

## J-PARC マルチ MW 化のためのバンチ操作 A BUNCH MANIPULATION FOR MULTI-MW J-PARC

大森 千広<sup>#</sup>, 杉山 泰之<sup>A)</sup>, 長谷川 豪志<sup>A)</sup>, 原 圭吾<sup>A)</sup>, 古澤 将司<sup>A)</sup>, 吉井 正人<sup>A)</sup>  
島田 太平<sup>B)</sup>, 田村 文彦<sup>B)</sup>, 山本 昌亘<sup>B)</sup>,  
Chihiro Ohmori<sup>#A)</sup>, Yasuyuki Sugiyama<sup>A)</sup>, Katsushi Hasegawa<sup>A)</sup>, Keigo Hara<sup>A)</sup>, Masashi Furusawa<sup>A)</sup>,  
Masahito Yoshii<sup>A)</sup>, Taihei Shimada<sup>B)</sup>, Fumihiko Tamura<sup>B)</sup>, Masanobu Yamamoto<sup>B)</sup>,  
<sup>A)</sup> J-PARC/KEK  
<sup>B)</sup> J-PARC/JAEA

### Abstract

J-PARC MR delivers 470 kW beam for T2K neutrino experiment and 45 kW for Hadron experiments. J-PARC plans to increase the repetition rate of the MR to reach the design value of 750 kW and to achieve the higher intensity beyond 1 MW. In this paper, we describe the possibility to increase the beam power to 3 MW using a bunch manipulation scheme.

### 1. はじめに

J-PARC MRはT2Kニュートリノ実験のために470kW、ハドロン実験に45kWのビームを供給している(図1)。これまでビーム強度の増強のために、ベータatron共鳴の補正、2次高調波の導入によるバンチ長の制御と空間電荷の緩和、入射電磁石パルスの改善、トランスバースダンパーによる横方向の振動の抑制などの改良が継続的に行われてきた。特に2次高調波の導入においては、高性能な金属磁性体FT3L空洞の導入により(図2、3)、加速電圧に余裕ができたため、より高い2次高調波電圧が2016年から出力可能となった[1]。さらに2019年に高繰り返し運転のために新しい電磁石電源が導入される予定である。これに加え加速システムの電源を強化することで、1.3MWのビーム供給を目指している。このためには加速粒子数を $3.2 \times 10^{14}$  pppまで増やすことが必要となる。しかし、MRでは空間電荷効果に関するビームスタディの結果から、 $3.2 \times 10^{14}$  pppを超えるビーム強度を実現するためには入射エネルギーを上げることが必要となり、新ブースターが検討されている(図4)[2,3]。この新ブースターは6-8GeVの加速器であるため、より強度の高いビームバンチをMRに入射することができる。しかし、通常の入射方式では入射できるバンチ数に制限がある。CERNのLHC実験のためにPS加速器で使われているバッチコンプレッションと呼ばれるバンチ操作をMRでも行うことでバンチ数を増やす可能性に議論する。このバンチ操作を用いた3MWのビーム供給の可能性について検討を行う。

バンチ操作はCERNやFNALなど海外のハドロン加速器ではビーム強度を増やすためまた実験に必要なビーム条件をつくりだすための重要な技術として用いられている。以下に主なバンチ操作を示す[4]。

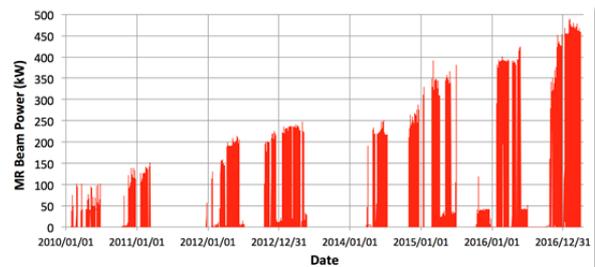


Figure 1: Intensity history of J-PARC MR.



Figure 2: Nine sets of new FT3L magnetic alloy loaded cavities.

<sup>#</sup> chihiro.ohmori@kek.jp

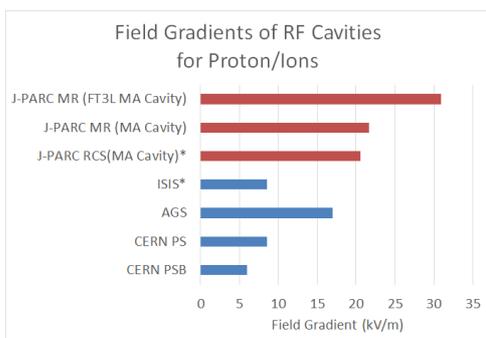


Figure 3: Comparison of RF field gradient of cavities for hadron beam acceleration.

\* means the cavities which have large aperture.

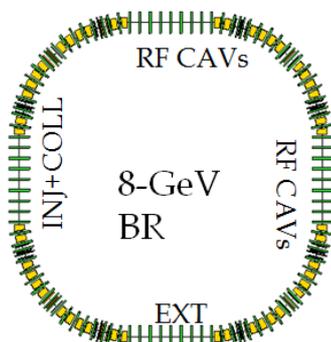


Figure 4: Design of a new 8 GeV booster.

- スリップスタッキング: FNAL Main Injector, Recycler で使われている[4,5]。主リングとブースターシンクロトロンがある場合、 $f+\Delta f$  と  $f-\Delta f$  の 2 つの RF システムを用意し、ブースターからのビームバンチを  $f+\Delta f$  の RF で捕獲したとする。次にビームの無い位置にビームバンチを入射し  $f-\Delta f$  の RF で捕獲すると、2 種類のバンチは異なる運動量を持つため、いずれ主リング内の同じ場所に来る。この時に周波数  $f$  の RF システムにより 2 つの運動量の異なるバンチを捕獲することで 2 倍の強度のある 1 バンチを形成することができる。FNAL の場合、このスリップスタッキングを Recycler で行うことにより、MI のサイクル時間を縮め、700kW のビーム強度を実現している。この手法が成立するためには、加速器のサイクルに合致する  $\Delta f$  が現実的な範囲として選べること、ビームの運動量広がり小さく、2 バンチを同時に捕獲して加速するための必要な RF 電圧が実現可能な値であることが必要となる。FNAL の場合、数 10MHz 帯の RF が用いられているため、この手法が可能となっている。
- バンチスプリッティング、マーキング[4,6]: CERN でバンチを分割し、異なる RF 周波数を持つ加速器間 (PSB-PS-SPS) でのバンチの受け渡しを実現するために使われている。PSB から PS に入射された 8 つのバンチは一度 4 つのバンチにマーキングした後、10MHz 帯の RF に合うように 12 個のバンチに

スプリッティングされる。PS での加速後にはさらに 2 度のスプリッティングを行い、LHC に必要な 25ns 間隔を持つ 48 個のバンチとなり、SPS に入射される。

- バッチコンプレッション[4,6]: 同じく CERN PS でバンチ間の距離を変えるために使われる。例えばハーモニック 9 の RF に対し 8 個のバンチがある場合、ハーモニック数 10 の RF の振幅を増やししながら、ハーモニック数 9 の RF の振幅を減らすことで、バンチ間隔を狭め、ハーモニック数 10 の RF によって捕獲することができる。この操作を繰り返し、PS ではハーモニック数 14 の RF によって捕獲した後、先のバンチスプリッティングとマーキングによりハーモニック数 21 の 10MHz 帯の RF によって加速している。CERN はこのバッチコンプレッション、マーキング、スプリッティングを用いた BCMS とされる手法で LHC のルミノシティを増加させた[3]。

このようにバンチ操作は、様々なハドロン加速器においてビームの性能向上に用いられ、成功を収めている。ところが、J-PARC ではこのようなバンチ操作は一切使われていない。こうした手法を紹介し、それを使うことで J-PARC の性能向上に結び付ける可能性について議論することが本論文の目的である。本論文ではバッチコンプレッションについて検討し、J-PARC への応用を考える[7]。

## 2. バッチコンプレッション

バッチコンプレッションの利点の一つは数 MHz 帯の RF が使えるために J-PARC のビームに合致していることである。ブースターが新たに建設されたとして、ブースターからの 6GeV ビームを MR に通常の 8 バンチより多く入射することを考える。ブースターは RCS と同じサイクルで加速するものとし、2 または 1 バンチが MR に入射される。図 5 にハーモニック数を 9 から 13 にバッチコンプレッションするための RF 電圧パターンとビーム強度の変化を示す。ブースターからの入射 K1 から K3 までは 2 バンチ入射とし、K4 から K8 は単バンチ入射である。

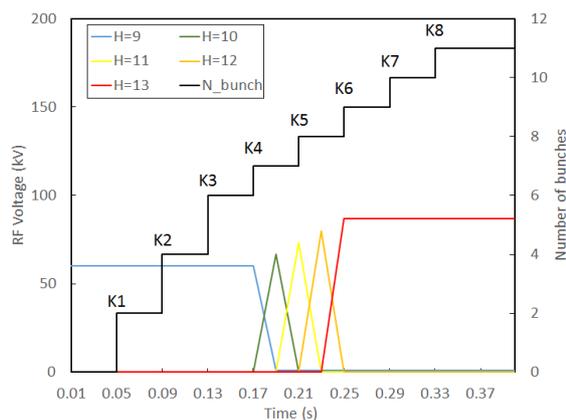


Figure 5: Voltage pattern for batch compression.

## 2.1 Visual Basic シミュレーション

この電圧パターンでコンプレッションした時のビームのコンタープロットが図6である。バンチ数は8から11に増加する一方、入射時間は0.12秒から0.28秒に増加する。このシミュレーションは Visual Basic を用いて独自に行われたが、より正確な計算のための CERN で開発された BlonD コードを用いても計算された。

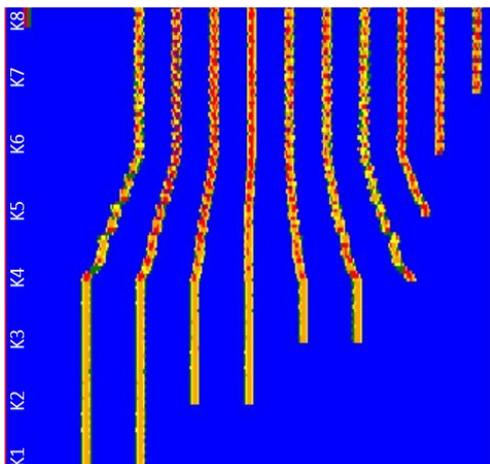


Figure 6: Contour plot for batch compression.

## 2.2 BlonD シミュレーション

CERNで開発されたコード BlonD[8,9]は縦方向のビームの運動を計算するためのもので、加速やビーム捕獲の他にバンチ操作に関するシミュレーションにも使われている。このコードを用いて図5の条件で計算を行った(図7)。BlonDの計算結果は図6の Visual Basic を用いた計算と一致していることがわかる。

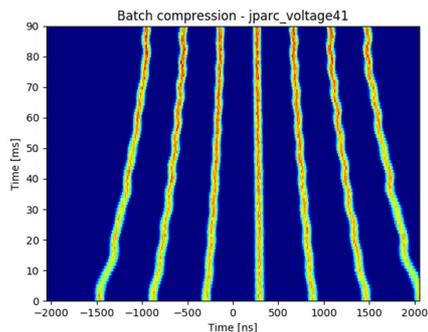


Figure 7: 6-cell cavity.

図8に2つの異なる周波数のRF電圧が合わさった時の合成電圧とその時のバンチ位置および波形を示す。ハーモニクスの一つ高いものを加えることで、バンチが移動していく様子を見ることができる。また、このバッチコンプレッションにより、バンチはRF周波数が変わるため細

くなくなって行く。図9にK2(上)とK4(下)で入射されたビームのバンチ幅の変化を示す。K4で入射されたビームは四極振動はあるが、エミッタンスが特に増加していないことがわかる。

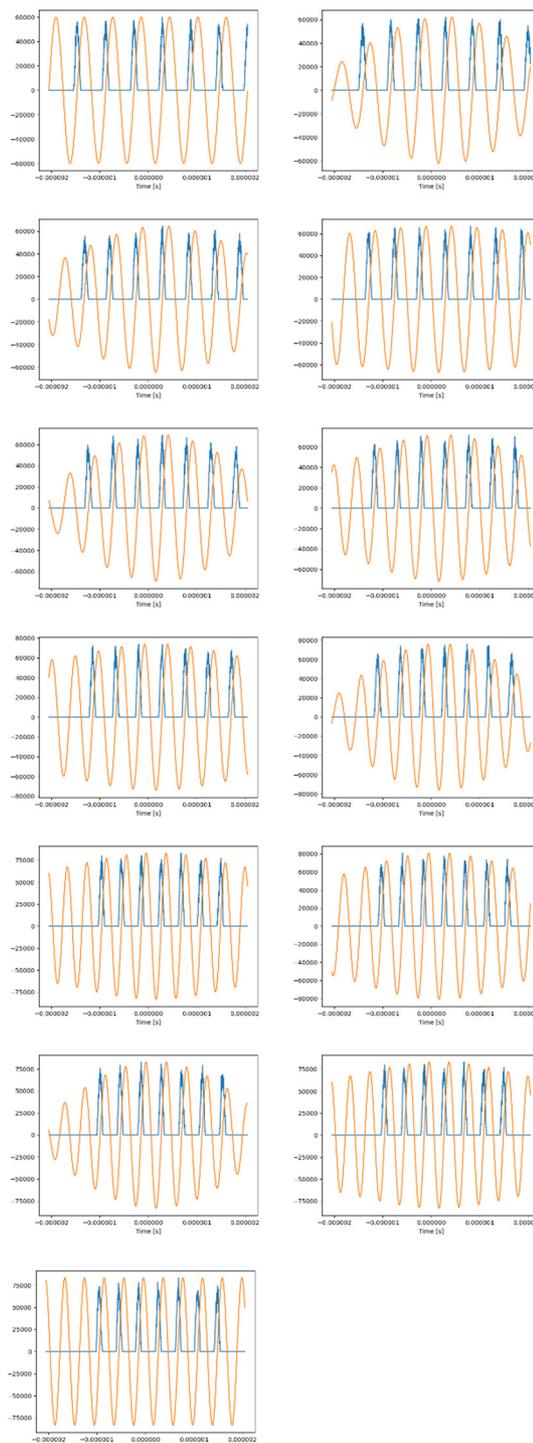


Figure 8: RF voltages and bunch shapes during batch compression from H=9 to H=13. Variations for every 6.6 ms are shown.

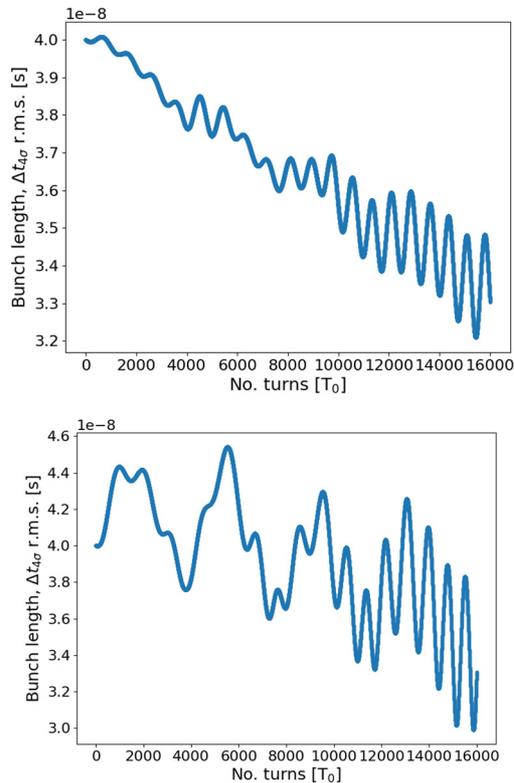


Figure 9: Variation of bunch length during batch compression.

### 2.3 Batch Compression from H=9 to H=15

バッチコンプレッションを H=15 まで続けることで、より多くのバンチを入射することができる。図 10 にその結果を示す。

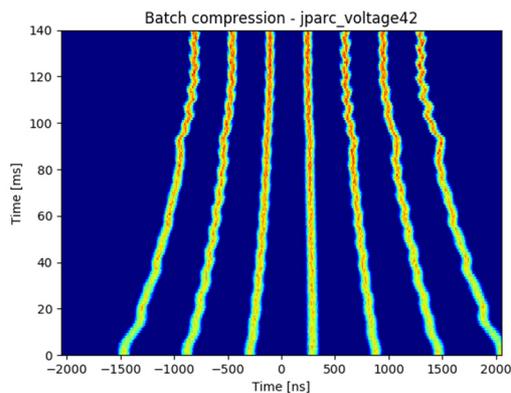


Figure 10: Batch compression from H=9 to H=15.

バッチコンプレッションによるビーム強度の増強を RCS のビーム強度が 1.6MW と 2MW[10]に増強された場合について表 1 にまとめる。バッチコンプレッションは際限

なく続けることはできず、入射キッカー電磁石の立ち上がり時間とバンチの幅の合計が RF 周期以下でなければならない。

Table 1: Batch Compression

Compression	No	Yes
No. of Batch	4	10
RCS Beam	1.6 MW	1.6 MW
Cycle Time	1.16 s	1.4 s
No. of Bunches	8	13
Harmonic number	9	9-15
RF Period	599 ns	359 ns
Proton/cycle	$5.3 \times 10^{14}$	$8.7 \times 10^{14}$
Beam Power	2.2 MW	3.0 MW

## 3. Discussions

### 3.1 Application of Batch Compression to the present MR

バッチコンプレッションを現在の J-PARC MR の入射に使おうとすると、次の点が障害となることがわかっている。

- 入射時間が長くなりビームロス、エミッタンス増加の可能性はある。
- 2 次高調波をかけながらバッチコンプレッションをすることができないため、バンチ長が短くなり、ビームロスが発生する。

このため、バッチコンプレッションは十分にエネルギーが高く、コンプレッションに時間をかけてもビーム損失に結び付かないことが必要となる。

### 3.2 Application of Batch Compression for SX

遅い取り出しでは 30GeV まで加速したビームバンチに対し RF 電圧を切ることでデバンチさせ、コースティングビームとすることが必要となる。このデバンチ過程において、電子雲を原因とする真空度の悪化がビーム強度増に伴い観測されている。電子雲を発生、増幅する機構としてビームバンチがデバンチする過程で生じるビームの高い周波数成分が考えられている。特に、電子雲が観測されている位置には MR ビームの空バケツ(ビームが入っていない高周波バケツ)の位置との相関がみられる。バッチコンプレッションは通常高いハーモニクスに移る方向に用いられるが、これを H=9 (加速時のハーモニクス数)から H=8 とし、空バケツをなくすることで、特定のバンチがデバンチした際に高い周波数成分を極端に多く持たないようにできる可能性がある。図 11 に H=9 から H=8 にハーモニクス数を変化させた場合のビームの分布の変化を示す。ハーモニクス数を 9 から 8 にする際に大きなビーム損失は見られていない。

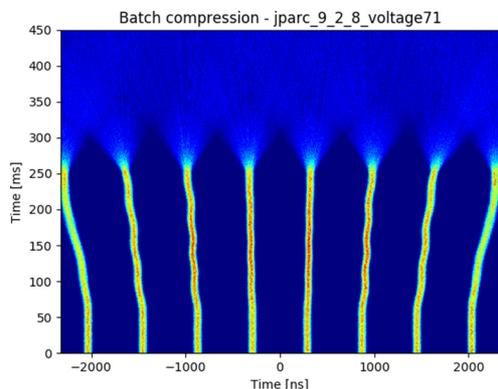


Figure 11: De-bunching for SX after bunch manipulation.

#### 4.3 Application of Batch Compression for SX abort

遅い取り出し運転では MR の機器に異常が生じた場合、遅い取り出しを中断し、ビームを MR 加速器内のアボートダンプに取り出す SX アボートが運用されている。しかし、遅い取り出し中のビームはデバンチしているため、すべてのビームをアボートすることはできない。SX アボートが遅い取り出し開始の初期に発生した場合、ビーム強度が増えるに従い、機器への影響も懸念される。Batch Compression をデバンチしたビームに用いた場合、図 12 のようになる。ここでは図 11 のようにハーモニクス数 8 の時に 8 バンチのビームをデバンチさせた後に SX アボートが発生した場合を想定している。ハーモニクス数 8 で再バンチしたビームを Batch Compression によってハーモニクス数 9 でアボートに必要な空きバンチを形成している。完全な空きバンチの形成はできないが、デバンチしたビームの一部がアボート取り出し機器に衝突する量を減らすことができる。なお、ここではリバンチからアボートまで 500ms 程度で収まる条件で検討した。

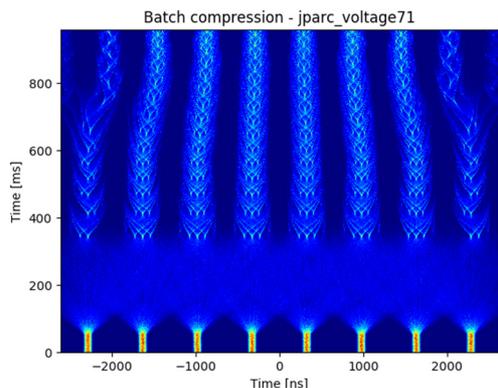


Figure 12: Batch compression for SX-Abort.

#### 4.4 Other schemes for multi-MW

J-PARC 加速器はビーム加速について次のユニークな特徴を持っている。

- Imaginary Transition (MR) または High Transition gamma (RCS) のため、加速中にトランジションが存在しない。
- RCS では広帯域(Q=2)な RF システムを用いているため、加速周波数とは異なる RF 周波数を出力することができる。
- MR, RCS ともに金属磁性体空洞を用いているため Passive な負荷であり、ビームローディング補償がしやすい。

こうした特徴をもっているため、MR のみならず RCS でもバンチ操作をすることによりビーム強度を増やす方法を検討する必要がある。

## 8. Conclusions

J-PARC MR は約  $2.4 \times 10^{14}$  の世界最大の粒子数の陽子を加速している。しかも、その過程ではバンチ操作が使われず、極めてシンプルに RCS からバンチが MR に受け渡され加速され、供給されている。ここに、他の加速器で使われているバンチ操作を導入することで、ビーム強度をさらに増やすことの可能性について議論した。

## 参考文献

- [1] C. Ohmori *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 16, 112002 (2013).
- [2] S. Igarashi *et al.*, Proc. of 2nd Int. Symp. Science at J-PARC, JPS Conf. Proc. 8, 012018 (2015).
- [3] H. Hotchi *et al.*, Proc. of 2nd Int. Symp. Science at J-PARC, JPS Conf. Proc. 8, 012008 (2015).
- [4] R. Garoby, "RF Gymnastics in a Synchrotron", Handbook of Accelerator Physics and Engineering, Alexander Wu Chao, Karl Hubert Mess, Maury Tigner, Frank Zimmermann.
- [5] K. Seiya, "PROGRESS IN MULTI-BATCH SLIP STACKING IN THE FERMILAB MAIN INJECTOR AND FUTURE PLANS", Proceedings of PAC09, Vancouver, BC, Canada, p1424.
- [6] "New bunch-production scheme breaks luminosity record", CERN Courier September 2016.
- [7] C. Ohmori *et al.*, "Batch Compression Scheme for Multi-MW J-PARC", Proceedings of IPAC17, Copenhagen, Denmark, p.2294.
- [8] H. Timko *et al.*, IPAC16, Busan, Korea, May 2016, p. 3094 (2016); <http://blond.web.cern.ch/>
- [9] A. Lasheen, private communications.
- [10] M. Kinsho, IPAC 2016, Korea, May 2016, p. 999 (2016).