

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)}, 瀨上隆太 ^{A)},
小田部圭佑 ^{A)}, 羽田祐基 ^{A)}, 北上悟 ^{A)}, 石井勇揮 ^{A)}, 羽鳥聡 ^{A)}

Tetsuro Kurita ^{*,A)}, Hiroaki Yamada ^{A)}, Makoto Hiroto ^{A)}, Masaya Shimizu ^{A)}, Seiji Furukawa ^{A)}, Ryuta Fuchigami ^{A)},
Keisuke Otabe ^{A)}, Yuki Haneda ^{A)}, Satoru Kitajyo ^{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 fiscal year 2024 of the period from April 1, 2024 to January 31, 2025, experiment time amounted to 1428 hours. The percentage of experiment time using the synchrotron was ~66%. A new RF control system which includes BPM signal processing is currently under development. Using FPGA makes it possible to digitize and process the signal all over the system. The part of RF acceleration control has been utilized in normal operations since October 2023. As a test of the BPM signal processing part, measurements of closed orbit distortion (COD) using the new and the old systems are compared. The equivalent results of COD indicate that normal operation of the new BPM signal processing part can be expected. Also, operation interfaces for these functions have been developed. By using the new BPM signal processing system, it is confirmed that the vertical COD is changing over the years. We planed to use backleg coils to correct the vertical COD. Also, troubles of cooling water leakage of magnet coils and cooling plates of power supplies are reported.

1. はじめに

財団法人若狭湾エネルギー研究センターは 1994 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-200 MeV; He, C: 数 MeV/u-55 MeV/u) を様々な実験に供給している [1]。

また、200 keV マイクロ波イオン源で H, He, N, O, Ne, Ar などの気体元素の大電流ビームを供給している。

2. 運転状況

2024 年 2 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、2024/4/1 から 2025/1/31 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まず、実験にビームを供給した時間) の推移を示す。

施設全体の実験時間は 1428 時間だった。そのうち、シンクロトロンを使った実験時間は、約 66% であった。シンクロトロンを使った実験は増加傾向にはあるが、タンデム加速器単体を使った実験が増加せず、コロナ禍前と同程度には回復していない。

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。近年、シンクロトロンを使った実験が増加傾向にあり、特に、宇宙開発関連に多

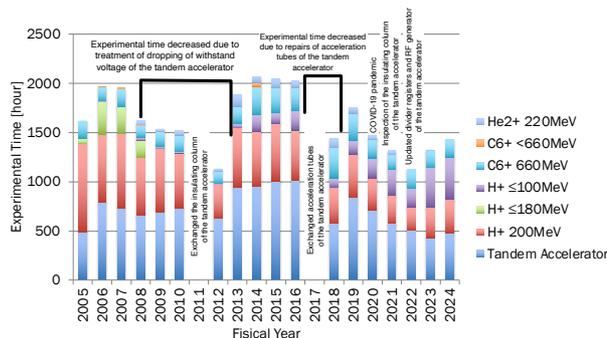


Figure 1: Trend of beam time categorized by ion and energy.

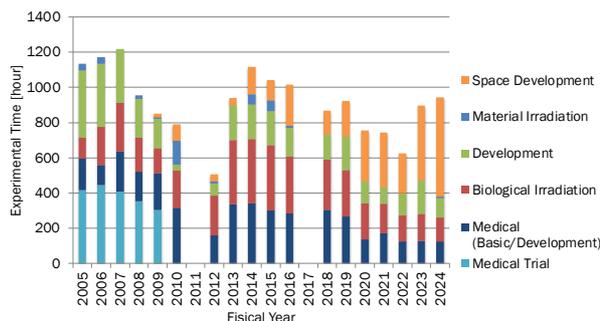


Figure 2: Trend of beam time of the synchrotron categorized by experimental interests.

くの時間が割かれている。

宇宙開発関連の実験では、2015 年度から費用が発生する依頼照射が行われるようになった。Figure 3 に、依頼

* tkurita@werc.or.jp

照射の課題件数の推移を示す。年々、件数が増えておきており、2023年度から急激増えている。特に、2024年度から著しく増加し、要求された日数をこなせない状況にある。2024/9/2 から 11/15 の期間では、申し込み日数の 29% しか実施できなかった。

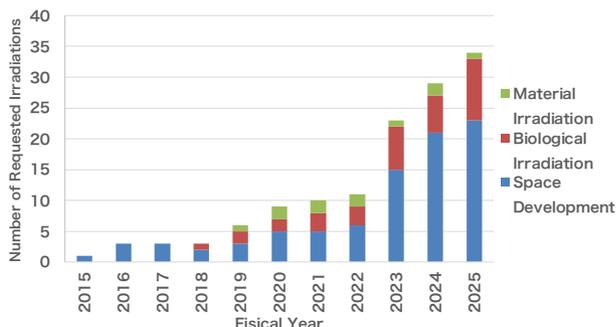


Figure 3: Trend of the number of themes of requested irradiations.

Figure 4 に近年の実施された実験課題数の推移を示す。宇宙開発関連の実験課題数の増加が著しく、2024年度は過去最高の 68 件が実施された。

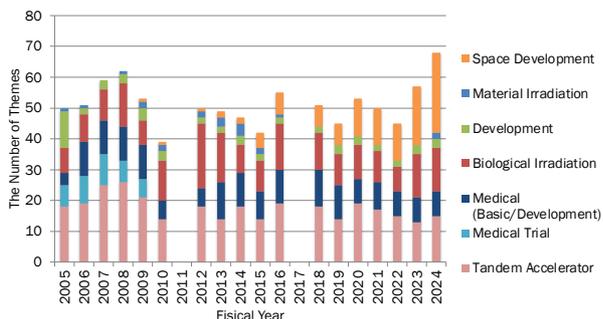


Figure 4: Trend of the number of themes categorized by experimental interests.

3. 高周波制御系の開発状況

3.1 システムの概要と経緯

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随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。

J-PARC で開発された LLRF 制御系 [3] を参考に設計を行った。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] を用いている。AD 入力の都合で、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、6 台の BPM (Beam Position Monitor) の信号の処理を行う (BPM 信号処理部)。

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 [2]。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なった。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なった [5,6]。

2023 年 10 月から、フィードバック制御部を通常の運転での使用を開始した。これによって、加速効率が 70% 程度から 80% 程度に上昇し、出射電流量も 2.5 nA 程度から 3 nA 程度に増えた [7]。

従来、周波数制御に B-Clock を用いていたが、2024 年には T-Clock を用いた周波数パターンの調整方法も確立した [7]。2025 年度から順次、T-Clock パターンの運用を開始している。これまで、proton 7 MeV 入射 200 MeV 出射、carbon 20 MeV 入射 660 MeV 出射の運転パターンを T-Clock で運用するようにした。これらの運用で問題がなかったため、その他の運転パターンも順次 T-Clock モードに切り替える予定である。

3.2 FPGA 冷却の改善

運用を開始してから、2024 年度まで、以下のトラブルが頻発していた。

- ADC-FPGA 間の遅延が変化し、空洞電圧フィードバックが正常動作しなくなる。
- Ethernet が通じなくなり、設定が行えなくなる。

MTCA.4 シャーシ (NAT 社 NATIVE-R2) の空冷系を見直し、FPGA の冷却を改善することにより、2025 年度は上記のトラブルが発生しなくなった。

1. 空きスロットにブランクパネルを設置した。
 - FPGA の放熱を期待して、空きスロットは解放していたが、気流がそこから漏れることによって、冷却には逆効果であることがわかった。
 - FB カードの FPGA の温度が 74 °C から 69 °C まで下がった。
2. クーリングユニットのフィルターの交換および外付け化
 - クーリングユニットの中にエアフィルターが配置されていた。システムをシャットダウンしないと状態を確認できず、目詰まりしても気づかない。劣化により清掃しても風量が回復しなくなったので、新品に交換するとともに Fig. 5 のようにシャーシの外側に配置した。これによって、常に状態を確認でき、任意のタイミングで交換できるようにした。
 - FB カードの FPGA の温度が 64 °C から 60.8 °C まで下がった。



Figure 5: An air filter is attached outside of the air intake of the MTCA.4 chassis.

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、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。従来のシステムは AM-PM 変換回路を用いており、演算結果が信号レベルに依存する、複数の BPM の同時測定が行えないなどの問題があった。新システムではこれからの問題を解消するために、BPM 信号を同期検波を行なって振幅を導出し、振幅からビーム位置を演算している [8]。

演算方式が全く違うので、同等の結果が得られるか、両システムでの測定値を比較した。Figure 6, 7 に、結果を示す。横方向の COD は分散によるシフトが見られるが、同等の形状が確認できる。垂直方向はよく一致している。これで、新旧システムで同等の COD の測定結果が得られることが確認できた。

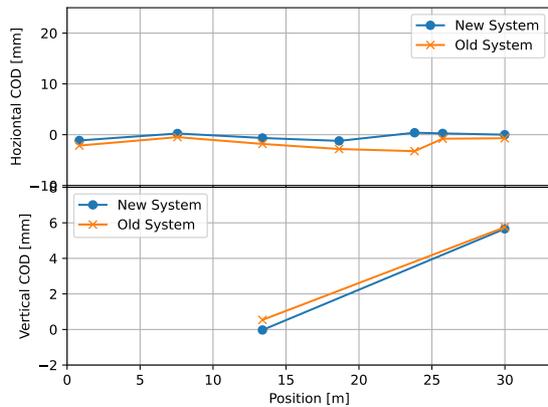


Figure 6: CODs at flat base (proton 7 MeV) measured with new and old system.

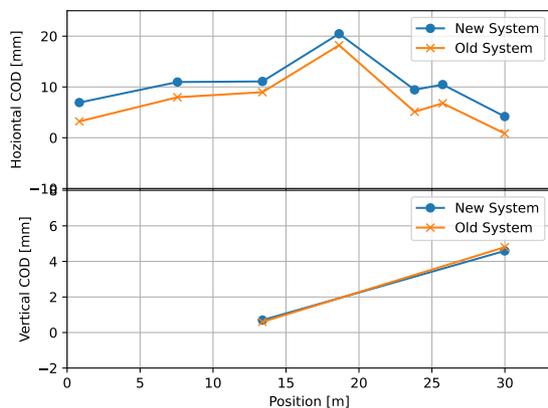


Figure 7: CODs at flat top (proton 200 MeV) measured with new and old system.

4. 垂直 COD 補正の状況

シンクロトロン of 垂直方向の COD が年々、変化していることがわかっている。

建設当初および 2006 年に垂直方向 COD を一つのパターン運転ステアラー電磁石 (QD2V: QD2 のバックレグコイル) と二つの静的ステアラー電磁石を用いて行った。2013 年に垂直方向 COD が変化していることがわかった。パターン運転に比例した誤差磁場成分が変化していた。QD2V では補正することができず、QD1 にバックレグコイル (QD1V) を新設し、垂直 COD 補正を行った [9]。

その後も、垂直 COD は変化し続け、再度、垂直方向 COD 補正が必要な状況にある。補正がされていない COD の変化を Fig. 8 に示す。

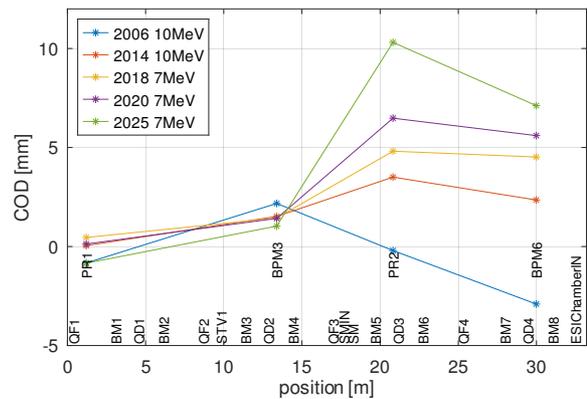


Figure 8: Changes of vertical COD at flat base.

COD を生み出しているキックが存在するか場所を推定するために、2006 年からの COD の差分を、各 BM にキック源があると仮定して COD を再現するキック角を最小二乗法で求めた (Fig. 9)。フィッティング対象となるデータ数は 4 個に対して、BM は 8 個でありパラメータが多いので最小ノルム解を求めている。

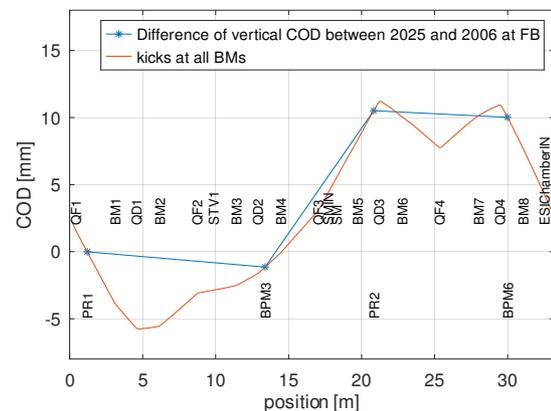


Figure 9: The difference of COD between 2005 and 2016 and a represented COD with kicks at all BMs.

Figure 9 と同じことを時期がことなったデータに対して行い、COD の差分を再現する BM でのキック角の年々の変化を求めた (Fig. 10)。BM1,2 付近のキックが年々増大している。

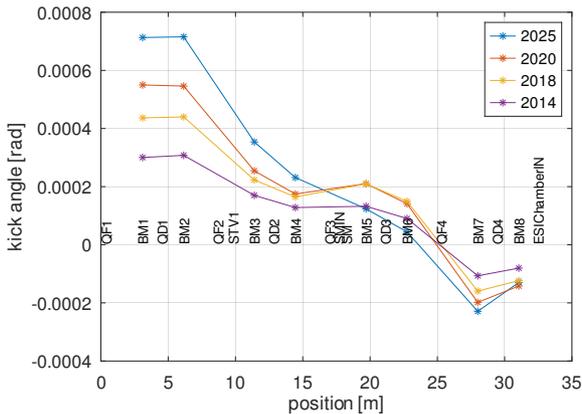


Figure 10: Trend of kicks at BMs which represent differences of CODs from the one of 2026.

垂直 COD 変化の原因は偏向電磁石 (BM) の傾きが変化することであると考へ、電磁石のレベルの変化を追跡している。Figure 11 のように磁石のレベルが年々変化しており、特に BM1 および BM2 付近の変動が大きい。Figure 10 で示したキック角が増大している位置と相関がある。BM の傾きの変化が COD 変化の原因と推定しているが、Fig. 11 で示したレベルの変化から説明できない。

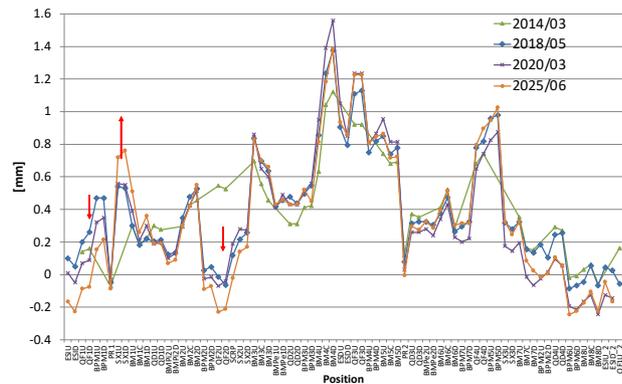


Figure 11: Trends of level of magnets.

現状、垂直 COD 補正のために用意された、パターン運転をする垂直 COD 補正用ステアラ電磁石電源は一つしかない。しかし、現状の COD は一つのパターン運転ステアラ電磁石では、補正する解が見つからない。そこで、QF2 にバックレグコイル (QF2V) を新設し、QD1V と直列に接続することで補正を検討している。2025 年に測定した現状の COD を QD1V と QF2V の位置で同じキック角という条件のもと最小二乗法でフィッティングした計算を Fig. 12 に示す。COD を再現できており、直列に接続した二つの Q 電磁石のバックレグコイルで垂直 COD 補正が行える見込みである。

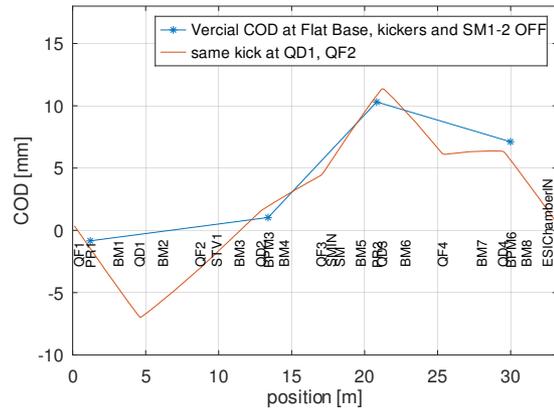


Figure 12: The result of least square fitting of the current COD with same kick angles at QD1 and QF2.

5. 電磁石及び電磁石電源からの冷却水漏れ

加速器の運用は 25 年を超え、老朽化により、電磁石のコイル、電源の銅製水冷シャント抵抗および銅製トランススタバク冷却板からの冷却水 (イオン交換水) 漏れのトラブルが頻発している [6]。加速器の利用は変わらず強い需要があるが、冷却水漏れが原因で運用が中断する危険性がある。

エルボ部やアーク部で発生することが多いので、減肉摩耗が大きな要因になっていると考えられる。しかし、直線部で発生することもあるので、物理的な侵食だけでなく、腐食によって冷却水中に銅が溶融していることが示唆される。

冷却水漏れ発生件数の年度毎の推移を Fig. 13 に示す。運用から 10 年ぐらい経ってから、冷却水漏れが発生し出した。2015 年ごろからビームライン電磁石電源のシャント抵抗から水漏れが発生するようになった。当初、ロウ付けによる応急処置で対応していたが、空冷のシャント抵抗に交換を行った。

その後、2020 年ごろからセプタム電磁石電源の冷却板から水漏れが立て続けに発生するようになった。株式会社メックテクニカに同等品を再製作を依頼しており、順次交換をしている。

また、同時期にビームライン電磁石電源の冷却板からの水漏れも問題になった。ロウ付けや紫外線硬化樹脂で応急処置をしつつ、同等品を製作して交換することを計画している。

電源については、冷却板などの交換は進んでいるが、電磁石電源のコイルについては抜本的な対策の目処が立っていない。

これまで、Fig. 14 のようにセプタム電磁石や六極電磁石などのコイルのホローコンダクター端部で冷却水漏れが発生し、エポキシ樹脂の塗布やロウ付けで塞ぐことができていた。しかし、コイルの奥で水漏れが発生した場合は同様の対処は行えず、近い将来発生することが懸念されている。電磁石電源のコイルを更新を行う必要があるが、対応してくれる業者が見つからない。

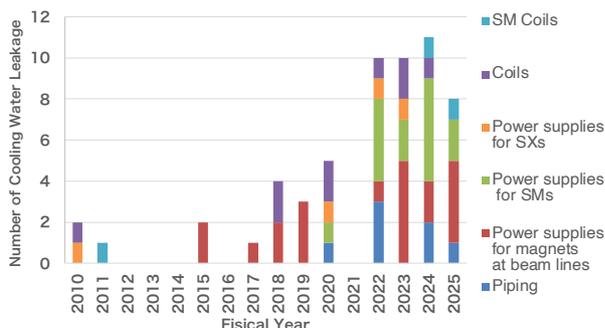


Figure 13: Trend of number of cooling water leakage.

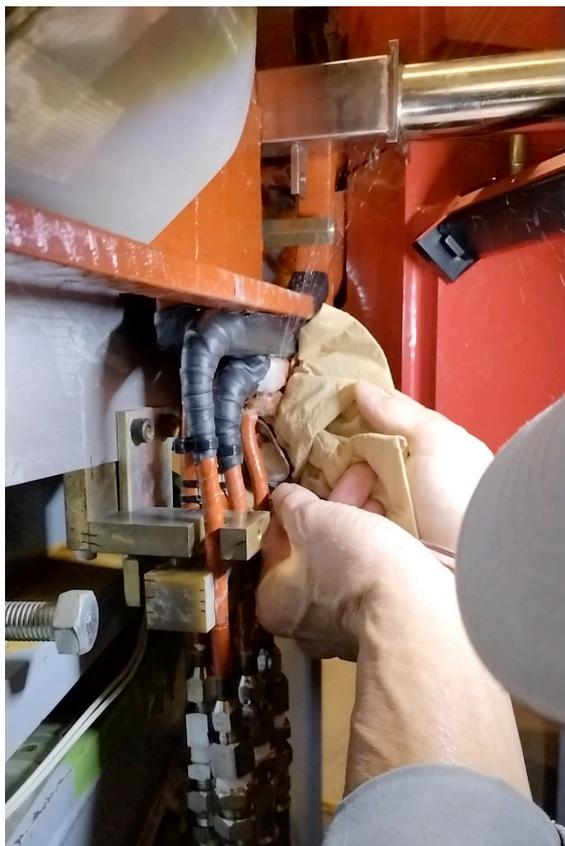


Figure 14: Cooling water leakage from the coil of the septum magnet.

6. まとめ

2024年度の全体の実験時間は1428時間である。宇宙開発関連の依頼照射に強い需要があり増加傾向にある。

FPGAを使った高周波加速制御系およびBPM信号処理系の更新はほぼ完了し、全系を通常運転で使用している。2024年度に、旧システムと新システムのCODを測定を比較し、同等の測定が行えることを確認した。

新しいBPM信号処理系を用いて、COD測定を行った。過去に、垂直CODは年々変化していることを観測している。その変化が継続していることを確認した。QD2にバックレグコイルを新設し、QD1Vと直列に

接続することで、垂直COD補正を行うことを検討している。CODと電磁石のレベルの変化から、BM1,2付近にキック源がある考えられる。COD変化の原因を明らかにする必要がある。

電磁石電源およびセプタム電磁石コイルからの冷却水漏れが大きな問題になっている。電磁石電源については、冷却板なシャント抵抗の更新で対応できつつある。セプタム電磁石コイルの更新を行う必要があるが、修理の目処が経っていない。加速器には強い需要があるので、故障によって長期のシャットダウンを避ける方策を懸命に探っている。

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した。

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”, Proc. 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2021), Online, Aug., 2021, pp. 165-169.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/WEOB/WEOB07.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”, Proc. 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2016), 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”, Proc. 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022), Online, Oct., 2022, pp. 1132-1135.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/TFP0/TFP003.pdf
- [6] T. Kurita *et al.*, “PRESENT STATUS OF THE SYNCHROTRON AT WERC”, Proc. 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug.-Sep., 2023, pp. 1073-1076.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2023/proceedings/PDF/TFSP/TFSP05.pdf
- [7] T. Kurita *et al.*, “PRESENT STATUS OF THE SYNCHROTRON AT WERC”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Jul.- Aug., 2024, pp. 1201-1205.
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2024/proceedings/PDF/TFSP/TFSP13.pdf
- [8] T. Kurita *et al.*, “PRESENT STATUS OF THE SYN-

CHROTRON AT WERC”, Proc. 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2021), Online, Japan, Aug. 2021, pp. 595-597.

https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/TUP0/TUP057.pdf

[9] T. Kurita *et al.*, “PRESENT STATUS OF THE SYN-

CHROTRON AT WERC”, Proc. 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2014), Aomori, Japan, Aug., 2014, pp. 416-419.

https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/FSP0/FSP028.pdf