

[07-P07]

## Status of ATF Accelerator Development

S. Takeda, J. Urakawa, H. Hayano, K. Kubo, N. Terunuma, S. Kuroda, M. Kuriki,  
N. Toge, M. Akemoto, V. Vogel, T. Naito, S. Araki, T. Okugi,  
S. Kashiwagi<sup>1</sup>, K. Dobashi<sup>2</sup>, D. Aizawa<sup>3</sup>, M. Takano<sup>4</sup>, T. Imai<sup>5</sup>, I. Yoshida<sup>5</sup>, H. Sakai<sup>6</sup>

High Energy Accelerator Research Organization

Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan

<sup>1</sup>Waseda University, <sup>2</sup>Tokyo Metropolitan University, <sup>3</sup>Tohoku-Gakuin University

<sup>4</sup>Tohoku University, <sup>5</sup>Science University of Tokyo, <sup>6</sup>Kyoto University

### Abstract

ATF is now in the stage of low emittance beam development. Even after the improvement of Linac in summer '98, the small beam energy spread and the energy stability as well as the beam charge transmission were not improved immediately. After introducing correlation measurement system and analysing the source of instabilities, we could find another source of instabilities related to AC line instability and timing jitter in several places. The countermeasure on the gun pulser made improvement of beam a lot. The countermeasure on the klystrons is now underway. We will report it briefly.

## ATFの開発状況

### 1. はじめに

リニアコライダー加速器開発を行っている試験加速器(ATF)では、97年1年間の立ち上げ運転から、98年には低エミッタンスビーム開発運転に移行しエミッタンス達成を第一目標として開発研究を行っている。リング自体の開発はもちろんの事、リングへビームを供給しているリニアックの性能改善がリングのビーム開発を左右している状況である。98年夏までの状況は昨年の本研究会で報告したが、今回はその時におこなった改善の結果とその後の研究開発および今後の開発方針について報告する。

昨年夏に行った改造項目は以下のとおりである。

(1) リングのエネルギーアクセプタンス内に設計値の粒子数を入射できるようにするためのリニアック入射バンチング部の改造。

(2) ビームエネルギーフィードバックの負担を軽減するためにクライストロン冷却水温度安定化の改造および基準信号伝送用光ファイバーの温度安定化ファイバーへの改造による長期エネルギー変動の安定化。

(3) パルス毎のエネルギー安定化に対してはクライストロン変調器電源にフィードフォワード回路を組み込む事によるパルス毎充電電圧の安定化。

(4) リニアックのビーム軌道の高速制御のためシングルショットで読みだせるBPM回路システムへの改造。以上の改造が98年夏のシャットダウン時に行われ、9月末からの運転でその改善度が評価された。それらについて以下に報告する。

### 2. 入射バンチング部の改造

主な改造点は電極型チョッパーの撤去による電子銃と第1SHBとの距離の短縮およびこの領域の収束磁場を弱める事で空間電荷力によるデバンチを避けた事、また、

第1SHBと第2SHBとの距離も縮め、さらに第2SHBとバンチャーとの距離も縮めSHBの運転電圧を上げた事、バンチャー部から加速管部にかけて収束磁場を約2倍にあげて空間電荷力による横方向発散を抑えトランスミッションを上げた事、などである。PARMELAの計算によるとこれら一連の改造により入射バンチング部出口78MeVの地点で20ps以内に82%のビームを集群させることができ、バンチ長の半値全幅は約10psとなる。これは改造以前の長いテールを引くバンチングが改善されるので加速後のエネルギー拡がりテールを少なくする事ができると期待された。そのコミッションングではジッターが大きかったものの最小バンチ長および透過率は計算値に近いものが実現され改造は成功であった。しかしリニアック自体の性能は以下に述べる不安定性が支配的であり改造の結果よくなったという印象はなかった。後に述べる電子銃電源部の改善の後の運転ではバンチングが安定しエネルギージッターも減少したので詳細なチューニングが可能となったため、リニアックの電流安定度と電流透過率が向上した。

### 3. ビームエネルギー長期変動安定化のための諸改造

ビームエネルギー変動は数10分から一日程度の長期的変動では1~2%が観測されておりその原因はクライストロン冷却水が±2℃程度20分周期で変動しそれが原因でクライストロンのゲインと位相が変動していたものと関連づけられた。これを改善するためにトンネル内で加速管等に使用している0.1℃制御の精密温調系から冷却水を分岐させて使用するような改造を行った。これにより冷却水温度依存の変動は取り除くことができた。もうひとつの長期変動原因はクライストロン制御系の周囲温度変化によるものであり、これはクライストロン室が空調されていないことに起因する。それによる影響で

一番顕著だったのは2856MHzの基準加速周波数を伝送している光ファイバーが一部分温度安定化されていないものを使用していた事によるもので、ひどい時には一日のうちに $10^\circ$ 以上も位相変化を引き起こしていた。このファイバーは温度安定化ファイバーに取り替えられた。しかしながら空調していないことに起因する不安定は回路全体におよび依然取り除けていない。これらを一挙に解決するにはクライストロン室の空調が不可欠である事はいうまでもないが予算面で現状は困難である。現在これに対してはクライストロンRF部だけ空調を行い、温度依存を緩和しようと作業中である。また、クライストロン部分の位相フィードバックも導入予定であり、位相検出器を評価中である。

#### 4. パルス毎のエネルギー安定化

パルス毎のエネルギー変動はビームトランスポート部で軌道変動を招きリングへの入射角変動となるのでリング入射電流の変動を招く事になる。相関測定結果が示すところではエネルギー変動はクライストロンrf振幅変動および位相変動と相関が見られ、さらにそれらは変調器充電電圧変動と相関が見られた。すなわち変調器の充電電圧の安定化を計ればパルス毎のエネルギー変動を少なくできる事を示唆しており、毎パルスの充電電圧の安定化をdcQ回路にフィードフォワード回路を付加することで解決できると期待されている。現在までにはフィードフォワード回路は最上流の変調器のみに取りつけてテスト中であるが電圧の安定化は確認されている。しかし直接のエネルギー安定化には結びついていないように測定されている。他のクライストロンがまだ安定化されていないためと考えられ、さらにサイクロトロンジッターやRFパルス変調ジッターなども考慮に入れなければならないであろう事も推測できる。また、バンチングの安定性もリニアック最下流で強度ジッター、エネルギージッターを引き起こす要因と考えられ詳細に調べられた。ビーム同期相関測定[1]によると、電子銃のHV電圧の変動(ACライン変動およびコロナ放電による)が強度変動とバンチング変動を引き起こしているようだとの事なので、ACラインには安定化回路を組み込み(AVR)、コロナ対策として高圧ステーションの徹底的彎曲化を図った。その結果HV電圧変動は少なくなったがまだdcQ回路(AVRは未だ使用していない)のAC依存と考えられるゆっくりとした変動が見られる。また、バンチングジッターに直接効くグリッドパルサーの時間ジッターも従来のrms 7psから3psに改善した結果、バンチ長モニターでのジッターが少なくなり安定化に大きな寄与があった。これらの改善によりリニアック中のビーム強度ジッターは従来の2~3%から1%以下に下げることができた。もっとエネルギーに敏感なBT部ではその強度ジッターは従来4~5%あったものがやはり1~2%程度にできた。

全クライストロンにdcQフィードフォワード回路を付加した時にはさらなる安定化が期待できる。一方、ビーム透過率はジッターが少なくなった分チューニングが詳細にでき、その結果非常に改善されバンチャ-出口からリング入射まで90%以上の透過率であった。リングへの透過率は約70%であり、これもより微細なチューニングにより上げれるであろう。

#### 5. BPMシステムの改造

ビームエネルギードリフトやエネルギージッター解析のため、軌道調整あるいは軌道解析を行なうためにはマルチプレックス方式によるBPM読みだし回路では時間がかかるしまたジッター解析のための相関測定も不可能である。そこでシングルショット測定が可能ないように、現用の低ノイズヘッドアンプをそのまま活かしその後段に低ノイズクリップ回路を新たに開発し、その出力である負極性パルスをチャージ積分型ADCでデジタル化する回路に変更された。この新開発の低ノイズクリップ回路により位置分解能は前設計から落ちる事なく $1\sim 2\mu\text{m}$ が得られるものと計算されている。回路変更は98年8月末までに行なわれ、9月末からは運転に使用している。これにより現用0.78Hz繰り返しのビームの各パルスで軌道を測定表示できるようになり格段に軌道調整の効率があがり、また軌道不安定がどこから発生しているかも一目でわかるようになった。また、99年3月には電子銃から80MeV部分までの入射部にさらにBPMを追加し合計10BPMで軌道を測定できるようになりバンチング部分の安定性を上げるのに役だっている。

#### 6. より高安定なビーム入射のための相関測定システム

ダンピングリングの入射蓄積電流の数10%にもおよぶパルス毎のジッターは大部分ビームエネルギージッターから発生していると推測されるが、その正確な原因特定解析のために相関測定システムが構築されつつある。これはビームと同期した各種パラメーターの同時計測であり、多数のチャージ積分型ADCにひとつのビームに同期したゲートを配ることで計測値がADCにホールドされ、各種パラメーターが1ショットのビームに対して測定できるのでそれらの間の相関測定が可能となる。具体的には、BPMリーダータスクがビームの繰り返して軌道を読み出しているのがそれと同時に各種パラメーターも読み出すように改造した。現在、その相関測定で読み出せるのは、AC200V振幅、積分型ビーム電流トランス読み出し、電子銃高圧電圧、SHB位相、バンチャー位相、バンチ長、クライストロン電圧などであり、ソフト的には非同期ではあるが全種類のマグネット電流や室内温度モニターとの相関測定が取れるようになっている。

#### 7. ダンピングリングのビーム開発状況

リングの開発状況について要約する。98年夏に行ったBPMの高分解能化および取出しキッカー[2]の放電対策の結果、モデルの精密化および取出しラインへの安定したビーム取出しが可能になった。軌道補正、デイスパージョン補正、バンパ軌道設定、ベータ関数測定、ビームベースアライメント、Skew-QによるX-Y結合補正などの各種調整用ツールの整備も進み、エミッタンス測定法の確立と精密化が計られ、99年春にはエミッタンス調整手法が確立しだしてきた。X方向エミッタンスは98年に確認済みであるが、Y方向エミッタンスがまだ目標値に到達しておらず、現在の焦点はY方向エミッタンスのチューニングである。目標の0.014nmに対して到達しているのは0.044nmであり、あとファクター3下げたいところである。なぜ達成できないかは研究中であるが、リニアックからの入射電流の不安定も一因であろうがアライメントの安定性、縦方向ビーム振動の問題、マグネットの安定性(電源安定性、温度安定性)が欠けている可能性なども認識され始めている。リングにも相関測定システムを拡張して、その原因究明にあたらなければならない。[3],[4]

#### 8. 今後の課題

99年10月からマルチバンチシングルトレイン運転が本格的に開始する予定であるが現在予備的な運転を行っており問題点の解決にあたっている。そのためにリニアックとして準備している事は、マルチバンチビームの生成、過渡ビームローディング補償システムの立ち上げ、各種ビームモニターをマルチバンチ対応型に改良すること、放射線シールドの強化などである。

矩形状のリニアコライダー型マルチバンチを生成するために新たに開発されたのはバースト状のrfパルスとその中央部のフラットな部分を切り出しエンハンスさせるための矩形パルスをグリッドに入る直前で直接合成する物である。この方式でマルチバンチビームを出した場合現在直面している問題は電子銃からの各バンチ強度に数%から20%程度のばらつきが出ている事である。グリッド入力波形は振幅がそろっているにもかかわらずグリッド内部回路で変調を受けるためであろうと推測されている。現在解析中である。[5]

過渡ビームローディング補償システムとしては当初はdF-ECSを使用する予定であり、ECSクライストロンを動作させるための変調器は順調に稼動している。

ビームモニターをマルチバンチに対応させるため、電流モニターは減衰器を切り変える方式で行い、スクリーンモニターは電子式シャッター速度を遠隔より可変させて行い[6]、BPMは現行回路ではバンチ構造よりはるかに低い周波数領域で動作しているためマルチバンチ立ち上がり部分と立下り部分しか応答せず、このうちクリップ回路は立ち上がり部分を検出している。したがってト

レインの最初の部分の位置を検出している事になる。各バンチのエネルギーや透過率測定にはデジタルオシロスコープを用いたビーム位置モニター、ビーム電流モニターを使用している。しかしながら、専用のマルチバンチBPMが必要であり、現在開発中である。[7]

マルチバンチ運転で現在一番深刻な問題は放射線シールドである。シングルバンチ $1e10$ の電子数、0.78Hzのビーム繰り返しが漏えい放射線量から決まる現在の限界である。したがって20バンチのマルチバンチに切り替えても全電荷量で決まる量まで各バンチ強度を下げないと継続的な運転ができない状況にある。現在漏えい個所の特定と対策が進行中であり、秋の本格的運転が可能となるようシールド強化の作業中である。

ATFリニアックの今後の方向はさらなるビーム安定化が第1焦点であり、マルチバンチビーム生成が第2焦点である事は昨年度から変わっていない。その中でも重要な課題と考えているのはパルス毎の各種ジッターを極力減らす事である。これらのジッター問題を解決し高安定なリニアックを実現することはリニアコライダーを安定に運転する技術の確立に最重要であり試験加速器の意味がそこにあると考えている。また、ここで得られた経験と結果が皆様の参考になり種々の問題解決の糸口になれば幸いです。

#### 9. 謝辞

ATFの運転維持および開発研究はシフトに参加してくださる皆様と、技術サポートして下さる(有)イーキューブ、(株)関東情報サービスの方々によって行なわれています。あらためてここに感謝致します。さらに、本著者は菅原機構長、木村物質構造科学研究所長、木原加速器研究施設長、高田加速器総主幹、山崎加速器第一研究系主幹の方々のご理解とご指導に感謝致します。

#### 10. 参考文献

- [1] V. Vogel et.al.: Analysis of ATF LINAC stabilization; Proc. of 24th Linear Accelerator Meeting in Japan(1999)
- [2] T. Imai et.al.: ダブルキッカーシステム(D); Proc. of 24th Linear Accelerator Meeting in Japan(1999)
- [3] J. Urakawa et.al.: ダンピングリングの周長問題; Proc. of 24th Linear Accelerator Meeting in Japan(1999)
- [4] S. Araki et.al.: アクティブアライメントシステム; Proc. of 24th Linear Accelerator Meeting in Japan(1999)
- [5] M. Kuriki et.al.: 熱電子銃によるマルチバンチビーム生成; Proc. of 24th Linear Accelerator Meeting in Japan(1999)
- [6] T. Naito et.al.: ランダムシャッターカメラを用いた光量可変型スクリーンモニター; Proc. of 24th Linear Accelerator Meeting in Japan(1999)
- [7] I. Yoshida et.al.: マルチバンチBPMの開発; Proc. of 24th Linear Accelerator Meeting in Japan(1999)