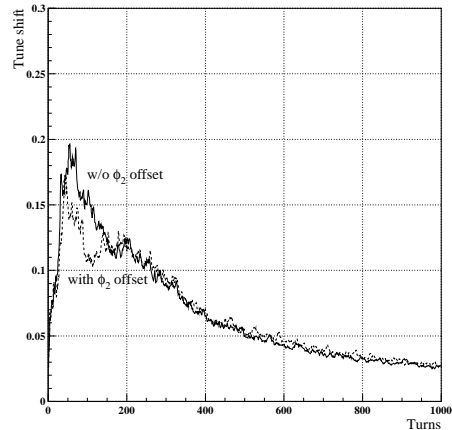


図 9: 2 倍高調波位相オフセットとチューンシフト。

3. SUMMARY

J-PARC RCS のマルチターン入射について、粒子トラッキング及びビーム試験の結果を比較した。バンチングファクターを大きくするために 2 倍高調波、運動量オフセット、2 倍高調波位相オフセットを設けることが有効であることをシミュレーションによって検討してきたが、ビーム試験の結果と入射領域については良く合っていることが示された。現状では、磁場が一定の加速のない状態でのビーム試験結果であるので、今後は加速がある場合についても検討を進めていく。

参考文献

- [1] “Accelerator Technical Design Report for High-intensity Proton Accelerator Facility Project, J-PARC”, KEK Report2002-13, 2003
- [2] M. Yamamoto *et al*, “Longitudinal Beam Dynamics on 3 GeV PS in JAERI-KEK Joint Project”, Proc. of EPAC2002, p.1073