

[A16a02]

## Status of ATF Linac

S. Takeda, H. Hayano, M. Akemoto, T. Naito, S. Kashiwagi<sup>1</sup>, T. Okugi<sup>2</sup>, K. Dobashi<sup>2</sup>, D. Aizawa<sup>3</sup>, J. Urakawa, N. Terunuma, K. Kubo, K. Oide, N. Toge, Y. Funahashi, S. Araki, Y. Takayama, M. Takano<sup>4</sup>, T. Imai<sup>5</sup>, I. Yoshida<sup>5</sup>, H. Sakai<sup>6</sup>, T. Shima<sup>6</sup>, S. Morita<sup>7</sup>, T. Matsui<sup>7</sup>, and T. Ishii<sup>8</sup>

High Energy Accelerator Research Organization  
Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan

<sup>1</sup>The graduate university for advanced studies, <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, <sup>7</sup>E-cube Ltd., <sup>8</sup>Kanto-Joho Service Co.

### Abstract

During one year operation of ATF Linac as the Damping Ring Injector, the small beam energy spread and the energy stability as well as the beam charge transmission became very important issue for the stable Damping Ring injection. In this summer shut-down period, the injector upgrade, the klystron rf stabilization and BPM electronics upgrade are in progress. These upgrades are reported here in detail. As for the rf stabilization, we developed a feedforward circuit inside modulator which gave us twice more stabilities in rf amplitude and phase. We will mention it briefly. The multi-bunch operation is also under planing from this fall run. The preparation of multibunch operation is also reported.

### A T F リニアックの現状

#### 1. はじめに

リニアコライダ実現のための低エミッタンスビーム開発を行っている試験加速器(ATF)の1.5GeVリニアックは、97年1月よりダンピングリング入射運転を1GeVで始め4月からは1.3GeVで継続的にこの6月まで運転している。エネルギーを設計値1.54GeVまであげていないのは97年9月からダンピングリングのビーム性能開発に主眼をおいた運転をしているため全ての機器が余裕を持って継続的に安定に動作させる事をねらっている為である。98年6月までの運転で明らかになってきたことは、ビームエネルギー拡がりがあるためにダンピングリングの蓄積電流に上限(設計値の半分程度)が見えてきており電子銃グリッドバイアスにより加速荷電数を単に増やしただけではリングのアクセプタンス内に設計値の粒子数を入射できない事である。これについては入射バンチング部にわずかな改造を施すことで大幅に改善できる見込みがあることがわかり、現在SLACとの共同開発で改造中である。また、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の安定化の改造および基準信号伝送用の光ファイバーの温度安定化も同時に進んでいる。ビームエネルギーフィードバックでは制御できないパルス毎のエネルギー安定化に対しても開発が進んでおりクライストロン変調器電源内でフィードフォワード回路を付加するだけでエネルギージッターを半減できる事がわかった。これについては別に報告があるので簡単にふれる。ビーム軌道の制御には現用のBPMシステムではマルチバンチプレクサーを使用しているため非常に時間がかかり支障を来たしているのでシングルショットで読みだせる回路に改造中である。その詳細についても報告する。また、この秋から始まるであろうマルチバンチ運転のためのECSクライストロンシステムの準備およびマルチバンチビーム発生のための電子銃グリッドシステムの準備などについても報告する。

#### 2. ATFリニアックの運転現状

98年6月現在でのATFリニアックの運転状況(表1)はビームエネルギーは1.3GeVであり、繰り返し0.78Hzのシングルバンチ $1.2 \times 10^{10}$ 個をダンピングリングに入射している。リニアック最下流のベンディングマグネット直前では $2.0 \times 10^{10}$ 個を加速しているがダンピングリングへの入射トランスポート系のエネルギーアクセプタンスが全幅1%と狭いので現状では60%程度しかビームを輸送できない状況にある。ダンピングリングで捕獲蓄積されるビームは最初の数ターンでビームロスし $0.8 \times 10^{10}$ 個とさらに落ちている。ダンピングリングの蓄

積電流設計値は $2.0 \times 10^{10}$ 個のバンチを2.8ns間隔で20個というトレインを総計5トレイン蓄積するもので、シングルバンチといえどもまだその設計値までには2.5倍の荷電数を蓄積する必要がある。運転は基本的に月曜日の夕方5時から始めて土曜日の早朝1時まで連続して行ない、次の週はメンテナンスおよびデータ解析にあてるという2週間単位で行なっている。リニアックの昨年からの変更点は、SHBアンプが真空管式の25kWのものに置き換えられた事、位相変調による振幅変調を2台のクライストロンで行なうマルチバンチビームローディングエネルギー補償システムの実験のため1号機と2号機のクライストロン合成システムに変更された事、 $\Delta f$ エネルギー補償システムのための変調器電源が2台必要なところを1台製作され完了した事などである。それ以外は定期的に運転され平均クライストロン出力56MW、rfパルス幅4.5 $\mu$ s、繰り返し25Hzで8本のクライストロンにより平均加速勾配28.7MV/mである。なお、入射部は1本のクライストロンにより出力70MW、1.0 $\mu$ sのrfがSLEDを経由せずに方形波で供給されている。

|           | 現状                                    | デザイン値                         |
|-----------|---------------------------------------|-------------------------------|
| エネルギー     | 1.42 GeV (最高)                         | 1.54 GeV                      |
| 加速勾配      | 28.7 MV/m (最高)                        | 30 MV/m                       |
| 加速荷電数     | 2e10 single<br>8e10 (20multi)         | 2e10 single<br>4e11 (20multi) |
| ビーム繰り返し   | 25Hz (Linac mode)<br>0.78Hz (DR mode) | 25Hz                          |
| エネルギー拡がり  | 0.4% (FWHM)                           | <0.38%(FWHM)                  |
| 正規化エミッタンス | 1.3e-4 at 80MeV                       | <3e-4                         |

表1 ATFリニアックのビーム状況

#### 3. 入射バンチング部の改造

ダンピングリングの小さなアクセプタンス内に現状の約2.5倍の荷電数のビームを入射するために、ビームのエネルギー拡がりを抑さえる必要がある。現在の入射バンチング部はもともと大強度シングルバンチ発生用としてデザインがなされ、その後リニアコライダのデザイ

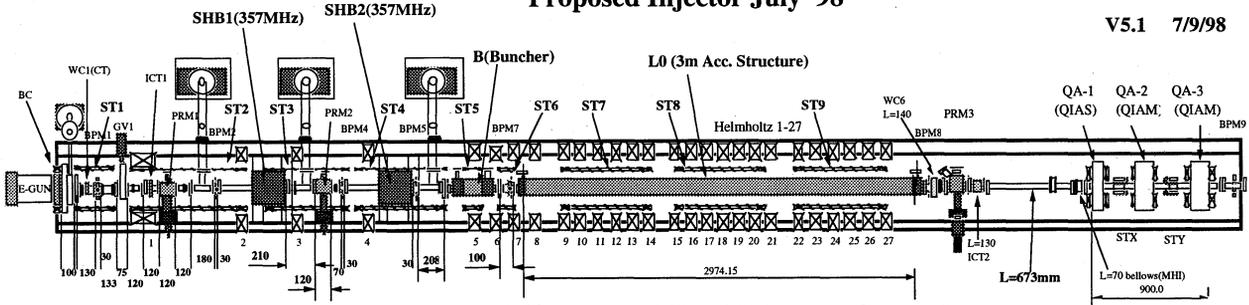


図1 ATFリニアック入射バンチング部の改造後のセットアップ

ン研究が進むにつれてマルチバンチの加速用に変更されつづけていったものであり、予算、時間スケジュール等の諸事情により大規模な変更ができず今日にいたっているものである。今回SLACの協力を得ることでデザイン計算面および予算面、マンパワー的に大きな進歩があり、この夏の改造が実現できる運びとなった。

主な改造点(図1)は電極型チョッパーの撤去によるガンと第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。電極型チョッパーは発生させたマルチバンチの立ち上がり、立ち下がりテールを取り除き矩形のマルチバンチを実現させるために導入試験されてきたものであるが、収束磁場内で偏向角を大きくとれないなどの問題点があったものである。現在では後に述べるようにグリッドパルスに変更を加える事で矩形のマルチバンチを実現できているのでここにきては必要がなくなった。SHBの高電圧運転は昨年やっとアンプのパワー増強が真空管式ではあるもののなされ実現できる状況にある。収束磁場の倍増は現状のコイル間隔を狭め密に並べる事で実現する。

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である(図2)。これは現状でのPARMELA計算値では長いテールを引くがそれがなくなりほとんどの電子を20ps以内に集群できるので加速後のエネルギー拡がりテールをなくす事ができると期待できる。

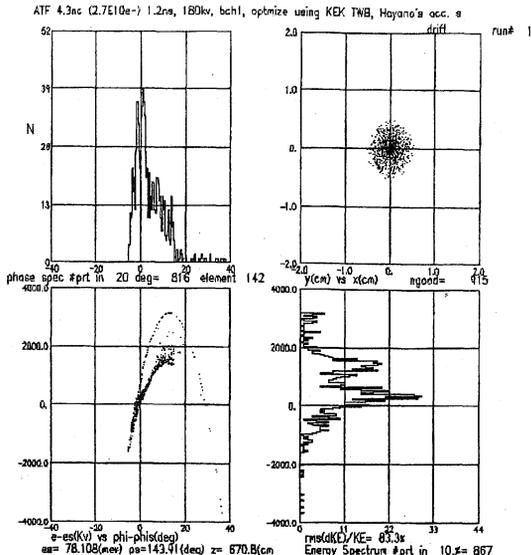


図2 改造後のビーム性能 (PARMELAによる計算値)

#### 4. ビームエネルギー安定化のための諸改造

ビームエネルギー変動は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についてここ1~2年の各種測定により原因が特定できている。ひとつはクライストロン冷却水が一般温調系から取られていたためそのポディー温度が±2℃程度20分周期で変動していた事である。この温度変化はクライストロン内のバンチング空洞の共振周波数を変化させ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することとなった。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[1]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°以上も位相変化を引き起こしていたものである。このファイバーは一部分は昨年のうちに温度安定化ファイバーに取り替えられたが、残りはこの夏に取り替える予定である。しかしながら空調していないことに起因する不安定はクライストロン電圧のドリフトによるrfの振幅ドリフトおよび位相ドリフト、低レベルrf回路で発生する位相ドリフトが原因でおこるrfの位相ドリフトなどがあり、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。これに対してはソフトウェアによるビームエネルギーフィードバックがこの状況を救っている事になる。

長期変動とは別にパルス毎のエネルギー変動もリング入射電流の変動を招いているので、その安定化も必要とされている。相關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關が見られ、さらにそれらは変調器充電電圧変動と相關が見られた。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deQ回路にフィードフォワード回路を付加することでテストした[2]。このテストはうまくいき、図3に示すようにrf振幅ジッターおよび位相ジッターを半減することができた。これは現状の変調器電源を改造することなしにフィードフォワード回路を付加するだけでジッターを半減できるので非常に有望な技術である。

#### 5. BPMシステムの改造

ビームエネルギードリフトがあるときにたとえエネルギーフィードバックが働いていたとしてもリニアック中のビーム軌道がQマグネットからオフセットを持っていると軌道変位が発生しそれによりダンピングリングへのビーム入射角などが変化する。したがって軌道のビームベースアライメントとそれによって得られた軌道の維持は安定な入射のためには欠かせないものである。このよ

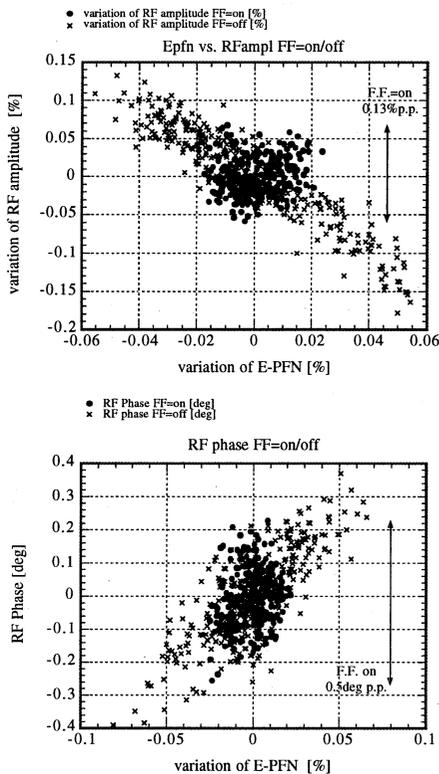


図3 フィードフォワード回路付加による r f 振幅ジッターおよび位相ジッターの低減

うな軌道調整あるいは軌道解析を行なうためには現用の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シングルショット測定ではないのでジッターの影響を取り除く事ができない。マルチプレックス方式をとったのは信号のピークホールドおよびデジタル化回路が高価なためで十分な数の回路を用意できなかったためである。ダンピングリングのBPM回路で実証されたようにパルス積分型回路を使用するとそれが高エネルギー実験で大量に使用されているため回路のコストを大幅に下げることができる。リニアックのBPMもその回路を使用するとシングルショット測定が可能になることが検討の結果わかってきた。ただしダンピングリングの回路をそのまま使用するのはなく、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でデジタイズする(図4)。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1~2 $\mu$ mが得られるものと計算されている。回路変更は8月末までに行なわれ、その後キャリブレーションされて9月末には運転に使用できるようにする予定である。

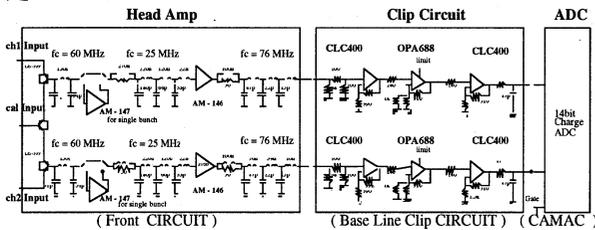


図4 改造後のBPM回路ブロック図

## 6. マルチバンチ運転のための準備

98年12月からマルチバンチシングルトレイン運転が予定されているが、そのためにリニアックとして準備

しなければならない事は、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などである。矩形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(図5)。グリッドバイアスを適当な浅い位置にかければエンハンスされた矩形パルスrf波がグリッドにかかることになり電子銃からのビームは矩形マルチバンチになる。rfアンプの出力側にはBPFを使用しパルス波が出力トランジスターを破壊しないように保護している。このマルチバンチビームを集群させ加速する試験が数回行なわれたが、各バンチ強度に数%のばらつきがあり、未だそれらの強度分布をリニアコライダージン値の1%に収める事に成功していない。今後その原因の究明をし解決を計らなければならない。

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を1台昨年度製作しこの4月から試験運転に入っている[3]。デザインでは2台のdF-ECSクライストロンを使用する予定であったが、当面1台で運転しdF側を使用してエネルギー補償をする予定である。このシステムの実証実験は96年3月までに終了しておりその動作は確認されている。問題はビームモニターを使用するかが焦点となる。当初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する事になるが専用の回路あるいはシステムを開発していかなくてはならない。

## Multi-bunch Beam Generation by Thermionic Gun

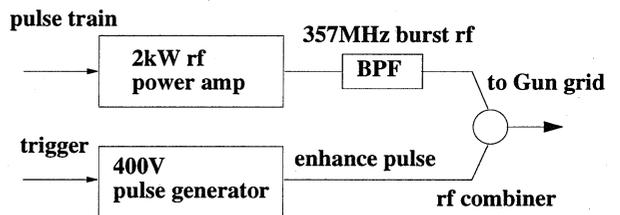


図5 バーストグリッドパルスによる矩形パルスマルチバンチの生成

## 7. 今後の課題

ATFリニアックの今後の方向はビーム安定化が第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。デザイン値の達成はそれほど問題なくできるであろうと考えられるのでそれに大きな重点を置く必要はないであろう。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。変調器フィードフォワードはひとつの解を与えるものであり、入射バンチング部でのビーム安定化もさらに重要であると考えている。これらの諸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ジン値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。

## 8. 参考文献

- [1] T. Naito et al.:ATFリニアックの光伝送システムの特性;Proc. of 23th Lenea Accelerator Meeting in Japan(1998)
- [2] D. Aizawa et al.:フィードフォワード回路によるクライストロンRFの安定化;Proc. of 23th Lenea Accelerator Meeting in Japan(1998)
- [3] S. Morita et al.:インバーター電源を用いたクライストロン変調器の試験運転;Proc. of 23th Lenea Accelerator Meeting in Japan(1998)