

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)}, 羽鳥聡^{A)}, 山田裕章^{A)}, 廣戸慎^{A)}, 清水雅也^{A)}, 山口文良^{A)},
 淀瀬雅夫^{A)}, 瀧上隆太^{A)}, 小田部圭佑^{A)}, 古川靖士^{A)}, 羽田祐基^{A)}, 田村文彦^{B)}
 Tetsuro Kurita^{*,A)}, Satoshi Hatori^{A)}, Hiroaki Yamada^{A)}, Shin Hiroto^{A)}, Masaya Shimizu^{A)},
 Fumiyoshi Yamaguchi^{A)}, Masao Yodose^{A)}, Ryuta Fuchigami^{A)}, Keisuke Otabe^{A)},
 Seishi Furukawa^{A)}, Yuki Haneda^{A)}, Fumihiko Tamura^{B)}

^{A)} The Wakasa Wan Energy Research Center

^{B)} J-PARC Center, JAEA

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, medical, biological and material sciences are performed. In the 2021 fiscal year of the period from April 1, 2021 to January 29, 2022, experiment time amounted to 1320.4 hours. The percentage of experiment time using the synchrotron was ~56.4%. Also, we report development progress of a new LLRF control system. The new system utilizes FPGA and MicroTCA.4. The beam commissioning and development of operation interface softwares are in under progress. Beam profile monitors of the extraction beam lines of the synchrotron has been updated to fix vacuum leakage. As a result, intermittent leakages of vacuum have rarely occurred.

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 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]。

2002 年に陽子線を用いたがん治療装置治験開始し、2003 年から 2009 年まで陽子線ががん治療臨床研究が行われた。臨床研究は、福井県立病院に移転されたが、シンクロトロンからのビームは、がん治療の基礎研究および材料/生物/細胞への照射実験に利用されている。

2. 運転状況

2020 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、計画通り 2020 年 4 月から 2021 年 1 月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。加速器施設全体の実験にビームを供給した時間は、1320.4 時間であった。2021 年の 6 月下旬から 7 月にかけて、タンデム加速器のコラム電流が不安定になったため、計画外の整備を行った。このため、2020 年度より、さらに実験時間が減少することになった。

その内シンクロトロンを使った実験は ~56.4% であった。例年の 50% 程度より 1 割程度増えた。

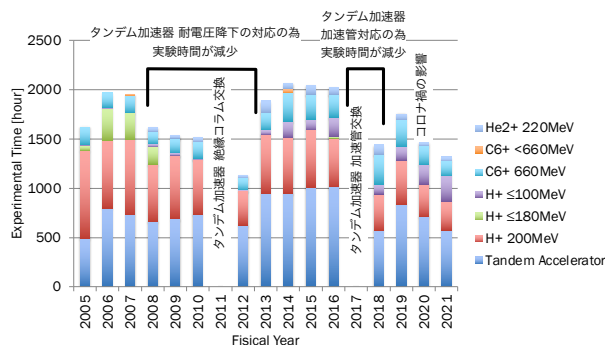


Figure 1: Trend of beam time categorized by ion and energy.

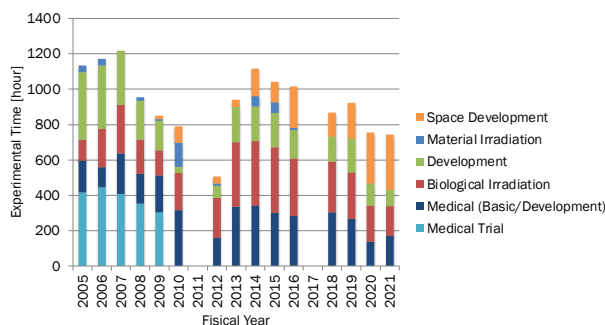


Figure 2: Trend of beam time of the synchrotron categorized by experimental interests.

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。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。費用の発生する依頼照射が多く行われるようになって

* tkurita@werc.or.jp

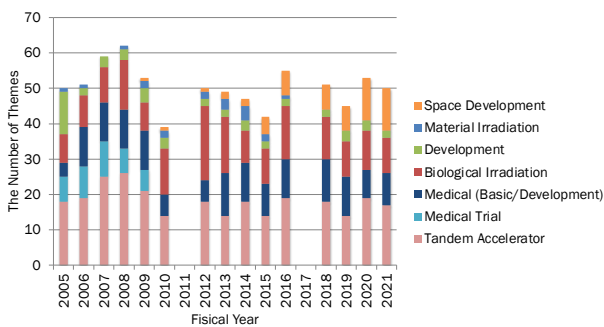


Figure 3: Trend of the number of themes categorized by experimental interests.

てきている。

Figure 3 に近年の実施された実験課題数の推移を示す。ほぼ毎年 50 前後の課題が申請/実施されている。

3. 加速高周波制御系の開発

現在、加速高周波制御系 (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。

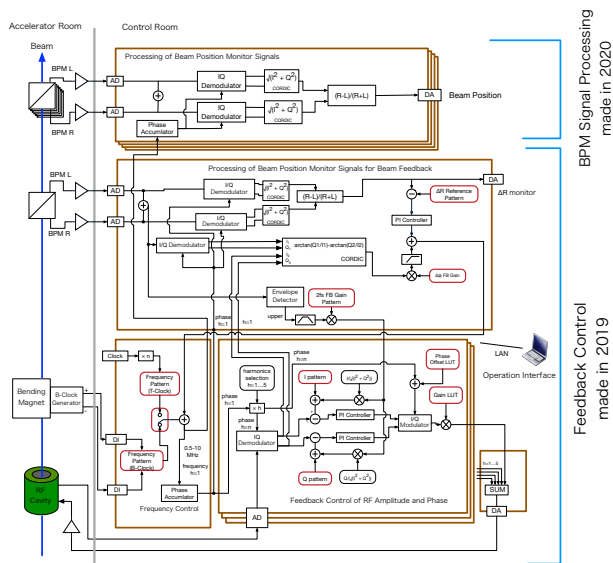


Figure 4: A schematics of New LLRF.

Figure 4 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。MicroTCA.4 を用いて、三菱特機システムによって開発された 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 で構成する。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

御である。もう二つの AMC は、6 台の BPM の信号を処理する。

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、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ている。B-Clock モードでの加速に成功している (Fig 5)。現在、位相振動及びビーム位置フィードバックのテストを行っている。

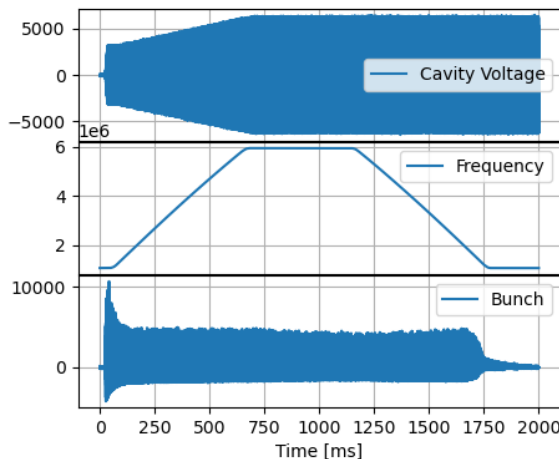


Figure 5: Accelerated beams with new LLRF system in B-Clock mode.

Figure 6 に現在開発中のオペレーションインターフェースの構成を示す。GUI 画面は Control System Studio(CSS) [5] を用いている。各種パターンデータの生成や設定、操作を補助するロジックの実装のために、Python の Epics Channel Access ライブラリである caproto [6] を用いて、Software IOC を構築した。Software IOC は、Channel Access などの入出力を非同期で実行するようにしている。イベントループをブロックしないように、ファイル選択ダイアログなどは、CSS の Action Button から Python スクリプトで開くようにしている。

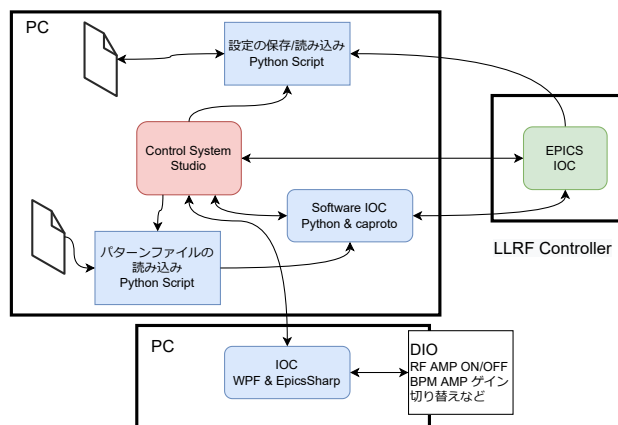


Figure 6: Architecture of operation interface software.

RF アンプの ON/OFF や BPM アンプのゲインの切り替えなどの DIO 処理は、コンテキストの PIO ボード

を用いている。PIO ボードの IOC を C#.Net の Channel Access ライブラリである EpicsSharp [7] を用いて構築した。

4. ビームプロファイルモニターの真空容器の改良

炭素イオンのような重イオンをシンクロトロンで加速する際に、真空度が加速効率に大きく影響する。そのため、これまで、継続的にシンクロトロンの真空度を改善する試みをしてきた [8,9]。

接続される入射のビームラインの真空度もリングの真空度に影響を与える。出射ビームラインにはイオンチャンバー型ワイヤープロファイルモニターが 3 台 (HPR1, HPR2, HPR311) 設置されており (Fig. 7)、すべてのプロファイルモニターから間欠的な真空リークがあり、リングの真空度の悪化の原因になっていた [10]。

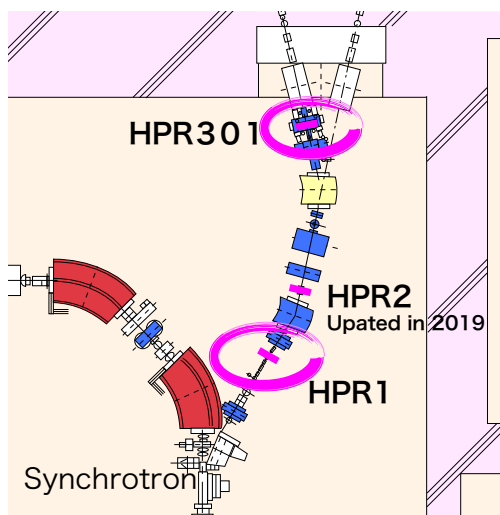


Figure 7: Profile monitors in the extraction beam line.

従来のプロファイルモニターの真空容器は使用されている O-ring が細く、ボルトの配置が不均等かつ少ないという構造に問題があり、O-ring の交換などによって修繕できなかった。そのため真空容器を構造を改良したものを、2019 年に製作して HPR2 を更新した [11]。その結果、真空度の変動が少なくなり、新設計のプロファイルモニターの効果が確認できた。

2021 年度に残り 2 台のプロファイルモニター (HPR1, HPR31) を新設計のプロファイルモニターに交換して、出射ビームラインの真空度の改善を試みた。設置したプロファイルモニターの外観を Fig. 8 に示す。

更新前の真空度のトレンドを Fig. 9 に、更新後の真空度のトレンドを Fig. 10 に示す。スパイク状の真空度の変化は大幅に減少した。しかし、完全に消えておらず、プロファイルモニター以外のリーク箇所の存在が示唆される。現在、対応を検討中である。

5. まとめ

2021 年度は、タンデム加速器の計画外の整備のため、全体の実験時間は 1468.8 時間にとどまった。しかし、シ

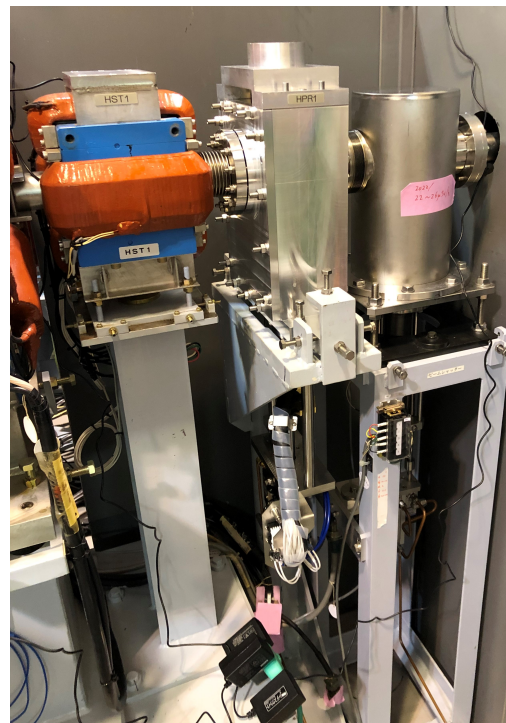


Figure 8: Photo of installed profile monitor.

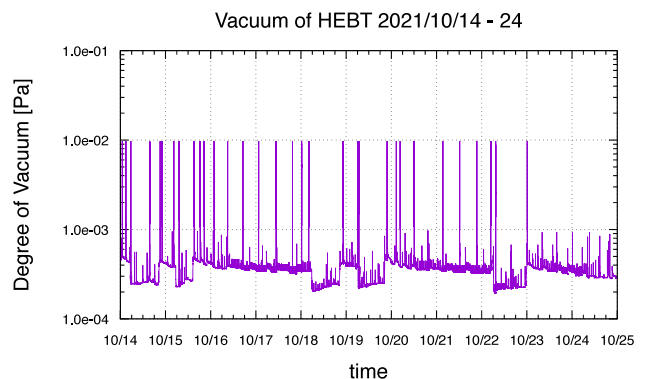


Figure 9: Trend of vacuum of the extraction beam line before updating profile monitors.

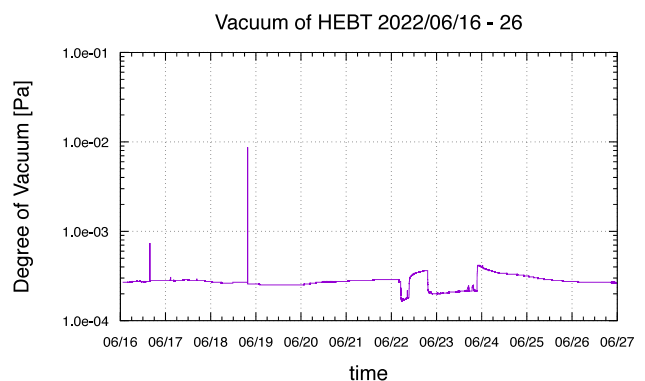


Figure 10: Trend of vacuum of the extraction beam line after updating profile monitors.

ンクロトロンビームは宇宙開発関連に強い需要があり、例年より割合は1割程度増加し、昨年度とほぼ変わらない実験時間であった。

FPGAを使った加速高周波制御系の更新を進めており、現在、ビーム試験を重ねて、FPGAプログラムの修正と改良を進めている。あわせて、オペレーションインターフェースの開発も進めている。

出射ビームラインのプロファイルモニターの更新により、間欠的な真空リークの修繕が行えた。しかし、低い頻度ながらスパイク状の真空度の変化が発生しており、原因を調査中である。

謝辞

加速高周波制御系の開発にあたって、三菱電機特機システム株式会社の方々にご尽力いただきました。ビームプロファイルモニターの真空容器の改良に当たっては、株式会社日立製作所と株式会社ブイテックスの方々にご尽力いただきました。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”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 9-12, 2021, p. 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] <https://controlsystemstudio.org>
- [6] <https://github.com/caproto/caproto>
- [7] <https://github.com/paulscherrerinstitut/NetChannelAccess>
- [8] T. Kurita *et al.*, “The Staus of the Synchrotron of the Wakasa-wan Energy Research Center”, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 4-6, 2010, p. 76-79; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj7/proceedings/FSRP/FSRP24.pdf
- [9] T. Kurita *et al.*, “The Staus of the Synchrotron of the Wakasa-wan Energy Research Center”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 1-3, 2011, p. 274-79; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj8/proceedings/poster/MOPS013.pdf
- [10] T. Kurita *et al.*, “The Staus of the Synchrotron of the Wakasa-wan Energy Research Center”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 3-5, 2013, p. 367-369;

- https://www.pasj.jp/web_publish/pasj10/proceedings/PDF/SSFP/SSFP20.pdf
- [11] T. Kurita *et al.*, “PRESENT STATUS OF THE SYNCHROTRON AT WERC”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, p. 1220-31223; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/FSPH/FSPH009.pdf