

J-PARC MR 遅い取り出しにおける運動量ロスとその対策

MOMENTUM LOSS DURING SLOW EXTRACTION IN THE J-PARC MR AND ITS COUNTERMEASURES

田村文彦 ^{*A)}、山本昌亘 ^{A)}、大森千広 ^{A)}、吉井正人 ^{A)}、アレクサンダーシュナーゼ ^{B)}、野村昌弘 ^{A)}、富澤正人 ^{A)}
 Fumihiko Tamura ^{*A)}, Masanobu Yamamoto ^{A)}, Chihiro Ohmori ^{A)}, Masahito Yoshii ^{A)},
 Alexander Schnase ^{B)}, Masahiro Nomura ^{A)}, Masahito Tomizawa ^{A)}
^{A)} J-PARC Center, KEK & JAEA, ^{B)} GSI

Abstract

For the slow extraction in the J-PARC MR, the rf voltage in the cavities is turned off after finishing the acceleration to obtain a coasting beam. During the debunching process, the average momentum decreases due to the longitudinal coupling impedances in the MR. The deceleration continues until a well debunched beam is formed. The deceleration causes a reduction of the extraction efficiency due to the chromatic effects. In the J-PARC MR, a momentum loss has been observed at a relatively low beam power. To achieve higher beam power with keeping the high extraction efficiency, measures against the momentum loss are necessary. In this article, we report the observations and simulation results of the momentum losses. We adopt the rf feedforward method to cancel the wake voltage in the cavity as a measure of the momentum loss. By the feedforward, the momentum loss is significantly reduced. We achieve a high extraction efficiency, 99.5%, at the beam power of 24 kW.

1. はじめに

J-PARC メインリング (MR)^[1] において 30 GeV に加速された陽子ビームは、3 次共鳴を利用した遅い取り出し^[2]により、ハドロン実験施設へ供給される。現在までに、ビームパワー 24 kW (3.0×10^{13} ppp、6 秒サイクル)でのユーザー運転を達成している。遅い取り出しでの MR および rf パラメータを、Table 1 に示した。遅い取り出しにおいては、スプイル性能 (duty factor^[3] およびスプイル長) とともに、取り出し効率の向上が重要である。遅い取り出し過程で生じるビームロスによって引き起される遅い取り出し機器の放射化と損傷をできる限り抑えるために、取り出し効率を向上と高い取り出し効率を維持することが、遅い取り出しビームの大強度化に向け最も重要な課題である。

J-PARC MR では、デバンチしたビームをハドロン実験施設に供給している。デバンチは、30 GeV までの加速をした直後、フラットトップ開始 (P3 タイミングと呼ばれる) から加速空洞の電圧をオフにすることで実現される。P3+300 ms から約 2 秒かけて、ビームはハドロン実験施設に取り出される。ビーム強度が上がるにつれ、インピーダンスによるウェーク電圧の効果が無視できなくなり、十分なデバンチ状態になるまでの過程の数百 ms の間、ビームは運動量を失い減速され、また、運動量の広がり増加を招く。

運動量ロスおよび運動量の広がりにより、取り出し効率の悪化が生じる。MR のクロマティシティは、2 ファミリーの補正六極磁石を用いゼロになるように補正しているが、運動量のずれが大きい領域では、高次の効果により運動量広がりに対し有限のチューンの広がりを生じる。このチューンの広がりによって、取り出しのセパトリティクスが運動量に依存し、取り出しの角度が広がることとなり、静電セプトタムのリボンへのヒット率を増加させ、ビームロスを生じることが、取り出し効率の悪化の主な原因であると考えられている。

Table 1: Parameters of the J-PARC MR slow extraction and the rf system

circumference	1567.5 m
energy	3–30 GeV
γt	31.6i
beam intensity	(achieved) 2.95×10^{13} ppp
beam power	(achieved) 24 kW
repetition period	6.00 s
accelerating period	1.9 s
flat top	2.93 s
spill length	2.0 s
accelerating frequency	1.67–1.72 MHz
harmonic number	9
number of bunches	8
maximum rf voltage	256 kV
No. of cavities	8
Acc. gaps in a cavity	3
cavity resonant frequency	1.72 MHz
shunt impedance per gap	1100 Ω
Q-value of rf cavity	22

J-PARC では、6 kW という比較的低いビームパワーから、1% 程度の有意な運動量ロスを観測している。MR における主なインピーダンス源は 8 台の加速空洞である。本稿では、運動量ロスの実際について、またその対策について報告する。

2. デバンチ過程の運動量ロス

デバンチ過程における運動量ロスの様子を検証するために、ビーム強度 6 kW (7×10^{12} ppp) における RCS の入射から MR での P3+500 ms までの縦方向のトラッキ

* fumihiko.tamura@j-parc.jp

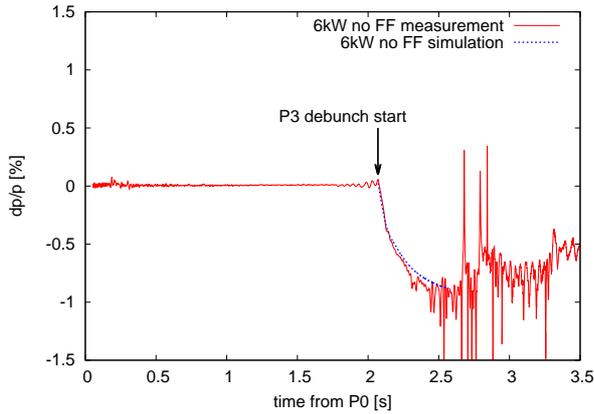


Figure 1: A comparison of the momentum deviations of the simulation and measurement.

ングシミュレーションを行った。シミュレーションに用いたマクロ粒子数はバンチあたり 4700 個である。RCS の入射条件は、linac からの入射ピーク電流は 15 mA、マクロパルスは 100 μ s、チョップ幅は 280 ns である。計算時間の短縮のために、スペースチャージの効果は無視し、また、MR 空胴の帯域に入る $h = 8, 9, 10$ のビームローディングの効果は、P3 タイミング以降のみ考慮して、シミュレーションを行った。

シミュレーションおよび実際の 6 kW ビームの平均運動量ずれ dp/p の比較を Fig. 1 に示す。実際のビームの dp/p は、全周のビーム位置モニタ (BPM) 信号とディスパージョンから求めたものである。BPM 信号はデバンチが進むにつれて、検出に用いる周波数成分が減少するために S/N 比が悪化する。MR サイクル開始 (P0) から 2.07 秒後がフラットトップ開始 (P3) であり、ここから rf 電圧はオフとなりデバンチが開始される。 dp/p のシミュレーション結果は P3 から 500 ms の間をプロットした。P3 から 300 ms 後より、遅い取り出しが開始される。

シミュレーションおよび実測のデバンチ過程での運動量ロスの挙動はよく一致し、また P3+500 ms での運動量ロスは 1% 近くに達していることがわかる。MR における主な縦方向インピーダンス源は加速空胴である。現状では、Table 1 に記載した通り、シャントインピーダンス 1100 Ω の加速ギャップを 3 つ持つ空胴が 8 台インストールされている。縦方向のシミュレーションではその他の resistive wall やキッカー電磁石のインピーダンスは考慮していないが、シミュレーションと実測がよく一致することから、加速空胴以外のインピーダンスの運動量ロスへの寄与は小さいことがわかる。

同じビーム条件で、空胴でのビームローディングのうち主要なハーモニクス、 $h = 8, 9, 10$ について完全に補償されている場合についても、デバンチ過程のシミュレーションを行った。ビームローディングが補償されてウェーク電圧がキャンセルされている場合には、ビームは運動量を失わない。

ビームローディングが補償されている場合および補償されない場合のビームの位相空間分布の変化を P3 から P3+500 ms まで 100 ms ごとにプロットしたものを、Fig. 2 に示す。デバンチ開始前では、バンチ長は全幅

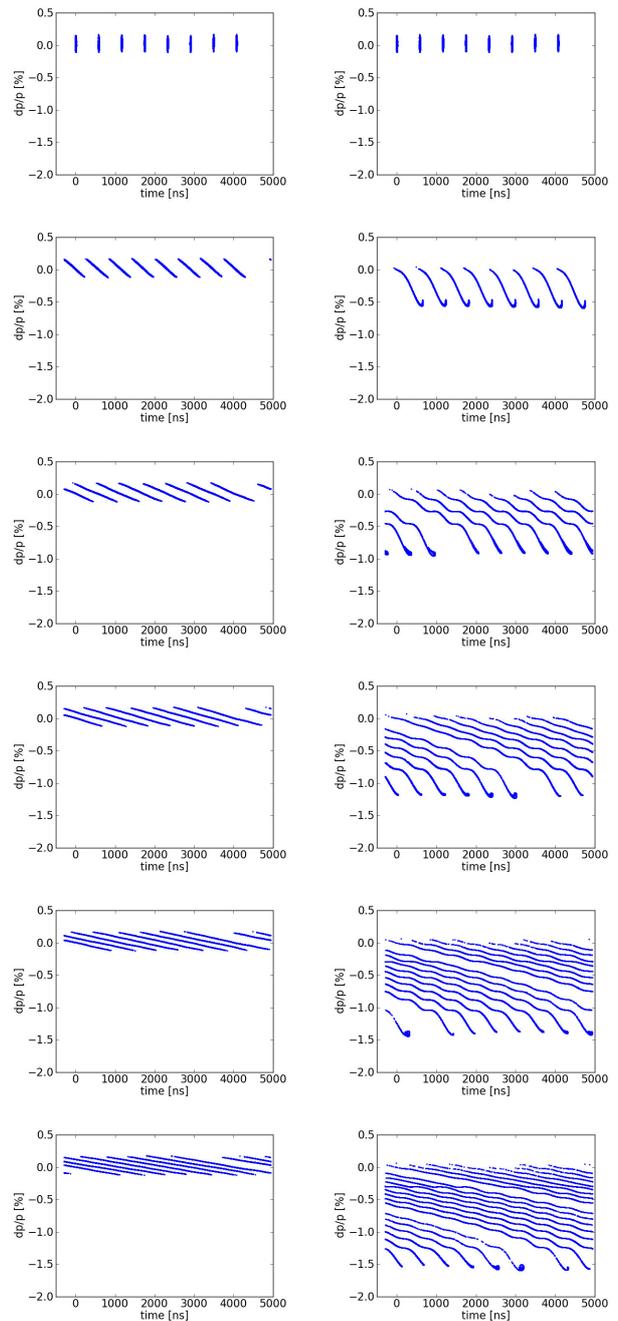


Figure 2: Phase space plots during the debunching process, (left) with beam loading compensation and (right) without compensation. (From top to bottom) P3+0 ms, P3+100 ms, P3+200 ms, P3+300 ms, P3+400 ms, and P3+500 ms.

で 40 ns、運動量の広がりには全幅で $\pm 0.12\%$ である。rf 電圧がオフになった後、運動量の広がりによる周回周波数の広がりにより、ビームはデバンチしていく。MR は imaginary γ_t ラティスを採用しているため、トランジションがなく安定な加速ができる一方で、フラットトップではスリッページが -0.002 と小さくなるために、デバンチには比較的時間がかかる。ビームローディングが補償されている場合 (左) では、デバンチは P3 での運動量広がりによる周回周波数の違いのみを原因として

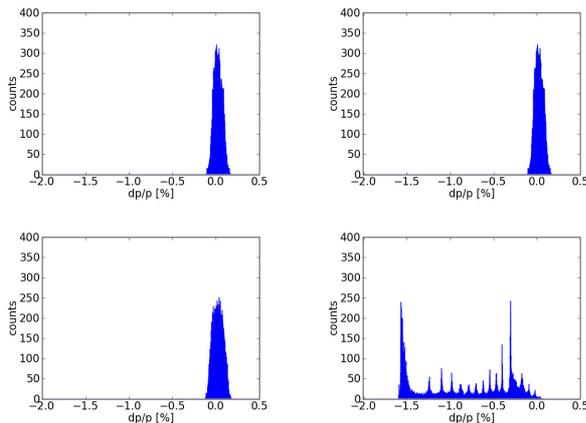


Figure 3: Momentum distribution before and after the debunching process, (left) with beam loading compensation and (right) without compensation. (Top) P3+0 ms and (bottom) P3+500 ms.

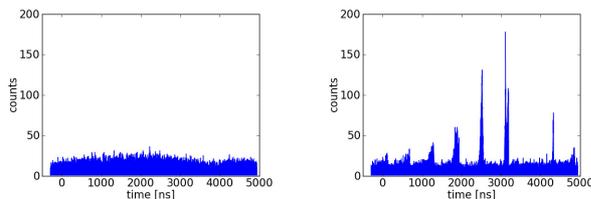


Figure 4: Longitudinal distribution after the debunching process at P3+500 ms, (left) with beam loading compensation and (right) without compensation.

均等に進むため、各バンチは一樣にデバンチしていく。ビームローディングが補償されない場合(右)では、デバンチは均一な運動でなく、平均の運動量の減少とともに運動量広がりが増加していくことがわかる。これは、加速ギャップに生じるウェーク電圧により、一部の粒子が加速または減速されることによると考えられる。

デバンチ開始時 (P3) およびデバンチ後 (P3+500 ms) での運動量広がり比較を Fig. 3 に示した。ビームローディングが補償されない場合(右)では、 -1.5% から 0% にわたる大きな運動量広がりを持つことがわかる。この場合、クロマティシティの効果でチューンの広がりを生じるために、取り出し効率の悪化を招いてしまう。ビームローディングが補償されている場合(左)では、運動量広がりが増加しない。わずかに分布が変化しているのは、シミュレーション中で補償されている ($h = 8, 9, 10$) 成分以外のインピーダンスによるものであると考えられる。

空腔に発生するウェーク電圧は、デバンチそのものにも影響を及ぼす。P3+500 ms でのビームの時間方向の分布をプロットしたものを Fig. 4 に示した。ビームローディングが補償されている場合(左)ではきれいにデバンチが進んでいるのに対し、補償されない場合(右)では、全体的にはデバンチしているものの、一部にバンチ的な構造がまだ残っている。周回の中で分布に大きな違いがあるのは、加速周波数に隣接するハーモニクス ($h = 8, 10$) のインピーダンスによる、periodic transient

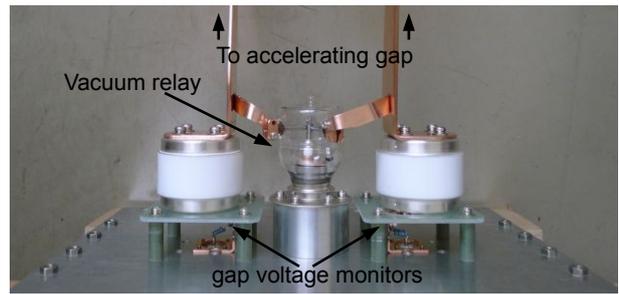


Figure 5: The gap short relay and voltage monitors of the MR cavity.

の効果であろう。

以上、6 kW のビームパワーでも、空腔に生じるウェーク電圧により、デバンチ過程に運動量ロスを生じること、大きな運動量広がりを生じること、デバンチに長い時間を要することがシミュレーションにより確認された。より大強度のビームの遅い取り出しを高い取り出し効率で行うためには、ビームから見える空腔のインピーダンスを下げ、空腔に生じるウェーク電圧を減少させる必要があることがわかる。

3. 運動量ロスの対策

デバンチ過程の運動量ロスの対策としては、前節に示したようにビームから見る空腔インピーダンスを下げるが必要であり、以下の手法が考えられる。

3.1 ギャップショート

デバンチの際にギャップをショートすることで、ビームの見るインピーダンスを下げるができる。

MR の各空腔の中央の加速ギャップには、Fig. 5 の写真に示したように、ギャップ電圧モニターとともにギャップショートのための真空リレーがインストールされている。真空リレーは、Kilovac H-17 を使用している。空腔の動作周波数帯域での動作耐圧仕様は 20 kV であり、また最大許容電流は 16 A である。加速電圧発生のために、真空管アンプからは数十 A 以上の電流が空腔に供給されていることから、もし電圧発生中にリレーを閉じることがあればリレーの焼損が発生する。機械的な動作であるため、リレーをショートするのに必要な時間は最大 25 ms と比較的長い。リレーの焼損を避けるために、リレーを閉じる動作ゲートは、電圧がオフとなる P3 タイミング直後から発生させている。リレーが実際に閉じるまでの P3 から 25 ms 程度の期間は、空腔のインピーダンスは高いままであり、運動量ロスの抑制効果はない。

3.2 rf フィードフォワードによるビームローディング補償

MR では、大強度ビームの安定な加速を行うために、rf フィードフォワード法によるマルチハーモニックビームローディング補償システムを開発、運用している^[4]。rf フィードフォワード法の概念を Fig. 6 に示す。ビーム電流 (i_{beam}) をウォールカレントモニターで検出し、空腔電圧発生のためのドライブ電流に加えて、フィードフォワードシステムが $-i_{\text{beam}}$ なる電流を空腔に供給す

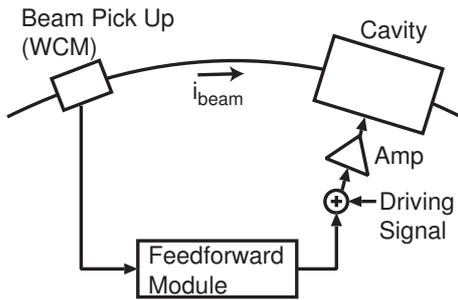


Figure 6: A conceptual diagram of the rf feedforward method.

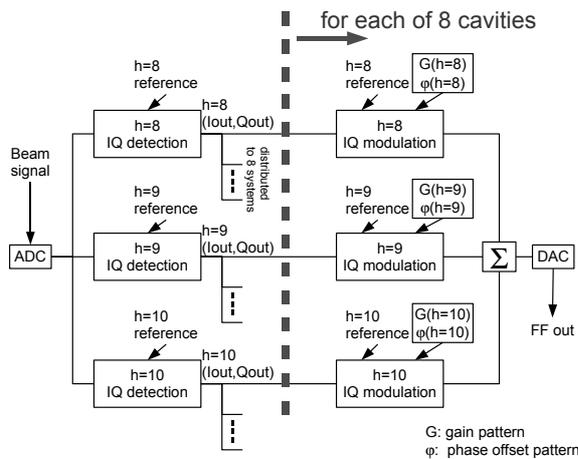


Figure 7: Block diagram of the multiharmonic rf feedforward system for the MR.

ることで、ウェーク電圧をキャンセルする、というのが動作原理である。ウェーク電圧が複数のハーモニクスを含むため、MRでは空胴帯域に入る主要な ($h = 8, 9, 10$) のハーモニクスのビームローディングをフィードフォワードにより補償している。MRのフィードフォワードシステムのブロック図を Fig. 7 に示した。MRのフィードフォワードシステムは、対象とするハーモニクスの選択以外は RCS^[5] と同様の構成を持つ。フィードフォワードは、WCMで検出されたビーム信号から、IQデモジュレーションおよびモジュレーションにより、フィードフォワード補償信号を生成するものである。フィードフォワードシステムは本質的にトラッキングバンドパスフィルターとして動作する。フィルターのパスバンド ($h = 8, 9, 10$) は加速周波数スイープに追従し、また、各ハーモニクスのゲインおよび位相は、プログラムされたパターンに従う。

速い取り出しの高いビームパワー、200 kW 以上 (1.0×10^{14} ppp 以上) での運転においては、安定な加速のためにはビーム入射時から加速終了までの期間でビームローディング補償が必須であるが、現状の遅い取り出しの強度では、ビームローディング補償をしなくても加速自体には問題はない。一方、デバンチ過程でのビームの見るインピーダンスを下げるためにはフィードフォワードが有効である。

フィードフォワードは開ループであるために、ビーム条件ごとに、アンプの動作、ゲインの変動により、最

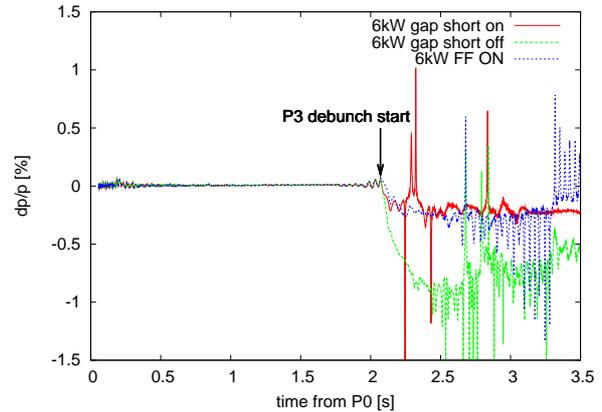


Figure 8: A Comparison of the momentum deviation during the debunching process, without feedforward and gap short, with feedforward, and with gap short.

適なパターンは異なる。従って、速い取り出しの大強度ビームで調整したフィードフォワードパターンは、遅い取り出しのデバンチ過程では必ずしも最適条件とはいえない。しかしながら、本格的なフィードフォワードの調整には、1台あたり2時間程度かかり、遅い取り出し用に8台全ての空胴を調整するための時間は、これまで取れていない。このため、最も重要な加速ハーモニック ($h = 9$) について、検波電圧を見ながら簡易的な調整を行い、隣接ハーモニクス ($h = 8, 10$) については、速い取り出しの調整で得られたパターンを適用している。

3.3 ビーム運動量ロス抑制結果

Fig. 8 に、運動量ロスの対策をしない場合、デバンチ中にギャップショートを開じた場合、フィードフォワードを適用した場合の 6 kW ビーム (7×10^{12} ppp) での平均運動量ずれの比較を示した。対策をしない場合、デバンチ過程で平均運動量ロスは約 1% である。この場合、取り出し効率は約 97% と悪い。

前述のように、ギャップショートルレーの動作ゲートは P3 直後に出力されるが、実際にリレーが閉じるまでには 25 ms かかるため、その期間は無視できない運動量ロスが生じる。閉じた後は運動量ロスがほぼなくなるため、全体として約 0.2% のロスとなっている。フィードフォワードは簡易調整ながら、対策のない場合と比較して大幅にウェーク電圧を減少させることができ、運動量ロスはギャップショートと同程度、約 0.2% に留まっている。

ギャップショートおよびフィードフォワードの場合のどちらも、高い取り出し効率、99.5% を実現した。ギャップショートは誤動作によりリレーの焼損の危険があること、また、寿命の問題があることから、これらのリスクのないフィードフォワードを運動量ロス対策として通常のユーザー運転に採用している。

4. 大強度ビームの遅い取り出しに向けて

近い将来の 50 kW 以上という大強度ビームの遅い取り出しを高い取り出し効率で行うためには、簡易調整のフィードフォワードパターンでは運動量ロスを十分に

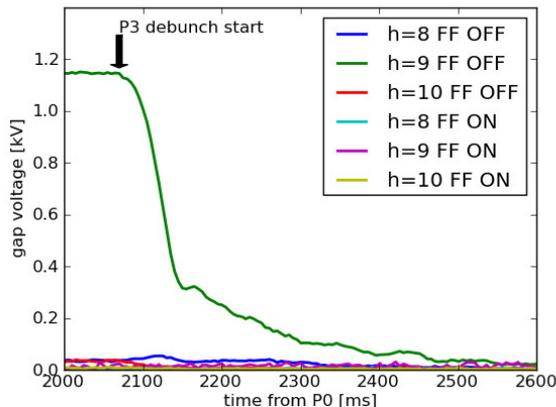


Figure 9: A comparison of the harmonic components of cavity #1 gap voltage without and with feedforward.

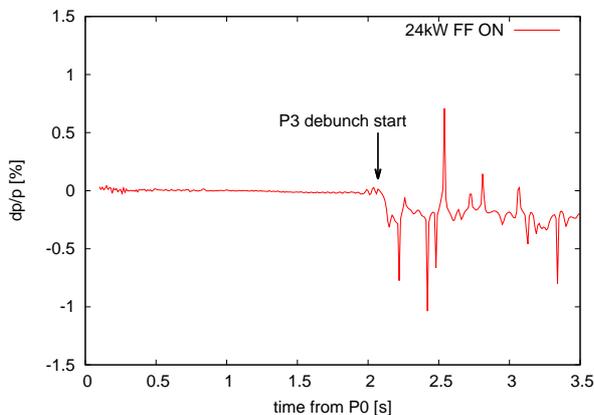


Figure 10: Momentum deviation during the debunching process with feedforward at the beam power of 23.8 kW.

抑制できないことが考えられる。このため、空胴 1 号機のみではあるが、フィードフォワードパターンを文献^[4]に記述した調整手法をにより 15 kW ビームを用いて調整を行い、効果を確認した。調整は、1 号機の電圧をオフに行なった。この強度では、他の空胴の電圧で問題なく加速することができる。この場合、空胴電圧はウェーク電圧とフィードフォワード電圧の重畳であり、対象とするハーモニック (h) について、

$$V_{\text{cav}}(h, t) = V_{\text{cav, wake}}(h, t) + V_{\text{cav, FF}}(h, t) \\ = Z'_{\text{cav}}(h, t) \cdot I_{\text{beam}}(h, t) + Z_{\text{FF}}(h, t) \cdot I_{\text{beam}}(h, t) \quad (1)$$

の関係がある。ここに、 t は時間、 $Z_{\text{FF}}(h, t)$ はビーム電流からフィードフォワード成分への伝達関数である。フィードフォワード ON で測定されたハーモニック成分 ($V_{\text{cav}}(h, t)$, $V_{\text{dr}}(h, t)$, $I_{\text{beam}}(h, t)$)、またフィードフォワード OFF でビームを加速して求めたインピーダンス ($Z'_{\text{cav}}(h, t)$) から、 $Z_{\text{FF}}(h, t)$ を求め、 $Z_{\text{FF}}(h, t) = -Z'_{\text{cav}}(h, t)$ となるように、フィードフォワードパターンの調整を行う。

Fig. 9 に、フィードフォワード OFF の場合および上記調整を行ったあとのフィードフォワードを適用した場

合の、デバンチ過程での空胴ギャップ電圧のハーモニック成分をプロットした。フィードフォワード OFF の場合だと、加速ハーモニック ($h = 9$) 成分は P3 時点で 1.15 kV である。隣接ハーモニック ($h = 8, 10$) については、100 V 以下とあまり高くない。フィードフォワード ON の場合、全てのハーモニック成分についてウェーク電圧は 30 V 以下に抑制することができた。簡易調整の場合、ウェーク電圧の抑制は数分の一程度である。この結果から、今後の大強度ビーム加速においては、時間をかけ全空胴について調整を行うことで、運動量ロスをさらに抑制できる可能性が示唆される。1 号機については、通常のコピー運転においてもこの調整済みパターンで運転している。

現在まで、ビームパワー 24 kW でのユーザー運転を行っているが、Fig. 10 に示したように、運動量のロスは約 0.2% に留まっており、99.5% の高い取り出し効率を維持している。

5. まとめと今後

以下に、まとめを示す。

- J-PARC MR の遅い取り出しにおけるデバンチ過程では、ビーム強度に応じ、空胴のインピーダンスによりウェーク電圧が発生し、有意な運動量ロスが発生する。この時、有限のクロマチシティの効果により、取り出し効率が悪化する。
- デバンチ過程の縦方向シミュレーションにより、実際のビームの運動量ロスを再現できた。また、ウェーク電圧により、運動量を失うのみならず、運動量広がり的大幅な増加を生じることがわかった。
- 運動量ロスの対策として、デバンチ過程でのギャップショートおよびフィードフォワードによるビームローディング補償を 6 kW ビームを用い試験した結果、いずれの場合も大幅に運動量ロスを低減することに成功し、高い取り出し効率 99.5% を達成した。通常の運転には、リスクの少ないフィードフォワードを採用している。
- 24 kW の大強度ビームにおいても、フィードフォワードにより運動量ロスは 0.2% に留まり、99.5% の取り出し効率を維持している。

今後、50 kW 以上の大強度ビームの遅い取り出しに向けては、高い取り出し効率を維持するために、全空胴についてフィードフォワードの本格的な調整を行う必要があると考えている。

参考文献

- [1] T. Koseki et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2012) 02B004.
- [2] M. Tomizawa, et al., in proceedings of PASJ 2012, pp. 80 (2012).
- [3] T. Kimura, et al., in Proceedings of PASJ 2010, pp. 1076 (2010).
- [4] F. Tamura, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, 16, 051002 (2013).
- [5] F. Tamura, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, 14, 051004 (2011).