

MTCA.4 規格低電力高周波システムの SPring-8 蓄積リング A ステーションへの導入

UPGRADE OF LLRF SYSTEM AT SPring-8 STORAGE RING USING MTCA.4 STANDARD MODULES

大島隆^{#, A,B)}, 細田直康^{A,B)}, 前坂比呂和^{B)}, 大橋裕二^{A)}, 佐々木茂樹^{A)}, 安積隆夫^{A)}, 福井達^{B)}, 稲垣隆宏^{B)}
Takashi Ohshima^{#, A,B)}, Naoyasu Hosoda^{A,B)}, Hirokazu Maesaka^{B)}, Yuji Ohashi^{A)},
Shigeki Sasaki^{A)}, Takao Asaka^{A,B)}, Toru Fukui^{B)}, Takahiro Inagaki^{B)}
^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute
^{B)} RIKEN SPring-8 Center

Abstract

The renewal of the low-level RF system for the 3rd generation synchrotron radiation facility, SPring-8, is underway. The existing RF system of the storage ring is composed with single-function analog modules, which are obsolete and hard to be maintained. Therefore, the system is being replaced with a modern digital system using MTCA.4 modules. The amplitude and phase of an RF signal are detected with an under-sampling scheme because of simple composition and robustness to the ambient parameter changes. For this purpose, we developed new MTCA.4 modules: a digitizer AMC having a sampling rate of 370 MHz and 16-bit resolution, and a signal conditioning RTM. A motor driver controlled through EtherCAT was newly adopted to the cavity tuner control. After several tests of the system at a high-power RF test stand since 2016, the digital system was installed to one of the four RF stations of the storage ring in February 2018. The new system has been working well although some minor troubles were observed. The phase and amplitude stabilities were 0.06 degree and 0.037 % rms, which satisfied requirements of 0.1 degree and 0.1%, respectively.

1. はじめに

加速器では NIM 規格、CAMAC 規格、VME 規格などのモジュールを組み合わせてシステムを構築してきた。近年、通信分野の大きな進展のおかげで、安価に高機能なモジュールを入手することが可能となってきた。その一方で、古い規格の電子素子は製造中止になって入手が困難となってきた。建設から 20 年以上が経過した SPring-8 の低電力高周波 (LLRF) システム[1]でも、その流れには逆らうことができず、入手性の悪くなった保守部品も見られている。そこで、新しい規格のモジュールを組み合わせたシステムの構築を検討してきた。その候補の 1 つは MTCA.4[2]である。これは、Micro Telecommunications Computing Architecture[3]の規格のひとつであり、EuroXFEL の線形加速器にて使用実績がある[4]。この規格はコンパクトなモジュールの組み合わせで高機能なコンピュータシステムを構築することを目的として開発された。使用するモジュールは Advanced Mezzanine Card (AMC) と呼ばれる様々な機能を実現する。AMC はホットスワップが可能である。入力する信号の処理を行う Rear Transition Module (RTM) を AMC と組み合わせて使用することも可能である。この規格のモジュールを使用したシステムでは、従来のアナログベースのシステムに比べ、使用モジュール数、占有空間の大幅な削減、制御パラメータの細かな制御が期待できる。また、4 レーンの高速シリアルバスを持ち、異常時

などの波形データの保存のような大容量データの取り扱いも可能となる。MTCA のシステムの情報、例えばどのスロットにどんなモジュールが挿入され、そのモジュールの電源の状態がどうであるかなどは MicroTCA Carrier Hub (MCH) 経由で取得することが可能である。

SPring-8 では、まず 2016 年度にテストスタンドに MTCA.4 規格のシステムを導入し、試験運転で問題点の洗い出しを行った[5]。その後、2018 年 2 月に蓄積リングの 4 つの RF ステーションのうちの 1 つである A ステーションにこのシステムを導入した。ここでは、MTCA.4 システムの構成、性能を従来システムと比較しながら述べ、今後の予定などについて報告する。

2. 新旧システムの構成

LLRF システムの目的は、加速空洞に作られる電場の振幅および位相を、目標値に保つことである。従来の SPring-8 の LLRF システムは、基本的に単機能の NIM モジュールを組み合わせて構築していた。Figure 1 にアナログ回路ベースのシステムのブロック図を示す。それぞれのモジュールに対して、目標値の設定や、現在値の読み取りなどの遠隔制御には、VME 規格のモジュールを用いていた。個々のモジュール間は、SMA やリモコネクタの付いた同軸ケーブル、D-sub コネクタの付いた多芯ツイスト信号ケーブルなどを用いて信号の授受を行っていた。位相検出器やインターロックなどの一部の信号については、NIM 電源ビンのバスを用いた伝送を行っていた。

[#] ohshima@spring8.or.jp

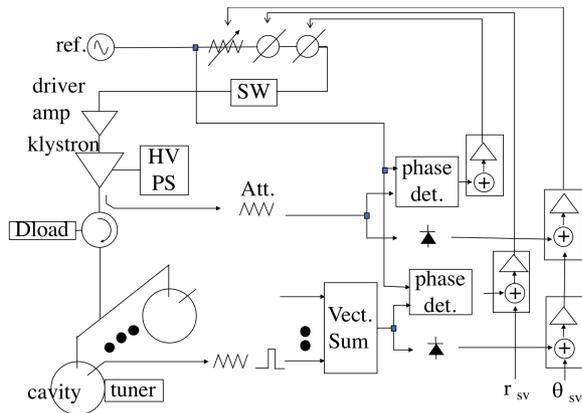


Figure 1: A block diagram of an analog module based LLRF system.

新システムでは、多チャンネルのADCモジュールを複数枚使って RF 信号を数値データ列に変換したのちに、In-phase Quadrature (IQ)変換[6]により、高周波信号の振幅・位相を取得する。このようにして得た測定値からフィードバック制御などを数値演算に行っている。Figure 2 に MTCA.4 規格モジュールを使ったシステムのブロック図を示す。ADC モジュールのデータは PCIe バスを使って CPU に伝送される。8 つの空洞の RF ベクトル和、空洞の RF 振幅位相の安定化、空洞の共振保持など複数の機能を、ADC モジュールに実装された FPGA 上で動作する firmware、または MTCA クレートに実装した CPU 上のプロセスで実現している。また、分散して設置された複数の機器に対しては EtherCAT というフィールドバスを通して制御を行うことにより、省配線を実現した。

LLRF の主な機能について、新旧システムの違いを以下の節に示す。

2.1 RF 基準信号の伝送

蓄積リングの4つのRFステーションにRF基準信号を送るために、光ファイバシステムが用いられている[7]。従来システムでは、E位相調整室から蓄積リング1周に渡ってEOで光に変換された信号を送り、光結合器を使ってその信号の一部を取り出し、それぞれのRFステーションで検出して使用していた。そのため、各ステーションで取り出される光信号強度が低くなり、ノイズフロアが高くなっていた。新システムでは、E位相調整室からそれぞれのRFステーションに1対1で伝送することにより、光信号強度を高くし、ノイズフロアを低減させた。

2.2 加速空洞電圧の位相振幅検出

SPring-8 蓄積リングの従来システムでは空洞のピックアップ信号の振幅検出にはダイオード検波器を、位相検出については、508.58 MHz の基準信号と、ピックアップ信号とを 1 MHz にダウンコンバートし、フリップフロップ回路に入力することで位相信号を得ていた。8 つの空洞のピックアップ信号からベク

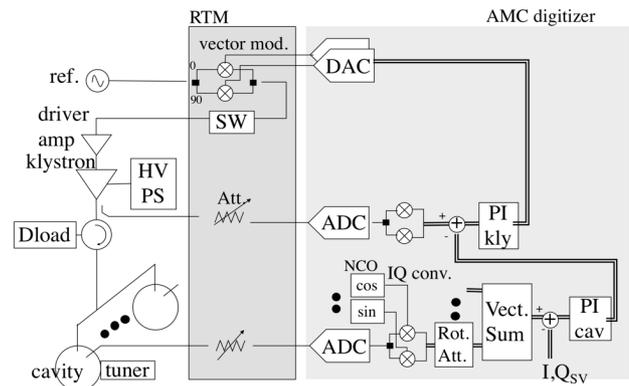


Figure 2: A block diagram of a MTCA.4 based LLRF system.

トル和信号を得るには、各空洞の信号に対して 0.1 dB 単位のステップアッテネータで振幅を、トロンボーンで位相を調整した上で、電力合成を行っていた。

新システムでは、8つの空洞のピックアップ信号を個別にADCに入力し、IQ検出を行う。蓄積リングのRF周波数(508.58 MHz)領域の信号をIQ検出する場合、従来は中間周波数にダウンコンバートして検出することが多かった。この方式の短所としては、非線形素子であり環境の影響を受けやすいミキサを使うこと、ローカルオシレータが別途必要となること、また、これらの回路を実装するためにスペースが必要となることが挙げられる。そこで我々は、サンプリングクロックよりも高い周波数のRF信号をADCに入力して検出するundersampling方式を採用することとした。ADCのクロックを基準信号の周波数の5/7倍(~363 MHz)に設定すると、ADCから出力されるデータ列はRF信号の2/7倍(~145 MHz)の中間周波数(IF)を持つ。Figure 3に示すように、このデータ列は、5クロック中で2回振動する波になる。ADCクロックを元に数値制御した発振器(Numerically Controlled Oscillator NCO)で正弦波、余弦波を出力し、IF信号との積の平均を取ること

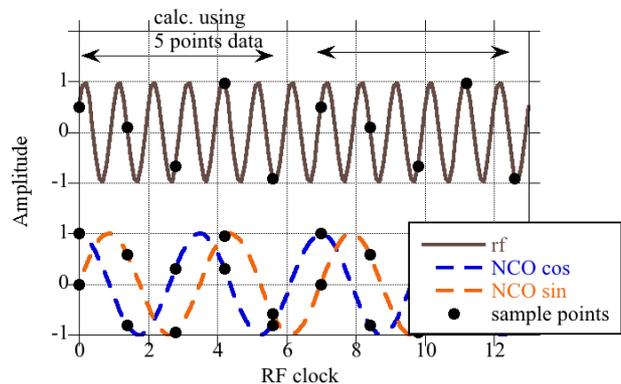


Figure 3: An input rf signal, NCO sine and cosine signals. Sampling points of the rf signal are shown with circles.

In-phase (I)成分, Quadrature (Q)成分を得る。I, Q の成分から振幅 r 、位相 θ への換算式は

$$r = \sqrt{I^2 + Q^2}, \quad \theta = \tan^{-1} \frac{Q}{I} \quad (1)$$

で得る。ベクトル和は 8 組の (I, Q) のベクトルに対して、適切な回転行列 (Rot.)、定数倍 (Att.) をかけることで位相、振幅の調整を行い、加算することで得る。これらの演算は AD 変換器を実装している AMC ボード上の FPGA ファームウェアで実施している。

Undersampling 方式での高精度 RF 位相・振幅計測を実現するために、広帯域、高速クロックで動作するデジタイザが必要となる。我々は MTCA.4 規格の AMC デジタイザ、このデジタイザに接続される信号処理用 RTM、および、ADC 用クロックを発生する eRTM を新規開発した。高速デジタイザの分解能は 16 bit、サンプリングクロックは 370 MHz、10 チャンネル入力の仕様とした。また、基準 RF 信号、ADC クロック信号を複数の AMC、RTM に供給するために、RF backplane[8]付きのクレートを採用した。これにより、省配線を実現した。

2.3 ベクトル和の位相振幅の安定化

従来システムでは、フィードバック制御にオペアンプを使った比例制御を行うフィードバックコントローラを使用していた。位相変調には移相器、振幅変調には RF モジュレータを使用している。ベクトル和の目標値は VME から与えていた。

新システムでは、クライストロン励振信号の変調は DAC と IQ 変調器の組み合わせを用いており、FIR や IIR フィルタ、PI 制御利得などを数値で設定し、演算によって制御量を求めている。これらの演算はデジタイザに実装された FPGA 上のファームウェアで実施している。加速電圧の設定値は位相・振幅で与えられるが、フィードバックは I、Q の直交座標に分割してそれぞれの軸方向でのフィードバックを行う方式を採用した。フィードバックは、クライストロン高電圧電源のリップルなどを抑制することを目的とした広帯域のクライストロン系、空洞の温度変化やビームローディングなどを抑制することを目的とした狭帯域の空洞系の 2 段構成とした。

2.4 空洞の同調

空洞の共振状態の維持は、空洞に入力される信号と、空洞のピックアップ信号との位相差を一定に保つように空洞に取り付けられたチューナーの位置を制御することにより実現している。

従来システムでは、2.2 節、2.3 節に示したものと同様のアナログ回路で位相検出、フィードバック制御を行っていた。

新システムでは、MTCA.4 の CPU 上で動作するプロセスが、数値データとして取得されている位相値を元にチューナーの位置を制御している。チューナーを駆動するパルスモータコントローラ、チューナーのエンコーダ読み取り装置と MTCA 機器との間は EtherCAT にて通信し、多数のアナログ配線、制御配線を省略することができた。

2.5 変調アノード電圧制御

クライストロンの RF 出力を制御する場合、励振入力 RF 電力を変えるだけでなくクライストロンのビーム電流も制御すると、電力効率を大きく損なうことなく低出力から高出力まで制御することができる。ビーム電流は、クライストロンのアノード電極に印加した電圧を変えることにより制御できる。

従来システムでは、ドライバアンプの出力電力を検出し、その値がターンアップ出力より低い領域では一定のアノード電圧、それ以上ではドライバ電力に比例して増加するアノード電圧を設定するアナログ回路のモジュールが使用されていた。この方式では、ターンアップ出力が高出力時の飽和点を超えてはいけないうこと、クライストロンがオーバードライブにならない領域であることなどの要請があるため、中間出力電力時にはコレクタ損失の大きな領域を通過することになっていた。

新システムでは、MTCA.4 の CPU 上で動作するプロセスが、IQ 検出したクライストロン出力を元に予め登録しておいた数値テーブルに従ってアノード電圧を設定する方式をとった。これにより、従来の回路では困難であった中間出力電力時のコレクタ損失抑制が実現できる。

2.6 インターロック動作

高周波加速システムでは、空洞入力カップラでのアーク発生、空洞内真空度の悪化、クライストロン電源の異常、空洞冷却水流量の低下など様々な要因で RF スイッチを遮断するインターロック動作を行う必要がある。

従来システムでは、NIM 規格のモジュールでインターロック信号を取りまとめ、RF スイッチの制御を行っていた。

新システムでは、EtherCAT 通信機能を実装したインターロックモジュールを新規に製作した。取り合いは信頼性と互換性を考慮し、基本的に従来の NIM モジュールと同様の Dsub コネクタ、ピン配置、信号レベルとした。インターロックモジュールで集約した異常信号は、クライストロン励振出力を制御している AMC モジュールに伝送され、RF スイッチを停止させる。

3. 新システムでできたこと

2018 年 2 月に RF ステーションの一つである A ステーションに MTCA システムを導入した。そこで得られた性能に関して報告する。

3.1 占有空間の削減

MTCA.4 規格のモジュールを用いたシステムにより、LLRF システムの機器の占有する空間を大幅に削減することができた。Figure 4 に A 位相調整室の LLRF システムを取めたラックの図を示す。ここには LLRF 用に 8 台、VME 制御用に 1 台の合計 9 台の 19" ラックが設置されていた。新しいシステムで使用している箇所はおおよそ 19" ラック 3 台分程度であり、大幅な空間の節約につながった。また、保守用

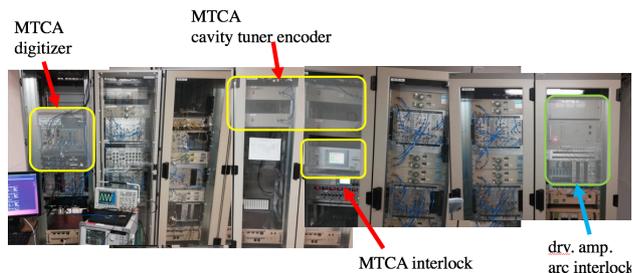


Figure 4: A photo of the 19" racks at the Low Level RF control room. The occupied space by the new RF system was indicated by rounded rectangles, which were drastically reduced compared to the old system.

の機器の種類及び数も減らすことが可能となった。

3.2 クライストロン アノード電圧の制御

2.5 節で示したように、アノード電圧の制御を MTCA.4 規格のモジュールで行った。Figure 5 にアノード電圧を一定とした際のドライバ電力とクライストロン出力の関係を示す。従来の方式では、クライストロン出力が 100~400 kW 付近でコレクタ損失の大きな領域を通過することとなっている。新しいシステムでは、まだ調整途中の段階であるが、クライストロン出力の増加とともにドライバアンプ出力を下げるパターンも設定することができ、コレクタ損失を低く抑えることができています。

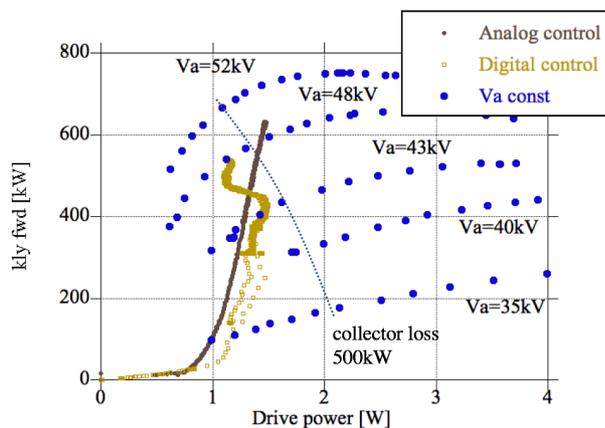


Figure 5: Responses between the drive power and the klystron output power with the analog system (square symbol) and the MTCA.4 system (filled circle). Blue dots show the response at constant anode voltage.

3.3 フィードバック動作とノイズの大きさ

空洞ピックアップ信号に、小さな振幅変調を外乱として加え、オープンループ特性、クローズドループ特性の測定を行った。結果を Fig. 6 に示す。加速空洞の閉ループ特性の-3 dB 帯域はおよそ 20 Hz 程度である。これは、外乱の対象が温度変動など遅い周波数であること、コヒーレントなシンクとロトン振動などビームに対する干渉を抑えることを考慮して

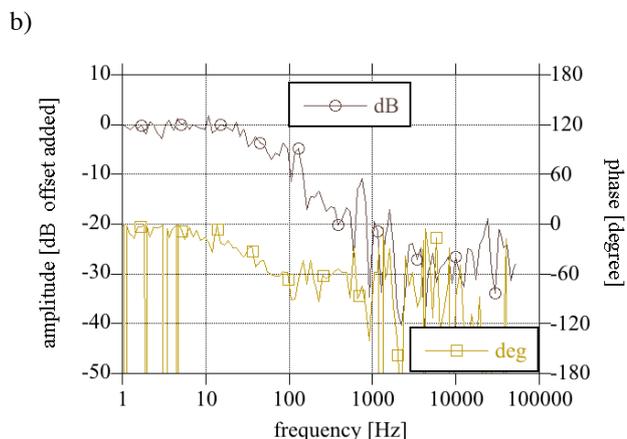
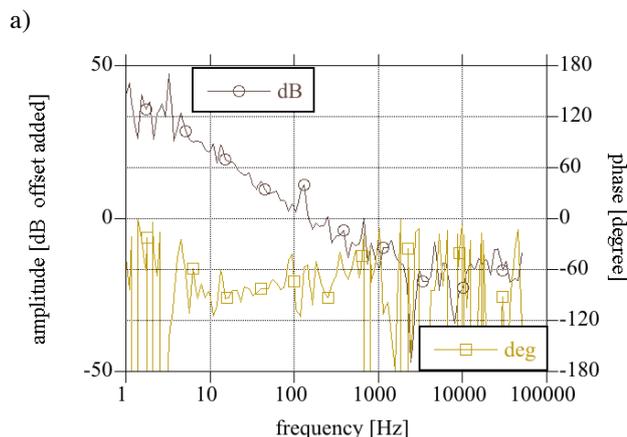


Figure 6: Measured Bode plots of the cavity feedback control of an open loop (a) and a closed loop (b).

選んだ。一方、クライストロンの閉ループ特性は、高電圧電源のリップルを抑制するために、10kHz 付近まで帯域を伸ばした設定とした。

100 mA の蓄積電流の通常運転の条件で、加速空洞の位相のノイズ、AM ノイズのスペクトラムを A ステーションで計測した。比較のために、アナログ回

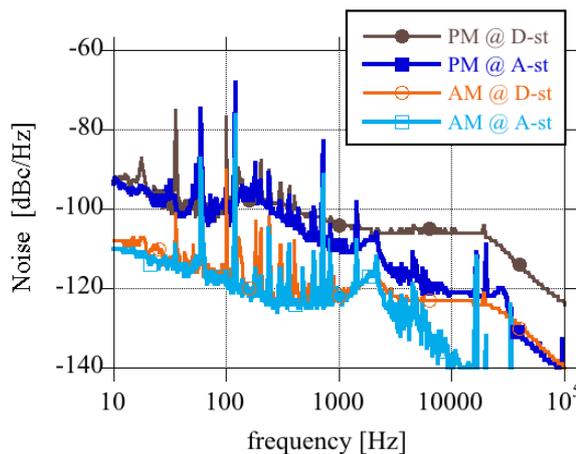


Figure 7: PM and AM noise spectrum of a cavity pickup signal measured at the A-station and D-station.

路の LLRF システムで動作している D ステーションでも計測を行った。Figure 7 に結果を示す。10 Hz から 100 kHz まで積分した位相ノイズの大きさは、A ステーションが 342 fs rms、D ステーションが 321 fs rms で、それぞれ位相換算で 0.0591 度、0.0587 度に対応する。AM ノイズの積分値は、A、D それぞれ 0.037%、0.024% であった。A、D ステーションともに、要求値である位相変動 0.1 度以下、振幅変動 0.1% 以下を満足している。

3.4 異常時の波形収集

MTCA.4 システムの高速通信機能を活かして、インターロック発生前後の進行波、反射波などの波形を自動で収集する仕組みを構築し、原因の究明などに活用している。例として、Fig. 8 に空洞で反射が発生した時の空洞ピックアップ信号(pu)、空洞への入力信号(fwd)、空洞からの反射信号(bwd)の電圧波形を示す。空洞からの反射波が徐々に増加し、20 μ s 後にインターロックの閾値に達してクライストロン出力が停止している様子が見られる。

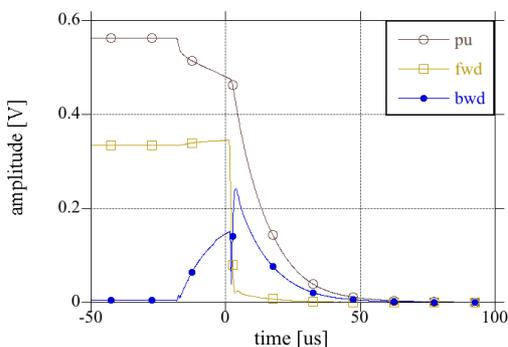


Figure 8: An example of measured waveforms at an abnormal event. Each line shows waveform of a cavity pickup signal (open circle), a cavity feeding signal (square) and a reflected signal from the cavity.

3.5 発生したトラブル

新しいシステムを導入して直面したいくつかの事項について報告する。

クレートの電源を投入した際に、挿入されているボードと通信ができない場合があった。また、MCH はボードを認識しているが、CPU は認識していない状況も発生することがあった。現状でも完全にはこの状況を克服することはできておらず、電源のオフオンを数回繰り返す対処を余儀なくされる場合がある。

8 台の空洞のピックアップ、進行波、反射波、クライストロン関連の信号などの検出には 4 セットの AMC と RTM が用いられている。電源のオフオンを行なった後では、4 台の AMC モジュールの NCO の位相関係は一般に不定となる。正しく動作させるためにはこれらを同期させる必要がある。このために、基準 RF 信号を分周した信号を 4 台の AMC に入力するようにした。

極座標で位相、振幅を制御する場合と異なり、IQ 座標で独立して制御を行う場合、現在値、目標値、制御値の位相が離れていない場合は安定であるが、制御値の位相が 90 度以上ずれている場合は正帰還となり系は発振する。この状態とならないように位相関係を制御する必要がある。我々は、この機能を実現する位相制御機能をデジタイザの firmware に実装し、現在は安定な動作を行っている。

4. まとめと今後

SR の 4 つの RF ステーションのうちの 1 つ A ステーションの LLRF システムをアナログベースの回路から MTCA.4 規格のモジュールに更新した。2018 年 4 月から 8 月現在までの運転で、いくつかのトラブルもあったが、現在は順調に運転が継続されており、その位相安定度は 0.06 度、振幅安定度は 0.037% であり、要求精度である 0.1 度以下、0.1% 以下を満足している。

今後、新システムの改良を継続する。また、残りのステーションに対する LLRF システム更新は、2018 年度末に D、2019 年度に B、C を予定している。

謝辞

本システムの更新は多くの方々の協力なしには実現できなかった。感謝の意を表したい。特に MTCA.4 規格デジタイザ AMC ボードの開発、ファームウェア制作に協力いただいた三菱電機特機システムの漁師氏、岩城氏をはじめとする方々、信号処理 uRTM モジュール、クロック eRTM モジュールの開発に協力いただいたキャンドックスシステムズの埜下氏、仙石氏、桑原氏、田嶋氏、インターロックモジュールの開発に協力いただいたアイデン門田氏、システムの入替えにおいて、配線作業などに協力いただいたスプリングエイトサービスの方々に感謝する。

参考文献

- [1] M. Hara *et al.*, "RF Stations of the SPring-8 Storage Ring", Proceedings of the 17th Particle Acc. Conf., Vancouver, U.S.A., May 12-16, 1997, pp.2971-2973.
- [2] <https://techlab.desy.de>
- [3] <https://www.picmg.org/openstandards/microtca>
- [4] J. Branlard *et al.*, "The European XFEL LLRF System", Proceedings of the 3rd Int. Particle Acc. Conf., New Orleans, USA, May 20-25, 2012, pp.55-57.
- [5] T. Ohshima *et al.*, "Development of a New LLRF System Based on MicroTCA.4 for the SPring-8 Storage Ring", Proceedings of the 8th Particle Acc. Conf., Copenhagen, Denmark, May. 14-19, 2017, pp. 3996-3999.
- [6] T. Schilcher, "RF application in digital signal processing", CERN Accelerator School, Sigtuna, Sweden, 31May-9Jun 2007, pp. 249-283.
- [7] Y. Ohashi *et al.*, "Performance of the Reference and Timing System at SPring-8", Proceedings of International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control System 2001, California, USA, pp. 641-643.
- [8] Krzysztof Czuba, "RTM RF Backplane Extensions for MicroTCA.4 Crates", 20th Real Time Conference, Padova, Italy, 5-10, June 2016.