

Status of ATF Linac

Seishi Takeda, Hitoshi Hayano, Takashi Naito,
 Shigeru Kashiwagi¹, Toshiyuki Okugi², Tomohiro Sakamoto³,
 Junji Urakawa, Nobuhiro Terunuma, Kiyoshi Kubo, Katsunobu Oide, Nobu Toge,
 Timo Korhonen, Cristoph Montag, Yoshisato Funahashi, Sakae Araki, Nobuhiko Sato,
 Mikio Takano⁴, Seiki Morita⁵, Takaaki Matsui⁵, and Toshiyuki Ishii⁶

National Laboratory for High Energy Physics, Oho 1-1, Tsukuba 305

¹Department of Accelerator Science, School of Mathematical and Physical Science,

The Graduate University for Advanced Studies, Oho 1-1, Tsukuba 305

²Faculty of Science, Tokyo Metropolitan University, Hachioji 192-03

³Department of Applied Physics, Tohoku-Gakuin University, Tagajo 985

⁴Faculty of Science, Toho University

⁵E-cube Ltd., Hanabatake, Tsukuba 305

⁶Kanto-Joho Service Corporation, Tsuchiura 300

ABSTRACT

The Accelerator Test Facility (ATF) has been constructed in order to produce multi-bunch electrons with vertical beam emittance of 5×10^{-8} mrad for linear collider studies. The ATF consists of a 1.54 GeV Injector Linac, beam transport line, 1.54 GeV damping ring, and beam extraction line. The injector linac supplies a train of multi-bunch beam of 20 bunches with 2×10^{10} electrons/bunch and 2.8 ns bunch spacing. The beam commissioning of the damping ring was held at the end of January 1997. The beam experiments have been performed by the international collaboration with SLAC, DESY, PLS, IHEP, BINP and CERN.

ATF リニアックの現状

1. はじめに

1995年11月22日にビームコミッショニングを迎え、その後ダンピングリング建設のために運転停止中であったATFリニアックは、ダンピングリングの建設が一段落した1996年12月末にRFプロセッシングを再開し、翌1997年1月から運転を再開した。そしてダンピングのビームコミッショニングを1997年1月23日に迎えることになった。その後、SLAC、DESY、PLS、IHEPから総勢約20名の共同研究者が次々と参加してダンピングリングのビーム実験が進められた。またリニアックのビームを利用した加速管BPMの実験がBINPとの共同研究として行われた。7月19日から9月16日までの夏期保守期間として現在運転が停止されている。

リニアックの運転期間は毎週火曜日の17:00から翌週の月曜日9:00までである。一般に放射光リングへの入射リニアックはリングへのビーム入射を連続的に行わない。しかし、ダンピングリングの場合は、ダンピングリング運転中長時間にわたって連続してビーム入射しなければならない。約7ヶ月にわたる連続運転で

リニアックの高安定化の要求がでてきた。毎週の短期保守期間に調査を行い、夏期保守期間にこれらの技術的解決を試みている。

2. Accelerator Test Facility (ATF)

JLC Accelerator Test Facility (ATF) は 1.54 GeV Sバンド電子リニアック、ビームトランスポート系、1.54 GeV ダンピングリング、ビームエクストラクション系から構成されており、将来はバンチコンプレッサーや主リニアックのユニットを設置して、ダンピングリングで生成された超低エミッタンスマルチバンチビームの加速試験を行う予定である。

JLCのダンピングリングのエネルギーは1.98 GeVであるが、ATFではJLCで必要とされるビームエミッタンスが達成でき、かつ既存のスペースに建設可能なエネルギー1.54 GeVで設計された。

2-1. 1.54 GeV ダンピングリング

JLC-I では、 $10^{33} \sim 10^{34} / \text{cm}^2 \text{ s}$ の高いルミノシティ

を達成するために、電子・陽電子のバンチを衝突点で垂直方向 3 nm、水平方向 300 nmまで最終収束系で絞り込む。そのために、ダンピングリング内で垂直方向で 5×10^{-8} mrad、水平方向で 5×10^{-6} mradの規格化エミッタンスを実現しなければならない。1.54 GeV ATFダンピングリングは、JLC で必要とされる超低バーティカル・ビームエミッタンスで且つ大電流のマルチバンチ電子ビームを生成試験するものである。ATFダンピングリング内で常時周回しているバンチのトレイン（集団）数は5個で、1つのトレインは20個のマルチバンチで構成されている。バンチ間隔は2.8 nsであり、バンチ内の最大電子数は 2×10^{10} 個（3.2 nC に相当）である。ダンピングリングは25 pps の繰り返しで20個のバンチをエクストラクションするので、リニアックはダンピングリングに25 pps の繰り返しで20バンチを入射しなければならない。

3. 1.54 GeV ATF 入射リニアック

1.54 GeV リニアックは80 MeV プリンジェクター・リニアック、8台のRFユニットからなるS-バンドリニアック、マルチバンチエネルギー補償システム（ECS）で構成されている。

3.1 80 MeV プリンジェクター・リニアック

SLC で加速される最大電子数は単バンチで 5×10^{10} 個である。ATF リニアックでは最大 2×10^{10} 個の20バンチを2.8 ns バンチ間隔で加速しなければならない。さらにバンチ毎の電子数のばらつきを $\pm 1\%$ 以内にするために、熱陰極電子銃システムにマイクロ波を利用したグリッドパルサーを用いる。電子銃で発生するパルス電子ビームをバンチ状に圧縮するために、基本周波数の8th サブハーモニックに相当する357 MHz でドライブする2台のSHB（サブハーモニックバンチャー）を用いている。SHB 内での過渡的ビームローディングに起因するマルチバンチ間のバンチング効果の変動を減少するために、これらのSHBは低R/Q型を採用した。バンチャーは4台の2.856 MHz 単空洞システムを将来用いるが、現在は2.856 MHz のTW型バンチャーを用いている。1本の3m長CG型加速管にピーク出力60 MW（最大95 MW）、パルス幅1 μ のRFをE3712型クライストロンから供給して、マルチバンチを80 MeV（最大105 MeV）まで加速する。またマルチバンチのバンチ毎の特性が計測できる各種のビームモニターが設置されていて、バンチ波形、バンチ内電子数、バンチの位置、バンチプロファイル、バンチエネルギー、バンチのエネルギー分布、バンチエミッタンスがショット毎の情報として得ることができる。

3.2 S-バンド・リニアック

E3712型クライストロンで発生した80 MW、4.5 μ s のパルスRFをSLEDシステムで1 μ s までパルス圧縮して400 MWのピーク出力を得て2台の加速管に供給する。加速管の1フィリングタイムである0.83 μ s 後には、加速管内に52~38 MV/mの加速電界が発生しこのときの平均加速勾配は、零電流で約40 MeV/mである。8台のRFユニットで1.54 GeVのビームエネルギーが得られる。

クライストロン変調器は1987~94年度にかけて開発してきたので異なった形式の集合になっている。大別すると、2台の独立直流電源方式と7台の集中電源方式、そして2台のマルチバンチエネルギー補償（ECS）用変調器である。

リニアックシステムの架台の位置を検出するためのワイヤーアラインメント方式が開発された。そして架台にはムーバーが設置されており、加速管架台やQ電磁石架台を水平、垂直方向に遠隔操作で微動させることができる。その結果加速管、Q電磁石やビームモニターを直線に対して $\pm 50 \mu$ m以下にアラインメントでき、またビーム軌道に沿って加速器コンポーネントの軸をアラインメントするビームベースド・アラインメントも可能である。

過渡的ビーム・ローディングによるマルチバンチ間のエネルギーの違いを補正するために、 $2856 + 4.327$ MHzと $2856 - 4.327$ MHzで設計された加速管1本づつをリニアックに設置してある。これらの加速管内の加速電場の位相速度は光速であるが、波長は基本周波数の波長とわずかに異なる。そのためにマルチバンチの最も高いエネルギーを有する先頭バンチを減速位相に乗せ、最も低いエネルギーを有する最終バンチを加速位相に乗せることができる。その結果、マルチバンチのエネルギー分布は、補償しない場合の5%から0.2%まで圧縮される。但し単バンチ内電子のエネルギー分布は約1%である。

4. リニアックの現状

昨年夏から行われた主な項目について述べる。

4.1) リニアック制御システムのアップグレード

リニアックをダンピングリング入射用として用いるために、リニアックの制御システムのアップグレードが行われた。従来のVT端末ベースのインターフェースから、ダンピングリングと同じくグラフィックインターフェースを組み入れた分散型データベース機能を持つVsystemを採用した。開発され使用されてきた制御プログラムの入出力部をグラフィックインターフェースに変更した。ビームエネルギーを安定化させるためのフィードバック等の機能を持たせたが、今後もフィードバック等複雑な処理やオンライン解析機能の充実を計っていく。

4.2) 変調器

サイラトロンが充電中にミスファイアして Over Current に至る現象が 1 日数回発生する。7 台の変調器は共通の直流電源と接続されているため、共振した高電圧が導通サイラトロンに印加する。そのため 7 台の変調器は一番不安定なサイラトロンを保護できる電圧レベルで運転しなければならず、当初ビームエネルギー 1.0 GeV でダンピングリングへの入射が行われた。共振電圧を下げる回路やその他の保護回路を追加した後、1.4 GeV で連続運転が可能になった。9 月からは 1.54 GeV 運転の予定である。サイラトロンのミスファイアの原因は色々調査したが現在のところ明らかになっていない。調査中である。

4.3) SHB アンプ

バンチ強度を増加させるとバンチ長が増えて、バンチテールの低エネルギー成分が増加する。これがオプティックスのアクセプタンスの範囲外に存在しビームの透過率を下げる原因となる。これは SHB を低 r/Q 型に変更したため、バンチ強度を増加させると SHB 内でビームの空間電荷効果が高まり、バンチングが十分にされていないと考えられる。夏期保守中に 5kW 半導体アンプを 30kW 真空管アンプに変更することで解決する予定。

4.4) リニアックの高安定化

a) 室温変化

空調の無い変調器ギャラリー内では、室温が冬季早朝で数℃まで下がり、夏期には約 40℃まで上昇する。1 週間の運転期間を通じては、24 時間周期で約 5℃の室温変化をし、これが加速周波数基準信号分配系に使用されている光ファイバーケーブルに対して伝送ライン 1 系統当たり約 15 度の位相変化を生じさせていることが判明した。

b) 冷却水温度変化

加速管は 0.1℃の高安定化された冷却水を用いているが、クライストロン冷却水が 25 分周期で 5℃変化して、そのため rf パルス振幅で約 1%、パルス位相で 5 度の短期変動を生じさせている。これらの問題点は空調施設の設置と冷却設備の改善で解決されるが、予算の都合でフィードバックによるエネルギー安定化を行っている。

c) ビーム・エネルギー安定化・フィードバック

リニアック最下流において、BT ラインへ偏向後 BPM でビームエネルギーを測定し、最終加速管への RF タイミングをフィードバックすることで、BT へのビームエネルギー変動を 0.1% 以下に制御している。

d) パルス毎のジッター

deQ 回路を使用しても、クライストロン rf パルス

のパルス毎のジッターを皆無にすることはできない。パルス毎の変動と PFN の充電電圧に相関があるとき、フィードフォワード方式で制御が可能になる。測定の結果、充電電圧 ±0.05% のパルス変動と、出力 rf 振幅 ±0.2% のパルス変動に相関が見られた。また充電電圧 ±0.07% のパルス変動と、出力 rf 位相 ±0.75% のパルス変動に相関が見られた。その結果、サイラトロンがファイアする 1 ms 以前に充電電圧を測定して、位相を予測し、パルス rf 振幅の変動を予測することで、位相にフィードバックをかけるフィードフォワード制御の準備を現在行っている。

4.5) ±Δf マルチバンチエネルギー補正システム

B-Factory リニアックから 2 台のクライストロン変調器を借用して、マルチバンチのエネルギー補償 (ECS) 実験を行った。マルチバンチのエネルギー分布をダンピングリングアクセプタンス以内に圧縮できることを確認した。借用中の変調器に代わるクライストロン変調器を現在開発中である。

4.6) ΔT マルチバンチエネルギー補正システム

SLED は rf パルス圧縮装置として小型で実績がある。ATF リニアックでは ±Δf マルチバンチエネルギー補正システムが用いられているが、加速管出口毎ではマルチバンチにエネルギー幅を有する欠点がある。ΔT 方式は 2 台のクライストロンを合成して SLED への入力位相ベクトルを時間的に制御し、SLED から出力される rf パルス波形を調整する。パルス先端部分のパワーを下げることで、ビームローディングをキャンセルでき、加速管出口毎にマルチバンチのエネルギーを一定にできる。この方式の可能性の試験がリニアックの一部を利用して行われている。

References

- [1] H. Hayano, et al., "Beam Energy Feedback of ATF Linac", Proc. of this meeting.
- [2] T. Sakamoto, et al., "Klystron RF Stabilization at ATF Linac", Proc. of this Meeting.
- [3] N. Terunuma, et al., "Upgrade of the ATF Linac Control System, Proc. of this Meeting.
- [4] T. Naito, et al., "Loss Monitor for ATF", Proc. of this Meeting.
- [5] S. Kashiwagi, et al., "ΔT Multi-bunch Beam Energy Compensation", Proc. of this Meeting.
- [6] T. Okugi, et al., "Orbit Measurement by Changing the Strength of Quadrupole Magnets in ATF BT Line", Proc. of this Meeting.