

KEK-PF リング用ローレベル RF 系更新の進捗 PROGRESS REPORT ON THE UPDATE OF THE LOW-LEVEL RF SYSTEM AT KEK-PF RING

内藤 大地*, 山本 尚人, 高橋 毅, 本村 新, 坂中 章悟

Daichi Naito *, Naoto Yamamoto, Takeshi Takahashi, Arata Motomura, Shogo Sakanaka
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

We are replacing the low-level RF (LLRF) system at the KEK PF-2.5-GeV ring. The new LLRF system is composed of digital boards based on the MTCA.4 standard. For RF detection, we adopted the direct sampling method with non-IQ technique. Its sampling clock was set to be 8/13 (307.75 MHz) of the RF frequency, where the denominator (13) is the divisor of the harmonic number (312) of the storage ring. For the RF control, we adopted the amplitude and phase feedback loops. Production of the new system has been completed and we are in the high-power testing with the RF system of the KEK PF-2.5-GeV ring. In this paper, we report on the status of the high power tests.

1. はじめに

KEK Photon Factory (PF) の 2.5 GeV リングでは現在、2023 年秋の運転に向けて low-level RF (LLRF) システムの更新を進めている。更新ではアナログ回路群で構成された LLRF [1] を、MTCA.4 規格のデジタル回路群に置き換える。本発表ではインストール状況と、デジタル LLRF と RF ハイパワー系を組み合わせた大電力試験の進捗について報告する。

2. RF システムの概要

Figure 1 に LLRF 更新後の PF 2.5 GeV リングの RF システムの概要を示す。また Table 1 に RF システムの基本パラメータを示す。システムは空洞の真空やクライストロンの温度等を監視する低速インターロック、RF 反射信号を監視する高速インターロック (FITL)、RF 制御を行う LLRF、ハイパワー系に分かれている。低速インターロックは PLC のモジュール群で構成され、高速インターロックと RF 制御は MTCA.4 規格のモジュール (1 組の AMC ボードと μ RTM ボード) で構成される [2]。高速インターロックは 1 つのモジュールで 2 系統分の低速インターロック信号と反射信号を監視する (Fig. 1 中の FITLA、B)。インターロックが発報した場合は RF 制御部からの RF 出力を即座に停止させる。RF 制御は 1 つのモジュールで 1 系統のハイパワー系を制御する (Fig. 1 中の LLRF 1, 2, 3, 4)。

次に Fig. 2 に示した RF 制御とハイパワー系の取り合いについて簡単に説明する。RF 制御部では空洞への入力 RF 信号を使った PI 制御でハイパワー系を制御する。またこの PI 制御のリファレンスには空洞のピックアップ信号を使った PI 制御の出力を用いており、ダブルループ構造となっている [2]。空洞電圧の安定性については振幅が $\pm 0.1\%$ 、位相が $\pm 0.1^\circ$ を目指している。この RF 制御部には下記 4 点の特色がある。

- ADC での RF 検出に Non-IQ ダイレクトサンプリング法を導入。

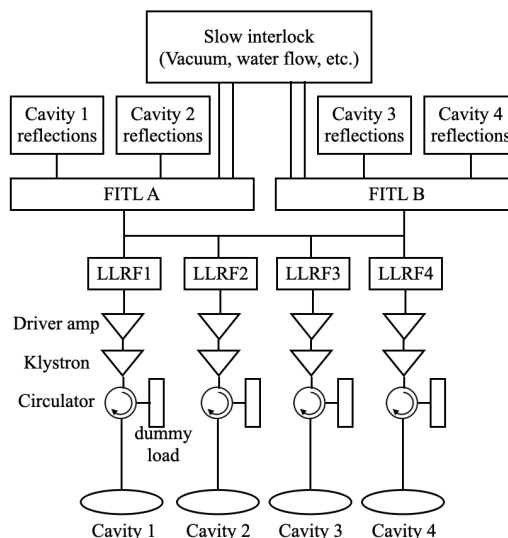


Figure 1: The schematic view of the RF system including the new LLRF system for the KEK PF-2.5-GeV ring.

Table 1: The Principal Parameters of the RF System for the Photon Factory Storage Ring

Parameter	Value
Number of cavities	4
Radio frequency	500.1 MHz
Harmonic number	312
Cavity voltage per cavity	0.425 MV
Beam current	450 mA
Klystron power per cavity	72 kW

- ADC のサンプリングクロックを 307.75 MHz(RF 周波数の 8/13 倍) に設定。
- RF 信号を IQ 値から振幅位相に変換してフィードバック制御。
- 任意の振幅/周波数の FM 変調及び AM 変調を RF

* daichi.naito@kek.jp

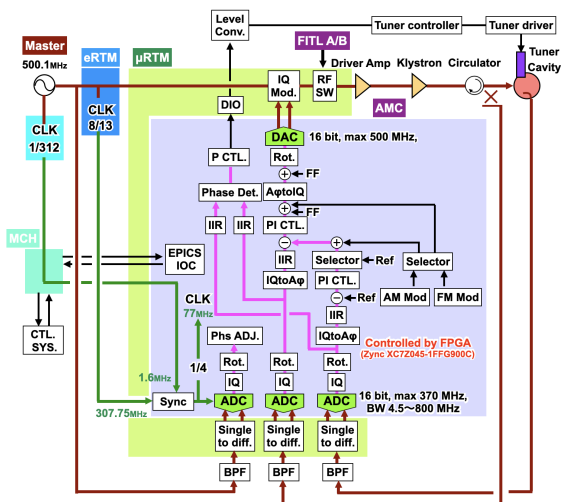


Figure 2: The schematic view of the RF control part.

信号に重畳可能。

このうち Non-IQ ダイレクトサンプリング法と振幅位相によるフィードバックは既に SPring-8 で導入されており [3]、我々のデジタル LLRF はこれらを踏襲している。我々のシステムの特筆すべき特徴は 312(リングの harmonic 数) の約数である 13 を分母に持つ、 $(8/13) \times (\text{RF 周波数})$ を ADC のサンプリングクロックに設定したことである。これにより IQ 値を 24 回取得するタイミングと電子バンチがリングを 1 周するタイミングが一致し、いつもバンチトレインの同じ位置の振幅/位相が測定可能になった。

Figure 3 に PF 2.5 GeV リングで実際に測定したバンチ変動を示す。黒線が新規 LLRF システムでビームポジションモニターの信号を取得してバンチ位相を計算した結果を、赤線が PF 2.5 GeV リングで bunch by bunch feedback に用いている iGP [4] でバンチ位相を測定した結果である。なお、LLRF での測定の際には専用のバンチ位相モニター用ファムウェアを用いた。iGP が 40000 ターン分のデータからバンチ位相を再構成しているのに対して、デジタル LLRF システムではわずか 100 ターン分のデータからバンチ位相を再構成できている。既存のシステムに比べて非常に高速なバンチ位相の再構成ができています。また PF 2.5 GeV リングでは将来計画として再構成したバンチ位相から空洞電圧の補正パターンを作成し、各バンチの位相変動をリアルタイム補正することを検討している。

3. 新規 LLRF のインストール状況

PF 2.5 GeV リングでは 2022 年度にデジタル LLRF 系実機の製造を行った。2023 年 8 月現在、デジタル LLRF システムは全て現場に設置済みとなっている。Figure 4 にデジタル LLRF システムの写真を示す。LLRF システムは 19 インチラックに収められており、外部からの入力信号及び出力信号は天井のタッチパネルに集約されている。高速インターロック及び RF 制御部は写真中央部の MTCA.4 規格のシェルフに収められている。タッチパネルからの入力信号は写真に示されたバンド

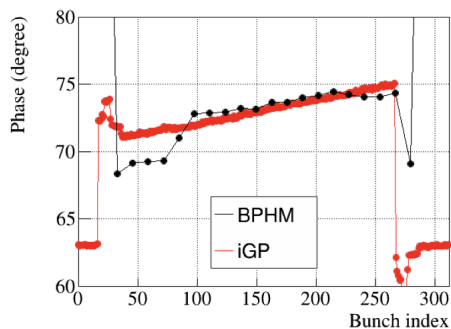


Figure 3: The phase shift of the electron bunch measured by the digital LLRF and the iGP. The fill pattern consisted of 250 bunches and 62 empty RF buckets.

幅 50 MHz のバンドパスフィルターを介して各ボードに入力される。またシェルフの下部には RF 制御部から出力したチューナー用信号を絶縁して 3V から 5V に変換するモジュールが置かれている。新規 LLRF システムとハイパワー系との接続については既存のアナログ LLRF とハイパワー系の接続用タッチパネルを再利用する。接続用タッチパネルと新規 LLRF までの配線は既に完了しており、いつでもアナログ LLRF から新規 LLRF に切り替えが可能な状態になっている。現在は 1 系統ずつアナログ LLRF からデジタル LLRF に切り替えて試験及び調整を行っている。

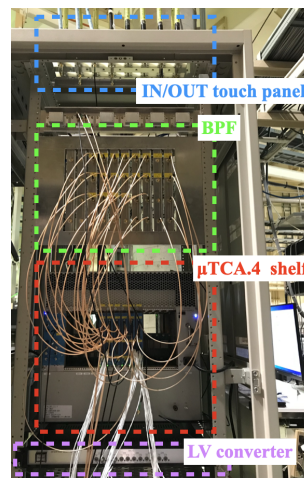


Figure 4: Photo of the new LLRF system.

4. 新規 LLRF のハイパワー試験

2023 年 4 月に LLRF が納入されてから 6 月までは LLRF 単体での性能評価を行ってきた。本発表では紙面の都合上これらの結果については省略し、7 月から行っている大電力試験のうち、クライストロンフィードバック試験、アナログ/デジタル LLRF 安定性比較試験、デジタル LLRF 系遅延測定、ダブルループフィードバック試験、安定性試験について報告する。

4.1 クライストロンフィードバック試験

Figure 5 に示すように空洞の代わりにダミーロードを繋いでクライストロン単体の制御試験を行なった。クライストロンの制御は Fig. 2 中の制御のうち、空洞ピックアップ系を切り離して空洞入力系のフィードバック単体で行なった。この時、PI 制御手前の IIR フィルターのカットオフ周波数は 10 kHz に設定した。また PI 制御の目標値は Fig. 5 中のパワーメーターでのモニター値がビーム運転時と同じ 80 kW になるように設定した。そして PI 制御の設定値を変更していき、ADC で観測される RF 信号の安定性を評価した。ADC で取得した振幅と位相は 26 μ s おきにサンプルし、4096 点分を 1 波形として記録した。

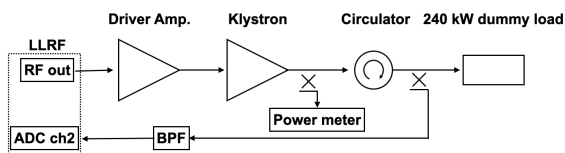


Figure 5: Experimental setup of the klystron control test with the digital LLRF.

Figure 6 にクライストロン出力の振幅の安定性、Fig. 7 に位相の安定性を示す。いずれのグラフも横軸が比例ゲインの設定値、縦軸が積分ゲインの設定値を示す。振幅の安定性については 1 波形分の分散の平方根を σ_A 、振幅の平均を M_A とおくと

$$Unstability = \frac{\sigma_A}{M_A} \times 100 [\%] \quad (1)$$

とした。位相の安定性は 1 波形分の分散の平方根とした。いずれの分布も比例/積分ゲインの設定値がそれぞれ 2 と 5000 程度の時が最も安定という結果になった。この時の安定性は振幅が $\pm 0.01\%$ 、位相が $\pm 0.05^\circ$ となり、目標とする振幅安定性 $\pm 0.1\%$ 、位相安定性 $\pm 0.1^\circ$ を十分満たす結果となった。

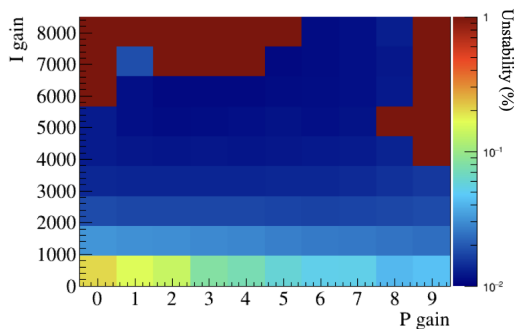


Figure 6: Unstability of the klystron-output amplitude with respect to the parameters of P gain and I gain.

4.2 アナログ/デジタル LLRF 安定性比較試験

アナログ/デジタル LLRF それぞれでクライストロン単体を制御した際のクライストロン出力を、スペクト

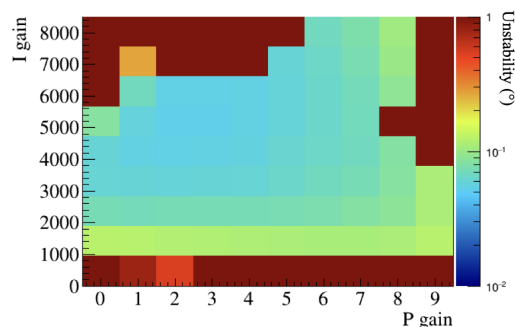


Figure 7: Unstability of the klystron-output phase with respect to the parameters of P gain and I gain.

ラムアナライザーで比較した。この測定ではどちらの LLRF 共にクライストロン出力パワーが 20 kW になるように制御を行なった。またデジタル LLRF のフィードバックでは比例/積分ゲインの設定値をそれぞれ 2 と 750 に設定して行なった。狭い周波数領域で比較したスペクトラムを Fig. 8、広い周波数領域で比較したスペクトラムを Fig. 9 に示す。どちらの図でもアナログ/デジタル LLRF でフィードバックをオフした時のスペクトラムが黒線と緑線、フィードバックをオンした時のスペクトラムが赤線と青線となっている。またグラフが見やすいようにアナログ LLRF のスペクトラムには 40 dB のオフセットをつけている。

Figure 8 で見えているピークは主に 60 Hz(商用周波数)の高調波で、中でも 600 Hz と 1.2 kHz の成分が大きかった。これらのピークはフィードバックをオンすることでアナログ/デジタル LLRF とともに大きく減衰できており、アナログ LLRF でのフィードバックの方が 3 dB 程度減衰量大きいという結果になった。

Figure 9 ではアナログ LLRF でフィードバックオンすると 22 kHz 付近にピークが発生することが判明した。PF 2.5 GeV リングのシンクロトロン周波数は約 23 kHz であり、このピークがビーム運転中に誘起されているシンクロトロン振動の原因の可能性がある。またアナログ LLRF でフィードバックをオンにすると 15 kHz 以上でノイズフロアが上昇しており、こちらもシンクロトロン振動を誘起する原因となりうる。これらの比較結果よりデジタル LLRF に置き換えることで安定性の向上が見込めると結論した。

4.3 デジタル LLRF 系遅延測定

Figure 10 に示すように通常通りクライストロンを空洞に接続した状態でデジタル LLRF 系の RF 信号遅延量を測定した。測定は Fig. 2 中のダブルフィードバック制御ダイアグラム通りに信号を接続し、フィードバック自体はオフに行なった。そして Fig. 2 中の極座標/IQ 変換直下の FF 入力を用いて、DIO からの外部信号をトリガーとした幅 1 μ s のインパルス信号を DAC から出力した。インパルス信号の強度は空洞への入力パワーがベースラインで 21 kW、インパルスのピークで 25 kW となるようにした。遅延量の測定はデジタル LLRF に備わった内部波形記録機能を用いた。制御の各

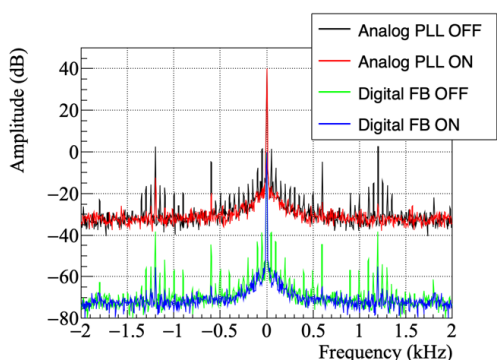


Figure 8: The narrow-span power spectrum of the Klystron output controlled by the analog LLRF and digital LLRF, respectively.

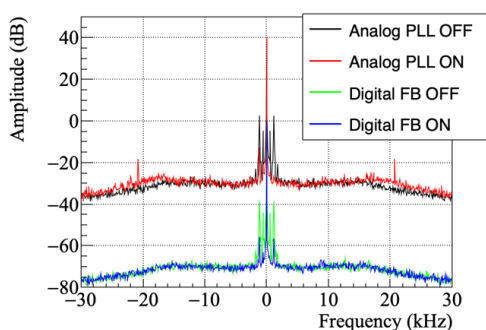


Figure 9: The wide-span power spectrum of the Klystron output controlled by the analog LLRF and digital LLRF, respectively.

ブロックでの波形を外部信号をトリガーに記録し、ブロック間でのインパルスの到達時間差を遅延量とした。

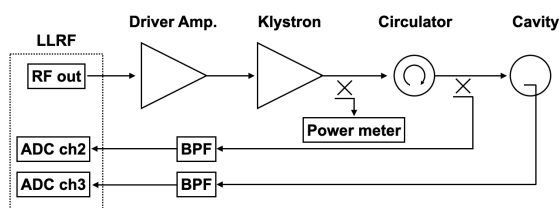


Figure 10: Experimental setup of the RF high-power test with the digital LLRF.

Figure 11 に測定結果を示す。デジタル LLRF の出力がハイパワー系を伝送され、空洞のピックアップ信号としてデジタル LLRF に到達する時間は $1.33 \mu\text{s}$ であった。デジタル LLRF 内での遅延は ADC から FPGA へデータ転送して IQ 値を計算する部分が $0.55 \mu\text{s}$ と一番大きかった。また次いで CORDIC アルゴリズムを用いた IQ から振幅位相への変換/逆変換が $0.34 \mu\text{s}$ と大きかった。RF システム全体の遅延としては $2.73 \mu\text{s}$ という結果になった。これらの遅延量は PF リングでの使用では問題になっていない。しかし KEK 将来光源において振幅/位相を安定化するためにより速い周波数成分

でフィードバックする必要が出てきた場合には、遅延を減らす工夫が必要になってくる。

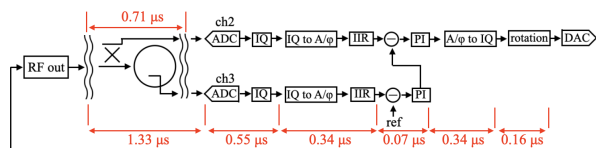


Figure 11: The result of the delay measurements in the digital LLRF system.

4.4 ダブルループフィードバック試験

空洞での損失パワーがビーム運転時と同じ 25 kW になるようにダブルフィードバックで制御し、空洞ピックアップ信号の振幅/位相安定性を評価した。試験では空洞入力信号と空洞ピックアップ信号用の IIR フィルターのカットオフ周波数をそれぞれ 10 kHz と 20 Hz に設定した。また空洞入力制御系の比例/積分ゲインの設定値をそれぞれ 2 と 3000 に固定し、空洞ピックアップ制御系の比例/積分ゲインのスイープを行なった。

Figure 12 に空洞ピックアップの振幅の安定性、Fig. 13 に位相の安定性を示す。いずれのグラフも横軸が比例ゲインの設定値、縦軸が積分ゲインの設定値を示し、振幅/位相の安定性の定義は Sec. 4.1 と同じである。いずれの分布も比例ゲインが大きいと安定性が低下し、比例/積分ゲインの設定値がそれぞれ 2 と 100 程度が最も安定という結果になった。この時の安定性は振幅が $\pm 0.01 \%$ 、位相が $\pm 0.04^\circ$ となり、目標とする振幅安定性 $\pm 0.1 \%$ 、位相安定性 $\pm 0.1^\circ$ を十分満たす結果となった。

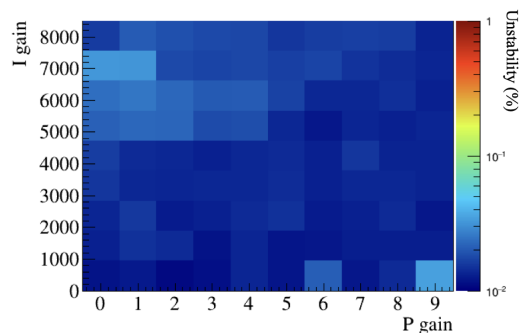


Figure 12: Unstability of the cavity-pickup amplitude with respect to the parameters of P gain and I gain.

4.5 ダブルループ安定性試験

前節で決定したダブルループのパラメータを設定し、空洞ピックアップ信号の安定性の時間依存性を評価した。この測定では参考のために eRTM から出力したマスターオシレーターの信号も ADC で測定した。それぞれの振幅/位相の値は 1 秒毎に更新される EPICS レコード値を 10 分毎に記録した。

Figure 14 に空洞ピックアップの振幅の安定性、Fig. 15 に位相の安定性を示す。安定性の定義は各時刻の振幅

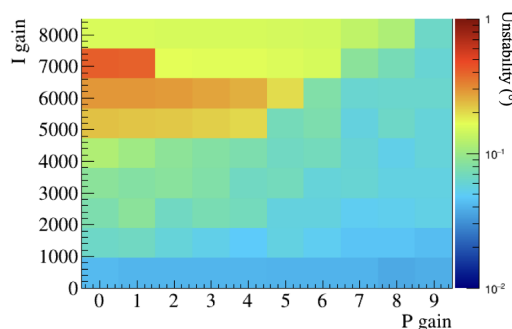


Figure 13: Unstability of the cavity-pickup phase with respect to the parameters of P gain and I gain.

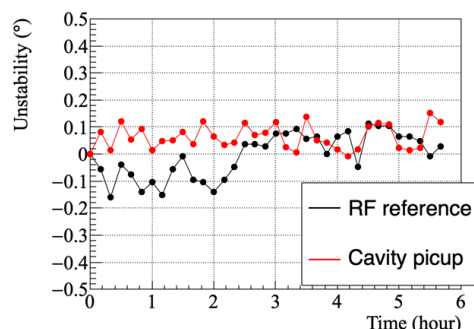


Figure 15: Time dependence of the cavity phase stability controlled by the digital LLRF.

を $A(t)$ 、位相を $P(t)$ とおくと

$$\text{Amplitude instability} = \frac{A(t) - A(0)}{A(0)} \times 100 \text{ [%]} \quad (2)$$

$$\text{Phase instability} = P(t) - P(0) \text{ [}^\circ\text{]} \quad (3)$$

とした。振幅安定性の時間変動の RMS は $\pm 0.01 \%$ 、位相安定性は $\pm 0.04^\circ$ となり目標を十分満たす値となった。次にマスター信号は非常に安定だと仮定し、ADC で測定したマスター信号から ADC 自身の変動による影響を大まかに見積もった。見積もりではマスター信号の変動の RMS を ADC の変動と等価と仮定し、空洞の振幅/位相の RMS との 2 乗和の平方根を計算した。ADC の変動を加味した振幅安定性は $\pm 0.03 \%$ 、位相安定性は $\pm 0.09^\circ$ となり、この場合でも目標性能を満たす事が分かった。ADC で観測されたマスター信号の変動は eRTM や途中の伝送経路での変動を含むため ADC の安定性は別途評価が必要だが、この結果より十分な安定性が期待できると結論づけた。

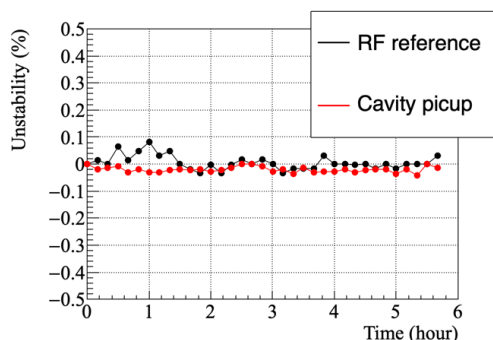


Figure 14: Time dependence of the cavity amplitude stability controlled by the digital LLRF.

5. まとめ

PF 2.5 GeV リングでは 2023 年度秋の運転に向けて LLRF システムの更新と調整を行っている。LLRF システムは MTCA.4 規格のデジタルボード群で構成され、ビームの周回に同期した RF 電圧変動やバンチ位相の

変動が測定可能という特徴を持つ。2023 年 4 月にデジタル LLRF が納入されてから性能評価及びデバッグを進めており、ソフトウェアの問題点は今のところ全て解決できた。現在は 1 系統のみ RF ハイパワー系とデジタル LLRF を組み合わせた調整が完了している。試験段階では空洞電圧の振幅/位相の安定性はそれぞれ $\pm 0.01 \%$ 、 $\pm 0.04^\circ$ となっており目標性能を十分満たす結果となった。今後は順次残りの 3 系統の調整も行っていき、11 月のビーム運転に向けて自動立ち上げシーケンスの開発/動作試験を進めていく。

謝辞

PF デジタル LLRF 開発にご協力、アドバイスいただいた KEK 加速器研究施設の小林鉄也氏、杉山泰之氏、二ツ川健太氏、松本利広氏、三浦孝子氏、日本原子力研究開発機構の田村文彦氏、SPRING-8 の大島隆氏に謝意を述べる。またデジタル LLRF の製作及びデバッグにご尽力いただいた三菱電機ディフェンス&スペーステクノロジーズの岩城孝志氏、北川隆太氏、寺田晃氏、張替豊旗氏、山崎伸一氏、漁師雅次氏に謝意を述べる。

参考文献

- [1] M. Izawa, S. Sakanaka, T. Takahashi, K. Umemori, "Present status of the Photon Factory RF system", Proceedings of the Asian Particle Accelerator Conference (APAC) 2004, Gyeongju, Korea, Mar. 2004, pp. 389-391.
- [2] D. Naito *et al.*, "The upgrade status of the KEK-PF low-level-RF system and performance test of their prototype", in the Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Aug. 2022, WEP044. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/WEP0/WEP044.pdf
- [3] T. Ohshima *et al.*, "Upgrade of LLRF system at SPRING-8 storage ring using MTCA.4 standard modules", in the Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 2018, pp. 55-59. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEOL/WEOL10.pdf
- [4] R. Takai *et al.*, "Bunch by Bunch Feedback System using iGp at KEK-PG", in the Proceedings of DIPAC09, Basel, Switzerland, May 25-27, 2009, pp. 59-61. <https://accelconf.web.cern.ch/d09/papers/mopd08.pdf>