

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 *^{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)}、山口文良 ^{A)}
淀瀬雅夫 ^{A)}、清水雅也 ^{A)}、和田一人 ^{A)}、辻宏和 ^{A)}

Tetsuro Kurita*^{A)}, Satoshi Hatori^{A)}, Yutaka Hayashi^{A)}, Shinya Nagasaki^{A)}, Shin Hiroro^{A)}, Tetsuya Odagiri^{A)}
Hiroaki Yamada^{A)}, Fumiyoshi Yamaguchi^{A)}, Masao Yodose^{A)}, Masaya Shimizu^{A)}

Kazuto Wada^{A)}, Hirokazu Tsuji^{A)}

^{A)}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 2015 fiscal year of the period from May 11, 2015 to April 1, 2016, experimental time amounted 2051 hours. The percentage of experiment time using the synchrotron was 49.7%. Also we report development of LLRF system. In our system, the phase noise superimposed on RF causes to excite phase oscillation of beam bunch. The problem of the system is that the frequency multiplier which 10 multiplies the frequency generated by DDS amplifies phase noise. In the improvement plan, DDS directly generates RF frequency to eliminate the frequency multiplier. On the other hand, a signal to detect the cavity voltage must be produced by up-conversion. The detail design is reported. Also, calibration of cavity voltage using beam is reported.

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-200MeV; He, C:数MeV/u-55MeV/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月から再開された。

2015年3月から4月にかけて定期点検を行い、2015年度は5/11から2016/4/1まで運転を行った。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まで上がらないという問題はあったが、概ね計画通り実験にビームを供給できた。

実験時間は昨年度(2014年度)と同程度の2051時間であった。シンクロトロンを使った実験の割合は、約49.7%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

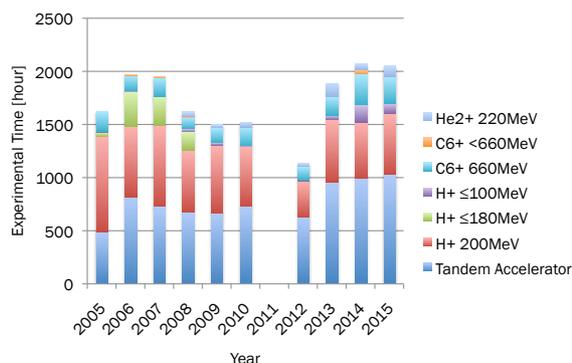


Figure 1: Trend of beam time categorized by ion and energy.

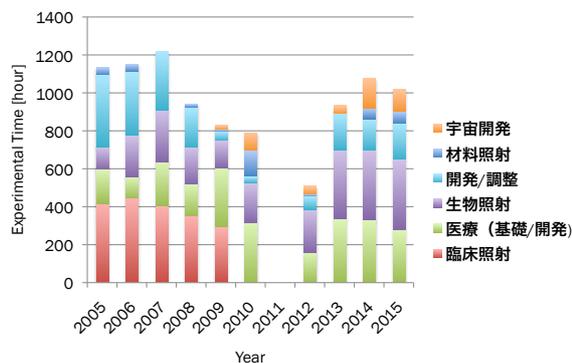


Figure 2: Trend of beam time of the synchrotron categorized by experimental interests.

*tkurita@werc.or.jp

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、2015年度も11%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

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すが問題にならないが、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。

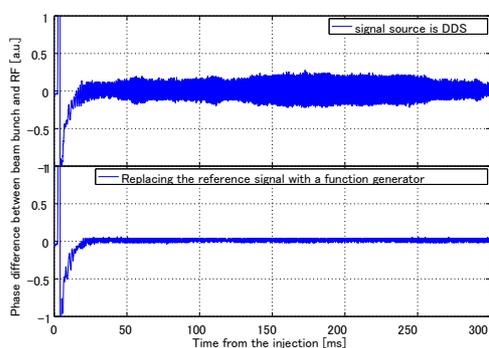


Figure 3: Phase oscillation without phase feed-back (upper plot). The phase oscillation does not occur when the reference signal is replaced with a function generator (lower plot).

原因は、加速高周波信号に重畳する位相ノイズであること、加速高周波周波数生成部に位相ノイズを増幅している箇所があることを確認している [2]。

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 [3]。

このシステムではDDSで生成した周波数を10通倍しているので、位相振動の原因である位相ノイズも10倍にしてしまっている。10通倍をやめれば、十分に位相ノイズは小さくなり、位相振動が抑えられる [2]。

そこで、図5のように、DDSで加速高周波の周波数を直接生成する方式に改造を進めている。この場合、空洞電圧モニタ信号やビーム位置モニタの検波のために、加速周波数に71MHzを足し合わせた信号 (検波用高周波信号) が必要である。空洞電圧モニタ信号を検波用基準信号を掛け合わせて中間周波数の71MHzに変換してから同期検波を行っている。

周波数変換の方法として、Double Balanced Mixer(DBM) とハイパスフィルターを組み合わせる方法が考えられる。しかし、今回は71MHzを搬送

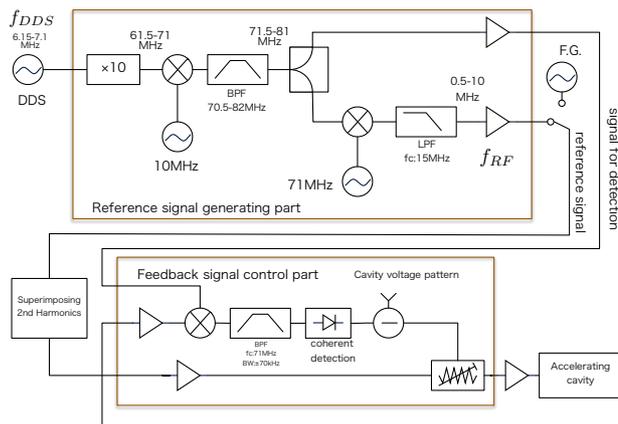


Figure 4: Schematics of current circuit of low level RF.

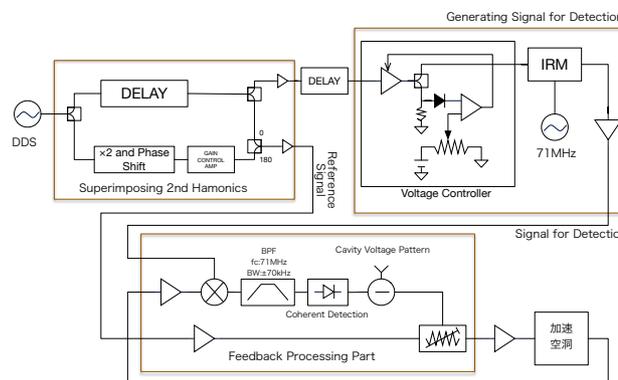


Figure 5: An improvement plan of a circuit to generate reference signal.

波として HSB と LSB の間隔が 1.5MHz 程度であり、周波数フィルターでは LSB を十分に減衰させることはできない。

そこで、Image Rejection Mixer (IRM) を用いる必要がある。IRM のイメージ除去比は典型的には-20dBc 程度である。すなわち、1/10 程度までにしかイメージ成分は減衰できない。LSB の除去が十分で無い場合の空洞電圧の検波出力への影響を、図6のような簡単なモデルで考察した。

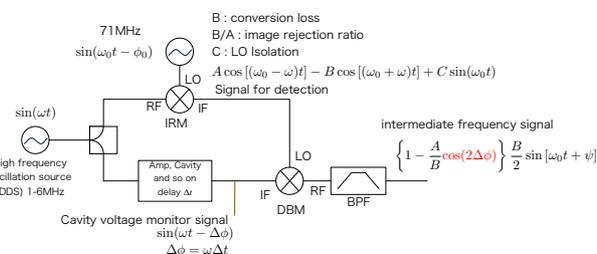


Figure 6: The effect of LSB when a cavity voltage signal is converted to intermediate frequency.

周波数発振器からの信号を分岐して、一つは加速空洞などを経て空洞電圧モニタ信号 (Cavity voltage monitor signal) となる。もう一つは、IRMによって周波数 ω_0 を足し合わせて検波用高周波信号 (Signal for detection) と

なる。検波用高周波信号の LSB の振幅を A 、HSB の振幅を B とする。イメージ除去比は B/A となる。

空洞電圧モニタ信号はアンプや加速空洞などを經由しているため、検波用高周波信号に対して時間遅れ Δt による位相差 $\Delta\phi = \omega\Delta t$ が発生していると考えられる。

空洞電圧モニタ信号と検波用高周波信号を混合し、バンドパスフィルターによって中間周波数 ω_0 の成分を抜き出すと、

$$\frac{A+B}{2} \cos \Delta\phi \sin[\omega_0 t] + \frac{B-A}{2} \sin \Delta\phi \cos[\omega_0 t] \quad (1)$$

となる。 $A/B \ll 1$ という条件で近似すると、

$$\left\{ 1 - \frac{A}{B} \cos(2\Delta\phi) \right\} \frac{B}{2} \sin[\omega_0 t + \psi] \quad (2)$$

となる。すなわち、中間周波数信号の振幅が位相差 $\Delta\phi$ に依存するようになり、空洞電圧の検波出力も $\Delta\phi$ に依存するようになる。空洞電圧の検波出力は空洞電圧のフィードバック制御に用いられており、 $\Delta\phi$ は周波数に依存するので空洞電圧が加速とともに変化することになる。

図7はIRMを用いて生成した検波用高周波信号を用いた場合の、周波数に対する空洞電圧の振幅の変化である。周波数とともに位相差が変化するので、振幅がうねっている(図7の青線)。おおよそ7-8%の変化幅がある。

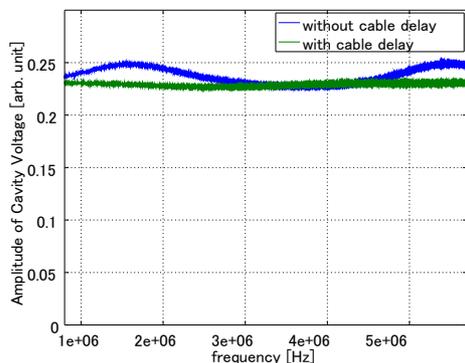


Figure 7: Frequency dependency of amplitude of cavity voltage due to image component of the IRM.

周波数の変化に伴う空洞電圧モニタ信号と検波用高周波信号の位相差をキャンセルするために図5のように、IRMの入力信号にケーブルディレイを入れた。空洞電圧の振幅の周波数に対する依存性が最小になるようにケーブルディレイを調整した結果が、図7の緑線である。2-3%程度まで振幅の変化を抑えられているが完全に周波数に対する依存性を無くせていない。IRMや加速空洞などで、位相差の変化が周波数に対して非線形になっており、ケーブルディレイでは完全にはキャンセルできない。

最終的には、IRMのイメージ除去比を-30dB以上にして空洞電圧の振幅の周波数に対する依存性を1%以下に抑えることを計画している。

4. ビームを用いた加速空洞電圧の校正

図8にW-MASTのシンクロトロン加速空洞の空洞電圧のモニタ系の概略を示す。

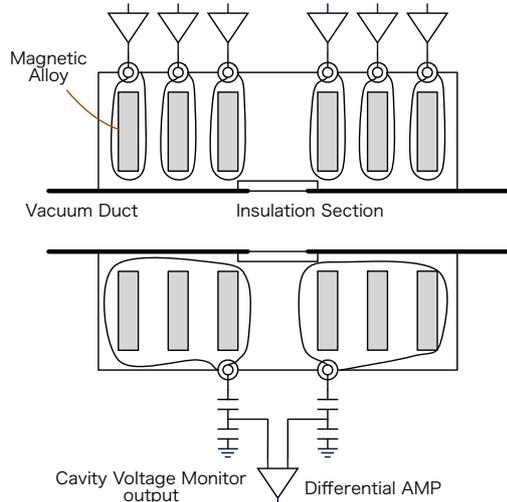


Figure 8: A schematic of circuit of cavity voltage monitor.

磁性体の周りにワンターンのピックアップコイルがあり、そこで発生した電圧を容量分割器によって分割している。上流側と下流側の容量分割器の出力を差動アンプを經由させグラウンドからの電圧に変換して、空洞電圧モニタの出力としている。

空洞電圧の校正係数は容量分割器の分割比と差動アンプのゲインによって決まる。これらの校正のために、実際の空洞電圧と同程度の模擬入力を得ることは容易ではない。そこでビームを用いて空洞電圧の校正係数の導出を行った。

空洞電圧を反映した物理量としてシンクロトロン振動数と同期位相が考えられる。シンクロトロン振動数から空洞電圧の導出には momentum compaction factor が必要であるが、momentum compaction factor は計算から推測するほかない。そこで、同期位相の測定から空洞電圧の導出を試みた。

空洞電圧を

$$V(t) = \hat{V} \sin(\omega_r t) \quad (3)$$

とすると、同期位相 ϕ_s は加速勾配 $\frac{dp}{dt}$ と周長 C でだけで決定される。

$$\hat{V} = \frac{C}{\sin \phi_s} \frac{dp}{dt} \quad (4)$$

そこで、図9のような、フラットトップとフラットベースの間で加速勾配が一定となる偏向電磁石のパターンでビームを加速する。そして、空洞電圧モニタ信号とバンチモニタ信号を同時に測定し、空洞電圧とバンチ信号の位相差の変化を調べる。

位相差は、空洞電圧モニタ信号を搬送波としてバンチ信号をI/Q信号に変換することによって得られる。そのスキームを図10に示す。

空洞電圧モニタ信号を $\sin(\omega_r t)$ とし、バンチ信号を $\sin(\omega_r - \phi_s)$ とする。ここで ϕ_s は同期位相とする。空洞電圧モニタ信号を90度位相をずらした $\cos(\omega_r t)$ はヒ

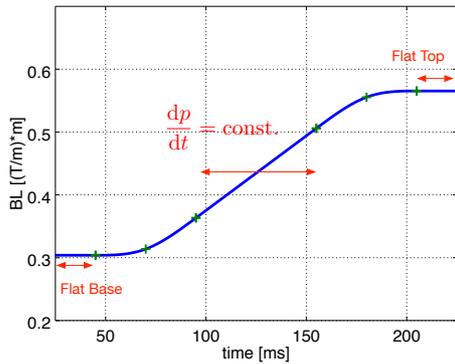


Figure 9: The pattern of bending magnet to evaluate synchronous phase.

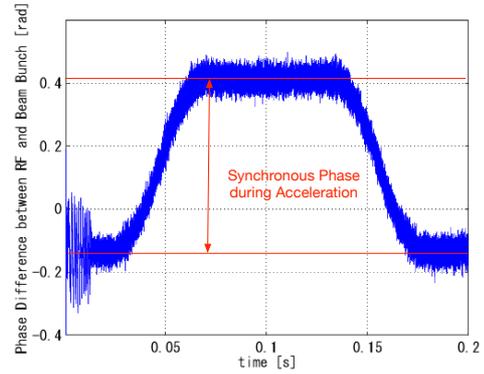


Figure 11: Change of phase difference between a cavity voltage monitor and a beam bunch over time.

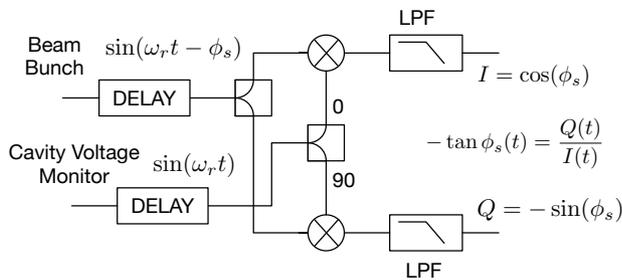


Figure 10: A scheme to obtain IQ signals for the beam bunch signal.

ルベルト変換を利用して求めることができる。空洞電圧モニタ信号とバンチ信号を掛け合わせ、LPFで高周波成分を除去することにより、IQ信号が得られる。

$$I(t) = \cos(\phi_s(t)) \quad (5)$$

$$Q(t) = -\sin(\phi_s(t)) \quad (6)$$

これより、同期位相は

$$-\tan \phi_s(t) = \frac{Q(t)}{I(t)} \quad (7)$$

と求められる。

空洞電圧モニタ信号とバンチ信号にはケーブルディレイによる位相差があるので、補正する必要がある。フラットベースとフラットトップでの同期位相はゼロであり、一致するはずである。すなわち、フラットベースとフラットトップの同期位相が一致するようにディレイを調整する。そして、フラットトップ/フラットベースの位相と加速中の位相の差が加速中の同期位相であると考えられる。その結果を図 11 に示す。

空洞電圧の設定を変えて幾つかの同期位相及びそこから評価される空洞電圧から校正曲線を得た。結果を図 12 に示す。合わせて、シンクロトロン振動数から得られた、空洞電圧も合わせてプロットする。両者は一致しており、もっともらしい結果が得られたことを支持している。

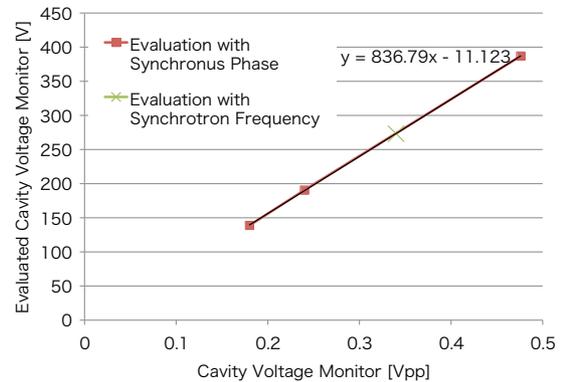


Figure 12: Calibration line of cavity voltage.

5. まとめ

2015年度は、加速器施設全体の実験時間は2051時間であり、その内シンクロトロンを使った実験は約49.7%であった。昨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検討している。アップコンバージョンによって、RF周波数+71MHzの空洞電圧検波用信号を生成するためにIRMの使用及びビメージ成分の影響を評価した。その結果、十分に実用になる見通しを得た。

ビームを用いて空洞電圧モニタ信号の校正を行った。加速位相から空洞電圧モニタの校正を行い、シンクロトロン振動数からの評価と良い一致を得た。

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] 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.
- [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10回日本加速器学会年会プロシーディング, 2013.