

## 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 OF THE WAKASA WAN ENERGY RESEARCH CENTER

栗田哲郎 \*<sup>A)</sup>、羽鳥聡 <sup>A)</sup>、林豊 <sup>A)</sup>、長崎真也 <sup>A)</sup>、廣戸慎 <sup>A)</sup>、小田桐哲也 <sup>A)</sup>、山田裕章 <sup>A)</sup>、山口文良 <sup>A)</sup>  
淀瀬雅夫 <sup>A)</sup>、清水雅也 <sup>A)</sup>、和田一人 <sup>A)</sup>、大矢龍輝 <sup>A)</sup>、辻宏和 <sup>A)</sup>

Tetsuro Kurita\*<sup>A)</sup>, Satoshi Hatori<sup>A)</sup>, Yutaka Hayashi<sup>A)</sup>, Shin'ya Nagasaki<sup>A)</sup>, Shin Hiroto<sup>A)</sup>, Tetsuya Odagiri<sup>A)</sup>  
Hiroaki Yamada<sup>A)</sup>, Fumiyoshi Yamaguchi<sup>A)</sup>, Masao Yodose<sup>A)</sup>, Masaya Shimizu<sup>A)</sup>

Kazuto Wada<sup>A)</sup>, Ryuki Oya<sup>A)</sup>, Hirokazu Tsuji<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 2016 fiscal year of the period from June 7, 2016 to April 28, 2017, experiment time amounted to 2030 hours. The percentage of experiment time using the synchrotron was 50%. Also we report an improvement in a LLRF (Low Level Radio Frequency) controller and a development of a feedback control of the beam extraction. In our system, the phase noise superimposed on RF for the acceleration causes to excite phase oscillation of beam bunches. An frequency multiplier which 10 multiplies the frequency generated by the DDS (Direct Digital Synthesizer) amplified phase noise. To remove the phase noise, DDS directly generates RF frequency to eliminate the frequency multiplier. On the other hand, A signal to detect the cavity voltage had to be produced by up-conversion. This system has been employed from October, 2016. The extracted beam increases from 3.59 nA to 3.90 nA. The stability of the beam is improved from 23% to 6%. The feedback control system of beam extraction aims to obtain constant beam intensity during the extraction period. The beam spill signal through a LPF is fed back to the gain of RF for the extraction. We confirmed the operation of the system in a beam test.

### 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 [1]。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

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。

2008 年から、シンクロトロンに入射器であるタンデム加速器の耐電圧性能が劣化し、トラブル対応や修繕作業のために多くの時間が割かれ、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、タンデム加速器の耐電圧を回復させるため、絶縁コラムの交換作業が行われ、長期間の運転の中断が発生した。運転は 2012 年度は 7 月から再開された。

2014 年 11 月以降もタンデム加速器の耐電圧性能の劣化が再発し、シンクロトロンへの入射エネルギーは、Proton ビームの場合は、10MeV から 7MeV へ、Carbon ビームの場合は、25MeV から 20MeV へと下げた運転が強いられている。

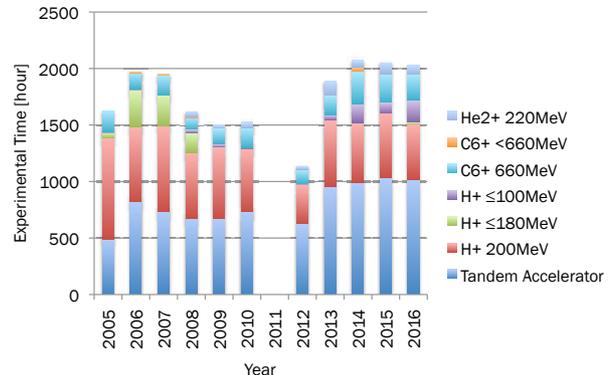


Figure 1: Trend of beam time categorized by ion and energy.

2016 年は 4 月から 5 月にかけて定期点検を行い、2016/6/7 から 2017/4/28 まで運転をおこなった。2016 年 9 月以降も入射器であるタンデム加速器のターミナル電圧が定格の 5MV まで昇圧できなくなり、シンクロトロンへの入射エネルギーを下げての運転となったが、概ね計画通り実験にビームを供給できた。

2016 年 10 月から、加速高周波位相ノイズによる位相振動対策を行った加速高周波制御系を使用しての運転を開始した。これにより、入射エネルギー低下に伴うビームロスをいくらか低減することができている。詳細は後述する。

\*tkurita@werc.or.jp

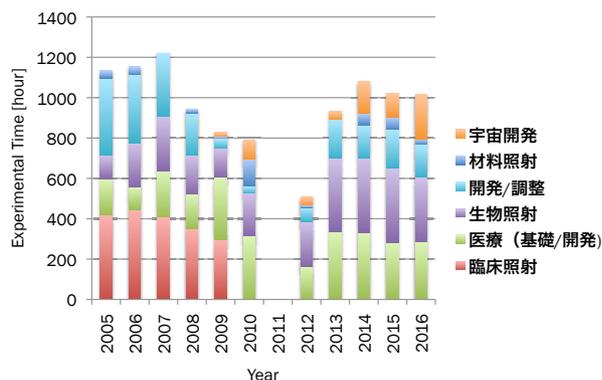


Figure 2: Trend of beam time of the synchrotron categorized by experimental interests.

実験時間は例年と同程度の 2030 時間であった。シンクロトロンを使った実験の割合は、約 50%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、年々増加傾向にある。2016 年度も 21.5%の利用時間の割合を占めた。

### 3. 加速高周波位相ノイズによる位相振動の発生とその対策

シンクロトロンに入射された荷電粒子は加速高周波によって、断熱捕獲法によりビームバンチを形成する。加速高周波によって形成される安定してビームバンチを捕獲できる領域 (RF バケツ) とビームバンチに何らかのミスマッチがあると、ビームバンチの位相振動が発生する。位相振動が成長すると、ビームは RF バケツの中からこぼれ落ちてビームロスになる。

このため、加速高周波とビームバンチの位相差を検出して加速高周波の周波数にフィードバックする事により、位相振動を抑制している [2]。しかし、位相フィードバックはバンチを形成していない捕獲領域と出射領域では機能しない。したがって、位相フィードバックがない状況でも位相振動を抑制できれば、捕獲電荷及び出射電流量の安定性に寄与すると考えられる。既存のシステムでは、加速高周波に位相ノイズが重畳することが原因で、位相振動が発生することがわかっている [3]。高周波信号制御系を改造し位相ノイズを低減させ、位相振動を抑制させることを試みた。

Figure 3 に従来の高周波信号制御系の概要を示す。原発振器である DDS (Direct Digital Synthesizer) の周波数を 10 通倍し、PLL (Phase Locked Loop) によって 10MHz にロックされた VCO (Voltage Controlled Oscillator) の周波数を足し合わせている。さらに 71MHz を引くことにより加速高周波の周波数 (高周波基準信号) としている。71MHz を引く前の信号は、空洞電圧およびビーム位置モニタの検波用信号として用いている。

周波数の 10 通倍の際に位相ノイズも 10 倍にしてし

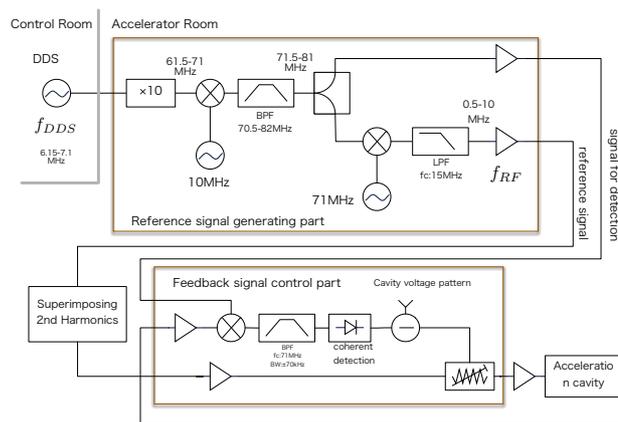


Figure 3: Schematics of current circuit of LLRF

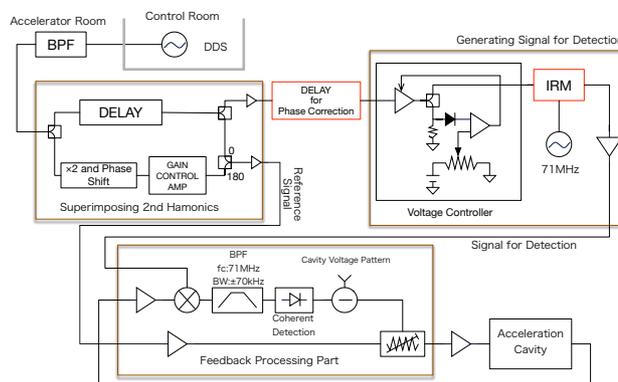


Figure 4: An improvement plan of the circuit to generate reference signal.

まっているので、Figure 4 のように DDS の出力を直接加速周波数とするようにした。この場合、空洞電圧とビーム位置モニタの検波に、加速周波数に 71MHz を足した検波用信号をアップコンバージョンで生成する必要がある。一般的に周波数変換には、二重平衡変調器 (DBM) によって周波数を混合し必要なサイドバンドだけを周波数フィルターで取り出すことによって行われる。しかし今回の場合、周波数間隔が狭く、周波数フィルターでは下側波帯 (LSB) を除去できない。そこで株式会社サムウェイによって開発された Image Reject Mixer を用いて、周波数フィルターを用いることなく、LSB を -30dBc (約 1/30) まで減衰させる。

しかし、残留する LSB の影響で空洞電圧検波出力が、空洞電圧モニタ信号と検波用高周波信号の位相差に依存するようになる。その結果、空洞電圧の振幅が周波数特性を持つ [4]。Figure 5 に空洞電圧の周波数特性を示す。空洞電圧の振幅が周波数特性を低減させるために、Image Reject Mixer への入力信号にケーブルディレイを挿入して位相差を補正し、空洞電圧の変化幅を 1.6% まで減少させた。

加速高周波に位相ノイズが重畳している場合、ノイズの周波数成分と加速高周波電圧で決まるシンクロトロン振動数が一致すると、ビームバンチの位相振動の振幅が大きくなる。Figure 6 に、加速高周波の電圧を捕獲後に一定にし、その電圧を変化させることによりシ

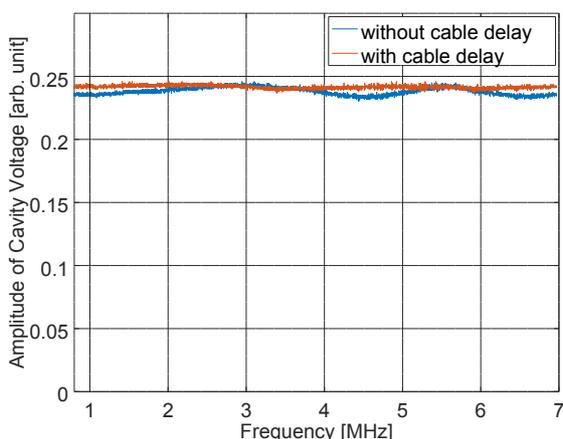


Figure 5: Frequency dependency of amplitude of cavity voltage due to image component of the IRM.

シンクロトロン振動数を変化させ、シンクロトロン振動数に対する位相振動の振幅をプロットしたものを示す。改造前は、720Hz, 773Hz, 1770Hz, 3140Hz の周波数で共鳴が発生していた。720Hz 以外の周波数は加速高周波の位相ノイズの周波数と一致する [3]。改造後では、720Hz 以外の周波数では、共鳴周波数は消えた。720Hz は偏向電磁石のリップルの周波数に一致し、軌道長が変化することによって位相振動が発生していると考えられる。

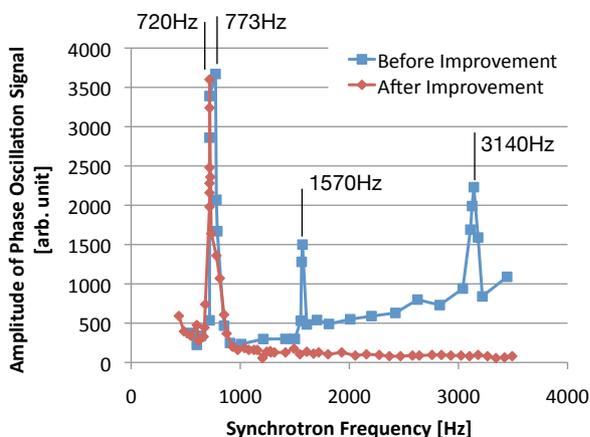


Figure 6: Amplitude of phase oscillation as a function of synchrotron frequency.

Figure 7 に改造前後での加速中の電荷の比較を示す。位相振動が抑制できるようになったために、捕獲電荷が増加し安定するようになった。その結果、Proton 7MeV 入射 200MeV 出射時の電流量が 3.59nA から 3.90nA に増加し、出射電流量の変動が 23% から 6% に抑えられた。

#### 4. 出射ビームのスピルフィードバック制御

W-MAST のシンクロトロンでは三次共鳴を用いた遅い取り出しによって、数 100ms の時間にわたってビームが出射される。六極電磁石によってセパトリクス

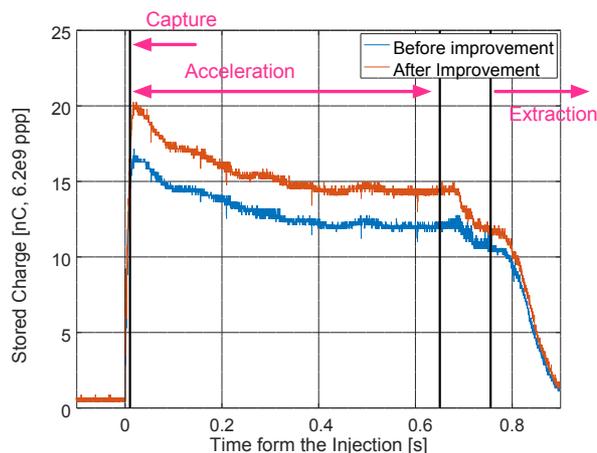


Figure 7: Comparison of accelerated charge with the synchrotron between before and after the improvement.

を形成し、帯域ノイズ高周波を横方向のキッカー電極に印加することによって、ベータトロン振動の振幅を増大させ、リング内から出射する (RF Knockout 法)。

出射ビームはウォブラー電磁石によって照射野を形成して照射実験に用いられる。一様な照射野を形成するには、出射ビームの時間構造 (スピル) が均一であることが必要である。RF Knock 法では、キッカー電極に印加する高周波の強度を調整することにより、出射ビームの電流量を容易に調整できる。

これまで、帯域ノイズ高周波のゲインパターン制御および中心周波数の出力を出射スピルでフィードバック制御することを試みてきた [5]。帯域ノイズを用いた RF Knockout 法では、キッカーに印加する高周波が帯域ノイズの周波数間隔のうねりを持つため、微細構造を持つ。その微細構造も含めてフィードバック制御によってコントロールを試みていたが、成功には至っていない。

スピルの微細構造をフィードバックで制御することはあきらめ、Figure 8 のように出射ビームスピルをローパスフィルタを経由したものを帯域ノイズ高周波のゲイン設定にフィードバックするようにした。これによって、全体的な一様性を容易に調整できることを目的とした。出射ビーム電流量の目標値は外部からの DC 電圧で与える。

ローパスフィルタ、位相遅れ補償器によって構成されるフィードバック制御系は MTT 社の Digital Signal Processor(DSP) 開発キット sBox [6] を用いて開発した。DSP を用いたデジタル信号処理を採用することによって、フィードバック系のパラメータの調整が自在に行える。

Proton 200MeV 出射時のビーム試験の結果を Figure 9 に示す。この時の各パラメータを Table 1 に示す。フィードバック系のパラメータは日立製作所の先行事例 [7] を参考にして調整した。

出射ビームスピル信号の LPF 出力の立ち上がり時間は 1ms 以下であった。270ms の出射期間の内、約 80% の区間で出射ビームを一定にすることができている。出射期間の後半 20% ではビーム電流が減少しているが、こ

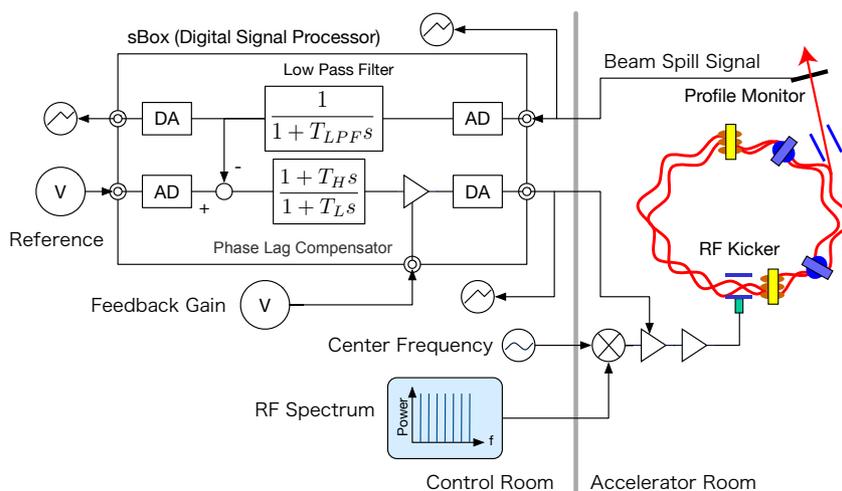


Figure 8: A schematic diagram of a feedback control of the beam extraction.

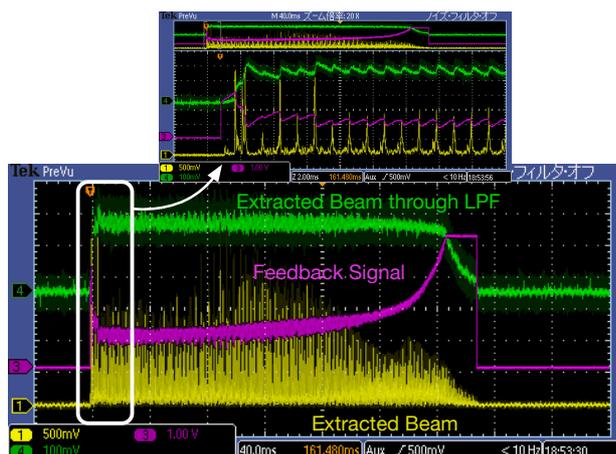


Figure 9: A beam spill of 200MeV proton beam under the feedback control.

Table 1: Parameters of Beam Test of the Spill Feedback Control

Synchrotron	Proton Extraction Energy	200 MeV
	RF center frequency tune converted	3.460 MHz 1.677
	RF spectrum band-width tune converted	$\pm 25$ kHz 1.682- 1.672
	RF spectrum division	1 kHz
Feedback system	AD sampling frequency	100 kHz
	$1/T_{LPF}$	500 Hz
	$1/T_L$	5.2 Hz
	$1/T_H$	500 Hz

これはリング内の蓄積電荷が少なくなってきたためである。リング内の電荷を完全に射出しきを確認するために、射出期間の終わりで射出ビームスピルが減少することを許容している。リング内に電荷を残すことを許容すれば、全射出期間にわたって一定の射出ビームスピルを得ることもできる。

## 5. まとめ

2015年度は、加速器施設全体の実験時間は2030時間であり、その内シンクロトロンを使った実験は約50%であった。例年度とほぼ同じ程度の実験時間であった。シンクロトロンに発生している位相振動を除去し、ビームを安定化させるために高周波基準信号に重畳する位相ノイズを低減させる改造を行った。その結果、ビーム電流量と安定性が向上した。2016年10月から通常運転に用いている。

射出ビームのフィードバック制御の開発を行った。DSPを用いたフィードバック制御系の動作を確認した。現在、ビーム射出制御系のPCの更新を進めており、その中で通常の運転に使用できるように整備を進めている。

試作したシステムでは、射出ビーム電流量の目標値は外部から与えているが、蓄積電荷から目標値を設定することを計画している。また、詳細なフィードバックループの解析が今後の課題である。

## 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10回日本加速器学会年会プロシーディング, 2013.
- [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12回日本加速器学会年会プロシーディング, 2015.
- [4] 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13回日本加速器学会年会プロシーディング, 2016.
- [5] T. Krunita *et al.*, “AN IMPROVEMENT OF MATCHING CIRCUIT OF RF KICKER ELECTRODES”, The Proceedings of EPAC'06, 2006.
- [6] [http://www.mtt.co.jp/dsp/sbox\\_index.html](http://www.mtt.co.jp/dsp/sbox_index.html)
- [7] H. Nishiuchi *et al.*, “医療用シンクロトロン向けビーム射出制御システムの開発”, 第6回日本加速器学会年会プロシーディング, 2009.