

1.54 GeV ATF Damping Ring Injector Linear Accelerator

Seishi Takeda, Mitsuo Akemoto, Junji Urakawa, Katsunobu Oide,
Takashi Naito, Hitoshi Hayano and Hiroshi Matsumoto
KEK, National Laboratory for High Energy Physics
Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

Masashi Yamamoto
The Graduate University for Advanced Studies
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 of electrons with ultra-low beam emittance. The ATF consists of a 1.54 GeV linac, beam transport line, 1.54 GeV damping ring, bunch compressor, final focus system and positron target test-stand. The 1.54 GeV linac consists of a low energy injector linac, accelerating linac and energy compensation system. The accelerating gradient of 33 MeV/m is produced at 200 MW input power. The 1.54 GeV linac accelerates 20 bunches of electrons with bunch separation of 2.8 ns. The accelerating structures, beam monitors and Q-magnets are aligned within $\pm 100 \mu\text{m}$ by active alignment system. The energy spectrum of multi-bunch is compressed to $\pm 0.16 \%$ by the energy compensation system

1.54 GeV ATF 入射リニアック

1. はじめに

JLC 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を行うための JLC-R&D 5 年計画が 1987 年より 1991 年にかけて行われた。

この間、JLC の物理に関する R&D も目覚ましい発展を遂げた。LEP の実験結果が出揃ったこともあるが、JLC 物理グループによって行われてきた、理論と計算機シミュレーションによる R&D の成果は、JLC で目標にしている TOP、HIGGS、そして SUSY の発見に必要なとされる重心系エネルギーが当初考えられていた 1 ~ 1.5 TeV ではなく、300 ~ 500 GeV で充分であることが判明したことである [1]。

最近の JLC 物理グループが想定しているシナリオは [1]、

- 1) 遅くとも西暦 2001 年には、重心系エネルギー 300 ~ 500 GeV で、TOP、HIGGS そして SUSY の Discovery Run に入る。

- 2) その後数年間、このエネルギー領域における精密実験を行う。

- 3) 精密実験終了後には、JLC 加速器を改造してエネルギー増強を果たす。そして更なるエネルギーフロンティア物理の追求を行っていく。

JLC の建設に必要な年月は、土木工事を含めて最低 5 年が必要であると予想される。物理のシナリオを満足させるべく西暦 2001 年に JLC を完成させるには、少なくとも 1996 年に建設開始しなければならない [1]。

1991 年までの R&D 5 年計画では、1 ~ 1.5 TeV の JLC をターゲットにして、このエネルギー領域での加速器を最適化し、またそれに必要な加速器コンポーネントの開発を行ってきた。物理が必要とする重心系エネルギーが 300 ~ 500 GeV に下がったことで、加速器に要求される技術目標がリラクセスされ、以前に比べて JLC が現実のものに近づくと同時に早期実現の見通しが立った。

1992 年には、JLC R&D 5 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 JLC R&D 第 2 次 3 ヶ年計画 (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 ヶ年計画で開発された加速器コンポーネントを総合的システムとしてテストできる試験加速器施設 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。

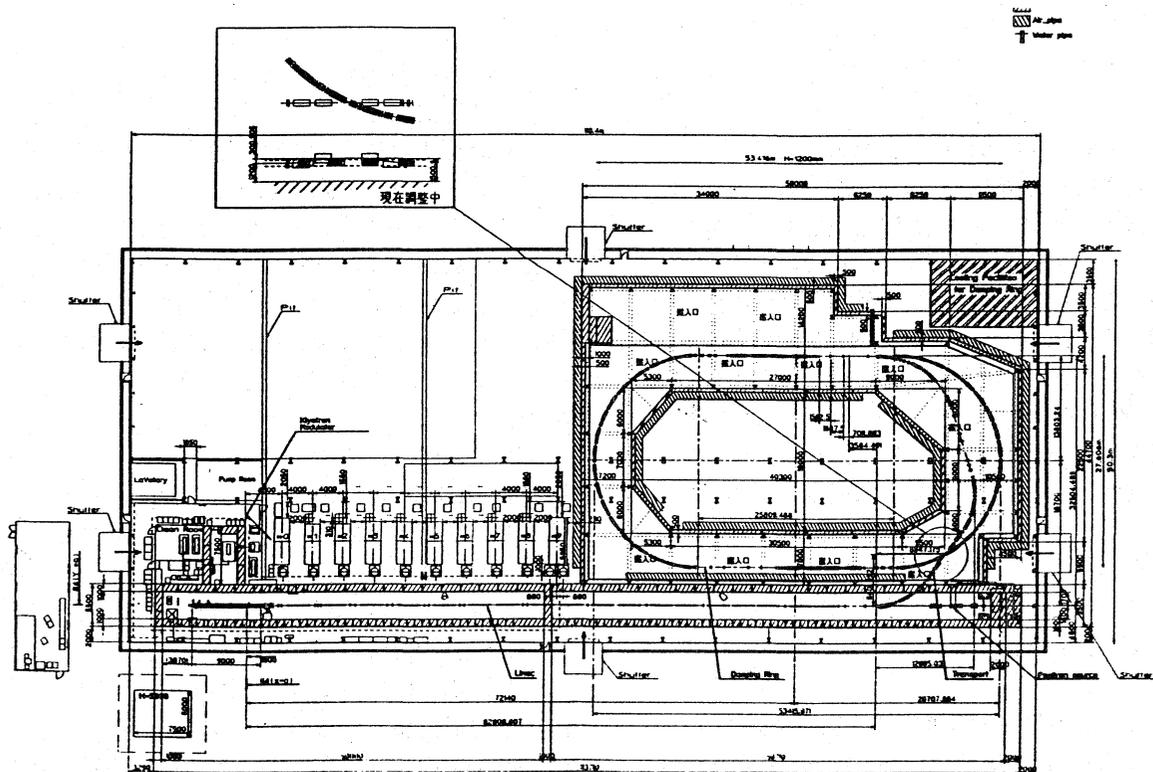
2. Accelerator Test Facility (ATF)

第 2-1 図に示すように、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^[2-3]、バンチコンプレッサー、垂直方向ビームサイズを 30 nm まで絞り込む最終収束系、陽電子ターゲット試験装置^[4]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生成される低エミッタンスビームの加速試験をする予定である。

1.54 GeV ダンピングリング入射リニアックの設計目標は、ダンピングリングの要求に依存する。

2-1. 1.54 GeV ダンピングリング

1.54 GeV ダンピングリングの目標は、JLC で必要とされる超低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ことである。実機 JLC では、 $10^{33-34}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ の高い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まなければならない。そのためには、ダンピングリング内で、縦方向で $5 \times 10^{-8} \text{ m rad}$ 、横方向で $5 \times 10^{-6} \text{ m rad}$ という従来リングの 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。ダンピングリング内で常時周回しているバンチのバッチ (集団) 数は 5 個である。1 つのバッチは 20 個のマルチバンチで構成されており、それぞれのバンチ間隔は 2.8 ns である。最初のバンチと 20 番目のバンチの時間間隔は 53.2 ns、1 つのバンチ内の電子数は、最大で 2×10^{10} 個 (3.2 nC) である。リニアックは 25 pps の繰り返して、ダンピングリングに 20 バンチを入射しなければならない。



第 2-1 図 JLC Accelerator Test Facility (ATF)

2-2. トリスタン・アセンブリーホール

リニアックやダンピングリングを設置するトリスタン・アセンブリーホールは、本来トリスタン建設時に加速器やディテクターのコンポーネントをインストール前にテストできる場所として建設された。そのため、20 cm 厚のコンクリート床厚に鉄骨スレート屋根構造で、加速器を設置するには、床の補強、コンクリートシールドの設置等の工事が必要とされた。

このホールの 3/4 のスペースに、リニアック部とダンピングリング部を設置する。リニアックとダンピングリングには、それぞれ厚さ 1.0 m と 0.5 m のコンクリートシールドを設置し、さらにシールド内に垂直方向アラインメント・トーランスが $\pm 100 \mu\text{m}$ の 1.54 GeV リニアックと $\pm 30 \mu\text{m}$ のダンピングリングを建設しなければならない。そのため、耐荷重を増加させ、かつ床面変動を小さくするための床改造工事が 1991~92 年度に渡って行われた。新たにコンクリート製ピアーを密に打ち込み、その上に鉄筋コンクリート製ブロックを形成させ、その上部を仕上げる工事である。1991 年度に完成した 1/4 の部分には、コンクリートシールドが設置完了されており、この中にリニアックの 800 GeV 部分の建設が進められている。残りの 1/2 に相当する領域に関しては、1993 年 6 月末に床工事が終了し、8 月末から 12 月にかけて、コンクリートシールド建設工事が行われる。

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、従来のリニアックには無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。

3-1. 大電流マルチバンチ加速

SLC で加速できる最大電子数は、単バンチの場合 5×10^{10} 個 (8 nC) である。ATF 入射リニアックで加速しなければならないバンチ内の電子数は、最大 2×10^{10} 個で、これは 3.2 nC に相当する。しかも、2.8 ns のバンチ間隔で 20 バンチ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 $\pm 1\%$ 以内に抑える必要がある。これらの条件を満たすために、次の 2 方式の電子銃システムの開発が行われている。

3-1-1. 熱陰極型電子銃システム

グリッドパルス器を用いて、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 のマルチパルスビームを発生させる[5]。これらのマルチパルスビームは、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 SHB (サブハーモニックバンチャー) 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れる。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。

3-1-2. RF 電子銃システム

基本周波数のサブハーモニック間隔でマルチパルスビームを発生させる方式として、2856 MHz でドライブされるフォトカソード RF 電子銃と、モードロックレーザーの組み合わせが将来有望であると考え開発を行っている。

3-2. 高電界加速

1.54 GeV のリニアックを、トリスタン・アセンブリーホールという既存の建屋内に設置しなければならない。そのため、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総全長が、80 m 以下になるよう設計しなければならない。これを実現する唯一の方法は、加速管内で 33 MeV/m 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、これまでに最大 93 MeV/m の加速勾配の発生に成功している。しかしながら、加速器として利用できる加速勾配は、RF 放電が発生しない安定な領域で、且つ暗電流が無視できる量でなければならない。実験結果から実用範囲の加速勾配は、0.6 m 長加速管の場合は 50 MeV/m 以下であった。

3-2-1. 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[6]。加速管の高周波スペックは第 3-2-1 表に示す。

表 3-2-1. 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 τ	0.57	
Peak Surface Electric Field (Es) / Axial Electric Field (Ea)	1.9 ~ 2.1	
Average Group Velocity vg/c	0.012	
Filling Time T_f	0.83	μ sec

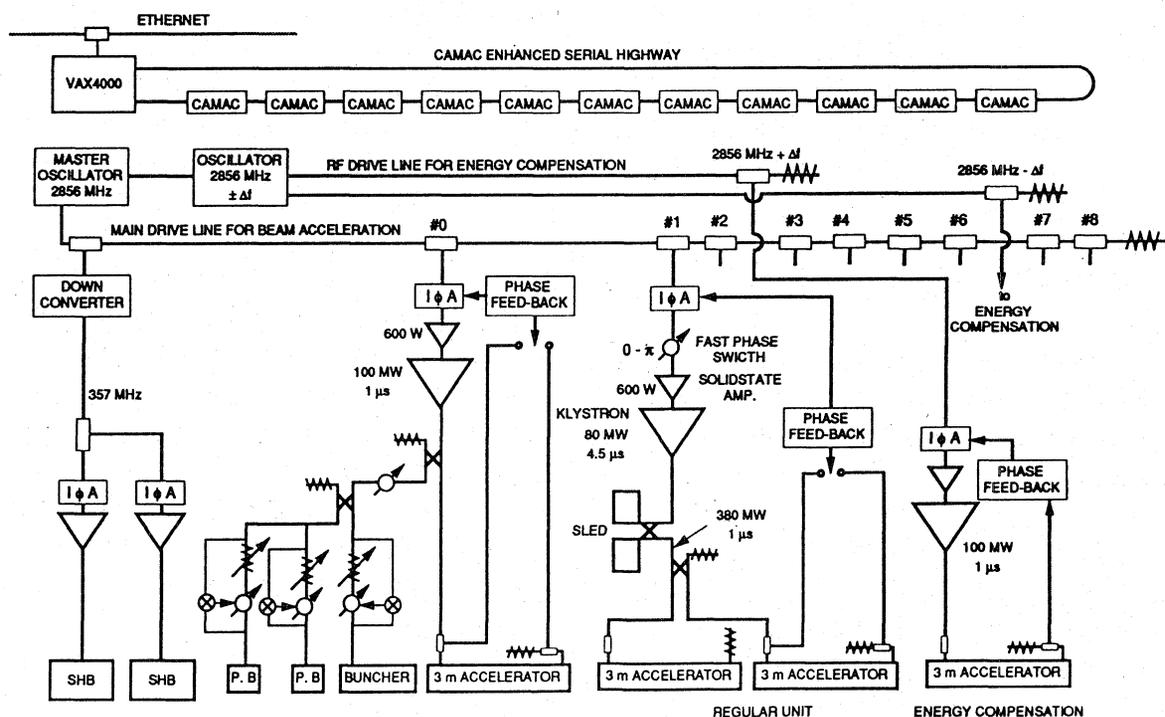
加速勾配 33 MeV/m を加速管内に発生させる場合、暗電流をできるだけ最小にするため次の点に留意した。

- (1) 加速管材料に不純物が無いこと。
- (2) 加速管材料内部に気孔がないこと。
- (3) 表面電界が集中しない構造にすること。
- (4) 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 銅を採用した。内部の材料内に気孔が存在すると、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。ディスク部とカップラー部は特に電界が集中するので、日立クラス-1 OFHC 銅材を HIP (Hot Isostatic Press) 処理した材料を加工した。

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。また 0.6 m 長加速管による高電界試験の結果から、カップラー部の放電が電場勾配を制限する主要因の一つになることが明らかになっている。それで、ここでは MAFIA 3 次元計算機コードを用いてカップラー部の詳細な解析を試みた[10]。これにより、一切の手作業による加工なしで、高精度に加速管を製作することが可能となった。

RF DRIVE SYSTEM FOR S-BAND INJECTOR LINIAC



H. MATSUMOTO FEB. 18 '92

第 3.2.1 図 1.54 GeV 入射リニアックの RF システム

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、外部から加速管内に混入しないように、内部の清浄度を確保するための工程管理を製作の初期段階から厳密に行った[6]。

3-3. 高出力ピークパワー

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クライストロンと、SLEDシステムを組み合わせて、400 MWを発生する方法を採用することにした。E3712型クライストロンは、1 μ sの短パルスでは100 MWのピーク出力が発生できるが、4.5 μ sのパルス幅では、公称80 MWのピークパワーが得られることになっている。KEKでの数年に渡るこの球のテスト結果から、4.5 μ sのパルス幅でも、85 MW運転に充分耐えるものと判断した。このときの印加電圧は ~ 400 kVである。

400 MWピークパワーを得るために、新しい方式のSLEDシステムが開発された[7]。SLCでは、60 MW以上の入力パワーで、SLED空胴アイリス付近での暗電流による放射線量が多くなる。そこで、85 MW耐入力のSLEDを開発することになった。導波管の側壁と空胴を2個のアイリスでカップリングさせる方式を考案して、アイリス付近の表面電界をSLACに比較して65%まで減少させることができた。85 MW、4.5 μ sをSLED空胴に入力するが、後半の1.0 μ sでは位相を 180° 反転させることで、ピークパワー400 MW、パルス幅1 μ sを空胴から出力させる。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入力する。

さらにクライストロン電源として、200 MW級のクライストロン変調器の開発がおこなってきた。当初は100 MWピークパワーの出力が可能なのが開発された。これは1:15のパルス幅比を用いて、450 kV、3.5 μ sまたは、400 kV、7 μ sのパルス電圧をクライストロンに印加するものである。最近従来に比較して容積率が33%にまで小型化できる見通しが立ち、1993年度に3台が完成する予定である。

Sバンドで、85 MW、4.5 μ sから400 MW、1 μ sまでのハイパワーを取り扱うことになるので、数100 MW対応のハイパワーコンポーネントの開発を進めてきた。新たに開発されたRFウィンドウ[8]、方向性結合器、位相器は、それぞれ310 MW、407 MW、407 MWまで耐出力試験を行ったが、異常は認められていない。

3-4. アクティブ・アライメント

JLCでは主リニアックの加速管、ビームモニター、収束電磁石等をアクティブにアライメントできる機構が必要とされる。ATF入射リニアックでは、前段階的レベルではあるが、アクティブ・アライメント機構をもうけテストする。

入射リニアックのアライメントの測定方法は、組み立て時には従来通りのレーザー、水準器、スコープ等を用いる。組み立て後に発生する地盤変動、建物の変動、地震等の原因で生じるアライメントのずれをリアルタイムでモニターする機構に、サーボモーターによる姿勢制御機構を加えることで、リニアックのアライメントをアクティブに行えるよう設計した。

押し付け垂直面及び平面を有するL型テーブルに加速管、収束電磁石、並びにビームモニターを設置する。加速管は専用L型テーブルに、また収束電磁石とビームモニターは加速管とは独立した専用L型テーブルに設置する。それぞれのテーブル両端両側には、合計4個の位置センサーが設置されている。加速管2台を設置する全長6 mのテーブルには中間点の両側2ヶ所を含めて計6個の位置センサーが設置されている。垂直面に近い側の位置センサーは垂直水平両方向位置が計測でき、他の側は垂直位置のみを計測する。位置センサーは、1対の誘導コイルから構成されている。直径0.6 mmの鋼鉄ワイヤーがリニアックに沿って左右両側にそれぞれ張られ、6 kHzの高周波電流が流されている。低周波を採用したのは、ロックインアンプを使用して、高ノイズレベル下での測定を可能にするためである。ワイヤーの位置が1対の誘導コイルの中心にあるときは、コイルの検出電流は0 Aで、中心からのずれに比例して電流が検出され、ずれの方向と量が計測できる。位置センサーは、マイクロメーターを用いてワイヤーの撓みに合わせてバイアスがかけられており、ワイヤーに合わせて位置制御することで、全てのL型テーブルが垂直方向、水平方向にアライメント可

能である。リニアックシステムとしてのアラインメント精度は、 $\pm 100 \mu\text{m}$ である。

3-5. ビーム・ベースドゥ・アラインメント

JLCの主リニアックには、加速中のバンチビームが加速管や収束電磁石の中心を常に通過するように、加速管、ビームモニター、収束電磁石を垂直、水平方向に微小移動させる機構をもたせる、ビーム・ベースドゥ・アラインメント法を採用する。ATF入射リニアックのアクティブ・アラインメントを利用して、この新しいアラインメント法のテストを行う。

3-6. マルチバンチのエネルギー補正

マルチバンチのエネルギー分布は、加速管内を通過して得られるエネルギーゲインとビームローディングとによって決定される。1つのバンチ内電子数が最大で 2×10^{10} 個 (3.2 nC) で、かつ 20 個のマルチバンチで構成されている大電流短パルスビームを加速する場合、33 MeV/m の高加速勾配で加速してもビームローディングはエネルギーゲインの約 10% にまで達する。ダンピングリングからの要請で、これら 20 個のマルチバンチ間のエネルギー分布を $\pm 1\%$ 以下にしなければならない。

マルチバンチのエネルギー分布を減少させる方法として、従来から ECS 電磁石システムが用いられたり、ビームの入射タイミングを調整する方法がとられてきた。ECS 電磁石は、バンチの加速位相を変更することでバンチ間のエネルギー補正をおこなうが、結果的にはバンチ間隔が変更される。これは、ダンピングリングの要請に反するので採用できない。また、マイクロ波が加速管下流端に到達しない以前にビームが加速管を通過するように入射タイミングを調整する従来の方法では、広範囲のバンチ内電子数(ピーク電流に相当)に対して有効ではない。

1.54 GeV 入射リニアックでは、 $2,856 \pm \Delta f \text{ MHz}$ のそれぞれ 1 台ずつのクライストロンと加速管を用いて、エネルギー補正を行う。先頭バンチは減速位相に、最終バンチは加速位相にすることで、中間バンチも含めてバンチ間のエネルギー分布を $\pm 0.16\%$ にまで縮小できる。 $2,856 \pm \Delta f \text{ MHz}$ の 2 種類の周波数を利用することで、各バンチはフラットな加速、減速電場でエネルギー補正される。従って、単バンチのビームローディングは、エネルギー補正の量に関係なく保存される。また、この補正方法は広範囲のバンチ内電子数に対しても有効である。ビームローディングの大小に対しては、補正電場の強度を変

えること、すなわち補正加速管への RF パワー調整だけで対処できる特徴を有する。

4. まとめ

1.54 GeV ATF ダンピングリング入射リニアックは、コンベンショナルな RF 周波数である S-バンドを採用しているが、200 ~ 400 MW のハイパワー RF の使用、33 MeV/m の高加速勾配、アクティブアラインメント、新しいエネルギー補正法等、新しい設計思想を取り入れた次世代リニアックである。

1.54 GeV ATF 入射リニアックは、現在上流の 800 GeV 部の建設が進められている。延長部のシールド工事が終了する 1993 年 12 月から、リニアックの残り 740 GeV 部分の建設が開始される。ダンピングリングの建設は 1994 年度から本格的に始まり、1995 年 12 月には、最初のビームがダンピングリングを周回する予定である。

1.54 GeV ATF リニアックは、過去 5 年間にわたって総合的に行われてきた JLC 開発研究の成果をベースに設計された。これらの開発研究に携わった方々に、また JLC のための新しい製造技術に挑戦された方々に心から感謝いたします。

References

- [1] JLC Group "JLC-I", KEK Report 92-16 (December 1992) A/H/M.
- [2] N. Terunuma, Y. Hori, K. Kanazawa and J. Urakawa, Proc. of this meeting.
- [3] K. Egawa, J. Urakawa and H. Nakayama, Proc. of this meeting.
- [4] H. Ida, et al., Proc. of this meeting.
- [5] T. Naito, M. Akemoto, H. Hayano, J. Urakawa and M. Yoshioka, Proc. of this meeting.
- [6] H. Matsumoto, S. Takeda and S. Yamaguchi, Proc. of this meeting.
- [7] H. Matsumoto, H. Baba, A. Miura and S. Yamaguchi, Nucl. Instr. Meth. A330 (1993) 1-11.
- [8] A. Miura and H. Matsumoto, Proc. of this meeting.