

J-PARC RCS 次世代 LLRF 制御システム NEXT GENERATION LLRF CONTROL SYSTEM FOR J-PARC RCS

田村文彦*, 杉山泰之、吉井正人、大森千広、山本昌亘、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, Chihiro Ohmori, Masanobu Yamamoto,
Masahiro Nomura, Taihei Shimada, Katsushi Hasegawa, Keigo Hara, Masashi Furusawa
J-PARC Center, JAEA & KEK

Abstract

The LLRF control system for the J-PARC RCS has been playing important roles for acceleration of high intensity proton beams. The key functions of the system are the dual harmonic voltage control and the multiharmonic rf feedforward to compensate the heavy beam loading in the wideband cavities. The system has been working fine for more than ten years, however, the old FPGAs in the system are already discontinued and not supported by current development environment. Maintenance of the system will be difficult soon. We are developing the next generation LLRF control system with the new form factor, MicroTCA.4, while the existing system is based on the VME. In this article, we describe the configuration of the new system, its functions, and the status of the development.

1. はじめに

J-PARC RCS (3 GeV シンクロトロン) の low level rf (LLRF) 制御システムは建設期である 2003 年から 2007 年まで開発が行われ、2007 年の RCS のビーム調整開始時よりその運転を開始した。

RCS では大強度ビームの加速に必要な高い加速電圧を得るために金属磁性体 (MA) 空胴を採用しており、12 台の空胴により最大 440 kV を発生させている。また、MA 空胴は広帯域 ($Q = 2$) であり、400 MeV から 3 GeV までの陽子加速による速度変化に対応した加速基本波 ($h = 2$) の幅広い変化 (1.23–1.67 MHz) においても同調なしに電圧を発生できる。周波数応答は 2 倍高調波 ($h = 4$) もカバーしているので、基本波電圧と 2 倍高調波電圧を一つの空胴に重畳して発生させる、デュアルハーモニック運転が可能である。デュアルハーモニック運転によるバンチ整形は、空間電荷効果を軽減し、大強度ビームを加速するために必須なものとなっている。

一方、広帯域であるがゆえに、MA 空胴に大強度ビームが励起するウェーク電圧は基本波だけでなく複数のハーモニクスを含むものとなる。従ってマルチハーモニックビームローディング補償が必要となる。

これら機能は LLRF 制御システムに実装されており、RCS での大強度ビーム加速において LLRF は非常に重要な役割を果たしてきた。RCS の LLRF 制御システムは 10 年以上の長きにわたり大きな問題なくその役割を果たしてきたが、システムに使用されている FPGA は既に製造中止となっているだけでなく、最新の開発環境でサポートされていない。近い将来にシステムの維持が困難となることが予想されるため、次世代 LLRF 制御システムを開発している。本稿では、既存 LLRF の主要機能について概説するとともに、次世代システムの構成、重要な機能、開発の現状について報告する。

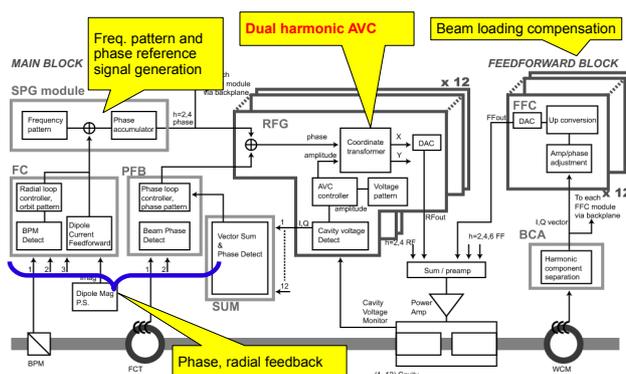


Figure 1: Functional block diagram of the existing LLRF control system.

2. 既存 LLRF 制御システム

2.1 全体構成と機能

既存 LLRF 制御システムの機能ブロック図および写真を Fig. 1 および Fig. 2 に示す。システムは特注の 9U height の VME モジュール群として構成されている。全ての機能は FPGA 上にロジック回路として実装されており、DSP は使用されていない。主に使用されている FPGA はザイリンクスの Virtex-II や Spartan-2 などである。システムの動作クロックは 36 MHz である。

パターンメモリに保持される周波数パターンから位相加算器により周回周波数の位相信号 ($-\pi \dots \pi$) が生成される。この位相信号にハーモニック数を掛け算してやることで、加速基本波 ($h = 2$) や高調波の位相信号を得る。このマルチハーモニックの位相信号は他のモジュールにバックプレーンを介して分配されており、位相信号を利用することでモジュール間の同期は完全に保たれている。この位相信号は I/Q デモジュレーションやモジュレーションに利用される。

システムの最も重要な機能は空胴電圧の制御である。

* fumihiko.tamura@j-parc.jp

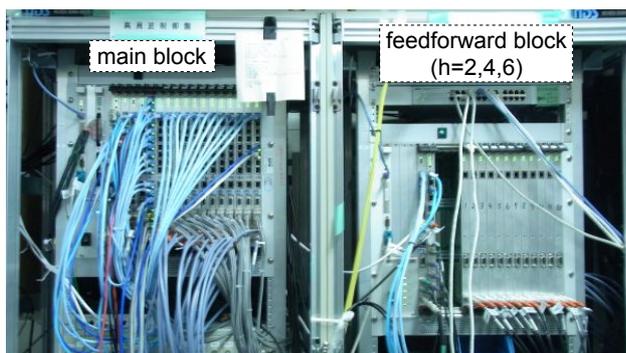


Figure 2: The existing LLRF control system.

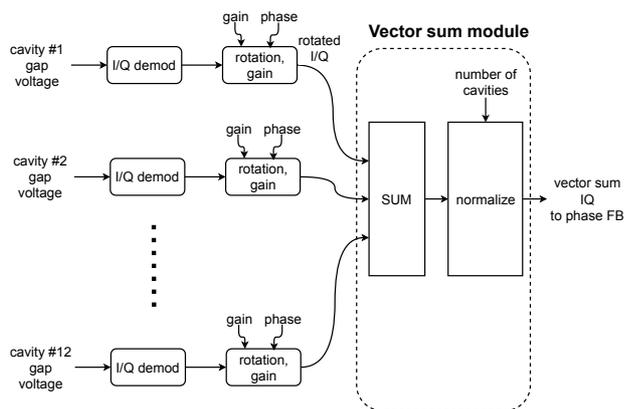


Figure 3: Block diagram of the vector sum.

各空胴はデュアルハーモニック AVC (auto voltage control) [2] により電圧を制御されている。デュアルハーモニック AVC においては、加速基本波 ($h = 2$) と 2 倍高調波 ($h = 4$) の I/Q 信号から CORDIC によって振幅を取り出し、電圧パターンと比較したのちに PI 制御によってハーモニック電圧制御信号を得ている。これらを rf 信号に変換した後合成することで、デュアルハーモニック rf 信号を得る。大強度ビームの空間電荷効果の軽減に必須である縦方向ペインティング [3] はデュアルハーモニック AVC により実現されている。

大強度ビームの加速においては、空胴に生じるウェーク電圧によるビームローディング [1] が問題である。前述のように、広帯域の MA 空胴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となる。既存 LLRF 制御システムでは、rf フィードフォワード法を用いた補償を行っている。フィードフォワードシステムはウォールカレントモニター (WCM) のビーム信号から選択したハーモニックの複素振幅を取り出し、ゲインおよび位相のパターンを適用して、ウェーク電圧を打ち消すように補償信号を生成する。補償信号は、ドライブ信号と重畳されて空胴を駆動する。マルチハーモニックフィードフォワードシステムの調整手法については、[4] を参照して欲しい。初期には偶数ハーモニック ($h = 2, 4, 6$) のフィードフォワードシステムのみがインストールされたが、のちに奇数ハーモニック ($h = 1, 3, 5$) のためのシステムが追加され、大強度の単パンチ運転が可能となった [5]。

ビームの安定化のためのフィードバックも実装されて

いる。

ディスパージョンの大きい場所に置かれた BPM 位置信号により周波数を変調し偏向電磁石と rf 周波数のずれを補正する軌道フィードバックは、実装されているが実際の運転には使用されていない。これは、偏向磁場の再現性が非常に高く、周波数パターンの調整だけで十分であることがわかったからである。

位相フィードバックは、縦方向のダイポール振動を減衰させる目的を持つ。12 台の空胴電圧をベクトル合成したものの位相とビーム位相を比較し、位相モジュレーション信号を生成している。ベクトル合成の機能ブロック図を Fig. 3 に示す。各空胴電圧の I/Q 信号は、空胴位置に対応する回転を適用されたのちに、ベクトル合成モジュールに送られる。ベクトル合成モジュールはこれらを加算し、空胴台数でノーマライズすることで、空胴電圧のベクトル合成を得るのである。

既存 LLRF 制御システムにはこの他、図中には表示されていないが、取り出しキッカーのトリガー生成や linac チョッパーゲート信号生成などの機能が実装されている。

2.2 次世代システムへの要求

10 年以上にわたり安定な運転を続けている既存システムは、前述のように使用している FPGA の陳腐化などの理由により、更新時期を迎えている。

既存システムはアナログ LLRF 制御システム的な発想で開発されたため、機能ごとにモジュールが全て異なっており、機能ごとの予備モジュールの維持管理は実用上の問題となっている。FPGA の柔軟性をより生かすためにも、FPGA のメインボードは共通とし、必要な機能により I/O ボードを開発する方針とした。

新システムには、基本的に既存システムの軌道フィードバック以外の全ての機能を実装する方針とした。

3 次世代 LLRF 制御システム

3.1 システムの概要

次世代システムのフォームファクターとしては、既存システムで用いられている VME でなく、MicroTCA.4 を採用した。MicroTCA.4 では、I/O の機能を担う RTM (rear transition module) と FPGA ロジックを持つ AMC (advanced mezzanine card) が分離した構成であり、FPGA の柔軟性を生かした設計が可能になる。

全体構成を Fig. 4 に示す。クロック生成 eRTM により、J-PARC のマスタークロックである 12 MHz から 144 MHz のシステムクロックが生成され、DESY により開発された rf バックプレーンを介して各モジュールに分配される。三菱電機特機システムにより開発された Zynq 搭載の AMC を採用している。Zynq 上で EPICS IOC が動作しており、全ての設定、モニターは EPICS チャンネルアクセスにより行われる。特に、I/Q 波形モニターは有用である。この AMC は 8 つの ADC と 2 つの DAC を備えており、1 つの AMC で 2 台の空胴の制御が可能である。

システム内では大きく 2 種類のモジュール構成とした。全空胴に共通な機能をもつ共通機能モジュールと、各空胴に対応した機能を実装する空胴ドライバモジュール

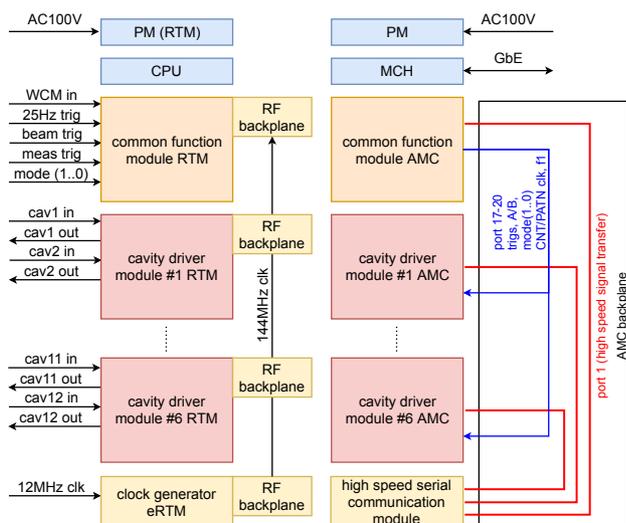


Figure 4: Overview of the next generation LLRF control system.

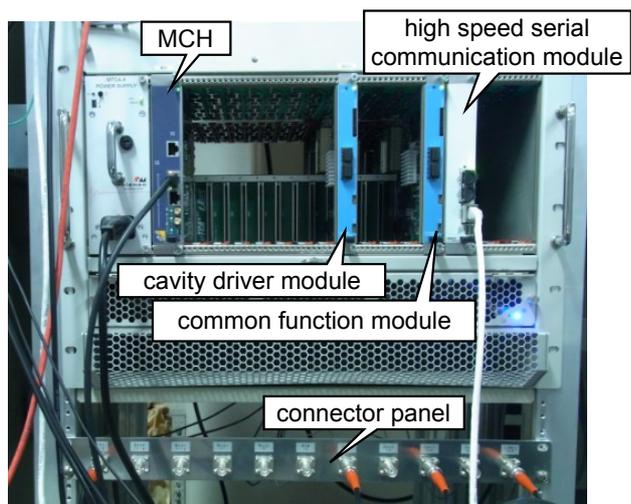


Figure 5: Next generation LLRF control system.

ルである。MCH2のスロットには、高速シリアル通信モジュールを備える。これらモジュールの機能については後述する。

現在まで、Fig. 5の写真に示すように、共通機能モジュール、空洞ドライバモジュール、高速シリアル通信モジュール、クロック生成eRTMを各1台ずつ製作して試験を行っている。

3.2 共通機能モジュール

共通機能モジュールの機能ブロック図をFig. 6に示す。共通機能モジュールは、周波数パターンの管理、位相フィードバックなどの主要機能を持つ。トリガーおよびビーム行き先信号(mode(1..0))を外部より受信し、他モジュールへ分配を行う。また、フィードバック制御等で用いられる制御クロック、パターンの読み出しに使われるパターンクロックもこのモジュールで生成される。

周波数パターンメモリより読み出された32ビットの

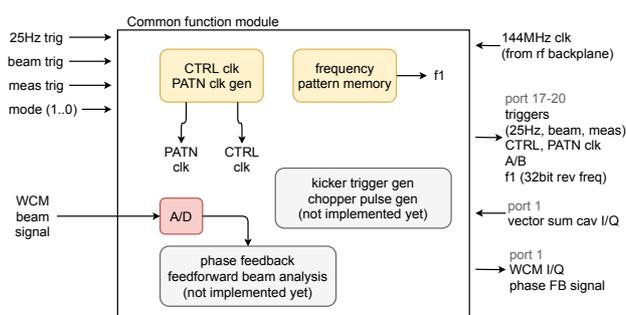


Figure 6: Functions of the common function module.

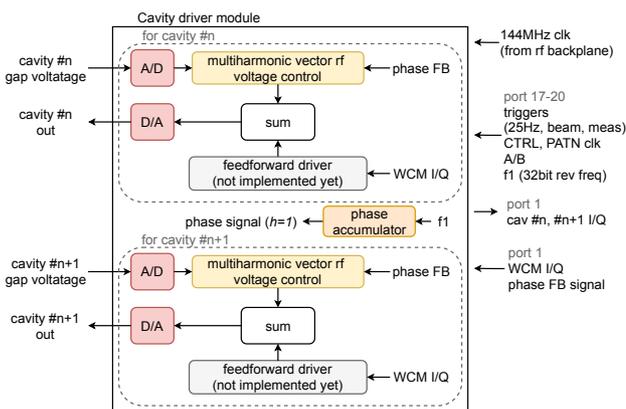


Figure 7: Functions of the cavity driver module.

周回周波数信号は、シリアル化されAMCバックプレーンを通じて空洞ドライバモジュールに分配される。基本波と2倍高調波($h = 2, 4$)を分配する既存システムとの大きな違いである。新システムでは、それぞれの空洞ドライバモジュールに位相加算器が実装され、ドライバモジュール側でマルチハーモニックの位相信号が生成される構成となっている。この構成は後述のマルチハーモニックベクトル電圧制御を実現するために必要である。

現状では、位相フィードバックやWCMビーム信号検波などの機能は実装されていないが、2018年度中に実装予定である。

3.3 空洞ドライバモジュール

空洞ドライバモジュールのブロック図をFig. 7に示す。前述のように、1つの空洞ドライバモジュールで2台の空洞を独立に制御できる。バックプレーンより入力される周回周波数信号は位相加算器に入力され、周回周波数の位相信号はマルチハーモニック位相信号の生成に使用される。

空洞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電圧制御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機能は、バックプレーンより入力されるビーム信号の複素振幅から、既存システム同様にマルチハーモニック補償信号を生成するものである。現在は未実装であるが、既存システムが6つのハーモニクスを扱うのに対し、8ハーモニクスを扱うように拡張される予定である。

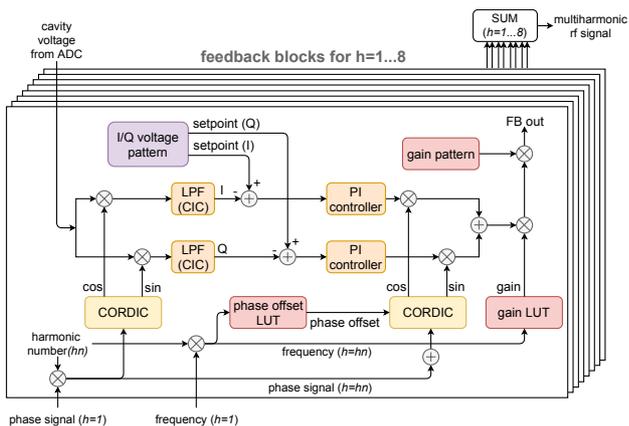


Figure 8: Block diagram of the multiharmonic vector rf voltage control.

マルチハーモニックベクトル電圧制御は次世代 LLRF 制御システムの鍵となる機能である。既存のデュアルハーモニック AVC では 2 つのハーモニクス ($h = 2, 4$) の振幅 (スカラー) を制御しているのに対し、新システムでは I/Q ベクトル振幅を 8 つのハーモニクス ($h = 1 \dots 8$) について制御できる。ベクトル電圧制御によりビームローディング補償が可能である他、高調波までの電圧位相制御が可能となる。

マルチハーモニックベクトル電圧制御のブロック図を Fig. 8 に示す。I/Q デモジュレーションにより、選択されたハーモニックの I/Q ベクトル振幅を検波し、電圧パターンと比較したのちに PI 制御と I/Q モジュレータにより rf 信号を生成する。各ブロックからの出力を合成し、マルチハーモニック rf 信号を得ることができる。

3.4 高速シリアル通信モジュール

モジュール間の信号の伝送は LLRF の機能を実装するために重要である。既存システムにおいては、信号伝送は必ずしも洗練された実装ではない。位相信号の分配では、パラレル信号をバス接続を介して分配しており、また、ベクトル合成のための I/Q 信号の伝送は、Fig. 2 の写真のようにフロントパネルからシリアルケーブルをモジュール間に渡すことで実現されている。

RCS の LLRF において、ベクトル合成等の信号のやりとりは、スター状の接続になっている。MicroTCA.4 においては、スター状の接続を実現することは自明ではないが、次世代 LLRF 制御システムにおいては、MCH2 のスロットに特別なモジュールを配置し、port 1 を使用することで、スター状の接続を実現している。

高速シリアル通信モジュールとその周辺の信号の流れを Fig. 9 に示す。各空洞ドライバモジュールは 2 台の空洞の 8 つのハーモニクス ($h = 1 \dots 8$) の I/Q 信号を高速シリアル通信モジュールへ送る。送信に先立って、ドライバモジュール側であらかじめ回転を与えてある。高速シリアル通信モジュールには、信号の加算と台数によりノーマライズの機能が実装しており、得られたベクトル合成電圧は、port 1 を通じて共通機能モジュールに送られる。シリアル通信の速度は 2.5 Gbps であり、プロトコルとしては、ザイリンクスの Aurora を採用している。

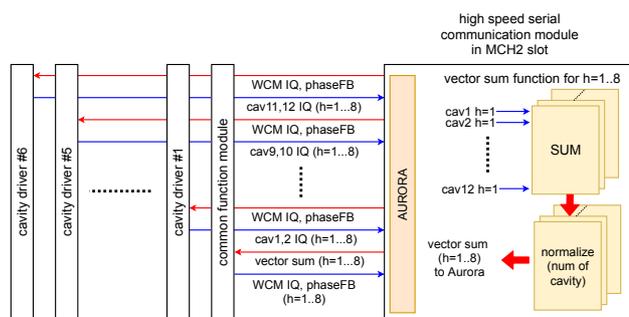


Figure 9: Block diagram of the high speed serial communication module and the signal flow around the modules.

AMC バックプレーンの高速シリアル通信により、モジュール間の信号伝送は既存システムより洗練されたものとなった。ケーブル接続を排することにより、長期間にわたる機械的な安定性も期待される。

4. 試験結果

マルチハーモニックベクトル電圧制御の性能を確かめるために、鋸波を発生させる試験を行った。振幅 1、周波数 f_1 を持つ鋸波の m 次高調波までのフーリエ級数展開は、

$$f(t) = \frac{2}{\pi} \sum_{h=1}^m \frac{(-1)^{h+1}}{h} \sin 2\pi h f_1 t, \quad (1)$$

で表わされる。ここに、 h はハーモニック数である。前述のように 8 つの電圧制御ブロックが実装されているので、(1) を書き下すと、

$$f(t) = \frac{2}{\pi} \left(\sin \omega_1 t - \frac{1}{2} \sin 2\omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_1 t - \frac{1}{4} \sin 4\omega_1 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_1 t - \frac{1}{6} \sin 6\omega_1 t + \frac{1}{7} \sin 7\omega_1 t - \frac{1}{8} \sin 8\omega_1 t \right) \quad (2)$$

となる。

今回の試験では、 f_1 を 1 MHz とし、周回ハーモニック ($h = 1$) の I/Q 振幅をデジタル値で (0,3000) に設定した。高調波の振幅は (2) に従って設定した。

測定された $h = 1 \dots 8$ の I/Q 振幅を Fig. 10 に、計算された波形と測定された波形の比較を Fig. 11 に示す。これらのプロットにより、I/Q 振幅が設定された値に非常に近いこと、また、計算された波形と測定された波形がよく一致していることがわかる。

同様に、矩形波の発生についても試験を行った。矩形波のフーリエ級数展開は、奇数次の高調波成分だけからなり、

$$f(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^m \frac{1}{2n-1} \sin(2n-1)\omega_1 t = \frac{4}{\pi} \left(\sin \omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_1 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_1 t + \frac{1}{7} \sin 7\omega_1 t \right) \quad (3)$$

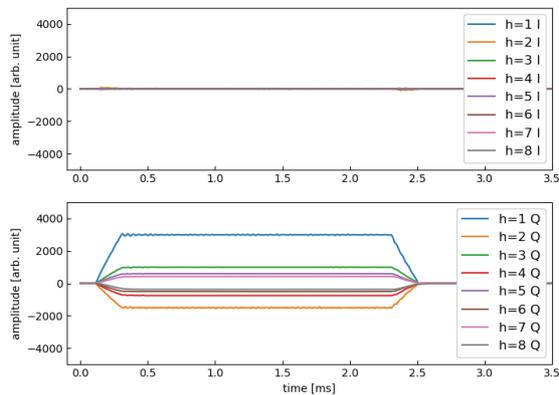


Figure 10: Measured I/Q amplitudes of eight harmonics ($h = 1..8$) for generation of a sawtooth wave.

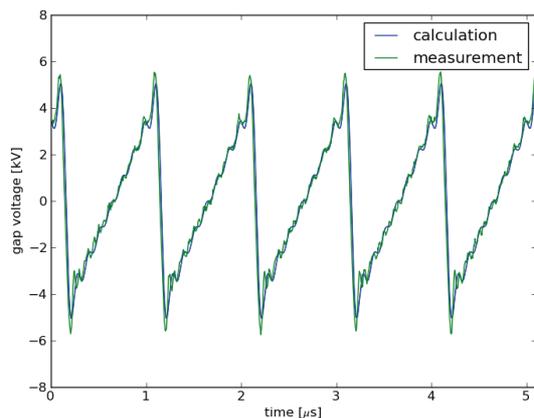


Figure 11: Comparison of the measured and calculated cavity gap voltage waveforms (sawtooth wave).

と表わされる。Figure 12 に示すように、矩形波の場合も測定された波形は期待される波形と非常によく一致している。

次世代 LLRF 制御システムに実装されたマルチハーモニックベクトル電圧制御の性能は今後期待が持てるものであり、ビームローディング補償についても $h = 8$ までの補償が期待される。また、現在は縦ペインティング入射に基本波 ($h = 2$) と 2 倍高調波 ($h = 4$) のみを用いているが、これに 3 倍、4 倍高調波 ($h = 6, 8$) を加えることで、さらにパンチングファクターが大きい平坦なバンチが得られる可能性がある。

5. まとめと今後

J-PARC RCS の LLRF 制御システムは、10 年以上の長きにわたって大きな問題なく、大強度ビーム加速に貢献してきた。しかし、使用している FPGA の陳腐化により今後の維持が困難となることが予想される。このため、MicroTCA.4 をフォームファクターとした次世代 LLRF 制御システムを開発中である。

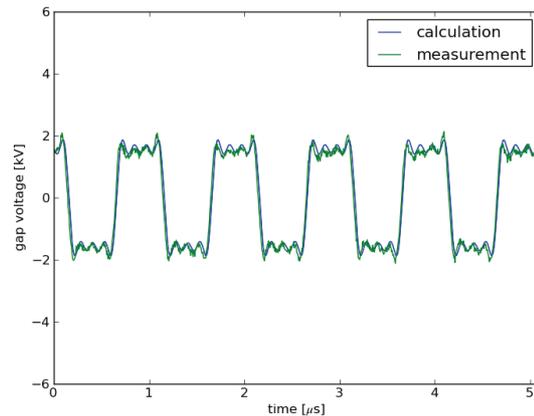


Figure 12: Comparison of the measured and calculated cavity gap voltage waveforms (square wave).

新しいシステムには、既存システムと同様の機能が実装されるほか、新機能が実装される。鍵となるのは、既存システムよりも多数のハーモニクスを制御するマルチハーモニックベクトル電圧制御であり、大強度ビームによるビームローディングの補償や縦ペインティング入射の向上が期待される。また、MicroTCA.4 のバックプレーンの高速シリアル通信の能力を生かし、洗練され、また堅牢なモジュール間の信号伝達を実現した。

現在は、12 台の空洞をドライブするために残り 5 つの空洞ドライバモジュールを製作し、残りの機能を実装中である。2019 年度の夏期メンテナンス中に既存システムとの入れ替えを行い、10 月のビーム運転では次世代システムの運用を開始したいと考えている。またこれに先立ち、ビームローディング補償の性能評価をビーム試験で行っていく。

参考文献

- [1] F. Pedersen, “Beam loading effects in the CERN PS booster”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 22, no. CERN-MPS-Int-BR-75-6. 3, pp. 1906–1909, Mar 1975.
- [2] F. Tamura, A. Schnase, and M. Yoshii, “Dual-harmonic auto voltage control for the rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, vol. 11, no. 7, p. 072001, Jul 2008.
- [3] F. Tamura *et al.*, “Longitudinal painting with large amplitude second harmonic rf voltages in the rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, vol. 12, no. 4, p. 041001, Apr 2009.
- [4] F. Tamura *et al.*, “Multiharmonic rf feedforward system for beam loading compensation in wide-band cavities of a rapid cycling synchrotron”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, vol. 14, p. 051004, May 2011.
- [5] F. Tamura *et al.*, “High intensity single bunch operation with heavy periodic transient beam loading in wide band rf cavities”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, vol. 18, p. 091004, Sep 2015.