

# 若狭湾エネルギー研究センター シンクロトロン の現状

## THE STATUS OF THE SYNCHROTRON OF THE WAKASA WAN ENERGY RESEARCH CENTER

栗田哲郎 \*A)、羽鳥聡 \*A)、林豊 \*A)、長崎真也 \*A)、廣戸慎 \*A)、小田桐哲也 \*A)、島田麻亜久 \*A)  
 山田裕章 \*A)、山田和彦 \*A)、山口文良 \*A)、淀瀬雅夫 \*A)、清水雅也 \*A)

Tetsuro Kurita \*A)、Satoshi Hatori<sup>A)</sup>、Yutaka Hayashi<sup>A)</sup>、Shinya Nagasaki<sup>A)</sup>、Shin Hiroro<sup>A)</sup>、Tetsuya Odagiri<sup>A)</sup>、Mark Shimada<sup>A)</sup>  
 Hiroaki Yamada<sup>A)</sup>、Kazuhiko Yamada<sup>A)</sup>、Fumiyoshi Yamaguchi<sup>A)</sup>、Masao Yodose<sup>A)</sup>、Masaya Shimizu<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. We report the operation status, the improvement of the vacuum system and commissioning of new beam feedback system of RF Control.

### 1. はじめに

若狭湾エネルギー研究センター加速器施設 (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<sup>[1]</sup>。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。

2011年1月からタンデム加速器の絶縁コラム交換作業より長期間の運転の中断が発生したが、2012年7月より運転が再開している。この間に、シンクロトロン入射ラインのビームダクトのメタルシール化をおこなった真空度の向上を図った。

また、加速高周波制御系を更新し、様々な機能を付加させる開発を行っている。もっとも大きな改良は、ビームフィードバック制御系である。これまで、フィードバック信号を VCO で周波数に変換してから、DDS の出力に足し合わせていたが、ADC で DSP に読み込み、DDS に直接反映させる方式を開発した。

### 2. 運転状況

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。

近年、シンクロトロンの入射器であるタンデム加速器の耐電圧性能劣化し、修繕作業のために多くの時間が割かれ、2009年以降では、それ以前より実験時間が減る傾向にあった。2011年1月から2012年6月まで、タンデム加速器の絶縁コラムの交換作業のために長期間の運転の中断が発生した。

2012年度は7月から12月まで運転が行われた。タンデム加速器の絶縁コラム交換作業のために従来より、少ない運転期間である。実験にビームを供給した総運転時間は1135時間であった。整備の為にビームを供給できた期間は短かったが、週休2日で、夜間は加速器の調整/コンディショニングを行う体制のもと、6ヶ月間ほ

ぼフル稼働したことになる。そのうち、シンクロトロンからビームが供給された割合は45%であった。

2013年は3月から運転を開始しており、タンデム加速器のターミナル電圧も定格の5MVが復活した。実験時間の復活が期待できる。

Figure 2 にシンクロトロンからのビームの2012年度のテーマ別の統計を示す。例年通り、もっぱら医療および生物の照射実験に使用されている。

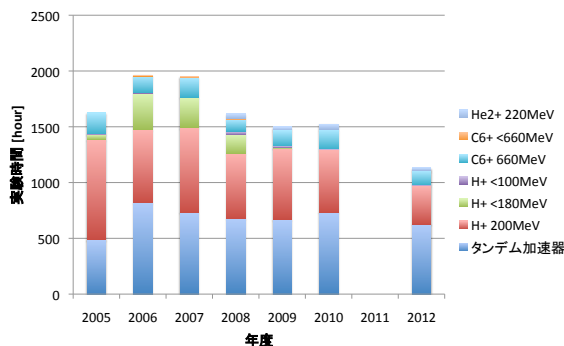


Figure 1: Trend of Experimental Time Categorized by ion and energy.

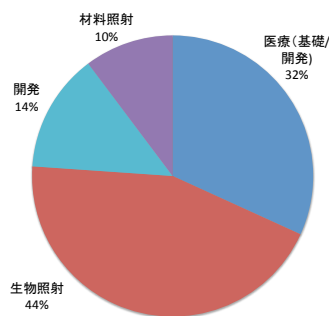


Figure 2: Beam Time Breakdown by Experimental Interests.

\* tkurita@werc.or.jp

### 3. 入出射ビームラインの真空度の改善

若狭湾エネルギー研究センター加速器施設のシンクロトロンカーボンビームの加速効率、真空度に大きく制限されていた。そのため、2009年度には、2台のイオンポンプ(140 L/s)をクライオポンプ(1400 L/s)に置き換え、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した。さらにベーキングを行うことにより、平均の真空度を  $8.6 \times 10^{-6}$  Pa から  $8.2 \times 10^{-7}$  Pa に向上させた<sup>[2]</sup>。これにより、20 MeV 入射時のカーボンビームの加速効率が8%から39%に向上した<sup>[3]</sup>。

2010年度には、イオンポンプの更新が行われ、排気量が140 L/sから220 L/sに増強された。これによって、平均真空度が  $7.5 \times 10^{-7}$  Pa まで向上した<sup>[3]</sup>。

実際にビームを輸送する際にビームラインに接続すると、ビームラインの真空度の影響を受け、シンクロトロン本体だけでなく、接続されるビームラインの真空度も向上させる必要がある。

シンクロトロン入出射ラインの真空度の向上を図るべく以下の対策を行った。

- 超高真空計の設置
- 包括的なリークチェックおよびリーク箇所の修繕
- ビームラインダクトのメタルシール化

ビームラインダクトのフランジにはO-ringシールのISO-KFフランジが使われていた。このフランジのO-ringをEVAC社のアルミエッジシールに交換した。EVAC社の仕様では、EVAC社のチェーンクランプを用いてフランジを接続することになっている。しかし、溶接に伴うフランジのゆがみにより、チェーンクランプでは十分な潰ししろを確保できなかった。そこで、独自のボルトで固定するクランプを開発し (Figure 3)、ビームダクトのメタルシール化に成功した。これにより、入射ラインの真空度が  $2.7 \times 10^{-4}$  Pa から、 $2.1 \times 10^{-5}$  Pa まで向上した。

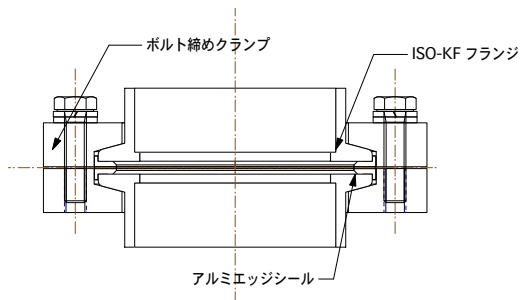


Figure 3: A Custom Clamp for a Metal Sealing ISO-KF Frange

出射ラインについては、三台設置されているプロファイルモニタすべてに真空リークが発見された。部材調達の都合で、2011年度の整備期間内には完全にリークを修繕することができなかった。2012年度は一台の修繕を行ったが、未だリークを修繕しきれていないプロファイルモニタが残り、出射ラインの真空度は  $3.5 \times 10^{-4}$  Pa にとどまっている。

Figure 4に入出射ビームラインのゲートバルブを開閉させた時の、シンクロトロン入出射部の真空度の変化を示す。入射部のゲートバルブを開いても、シンクロトロン本体の真空度はほぼ変化しないが、出射部のゲートバルブを開くとシンクロトロン本体の真空度に影響する。2013年度の整備期間中に、プロファイルモニタのリーク対策を行うことを予定している。

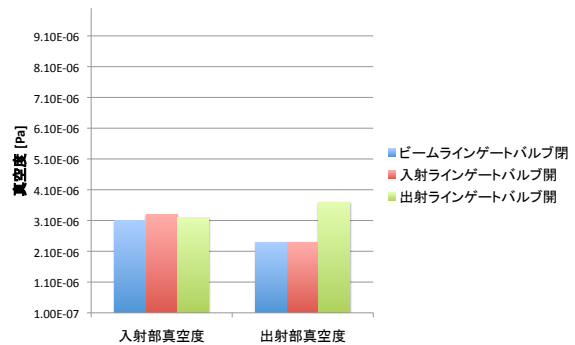


Figure 4: Vacuum Influenced by Injection and Extraction Beam Lines.

### 4. 加速 RF 制御系の更新とビームフィードバックの改善

2009年から加速RF制御系の更新に取り組んできた<sup>[2,3]</sup>。2011年にインストールがおこなわれ、2012年からデバッグをおこなっている。

Figure 5に加速RF制御系の概要を示す。主発振器DDSが用いられDSPに制御されている。偏向電磁石に設置してあるサーチコイルで検出されたB-Clock信号に従い、DSPがDDSの周波数を更新する。ビーム位置検出器によって検出されたビーム位置および位相信号によって生成したフィードバック信号はVoltage Control Oscillator(VCO)を使用して周波数に変換しDDSの出力に加算していた。

従来は、アナログ信号であるフィードバック信号が制御室から本体室まで搬送されており、その間でノイズが重畳する。このため、ビームフィードバックが動作していない捕獲中や出射中に不安定性があつた。また、制御のためのDSPおよびDDSがリング内の放射線環境下に設置されており、しばしばDSPのエラーによる停止もしくは動作の異常が発生した。

そこで、まずはDSPおよびDDSを本体室から制御室に移設し、DSPおよび制御系PCの更新とともに、フィードバック信号を本体室のVCOに伝送せず、ADCでデジタル化しDSPにおいてDDSの設定値に加算する方式を開発した。

フィードバック信号による周波数の補正はDDSの設定時間およびDSPの処理速度の制約により、現状50kHzで行っている。AD変換を開始してから実際にDDSに周波数は反映されるまでの遅延時間は約  $8 \mu\text{sec}$  である。

B-Clockによって周波数を更新するのではなく、DSPの内部パターンによる更新も行えるようにした。この場合、B-Clockによる割り込みのオーバーヘッドが無くな

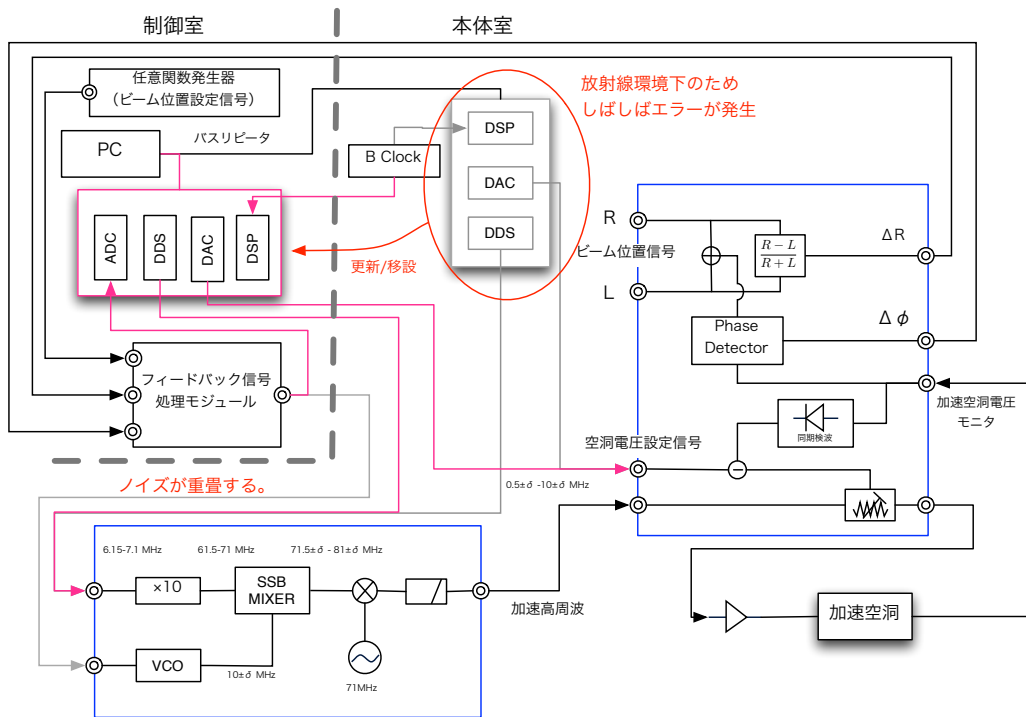


Figure 5: RF Control System and Beam Feedback Circuit.

るので、フィードバック信号の反映は 100 kHz で行えている。

Figure 6 にビームフィードバックを使用していないときの  $\Delta\phi$  信号と  $\Delta R$  信号を示す。 $\Delta\phi$  信号には振動が発生しており、 $\Delta R$  信号からビーム位置が加速とともに変化していることがわかる。Figure 7 にビームフィードバックを使用したときの  $\Delta\phi$  および  $\Delta R$  信号を示す。 $\Delta\phi$  信号に発生していた振動を抑制しビーム位置を一定に調整できていることがわかる。

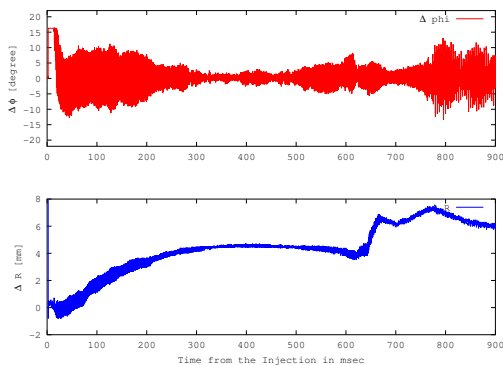


Figure 6:  $\Delta\phi$  and  $\Delta R$  signals when beam feedback is disabled.

現状、B-Clock によって周波数を上昇させる方式で安定に運用ができています。将来的に内部周波数パターンを用いて 100kHz でフィードバック制御を運用する事を目指している。現状、偏向電磁石に設定している磁場パ

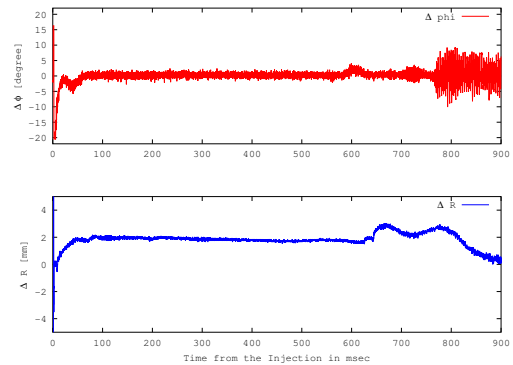


Figure 7:  $\Delta\phi$  and  $\Delta R$  signals when beam feedback is enabled.

ターンと実際に発生する磁場の誤差を適切に補正した周波数更新用の内部パターンの生成方法を検討している。

### 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] 栗田哲郎 et al., "若狭湾エネルギー研究センター シンクロトロン の 現 状" 第 7 回 日 本 加 速 器 学 会 年 会 プ ロ シ ー デ ィ ン グ, 2010
- [3] 栗田哲郎 et al., "若狭湾エネルギー研究センター シンクロトロン の 現 状" 第 8 回 日 本 加 速 器 学 会 年 会 プ ロ シ ー デ ィ ン グ, 2011