

Status of ATF Linac

Seishi Takeda, Junji Urakawa, Hitoshi Hayano, Takashi Naito, Katsunobu Oide, Nobuhiro Terunuma, Kiyoshi Kubo, Fujio Hinode, Timo Korhonen, Yoshisato Funahashi, Sakae Araki, Nobuhiko Sato, Shigeru Kuroda, Toshihiro Mimashi, Shogo Sakanaka, Hiroshi Matsumoto, Yasuki Takeuchi, Mitsuo Akemoto, Hideo Hirayama, Yoshihito Namito, Mikio Takano¹, Shigeru Kashiwagi², Toshiyuki Okugi³, Shinji Kagaya⁴, Tomohiro Sakamoto⁴, Seiki Morita⁵, Takaaki Matsui⁵, and Toshiyuki Ishii⁶

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

¹Faculty of Science, Toho University

²Department of Accelerator Science, School of Mathematical and Physical Science,

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

³Faculty of Science, Tokyo Metropolitan University, Hachioji 192-03

⁴Department of Applied Physics, Tohoku-Gakuin University, Tagajo 985

⁵E-cube Ltd., Hanabatake, Tsukuba 305

⁶Kanto-Joho Service Corporation, Tsuchiura 300

ABSTRACT

The Accelerator Test Facility (ATF) is under construction in the TRISTAN Assembly Hall in order to produce multi-bunch electrons with vertical beam emittance of $5\text{\AA}^{-1-8}\text{mrad}$ 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 $2\text{\AA}^{-10^{10}}$ electrons/bunch and 2.8 ns bunch spacing. The construction of the linac was completed except two klystron modulators for the energy compensation system. The beam commissioning was held at the end of November 1995. A single bunch and multi-bunch beam were accelerated up to 1.3 GeV to the end of beam transport line. The beam experiments on a high gradient acceleration and multi-bunch energy compensation for the transient beam loading have been performed. The construction of the damping ring will be completed by the end of 1996. The beam commissioning of the damping ring will be in January 1997.

ATF リニアックの現状

1. はじめに

重心系300~500 GeVのJLC-Iを建設するための基礎的開発研究が5ヶ年計画として1987年から1991年にかけて行われ、さらに第二次3ヶ年計画(1993~95)が進められた。その間、開発された加速器コンポーネントからなる総合システムの機能試験ができるJLC Accelerator Test Facility (ATF)の建設が進められ、1.54 GeV Sバンドリニアックの建設は一部を除きほぼ完了し、1995年11月末にビームコミッショニングを迎えた。1996年末の完成を目指して現在Damping Ringの建設中である。

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-I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-I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 $5\times 10^{-8}\text{mrad}$ 、水平方向で $5\times 10^{-6}\text{mrad}$ 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 ダンピングリングは、JLCで必要とされる超低パーティカル・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 の繰り返して 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 の繰り返して 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 プリインジェクター・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 プリインジェクター・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 単空洞システムが製造中で、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

既存の建屋内に建設された ATF リニアックにおいて、リニアックの総全長を 80 m 以内に抑えるために、ビームローディングを含めて加速管内で 33 MeV/m の加速勾配を達成しなければならない。そのためには、約 200 MW の入力ピークパワーが必要となる。そこで JLC の S-バンド用として開発された E3712 型 100 MW 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 52~42 MV/m の加速電界が発生する。このときの平均加速勾配は、零電流で約 45 MeV/m、ビームローディングを含めると約 40 MeV/m である。従ってクライストロン+SLED+3m 長加速管 2 本の 1 RF ユニットでの最大エネルギーゲインは約 240 MeV である。1.54 GeV まで加速する場合に必要なとされるクライストロンの平均出力は、8 台の全 RF ユニットが稼働できる状態で約 60 MW で、このときの平均加速勾配は 33 MeV/m である。

加速管は真空ロー付法で製造された、 $2\pi/3$ モードの定勾配進行波型加速管を採用した。高加速勾配でのダーク電流を減少させるために、材料として HIP 加工した OFHC 銅を採用した。プロセッシングに必要な時間は、SLED で約 300 時間、加速管で約 300 時間、トータルで約 600 時間である。

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メントするビームベースド・アライ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. ビームコミッショニング

SLED 空洞や加速管の RF プロセッシングが完了していない状態で、1995 年 11 月 22 日に、ATF リニアックのビームコミッショニングを行った。80 MeV プリインジェクターのビームエミッタンスをまず最初に測定し、

これを「SAD」コードに入力し、その結果に従ってリニアックのオプティクスを設定した。8台のRFユニットのRFパルス出力とBPM信号として得られるビームのタイミングの調整を行い、RF位相に関してはビーム透過率を測定して最適位相に調整した。当時BPMのエレキの台数が完備していなかったため、オービットに関しては、ビームプロファイルモニターを利用して調整した。ビームがリニアック下流にまで到達した段階で、RFパルスとビームのタイミング、並びにRF位相を最大のビームエネルギーが得られるように微調整した。その結果、電子数が 1×10^{10} 個の単バンチを1.3 GeVまで加速することに成功した。この時の平均加速勾配は25.5 MeV/mであった。測定された単バンチのエネルギー分布は、FWHMで1%で、規格化エミッタンスは 2×10^{-4} mradであった。続いてバンチ内電子数が 1×10^{10} 個の6個のマルチバンチ加速に成功した。さらにバンチ内電子数を 2×10^{10} 個まで増加したが、リニアック最下流におけるビーム透過率は 1×10^{10} 個以上で60%にまで減少した。その後の実験で、バンチ強度を増加させるとバンチ長が増えて、バンチテールに存在する低エネルギー成分の電子がオプティクスのアクセプタンスの範囲外に存在していることが明らかになった。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、バンチングが不十分になるのが原因であると考えられる。ビームコミッションの後、RFプロセッシングを再開したが、集中電源方式のクライストロン変調器のオーバー電流によるトリップが多発して電圧を上昇できず、ビームのエネルギー換算で、1.3~1.4 GeVで運転を続行した。ビームコミッション後1996年2月末までに、JLCのための大学との共同研究実験が進められた。東北学院大とビームベースド・アラインメント実験と加速管BPM実験、東京都立大と偏極陽電子発生基礎実験と高加速勾配リニアックにおけるダーク電流実験、横浜国大とマルチバンチエネルギー補償実験、京大とワイヤーモニター用 γ 線検出器の開発実験である。さらにKEK所内では放射線安全管理センターと200 MeVから1.3 GeVでの中性子のTOF実験、国際的には、ロシアプロトビーノのBINPと14 GHz加速管での加速管-BPMの実験が行われ、それぞれ有意義な実験結果を得ることができた。1996年3月にBPMのマルチプレクサーを含めたエレキが一部完了したので、ビームチューニングを再開した。BPMによって計測された位置を「SAD」で校正した結果、ビームチューニングが簡略化され、またそれに要する時間が短縮され、この方法によるルーティンオペレーションが続けられた。6月に入り、ダンピングリングの組立作業が本格化し、リニアックに関しては主として変調器等の改造、B-Factoryリニアックから借用

しているECS用変調器の立ち上げ等が行われた。現在ニュートリノ振動実験のための初期工事のため運転は停止中であるが、工事が完了し、放射線管理区域の変更が行われる本年10月にリニアックの運転を再開する予定である。

まとめ

1.54 GeVリニアックのビームコミッションはRFプロセッシングの途中であったが、1995年11月末に行われた。そこで単バンチとマルチバンチビームが加速され、各種ビームモニターによるビーム特性が計測された。その後、ビームは大学との共同研究で、加速器研究開発のための実験に利用された。現在ダンピングリングが建設中であるため、1997年1月のダンピング・ビームコミッションに向けてリニアック周辺機器の改造中である。

References

- [1] T. Okugi, et al., "The Study of Transmission Efficiency in ATF Linac", Proc. of this meeting.
- [2] S. Morita, et al., "Modulator Operation in ATF Linac", Proc. of this Meeting.
- [3] M. Kagaya, et al., "Study of Beam-based Alignment for Accelerator Structure", Proc. of this Meeting.
- [4] S. Kashiwagi, et al., "Multi-bunch Beam Energy Compensation for ATF Linac", Proc. of this Meeting.
- [5] H. Hayano, et al., "BPM System of ATF Linac", Proc. of this Meeting.
- [6] M. Takano, et al., "Fine Alignment of Magnets on Mover Table for ATF Damping Ring", Proc. of this Meeting.
- [7] T. Sakamoto, et al., "The Beam Stabilization at ATF Linac", Proc. of this Meeting.
- [8] T. Naito, et al., "Timing System of ATF", Proc. of this Meeting.
- [9] T. Korhonen, et al., "Computer Control System of the ATF Linac", Proc. of this Meeting.
- [10] K. Dobashi, et al., "Backgrounds of Dark-Current in the ATF High Gradient Linac I -Simulation-", Proc. of this Meeting.
- [11] K. Sugiyama, et al., "Backgrounds of Dark-Current in the ATF High Gradient Linac II -Measurement-", Proc. of this Meeting.