

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*, 羽鳥聡, 山田裕章, 廣戸慎, 清水雅也, 山口文良,
淀瀬雅夫, 瀧上隆太, 小田部圭佑, 古川靖士, 羽田祐基

Tetsuro Kurita*, Satoshi Hatori, Yutaka Hayashi, Hiroaki Yamada, Shin Hiroto, Masaya Shimizu
Fumiyooshi Yamaguchi, Masao Yodose, Ryuta Fuchigami, Keisuke Otabe, Seishi Furukawa, Yuki Haneda
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 2020 fiscal year of the period from April 1, 2020 to January 29, 2021, experiment time amounted to 1468.8 hours. The percentage of experiment time using the synchrotron was ~51.5%. From April to May 2020, some experiments were canceled due to the state of emergency measures taken against COVID-19. The experimental time was reduced from 2019. Also, we report development progress of a new LLRF control system. The new system utilizes FPGA and MicroTCA.4. The off-beam commissioning is in under progress. Improvement of a BPM signal processing circuit is progressing. The AM/PM converter utilized to obtain beam positions, of which outputs depend on input signal level. It will be presented the development status of an amplifier to make input signal level to the AM/PM converter constant.

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、1468.8 時間であり、その内シンクロトロンを使った実験は ~51.5% であった。

2020 年の前半は新型コロナウイルス感染症に対してとられた緊急事態宣言の措置によるマシンタイムのキャンセルが発生した。このため、2019 年度より、実験時間が減少することになった。

4 月には、4 件 (6 日) の実験がキャンセルされた。そのうち 2 日は代替実験を実施した。5 月には、7 件 (8 日) の実験がキャンセルされた。そのうち 7 日は代替実験を実施した。

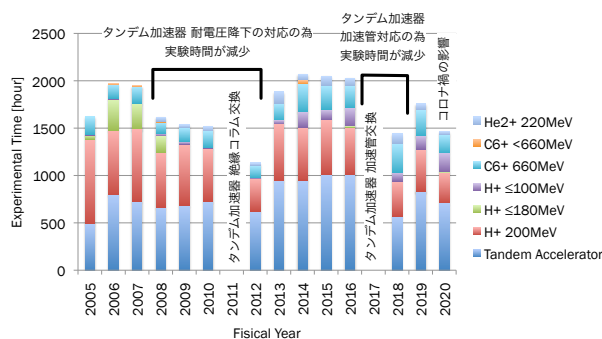


Figure 1: Trend of beam time categorized by ion and energy.

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。シンクロトロンから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る。

2014 年度から、人工衛星搭載用電子機器の放射線環境化での試験を行うユーザーが集まり始め、2016 年度まで増加傾向にあったが、2018 年度は、いくらか減った。2018 年度は、受託研究の生物照射と医療が大きな割合を占めており、外部利用がおもな宇宙開発関連の実験に実験時間を割り当てられなかったと考えられる。2019 年から再び増加傾向にあり、2020 年には大幅に宇宙開発関連の割合が、実験時間および課題数の両方で増加傾向にある。宇宙搭載機器の放射線耐性試験に強い需要がある。

Figure 3 に近年の実施された実験課題数の推移を示

* tkurita@werc.or.jp

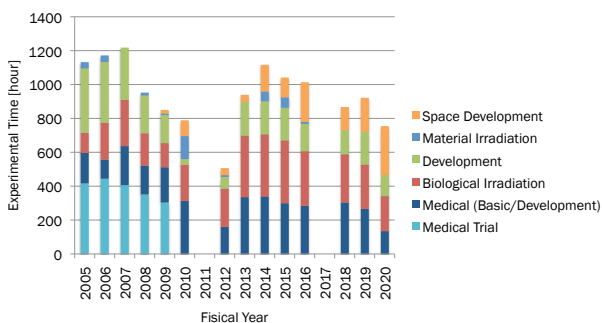


Figure 2: Trend of beam time of the synchrotron categorized by experimental interests.

す。ほぼ毎年 50 前後の課題が申請/実施されている。

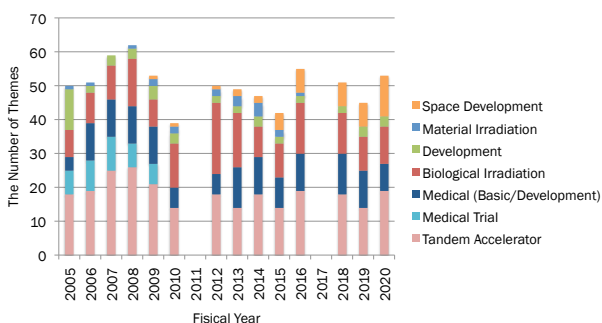


Figure 3: Trend of the number of themes categorized by experimental interests.

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 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 ボード [4] を用いる。AMC ボードには、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 入力の都合で、二つの AMC ボードで構成する。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。2019 年度に製作した。

もう一つの AMC ボードは、6 台の BPM の信号を処理する。2020 年度に製作した。現在、オフビームでの調整を行なっている [5]。

4. ビーム位置モニタ信号用アンプの開発

W-MAST のシンクロトロンで用いられているビーム位置モニタ (BPM) はダイアゴナルカットされた直

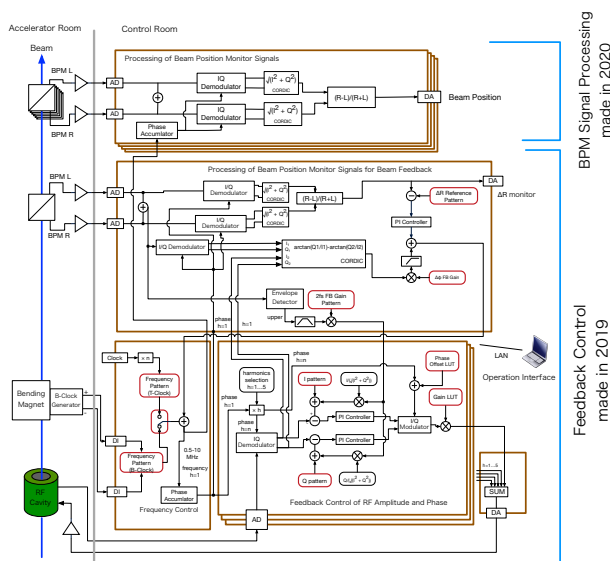


Figure 4: A schematics of New LLRF.

方電極である。測定信号からビーム位置の演算には AM/PM 変換回路が用いられている。AM/PM 変換回路は、入力信号の振幅差を位相差に変換してビーム位置を演算する。

位相検出の際に信号が完全な矩形波でない限り信号レベルが変化すると演算結果が変化する。Phase Detector 直前で Limiting AMP によって矩形波に近い波形に整形しているが、十分でない状況にある。入力信号レベルが一定範囲外になると演算結果が大きく変化する [2]。

加速高周波の周波数をビーム位置でフィードバック制御しているため、リング内の電荷を大きく変化させると、出射ビームのエネルギーおよび出射ビームラインでのビーム位置が変化する。したがって、AM/PM 変換回路によるビーム位置演算結果が入力信号 (リング内の電荷量) に依存する場合、シンクロトロンの出射電流量の調整には注意を要する。ビーム電流量を 10 倍以上の範囲で変化させる実験は頻繁にあり、そのような要請がある場合は、

- シンクロトロンの入射電荷を変化させた際には、AM/PM 変換回路への入力信号レベルが一定範囲になるように、BPM 信号のアンプゲインを調整する (いくつかの固定倍率から選択)。
- シンクロトロンの入射電荷を変化させず、出射用 RF キッカーの出力を下げて、出射電流量だけを変化させる。

などの手段でビーム電流量を調整している。場合によっては、出射ビームラインの再調整が必要なこともある。

AM/PM 変換回路の出力が入力信号レベルに依存しないようになれば、調整手順を簡素化することができる。そこで、AM/PM 変換回路の入力信号レベルがある程度一定になるように、ゲインがフィードバック制御されるアンプを挿入する。R 信号と L 信号の和信号をダイオード検波した信号と設定電圧が同じになるように、アンプのゲインをフィードバック制御する。2019 年度に 1 号機を開発し、入力信号レベルに依存せず、安定したビー

ム位置演算結果を得られるようになった [2]。

しかし、1号機では、BPM 信号の上側を包絡線検波しており、四重極モードの位相振動フィードバックと干渉する問題点があった。そこで、以下の改良を施した2号機の開発を行った。

- BPM 信号の下側を包絡線検波する。
- LPF と PI 制御を導入して、四重極モードの周波数帯域 (> 1 kHz) のゲインを抑える。

回路図を Fig.5 に示す。

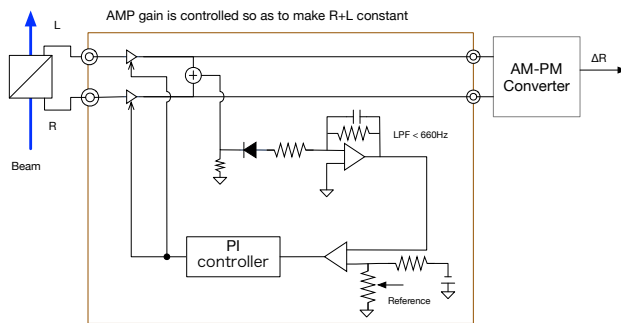


Figure 5: A circuit of an amplifier to make input signal level to the AM/PM converter constant.

PI ゲインの調整は、BPM 信号の立ち上がりを模擬した AM 信号を Function Generator で生成して行った。模擬信号を入力し、フィードバック出力の立ち上がりのオーバーシュートを最小限にし、定常状態になる時間が最小になるように PI ゲインを調整した。P ゲイン = 0.49, I ゲイン = 2339 と調整した。

オフビームでの試験は完了し、今後、ビームを使った試験を予定している。

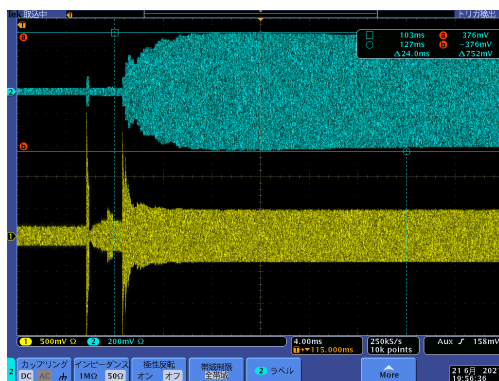


Figure 6: Adjustment of PI gain. Blue: pseudo BPM signal generated with a function generator. Yellow: a feedback controlled output.

5. まとめ

2020 年度は、新型コロナウイルスの影響で、一時期外部ユーザーの利用が制限されることがあった。施設として、感染症対策に取り組みながら運転を続けている。

FPGA を使った加速高周波制御系の更新を進めており、現在、オフビームでの試験がほぼ完了した。クロッ

クが不安定というハードウェアの問題があり、クロック通倍回路に使われている Voltage Control Oscillator (VCO) の交換を予定している。その際に、クロックを 150MHz から 300MHz に変更する予定である。

今後、ビーム試験を行うとともに、オペレーションインタフェースの開発を進める予定である

ビーム位置演算が信号レベルで変化する問題に対応するために、BPM 信号の信号レベルをフィードバック制御で一定にするアンプを開発した。今後、ビーム試験を予定している。

なお、FPGA を使った高周波制御系の更新が完了すると AM/PM 変換回路は撤去され、FPGA を用いた同期検波の回路に置き換えられる予定である。ゲインのフィードバック制御機能は不要になる可能性が高い。しかし、高周波制御系の更新に伴い撤去される回路の中にビーム位置モニタアンプも含まれており、代替となるアンプ自体は必要になる。

謝辞

加速高周波制御系の開発にあたって、(株)三菱電機特機システムの方々にご尽力いただきました。ゲインフィードバック付き BPM アンプの製作にあたって、(有)ギガの松下様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.*, “PRESENT STATUS OF THE SYNCHROTRON AT WERC”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan”, Sep. 2020, p. 958-961.; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/FRSP/FRSP05.pdf
- [3] F. Tamura *et al.*, “DEVELOPMENT OF A VECTOR RF VOLTAGE CONTROL SYSTEM FOR THE J-PARC RCS”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 2017, pp. 241-245.; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/THOL/THOL16.pdf
- [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, F. Tamura, “Development of a LLRF control system at WERC”, in these proceedings (WEB07).