

放射光施設ニュースバルの新入射加速器のタイミング・低電力高周波制御システム

TIMING AND LOW LEVEL RF CONTROL SYSTEM OF NEW INJECTOR LINAC FOR NEW SUBARU

大島隆^{#, A,B)}, 細田直康^{A,B)}, 前坂比呂和^{B)}, 岩井瑛人^{A,B)}, 出羽英紀^{A)}, 松原伸一^{A)}, 吉岡正倫^{C)}, 皆川康幸^{C)}, 稲垣隆宏^{A,B)}, 上島考太^{D)}

Takashi Ohshima^{#, A,B)}, Naoyasu Hosoda^{A,B)}, Hirokazu Maesaka^{B)}, Eito Iwai^{A,B)}, Hideki Dewa^{A)}, Shinichi Matsubara^{A)}, Masamichi Yoshioka^{C)}, Yasuyuki Minagawa^{C)}, Takahiro Inagaki^{A,B)}, Kota Ueshima^{D)}

^{A)}Japan Synchrotron Radiation Research Institute

^{B)}RIKEN SPring-8 Center

^{C)}SPring-8 Service Co., Ltd.

^{D)}National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology

Abstract

A new linear accelerator was constructed for the New SUBARU (NS), a 1.5 GeV synchrotron radiation facility. The accelerating frequencies used at the new linac are 238 MHz, 476 MHz, 2856 MHz, and 5712MHz. The required phase and amplitude of the accelerating field are 8.0×10^{-4} and 0.2 degree, respectively in the most severe case. Also, the master trigger of the linac must be synchronized with both the aimed bucket timing of the ring and the linac master clock. To fulfill these requirements, the timing system and Low-Level RF (LLRF) control system were developed using the modules of Micro Telecommunication Computing Architecture 4 (MTCA.4) standard. The master trigger and the clock of the linac are generated at the master unit located near the LLRF station of the ring, and are delivered to four LLRF subunits of the linac through the optical links. The phase and amplitude of the accelerating field are controlled based on In-phase and Quadrature (IQ) scheme. The achieved stabilities in rms are 7.0×10^{-4} in amplitude and 0.2 deg in phase, which satisfy the requirements. The operation of the NS has been carried out stably since April 2021 with no significant faults.

1. はじめに

兵庫県立大学が運営する 1.5 GeV 放射光施設のニュースバル (New SUBARU, NS) [1]では、従来、SPring-8 のための線型加速器からの電子ビームの一部を振り分けて入射してきた。しかし、2020 年に SACLA から SPring-8 蓄積リングへの入射が始まり、不要となった線型加速器のシャットダウンが予定された。そこで、新しい 1 GeV 線型加速器を NS 専用の入射器として建設することになった[2,3]。この入射器では電子銃のトリガタイミングジッタとして 5 ps 以内を達成することや、加速空洞の電界強度の変動量として、空洞の周波数ごとにばらつきはあるが、位相について 0.2 度、振幅について 8×10^{-4} が rms 値として要求されていた。この要求を満たすために、Micro Telecommunication Computer Architecture 4 (MTCA.4) 規格[4]のモジュールを中心に低電力高周波制御 (LLRF) システムの構築を行なった。この規格は DESY で開発が進められ、多チャンネルの信号をコンパクトなモジュールで処理できること、省配線、高速通信が可能、モジュールのマネジメント機能が充実していることなどの特徴を持つ。この規格のモジュールは EuroXFEL で大規模に使用されていて、SPring-8 の蓄積リングの LLRF にも導入

されている[5]。3 GeV 次世代放射光施設でも NS で構築したものと同様のシステムを導入する予定である[6]。入射器の高周波基準信号として、NS 蓄積リング(SR)の加速周波数の基準信号を分周通倍した信号を用いた。この信号は、位相安定化光ファイバーを用いた光送受信システムを経由して、入射器のクライストロンギャラリの 4 箇所に設置されたサブユニットまで伝送した。入射器のマスタートリガ信号は、AC 60 Hz、SR のバケットタイミングおよび入射器の高周波基準信号のゼロクロスとが合致するタイミングで出力し[7]、MTCA.4 規格のトリガシステムによって各サブユニットに伝送した。各サブユニットでは MTCA.4 規格の IQ 変調・検出器を用いて加速空洞に供給する高周波パルス信号の制御・モニタを行なった。新入射器は今年の 2 月から運転を開始し[2,3]、4 月からはユーザー運転が再開され安定な運転が行われている。本発表では、導入されたタイミング・LLRF システムの構成、達成された性能などについて報告する。

2. タイミング・LLRF システムの構成

2.1 線型加速器の構成と MTCA モジュール

線型加速器は Fig.1 に示すように、熱電子銃 (GUN)、238 MHz 加速空洞 1 台、476 MHz 加速空洞

[#]ohshima@spring8.or.jp

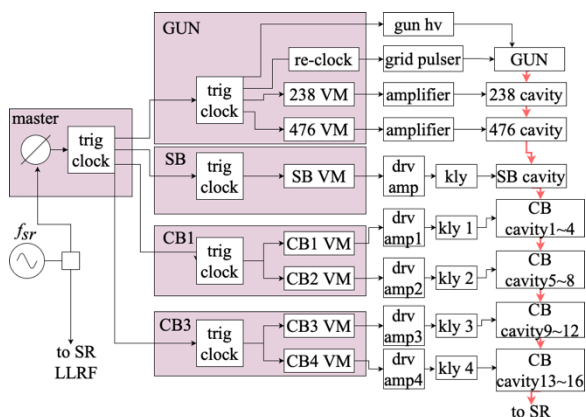


Figure 1: Block diagram of LLRF at NS the linac.

1台、2856 MHz (S Band, SB) 加速管 1本、5712 MHz (C Band, CB) 加速管 16本から構成されている。CB 加速部は、加速管 4本が1つのクライストロンに接続されたユニットが4式で構成されている。LLRF システムは、GUN、SB、CB1、CB3 の4つのサブユニットで構成される。GUN ユニットの電子銃、238 MHz 空洞、476 MHz 空洞の制御をし、SB はクライストロン 1台を、CB1 ユニットの、CB3 ユニットのそれぞれクライストロン 2台分の RF 系を制御する。この LLRF システムで使用した Advanced Mezzanine Card (AMC) や Rear Transition Module (RTM)などを Table 1 にまとめて示す。新規開発のコストや時間を節約するために、要求された機能を満たす市販の MTCA モジュールがあるものは、なるべく活用するようにしたが、タイミング同期 RTM のように代用できないものについては、モジュールの新規開発を行った。

2.2 線型加速器と蓄積リングのタイミング同期

線型加速器のマスタートリガ信号はパルス動作を行う機器のタイミング基準であり、ビーム出射タイミングの 15.5 ms 前に設定している。このトリガ信号は、AC 60 Hz 信号のゼロクロスタイミングと、線型加速器の基準 RF クロックのゼロクロスタイミングと同期させている。SR の狙ったバケットに線型加速器から入射を行うためには、このトリガ信号が SR のバケットタイミングと線型加速器の基準 RF 信号との両方に合致している必要がある。そこで、Li の RF 基準信号の周波数 f_i 238 MHz と、NS の SR の基準信号の周波数 f_{sr} 499.9555 MHz との間に有理数の関係、 $f_i = 308/647 f_{sr}$ を持たせることにした。この条件においては、 $T_{sync} = 308 / f_i$ 時間毎に f_i と f_{sr} とに同期したタイミングが現れ、SR のバケットタイミングは 647 だけずれる (Fig.2 参照)。狙ったバケット M と合致したタイミングは T_{sync} の $L = \text{mod}(M \times 71, 198)$ 倍だけ待ち時間を与えた場合に現れる [7]。ここで、 $\text{mod}(a, b)$ は a を b で割ったときの剰余を示し、71 は $\text{mod}(k \times 53, 198) = 1$ となる最初の k の値である。この機能を実現するタイミングシステムのブロック図を Fig. 3 に示す。この機能はタイミング同期 RTM モジュール (72TSR508B01) に実装した。バケットアドレスの選択はトリガ用 AMC (mmetrg01b) と接続されている Zone 3 コネクタ 経由で PC 規格の通信コマンドにより設定する。狙ったバケットのタイミングと、AC 60 Hz、 f_{sr} 信号、 f_i 信号に同期したマスタートリガがこの RTM から出力される。このマスタートリガ信号は mmetrg01b に対して Zone 3 コネクタ 経由で伝送される。これらのタイミングモジュールは SR の LLRF システムに隣接した 19" ラックに設置された。

Table 1: MTCA.4 Modules Used at the New Linac

| unit | name | supplier | location | Specifications [used condition] |
|---------------------|----------------|-----------|---------------|---|
| Digitizer AMC | SIS8325 | Struck | All sub units | 10 ch 250 Ms/s 16 bit ADCs, 2ch 250 Ms/s 16bit DACs [Clock frequency: 238 MHz @476, SB, CB units, 191 MHz @ 238 unit] |
| Trigger AMC | mmetrg01b | MDT | All units | 16ch front and 8ch backplane output, 24bit delay count, fine adjustment with 78 ps resolution [238 MHz clock input] |
| RF conditioning RTM | DWC8VM1 | Struck | > 238 MHz | 8 ch RF input with down conversion, 1ch vector modulation output, 2ch DC input [LO frequency: reference frequency - 238/4 MHz] |
| RF conditioning RTM | 72DSR238A01 | Candox | 238 MHz | 9 ch RF input for under sampling, 1ch vector modulation output, 1ch DC input |
| synchronizing RTM | 72TSR508B01 | Candox | Master unit | AC input, 500 MHz clock input, master trigger output, I2C control |
| MCH | NAT-MCH-PHYS80 | N.A.T. | All units | support GbE and PCIe Gen 3 |
| Power supply | MTCA.4 | W-ie-ne-r | All units | 1000 W output, low noise |
| Crate | 11850-026 | Uber | All sub units | 12 slots, fan speed control |

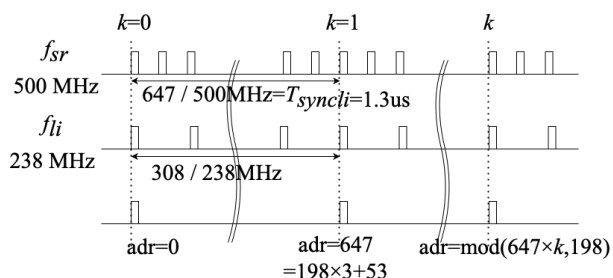


Figure 2: Timing chart of the RF reference clocks f_i and f_{sr} .

2.3 マスタトリガと RF 基準信号の伝送

mmetr01b には光伝送 SFP モジュールを挿入できるポートが 5 つあり、最大 4 台の子モジュールと信号伝送が可能である。Figure 3 に示すように、SR の LLRF 制御部に設置したマスタとなるトリガ AMC から、光ファイバーを通して線型加速器の 4 箇所のサブユニットの mmetr01b にスター接続を行った。各サブユニットの mmetr01b からは、例えば、インバータの充電開始・停止、モジュレータの放電開始、デジタル AMC へのトリガなどのトリガ信号が出力される。サブユニット GUN においては電子銃のグリッドに印加するトリガが最も厳しいジッタを要求する。ここには位相調整が可能な 238 MHz に再同期を行うモジュールを設置して精度を向上させた

RF 基準信号についても、線型加速器の RF 基準信号を EO モジュールを介してサブユニットに伝送する。光ファイバーとしては 6 芯の位相安定化光ファイバケーブルを複数本使用した。サブユニットの OE モジュールでは、受けた線型加速器の 238 MHz 基準信号からそれぞれのユニットで使用する加速空洞の共振周波数の信号 (reference 信号) を VCO および PLL 回路を使って生成している。OE モジュール内の OE 素子、バンドパスフィルタと PLL 回路は、ペルチェ素子を使った温度安定化板の上に実装している。サブユニットのクロック発生器では、ADC 用クロック信号、Down Conversion 用局発 (LO) 信号などを発生する。ADC 用クロック信号と LO 信号に対しては、マスタートリガのタイミングに同期するようにリセットを受け付ける機能を設けた。

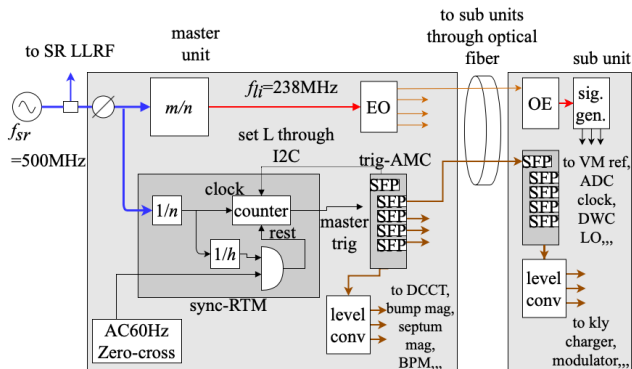


Figure 3: Block diagram of the clock and trigger distribution system.

2.4 LLRF 制御

加速空洞を励振する信号の生成、検出にはデジタル AMC と信号処理 RTM が使用される。Figure 4 に SB の LLRF のブロック図を例として示す。加速空洞を励振する信号のパルス成形、位相および振幅の設定は信号処理 RTM 内の IQ ミキサ (Vector Modulator, VM) をデジタル AMC 内の 2 チャンネルの DAC で制御することで行う。

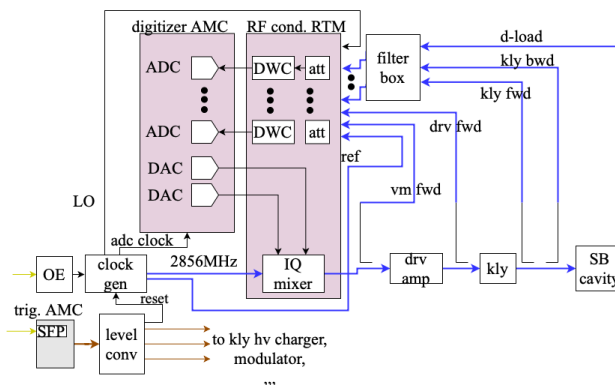


Figure 4: Block diagram of the LLRF system at SB.

RF 加速空洞の振幅・位相の計測には原則として DWC8VM1 を用いたダウンコンバージョンの方式を採用した。ADC のクロックとして 238 MHz を、中間周波数 (IF) としては、238 MHz の 1/4 の 59.5 MHz を用いた[6]。ただし 238 MHz 信号の検出には 72DSR238A01 を用いたアンダーサンプリングの方式を採用した。ここではクロックの周波数として 238 MHz \times 4/5 を用いた。空洞ピックアップや方向性結合器からの信号はバンド幅 40 MHz のフィルタボックスを経由して RTM に入力した。空洞が定格運転時におよそ 30 dBm の出力となるようにフィルタボックス内に固定アッテネータを挿入した。また、外部検出器による信号の確認が可能ないように一部を分岐したモニタポートを設けた。RF 信号処理 RTM には遠隔制御可能なアッテネータが実装されていて、定格運転時に ADC の検出電圧がおよそ 0.7 V になるように調整した。ADC で検出したデータから IQ 信号への変換処理は、ADC に実装された FPGA 内で行われる。DB には、トリガ信号からあらかじめ指定した遅延クロック数でのポイントデータを RF の運転繰り返し周期で記録している。RF 波形の確認を行う場合には 2k ポイントの IQ 波形データに対して DMA 転送を実施する。

空洞のピックアップ信号の位相が一定となるように、VM 位相を調整するフィードバックコントロールを実施している。このプロセスは、MTCA の CPU 上で動作する。このプロセスでは RF の運転繰り返し周期ごとにデータを収集し、PID 制御を実施する。RF 信号処理 RTM の温度変化に起因する位相読み取り変化の影響を低減するために、空洞ピックアップ信号と基準信号の位相との差が目標値となるように制御を行なっている。238 MHz、476 MHz、SB の空洞に対しては振幅の安定化のための VM 振幅の制御

も実施している。CB の加速管に対しては、クライストロン電源が高い安定度を有しているため、励振信号をクライストロンの飽和領域に設定し、VM での振幅制御は行っていない。

3. タイミング・LLRF システムの性能

3.1 マスタートリガのジッタと基準信号の位相雑音

同期 RTM から出力されるマスタートリガと分周通倍信号発生器からの 238 MHz クロック信号とのジッタは 6.3 ps rms であった。この信号は mmetrg01b に入力され、クロックによる再同期が取られる。タイミングジッタ許容値の厳しい電子銃のグリッドパルサへのトリガ信号については、位相調整が可能な 238 MHz クロック信号との再同期を行うユニットを追加設置している。この出力のジッタは 3ps rms であった。このジッタは 5 ps 以下の要求を満たしている。

サブユニットに伝送された RF 基準信号から生成された reference 信号の位相雑音のシグナルソースアナライザを用いて測定を行なった。オフセット周波数 10 Hz から 10 MHz までの積分を行った位相雑音の測定結果を Table 2 に示す。若干雑音の大きいユニットもあるが、概ね低い雑音で基準信号が伝送できている。

Table 2: Integrated Phase Noise of RF Signals at the Sub-units

| Frequency [MHz] | Integrated phase noise [fs rms] |
|-----------------|---------------------------------|
| 238 | 288 |
| 476 | 1062 |
| 2856 | 257 |
| 5712 | 248 |

3.2 VM の補正

RF 信号処理 RTM に実装されている VM には設定した位相・振幅に対して出力信号の無視できないひずみが見られた。これらの誤差はフィードバックコントロール制御を行う際に性能を悪化させる要因となり、誤差を小さく抑えることが望まれる。そこで、VM 出力を IQ 検出器に入力しそのひずみの大きさの計測を行った。DAC の設定は、位相 10 度ステップ、振幅 0.1 V ステップで 0 度から 350 度、0.1 V から 1 V までの範囲で計測を実施した。データから I、Q それぞれの DC オフセット、IQ 軸のゲイン誤差、IQ 軸の直交からの角度ズレの 4 つの補正パラメータを求めた[6]。CB の DWC8VM1 に対して測定した結果の例を Fig. 5 に示す。補正前は振幅の誤差が $\pm 20\%$ 、位相誤差が ± 20 度程度あった。補正後は振幅の誤差が $\pm 1\%$ 、位相誤差が ± 0.5 度程度にまで抑制することができた。

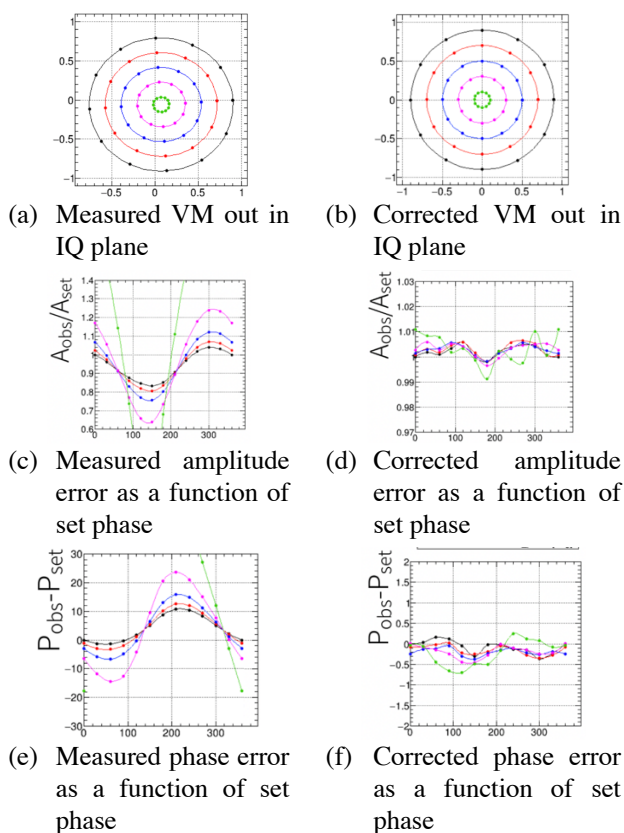


Figure 5: Measured (left) and corrected (right) VM output.

3.3 RTM 内蔵アッテネータの補正

通常の加速のために空洞を励振している場合と、ビームが空洞を通過するときに誘起する信号とは、信号強度が大きく異なる。RF 信号処理用 RTM の RF 入力部には遠隔操作によって最大 31.5 dB の減衰を与えられるアッテネータが設置されており、これを条件に応じて切り替えて運用することにした。アッテネータの振幅・位相の精度は以下の方法で測定した。一定の RF 信号の入力を行っている条件でアッテネータの設定を変更し、振幅比、位相差を求める。必要な精度が実現できるように入力信号強度を切り替え前記手順を繰り返す。Figure 6 に CB の DWC8VM1 に対して実施した測定結果の例を示す。アッテネータの設定値が 0 dB と 31.5 dB では位相がおおよそ 35 度ずれることが 2 度以下の精度で計測できた。

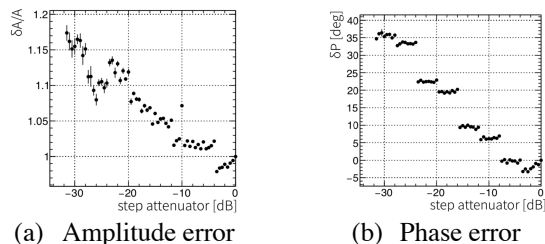


Figure 6: Amplitude and phase error of the remote-controlled attenuator in the DWC8VM1 of CB.

Table 3: Rms Values of RF Phase and Amplitude for 1 Hour

| Frequency [MHz] | Phase [degree] | dV/V |
|-----------------|-------------------|---|
| | Measured/Required | Measured/Required |
| 238 | 0.098 / 0.5 | $7.0 \times 10^{-4} / 8.0 \times 10^{-4}$ |
| 476 | 0.170 / 0.2 | $2.9 \times 10^{-4} / 1.5 \times 10^{-3}$ |
| 2856 | 0.107 / 0.5 | $6.4 \times 10^{-4} / 3.0 \times 10^{-3}$ |
| 5712 | 0.064 / 2.5 | $6.7 \times 10^{-4} / 3.0 \times 10^{-3}$ |

3.4 位相・振幅の安定度

加速空洞の種類によって RF の波形のパルス幅は異なり、238 MHz 空洞は $\sim 100 \mu\text{s}$ 、476 MHz 空洞は $\sim 50 \mu\text{s}$ 、SB 加速管は $\sim 1 \mu\text{s}$ である。CB 加速管では $3 \mu\text{s}$ のパルス幅だが、パルス圧縮のために $2.5 \mu\text{s}$ のタイミングで位相を 180 度反転させている。空洞励振の繰り返し周波数は 238 MHz、476 MHz および SB が 10 pps、CB が 1 pps である。各空洞のパルス波形の振幅および位相の例を Fig. 7 に示す。波形データの代表点として Fig. 7 の $0 \mu\text{s}$ のポイントの位相および振幅がデータベースにショットごとに記録されている。

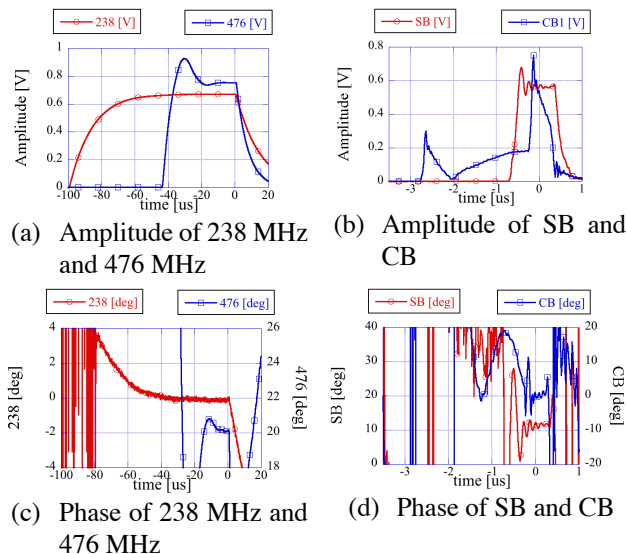


Figure 7: Amplitude and phase waveforms of pulsed RF signals.

コンディショニングが完了し、定常的な RF 運転が実施された状態で、各加速空洞の位相・振幅の安定度の計測を行った。連続 1 時間の位相および振幅を 1 秒の時間間隔で測定した。ただし、CB については放電などによる運転停止を除いた時間帯を選んだ。振幅、位相の rms 値を Table 3 に示す。これらの値は、要求された値を満足している。

4. まとめ

NS 用線型加速器の LLRF システムを MTCA.4 規格のモジュールを用いて構築した。構築したシステムは蓄積リングの目標とするバケットへの入射が可能であり、高周波空洞の位相の rms 値が 0.2 度以下、振幅の rms 値が 7×10^{-4} 以下と、要求を満足していた。蓄積リングへの入射効率も 90% を超える状態を定常的に実現している。今回導入したシステムは、3 GeV 次世代放射光施設にも導入予定であり、十分な性能を有していることが確認できた。

謝辞

LLRF システム構築に関しては多くの方々から協力をいただいた。すべてを網羅することはできないが、兵庫県立大学の橋本智氏、LLRF システムのモジュール製作に協力いただいた三菱電機特機システムの岩城氏、漁師氏、キャンドックスの仙石氏、桑原氏、佐久間氏、埜下氏、現場での測定を実施したスプリングエイトサービスの運転員の方々に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] S. Hashimoto *et al.*, “ニュースバル放射光施設の現状”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 9-12, 2021, THP057.
- [2] T. Inagaki *et al.*, “ニュースバル 1.0 GeV 新入射器の建設とコミッション運転”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 9-12, 2021, TUOB03.
- [3] T. Inagaki *et al.*, “ニュースバル新入射器における CB 主加速器のコンディショニングと運転状況”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 9-12, 2021, THP033.
- [4] <https://techlab.desy.de>
- [5] T. Ohshima *et al.*, “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”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 7-10, 2018, pp.55.
- [6] E. Iwai *et al.*, “次世代放射光施設入射器における MTCA.4 規格を用いたデジタル LLRF システムの評価”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Jul.31-Aug.03, Kyoto, 2019, THOI03 pp.130-134.
- [7] T. Ohshima *et al.*, “3 GeV 次世代放射光施設の線型加速器と蓄積リングとのタイミング同期”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sep. 2-4, 2020, WEPP26 pp.288-290.