

J-PARC MR での RF 二倍高調波重畳による取り出し前バンチ操作 BUNCH MANIPULATION BEFORE THE EXTRACTION BY A SECOND HARMONICS SUPERPOSITION AT THE J-PARC MR

杉山泰之*, 田村 文彦、大森千広、吉井正人、
Yasuyuki Sugiyama*, Fumihiko Tamura, Chihiro Ohmori, Masahito Yoshii,
J-PARC Center

Abstract

The J-PARC Main Ring (MR) delivers 2.66×10^{14} protons per pulse, which corresponds to the beam power of 515 kW, to the neutrino experiment as of May 2021. For the neutrino experiment, eight bunches of the proton are extracted by the extraction kicker and septum magnets. In the future neutrino experiment, a water Cherenkov detector is planned to be used as a new near detector. The event pile-up in a bunch due to high neutrino flux can be a source of measurement inefficiency. The beam with lower peak and wider time structure is desired to improve the detection efficiency of the water Cherenkov detector. We propose a longitudinal bunch manipulation at the flattop of the MR by a second harmonics superposition. With a second harmonics superposition, the reduction of peak current by a factor of 4 can be achieved in 20ms at the flattop. We present the longitudinal simulation result and the preliminary beam measurement results.

1. はじめに

J-PARCの主リング(MR)シンクロトロン[1]では30GeVまで加速した陽子をニュートリノおよびハドロンの各実験施設へと供給している。Table 1にニュートリノ実験に対する速い取り出し運転モードにおけるMR及びそのRF加速システムの運転パラメータを示す。速い取り出しにおいては、 2.66×10^{14} pppの陽子を加速して2.48秒繰り返して取り出すことで2021年4月に利用運転での取り出し強度515kWを達成している。J-PARC MRは更なる大強度を目指したアップグレードを進めており、周回陽子数の増加と、加速の繰り返しサイクルの高速化により将来的には1.3MWを目標としている[2,3]。

ニュートリノ実験へのビーム供給においては、MRの9個のRFバケツのうち1バケツは取り出しキッカーの立ち上がりの時間($\sim 1.1 \mu s$)を確保するために空きバケツとし、残りの8個のバケツでビームが加速される。3 GeVで入射した陽子ビームは30 GeVまで加速した後に取り出しキッカーで瞬時に取り出される。ビーム強度515 kWでの利用運転におけるフラットトップでのビームのピーク電流は100 Aを越える。

MRで加速した陽子ビームを用いたニュートリノ実験では遠方検出器として岐阜県にある大型水チェレンコフ検出器“スーパーカミオカンデ”を用いている。将来的なニュートリノ実験のアップグレードとして、現在建設中の更に大型の水チェレンコフ検出器“ハイパーカミオカンデ”を用いる計画(HyperK計画)[4]が進められている。HyperK計画においては、J-PARCにおける前置検出器と遠方検出器としてのハイパーカミオカンデに加えて、中間検出器として水チェレンコフ検出器をJ-PARC近傍に新たに設置することで、ニュートリノ振動測定系の系統誤差の低減を狙っている。

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

parameter	value
circumference	1567.5 m
energy	3–30 GeV
beam intensity	(achieved) 2.66×10^{14} ppp
beam power	(achieved) 515 kW
repetition period	2.48 s
accelerating period	1.4 s
accelerating frequency f_{RF}	1.67–1.72 MHz
revolution frequency f_{rev}	185–191 kHz
harmonic number h_{RF}	9
number of bunches N_b	8
maximum rf voltage	320 kV
No. of cavities	7 (h=9), 2 (h=18)
Q-value of rf cavity	22

水チェレンコフ検出器を中間検出器としてJ-PARC近傍に置く場合に問題となり得るのがイベントパイルアップ事象である。ピーク電流100 Aを越える陽子ビームによって作り出されたニュートリノビームにより、J-PARC近傍の水チェレンコフ検出器ではイベント頻度が瞬時的に高くなり短期間に起こった複数のイベントを弁別するのが困難となることが考えられる。ニュートリノ実験で重要なイベント統計数を集めるためのニュートリノビーム強度を維持しつつ中間水チェレンコフ検出器の感度を悪化させないためには、陽子ビーム強度を保った上で取り出し時点での各バンチのピーク電流を抑えることが必要となる。加速中でのバンチ操作には限界があるため、取り出し直前のバンチ操作を行うことでピーク電流の低減を行う。この際、加速時間に加えてバンチ操作を行うための時間が必要となりビームの加速サイクルが長くなってしまう。バンチ操作による加速サイクルの延長を最低限に抑えるために、バンチ操作に必要な時間はできるだけ短いことが望ましい。

* yasuyuki.sugiyama@kek.jp

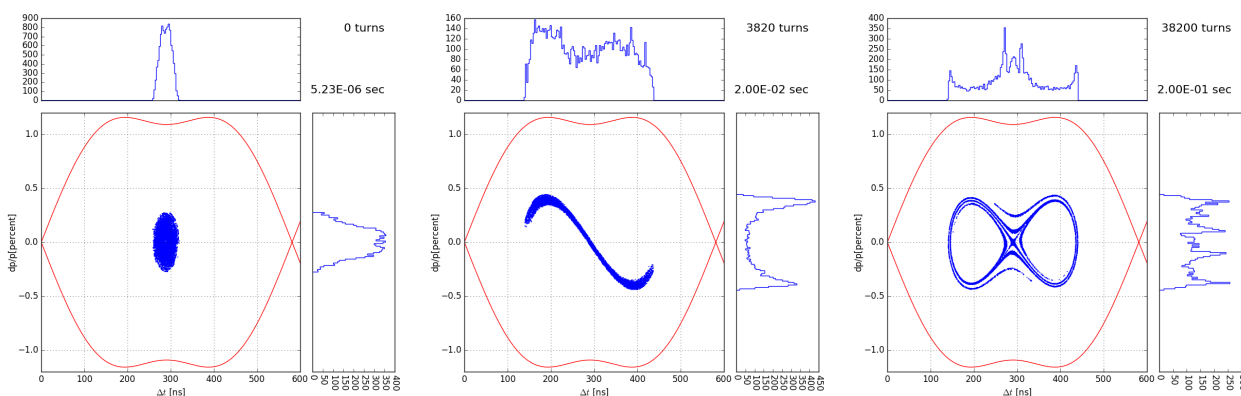


Figure 1: The longitudinal distribution in the case with 100 kV for h=9 and h=18 (Left: At the end of acceleration. Center: Bunch manipulation for 20 ms. Right: Bunch manipulation for 200 ms). The red line represents the separatrix.

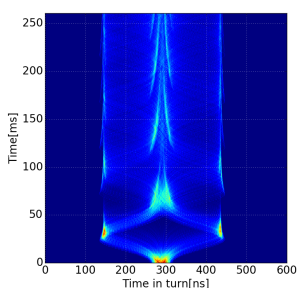


Figure 2: Mountain plot for the simulation in the case with 100 kV for h=9 and h=18.

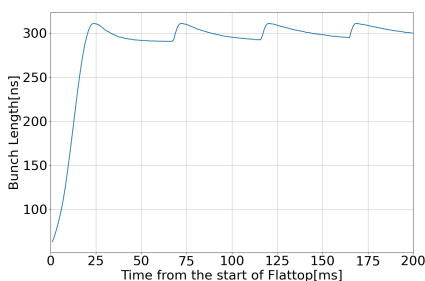


Figure 3: The change in bunch length for the simulation in the case with 100 kV for h=9 and h=18..

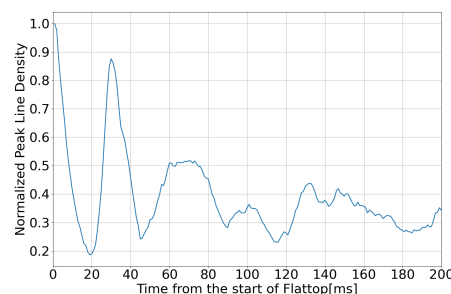


Figure 4: The change in peak line density for the simulation in the case with 100 kV for h=9 and h=18.

2. 二倍高調波重畳によるバンチ操作

MRの現行の運転パラメータでは30 GeV取り出し時点でのシンクロトロン周波数が約30 Hz(加速電圧256 kVの場合)と遅いため、加速RF基本波(h=9)のみでのバンチ操作には時間がかかる。このため、RF二倍高調波の重畳によるバンチ操作の高速化を狙うこととした。二倍高調波の重畳によりバケツ中心部に二つの安定不動点が形成されて横長のバンチを形成することが出来る。そこでピーク電流の低減手法としてRF二倍高調波重畳によるバンチ延伸の検討を行った。

検討のためのビーム縦方向シミュレーションにはCERNによって開発されたBLonD [5]を用いて行った。シミュレーションの初期条件として、MRでの3 GeVから30 GeVまでのビーム加速をBLonDでシミュレーションを行って得られたフラットトップでのビーム分布を用いた。初期分布の作成とバンチ操作のシミュレーションにおいてはインピーダンスによるビーム強度依存効果は除いた。基本波と二倍高調波それぞれの電圧値の組み合わせによるバンチ延伸への効果を比べた。電圧のパターンとしてはRF基本波、二倍高調波ともに一定値に固定した。

図1に基本波と二倍高調波それぞれ100 kVの場合

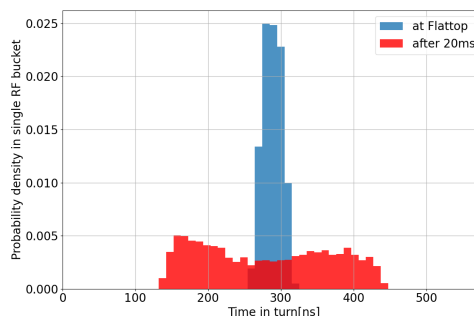


Figure 5: The comparison of the line densities at 0 ms (Blue) and 20 ms (Red) with bunch manipulation.

の位相空間分布の変化を示す。バケツ中心のバンチは等高線に沿って伸びた後に折りたたまれて横長バンチを形成する。図2,3,4に基本波と二倍高調波それぞれ100 kVの場合のマウンテンプロット、およびバンチ長とピーク電流の時間変化を示す。バンチ長は25 msで最大になりピーク電流は20 ms程度で5分の1近くにまで減少するが、それぞれの値はバンチの粒子の等高線に沿った運動に伴って振動を繰り返す。図5に基本波と二倍高調波それぞれ100 kVの場

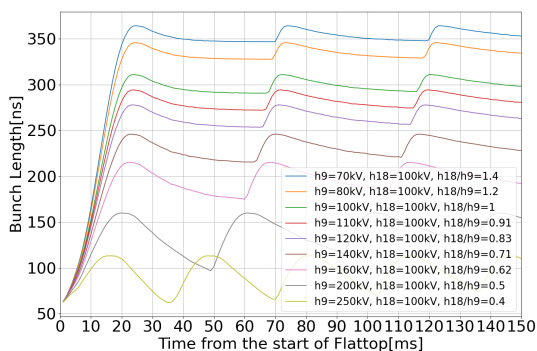


Figure 6: Comparison of the change of bunch length for various voltage ratio of h=9 and h=18.

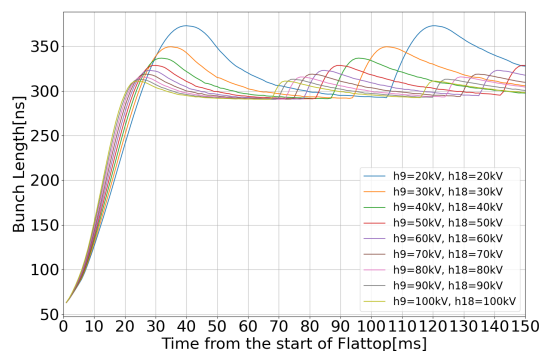


Figure 9: Comparison of the change of bunch length for various RF voltage with the ratio between h=9 and h=18 fixed.

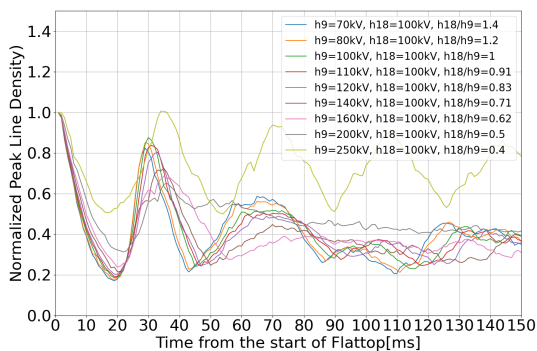


Figure 7: Comparison of the change of peak line density for various voltage ratio of h=9 and h=18.

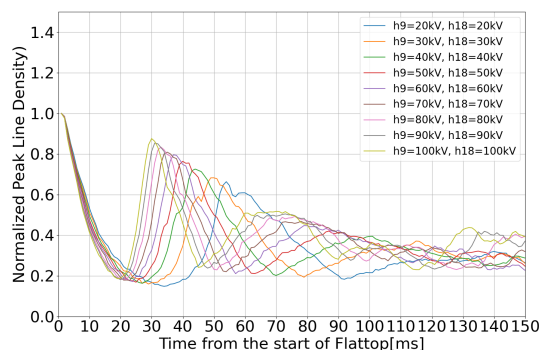


Figure 10: Comparison of the change of peak line density for various RF voltage with the ratio between h=9 and h=18 fixed.

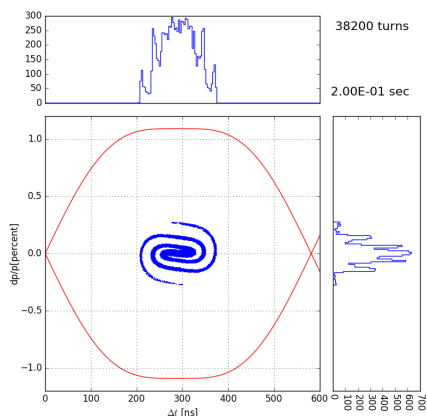


Figure 8: The longitudinal distribution at 200ms in the case with 100kV for h=9 and 50 kV for h=18. The red line represents the separatrix.

合のフラットトップ直後と 20 ms 後の線密度分布の比較を示す。

バンチの延伸は RF バケツの等高線に沿って行われるため、RF 基本波と二倍高調波の割合によって RF バケツ形状の変化と共に延伸後のバンチの形状も変化する。RF 基本波と二倍高調波の電圧を変化させてシミュレーションを行い、電圧比の変化に応

じたバンチ長や線密度の変化を調べた。図 6 にそれぞれの電圧比でのバンチ長の時間変化を示す。二倍高調波の割合が高くなるほどバンチ長が長くなるのが分かる。また、バンチ長が最初に最長となるのは二倍高調波の割合が増えるに従って遅れていくが最終的に 25 ms 程度に収束することが分かる。図 7 にそれぞれの電圧比での線密度のピーク値の変化を示す。ピーク線密度が二倍高調波の割合に寄らず 20 ms 程度で最小値となることがわかる。また、ピーク線密度の低減は二倍高調波の割合を増やしていくと顕著になるが、割合が 0.6 を越えると操作前の 5 分の 1 程度以上下がらなくなる。これは図 8 に示すように、二倍高調波の割合が 0.5 以下では RF バケツ中心は不安定不動点では無く横長バンチになっているが、割合が 0.6 以上では二倍高調波が優勢となって RF バケツ中心が不安定不動点となり等高線に沿ってメガネ型のバンチが形成されるため、両端で回り込む成分がピークを作るからであると考えられる。

次に、二倍高調波の割合を固定した状態で基本波と二倍高調波の電圧を変化させてバンチ長や線密度の変化を調べた。図 9, 10 にそれぞれの電圧でのバンチ長とピーク線密度の時間変化を示す。電圧が増えて RF バケツが大きくなるに従ってバンチ長やピー

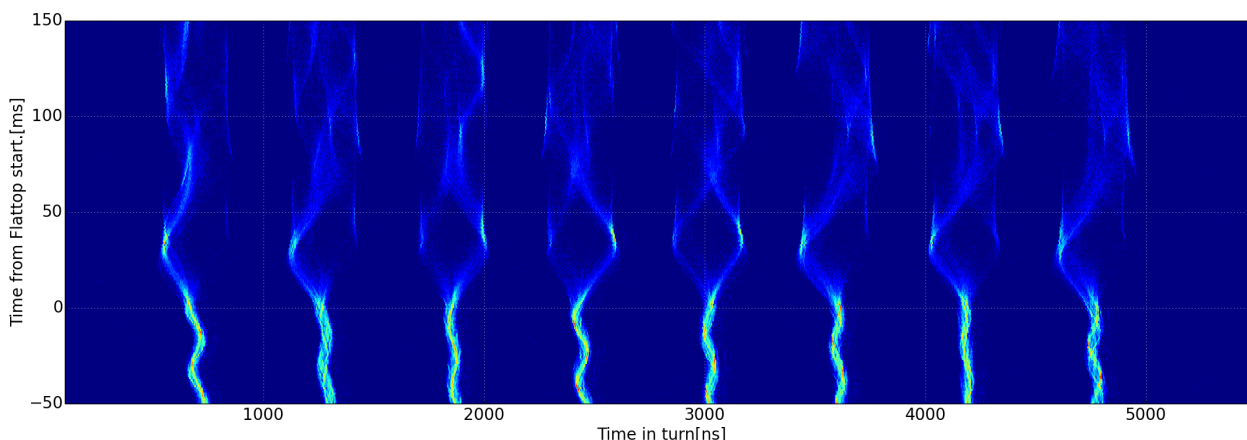


Figure 11: The mountain range plot for recorded beam signal of 24 kW beam with bunch extension.

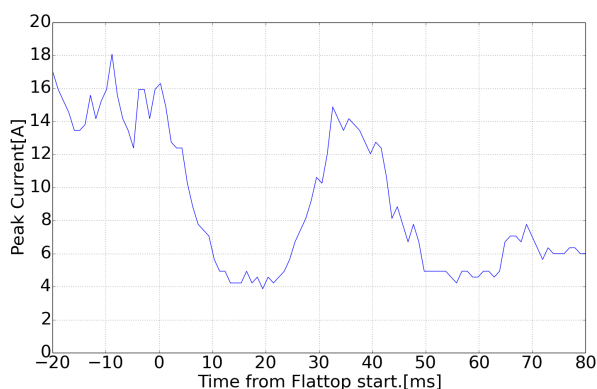


Figure 12: The change of peak current of the beam with beam extension.

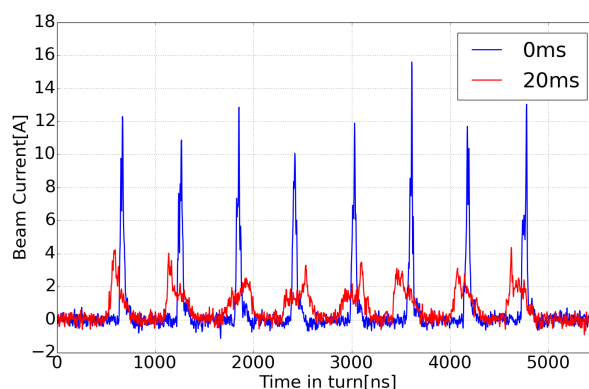


Figure 13: The waveform of the beam signal. (Blue: before bunch manipulation. Red: 20 ms with bunch manipulation)

ク線密度の変化の周期が速くなっていることが分かる。

3. バンチ延伸のビーム試験

シミュレーションで検討を行ったバンチ延伸が実際の MR ビームで行えることをビーム試験において確認を行った。ニュートリノ実験向けの取り出しキッカーを用いた速い取り出しの運転サイクルでは加速終了後のフラットトップの時間が極めて短くバンチ操作を試験する余地はない。そのため、ビーム試験はハドロン実験へのビーム取り出しサイクルに準じる周期 5.20 s の遅い取り出しサイクルで行った。遅い取り出しサイクルでは、加速にかかるフラットトップまでの時間はほぼ同じであるがフラットトップの時間が 2.5 s 程度あり、バンチ操作の試験を大きなターン数で行うことができる。

ビーム試験においては、基本波と二倍高調波の電圧はそれぞれ 50 kV とした。二倍高調波の位相は電圧波形をオシロスコープで確認して調節した上で、最終的にビームを用いてバンチ延伸が最も安定する位相を選んだ。バンチ操作への影響を抑えるためにビームに対する空洞位相のフィードバックはフラッ

トトップ以降の操作時間は無効としている。

図 11 に 8 バンチで合計陽子数 2.52×10^{13} 個 (23 kW 相当) のビームに対してバンチ延伸を行った際のマウンテンプロットを示す。ほぼ 8 つのバンチすべてでバンチ長の延伸とピーク電流の低減が出来ることから分かる。図 12 に 8 バンチ全体でのピーク電流値の時間変化を示す。およそ 20 ms 程度でピーク強度が 1/4 程度に抑えられていることが分かる。図 13 にバンチ延伸前後でのバンチ波形の比較を示す。図 11 をシミュレーションのマウンテンプロット (図 2) と比較すると、各バンチのバンチ操作中の電荷分布がビーム試験では非対称になっていることが分かる。これは、バンチ操作を開始した際にバンチがバケツの中心からズレているために左右のそれぞれの安定不動点の周りを運動する粒子の数が均等でなくなったためと考えられる。バンチ毎に偏りの方向が違うことから、バンチ操作開始時にバンチ結合振動のモードの影響で各バンチの位相がバラバラになっていたり、ウェイク電圧による影響でバケツが変形して左右非対称になっていた可能性があると考えられる。この傾向はビーム強度を増やすとより顕著となる。図 14 は 8 バンチで合計陽子数 4.63×10^{13} 個

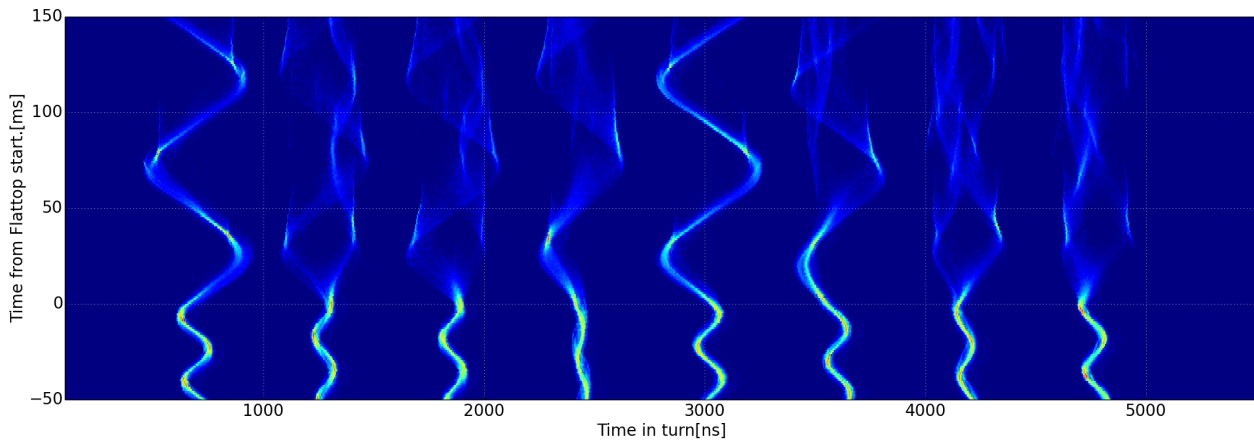


Figure 14: The mountain range plot for recorded beam signal of 42 kW beam with bunch extension.

(42 kW 相当) のビームに対してバンチ延伸を行った際のマウンテンプロットである。バンチ毎の左右の偏りがより極端になり、幾つかのバンチではバンチ延伸とは異なる長い周期の二極振動になっていることが分かる。これは、バンチを構成する大部分の粒子がバケツ中心部の安定不動点から離れてしまい、その外側の大きな等高線に沿って運動しているからであると考えられる。

RF 加速空洞に生じるウェイク電圧によるビームローディングに関しては、基本波空洞の加速基本波 ($h=9$) は RF フィードフォワード法を用い、その周辺ハーモニクス ($h=8,10$) には空洞電圧フィードバックを用いて補償している。二倍高調波空洞の二倍高調波とその周辺ハーモニクスについては、RF フィードフォワード法を用いて補償している。RF フィードフォワード法に関してはバンチ延伸に最適化されていないために補償しきれないウェイク電圧がバンチ延伸に影響を与えた可能性がある。特に、バンチ毎に揺れの位相が異なることから、RF 基本波や二倍高調波ではなくその近傍のハーモニクスの補償しきれないウェイク電圧の寄与が大きいと考えられる。

4. 今後の展望と課題

比較的低強度のビームに対してのバンチ延伸が可能であることは確認できたが、ビーム強度が増すにつれてウェイク電圧の影響でバンチが不安定になってしまうため、ニュートリノ実験向けの大強度ビームに対するバンチ操作にはウェイク電圧への対処が必要である。これらのウェイク電圧に関しては、MR の RF 高周波制御システムのアップデートにより RF 基本波や二倍高調波と近傍ハーモニクスの空洞電圧フィードバックを実現して対策を行う予定である。

また、取り出しキッカーによる速いビーム取り出しを行う際には、キッカー電磁石の立ち上がり時間内にビームがキッカー電磁石に来ないようにする必要がある。バンチ操作によってバンチ長が伸びると最後尾のバンチから次のターンの先頭バンチまでの距離が短くなってしまふ。このため、バンチ操作で

延長可能なバンチ長はキッカー電磁石の立ち上がり時間で制限される。バンチ延伸によるピーク電流の低減を活用出来るように取り出しキッカーに追加する補正キッカーの開発などが現在検討されている。

5. まとめ

ニュートリノ実験向けの速い取り出しでの取り出しビームのピーク電流の低減の手法として RF 二倍高調波重畳によるバンチ延伸を検討した。シミュレーションの結果、バンチ延伸を行うことで 20 ms 程度の短時間でピーク電流が 1/5 程度まで抑えられることが分かった。シミュレーションでの検討を元にビーム試験を行い、実ビームでのバンチ延伸とそれによるピーク電流の低減が可能であることを確認した。通常の加速時間に加えてバンチ操作のために時間が必要となり加速サイクルが長くなるが、20 ms の追加によるビーム強度低下は 2% 以下に抑えられる。ニュートリノ実験向けの大強度ビームで実際に用いるには、RF 高周波システムのアップデートによる空洞ウェイク電圧の低減と取り出しキッカー電磁石の高速化が必要であり、現在開発や検討を進めている。

参考文献

- [1] T. Koseki *et al.*, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2012 (2012) 2B004.
- [2] S. Igarashi *et al.*, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2021 (2021) 33.
- [3] J-PARC MR Group, preprint KEK Report 2021-2 (2021).
- [4] K. Abe *et al.*, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2015 (2015) 53C02.
- [5] CERN, CERN Beam Longitudinal Dynamics code BLonD.