

J-PARC RCS 次世代 LLRF 制御システムの性能 PERFORMANCE OF THE NEXT-GENERATION LLRF CONTROL SYSTEM FOR THE J-PARC RCS

田村文彦*, 杉山泰之, 吉井正人, 山本昌亘, 沖田英史, 大森千広,
野村昌弘, 島田太平, 長谷川豪志, 原圭吾, 古澤将司

Fumihiko Tamura*, Yasuyuki Sugiyama, Masahito Yoshii, Masanobu Yamamoto, Hidefumi Okita,
Chihiro Ohmori, Masahiro Nomura, Taihei Shimada, Katsushi Hasegawa, Keigo Hara, Masashi Furusawa
J-PARC Center, JAEA & KEK

Abstract

A stable and precise LLRF (Low Level RF) control system is indispensable for acceleration of high intensity proton beam in the J-PARC RCS. The original LLRF control system had been operated without major problems for more than ten years since the start of operation of the RCS, while maintenance of the system became difficult due to the obsolescence of the old FPGAs in the modules. We developed and installed the next-generation LLRF control system based on MTCA.4. The key function of the system is the multiharmonic vector rf voltage control feedback. We describe the system overview and the commissioning results. The performance of the beam loading compensation is significantly improved.

1. はじめに

J-PARC 3 GeV シンクロトロン (RCS) は 8.33×10^{13} ppp (protons per pulse)、1 MW のビーム出力パワーを目指す大強度陽子シンクロトロンである。RCS および RF システムの主なパラメータを Table 1 に示す。RCS で必要な高い加速電圧は 12 台の金属磁性体 (MA) 空胴により発生される。MA 空胴の周波数特性は広帯域 ($Q \sim 2$) であり、陽子ビームの速度変化に対応する 1.23 MHz から 1.67 MHz までの幅広い加速周波数 ($h = 2$) 変化のみならず、2 倍高調波もカバーしている。単一の空胴に加速高周波と 2 倍高調波を同時に発生させるデュアルハーモニック運転による陽子バンチ形状の操作は、大強度ビームの空間電荷効果を低減しビームロスの少ない安定な加速を行うために不可欠なものである。

大強度陽子シンクロトロンにおける重要な課題の一つは、空胴に発生するウェーク電圧によるビームローディングである。特に、RCS では広帯域の MA 空胴が採用されているため、ウェーク電圧は加速周波数だけでなく高調波成分を多く含み、RF バケツ形状もウェーク電圧によって歪められてしまう。このため、RCS ではマルチハーモニックビームローディング補償が必要である。

LLRF (Low Level RF) 制御システムは空胴電圧制御やビームローディング補償、その他重要な機能を司るものであり、大強度ビームの安定な加速の鍵となるものである。RCS 初期 LLRF 制御システムは J-PARC の建設期に設計、製作され、2007 年の RCS ビーム調整開始時から 10 年以上にわたり安定に運用されてきたが、使用している FPGA の陳腐化により長期の維持が困難となったため、2016 年より次世代 LLRF 制御システムの開発に着手した。2019 年に初期システムの次世代 LLRF 制御システムへの置き換えを行い、運用を開始した。本稿では次世代 LLRF 制御システムの概要および性能について述べる。

* fumihiko.tamura@j-parc.jp

Table 1: Parameters of J-PARC RCS and Its RF System

parameter	
circumference	348.333 m
energy	0.400–3 GeV
beam intensity	(achieved) 8.33×10^{13} ppp
harmonic number	2
accelerating frequency	1.227–1.671 MHz
maximum RF voltage	440 kV
repetition rate	25 Hz
No. of cavities	12
Q-value of RF cavity	2

2. 次世代 LLRF 制御システム

次世代 LLRF 制御システムのプラットフォームとして MTCA.4 (Micro Telecom Computing Architecture) [1] を採用した。MTCA.4 は FPGA による処理を AMC (Advanced Mezzanine Card) で行い、入出力は RTM (Rear Transition Module) に分離されるモジュール化された設計が可能であることが特長である。

システムの全体構成を Fig. 1 に示す [2]。クロック生成 eRTM により J-PARC マスタークロックである 12 MHz から LLRF システムクロック 144 MHz を生成する。クロックは DESY で開発された RF バックプレーンにより各モジュールへ分配されている。

AMC として三菱特機システム製の多目的 AMC を用いている。この AMC は、Xilinx の SoC FPGA である Zynq を搭載しており、FPGA 内の CPU で linux および EPICS IOC が動作する。システム全ての設定、モニタは EPICS チャンネルアクセスを介して行われる。

次世代システムでは、LLRF の機能を共通機能および空胴ドライバ機能の 2 つに分類し、それぞれを共通機能モジュールと 6 つの空胴ドライバモジュールに実装した。また、モジュール間の通信を司る高速シリアル通信

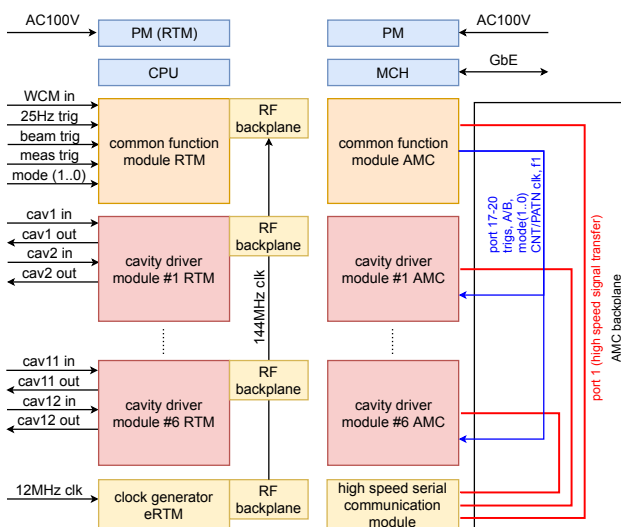


Figure 1: Configuration of the next-generation LLRF control system.

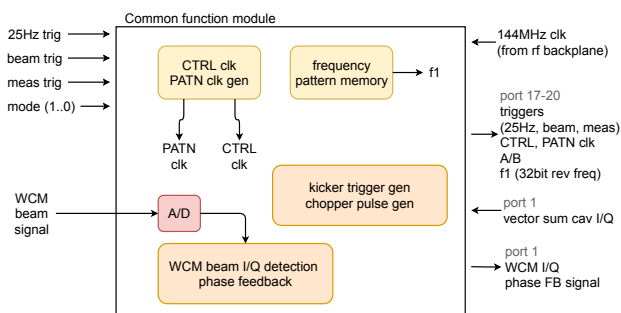


Figure 2: Block diagram of the common function module.

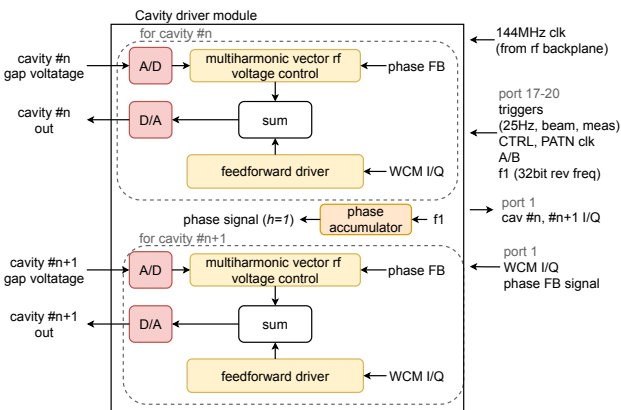


Figure 3: Block diagram of the cavity driver module.

モジュールを備える。

共通機能モジュールの機能ブロック図を Fig. 2 に示す。共通機能モジュールはタイミングシステムから供給されるトリガ、ゲート、およびビームの行先に対応するモード信号を受信する。フィードバックで用いられるコントロールクロック、パターンの読み出しに使用されるパターンクロックをモジュール内で生成し、これらの信号をバックプレーンを通じて空胴ドライバモジュールに

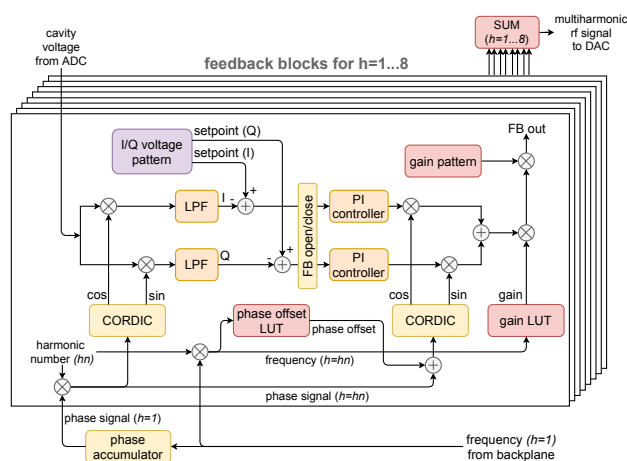


Figure 4: Simplified block diagram of the multi-harmonic vector rf voltage control feedback.

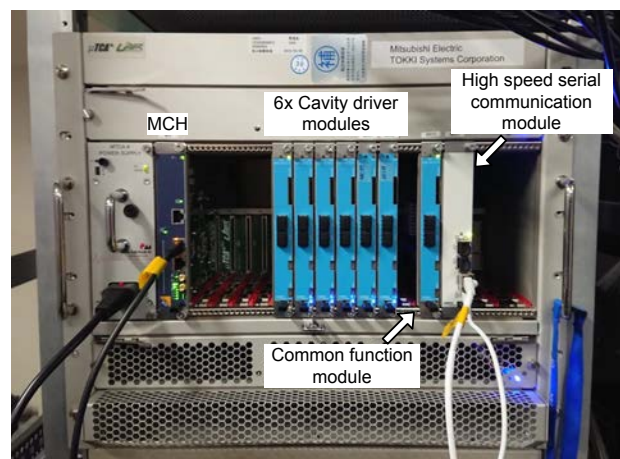


Figure 5: Photograph of the next-generation LLRF control system.

分配する。周回周波数は 32 ビットのデジタル値としてパターンメモリから読み出され、シリアル化してバックプレーンより分配される。

WCM (Wall Current Monitor) ビーム信号は I/Q デモジュレーションにより 8 つ ($h = 1 \dots 8$) のハーモニクスについて検波され、I/Q 信号はバックプレーンを通じ、後述する高速シリアル通信モジュールを経て、空胴ドライバモジュールへ送信される。 $h = 2$ の I/Q 信号は位相フィードバックに用いられる。

位相フィードバックは縦方向のダイポール信号を抑制するもので、加速周波数 ($h = 2$) の空胴のベクトル合成位相とビーム位相を比較してフィードバック信号を得る。位相フィードバック信号は WCM I/Q 信号と同様に空胴ドライバモジュールへ分配される。

共通機能モジュールには、その他キックトリガ生成機能、linac チョッパーゲートパルス生成機能 [3] 等が実装されている。

空胴ドライバモジュールの機能ブロック図を Fig. 3 に示す。6 台の空胴ドライバモジュールで空胴 12 台を制御する。バックプレーンより入力される周回周波数によ

り、周回周波数の位相信号を位相加算器により生成し、それをハーモニック倍してマルチハーモニックの位相信号を得る。

空胴ドライバモジュールの機能は、マルチハーモニックベクトル RF 電圧制御フィードバックとフィードフォワードドライバである。フィードフォワードについては、初期システムと同様の機能を、初期システムの6つのハーモニクスから8ハーモニクスに拡張を加え実装した。

マルチハーモニックベクトル RF 電圧制御フィードバックは次世代システムにおいて最も重要な新機能である。初期システムにおいては、加速周波数と2倍高調波 ($h = 2, 4$) の振幅がデュアルハーモニック AVC によって制御されていた、次世代システムでは、空胴電圧の8つのハーモニクス ($h = 1 \dots 8$) の I/Q 複素振幅が制御される。複素振幅の制御により、ビームローディングが補償されるのみならず、全てのハーモニクスの位相を制御することができる。

Figure 4 にマルチハーモニックベクトル RF 電圧制御フィードバックのブロック図を示す。 ($h = 1 \dots 8$) の8つのフィードバックブロックから構成され、I/Q デモジュレーションにより I/Q 振幅を得る。ローパスフィルタはフィードバックの応答、帯域を決める重要な要素である。フィルタ設計の詳細については論文を参照されたい。選択されたハーモニックの I/Q 電圧パターンと比較を行い、PI 制御、I/Q モジュレータを経てフィードバック出力を生成する。8つのハーモニクス ($h = 1 \dots 8$) の幅広い周波数範囲に対応するため、フィードバックブロック内には周波数をアドレスとした位相オフセット LUT およびゲイン LUT を備えている。最終的に、8つのハーモニクスのフィードバック出力を足し合わせマルチハーモニック RF 信号を生成する。

LLRF の機能を実現する上で必要なモジュール間の信号伝送は、高速シリアル通信が可能である MTCA バックプレーンを活用して実装した。高速シリアル通信モジュールには空胴電圧ベクトル合成機能が実装されており、また WCM I/Q 信号や位相フィードバック信号の分配を行っている。

次世代システムの写真を Fig. 5 に示す。初期システムは3つの VME シャーシに40以上のモジュールを収め構成されていたが、次世代システムでは最新の FPGA のロジック容量の増加により、モジュール数を大幅に削減することができた。MTCA の高速バックプレーンの活用により、モジュール間を渡る配線を排除することができている。次世代システムでは保守性が大幅に向上した。

3. 次世代システムの性能

全面的な次世代システムの導入に先立ち、2018年に1台の空胴でのビームローディング補償の試験を行った [4]。Figure 6 に 1 MW 相当のビーム加速時の空胴ギャップ電圧のハーモニック成分を示す。上段は、加速周波数 ($h = 2$) のみベクトル RF 電圧制御フィードバックを閉じ、他のハーモニクス ($h = 1, 3 \dots 8$) は出力しない場合のハーモニック成分である。加速周波数 ($h = 2$) はプログラム通り最大 12.2 kV となる電圧パターンに制

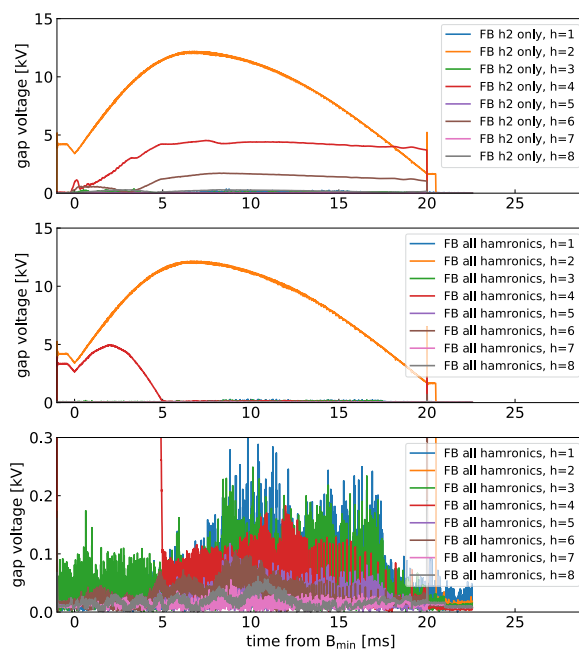


Figure 6: Harmonic components of the gap voltage with acceleration of 1 MW equivalent beam in the cases of (top) that the feedback for the fundamental acceleration harmonic ($h = 2$) is closed and the output of the others are turned off, (middle) the feedbacks for all harmonics are closed, and (bottom) vertically magnified view of the middle plot.

御されている。2バンチ加速であるのでビームは奇数次の成分を持たず、ウェーク電圧は生じない。偶数次の高調波のうち、($h = 4, 6$) は大きな振幅を持ち、それぞれ最大 4.6 kV および 1.7 kV にも達する。 ($h = 8$) 成分は観測されるものの、振幅は小さい。

全てのハーモニクスについてフィードバックを閉じた時のハーモニック成分を中段に、縦軸を拡大したものを下段に示す。加速周波数 ($h = 2$) は同様にプログラム通りの電圧に制御されている。2倍高調波 ($h = 4$) は5msまでプログラムされた電圧に制御され、その後は0.2 kV以下に抑制されている。他のハーモニクスは、プログラム電圧を0としており、0.3 kV以下に抑制されていることがわかる。この試験により、四極管を用いた終段増幅器により駆動される MA 空胴で、マルチハーモニックベクトル RF 電圧制御フィードバックの動作を確認し、高い性能を持つことを実証した。

2019年の初期システムを次世代システムに置き換える作業ののち、大強度ビームを用いて12台の空胴の電圧制御フィードバックの調整を行った [5]。1台の空胴の試験では、1 MW 相当のビームのビームローディングを8つのハーモニクスについて完璧に補償することができたが、12台全ての空胴についてベクトル RF 電圧制御フィードバックを適用した場合には状況は異なった。620 kW 相当のビーム加速までは8つのハーモニクスの補償を行うことが可能であったものの、それ以上の強度

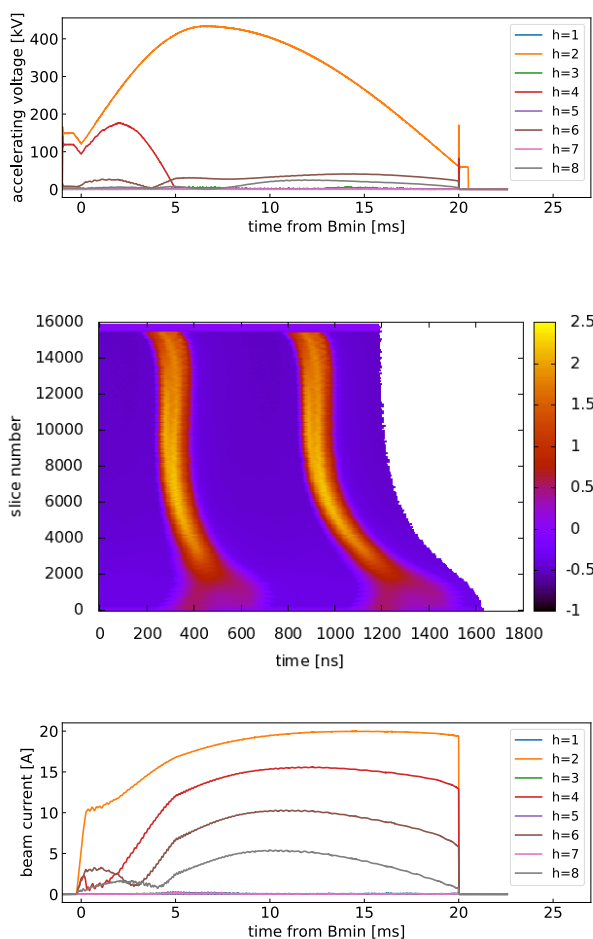


Figure 7: (Top) Harmonic components of the cavity voltage vectorsum, (middle) mountain plot of WCM beam signal, and (bottom) harmonic components of the WCM beam signal, with acceleration of 1 MW equivalent beam.

では、RF システムのトリップを防ぐためにいくつかの妥協が必要であった。具体的には、問題を生じた空胴については高調波のフィードバックを ($h = 8$) から順にオフにすること、それでも問題が解決しない場合には電圧パターンを下げることである。

最終的に 1 MW 相当のビームを RF システムのトリップなしに安定に加速するには、(1) 空胴 12 台のうち、5 台は ($h = 6$) まで、7 台は ($h = 5$) までの補償とすること、(2) 空胴 1 台については、電圧パターンに 0.9 を掛けたものを使用することが必要だった。上記を適用時の 12 台の空胴のベクトル合成電圧のハーモニック成分を Fig. 7 上段に示す。加速周波数および 2 倍高調波 ($h = 2, 4$) の振幅はプログラム通りによく制御されており、加速周波数の最大電圧 440 kV に対し、補償が完全でない高調波である ($h = 6, 8$) については、最大で 40 kV および 25 kV の振幅が観測された。

妥協が必要ではあったが、次世代システムでは非常に安定な 1 MW 相当のビーム加速が実現できている。入射から取り出しまでの WCM ビーム信号を Fig. 7 中段に示す。縦軸は入射からのターン数である。縦方向の振動や不安定のない安定な加速であることがわかる。ビーム信

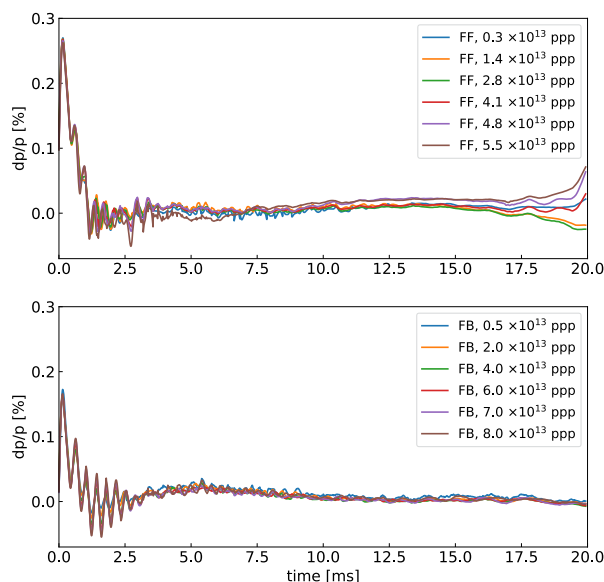


Figure 8: Momentum deviations (dp/p) of the beams with various intensities from injection to extraction, (top) with feedforward and (bottom) with feedback.

号のハーモニック成分を Fig. 7 下段に示す。ビーム信号のハーモニクスは振動することなくスムーズに変化しており、このことはバンチ形状が加速中ゆっくりとした変化をしていることを示している。

マルチハーモニックベクトル RF 電圧制御フィードバックにより、初期システムのフィードフォワードによる補償よりも、全てのハーモニクスについてより良いビームローディング補償を実現することができた。フィードフォワードとフィードバックの場合について、色々な強度での入射から取り出しまでのビーム運動量のずれ (dp/p) をプロットしたものを Fig. 8 に示す。フィードフォワードの場合の測定は、linac のピーク電流が 30 mA (現在は設計電流の 50 mA) で測定されたものであり、最大強度が 5.5×10^{13} ppp となっている。入射時の大きな dp/p は周波数オフセットを用いた運動量オフセット入射によるもので、設定周波数オフセットは運動量にしてそれぞれ 0.2% と 0.1% に相当する。どちらの場合も 10 ms までは dp/p の強度依存性は見られない。フィードフォワードの場合は、10 ms から 17.5 ms にかけて小さな依存性があり、その後取り出しにかけて、強い強度依存性が生じている。これは取り出しでは加速電圧を 60 kV まで下げているため、補償の不完全さによる残存するウェーク電圧の効果が大きくなるためと考えられる。取り出しの時点では dp/p の強度による変化の幅は 0.1% 程度と大きい。一方、フィードバックの場合には加速全域について強度依存性は非常に小さく、取り出しでは 0.01% の範囲に収まっている。

取り出し直前のバンチ波形の強度依存性を Fig. 9 に示す。フィードフォワードの場合、強度により 40 ns 程度タイミングが変化していることがわかる。加速周波数の補償が不完全であるために強度により RF 位相が変化してしまうことが原因と考えられる。フィードバックの

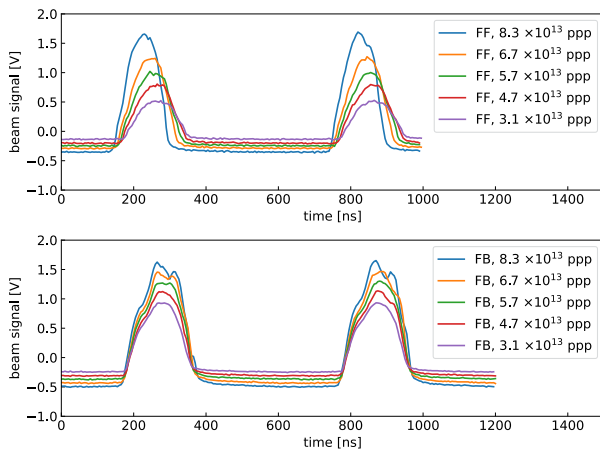


Figure 9: Beam signals just before extraction for various beam intensities, (top) with feedforward and (bottom) with feedback.

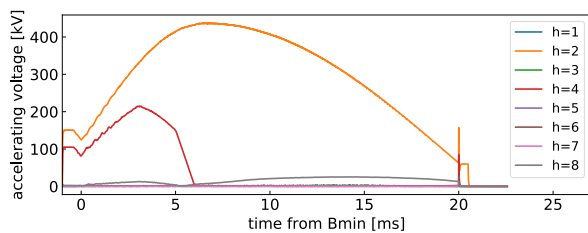


Figure 10: (Top) Harmonic components of the cavity voltage vectorsum with compensation up to ($h = 6$) for all cavities.

場合には、バンチのタイミングの強度依存性は非常に小さい。

フィードフォワードの場合でのバンチのタイミングおよび運動量の強度依存性は、調整のために様々なビーム強度、ビーム条件を用いる MR の調整で運用上の問題であった。MR の RF バケツの中心に入射するために MR の RF 位相調整や周波数オフセットを用いた RCS 取り出し運動量の調整を強度ごとに行うことは、煩雑な作業であった。次世代システムでフィードバックによるビームローディング補償が行われるようになり、これらの強度依存性が解消されたことで、MR の調整における手順は大幅に簡略化されたと言える。

次世代 LLRF 制御システムは、導入以降安定に運用されており、2020 年夏に行なわれた 1 MW ビームパワーでの 38 時間 MLF 連続運転においてもビームを安定に加速することができた。

4. ビームローディング補償の向上に向けて

上記の妥協が必要となったのは、大出力時の増幅器系の非線形性動作による。1 MW 加速時には駆動段増幅器、終段増幅器ともリミット値に近い出力を発生させており、出力波形の歪みによる加速ギャップ電圧の歪みを補正するために、フィードバックがさらに大きな出力信号を要求し、結果として RF システムのトリップ (駆動

段増幅器出力過多、陽極過電流等) を生じると考えられている。増幅器系、特に駆動段増幅器の増強が必要であり、開発を開始している。

終段増幅器の真空管のパラメータの再調整も有効である。RCS ではこれまで、真空管の寿命を伸ばすことを目的に、真空管 (TH589) のフィラメント電流を 450 A 程度に設定して運転を行ってきた。これを 480 A に引き上げ、またスクリーングリッド電圧を 1.75 kV から 2.0 kV に上げることで、終段増幅器のゲインを上げ、駆動段増幅器の負荷を下げるができる [6]。このパラメータにより、1 MW 加速時に 12 台全ての空胴で ($h = 6$) までの補償を行うことに成功した。この時の 12 台の空胴のベクトル合成電圧のハーモニック成分を Fig. 10 に示す。Figure 7 上図と比べると、($h = 6$) 成分がほぼ完全に抑制されていることがわかる。

より抜本的方法として、シングルエンド空胴 [7] によるビームローディングそのものの低減が提案されており、今夏には 1 台の空胴のシングルエンド空胴への置き換えが計画されている。

5. まとめ

次世代 LLRF 制御システムは 2019 年にインストール、調整が行われた。マルチハーモニックベクトル RF 電圧制御フィードバックにより、初期システムのフィードフォワードよりもビームローディング補償の性能を向上することに成功し、設計ビームパワー 1 MW においてより安定な運転を実現した。補償の向上のために増幅器系の増強や空胴の置き換えなどが検討、計画されている。

参考文献

- [1] PICMG, “MicroTCA Overview”, <https://www.picmg.org/openstandards/microtca/>
- [2] F. Tamura *et al.*, “Development of Next-Generation LLRF Control System for J-PARC Rapid Cycling Synchrotron”, *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, 66, 1242, 2019.
- [3] F. Tamura *et al.*, “Flexible Chopper Gate Pulse Generation for the J-PARC RCS”, in *Proc. of J-PARC2019*, Tsukuba, Japan, 2019, pp. 011021.
- [4] F. Tamura *et al.*, “Multiharmonic vector rf voltage control for wideband cavities driven by vacuum tube amplifiers in a rapid cycling synchrotron”, *Phys. Rev. Accel. Beams*, 22, 092001, 2019.
- [5] F. Tamura *et al.*, “Commissioning of the next-generation LLRF control system for the Rapid Cycling Synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 999, 165211, 2021.
- [6] M. Yamamoto *et al.*, “Vacuum tube operation tuning for a high intensity beam acceleration in J-PARC RCS”, to be published in *Proc. of IPAC’20*.
- [7] M. Yamamoto *et al.*, “Conceptual Design of a Single-Ended MA Cavity for J-PARC RCS Upgrade”, in *Proc. of IPAC’18*, Vancouver, Canada, 2018, pp. 987–989.