

# JLC 計画のための X-バンド線形加速器の開発状況

峠 暢一<sup>1</sup>、明本光生、大家圭司、工藤昇、高田耕治、高富俊和、陳 榮浩、徳本修一、東 保男、  
人見宣輝、舟橋義聖、肥後寿泰、松本修二、水野 元、両角祐一、渡辺勇一  
高エネルギー加速器研究機構  
〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

## 概要

JLC 計画は、リニアコライダーによって、重心系エネルギー約 250 GeV から可能ならば最終的には 1 TeV 程度までの電子・陽電子衝突反応での素粒子の相互作用を探る将来加速器計画である。ここでは、その主線形加速器の基幹スキームとして研究されてきた X-バンド技術開発の現状について報告する。

## 1. X-バンド線形加速器システムの構成

X-バンド線形加速器の基本システム構成を図 1 に示す[1]。本加速器システム構成の詳細についてはレポート[2,3]を参照されたい。JLC X-バンド線形加速器では一パルスあたり 2.8 ns 間隔で 95 バンチからなるマルチバンチビームを加速する。フィル時間を加えて各加速管に供給されるべき RF パルス長は約 360 ns である。JLC ではこれに対してクライストロンのパルス長さをその 4 倍の 1.5  $\mu$ s に設定した。運転では 8 本のクライストロンからのパルスを合成し、これを時間的に 4 分割して 4 つの加速管群に分配する。このような RF パルス圧縮分配の方法は DLDS (Delay Line Distribution System) と呼ばれているが、共鳴空洞を用いる SLED 方式ないしその派生に比べて 10 - 15 % 以上の効率改善が見込まれている。

加速管のシャントインピーダンスは平均  $\sim 90 \text{ M}\Omega/\text{m}$ 、加速モード Q 値は  $\sim 7800$  で、加速勾配 75 MV/m (ビームローディング無し) のときを発生する。ビーム加速時の実効加速勾配は 55 MV/m、従って重心系エネルギー 500 GeV の運転を行うのに必要な線形加速器の総実効長 (入射器、最終収束部を除外する) は 9 km 程度となる。大電力 RF 系の総合電力効率としては 38 % 程度を目標としている。これによって 500 GeV 運転時 (繰り返し 150 Hz、ルミノシティ  $8.7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) のときの所要 AC 電力は約 100 MW と見積もられる。

## 2. クライストロンモジュレータ

クライストロンモジュレータの基本要求性能は、最大繰り返し 150 Hz でフラットトップ 1.5  $\mu$ s 以上のパルスを安定にクライストロンに供給することである。スイッチ素子としてはサイラトロンを使うことを止め、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 半導体素子を採用することで高効率化、コストの低減と信頼性向上を図る可能性について重点的に研究している[4,5]。

2000 年春には、IGBT 回路モジュールを 10 段重ねた「5 分の 1」モデルで、試験目標のスイッチ電圧 20 kV、パルス幅 1.5  $\mu$ s を記録した。今後は保護回路の試験を完了したところで昇圧比 1:5 のパルストランスに接続し、100 kV 電圧を発生する試験を行う。来年 2001 年春には 500 kV 出力のフルモデル (クライストロン 2 台の同時運転が可能) の試験に持ち込む予定である。

## 3. クライストロン

クライストロンの基本要求性能は、最大繰り返し 150 Hz で、75 MW、パルス長 1.5  $\mu$ s の X-バンド RF 出力を得ることである。RF 効率は 55 % を目標とする。重心系エネルギー 500 GeV 運転のとき必要な X-バンドクライストロン総数は約 3600 本である。

KEK では、海外研究所との共同研究を進めると同時に、国内での X-バンドクライストロンの開発基盤の充実に努めており、過去にソレノイド収束タイプのクライストロンで 50 MW、1.5  $\mu$ s の出力を実現している。現在の研究重点はビーム収束のために周期構造をもった永久磁石群を採用した PPM (Periodic Permanent Magnet) タイプのクライストロンの開発にある。これにより、クライストロン運転電力の低減と各種インターロックの簡略化を目指している。日本で開発された PPM タイプ X-バンドクライストロンの 1 号機の試験は、2000 年 7 月から試験され、良好な結果を得た。2 号機の試験にお

<sup>1</sup>E-mail: toge@lcdev.kek.jp

In case of ECM = 500 GeV

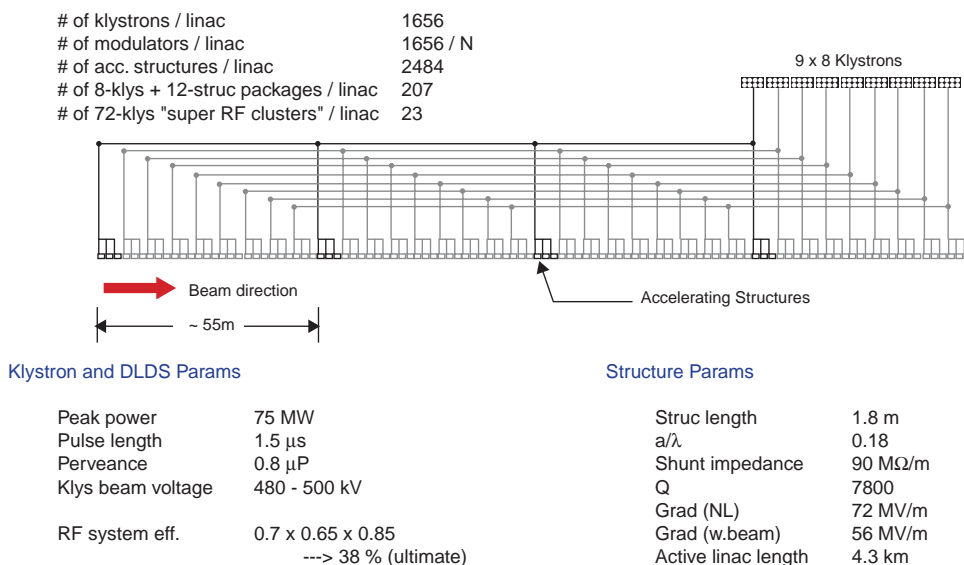


図1：JLC 加速器のための主線形加速器の構成概念図。クライストロン8本のパッケージが9個集まったRFクラスターによって、108本の加速管（延長約220m）をドライブする。1クラスターでの全加速電圧は約10.7 GeVとなる。

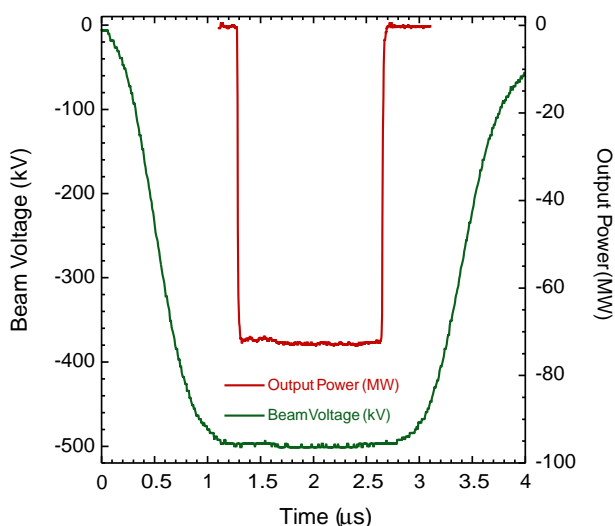


図2：X-バンドPPMクライストロン2号機で観測された出力波形。

いては、今年2001年6月には図2に示すように出力パワー73 MW、パルス長1.4  $\mu$ s 効率54%を達成した（ビーム電圧500 kV）[4,6]。現在、クライストロン試験は実験エリア近所の改修工事のため中断中であるが、今年暮れの再開時以降には、ビーム電圧を上げた運転、続いて3号機の試験を予定している。

#### 4. 大電力高周波分配システム

DLDSでは大量の導波管が必要となる。その数量を減らす一方法として導波管の上流端から各複数の伝送モードのX-バンド電力を注入することが考えられる（Multi-Mode DLDS）。必要に応じて所定の伝送モードのX-バンド電力のみ取り出して加速管に供給するようにすれば、必要な導波管群の総延長を低減することができる。KEKでは現在、いくつかの予備実験を経た結果、伝送モードとしてはTE01とTE02を使用している。これまでに基本部品的设计は終了し、その製作が進められている[4]。また、加速されるビームとX-バンドRFの相対位相の測定制御技術の開発実験が進行中である。

#### 5. 加速管

JLC用の加速管研究では、効率良く加速勾配を発生すると同時に、ビームエミッタンスの増大を防ぐべくウェーク場の共振を出来るだけ低減するような設計を開発実証することが当初大きな課題であった。KEKでは米国SLACとの共同研究のもと、高調波を離調し、かつ積極的に減衰もさせるDamped-Detuned型加速管の開発を進めてきた。これまでに何回かのビーム試験を経て、ウェーク場の減衰については十分JLCの要求仕様を満たす加速管をつくることのできることを

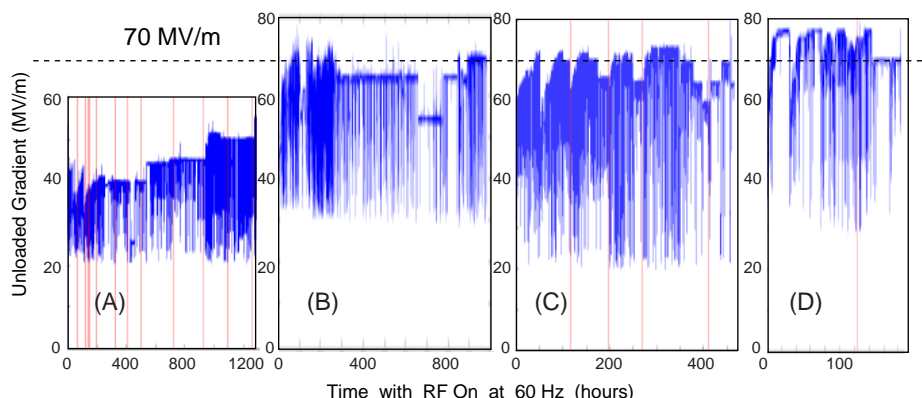


図3：X-bandでの加速管エージング成績。(A) 1.8 m管  $v_g/c = 0.12$ 、(B) 0.5 m管  $v_g/c = 0.05$ 、(C) 1 m管  $v_g/c = 0.05$ 、(D) 0.5 m管  $v_g/c = 0.03$ 。これらの加速管は最近 KEK-SLAC の共同研究で製作されたもの。試験は SLAC の NLCTA 施設で行われた。グラフ横軸は 60Hz くり返し換算の運転時間。縦軸は加速電場。

実証している[3]。しかしながら、2000年初めになって大加速勾配運転時の放電による加速管内壁面の損傷が無視できないことが明らかになってきた[3,7]。これは、X-バンドの大電力 RF 源がほぼ安定に動作するようになり、加速管長期運転の自動化が進んで初めて体系的な研究が行われるようになったことの一つの帰結でもある。この問題の解決には、

- 銅表面の洗浄技術の改善、
- 大電力エージングのアルゴリズムの改善、
- 放電を起こしにくい、もしくは
- 放電によるエネルギー集中投下の度合いの小さい加速管電気設計

など、多角的な対策が必要である。

特に上記リストの最後項目の放電時のエネルギー投下の振る舞いに関しては早くから注目が寄せられ、加速管内の群速度がより小さい場合には損傷がより軽微である可能性が指摘されてきた[7]。これについて、KEK-SLAC では 2000-2001 年度を通して集中的に各種試験加速管を製作し、高電界試験に供してきた。そのデータの一例を図3に示す。

また、埼玉大グループと共同で、銅の高電界下の放電振る舞いにおける表面状態への依存性についての研究を始めている[8]。

## 6. まとめ

JLC の主線形加速器のための X-バンド RF 系の開発状況を概観した。今後の開発要目については個別に既に挙げた。JLC 実現に向けて技術を確立するためには、更に、クライストロン、DLDS、加速管群の一セットを建設し実証運転することが必要と考えており、こ

れを数年間で完成するための予算や人的資源の調達について、現在 KEK 部内で方針検討と計画推進体制の再整備が進められているところである。これと並行して2-3年の内に JLC の詳細設計作業のための調査費が拠出されるよう、KEK としては努力を続けていくことになっている。なお、本研究では、株式会社東芝、三菱電機、石川島播磨重工業をはじめとする多数の企業、国内大学諸研究機関、米国 SLAC およびロシア BINP Protvino 支所ほかの方々の協力を受けていることを、ここに記して感謝致します。

## 参考文献

- [1] 峠暢一、報告 12C-05、第 25 回リニアック技術研究会、姫路、2000。 <http://lcdev.kek.jp/Conf/LinacMeeting2000/>
- [2] JLC Study Group, “JLC Design Study”, KEK-report-97-1, April, 1997. <ftp://lcdev.kek.jp/pub/DesignStudy/> より閲覧可能。
- [3] Ed. by N.Toge, et al, “International Study Group Progress Report”, KEK-report 2000-7. <http://lcdev.kek.jp/ISG/> より閲覧可能。
- [4] Y.H.Chin, “Status of X-band Power Source Development for JLC”, HEACC2001, Tsukuba. <http://lcdev.kek.jp/Conf/HEACC2001/> より閲覧可能。
- [5] 明本光生、報告 3A-5、本研究会。
- [6] 松本修二、報告 2B-3、本研究会。
- [7] [http://www-project.slac.stanford.edu/lc/wkshp/RFBreakdwn/struct\\_breakdown\\_wrkshp.htm](http://www-project.slac.stanford.edu/lc/wkshp/RFBreakdwn/struct_breakdown_wrkshp.htm)
- [8] 小林信一、報告 3B-2、本研究会。