

20a-2

1.54 GeV ATF INJECTOR LINAC FOR JLC

Seishi Takeda, Mitsuo Akemoto, Hitoshi Hayano,
Timo Korhonen*, Takashi Naito, Hiroshi Matsumoto
KEK, National Laboratory for High Energy Physics
Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

ABSTRACT

The Accelerator Test Facility (ATF) is under construction in the TRISTAN Assembly Hall to produce multi-bunch electrons with vertical emittance of 3×10^{-8} mrad. The ATF consists of a 1.54 GeV injector linac, beam transport line, 1.54 GeV damping ring, bunch compressor, final focus system and positron target test-stand. The injector linac consists of a 80 MeV pre-injector linac, accelerating linac and energy compensation system. The accelerating gradient of 33 MeV/m is produced at 200 MW input power. The linac accelerates 20 bunches of electrons with bunch separation of 2.8 ns. The accelerating structures, beam monitors and Q-magnets are aligned within ± 50 μ m by active alignment system. The energy spectrum of multi-bunch is compressed to ± 0.16 % by the energy compensation system.

1.54 GeV JLC-ATF 入射リニアック

1. はじめに

重心系300～500 GeVのJLC-Iを建設するためには、従来の1桁から2桁上廻る加速器技術を達成しなければならない。そのため加速器のパラメータの最適化、加速器の各コンポーネントの開発研究がJLC R&D 5ケ年計画として1987年から1991年にかけて行われた。1992年には、5ケ年計画の総まとめが行われ、1993年1月に高エネルギー委員会に対して報告された。その結果、重心系エネルギー300～500 GeVのJLC-Iの早期建設をめざした第2次R&D 3ケ年計画(1993～95)が認められ、現在この計画が遂行されている。この計画の目標は、実機に使用する加速器コンポーネントの開発を、大量生産を考慮したレベルでさらに進めることである。そして、5ケ年計画で開発された加速器コンポーネントの総合的システムとしての機能が試験できるJLC Accelerator Test Facility (ATF)の建設を最重点課題として遂行することが認められた。

2. Accelerator Test Facility (ATF)

JLC Accelerator Test Facility (ATF)は、1.54 GeVの電子リニアック、ビームトランスポート系、1.54 GeVダンピングリング、バンチコンプレッサー、最終収束系、陽電子ターゲット試験装置から構成されている。将来は、JLCに使用される主リニアックのユニットを設置し、ダンピングリングで発生される低エミッタンスビームの加速試験を行う予定である。

1.54 GeVダンピングリング入射リニアックは、ダンピングリングの要求を満たすことと、既存のスペースに建設することを目標に設計された。

2-1. 1.54 GeV ダンピングリング

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発生試験するものである。実機JLCでは、 $10^{33-34}/\text{cm}^2\text{s}$ の高いルミノシティを達成するために、電子と陽電子のバンチを縦方向3 nm、横方向300 nmまで最終収束電磁石で絞り込む。そのためには、ダンピングリング内で、

縦方向で 5×10^{-8} m rad、横方向で 5×10^{-6} m radという従来のリングの1～2桁小さい規格化エミッタンスを実現しなければならない。ATFダンピングリングは上記のエミッタンスを実現することを目的とする。ダンピングリング内常時周回しているバンチのバッチ(集団)数は5個で、1つのバッチは20個のマルチバンチで構成されており、バンチ間隔は2.8 nsである。バンチ内最大電子数は 2×10^{10} 個(3.2 nC)である。ダンピングリングは、25 ppsの繰り返しで20個のバンチを出射するので、リニアックはダンピングリング内に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 ATF入射リニアックは、ダンピングリングの要求に従って設計されたが、従来のリニアックのリニアックには採用されていない新しい試みがなされている。それについての概要を述べる。

4. 80 MeV プリインジェクター・リニアック

4-1. 大電流マルチバンチ加速

SLCで加速できる最大電子数は、単バンチで 5×10^{10} 個(8 nC)である。ATF入射リニアックでは最大 2×10^{10} 個(3.2 nC)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。さらにバンチ間における電子数のバラツキを ± 1 %以内に抑えなければならない。これらの条件を満たすビームを発生させるために、次の電子銃システムの開発が行われた。

4-2. 熱陰極型電子銃システム

マイクロ波を利用したグリッドバルサーを用いて、2.8 ns間隔で、パルス幅1 nsの20パルスを発生させ、グリッド付電子銃を制御して、最大ピーク電流3 A、パルス幅1 nsの20パルスビームを発生させる。熱陰極にはEIMAC Y646Eを採用し、ウェーネルト、並びにアノード形状はEGUNコードを用いて決定した。最大引加電圧240 kVの電子銃電源はPFNを用いたパルス方式を採用している。

4-3. マルチ単空洞バンチャーシステム

マルチパルスビームは、基本周波数の 8th サブハーモニクに相当する 357 MHz でドライブする SHB (サブハーモニクバンチャー) 2台を利用して、プリバンチャーのアクセプタンス内にまでバンチングさせる。従来のリニアックで採用されているプリバンチャーやバンチャーに比較してビームローディングが減少できるマルチ単空洞システムをバンチャーとして用いる。4台の 2.856GHz 単空洞はビームローディングを減少させる構造を持ち、それぞれ独立してマイクロ波の位相、入力パワーが調整できるので、最適なバンチングを行うことができる。

4.4. 加速管

1本の 3m 長加速管に、100MW、1 μ s を E3712 型クライストロンからフィードして、マルチバンチビームを 80 MeV (最大 105 MeV) まで加速する。

5. 高電界加速

1.54 GeV のリニアックを、トリスタンアッセンブリーホールという既存の建屋内に設置したので、電子銃やバンチャーセクション、そして収束系やビームモニター等を含めたリニアックの総全長は 80 m である。これを実現する唯一の方法は、加速管内に 33 MeV/m 以上の高電界を発生させることである。

高電界発生の限界は、加速管内での RF 放電、並びに暗電流の強度で決定される。0.6 m 長の S-バンド加速管を用いて、高電界発生と暗電流に関する研究を行い、これまでに加速管への入力パワーが 170 MW 時に最大 93 MeV/m の加速勾配の発生に成功した。

5-1. RFシステム(クライストロン+SLED)

33 MeV/m の高加速勾配を 3 m 長加速管内に発生させるためには、約 200 MW の入力ピークパワーが必要である。このピークパワーが発生できるクライストロンは、現在のところ存在しない。そこで、JLC の S-バンドリニアック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 のパルスを SLED システムで 400 MW、1 μ s を発生させ、2台の加速管にフィードさせる。

400 MW ピークパワーを得るために、導波管の側壁と空洞を 2 個のアイリスをかいてカップリングさせる新しい方式の SLED システムが開発された。80 MW、4.5 μ s を SLED 空洞に入力し、後半の 1.0 μ s で位相を 180° 反転させ、ピークパワー 400 MW、パルス幅 1 μ s を空洞から出力させる。これを 2 分割して 2 本の 3 m 長加速管内に、それぞれ 200 MW を入力する。1 ユニットに関して RF プロセッシングを行ったが、400 MW を SLED で発生させ、加速管内に 52~42 MV/m の加速電界を発生させることに成功した。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 40 MeV/m で、エネルギーゲインは、クライストロン+SLED+3m 長加速管 2 本のリニアック 1 ユニットで 240 MeV が得られた。

5-2. 加速管

加速管は真空ロー付法で製造された、 $2\pi/3$ モードの進行波型定勾配加速管を採用した。加速管の高周波スペックは第 5-2 表に示す。

表 5-2. 3 m 長加速管の主なスペック

Phase Shift/Cell	$2\pi/3$	Constant Gradient
Structure Length	3.0 m	
Resonant Frequency f	2856 MHz	
Quality Factor Q	13,000	
Shunt Impedance r	60 M Ω /m	
Attenuation Parameter t	0.57	
Peak Surface Electric Field (Es) / Axial Electric Field (Ea)	1.9 ~ 2.1	
Average Group Velocity vg/c	0.012	
Filling Time Tf	0.83 μ sec	

加速勾配 33 MeV/m を加速管内に発生させる場合、暗電流をできるだけ最小にするため次の点に留意した。

- (1) 加速管材料に HIP 加工 OFHC 銅を使用。
- (2) RF 電子銃にならないカップラー設計
- (3) 加速管内に外部から塵等が混入しないこと。

不純物が少ない材料として、日立クラス 1 OFHC 銅を HIP (Hot Isostatic Press) 処理し、内部の材料内に気孔を除去した。これで真空炉内でロー付後、気孔内に残留したマシンオイルが炭化し暗電流源になるのを防止する。

ディスクおよびシリンダーの表面粗度は夫々、平坦部で 40 nm、ビームホールの R 部で 200 nm 以下で加工した。カップラー部の詳細な設計を MAFIA 3 次元計算機コードを用いて行い、一切の手作業による加工なしで高精度に製作することが可能となった。NC による高精度加工は、従来に比べて良好な位相特性、入力マイクロ波特性が得られる結果となった。従来の 3 m 長加速管においては、累積位相誤差は $\pm 2.5^\circ$ 程度であるが、本加速管では $\pm 0.5^\circ$ 以下が達成されている。暗電流源になる、ダストや誘電体が加速管内に外部から混入しないように、製作の初期段階から内部の清浄度を確保するための工程管理を厳密に行った。以上の結果、ダーク電流の減少並びに、RF プロセッシング時間短縮の良い結果が得られた。平均ダーク電流は、最大加速勾配が 48 MeV/m、25 pps 運転時で 12 nA であった。加速管の RF プロセッシングに要する時間は、2 回の乾燥窒素パージを行った場合でも、約 150 時間で 80 MW 入力が可能となった。また SLED を含めた加速管の RF プロセッシングに要する時間は、慎重に行った結果、SLED は約 300 時間を費やし、加速管は約 300 時間で 200 MW 入力に達した。

5-3. コンパクト・クライストロン変調器

1987 年より 200 MW クライストロン変調器の開発を行ってきた。今回、小型コンデンサーの開発に成功し、PFN の小型化が実現できた。その結果、クライストロン変調器のサイズは従来にくらべて容積比で 1/3 以下にまで小型化でき、JLC のクライストロンギャラリー用トンネルのスペースを有効活用できることになった。

今回開発された変調器には、サイラトロンの寿命延長を実現するためのコマンド充電方式、テイルクリッパー回路が追加された。また deQ'ing 損失のエネルギーリカバリーを簡単な回路で実現した。

6. アクティブ・アラインメント・システム

リニアックシステムはアクティブアラインメントシステムが設置されており、ワイヤーアラインメント方式を開発して加速管、Q 電磁石やビームモニターを計算機制御で $\pm 50 \mu$ m 以下にアラインメントできる。

7. ビーム・ベースドゥ・アライメント

加速中のバンチがリニアック軸上を加速されるように、アクティブアライメントシステムを利用してリニアックのアライメントを計算機制御で行うことを試みる。

8. ビームモニター

ATFリニアックで開発されたビームモニターは、2.8 nsの間隔で通過する20バンチの各々に関するバンチの位置、プロファイル、強度、並びにエミッタンスを計測するもので、ビーム・ベースドゥ・アライメントに欠かせないものである。

9. マルチバンチエネルギー補正装置

リニアックにおけるビームローディングはリニアック特有のもので、本質的にこれを回避することはできない。マルチバンチのエネルギー補正は、入射タイミングの調整や、ダイポール電磁石と加速ユニットを組合せた ECS 装置が従来から利用されてきた。ECS装置ではバンチのエネルギーの違いを、バンチ間隔の違いに変更して、加速ユニット内で異なった位相で加速することで補正する。バンチ間隔の変更は、ダンピングリングでは許されないため、RFを用い

たマルチバンチエネルギー補正装置が考案開発された。この方式は、マルチバンチ間エネルギーを±0.2%までに補正できるので、JLCだけでなく、バンチ間隔が変更できない FELリニアックにも応用できると思われる。

10. まとめ

最大 150 MeV のプリインジェクターは既に建設が完了して、ビーム加速実験が行われている。他のユニットの建設は1995年3月に終了予定で、1.54 GeVのビームコミッションは1995年夏ごろを予定している。

References

- [1] H. Matsumoto, "High power test of an S-band Accelerator unit for JLC", Proc. of this meeting.
- [2] S. Morita, "RF processing of an S-band high gradient accelerator unit", Proc. of this meeting.
- [3] M. Akemoto, "Klystron modulator development for ATF linac", Proc. of this meeting.
- [4] T. Asaka, "Wire scanner system of ATF linac", Proc. of this meeting.
- [5] H. Hayano, "Wire alignment system for ATF linac", Proc. of this meeting.
- [6] T. Naito, "Beam profile measurement by OTR monitor", Proc. of this meeting.

ACCELERATOR TEST FACILITY FOR JLC

