

# PRESENT STATUS OF ACCELERATOR SYSTEM AT THE WAKASA-WAN ENERGY RESEARCH CENTER

Tetsuro Kurita, Satoshi Hatori, Yutaka Hayashi, Hiroaki Yamada, Shinobu Kimura, Jyunichi Mori,  
Yoshikazu Hamaji, Tsutomu Shimoda, Shin Hirose, Tetsuya Hashimoto, Maaku Shimada,  
Nobuo Ohtani, Sadayoshi Fukumoto  
The Wakasa-Wan Energy Research Center (WERC)  
64-52-1 Nagatani, Tsuruga, Fukui, 914-0192

Shigeshi Ninomiya  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaragi, 305-0801

## 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, clinical trial of cancer therapy and bio and material sciences are performed. We report development activity of each component of the accelerator system.

## 若狭湾エネルギー研究センターの加速器施設の現状

### 1. はじめに

若狭湾エネルギー研究センターの加速器システムは、5MVのタンデム加速器と200MeV( $H^+$ )のシンクロトロンによって構成されている<sup>[1]</sup>。イオン源としては荷電変換型イオン源とプラズマスパッタ型イオン源の2台が設置されており、荷電変換型イオン源から $H^-$ と $He^-$ のDCビーム、プラズマスパッタ型イオン源からは $H^-$ と $C^-$ のパルスビーム(シンクロトロン入射用)と $C^-$ のDCビームを供給している。

タンデム加速器からのDCビームは材料研究、イオンビーム分析、生物照射研究に使用されている。パルスビームはシンクロトロンへ入射され、材料・生物照射に加えがんの陽子線治療研究に供給されている。現在の主なテーマはがんの陽子線治療である。しかし、医療照射終了後の時間の積極的、計画的利用を行い、多様な物理実験が行われている。

### 2. タンデム加速器

#### 2.1 現状

タンデム加速器はすべての実験にビームを供給するのでそのターミナル電圧の安定化は重要である。現在、ターミナル電圧の検出に用いているGVMの不安定性と、系統の電圧変動によってターミナル電圧が揺らぐという問題を抱えている。

#### 2.2 GVMの改良

図1にGVMの概念図を示す。当初GVMのローターは積極的に接地されておらず、モーターシャフト、ベアリング、モーターケースを介してアースにつながるようになっていた。このため、ローターの回転状況によって接地抵抗が変化し誤信号を出力することがあった<sup>[3]</sup>。そこでローターを積極的に設置す

る改造を行った。2004年度にモーターシャフトの反対側からカーボンブッシュで接地を行ったところ、起動し始めに突然出力が下がり、その状態が30分から2時間続く等、段階的に出力が変化する振舞が見られた。スプリングアクションでカーボンブッシュが押さえられており、起動し始めはモーターシャフトとカーボンブッシュの接触抵抗が不安定であったことが原因の一つと考えられる。そこで、2005年度にはローターとモーターの間のシャフトを横から形式の物を製作し、現在試験稼働中である。特に問題なく順調に稼働している。

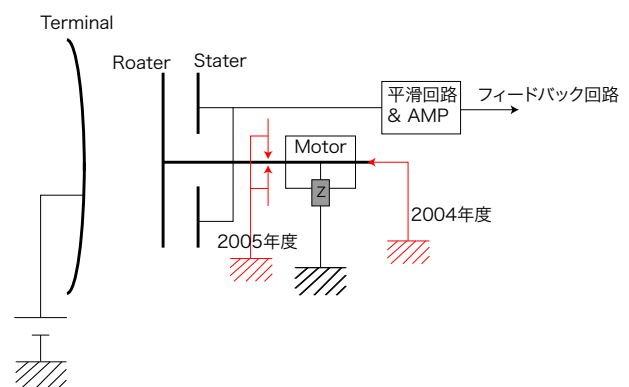


図1: GVMの概念図のローターの設置箇所

#### 2.3 電源系統の電圧変動の問題

系統電圧の変動によってターミナル電圧が変動するという問題がある。図2に昇圧回路とそのフィードバック回路を示す。

ターミナル昇圧用の高周波電圧は、三極管、共振トランスで形成される共振回路を他励振させること

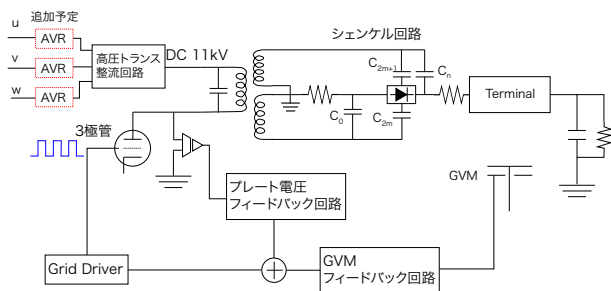


図 2: 昇圧回路とフィードバック回路の概念図

でえられる。共振周波数でグリッド電圧をスイッチングし、スイッチングの duty を変化させることによって、プレート電流を制御している。三極管の B 電源として、系統の三相交流を高圧トランスで昇圧後、整流・平滑化した物が用いられており、安定化電源ではない。そのため、系統の電圧変動を受けやすい。プレート電流が一定ならば、B 電源の変動はそのままプレート電圧の変動になる。一方、プレート電流を一定にすることがターミナル電圧を安定化させるという思想のもと、プレート電圧が一定になるように、プレート電流がフィードバックによって調整される。このフィードバックには B 電源が安定であることを仮定している。このため、プレート電流は変化していないにも関わらず、系統が変化すると B 電源を経由してプレート電圧が変化し、フィードバックによってターミナル電圧が変動する。

系統電圧が約 2V 変化すると、プレート電圧が 120V、ターミナル電圧が最大で約 0.3 % の変動が観測されている。現在、この対策として単相ノイズカット AVR を各相に設置し、そこから発振器の電力を供給することを計画中である。

### 3. シンクロトロン

#### 3.1 現状

シンクロトロンは 2 つの問題を抱えたまま 2001 年にメーカーから引き渡されている<sup>[2]</sup>。まず、一つ目は、加速初期に急激にビームをロスする。図 3 に捕獲及び加速中の蓄積電荷を示す（位置モニタの和信号を反転させた）。

2 つ目に出射に問題がある。出射として帯域ノイズを用いた RF Kicker が用いられているが、RF Kicker によってベータトロン振動を励起する前にビームが勝手に出射されてしまう（先漏れと呼んでいる）という問題がある。すなわち、出射ビームのスピルをコントロールできない。現在、シンクロトロンのビームの主要目的は陽子線治療であるがウォブラーで照射野を形成しているので、先漏れは照射野の平坦度に大きな影響を及ぼす。入射パルス幅  $25\mu\text{sec}$ 、 $H^+ 6\text{nA}$  出射時約 10% の漏れがある。現在、入射ビームのパルス幅を短くすることで照射野形成に影響のない漏れ量、約 0.1% に対応している。このときの出射電流量は 2-3nA である。

これらの問題を克服すべく、2004 年度より独自にシンクロトロンの開発と欠けている機能の開発に着

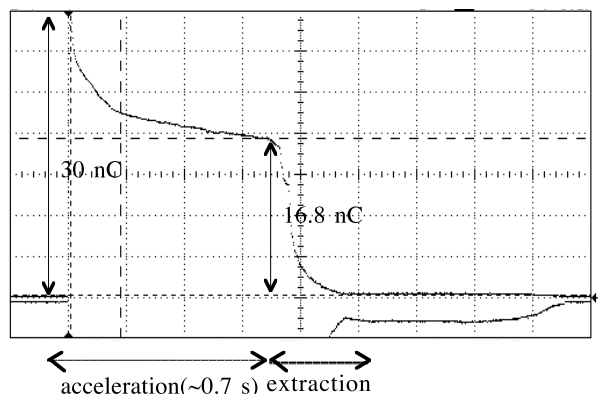


図 3: 加速中及び出射中の蓄積電荷 ( $H^+ 200\text{MeV}$  出射時)

手した。

#### 3.2 ビームフィードバックによる加速高周波制御の導入

ビームフィードバックによる  $\Delta\phi$ 、 $\Delta R$  制御の装置は納入されていたが、全く調整に利用されていなかった。また、非常に使い勝手が悪く、機能的な不備もあるので、KEK との共同研究によって独自の物に完全にリプレースした。ビームフィードバック回路の変更を図 4 に示す。

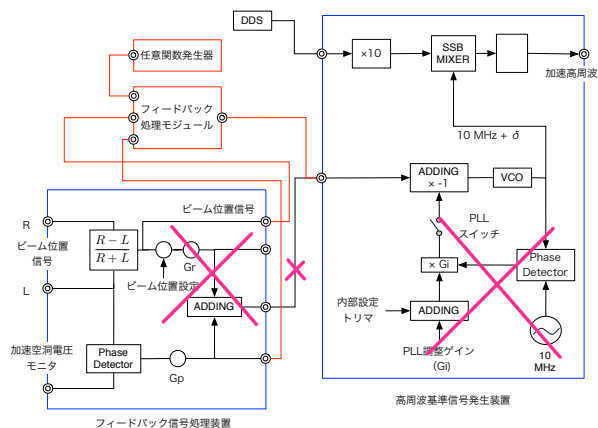


図 4: ビームフィードバック回路の置き換え

$\Delta R$ 、 $\Delta\phi$  信号を演算しフィードバックゲインを調整する部分は完全にリプレースした。メーカーによって納入された物は、ビーム及び装置を停止しないとフィードバックゲインを変えられないシステムであったので、実用に堪える物でなかった。また、フィードバックを OFF の状態では、VCO を 10MHz の水晶発振器に PLL でロックするシステムであった。しかし、フィードバックが ON になるタイミングで、PLL とフィードバック信号の偏差が大きく、スムーズにつなげることができないので、PLL の使用は完全に停止した。

ビームフィードバックの導入によるシンクロトロ

ン振動の抑制と $\Delta R$ の制御はできるようになったが、ビーム増加にはいたらなかった。しかし、マシンの状況を探るツールとして有用である。その一例として、加速途中でのダイナミックアパーチャサーチをした例を図5に示す。捕獲電荷に対する出射電荷の割合を、加速初期のいくつかのタイミングで $\Delta R$ を変化させプロットした。 $C^{6+}$  25MeVを入射したときは加速初期のダイナミックアパーチャが非常に狭いことが分かる。

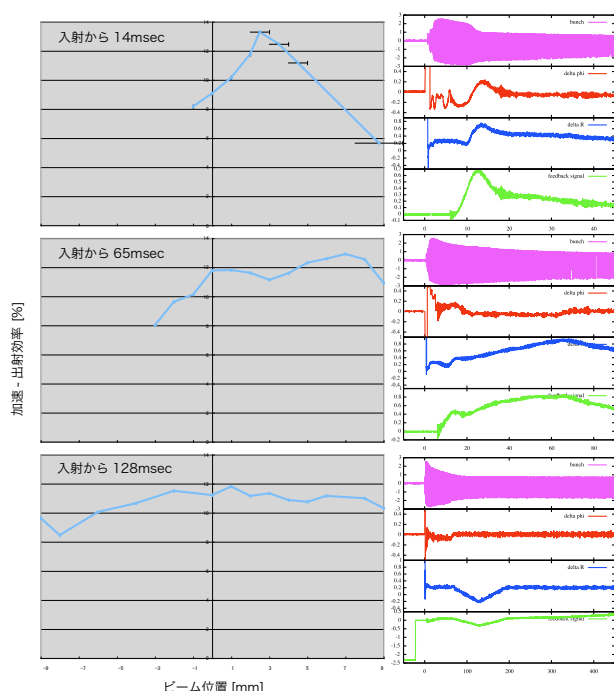


図 5:  $C^{6+}$  660 MeV 出射時の加速初期のアパーチャサーチ

### 3.3 今後の計画

現在、シンクロトロン蓄積電荷は位置モニタの和信号を用いて測定されている。したがって、パンチされていないと測定できない、またパンチ形状に値が変わりうるという問題がある。より、正確かつ制限のない形で入射電荷及び蓄積電荷を評価する為にKEKの協力を得て負性抵抗によって時定数を消去したCTを開発することを計画している。また、出射スピルの平坦度を向上させるため出射用高周波のフィードバック制御の導入も計画している。

## 4. イオン源

メーカーによって納入されたシンクロトロン入射用の表面生成H<sup>-</sup>イオン源は、しばしばプラズマが不安定になり、2-3週間間隔で極端なビーム減少と不安定性によりコンバータ面の清掃を行う必要があった。これに対して、セシウムリザーバからチャンバーの間にバルブを取り付け、より速いセシウム供給量のコントロール、およびターゲット電位給電部にコン

デンスバンプを取り付け放電トリップを起こさないようコンディショニングの持続性向上といった改良を行って来た[4]。

しかし十分ではなく根本的な原因は、フィラメントに対して非対称な閉じ込め磁場により、プラズマが不安定になりやすいこと。また、ターゲットの正面にフィラメントが配置されているので、フィラメント蒸発物質によりターゲット表面を汚染し荷電変換効率が低下することが考えられる。そこで、図6のようにチャンバーの中心かつターゲットの側面にフィラメントを配置するようにチャンバーデザインを変更した[3]。

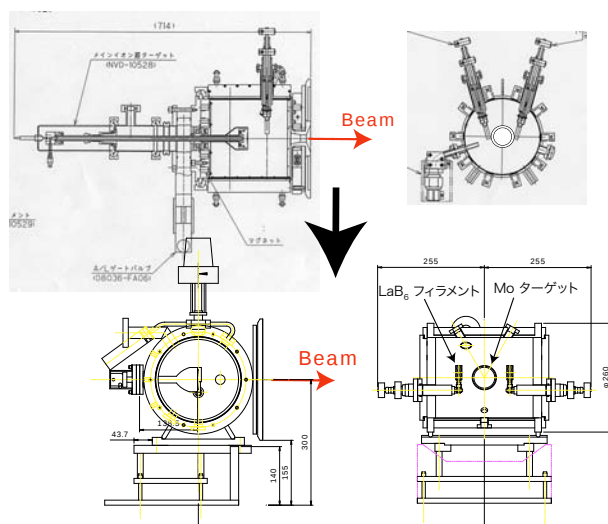


図 6: 新旧プラズマスパッタ型イオン源の比較

数週間の試験運転では、速やかにパルスアークが立ち上がり、コンディショニング時間の短縮、ビーム電流の増大など良好な結果が得られている。今後、半年以上の期間の連続運転試験を行う予定である。

## 参考文献

- [1] S. Hatori, et al, "Accelerator System at The Wakasa Wan Energy Research Center", Proceedings of the 16th International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry -2000, Denton, US, AIP Conference Proceedings 576, New York: American Institute of Physics, 86, 2001
- [2] S.Hatori et al, "Applications for industries and medical uses at the Wakasa Wan Energy Research Center", Proceedings of The 17th International Conference on Application of Accelerators in Research and Industry -2002, Denton, US, AIP Conference Proceedings 680, New York: American Institute of Physics, 981, 2003
- [3] 羽鳥聡、他、"若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状"、第17回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集、放射線医学総合研究所、46、2004
- [4] 林 豊、他、"大強度スパッタ型イオン源の改良"、第16回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集、神戸商船大学、67、2003