

## 若狭湾エネルギー研究センターシンクロトロン PRESENT STATUS OF THE SYNCHROTRON AT WERC

栗田哲郎<sup>\*A)</sup>、羽鳥聡<sup>A)</sup>、林豊<sup>A)</sup>、山田裕章<sup>A)</sup>、廣戸慎<sup>A)</sup>、清水雅也<sup>A)</sup>、山口文良<sup>A)</sup>  
淀瀬雅夫<sup>A)</sup>、長崎真也<sup>A)</sup>、大矢龍輝<sup>A)</sup>、瀧上 隆太<sup>A)</sup>、吉本 淳<sup>A)</sup>

Tetsuro Kurita<sup>\*A)</sup>, Satoshi Hatori<sup>A)</sup>, Yutaka Hayashi<sup>A)</sup>, Hiroaki Yamada<sup>A)</sup>, Shin Hiroto<sup>A)</sup>, Masaya Shimizu<sup>A)</sup>  
Fumiyoshi Yamaguchi<sup>A)</sup>, Masao Yodose<sup>A)</sup>, Shin'ya Nagasaki<sup>A)</sup>, Ryuki Oya<sup>A)</sup>, Ryuta Fuchigami<sup>A)</sup>, Atsushi Yoshimoto<sup>A)</sup>,  
<sup>A)</sup>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 2018 fiscal year of the period from June 11, 2016 to February 1, 2019, experiment time amounted to 1443 hours. The percentage of experiment time using the synchrotron was ~60%. Also, we report an improvement of vacuum system of the extraction beam line of the synchrotron. The vacuum of beam lines affect vacuum of the ring. The effort to improve vacuum of beam lines has begun from 2011. Vacuum leaks were found at the body of turbo molecular pump and profile monitors. The turbo molecular pump was updated in 2014. In 2018, one of three profile monitors was updated. The profile monitor has been redesigned to fix vacuum leaks. The beam extraction control system has been developed continuously. A reference of spill feedback control automatically adjusts to keep constant spill width according to charge in the ring just before extraction. Using the function to measure charge in the ring, it is added the function to measure charge at the timing of before and after acceleration. Also, the power of the RF kicker has increased with optimization of band noise.

### 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

2017 年 7 月はじめにシンクロトロンの入射器であるタンデム加速器の定期点検後、絶縁ガス (6 フッ化イオウ SF<sub>6</sub>) を充填を行った際に、加速管の真空リークが発見された。加速管は、チタン電極と円筒形の硼珪酸ガラス製絶縁体が積層接着された構造になっており、電極/ガラス絶縁体の接着面に剥離は発生していた [2]。2017 年 7 月から 2018 年 5 月まで、すべての加速管の交換作業を行ったため、長期間の運転の中断が発生した。

加速器利用は 2018 年 6 月から再開され、2019 年 1 月まで行われた。2019 年 2 月から 3 月はタンデム加速器の定期点検が行われた。

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。2018 年度は、タンデム加速器の加速管交換作業のタンデム加速器の定期点検期間の 2-3 月に固定するために、例年より 3 ヶ月ほど運転期間が少なく、実験時間は 1443 時間であった。そのうち、シンクロトロンを使った実験の割合は、~60% であった。これまで、ほぼコンスタントに 50% 程度であったので、10% ほど増加した。

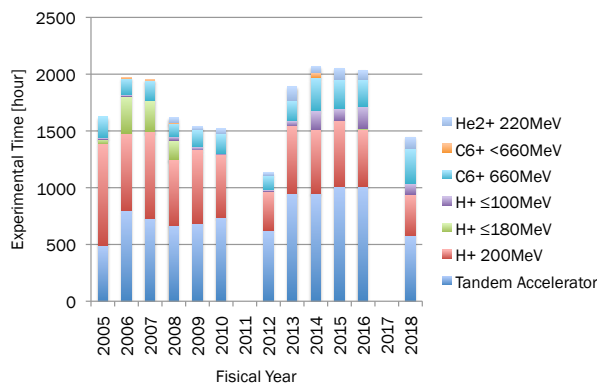


Figure 1: Trend of beam time categorized by ion and energy.

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く

\* tkurita@werc.or.jp

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。

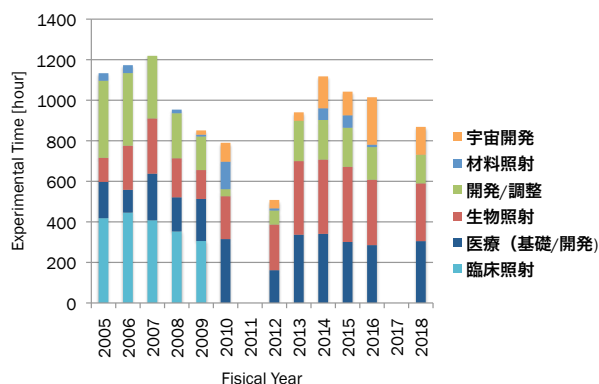


Figure 2: Trend of beam time of the synchrotron categorized by experimental interests.

Figure 3 に近年の実施され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。

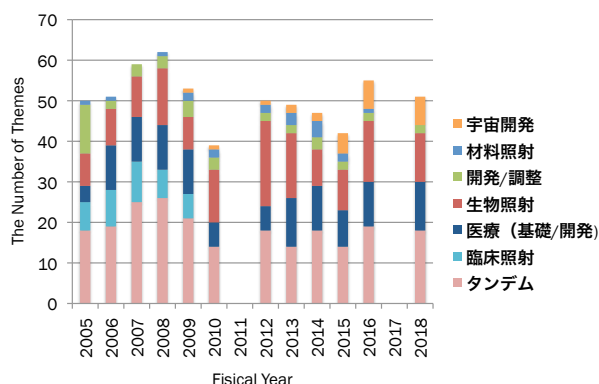


Figure 3: Trend of the number of themes categorized by experimental interests.

### 3. 出射ビームラインの真空系の整備

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。

当初、平均の真空度が  $\sim 8.6 \times 10^{-6}$  Pa であり、20 MeV 入射、660 MeV 出射時の炭素イオンの加速効率が 8% 程度と非常に低かった。

2009 年頃から、シンクロトロンの真空度を向上させる取り組みを開始した。2009 年度に以下を行うことにより、真空度を  $\sim 8.6 \times 10^{-7}$  Pa まで向上し、加速効率も 39% まで向上した [3]。

- 入出射部のチャンバーの O-ring の材質をニトリルゴムから耐放射線性バイトンに変更
- 2 台のイオンポンプをクライオポンプに交換
- ベーキング

2010 年度に老朽化した 9 台のイオンポンプの更新を行った。ANELVA 912-7010(140 L/s) を ULVAC アク

ターボポンプ 200AX II (220 L/s) に交換した。排気容量が増えたため、真空度は、 $\sim 7.5 \times 10^{-7}$  Pa まで向上した。

シンクロトロンに真空系に関しては、かなりの改善が行えたが、入出射のビームラインの真空度が悪く、ゲートバルブを開いて接続するとリング内の真空度が  $1.3 \times 10^{-6}$  Pa まで悪化する。

2011 年から入出射ビームラインの真空度を向上させる取り組みを開始した [4]。

- 出射ビームラインには真空計がピラニゲージしか設置されていない。コールドカソードゲージを追加した。
- リークチェックおよびリーク修繕
- メタルシール化

これによって、入射ビームラインの真空度は、 $2.7 \times 10^{-4}$  Pa から  $2.1 \times 10^{-5}$  Pa と一桁以上向上し、リング内の真空度に影響を与えることはなくなった。

出射ビームラインでは、ターボポンプおよび 3 台のプロファイルモニタに真空リークが発見され、真空度は向上させられなかった。真空度は  $\sim 3.5 \times 10^{-4}$  Pa 程度であった。

#### 3.1 ターボ分子ポンプの更新

出射ビームラインのターボ分子ポンプは、Fig. 4 のように、ビームラインの横にゲートバルブおよび 90 度のアングルパイプを経由して接続されており、下から架台で支えられていた。このため、ビームラインとゲートバルブを支えつつ下から架台で押されているので、本体を折り曲げるような力が働いていた。

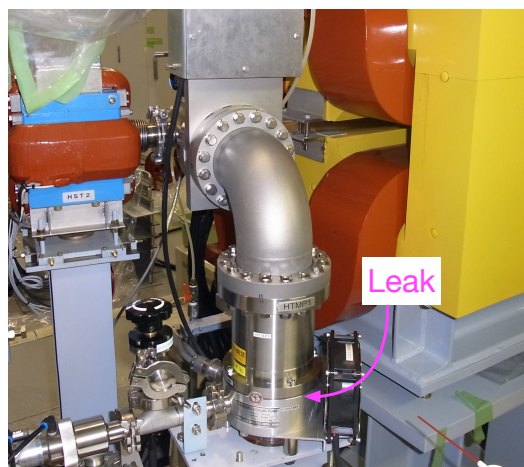


Figure 4: Old turbo molecular pump at the extraction beam line.

使用されていたターボ分子ポンプ (大阪真空 TH162) の筐体は、円筒面の内外系での O-リングシールによって接続されている箇所があり、筐体に加わる力によって、この部分から真空リークが発生していた。

ターボ分子ポンプの排気口に He リークディテクターをつないでビームラインの真空リークを行う際には、ターボ分子ポンプのリークとビームラインのリークの判別が難しく、大きな障害であった。

そこで、2014 年に Fig. 5 のように、横置きできるター

ポ分子ポンプ（大阪真空 TG350F）に更新し、ポンプ胴体から真空リークが発生することはなくなった。

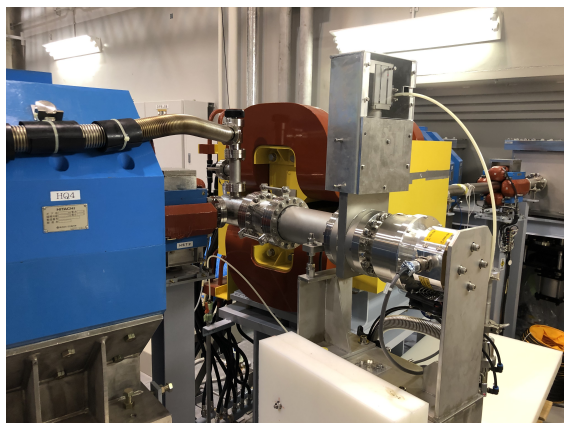


Figure 5: New turbo molecular pump at the extraction beam line.

が期待できる。

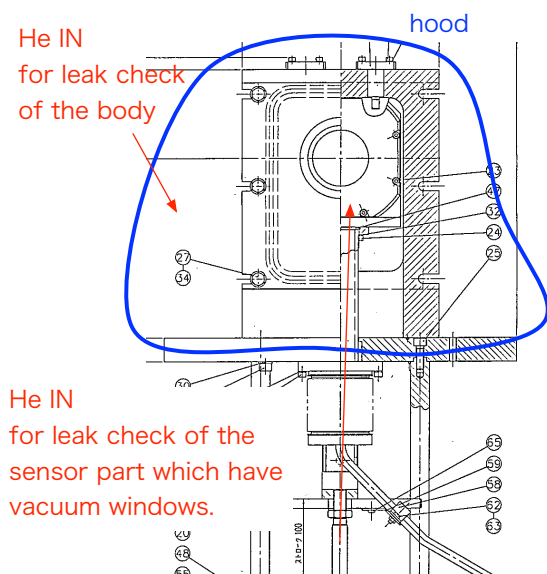


Figure 6: He leak check of a profile monitor

### 3.2 プロファイルモニタの設計変更と更新

出射ビームラインには3台のイオンチェンバー型ワイヤープロファイルモニタ (HPR1,HPR2,HPR31) が設置されている。2011年に、3台すべてのプロファイルモニタの真空リークが発見され、2013年度まで分解点検およびO-ring 交換などによって修繕を試みたが、修繕することができなかった。

プロファイルモニタからの真空リークは間欠的で真空度にスパイク状の変動を及ぼしていた。それを確認したリーク試験を Fig. 6,7,8 に示す。

筐体をビニールのフードで囲い、その中に He ガスを導入した (Fig. 6)。その状態で真空度と He リークディテクターによるリークレートのトレンドを観測した。HPR2 の測定例を Fig. 7,8 に示す。真空度とリークレートが同期して変動するイベントが多数確認された。特に、真空窓を持つセンサー部分に He を導入した時に顕著に同期した変動が多く現れた。すなわち、間欠的にリークが発生して外部から大気真空に流入していることが示唆される。他の2台のプロファイルモニタにも同様のリークを確認している。

従来のプロファイルモニタは Fig. 9 のように、締結ボルトが少なくアンバランスな配置で、細い O-ring が使用されていたためリークしやすい構造であり、抜本的な修繕のためには、構造を大きく変更する必要があると考えた。2015年から2016年にかけて Fig. 10 に示す新プロファイルモニタを設計した。不均一なボルトの配置を解消し、できる限り太い O-ring を使用するようになった。

2017年に制作する予定であったが、タンデム加速管の加速管に真空リークが発生し、制作することができなかった。2018年度に一台制作し、HPR2としてインストールした。

Figure 11 にインストール前後の出射ビームライン真空度のトレンドを示す。HPR2の更新に伴い、真空度の変動が大きく減少した。まだ、真空度の変動が残っているのは、他の2台のプロファイルモニタの影響と考えられる。それらを更新することができれば、真空度の改善

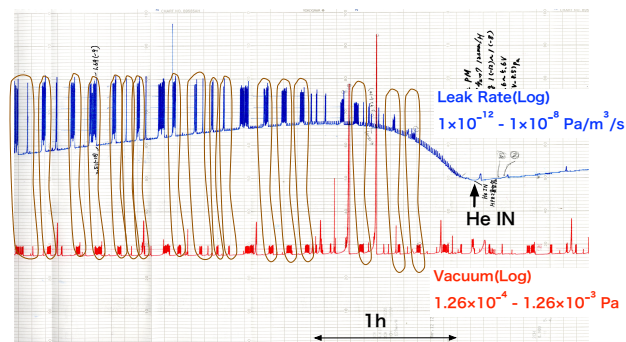


Figure 7: Trend of vacuum and leak rate when He gas is introduced into the inside of the sensor part.

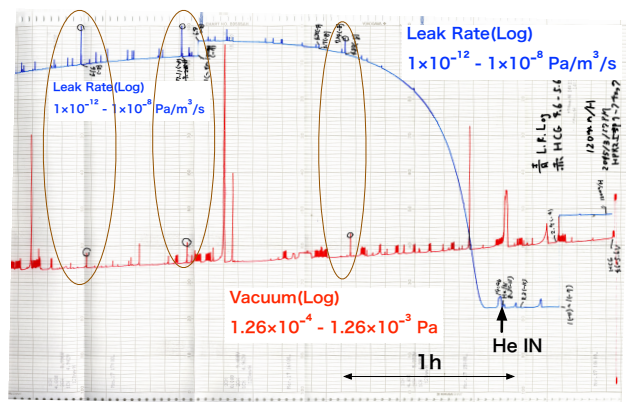


Figure 8: Trend of vacuum and leak rate when He gas is introduced into the hood covering the body.



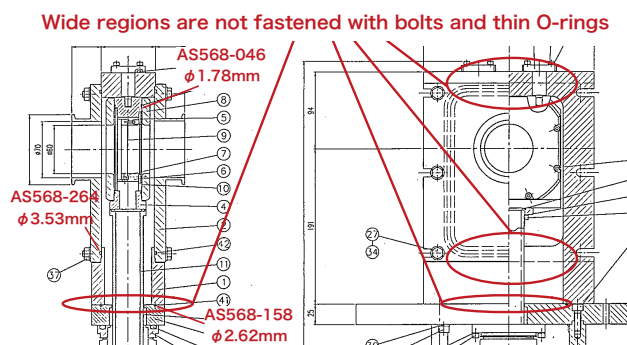


Figure 9: Problems of old profile monitor.

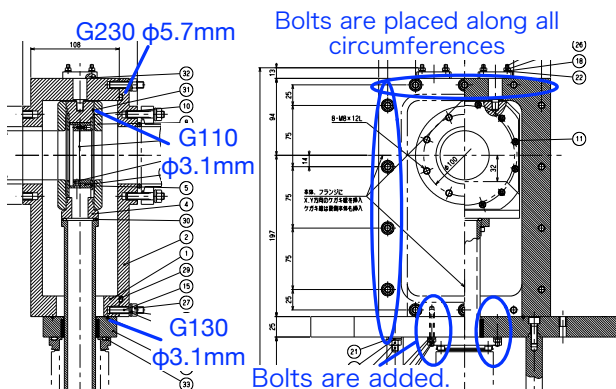


Figure 10: The design of new profile monitor.

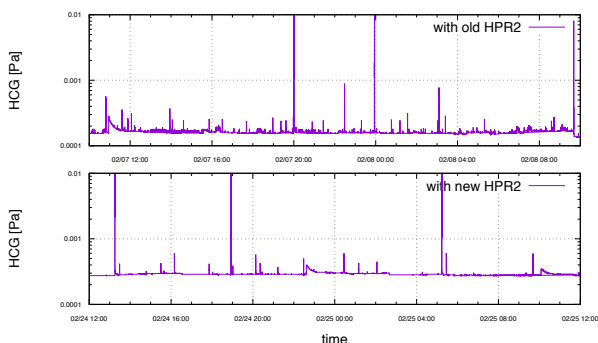


Figure 11: Comparison of trend of vacuum of the extraction beam line between before and after update of HPR2.

#### 4. 出射制御系の開発 [5]

W-MAST シンクロトロンでは、帯域ノイズを用いた RF ノックアウト法によって遅い取り出しを行っている。2017 年度に、老朽化した出射制御系の更新を行った [6]。その際に、出射スピルを一定にするために、出射ビームの電流量をイオンチェンバーで測定し、その信号を出射用高周波振幅にフィードバックするフィードバック制御（スピルフィードバック）を改良した。

2018 年度にも開発を継続し、フィードバック制御の改良を行った。出射直前のリング内の電荷量をモニタし、それに比例してフィードバック制御の目標値を変化させ、電荷量に変化してもスピルの時間幅が一定なるよう

な制御を開発した。

リング内の電荷量をモニタする機能を利用して、捕獲電荷/加速電荷/出射電荷/漏れ電荷を自動的に測定する機能を付け加えた。

さらに、帯域ノイズの生成について最適化を行うことにより、RF キッカーのパワーを増強させた。

#### 5. まとめ

2018 年度は、実験時間は 1443 時間であった。タンデム加速器の加速管交換作業のため例年より運転開始時期が遅くなったため、2016 年度の例年の ~70% であった。そのうち、シンクロトロンを使った実験は、~60% であった。

出射ビームラインの真空リークが確認されたターボ分子ポンプと 3 台のプロファイルモニタのうち 1 台を更新した。これにより、真空度の変動が少なくなった。予算が確保できしだい、残り 2 台のプロファイルモニタも更新予定である。

出射制御系に幾つかの機能を追加した。2018 年度から、新しい出射制御系は安定に運用しており、利便性および作業効率の向上に寄与している。

#### 謝辞

新プロファイルモニタの設計および制作に当たって、株式会社ブイテックスおよび日立製作所の多く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] 羽鳥聡 他, “若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状”, 若狭湾エネルギー研究センター研究年報, 20, 2018, pp. 126-127.; [http://www.werc.or.jp/research/kenkyuseika\\_houkoku/img/1houkokusyuH29.pdf](http://www.werc.or.jp/research/kenkyuseika_houkoku/img/1houkokusyuH29.pdf)
- [3] T. Kurita *et al.*, “THE STATUS OF THE SYNCHROTRON OF THE WAKASA WAN ENERGY RESEARCH CENTER”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan, Aug. 2013, pp. 274-278.; [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj8/proceedings/poster/MOPS013.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj8/proceedings/poster/MOPS013.pdf)
- [4] T. Kurita *et al.*, “THE STATUS OF THE SYNCHROTRON OF THE WAKASA WAN ENERGY RESEARCH CENTER”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 2013, pp. 367-369.; [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj10/proceedings/PDF/SSFP/SSFP20.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj10/proceedings/PDF/SSFP/SSFP20.pdf)
- [5] T. Kurita, “DEVELOPMENT OF A BEAM EXTRACTION CONTROL SYSTEM FOR THE SYNCHROTRON AT WERC (2)”, in these proceedings (THPI028).
- [6] T. Kurita, “DEVELOPMENT OF A BEAM EXTRACTION CONTROL SYSTEM FOR THE SYNCHROTRON AT THE WAKASA WAN ENERGY RESEARCH CENTER”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 2018, pp. 590-592.; [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEP0/WEP094.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEP0/WEP094.pdf)