

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)},
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)}
Tetsuro Kurita^{*,A)}, Satoshi Hatori^{A)}, Yutaka Hayashi^{A)}, Hiroaki Yamada^{A)}, Shin Hiroto^{A)}
Masaya Shimizu^{A)}, Masao Yodose^{A)}, Ryuta Fuchigami^{A)}, Keisuke Otabe^{A)}
Seishi Furukawa^{A)}, Yuki Haneda^{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, medical, biological and material sciences are performed. In the 2022 fiscal year of the period from April 1, 2022 to December 28, 2022, experiment time amounted to 1134.1 hours. The percentage of experiment time using the synchrotron was ~55%. 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 defence and space technologies corporation. In the report, overview of new system, progress of beam commissioning and development status of operation interface software are presented. Also it is reported that troubles of cooling water leakage from power supplies for electromagnets.

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-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

2022 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、2022/4/1 から 2022/12/28 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、タンデム加速器の整備 (デバイダー抵抗、放電ギャップ、高周波発振器の更新) によって運転時間が 1.5 ヶ月ほど短くなった。このため、運転日数が通常の 83% 程度で、総実験時間が例年より少ない。施設全体の実験時間は 1134.1 時間で、そのうちシンクロトロンは 55% 程度であった。

Figure 2 に近年のシンクロトロンが使われた実験テ

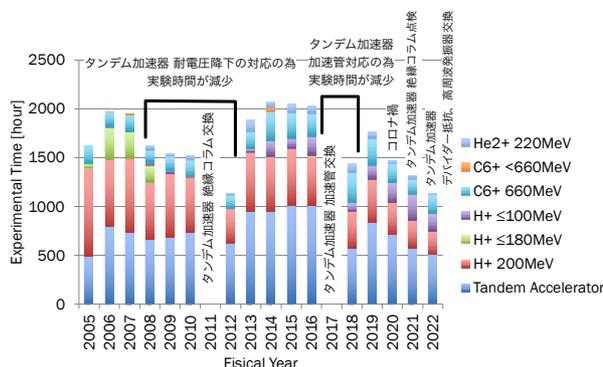


Figure 1: Trend of beam time categorized by ion and energy.

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。

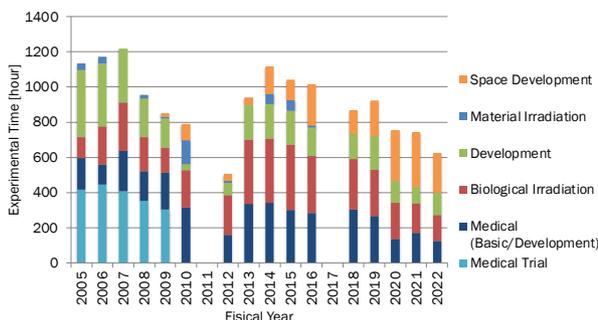


Figure 2: Trend of beam time of the synchrotron categorized by experimental interests.

* tkurita@werc.or.jp

宇宙開発関連の実験では、2015年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年度は21件を超える見通しである (Fig 3)。

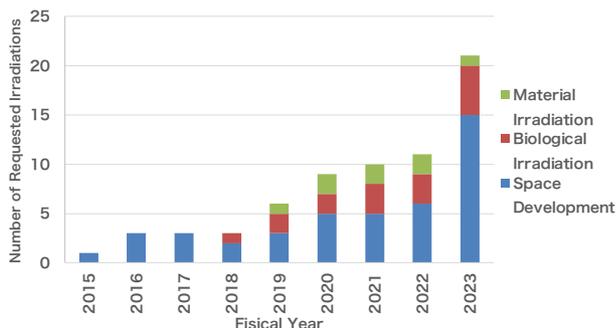


Figure 3: Trend of the number of themes of requested irradiations.

Figure 4 に近年の実施された実験課題数の推移を示す。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。

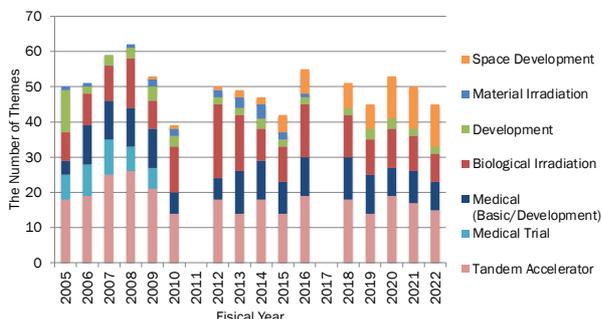


Figure 4: Trend of the number of themes categorized by experimental interests.

3. 高周波加速制御系の開発状況

現在、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。

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、フィードバックに用いられるもの以外の 6 台の BPM の信号を処理する。

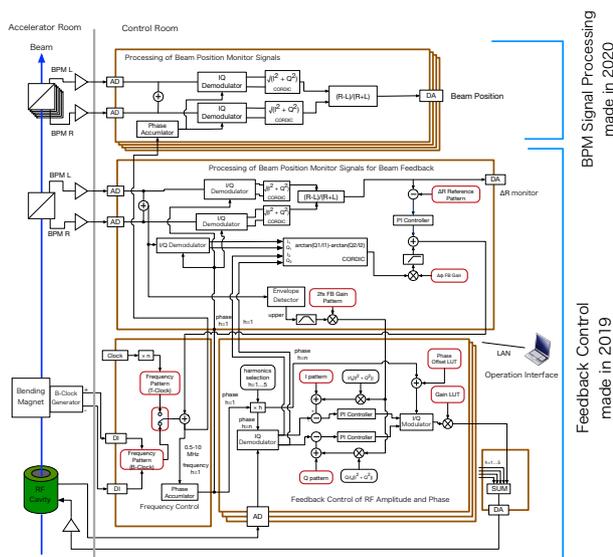


Figure 5: A schematics of New LLRF.

3.1 試験状況

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、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。

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。

2021 年度後半からビーム試験を開始すると、ADC と FPGA 間の遅延が安定しないことが問題になった。ADC と FPGA は JESD204B という規格でシリアル通信を行なっている。何らかの原因で、受信エラーが発生し、FPGA の受信バッファにデータの待ち行列が発生することが原因と考えられる。ADC と FPGA のタイミング調整は、FPGA は発信している SYSREF 信号によって行われる。FPGA が ADC に向けて発信している SYSREF 信号のタイミングを調整することによって、ADC と FPGA 間の遅延が安定するようになった。

これまでに、以下の機能の不具合の発見/修正を行いビーム調整に寄与することを確認した。

- B-Clock(磁場変化を検出して発生させるクロック)による周波数制御
- 空洞電圧フィードバック制御系
- バンチ位相の検出と位相振動フィードバック
- 横方向ビーム位置の検出とフィードバック制御
- 2倍高調波制御系

以下の機能の、試験および不具合の修正が未達成であるが、当面の通常運転は行える見込みである。

- T-Clock (時間周期クロック) による周波数制御
- 四極モード位相振動フィードバック

3.2 オペレーションインターフェースの開発

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。

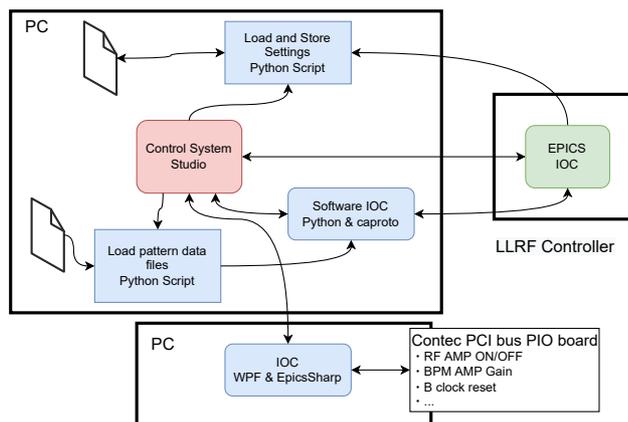


Figure 6: Architecture of operation interface software.

GUI画面はControl System Studio(CSS) [5] を用いている。CSSではそのままでは実装が困難な、複数の設定を連動して操作するなどの複雑なロジックの実装、各種パターンデータの生成や設定を行うために、同じPC内でPythonによるSoftware IOCをPythonのEPICS Channel Access ライブラリであるcaproto [6] を用いて開発した。このSoftware IOCは、Channel Accessなどの入出力を非同期で実行している。そのイベントループをブロックしないように、設定の一括設定/保存、パターンデータの送信などのためのファイル選択ダイアログなどは、CSSのAction ButtonからPythonスクリプトを独立したプロセスとして実行するようにしている。

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、コンテックスのPIOボードを用いている。PIOボードのIOCをC#.NetのEPICS Channel Access ライブラリであるEpicsSharp [7] を用いて構築した。

CSSによるオペレーション画面は、調整の場面ごとに、必要なコントロール、パラメータ、波形の表示を一画面にまとめるように作成している。その例として、捕獲周波数とビームフィードバック調整用をFig. 7,8に示す。

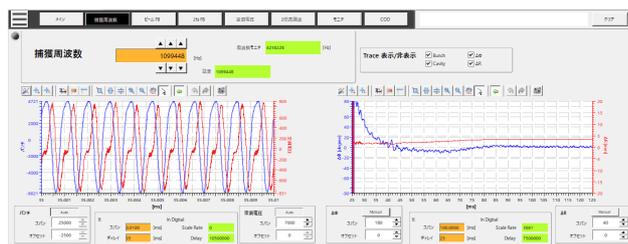


Figure 7: An operation interface to tune capture frequency up.

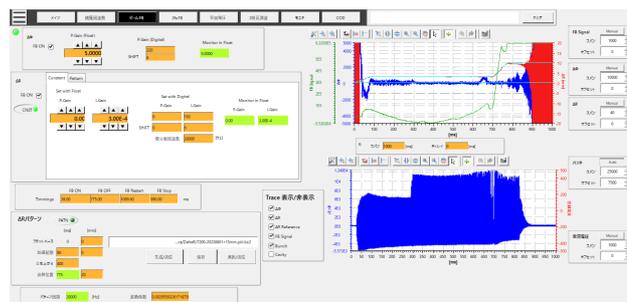


Figure 8: An operation interface for beam feedback control.

4. 電磁石電源の水漏れ

加速器の運用は20年を超え、電磁石電源の老朽化により、電源の銅製水冷シャント抵抗および銅製トランジスタバン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。Figure 9, 10に水漏れの様子を示す。Table 1に2021年度と2022年度の水漏れの件数を示す。

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、物理的には侵食だけでなく、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。

現在、水冷のシャント抵抗はロウ付けによる応急処置を行うとともに、空冷シャントに順次交換している。トランジスタバンク冷却板は、同等品を再制作して、予備品をストックし、水漏れが発生したら、速やかに対応できる体制を整備している。

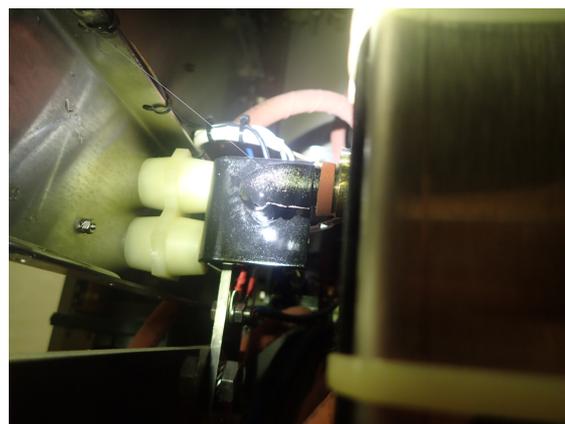


Figure 9: Leakage of cooling water of the shunt resistance in the power supply for the switching magnet.

Table 1: Number of Leakage of Cooling Water of Power Supplies

Fiscal Year	Cooling Plate	Shunt Resistance
2021	2	1
2022	6	1



Figure 10: Leakage of cooling water of the cooling plate of transistors in the power supply for the sextupole magnet.

5. まとめ

2022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1134.1時間にとどまった。シンクロトロンのはじめは宇宙開発関連に強い需要があり、依頼照射の件数が増えている傾向にある。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。同時にオペレーションインターフェースの開発も進めている。今年度中に通常の運転に使えるように整備する予定である。

電磁石電源の老朽化により、電源の銅製水冷シャント抵抗および銅製トランジスタバン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。

当面修理で対応しているが、恒久的には電磁石電源の更新を行う必要がある。

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/paulscherrerinstitute/NetChannelAccess>