

若狭湾エネルギー研究センターシンクロトロン の 現 状

PRESENT STATUS OF THE SYNCHROTRON AT WERC

栗田哲郎^{*,A)}, 山田裕章^{A)}, 廣戸慎^{A)}, 清水雅也^{A)} 古川靖士^{A)} 瀧上隆太^{A)},
小田部圭佑^{A)}, 羽田祐基^{A)}, 石井勇揮^{A)}, 羽鳥聡^{A)}

Tetsuro Kurita^{*,A)}, Hiroaki Yamada^{A)}, Makoto Hiroto^{A)} Masaya Shimizu^{A)}, Seishi Furukawa^{A)}, Ryuta Fuchigami^{A)},
Keisuke Otabe^{A)}, Yuki Haneda^{A)}, Yuki Ishii^{A)}, Satoshi Hatori^{A)}

^{A)} The Wakasa Wan Energy Research Center

Abstract

The accelerator complex at The Wakasa Wan Energy Research Center (WERC) consists of a 5 MV Schenckel type tandem accelerator and a 200 MeV proton synchrotron. Using this system, the element analysis and irradiations for medical, biological and material sciences are performed. In the 2023 fiscal year of the period from April 3, 2023 to January 23, 2024, experiment time amounted to 1327 hours. The percentage of experiment time using the synchrotron was ~68%. A new RF control system is under development. Using FPGA makes it possible to digitize and process the signal all over the system. The new system utilizes MicroTCA.4 platform and AMCs (Advanced Mezzanine Card) developed by Mitsubishi electric defense and space technologies corporation. The feedback and the BPM parts of the system has been utilized in ordinary operation since October, 2023. The BPM part of the system has been utilized in ordinary operation since July, 2023 and July, 2024, respectively. In this report, progress of beam commissioning and development status are presented. Also it is reported that repairs of remote IO devices of control network “HOLONIC HUB”.

1. はじめに

財団法人若狭湾エネルギー研究センターは1993年に発足し、施設としての福井県若狭湾エネルギー研究センターは1998年に開所した。同時に、加速器施設建設が開始され、2000年に加速器施設運用開始された。

加速器施設(W-MAST)は、タンデム加速器および、それを入射器としたシンクロトロンによって、広範囲のエネルギーのイオンビーム(陽子:数MeV-200MeV; He, C:数MeV/u-55MeV/u)を様々な実験に供給している[1]。

2. 運転状況

2023年1月から3月にかけて行われたタンデム加速器の定期点検の後、2023/4/3から2024/1/23まで実験にビームが供給された。

Figure 1に近年のビーム別の実験時間(加速器の調整/コンディショニングなどの時間を含めず、実験にビームを供給した時間)の推移を示す。

例年にはない整備のために運転時間が短くなることはなかったが、施設全体の実験時間は1327時間だった。2022年度よりは増え、2021年度と同程度にはなかったが、コロナ禍前と同程度には回復していない。そのうち、シンクロトロンを使った実験時間は、約68%であった。

Figure 2に近年のシンクロトロンが使われた実験テーマ別の実験時間の推移を示す。タンデム加速器を使った実験が減り続けているが、シンクロトロンを使った実験時間はコロナ禍前と同程度まで回復している。

シンクロトロンのビームの主な用途はイオンビーム育種や粒子線がん治療の基礎研究であったが、近年は、宇宙開発関連に大きな需要がある。

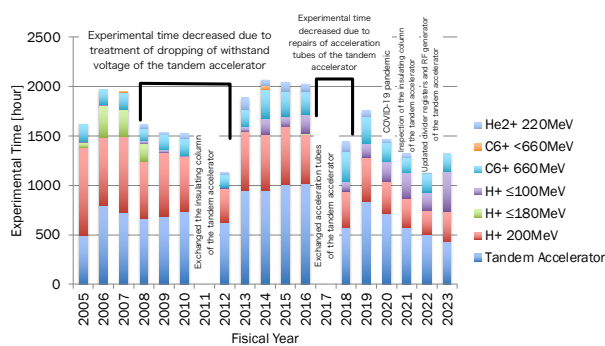


Figure 1: Trend of beam time categorized by ion and energy.

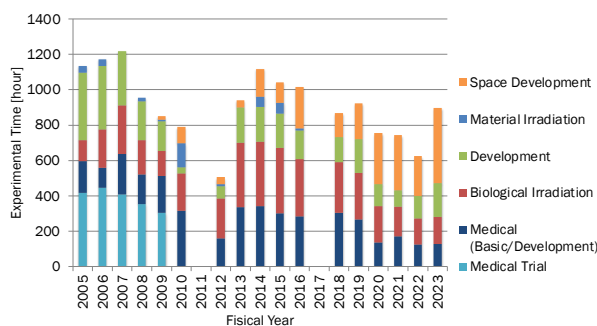


Figure 2: Trend of beam time of the synchrotron categorized by experimental interests.

宇宙開発関連の実験では、2015年度から費用の発生する依頼照射が行われるようになった。年々、件数が増えておきており、2023年度から急激増え、23件に達した(Fig 3)。2024年度も7月の時点で、20件あり、さらに増加する見通しである。

Figure 4に近年の実施された実験課題数の推移を示

* tkurita@werc.or.jp

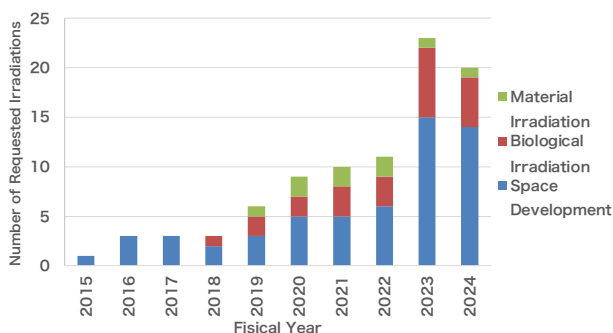


Figure 3: Trend of the number of themes of requested irradiations.

す。実験時間は減少の傾向にあるが、ほぼ毎年 50 前後の課題が申請/実施されている。

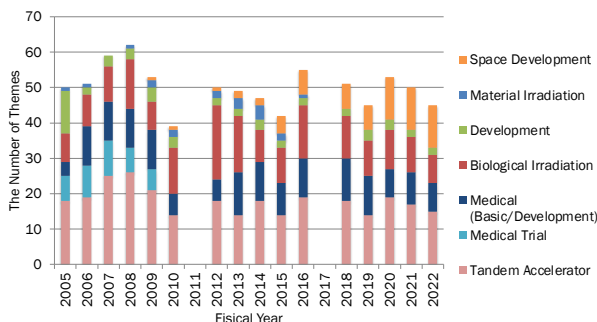


Figure 4: Trend of the number of themes categorized by experimental interests.

3. 高周波加速制御系の開発状況

3.1 システムの概要

2019 年度から、高周波加速制御系 (LLRF:Low Level RF) の更新に取り組んでいる [2]。

近年の技術的動向に追従したシステムとして、発振器およびフィードバック制御系、ビーム位置モニター信号処理系のすべてを FPGA を用いたデジタル高周波信号回路で構築したシステムの開発を行っている。

Figure 5 に新システムの概要を示す。J-PARC で開発された LLRF 制御系 [3] を参考に設計している。三菱電機ディフェンス&スペーステクノロジーズによって開発された MicroTCA.4 の AMC (Advanced Mezzanine Card) [4] を用いる。AMC には、Xilinx 社の Zynq XC7Z045(FPGA + Arm Cortex-A9) が用いられており、Linux で EPICS IOC が動作している。AD 入力の場合で、三つの AMC で構成される。一つは、空洞電圧と周波数の制御、および一つの BPM 信号の処理およびそれを用いたフィードバック制御部である。もう二つの AMC は、フィードバックに用いられるもの以外の 6 台の BPM (Beam Position Monitor) の信号を処理する、BPM 信号処理部である。

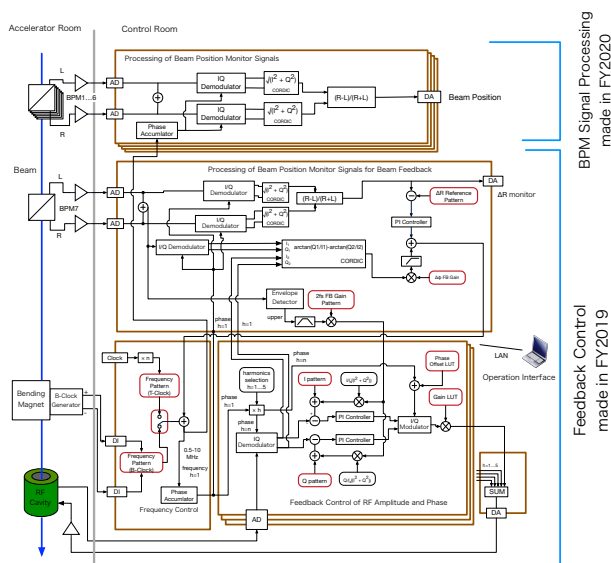


Figure 5: A schematics of New LLRF.

3.2 フィードバック制御部の状況

2020 年から 2021 年にかけて、オフビームでの空洞電圧フィードバックの動作を確認した。2021 年 11 月からビーム試験を重ねて不具合の洗い出しと修正を行った。

2021 年度には、フィードバック制御部のシステムクロックを生成している電圧制御発振器 (VCO) に不具合があり交換を行うとともに、システムクロックを 150 MHz から 300 MHz にアップグレードする改造を行った。

以上と並行して、オペレーションインターフェースの開発も行った [5]。

2023 年 10 月から、フィードバック制御部を通常の運転で使用を開始した。運用しながら不具合の解消とオペレーションインターフェースの改良をおこなった。新システム導入前後で Proton 7 MeV 入射、200 MeV 出射時の、加速効率 (加速終了時の電荷/捕獲電荷) および出射電流のトレンドを Fig. 6 に示す。

Figure 6 の上段より、加速効率が 70% 程度から 80% 程度に上昇していることがわかる。このため、出射電流量も 2.5 nA 程度から 3 nA 程度に増えた (Fig. 6 下段)。これは、次の 2 点が寄与していると考えている。

- 2 倍高調波の調整が精度良く行えるようになった。
 - 新システムでは基本波だけでなく高調波の振幅と位相も検波し、フィードバック制御しているので調整結果が再現される。旧システムでは、2 倍高調波のフィードバック制御がなく不安定だった。
- 横方向のビーム位置フィードバックの反映周期が上がった。
 - BPM フィードバック信号の加速周波数への反映周期が 50 kHz から 300 MHz に上がっており、加速周波数の変化幅が少なくなっている。

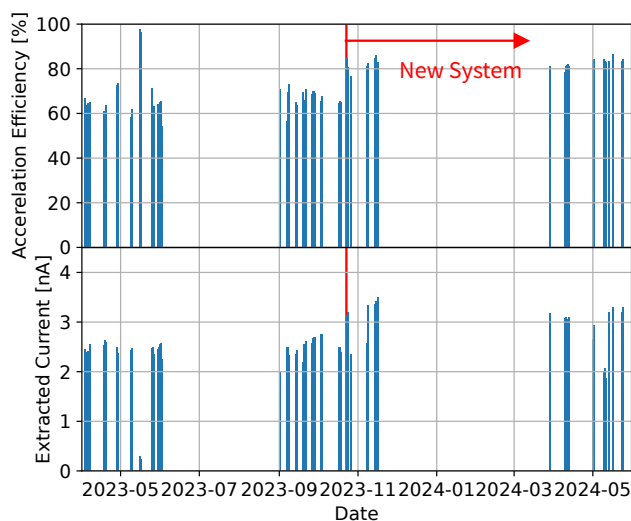


Figure 6: Trend of acceleration efficiency and extracted current when protons are accelerated from 7 MeV up to 200 MeV.

3.3 BPM 信号処理部の状況

BPM 信号処理部は、2020 年度末に納入されたが、フィードバック制御部のデバッグ作業および通常運転への投入を優先させた。このため、BPM 信号処理部の試験は遅れ、2024 年 7 月から BPM 信号処理部でのビーム測定が行えるようになった。

BPM 信号信号処理部は、Fig. 5 のように、ダイアゴナルカットされた並行平板電極からの信号を同期検波することによってビーム位置の演算を行なっている。

Figure 7 に Carbon 20 MeV 入射、600 MeV 出射時の測定例を示す。従来のシステムとは違い、

- ビーム位置の演算のために同期検波を用いており、信号レベルに依存しない演算結果。
 - 従来のシステムでは AM-PM 変換回路を用いており、演算結果が入力信号レベルの影響を受けていた。このためビーム強度で演算結果が変わっていた [6]。
- すべての BPM で得られるビーム位置情報を同時に記録できる。
 - 従来のシステムでは、AM-PM 変換回路が BPM の台数分用意されておらず、設定されたタイミングで入力信号を切り替えて COD の測定を行っていた。

3.4 T-Clock モードの調整

現在、加速周波数は、偏向電磁石の磁場の変化をサーチコイルで検出することで生成される B-Clock 信号で更新している。新システムでは T-Clock での周波数制御も行えるように制作した。すなわち、施設のタイミングシステムのクロック 10 MHz から生成される時間クロックに従って、あらかじめ設定した周波数パターンで周波数を更新する。

偏向磁石のパターンから計算される周波数では、大きな横方向ビーム位置のズレ ΔR が発生する (Fig. 8 の青線)。そこで発生した ΔR をキャンセルする周波数パターンの補正値を ΔR の測定値から計算することを試

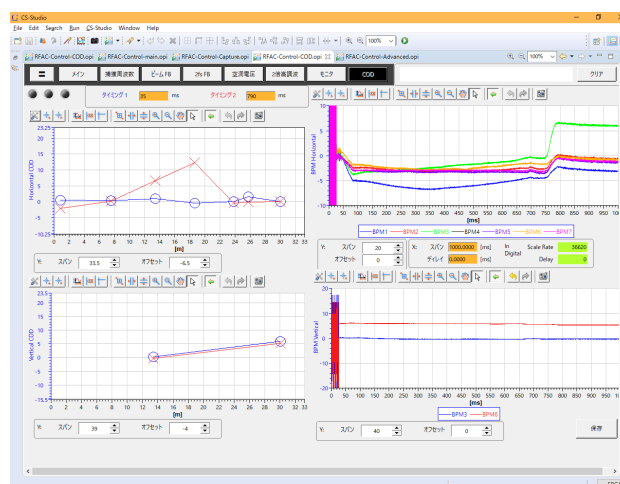


Figure 7: A measurement of BPMs and COD when C^{6+} ions are accelerated from 20 MeV up to 660 MeV.

みた。Proton 7 MeV 入射、200 MeV 出射時の調整を以下に示す。

Figure 8 に示すように、 ΔR の測定値には、偏向電磁石のリプル成分が含まれている。これは、B-Clock モードで加速時には現れないものである。 ΔR の周波数スペクトラムを Fig. 9 に示す。60 Hz および、その高調波のリプル成分が重畳しており、タイミングとは同期していないので、周波数パターン補正値を計算する前に除去する必要がある。リプル成分を除去するために、Fig. 10 のような CIC (Cascaded Integrator-Comb) フィルターを適用にした。リプル成分を確実に除去するために、ノッチの間隔が 60 Hz になるように調整した。Figure 8 の橙線に CIC フィルター適用後の ΔR 信号、Fig. 9 の橙線にその周波数スペクトラムを示す。

ΔR 信号から計算される周波数パターンの補正を 2 回繰り返すことで、 ΔR がゼロとなる周波数パターンが得られた (Fig. 8)。

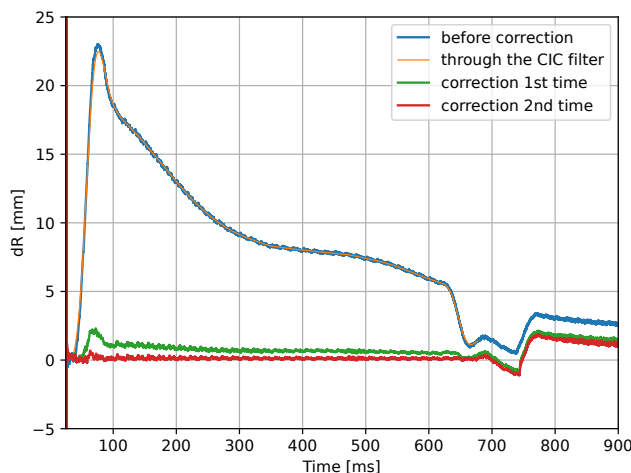


Figure 8: ΔR signals when the RF frequency is updated with T-Clock.

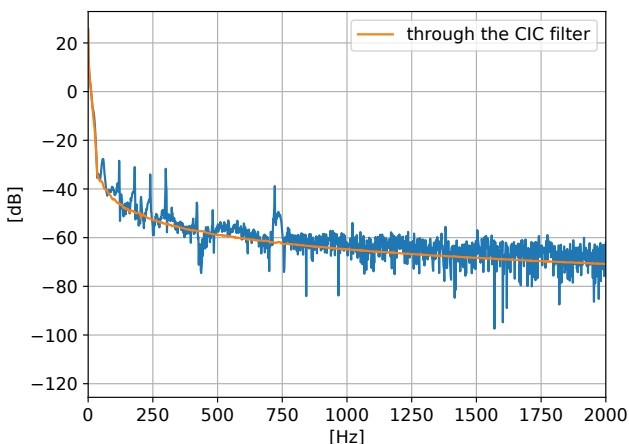


Figure 9: Frequency spectrum of the measured ΔR signal (blue) and of the signal through the CIC filter (orange).

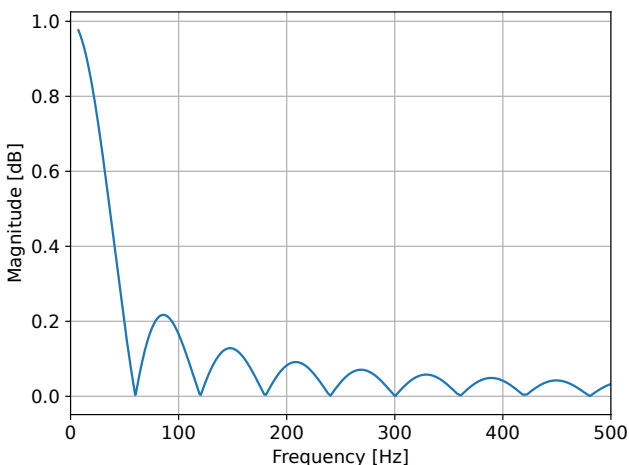


Figure 10: Frequency response of the CIC filter to remove ripple components from ΔR signals.

3.5 加速効率と T-Clock の周波数

新システムでは、T-Clock 周波数パターンのデータの周波数（パターンクロック）を任意に設定できる。また、パターンデータを補間クロックで直線補間して周波数を更新することができる。補間クロックは 1 MHz まで上げることができる。

Figure 11 に、パターンクロックおよび補間クロックを変化させ、T-Clock 周波数に対する加速効率（加速終了時電荷/捕獲電荷）を示す。パターンクロックが 10 kHz および 100 kHz の時に補間クロックを変化させて、加速効率の測定を行った。この時、位相振動フィードバックを用いているが、 ΔR フィードバックはオフにしてある。パターンクロックによらず、T-Clock の周波数が 100 kHz 程度までは、加速効率が上昇するが、それ以上は周波数を上げて、効果がないようである。

Figure 11 の黄色で示すように、 ΔR フィードバックを ON にすると、加速効率は T-Clock 周波数に依存しなくなる。 ΔR フィードバックは T-Clock とは独立に、システムクロック 300 MHz で周波数を更新しているためと考えられる。

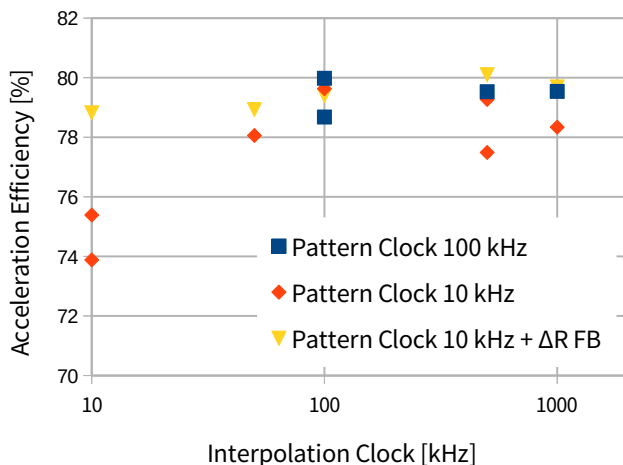


Figure 11: Acceleration efficiency depending on T-Clock frequency.

3.6 四極モード位相振動フィードバック系の問題

RF バケツ内でバンチが回転すると、バンチ信号の波高がシンクロトン周波数の 2 倍の周波数で振動する。このモードの位相振動を抑制するためにバンチ信号の包絡線の微分信号を空洞電圧の振幅にフィードバックする。四極モード位相振動フィードバックの回路を Fig. 12 に示す。

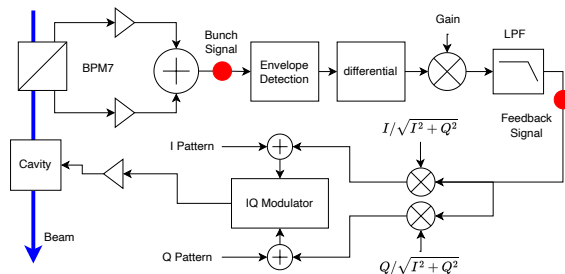


Figure 12: The circuit for the feedback control of quadrupole-mode bunch oscillation.

新システムでは、微分演算が Eq. (1) で表される、単純な差分を取っているため、フィードバック信号に大きなノイズが重畳している (Fig. 13 3 段目)。

$$H(z) = 1 - z^{-1} \quad (1)$$

カットオフ周波数 50 kHz のローパスフィルターが設置されているが、ノイズを除去できていない。ノイズを除去するために、ローパスフィルターのカットオフ周波数を可変にする事と、微分演算に Savitzky-Golay フィルター (Eq. (2)) の適用を検討している。

$$H(z) = z^{-3} \frac{3z^3 + 2z^2 + z - z^{-1} - 2z^{-2} - 3z^{-3}}{28} \quad (2)$$

これは、数学的には多項式フィッティングと等価である。Savitzky-Golay フィルターを適用した場合のシミュ

レーションの結果を Fig. 13 4 段目に示す。ノイズの除去が行えていることがわかる。

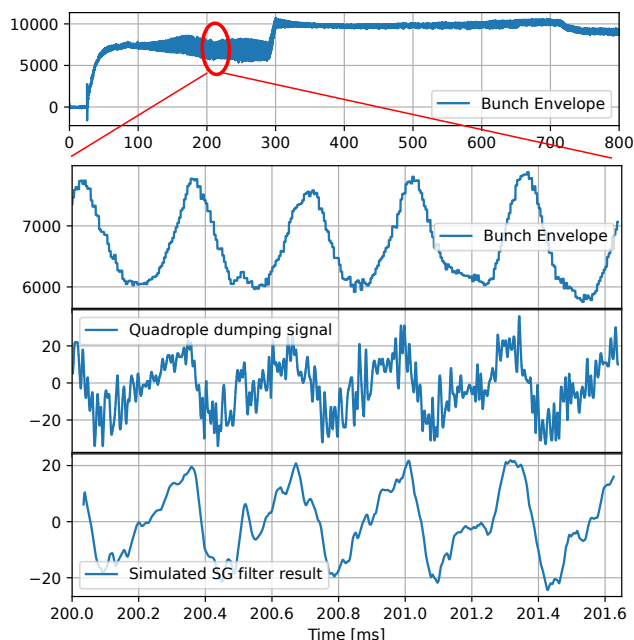


Figure 13: Quadrupole oscillation observed as vibration of the bunch envelope (1st and 2nd rows), the current feedback signal (3rd row) and the simulation result of feedback signal with the improved differential circuit (4th row).

4. リモート IO ホロニックハブの修理

若狭湾エネルギー研究センターのビームラインの電磁石電源及びシンクロトロンのパターン電源のリモート制御には Holonic Hub が用いられている。運転開始から 20 年以上経過しており、老朽化に伴いリモート IO ターミナルが故障するようになってきた。すでにメーカーは事業を撤退し、新品の購入はできず、修理サポートも終了している。轟産業株式会社、京西テクノス株式会社、壬生電機株式会社の協力を得て、故障箇所が DC-DC コンバーターか RS485 Communication IC であることを突き止め、独自の修理体制を確立した [7]。

5. まとめ

2023 年度の全体の実験時間は 1327 時間に止まり、コロナ禍前の水準まで回復していない。タンデム加速器だけを使った実験時間は減り続けているが、シンクロトロンのビームは宇宙開発関連に強い需要があり、シンクロトロンを使った割合 68% まで増えている。

FPGA を使った高周波加速制御系および BPM 信号処理系の更新を進めている。2023 年 10 月にフィードバック制御部を通常運転に使用するようになった。2024 年 7 月から BPM 信号処理系が使用可能になり、COD の測定が行えるようになった。これで、全系を通常運転で使用するようになったが、FPGA プログラムに既知の不具合がある。また、四極モード位相振動フィードバッ

ク系、オペレーションインターフェースに改良の余地があり、開発を継続している。

今後、T-Clock による周波数制御をつかったビーム調整を検討している。現在の、B-Clock と ΔR フィードバックを使った調整より、T-Clock モードを使うことの優位な点は、横方向ビーム位置を調整する自由度が高いこと、ビームを極端に減らしても加速できることが挙げられる。一方で、T-Clock モードでは、偏向電磁石のリップルでビームが横方向に揺さぶられる。悪影響がないか、確認する必要がある。

ホロニックハブの独自の修理体制を隔離することにより、電磁石類制御ネットワークの延命が行えた。しかし抜本的な対策として、制御ネットワークの更新が必要である。

謝辞

高周波加速制御系の開発にあたって、三菱電機ディフェンス&スペーステクノロジーズ株式会社の方々にご尽力いただいております。誠にありがとうございます。

参考文献

- [1] S. Hatori *et al.*, “Developments and applications of accelerator system at The Wakasa Wan Energy Research Center”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B241 (2005) 862.
- [2] T. Kurita *et al.*, “DEVELOPMENT OF A LLRF CONTROL SYSTEM AT WERC”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan”, Aug. 9-12, 2021, pp. 165-169. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/WE0B/WE0B07.pdf
- [3] F. Tamura *et al.*, “Development of Next-Generation LLRF Control System for J-PARC Rapid Cycling Synchrotron”, in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 66, no. 7, pp. 1242-1248, July 2019. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8642336>
- [4] M. Ryoshi *et al.*, “MTCA.4 RF SIGNAL PROCESSING SYSTEM”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 2016, pp. 340-344. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/MOP0/MOP013.pdf
- [5] T. Kurita *et al.*, “PRESENT STATUS OF THE SYNCHROTRON AT WERC”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan”, Aug. 29-Sep. 1, 2023, pp. 1073-1076. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2023/proceedings/PDF/TFSP/TFSP05.pdf
- [6] T. Kurita *et al.*, “PRESENT STATUS OF THE SYNCHROTRON AT WERC”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan”, Aug. 9-12, 2021, pp. 595-597. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/TUP0/TUP057.pdf
- [7] S. Furukawa *et al.*, “REPAIRS OF REMOTE IO HOLONIC HUB DEVICES”, in these proceedings (FRP037).