

## 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)、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)、辻宏和 A)

Tetsuro Kurita\*<sup>A)</sup>, 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>  
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>  
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 2014, experimental time amounted 2071 hours. The percentage of experiment time using the synchrotron was 52%. Recent trend in operation are reported. Also we report a phase oscillation due to a phase noise in LLRF system. The magnitude of the phase noise and its influence on the phase oscillation are investigated. The problem of the system is that a frequency multiplier amplifies the phase noise. An improvement plan is discussed.

#### 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まず、実験にビームを供給した時間) の推移を示す。

2008 年から、シンクロトロンの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 月から再開始された。

2014 年度は、4 月から 2015 年 2 月まで運転をおこなった。11 月末に約 10 日ほど入射器であるタンデム加速器の故障により運転が停止したが、それ以外は計画通り実験にビームを供給できた。

実験時間は昨年度 (2013 年度) から 10% ほど増えて、2071 時間であった。シンクロトロンを使った実験の割合は、約 52% であった。

2014 年度に実験時間が増えた要因は次の二点である。

2012 年度から、消費電力を押える目的で 7 月末から 8 月にかけてシンクロトロンを使った実験を行わないようにした。2013 年度は軽イオンビームのみの実験に制限し、実施できる実験が限られていたが、2014 年度の夏は重イオンビームも開放し、タンデム加速器のみでの利用が拡大した。

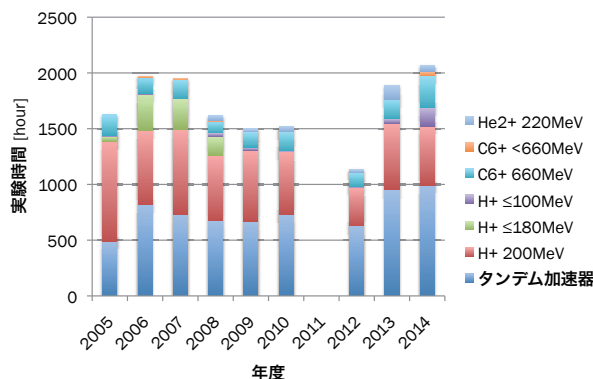


Figure 1: Trend of beam time categorized by ion and energy.

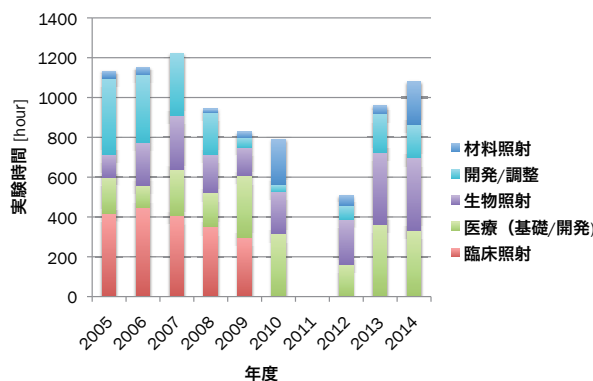


Figure 2: Trend of beam time of the synchrotron categorized by experimental interests.

\* tkurita@werc.or.jp

もう一つは、人工衛星搭載用電子機器の放射線環境化での試験のユーザー多く集まったことである。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。2014年は、シンクロトロンを使った材料照射の実験時間が割合の増加が目立つ。もっばら、人工衛星搭載用電子機器への長時間の照射実験が多く行われたことによる。

### 3. 加速高周波位相ノイズによる位相振動の発生

#### 3.1 位相振動と位相ノイズの状況

近年、Figure 3の上段のように位相フィードバックをオフにすると、位相振動が発生するようになった。通常は、加速中は位相フィードバックにより位相振動を抑制しているので問題にならないが、捕獲時 (adiabatic capture) や出射時は位相フィードバックをオフにする必要があるため、捕獲電荷および出射電流の安定性に影響を及ぼす。

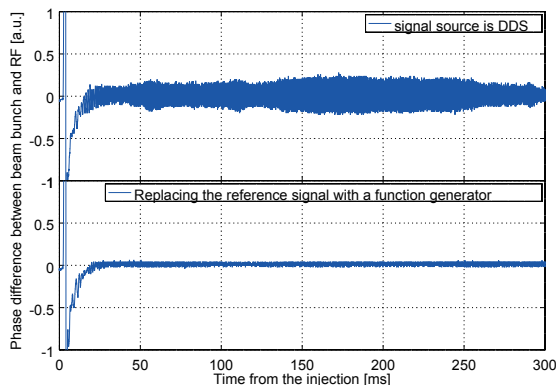


Figure 3: Phase oscillation without phase feed-back (upper plot). The phase oscillation does not occur when the reference signal is replaced with a function generator (lower plot).

Figure 4に高周波制御系の概要を示す。源発振器であるDDSの周波数を10通倍し、PLLによって10MHzにロックされたVCOの周波数を足し合わせている。当初はVCOにフィードバック信号を入力してビームフィードバックを行っていたが、現在はフィードバック信号をADCでデジタル化し、DDSに直接重畳させる方式に切り替えている<sup>[2]</sup>。

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。従って、加速高周波の $f_{RF}$ と源発振器の周波数 $f_{DDS}$ の関係は $f_{RF} = f_{DDS} \times 10 - 61$  [MHz]にある。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る。

高周波基準信号発生部から出力される高周波基準信号を外部のファンクションジェネレータに置き換えると、位相振動はFigure 3の下段のように発生しなくなる。すなわち、DDSもしくは高周波基準信号発生部で位相ノイズが重畳していると考えられる。

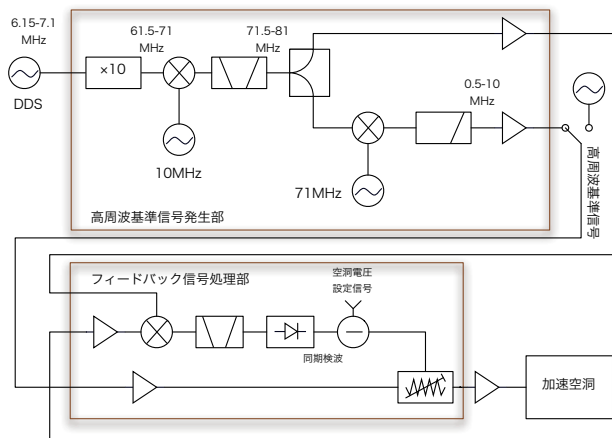


Figure 4: A schematic diagram of a low level RF system.

位相振動の原因としては、加速高周波に位相ノイズが重畳していることが考えられる。そこで、高周波基準信号の同期検波の原理で周波数変調を評価し、その周波数解析を行った (Figure 5 上段)。

次のように、変調信号 $\phi_m(t)$ で位相変調された空洞電圧 $V_{RF}$ を考える。

$$V_{RF} = \hat{V} \sin(\omega t + \phi_m(t)) \quad (1)$$

これに、 $\sin(\omega t)$ と $\cos(\omega t)$ を掛け合わせる。

$$V_{RF} \sin(\omega t) = \frac{\hat{V}}{2} [\cos(\phi_m) - \cos(2\omega t + \phi_m)] \quad (2)$$

$$V_{RF} \cos(\omega t) = \frac{\hat{V}}{2} [\sin(\phi_m) + \sin(2\omega t + \phi_m)] \quad (3)$$

適当なローパスフィルターで $\omega$ 以上の周波数を除去することにより、I信号とQ信号が得られる。

$$I(t) = \frac{\hat{V}}{2} \cos(\phi_m(t)) \quad (4)$$

$$Q(t) = \frac{\hat{V}}{2} \sin(\phi_m(t)) \quad (5)$$

これらより、 $\phi_m(t)$ は、

$$\tan(\phi_m(t)) = \frac{Q(t)}{I(t)} \quad (6)$$

と求まる。

次節で述べるように、位相振動の振幅は位相変調の変調度ではなく周波数変調の最大周波数偏移で考えると、シンクロトロン振動数に対する依存性がなくなる。位相変調の変調信号を微分することにより周波数変調の変調信号になる。変調信号が余弦波であるならば、

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_m(t)}{dt} &= \frac{d}{dt} \Delta\phi_m \cos(\omega_m t) = \frac{\Delta\phi_m}{\omega_m} \sin(\omega_m t) \\ &= \Delta\omega_m \sin(\omega_m t) \end{aligned} \quad (7)$$

であり、最大周波数偏移 $\Delta\omega_m$ と変調指数 $\Delta\phi_m$ の関係は、

$$\Delta\omega_m = \frac{\Delta\phi_m}{\omega_m} \quad (8)$$

となる。

図5は、式(6)を用いて、位相変調の変調信号を求め、それをフーリエ変換することにより、変調指数を求め、式(8)を用いて周波数変調の最大周波数偏移に変換することによって求めた。

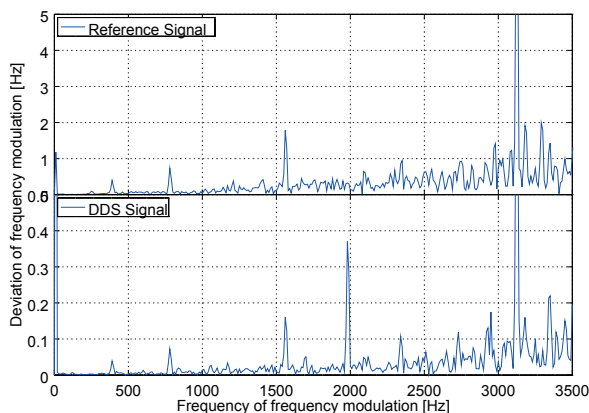


Figure 5: Frequency spectrum of frequency modulation of the reference signal (upper graph) and of DDS signal (lower graph).

Figure 5 上段のスペクトラムには、773Hz, 1570Hz, 3140Hz に特徴的なピークがある。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大きさをプロットした (Figure 6)。高周波基準信号の周波数変調スペクトラムに現れるピークの位置で、位相振動が大きくなっており、加速高周波に含まれる周波数変調が問題になっていることがわかる。

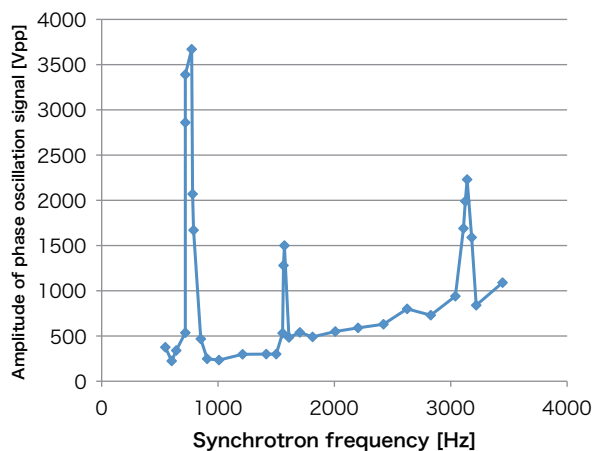


Figure 6: Amplitude of phase oscillation as a function of synchrotron frequency.

DDS 信号の周波数変調スペクトラムを Figure 5 の下段に示す。DDS 信号と高周波基準信号に含まれる周波

数変調成分の構造はほぼ同じであるが、最大周波数偏移の大きさが 10 倍になっている。高周波基準信号発生部で周波数を 10 通倍しているためと考えられる。

### 3.2 周波数変調の最大周波数偏移に対する位相振動の振幅

加速高周波の位相エラー  $\delta\phi_{rf}$  とビーム位相の変化  $\delta\phi_b$  の間の伝達関数  $B(s)$  は、

$$B(s) = \frac{\delta\phi_b}{\delta\phi_{rf}} = \frac{\Omega_s^2}{s^2 + \Omega_s^2}$$

$\Omega$ : シンクロトロン振動数

である [3]。

周波数特性は式(9)の  $s$  を  $j\omega$  に置き換えて、

$$B(\omega) = \frac{\Omega_s^2}{\Omega_s^2 - \omega^2} \quad (9)$$

$$= \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\Omega_s}\right)^2} \quad (10)$$

と得られる。

このように、位相振動は位相変調に対する応答が定式化されている。しかし、位相振動の振幅は、位相変調の変調度  $\Delta\phi_m$  ではなく、周波数変調の最大周波数偏移  $\frac{\Delta\phi_m}{\omega}$  で規格化されることを示す。

シンクロトロン振動数付近の振る舞いに注目する為に、 $\omega = \Omega_s + \Delta\omega$  とおくと、式(10)は、

$$B(\omega) = \frac{1}{1 - \left(1 + \frac{\Delta\omega}{\Omega_s}\right)^2} \approx \frac{1}{1 - \left(1 + 2\frac{\Delta\omega}{\Omega_s}\right)} = -\frac{\Omega_s}{2\Delta\omega} \quad (11)$$

となる。

次に、周波数変調の最大周波数偏移  $\Delta\omega_m$  に対する応答を考える。加速高周波の周波数が  $\omega$  の場合、位相変調の変調指数  $\Delta\phi_m$  は、

$$\Delta\phi_m = \frac{\Delta\omega_m}{\omega} \quad (12)$$

である。 $\omega = \Omega_s + \Delta\omega$  の場合は、

$$\Delta\phi_m = \frac{\Delta\omega_m}{\Omega_s + \Delta\omega} \quad (13)$$

となる。

この位相変調が、加速高周波の位相エラーとして加えられることを考える。

$$B(\omega)\Delta\phi_m = -\frac{\Omega_s\Delta\omega_m}{2\Omega\Delta\omega + \Delta\omega^2} \approx -\frac{\Delta\omega_m}{\Delta\omega} \quad (14)$$

式(14)は、同じ最大周波数偏移ならシンクロトロン振動数によらず同じ位相振動の振幅を誘起することを示している。

シンクロトロン周波数変調の最大周波数偏移に対する位相振動の振幅を測定する為に、高周波基準信号をファンクションジェネレータの信号に置き換え、加速高周波の電圧で決定されるシンクロトロン振動数と同じ周波数変調を加えた。二つのシンクロトロン振動数の場合で、最大周波数偏移に対する位相振動の振幅を測定した結果を Figure 7 に示す。異なるシンクロトロン振動数で位相振動の振幅が規格化できていることがわかる。

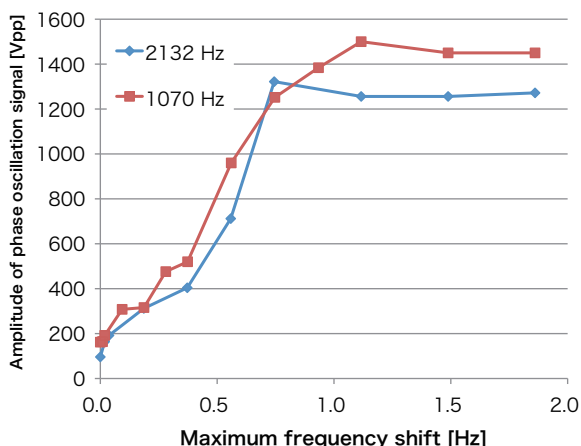


Figure 7: Amplitude of phase oscillation as a function of maximum frequency shift.

### 3.3 改造案

Figure 7 をみると、最大周波数偏差が 0.2Hz 程度であれば、めだった位相振動は起きないと考えられる。

位相振動が発生するようになったのは、DDS で発生する位相エラーが増えたことが考えられるが、高周波基準信号発生部で周波数を 10 通倍して位相エラーを 10 倍にしなければ、DDS での位相ノイズが増えても問題にならなかったはずである。実際に、通常運転でのシンクロトン振動数は 2kHz 以下であり、その領域で DDS で発生している周波数変調 (Figure 5 の下段) は 0.2Hz 以下である。

そこで、Figure 8 の様に、10 通倍を除去する改造を検討している。すなわち、DDS で加速高周波の周波数を発生させ、アップコンバージョンにより検波用基準信号を生成する。

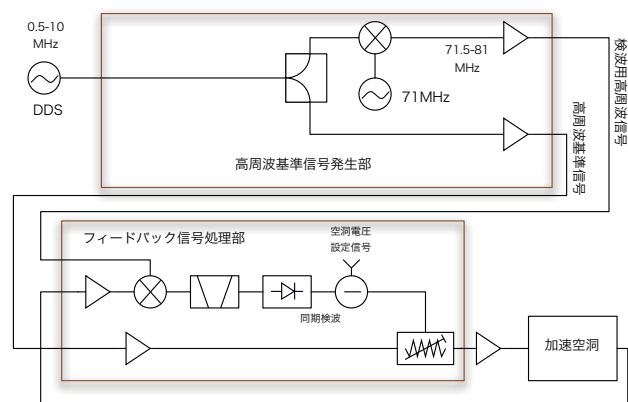


Figure 8: An improvement plan of LLRF system.

## 4. まとめ

2014 年は、加速器施設全体の実験時間は 2071 時間であり、その内シンクロトロンを使った実験は約 52% で

あった。タンデム加速器の故障により 10 日ほど運転が停止したが、実験時間は 2013 年度より多く行われた。

シンクロトロンに発生している位相振動の原因は、高周波基準信号に重畳する位相ノイズが原因である。DDS で発生する位相ノイズが変化した可能性があるが、そもそも高周波信号生成部で周波数を 10 通倍することにより位相ノイズを増幅していることが問題である。DDS で加速高周波の周波数を直接生成し、10 通倍を不要にする改造を検討している。

## 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 10 回日本加速器学会年会プロシーディング, 2013.
- [3] 二宮重史 “陽子シンクロトロンの高周波加速装置”, OHO’89, 1989.