

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

Tetsuro Kurita<sup>\*A)</sup>, Satoshi Hatori<sup>A)</sup>, Sadayoshi Fumumoto<sup>A)</sup>, Yutaka Hayashi<sup>A)</sup>, Hiroshige Kagawa<sup>A)</sup>, Shinya Nagasaki<sup>A)</sup>, Yoshinori Nakata<sup>A)</sup>, Tetsuya Odagiri<sup>A)</sup>, Mark Shimada<sup>A)</sup>, Hiroaki Yamada<sup>A)</sup>, Fumiyoshi Yamaguchi<sup>A)</sup>, Masao Yodose<sup>A)</sup>, Eisuke J. Minehara<sup>A)</sup>, Shigeshi Ninomiya<sup>B)</sup>,

<sup>A)</sup>The Wakasa Wan Energy Research Center(WERC)  
64-52-1, Nagatani, Tsuruga, Fukui, 914-0192

<sup>B)</sup>High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1, Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

The accelerator complex at the Wakasa-wan Energy Research Center (WERC) consists of a 5 MV Schenkel type tandem accelerator and a 200 MeV proton synchrotron. Using this system, the element analysis, medical, bio and material sciences are performed. We report the operation status and the improvement of the vacuum and RF control system of the synchrotron.

## 若狭湾エネルギー研究センターシンクロトロン現状

### 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、数MeVから200MeVまでのProton、数MeV/uから55MeV/uまでのHe,Cイオン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/細胞への照射に利用されている。

加速器の運転も10年を越え、各機器の老朽化が目立つようになってきた。昨年度はシンクロトロンのイオンポンプと加速RF制御系の更新および機能の増強を行った。

### 2. 2009年度の運転状況

2009年度は、タンデム加速器の整備に例年より時間を費やし、6月末から12月までのおよそ7ヶ月間の実験にビームを供給した。実験時間のビーム種別の統計を図1に示す。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総運転時間は約1523時間であった。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、7ヶ月間フル稼働したことになる。そのうち、シンクロトロンからのビームが利用された割合は52%であった。

シンクロトロンからのビームのテーマ別の統計2では、医療に関連した実験の割合が最も多いが、昨年度と比べて、生物照射、材料照射に使用された割合が増えている。昨年度、陽子線がん治療の臨床研究が終了したため、シンクロトロンの利用率が減少する可能性があったが、材料照射、生物照射による利用が増加したため、例年と同程度にシンクロトロンは利用された。

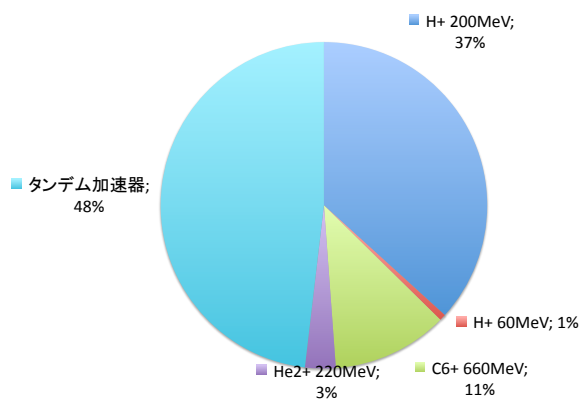


図1: 加速器施設全体のビーム種別ごとの実験時間の統計

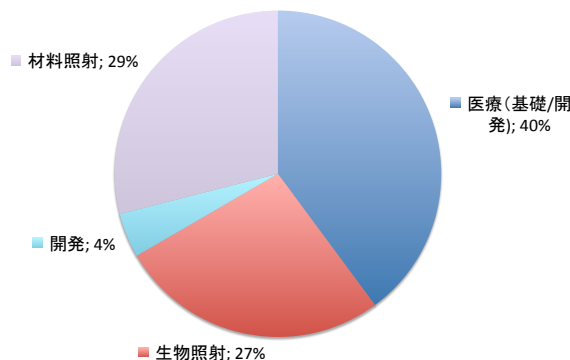


図2: シンクロトロンの実験テーマ別ごとの実験時間の統計

\* tkurita@werc.or.jp

### 3. 真空系の改善

シンクロトロンの真空系は、建設当初より11台のイオンポンプ(140L/s)と2台のターボ分子ポンプ(700L/s)によって構成されており、平均真空度は、 $8.6 \times 10^{-6}$  Pa程度であった。炭素イオンの加速の際には真空度が十分ではなく、残留ガスとの衝突による荷電交換が、ビームロスの原因になっていた。

今後、生物への重イオン照射の需要が高まる事が予想され、2009年度から真空度向上を目指した取り組みを開始した。

図3に対策前後の真空度分布を示す。4つのイオンゲージの測定値とイオンポンプの電流量より評価された真空度をプロットした。

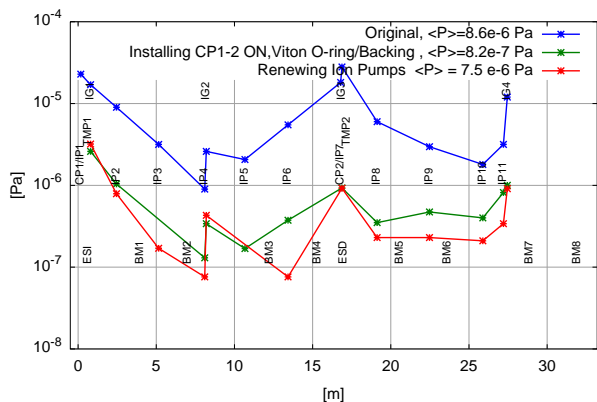


図3: 真空度の分布。青:対策前の真空度、緑:クライオポンプ導入、O-ring 交換、ベーキング実施後、赤:イオンポンプの排気速度向上後

ビームの入出射部分 (ESI/ESD チャンバー) には、700L/min のターボ分子ポンプで排気が行われているにも関わらず、もっとも真空度が悪く、全体の真空度悪化の原因になっている。ESI/ESD チャンバーは静電セパタム電極およびそれに関連した機器のため内面積が大きい。また、O-ring として耐放射線性は高いが、アウトガスの多いニトリルゴムが使用されていた。そこで、真空度向上の為に以下の対策を行った。

- O-ring 材質の変更
  - ニトリルゴムから耐放射線性の高いバイトンである日本バルカー D0675 [2] に変更した。
- ポンプの増強
  - ESI/ESD チャンバーに設置されているイオンポンプ (140L/min) を、クライオポンプ (1400L/min) に置き換えた。
- ESI/ESD チャンバーのベーキング
  - O-ring シールなので 110 °C 程度で行った。

以上の処置の結果、シンクロトロンの平均真空度は  $8.2 \times 10^{-7}$  [Pa] まで向上した (図3 緑線)。しかし、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で  $1.3 \times 10^{-6}$  [Pa] まで悪化する。今後、ビームラインの真空度の向上を行う必要がある。

以上の真空度で、ビーム電流増加の効果を図4に示す。加速効率が、8% (図4 赤線) から39% (図4 青線) に上昇し、真空度向上による効果が確認できた。

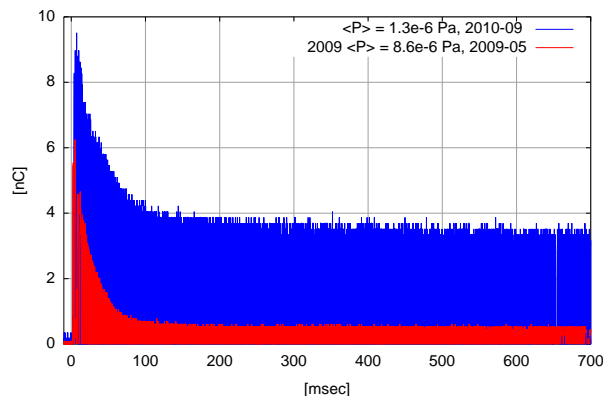


図4: Carbon 20 MeV → 660MeV の時のリング内の電荷の変化。赤:真空度向上前、青:クライオポンプ導入、O-ring 交換、ベーキング実施後

2010年度に、老朽化のためにイオンポンプを ANELVA 140 L/s から ULVAC アクターポンプ 220L/s に交換した。交換後の真空度の分布を図3の赤線に示す。イオンポンプで測定される真空度は向上したため平均の真空度の  $7.5 \times 10^{-6}$  [Pa] になった (図3 赤線)。しかし、イオンゲージで測定される真空度は変化していないため、実際のビームが通る領域での真空度はほとんど変化していない可能性がある。

イオンポンプ交換による真空度向上のビーム電流への評価が待たれている。

### 4. 加速 RF 制御系の更新

#### 4.1 構成

従来の W-MAST のシンクロトロンの加速高周波の制御系は、主発振器として Direct Digital Synthesizer (DDS) が使用され、Digital Signal Processor (DSP) によって制御されていた。ビームフィードバック成分の副発振器として VCO が用いられ、DDS の出力に周波数加算されていた。このシステムは次のような問題を抱えていた。

- DSP および DDS が放射線環境下であるリング内に設置されており、放射線の影響で頻繁にエラーによる停止もしくは動作の異常が発生する。
- 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る。
- ハードウェアおよびソフトウェアが古く、メンテナンスおよび改良ができない。

このため、次のような改良を施した加速 RF 制御系を開発中である。

- DSP/DDS を制御室に移し、放射線環境下から退避させる。

- フィードバック信号は ADC (100kHz) で DSP で取り込み、DDS の出力に加算する。
  - 副発振器は PLL によって水晶発振器にロックし、VCO は使用しない。

さらに、次のような機能を盛り込む。

- 2 倍高調波の制御出力を統合し、DDS の出力に追従させる。
- B-Clock ではなく、DSP の T-Clock によって、周波数の更新を行えるようにする。

以上の加速 RF 制御系の更新の様子を図 5 に示す。

#### 4.2 フィードバックループの計算

ビームフィードバックの安定性を確認する為に図 6 のモデルでフィードバックループの伝達関数の計算をおこなった。

各ループの伝達関数は次のように記述できる<sup>[3]</sup>。

$$\frac{\Delta u(s)}{V_n} = \frac{-G_0 e^{-(L_c+L_d)s}}{s^2 + P e^{-L_c s} + \omega_s'^2} \quad (1)$$

$$\frac{V_r'}{V_r} = \frac{-\omega_s'^2 \cdot D e^{-(2L_c+L_d)s}}{s^2 + P e^{-L_c s} + \omega_s'^2} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta R(s)}{V_n} = \frac{x_p}{h\eta\omega_r} \frac{-\omega_s'^2 G_0 e^{-(L_c+L_d)s}}{s^2 + P e^{-L_c s} + \omega_s'^2} \quad (3)$$

$$\omega_s' = \omega_s \sqrt{1 + D e^{-(2L_c+L_d)s}} \quad (4)$$

$$P = G_0 G_p g_p \quad (5)$$

$$D = \frac{G_0 N_r x_p g_r}{h\eta\omega_r} \quad (6)$$

ここで、

$\mu_0$ [rad]:	加速 RF の位相の変化
$\mu_b$ [rad]:	ビーム位相の変化
$G_p$ [V/rad]:	phase detector の特性。 ± 5V/± 180 度
$N_r$ [V/m]:	ポジションモニタの特性。 0.22 V/mm
$G_0$ [(rad/s)/V]:	フィードバック信号と周波数の変換。 1MHz/5V
$g_p$ :	$\Delta\phi$ フィードバックのゲイン
$g_r = g_{r0} \frac{s+\omega_1}{s}$ :	$\Delta R$ フィードバックのゲイン
$\omega_s$ [rad/s]:	シンクロトロン周波数 ~ 1.5kHz
$\omega_r$ [rad/s]:	周回周波数。計算では 2 MHz とした。
$x_p$ [m]:	ポジションモニタの位置での分散 ~ 2m
$L_c$ :	ケーブルによる時間遅れ ~ 0.5 [μsec]
$L_d$ :	ADC による時間遅れ ~ 10 [μsec]

である。

ポジションモニタによって検出される位置信号のループを  $\Delta R$  ループ、ビームと高周波の位相差信号のループを  $\Delta\phi$  ループと呼ぶ事にする。式 (1) は  $\Delta\phi$  ループの閉ループ伝達関数、式 (2) は  $\Delta R$  ループの一巡伝達関数、式 (3) は  $\Delta R$  ループの閉ループ伝達関数である。

最適な  $\Delta\phi$  フィードバックゲイン  $g_p$  は、 $\Delta\phi$  ループの閉ループ伝達関数 (式 (1)) の臨界制動の条件より求められ  $g_p \sim 0.015$  とした。

必要な  $\Delta R$  フィードバックのゲイン  $g_r$  は、

$$\left| \frac{V_r'}{V_r} \right|_{s=0} > 1 \quad (7)$$

の条件より求められる。必要な  $g_r$  は周回周波数  $\omega_r$  が高くなると大きくなるので、フラットトップの周回周波数 (5 [MHz]) で決定し  $g_{r0} \sim -0.019$  とした。

以上のフィードバックゲインにおける各伝達関数のボード線図を図 7,8,9 に示す。赤線がフィードバックが無い場合の周波数特性であり、フィードバックを動作させた場合の周波数特性が緑線である。

図 7 は  $\Delta\phi$  ループの閉ループ伝達関数のボード線図である。フィードバックにより、シンクロトロン振動の周波数の位置にあったピークが抑制されている、すなわちシンクロトロン振動が抑制できていることがわかる。

図 8 は  $\Delta R$  ループの一巡伝達関数のボード線図である。この図より、 $\Delta R$  フィードバックの安定性が判別できる。位相余裕は 90 度、ゲイン余裕は 26dB 程度であるので、安定条件を満たしている。また、 $\Delta\phi$  フィードバックをオフにした場合 (赤線)、シンクロトロン振動周波数に位置にピークが現れる。すなわち、 $\Delta R$  フィードバックには  $\Delta\phi$  フィードバックが必要なことがわかる。

図 9 は  $\Delta R$  ループの閉ループ伝達関数のボード線図である。フィードバックによりピーク特性が抑えられていることがわかる。外乱  $V_n$  のビーム位置  $\Delta R$  への影響は、最大で  $|\Delta R/V_n| \sim 0.15$  [m/V] 程度である。フィードバックが無い場合に比べて半分以下に抑えられている。周波数が低くなればさらに小さくなる。

いずれのボード線図でもシンクロトロン振動の周波数の数倍の領域から AD 変換による時間遅れの影響で位相遅れが顕著になるが、ゲインにピーク特性は現れていないため、安定した制御が行えると期待できる。

実際にビームを使用した試験が待たれている。

#### 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] 圓尾一司, "ゴムシール材の耐放射線性", バルカーレビュー, 39, p10, 1995
- [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

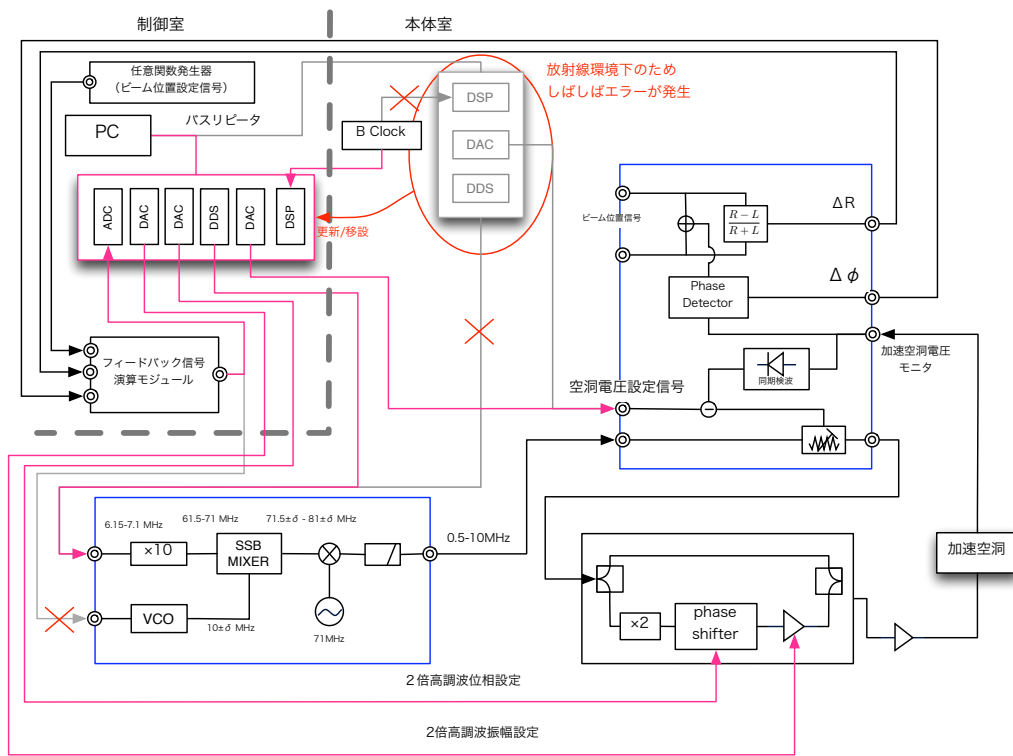


図 5: 加速 RF 制御系の構成

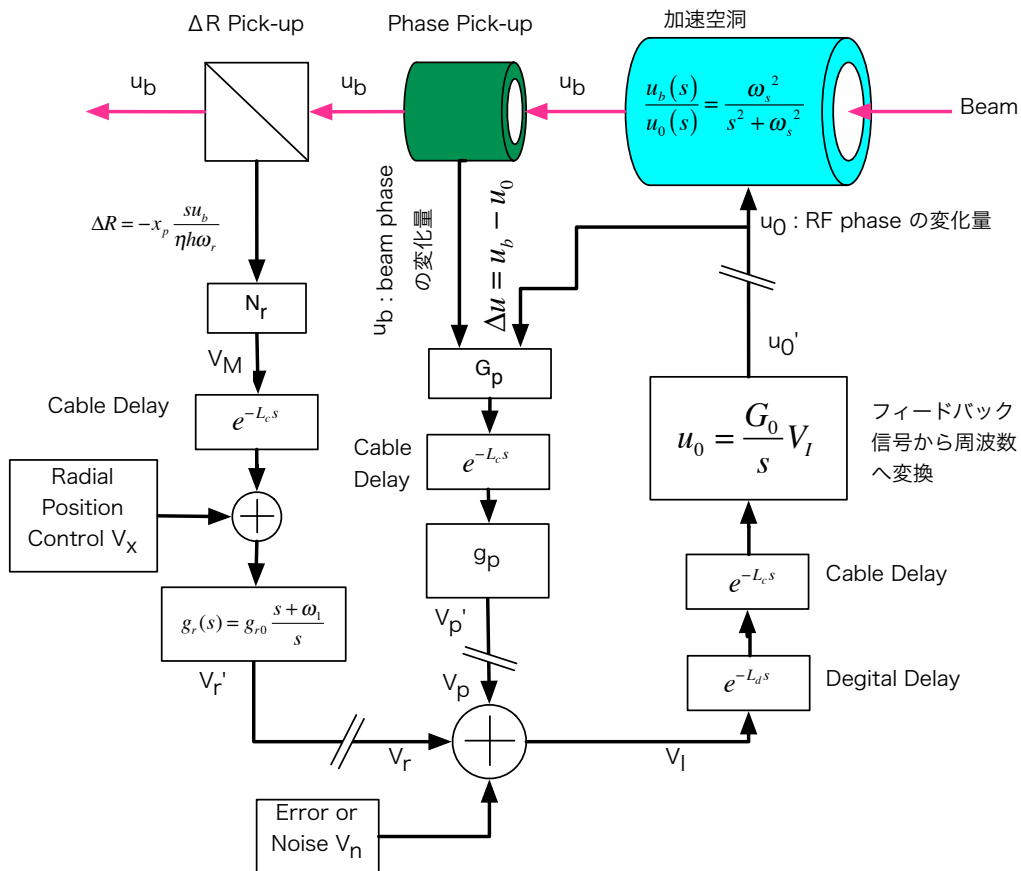


図 6: フィードバックループの計算モデル

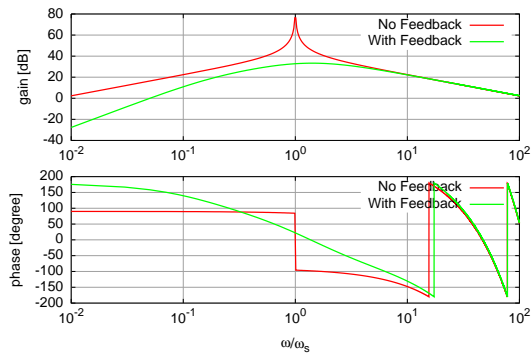


図 7:  $\Delta\phi$  ループの伝達関数

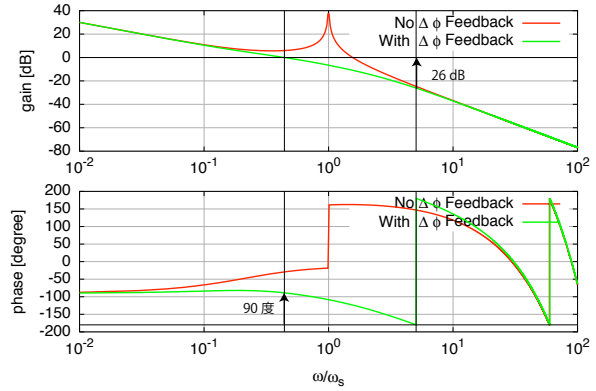


図 8:  $\Delta R$  ループの一巡伝達関数

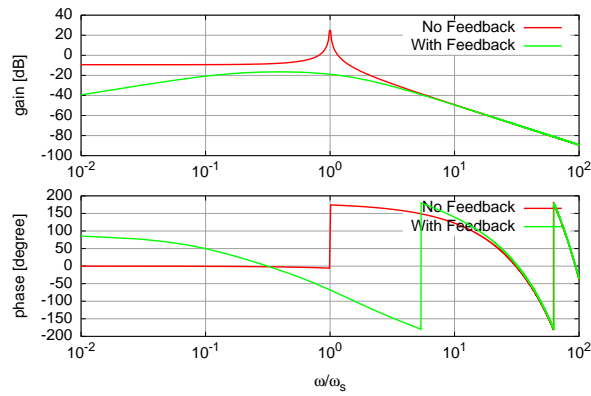


図 9:  $\Delta R$  ループの閉ループ伝達関数