

J-PARC MR フラットトップにおける非断熱的バンチ操作への 縦方向インピーダンスの影響

EFFECTS OF THE LONGITUDINAL IMPEDANCES ON NON-ADIABATIC BUNCH MANIPULATION AT FLATTOP OF J-PARC MR

田村文彦 ^{*A)}、大森千広 ^{A)}、吉井正人 ^{A)}、富澤正人 ^{A)}、外山毅 ^{A)}、
 杉山泰之 ^{A)}、長谷川豪志 ^{A)}、小林愛音 ^{A)}、沖田英史 ^{A)}

Fumihiko Tamura ^{*A)}、Chihiro Ohmori ^{A)}、Masahito Yoshii ^{A)}、Masahito Tomizawa ^{A)}、Takeshi Toyama ^{A)}、
 Yasuyuki Sugiyama ^{A)}、Katsushi Hasegawa ^{A)}、Aine Kobayashi ^{A)}、Hidefumi Okita ^{A)}

^{A)}J-PARC Center, JAEA & KEK

Abstract

J-PARC MR delivers high intensity proton beams to the neutrino experiment. Eight bunches with high peak currents are extracted from the MR by fast extraction, therefore the neutrino beam has a similar time structure. The Intermediate Water Cherenkov Detector (IWCD) is to be constructed for the future neutrino experiment. The IWCD requires a low peak current time structure, therefore peak current reduction by bunch manipulation during the MR flat top is considered. The manipulation must be done shortly to avoid a significant loss of the beam power and the bunch gap for the rise time of the extraction kickers must be kept. A non-adiabatic bunch manipulation using the multiharmonic rf voltage has been proposed. Since the longitudinal impedance of the entire MR circumference may affect the beam motion in the manipulation, simulations are performed to evaluate the feasibility of the bunch manipulation for high intensity beams.

1. はじめに

J-PARCの主リング(MR)は大強度陽子ビームをニュートリノ実験に供給している。2021年4月にはニュートリノ実験への出力ビームパワーは510 kWに達した。MRおよびMRのRFシステムパラメータをTable 1に示す。MRのハーモニック数は9であり、8つのRFバケツにバンチが入射され、3 GeVから30 GeVまで加速される。主電磁石電源のアップグレード後には、繰り返し周期は従来の2.48 sから1.16 sに短縮され、出力ビームパワーは倍増することとなる。8つのバンチは速い取り出し(FX)キッカーにより1ターンで取り出され、ニュートリノ実験施設へ導かれる。生成されるニュートリノビームは、取り出された陽子バンチと同様の構造を持つ。MRからの取り出し時、バンチ長は50 ns程度、またバンチ間の間隔は530 nsである。8番目のバンチと先頭バンチの間隔は1110 nsであり、この間隔はFXキッカーの立ち上がり時間のために必要なものである。

ニュートリノ実験のアップグレード計画も進んでいる。ハイパーカミオカンデ(Hyper-K) [1]は既存のスーパーカミオカンデに比べ桁大きい水タンクを持ち、感度の大幅な向上が見込まれる。この計画では、Hyper-Kによる測定精度の向上と振動測定の系統誤差の制御のために、新たに中間水チェレンコフ検出器(Intermediate Water Cherenkov Detector, IWCD)が建設されることとなっている。

IWCDにとって、バンチ内でのイベントのパイルアップは大きな課題のひとつである。パイルアップ由来のデッドタイムの割合は、50 nsといった短いバンチの場合特に大きな値となる。より長い時間構造、すなわち完全または部分的にデバンチしたビームにより、測定効率

Table 1: Parameters of the J-PARC MR and its RF System

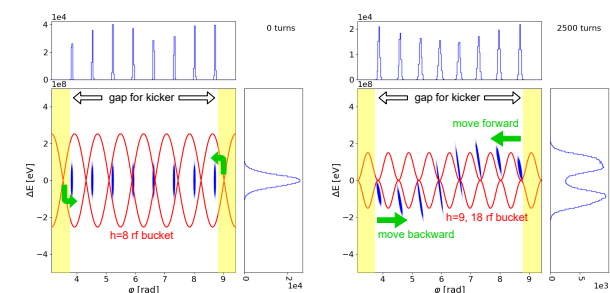
circumference	1567.5 m
energy	3–30 GeV
γ_t	31.6 <i>i</i>
beam intensity	(achieved) 2.6×10^{14} ppp
repetition period (FX)	(present) 2.48 s (upgraded) 1.16 s
accelerating frequency	1.67–1.72 MHz
harmonic number	9
number of bunches	8
maximum rf voltage ($h = 9$)	(present) 320 kV (upgraded) 600 kV
No. of cavities ($h = 9, 18$)	(present) 7, 2 (upgraded) 11, 2
cavity resonant frequency	1.72 MHz
Slippage factor (η)	(3 GeV) -0.058 (30 GeV) -0.0019
Q-value of rf cavity ($h = 9$)	22

を向上することが期待されている。このため、縦方向のバンチ操作によってより長い時間構造を持つビームを生成することを検討している。加速中には積極的な操作を行うことは困難であるため、必然的にフラットトップでのバンチ操作の検討となる。

2. 要求および手法

このバンチ操作は加速終了後のフラットトップで行われる。通常のMR速い取り出しでは、ビームは30 GeVまで到達した直後に取り出され、磁場のパターンはフラットトップを持たない。バンチ操作のためには磁場パターンを延長しフラットトップを持たせる必要があり、従って繰り返し周期はフラットトップの分だけ延長されることとなる。これは直接的に出力ビームパワーの減少

* fumihiko.tamura@j-parc.jp



(a) The bunches move differently according to the ($h = 8$) rf bucket. (b) Debunching stage.

Figure 1: Operating principle.

に繋がるので、バンチ操作はできるだけ高速に行い、フラットトップの延長を最小限に抑えねばならない。MRの繰り返し周期はRCSの周期40msの整数倍である必要がある。40ms以内に操作を終えることができるならば、ビームパワーの低下は約3%に抑えられる。

FXキッカーの立ち上がり時間は約1.1 μ sであり、これは通常運転での8番目のバンチと先頭バンチの間隙に近い。立ち上がり時間でのビームロス为了避免のために、バンチ操作ではこの間隙を維持することが必要である。

フラットトップでピーク電流を下げるバンチ操作には、いくつかの手法が考えられる。単純にRF電圧をオフにしてデバンチさせる手法は、FXキッカーのためのバンチ間隙を保つことができないので今回の目的では使えない。バリア電圧[2]を立てながらデバンチさせる手法は有望な方法ではあるが、大強度ビームのローディングに耐えるバリアRFシステムは現在のところ存在せず、新規の、そして難しい開発となる。

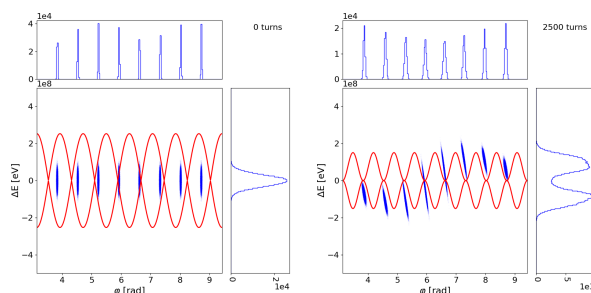
Table 1に示したように、30 GeVではスリッページファクターは $\eta = -0.0019$ と非常に小さい。このように小さな η では、バッチコンプレッション[3]といった断熱的なバンチ操作は非常に長い時間がかかり操作のためのフラットトップを長く取らねばならず、ビームパワーの減少が大きくなるものとなるため、要求を満たすものではない。

上記の要求のもとで、非断熱的なマルチハーモニックRF電圧を用いたバンチ操作が提案されている。MRの金属磁性体を用いた加速空洞は、Table 1に示すように $Q = 22$ と比較的広帯域であり、加速ハーモニック($h = 9$)のみならず隣接ハーモニクス($h = 8, 10$)もカバーするので、新たな空洞の増設なしに加速空洞に隣接ハーモニクスを発生させることができる。この隣接ハーモニクスをバンチ操作に使用する。以下に、動作原理とシミュレーション結果について述べる。

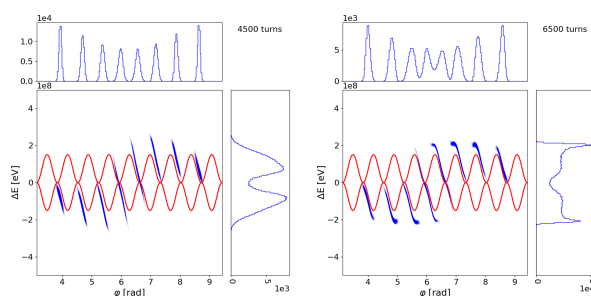
3. 動作原理

この非断熱的なバンチ操作の動作原理についてはIPAC21で報告を行っている[4]ので、ここでは概要を述べる。

RF電圧をオフにしてデバンチさせる手法は8番目と1番目のバンチの間隙を保つことができないのは前述の通りである。しかし、もし1番目と8番目のバンチをデ



(a) Initial distribution, 0 turn. (b) 2500 turns.



(c) 4500 turns. (d) Before extraction, 6500 turns.

Figure 2: Longitudinal distribution during the manipulation process.

バンチ前にそれぞれ減速、加速しておいたならば、これらのバンチはデバンチ中にそれぞれ後ろおよび前に動くであろう。このような減速および加速は、加速周波数の隣接ハーモニック($h = 8$)の電圧を発生させることで実現することができる。MR空洞は $Q = 22$ と比較的広帯域なので、隣接ハーモニック電圧の発生が可能である。Figure 1(a)では、加速周波数($h = 9$)の電圧を切り、隣接ハーモニック($h = 8$)電圧を発生させた時のRFバケツと、ビームの初期分布を示している。ここに、($h = 8$)電圧の位相は1番目と8番目のバンチが減速および加速されるように選んでいる。初期のバンチ間隔とRFバケツの mismatch により、バンチはそれぞれ異なる動きをする。

1番目と8番目のバンチがそれぞれ十分に減速、加速された後に、加速周波数($h = 9$)および2倍高調波($h = 18$)電圧を、デバンチが進むような位相で発生させる(Fig. 1(b))。単に電圧を切った場合よりも速くデバンチさせることができる。

この動作原理に基づき、CERNが開発した縦方向シミュレーションコードBLonD[5]を用いてフラットトップ開始からデバンチ終了までのシミュレーションを行った。ビームの初期分布は、運動量広がり $dp/p = 0.1\%$ (RMS)、バンチ長は10 ns (RMS)のバンチをRF周期の間隔で8個配置したものである。各バンチのマクロ粒子数は50000個とした。電圧のプログラムは、フラットトップ開始から13 msまでは隣接ハーモニック($h = 8$)を50 kV発生させ、13 msからは加速周波数($h = 9$)および2倍高調波($h = 18$)をそれぞれ20 kV、10 kV発生させるものである。バンチの場所に不安定不動点があるように($h = 9, 18$)の位相を設定している。

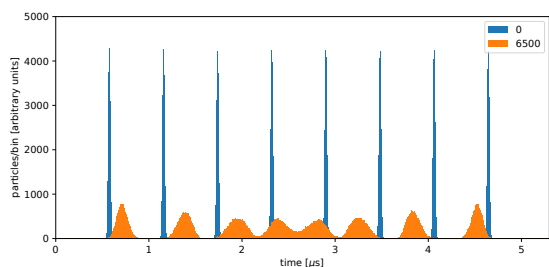


Figure 3: Comparison of beam structures at 0 and 6500 turns.

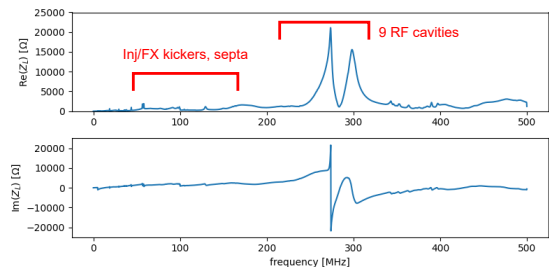


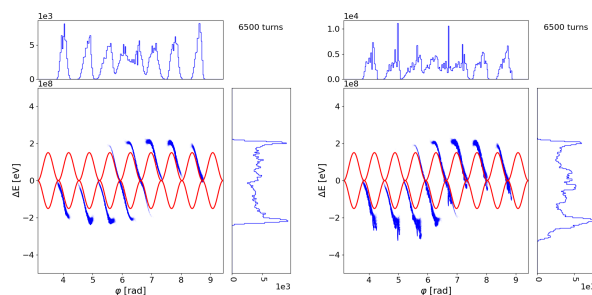
Figure 4: Impedance used for the simulations. Note that the impedance of the fundamental resonance of the accelerating cavities around 1.7 MHz is removed, assuming the beam loading compensation works correctly.

バンチ操作中の縦方向分布を Fig. 2 に示す。2000 ターンまでに、1 番目と 8 番目のバンチは隣接ハーモニック ($h = 8$) により十分に減速、加速されていることがわかる。13 ms 隣接ハーモニックを切り、加速周波数 ($h = 9$) および 2 倍高調波 ($h = 18$) を発生させることにより、RF 電圧を切った場合に比べ速いデバンチが実現される一方、既に 2500 ターンで運動量方向への広がりが増進されていることがわかる。陽子ビームは RF バケツの外の等高線に沿って運動する。6500 ターン (約 35 ms) ではピーク電流が低い構造が得られ、ビームの取り出しが可能となっている。ビーム取り出し直前では運動量広がりには全幅で約 0.7% であり、これはニュートリノビームラインで許容される範囲に収まっている。操作前と後のビームの時間構造の比較を Fig. 3 に示す。この非断熱的バンチ操作により、ピーク電流は約 1/6 に減少している。また、FX キッカーの立ち上がりに必要な 8 番目と 1 番目のバンチの間隔は保たれていることがわかる。

35 ms で操作が終わることから、MR の周期の延長は最小限の 40 ms に留めることができるため、ビームパワーの減少は約 3% に抑えられる。

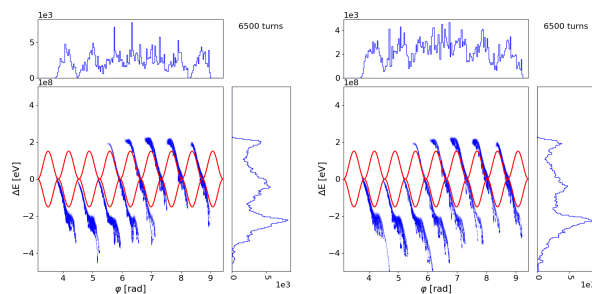
4. インピーダンスの影響

MR では遅い取り出し (SX) 運転のデバンチ過程において、FX 運転に比べ低いビーム強度でのビームマイクロバンチングの発生が観測されている [6]。これは、MR 機器の数十 MHz から数百 MHz 領域での高い周波数の縦方向インピーダンスによるものと考えられている。SX 運転ではマイクロバンチング起因の電子雲による横方向インスタビリティが課題となっている。これまでの FX



(a) 1×10^{13} ppb.

(b) 2×10^{13} ppb.



(c) 3×10^{13} ppb.

(d) 4×10^{13} ppb.

Figure 5: Longitudinal distribution at 6500 turns with various intensities.

大強度運転では短いバンチのまま取り出すのでマイクロバンチングは発生していないが、今回の非断熱バンチ操作はデバンチ過程を含むため、FX 大強度ビーム運転においては問題となりうる。

MR の大きな縦方向インピーダンス源となる機器には加速空洞、入射・取り出しキッカー、セプタムなどがあり、これらについてストレッチワイヤー法による測定が行われている [7]。測定された縦方向インピーダンスを台数に応じ積算したものを Fig. 4 に示す。最も大きな縦方向インピーダンスを持つ機器は 9 台の加速空洞である。約 270 MHz および 300 MHz 周辺の強い共振は、定性的には加速ギャップ、共振コンデンサとインダクタンスによるものと考えられており、電磁界シミュレーションによる調査が行われている。加速周波数 1.7 MHz 周辺の高いインピーダンスはビームローディング補償がよく働くことを仮定してシミュレーションおよびこのプロットから除いてある。

約 50 MHz から 150 MHz にわたるインピーダンスは、入射・取り出しキッカーやセプタムを源とするものである。合計で 1000 Ω 程度と空洞の高周波共振に比べれば低いインピーダンスであるが、周波数が比較的低いため無視することはできない。

上述のインピーダンスのバンチ操作に与える影響をシミュレーションにより調査した。初期ビーム分布はインピーダンスを含まない計算と同じとした。バンチ操作終了後 6500 ターン、約 35 ms での縦方向分布を目標強度である 4×10^{13} ppb (3.2×10^{14} ppp) までの様々な強度について計算した結果を Fig. 5 に示す。

強度 1×10^{13} ppb では、インピーダンスのない時とほぼ同様のバンチ操作が実現できる。ただし、位相空間

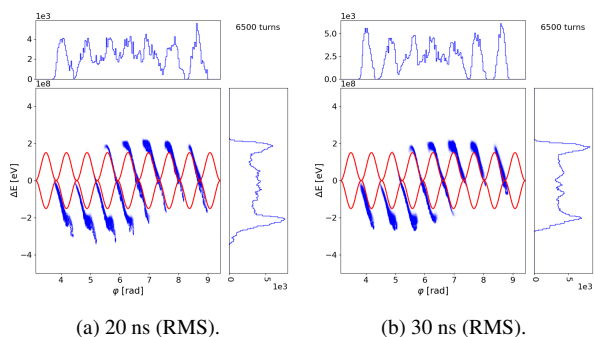


Figure 6: Longitudinal distribution at 6500 turns with increased initial bunch lengths.

分布ではわかりにくいですが、運動量分布およびビームの時間構造において、細かな構造が発現している。これは高い周波数のインピーダンス、特に RF 空胴の共振によるインピーダンスによるものである。強度 2×10^{13} ppb では、インピーダンスの実数部に起因する運動量のロスが発生している。2、3 番目のバンチで顕著のように、細かな構造を位相空間上でも見ることができる。特に、8 番目のバンチは後端が FX キッカーの立ち上がりに必要な間隙にしみ出してしまっている。強度 3×10^{13} ppb、強度 4×10^{13} ppb ではインピーダンスの影響はさらに強くなり、ビームの時間構造全域にわたり細かな構造がはっきりしており、運動量分布は下方に大きく拡がり、 $dp/p = -1.8\%$ に達する。時間構造、運動量分布ともに許容できるものではない。このように、MR の高い周波数のインピーダンスの影響は強大であり、目標強度 4×10^{13} ppb でのバンチ操作は困難である。

初期のバンチ長を長くすることで、ビームの持つ高い周波数の成分を減らす効果が期待できる。目標強度である 4×10^{13} ppb において、初期バンチ長を 20 ns および 30 ns (RMS) とした場合のバンチ操作終了後 6500 ターン、約 35 ms での縦方向分布を Fig. 6 に示す。

初期バンチ長 20 ns、30 ns のいずれの場合も、10 ns の場合 (Fig. 5(d)) に比べ高い周波数のインピーダンスの影響は低減されており、運動量分布の下方への拡がりはそれぞれ -1.1% 、 -0.9% までに抑えられている。20 ns の場合では 8 番目のバンチの後端が 300 ns 程度 FX キッカーの立ち上がりに必要な間隙に拡がっており許容することはできないが、30 ns の場合ではこれは 100 ns 程度であり、FX キッカーの立ち上がり時間の高速化改造を行うことで取り出し可能な範囲に収まると言える。

ビームの時間構造をより細かい時間方向のピン幅でプロットしたものを Fig. 7 に示す。初期バンチ長を伸ばしたことで、0 ターンでのピーク電流値が Fig 3 に比べ約 $1/3$ になっていることは当然である。6500 ターンではピーク電流は 0 ターンの半分から $1/3$ 程度になっている。注目すべきは、スパイク状のマイクロバンチング構造が時間構造全域にわたって発生していることである。このような構造は、SX 運転のデバンチ過程同様に電子雲を発生させ横方向インスタビリティを引き起こす可能性が高く、大きな問題である。

以上から、目標強度 4×10^{13} ppb でのバンチ操作は、

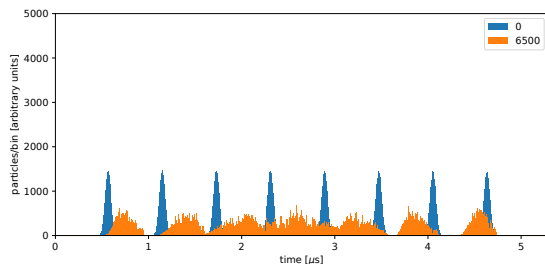


Figure 7: Comparison of beam structures at 0 and 6500 turns at 4×10^{13} ppb with the initial bunch length of 30 ns (RMS).

操作開始時の初期バンチ長を伸ばした場合においても、困難であると言わざるを得ない。

5. まとめと議論

IWCD で要求されるピーク電流の低い時間構造を実現するために、MR フラットトップでの非断熱的バンチ操作について検討を行った。インピーダンスを含まない計算では所望のビーム時間構造を得ることができるが、MR の高い周波数の縦方向インピーダンスを考慮すると、目標強度 4×10^{13} ppb でこのようなバンチ操作は非常に困難であることがわかった。運動量ロスや FX キッカーの立ち上がりに必要な間隙への侵入は初期バンチ長を伸ばすことである程度対処できるが、マイクロバンチング構造については対処が難しい。

RF 空胴の約 270 MHz および 300 MHz 周辺の強い共振は、加速ギャップの小さな静電容量と共振コンデンサ周辺の小さなインダクタンスが原因であると定性的に理解されており、これら容量、インダクタンスを大幅に変えることはできないから、この共振は除去が困難である。

目標強度においては、縦方向インピーダンスの影響は、今回のバンチ操作のみならずバリア電圧を用いた方法や 2 倍高調波を用いて時間構造を平滑化する方法においても同様と考えられるため、これらの方法も困難であろう。

MR から低いピーク電流の大強度ビームを供給するための手法としては、バンチ操作による方法は諦めざるを得ない。FX キッカーの高速化改造が前提となるが、VHF 電圧によるエミッタンス増加などの別の手法を考えていくことになるだろう。

参考文献

- [1] K. Abe *et al.*, Prog. Theo. Exp. Phys., 2015, 053C02 (2015).
- [2] M. Vadai *et al.*, in Proceedings of IPAC 2019, Melbourne, pp. 1128–1131 (2019).
- [3] R. Garoby, CERN Yellow Report CERN-2011-007, pp. 431–446 (2011).
- [4] F. Tamura *et al.*, in Proceedings of IPAC 2021, Campinas, pp. 3023–3026 (2021).
- [5] CERN, Beam Longitudinal Dynamics code BLongD, <http://blond.web.cern.ch>
- [6] R. Muto *et al.*, in Proceedings of IPAC 2019, Melbourne, pp. 2311–2314 (2019).
- [7] T. Toyama *et al.*, [arXiv:2208.09217 [physics.acc-ph]].