

AN IDEA OF BUNCH MANIPULATION FOR J-PARC MR

Chihiro Ohmori^{*A)}, Keigo Hara^{A)}, Katsushi Hasegawa^{A)}, Masahiro Nomura^{B)}, Alexander Schnase^{B)},
Taihei Shimada^{B)}, Fumihiko Tamura^{B)}, Makoto Toda^{A)}, Masanobu Yamamoto^{B)}, Masahito Yoshii^{A)},

^{A)}J-PARC KEK

Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki

^{B)}J-PARC JAEA

Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki

Abstract

The J-PARC accelerator complex supplies 210 kW beam for MLF, 200 kW for neutrino and 6 kW for hadron facility, respectively^[1, 2]. The repetition rate of J-PARC MR will be increased to supply more beam and to achieve the design value of 750 kW. For the high repetition rate, we need a replacement of magnet power supplies and an upgrade of RF system^[4]. On the other hand, neutrino physics requires over 1 MW beam. As another power upgrade scenario, we present a merging technique which combines two RCS bunches to one bunch during the acceleration in RCS. The doubled intensity beam will be injected to MR. Because this is one bunch injection, the harmonic number of MR can be increased and more bunches can be injected.

One high-intensity bunch extraction from RCS is also helpful for future LFV (Lepton Flavor Violation) experiments to supply more muons.

J-PARC MR ビーム増強のためのバンチ操作

1. はじめに

バンチ操作はCERN、FNALなどでリング加速器と次のリングとの間のビーム受け渡しプロセスにおいて、使われている手法である。詳細はセルンの加速器スクールの Roland Garoby 氏のテキスト^[3]に書かれている。例えば一つバンチを複数のバンチに分ける Splitting は現在の CERN PS ではフラットボトムにおいてハーモニック数 $H=7$ から $H=21$ の3分割した後、のフラットトップにおいて $H=21$ が $H=42(20\text{MHz})$ または $H=84(40\text{MHz})$ と2分割または4分割される。これにより 50ns または 25ns 間隔の小さなバンチとなり SPS の RF 周波数である 200MHz の RF によって捕獲され加速される。SPS では陽子の入射エネルギーが 26GeV であるため、陽子は十分に相対論的であり固定周波数の空洞によって加速することができる。この一連の操作によりブースターから入射された1つのバンチは12個のバンチに分割されたこととなる。図1はこの一連のプロセスの中の一つである1バンチを2つに分ける手法を説明したものである^[3]。この操作はフラットトップで行われており十分に断熱的な操作であるが、それでもバンチが分離される過程で後ろ側の粒子の運動量が前方の粒子のそれよりもやや低くなっていることがわかる。

この他にも FNAL では、複数のバンチをまとめてビーム強度を上げる Slip Stacking^[5, 6] が使用され、Tevatron でのルミノシティ向上や Main Injector のビーム強度向上に大きな役割をはたしている^[7]。

2. MR ビーム増強シナリオ

前述の Splitting に対して、逆のプロセスにあたるのが Merging である。すなわち複数のバンチを1つのバ

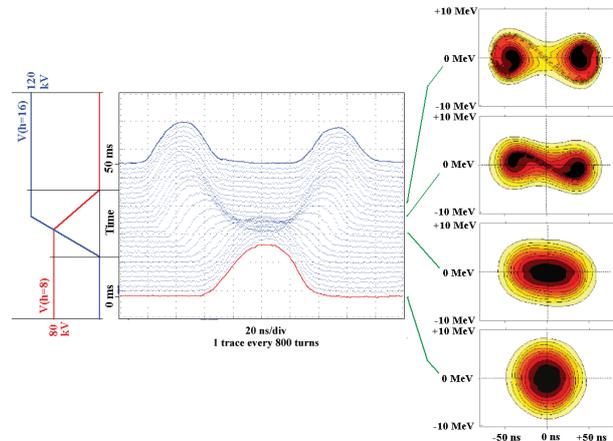


図1: Bunch Splitting の手法^[3]。

ンチに Merge する Stacking の手法である。RCS ではフラットトップがないため、ビーム加速の後半数 ms を使ってマージを行う。1バンチになったビームは J-PARC の元々の設計^[8]に近い大きなエミッタンスを持つためバンチングファクター 0.3 程度の広がりとなるが、RCS の取出しキッカーにより取り出される。この1バンチは同様に MR の入射キッカーにより、リング内に入射される。この操作を従来の4バッチ(図2)の倍の8バッチ繰り返し(図3)、リング内に8バンチが蓄えられる(図4参照)。MR に2次高調波を混合することでバンチングファクターを高く保ち、空間電荷を緩和する。この操作により2倍の強度のビームを MR に蓄積することになる。バンチングファクターが現状の2倍に増えるためバンチあたりの強度が増加しても蓄積時のピーク強度は大きく変化しないことが期待できる。

* chihiro.ohmori@kek.jp

現在の RCS2 バンチが MR に入射された時の周回ビームとの間隔を図 5 と図 6 にしめす。図 5 は RCS での取出しに 2 次高調波を混合しバンチ長を長くした場合、図 6 は 2 次高調波を混合しない場合である。図 2 からわかるように現在の反射対策をした入射キッカーの立ち上がりは 350 ns 程度であり、2 次高調波を最大限に混合したバンチを入射することは厳しい。キッカーパルスの反射対策は周回ビームに余分なキックを与えないために不可欠なため、自由度が少ない。これに対し、入射バンチを 1 バンチにした場合、次に述べる理由でキッカーパルスの反射対策を緩めることができる。RCS の 2 バンチを 1 バンチにする利点は次のとおりである。

- RCS の 2 バンチを 1 バンチにするため、空間電荷などに問題がなければ MR のバンチあたりのビーム強度を 2 倍にすることができる。(図 3)。したがって、5 バッチ以上入射できれば、増強につながる。
- RCS での Merge の過程でエミッタンスが 1 バンチ時の 3 倍程度になると考えられるため、MR での入射時のバンチングファクターが大きくなり、空間電荷を緩和しやすい。
- MR のハーモニック数を RCS と関係なく選ぶことができることになる。例えば、入射キッカーの立ち上がりを少し早くできれば、H=10 のバケツに 8 バンチ入射し 2 バケツを空バケツとすることで、入射の最後に周回ビームを蹴ることによるビームロスを避けることができる。また、逆に入射キッカーの反射対策が進んだ場合、H=8 を選ぶことで遅い立ち上がりでも、2 次高調波を混合した RF を使用することが可能となる。RCS2 バンチでは入射機器の性能と 2 次高調波混合は最適な条件での両立が困難であるが、Merging により 1 バンチとすることで両立しやすくなると期待される。
- 現状の RCS ビーム加速は極めて順調に進んでいるため、RCS のバンチ数を加速の最初から 1 にすることは改造が大がかりになり、得策ではない。これに対し、加速の後半に Merging をすることにより、トンネル内のハードウェアに手を付けることなく 1 バンチとすることができるため、MLF 施設との両立の点で問題がない。
- 入射時点から 1 バンチで加速した場合、バケツ高は $\sqrt{1/H}$ に比例するため、ハーモニック数が下がると同じ電圧で作られる運動量広がりには従来の 1.4 倍となり、大強度のビームを加速することに適さない。これを避けるためにはより多くのハーモニック数を混合し、運動量広がりが増えない工夫が必要となるがそれほど容易ではない。これに対し、バンチが小さくなっている加速後半でのマージではこの問題をさけることができる。

フラットトップおよびフラットボトムでの Merging の逆プロセスにあたる Splitting は CERN での加速器運転で用いられている。しかし、加速中でのこの Merging が可能かがこのシナリオの成否を決めることになる。図 7 に加速中での Merging に必要な RF 電圧波形の様子を示した。不必要なエミッタンスの増加を招かないために

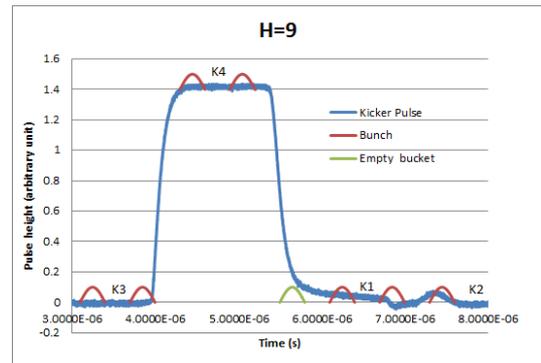


図 2: 現状のキッカーパルス波形と 2 次高調波により伸びたバンチの関係。キッカーパルスの反射対策として立ち上がり時間が少し遅くなっている。空間電荷効果緩和のため長いバンチを入射する場合、厳しいことがわかる。

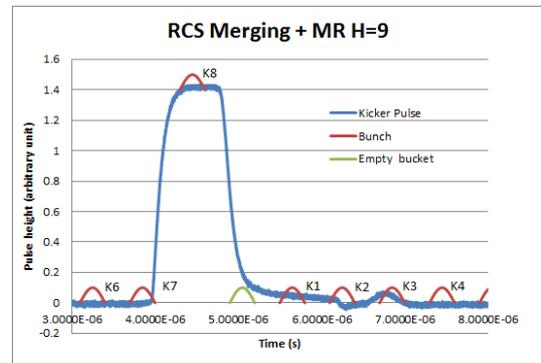


図 3: RCS1 バンチに対応して短くしたキッカーパルス波形と MR への 8 回入射の関係。Merge によりバンチ強度が上がれば、7 回入射とすることで K8 入射時に周回ビームをキックすることを避けることもできる。1 バンチ入射に対応し、キッカーパルスのフラットトップ長を 600 ns 短くしている。

は、H=1 と H=2 の電圧の位相と振幅を制御し、RF ポテンシャルが大きく非対称にならないようにする必要があることがわかる。

しかし、実際には RCS は速い繰り返しの加速器であるため、短時間に Merging をおこなう必要がある。このため、十分にこの操作が断熱的にできているかを確認する必要がある。また、RCS での RF 電圧とシンクロナス位相は大きく変化しているため、シミュレーション^[9]により、エミッタンスが増加しないか確認する必要がある。図 8 にその結果を示した。ここで RCS の入射は通常 2 次高調波を混合している^[10]。ここでは加速後半の 3 ms を用いて 2 つの RCS バンチが H=1 の RF で捕獲された 1 つのバンチとして形成されたことがわかる。実際には、MR 入射キッカーの立ち上がりが早くなれば H=2 の RF がまだ残っている状態の長いバンチとして取り出すのが空間電荷効果の面からは良いと思われる。運動量広がりには Merge 後のバンチで $\pm 0.5\%$ である。しかし、加速途中で右側のバンチの運動量が左のバンチに追いつくために高くなっている。このバンチの移動操作が実際の RCS のアパーチャーの範囲で行える

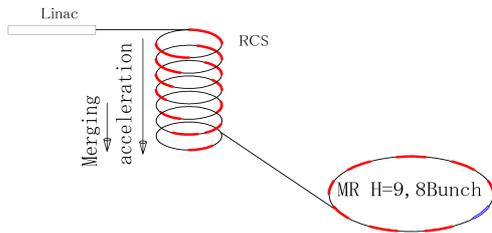


図 4: Merging シナリオ。Linac から入射されたビームは最初 2 バンチとして加速され、加速後半から Merge される。強度が 2 倍の 1 バンチとなったビームは MR に 8 回入射される。

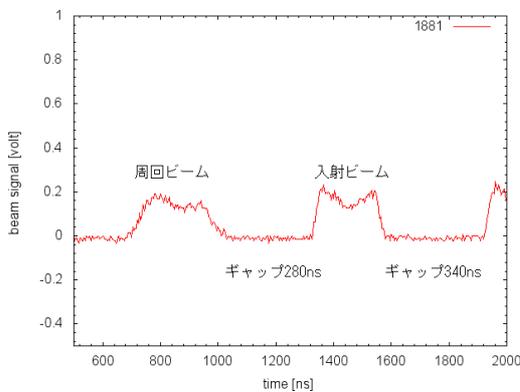


図 5: RCS 取出し付近で 2 次高調波を混合しバンチ長を長くしたビームを MR に入射した場合のバンチ間隔。2 次高調波混合のバケツとビームが十分にマッチしていないため周回ビームでエミッタンス増加があることがわかる。2 次高調波を混合が十分でないためバンチングファクターは 0.25 程度である。バンチングファクター 0.3 の場合、バンチ間の間隔はさらに短くなる。

かが重要となる。今後もシミュレーションを用いて更に条件の最適化をおこなうことができる考えている。

この図 8 のシミュレーションのように Merge を行う場合、入射時に H=2(加速)と H=4(2 次高調波)、さらに加速後半で H=2(加速)と H=1(Merging)が必要となり、3 つの異なる RF 周波数を操作する必要がある。これには現状の 2 つの周波数に対応した LLRF 系を 3 周波数対応に入れ替える必要がある。これには基板の設計から制作まで 1 年程度の期間が必要と思われる。

3. MUON EXPERIMENTS

Merging により 1 バンチとなることは、MLF 施設におけるミュオン実験にとっても利点がある。図 9 はミュオンの LFV 実験でのミュオン数を示している。2 バンチの場合、実際の測定に使えるのは 2 番目のバンチが標的に当たってからになるため、最初のバンチによって生成されるミュオンの一部は崩壊していることになる。これに対し、1 バンチの場合はこうした問題はない。これにより約 3 割のミュオン数を稼ぐことができる。

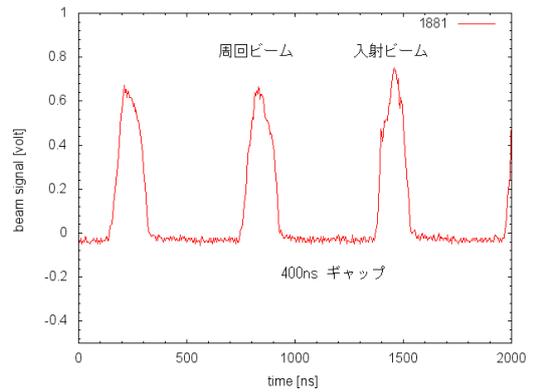


図 6: RCS 取出し付近で 2 次高調波を混合しない場合。周回ビームのエミッタンス増加が少ないことがわかる。このためバンチ間隔は 400 ns あり、MR 入射キッカーの立ち上がり時間には十分である。

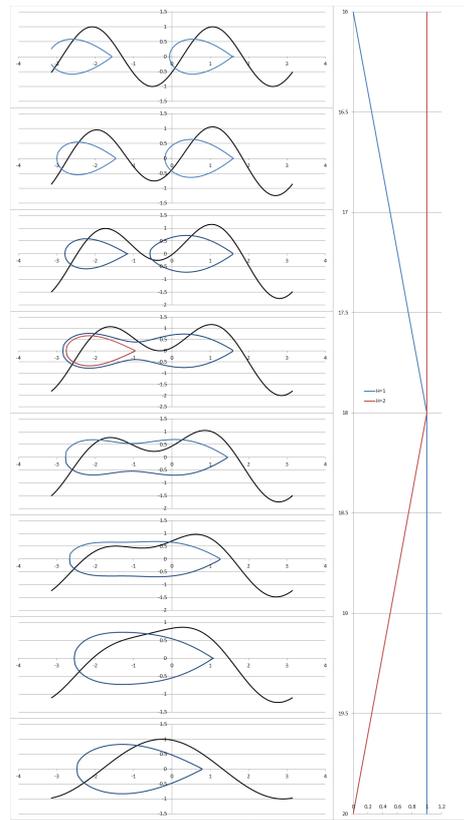


図 7: シンクロナス位相を 30 度を選んだ場合の Merging 際の電圧とバケツの変化の様子。実際の RCS 加速ではシンクロナス位相は加速後半には 0 度に近づき、電圧は低下していく。

4. 現状のシステムを用いた MERGING 試験

RCS で 300kW 相当 (25TP/Batch) のビームを加速するためには RCS 入射での 2 次高調波を用いたバンチ操作が不可欠である。しかし、Merge の原理の実証試験のためには 2 次高調波は必要ではない。RCS の LLRF(Low Level RF) モジュールは 2 つの周波数を扱うことができ

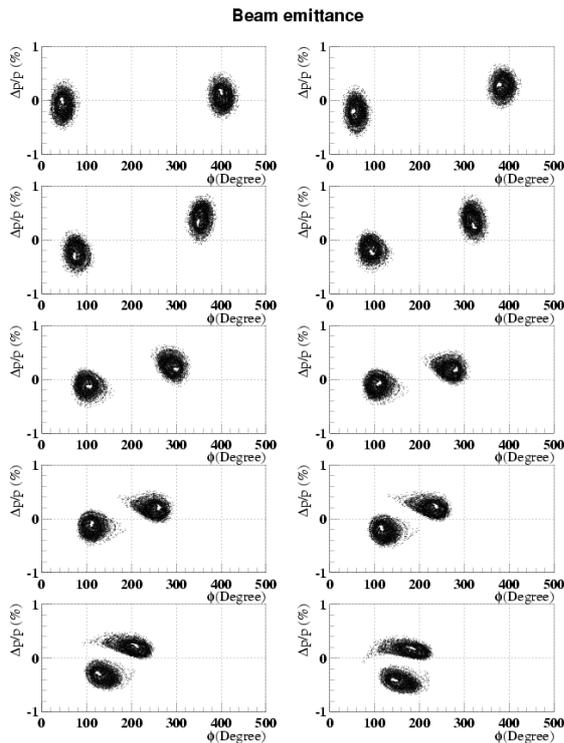


図 8: 実際の加速条件を用いた Merging のシミュレーションの例。加速後半の 3 ms を用いて 2 つの RCS バンチが 1 つのバンチとして Merge される様子を 0.3 ms 間隔で表示。運動量広がり は Merge 後のバンチで $\pm 0.5\%$ である。また、途中で右側のバンチの運動量が左のバンチに追いつくために高くなっている。今後、シミュレーションを継続することで、エミッタンス増加対策など、更に条件の最適化をおこなうことが必要である。

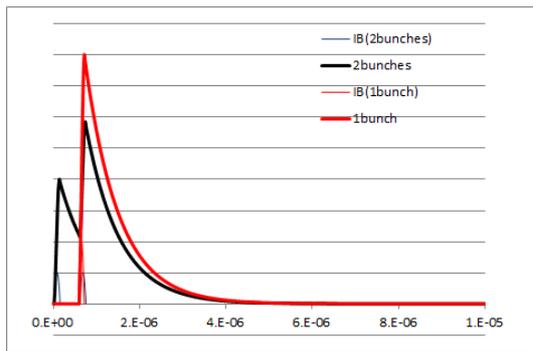


図 9: MLF 施設での LFV 実験での標的で生成されるミュオン数。黒線は 2 バンチの場合、赤線は 1 バンチの場合を示す。約 3 割ミュオン数が増加する。

るため、つぎのような表のような手法で Merging 試験をおこなうことができる。つまり、本来の H=4 対応のメモリーを H=2 の加速周波数のために使用し、H=2 対応のメモリーを H=1 の Merge のために使用するものである。Merging でカギとなるのはシミュレーションで示されているように、限られた時間内に大きなエミッタンス増加なくバンチを Merge することである。

表 1: LLRF の周波数メモリー割り当て

Period/Purpose	Present	Merging	Test
0-3ms			
加速	基本波用 (H=2)	H=2	2 次高調波用 (H=2)
2 次高調波	二次高調波用 (H=4)	H=4	なし
3-17ms			
加速	基本波用 (H=2)	H=2	2 次高調波用 (H=2)
17ms-20ms			
加速	基本波用 (H=2)	H=2	2 次高調波用 (H=2)
Merging	なし	H=1	基本波用 (H=1)

5. まとめ

ビーム増強のシナリオとしてバンチ操作 (Merging) を使った手法を検討した。加速中に Merging を行うというこれまで試されたことのない手法となるが、シミュレーション計算からは可能性が明らかになった。この手法は将来の 1MW を超える運転においても役立つ可能性がある。本格的な大強度での応用のためには LLRF の改造が必要となるが現状の LLRF を用いても部分的な試験は可能である。

参考文献

- [1] T. Koseki, "Status of J-PARC Main Ring After Recovery from the Great East Japan Earthquake Damage", Proceedings of IPAC12, New Orleans, May 20-25, 2012, THPPP079.
- [2] M. Kinsho, "Status of J-PARC 3 GeV RCS". Proceedings of IPAC12, New Orleans, May 20-25, 2012, .
- [3] R. Garoby CERN Accelerator School, RF for Accelerator, Ebeltoft Denmark, 8-17 June 2010, CERN-2011-007 p431-446.
- [4] C. Ohmori *et al.*, "HIGH GRADIENT MAGNETIC ALLOY CAVITIES FOR J-PARC UPGRADE" IPAC11, San Sebastian, Spain, September 2011, p. 2885 (2011).
- [5] F.E. Mills, BNL Report AADD 176 (1971).
- [6] D. Boussard and Y. Mizumachi, 8th Particle Accelerator Conference, San Francisco, CA, USA. 1979, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS26 (1979) 3623-5.
- [7] K. Seiya *et al.*, "Progress in Multi-Batch Slip Stacking in the Fermilab Main Injector and Future Plans", Proceedings of PAC09, Vancouver Canada, 2009, p1424.
- [8] Accelerator Group JAERI/KEK Joint Project Team, "Accelerator Technical Design Report for J-PARC", KEK Report 2002-13, JAERI-Tech 2003-044.
- [9] M. Yamamoto *et al.*, "Longitudinal Beam Dynamics on 3 GeV PS in JAERI-KEK Joint Project", Proceeding of EPAC02, Paris, p1073.
- [10] F. Tamura *et al.*, "Low Level RF Control System of J-PARC Synchrotrons", Proceeding of PAC05, Knoxville, p3624.