

# 次世代加速器用大電力クライストロン

High-Power Pulsed Klystron for Linear Collider

水野 元  
H. Mizuno

岩瀬 光央  
M. Iwase

米澤 宏  
H. Yonezawa

大家 圭司  
K. Ohya

次世代高エネルギー物理学研究用リニアコライダーに用いる 80 MW 級 Xバンド パルスクライストロンを開発している。今回耐電力性の向上を目的として、出力空洞にディスク装荷型進行波出力回路を用い、空洞内電界を大幅に低減し、また出力部のドリフト管径を拡大して電子衝撃を少なくした。さらにホーン型出力窓を用い、伝送主モードを TE11 (Transverse Electric wave: 進行方向に電界成分をもたない波) として、セラミック面での電界強度を低減させた。

これにより RF (Radio Frequency) パルス幅 100 ns で出力電力 54 MW を達成し、Xバンドリニアックなどの試験用高周波源としての性能を達成した。

An X-band 80 MW pulsed klystron for the next-generation linear collider is under development. In order to enhance the high-power capability, two major design improvements have been introduced into the latest klystron. One is a traveling-wave disc-loaded structure for the output cavity, which reduces the electric field and electron interception in the output section by employing a large drift tunnel. The other is a TE11 horn type output window, which reduces the electric field on the window ceramics to suppress discharge.

The klystron has achieved an output power of 54 MW with a radio frequency (RF) pulse duration of 100 ns, and is being used for the testing of linear accelerator components at the High Energy Accelerator Research Organization (KEK).

## 1 まえがき

高エネルギー加速器研究機構 (以下、KEK と略記) は高エネルギー物理学研究に用いる 200 GeV ~ 1 TeV レベルの次世代電子陽電子衝突型線形加速器 (リニアコライダー: 以下、LC と略記) の開発を行っている<sup>(1)</sup>。

このような高エネルギーの LC を現実的なコスト範囲で実現するには、加速器全長を 25 km 程度に抑えること、および運転時の総消費電力を抑制することが不可避である。より高いエネルギーを短い加速器で得るためには動作周波数を高めたほうが有利であるが、構造的に小さくなるため耐電力性が課題となる。世界的には Lバンド (1.3 GHz) から 30 GHz まで検討されていて、KEK では主として Xバンド (11.424 GHz)、およびそのバックアップとして Cバンド (5.712 GHz) で開発を進めている。

一方、クライストロンは大型電子線形加速器の高周波源として広く利用されていて、LC の高周波源としても唯一のものと考えられ、50 MW 以上の出力電力で、数千本が必要とされる。しかし、従来の商品化されているクライストロンの出力レベルは Xバンド、Cバンドとも数 MW 程度である。

当社は、すでに Sバンド (2.856 GHz) では 80 MW 管 (E 3712)、50 MW 管 (E 3730 A) などを商品化していて、

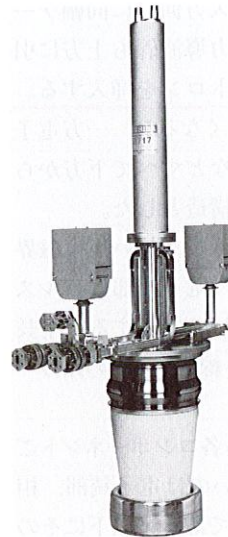


図1. Xバンドパルスクライストロン E3717  
全長約 1.7 m、質量約 100 kg、目標出力 80 MW 以上で、高エネルギー物理学研究用次世代線形加速器に使用する。

Model E3717 X-band pulsed klystron

Xバンド XB72K (KEK 名称、東芝名称は E3717) (図1)、Cバンド E3746 の開発を進めている。

今回 E3717 に耐電力性の向上を目的として、ディスク装荷型進行波出力回路、および TE11 ホーン型出力窓を搭載し、LC の Xバンドリニアックなどのコンポーネント試験用高周波源に用いる 50 MW 級クライストロンを開発したので報告する。

## 2 目標仕様

表 1 にコンポーネント試験用クライストロン、および LC で要求される目標仕様を示す。

表 1. E3717 の目標仕様  
Specifications of E3717

項目	50 MW 管	LC 用
動作周波数 (GHz)	11.424	11.424
パルス出力 (MW)	>40	80
効率 (%)	>24	45
パルスビーム電圧 (kV)	>450	466
パルスビーム電流 (A)	>300	382
パービアンス ( $\mu\text{K}$ )	$1.2 \pm 5\%$	1.2
利得 (dB)	>45	>53

## 3 全体設計

図 1 に E3717 の外観を示す。空洞数は 5 個、高周波の入出力導波管は WRJ-10 (方形導波管の規格名称, 8.2 GHz から 12.4 GHz で使用される) とした。また、大電力を透過させる出力窓の負担を減らすためと、出力空洞内の電界を均一化するために、出力導波管を二つ設けた。比較的低い周波数バンドのクライストロンでは、入力回路に同軸ケーブルを用い上方に引き出す。また、出力導波管も上方に引き出し、集束電磁石の上からクライストロンを挿入する。しかし、E3717 では導波管サイズが小さくなるが、一方電子銃の外径は大きいので、入出力導波管などすべて下方から引出し、集束電磁石を上からかぶせる構造とした。

これにより集束電磁石の内径を小さくし、強い集束磁界を得た。コレクタ、ボディ部は水冷で、電子銃部はパルストランスが入ったオイルタンクに挿入して使用する。全長は約 1.7 m、質量は約 100 kg (ただし X 線シールドの鉛カバーを除く) である。

E3717 ではクライストロンを構成する各コンポーネントごとに開発を進めた。特に開発要素が高いのは電子銃部、相互作用部 (特に出力回路部)、出力窓部である。以下にその詳細設計を述べる。

### 3.1 電子銃

設計は SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) の 60 MW 級クライストロン 5045、および KEK で使用実績のある S バンドクライストロン (E3712) などを参考に設計した。表 2 に E3717 の設計値<sup>(2)</sup>と E3712 の実績値を併せ示す。

パービアンス ( $K$ : 電流と電圧の  $3/2$  乗の比) は効率を左右する重要な要因であり、S バンドでは  $2 \times 10^{-6} K$  前後が一般的であるが、E3717 ではビーム集束の困難さから  $1.2 \times$

表 2. E3717 の電子銃の主なパラメータ設計値  
Gun parameters of E3717

項目	E3717	E3712
パルスビーム電圧 (kV)	550	390
パルスビーム電流 (A)	490	470
パービアンス ( $\mu\text{K}$ )	1.2	1.9
電極表面最大電界強度 (kV/cm)	275	220
ビーム集束比	110 : 1	20 : 1
カソード直径 (mm)	72	90
カソード面電流密度 ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )	10.4	6.6
集束磁界 (Max.) (T)	0.65	0.13

$10^{-6} K$  と低く設定した。このため動作電圧が高くなるが、構造自体を大型化して電子銃内の電界強度を低減させた。図 2 に高速表面電荷法による電子銃の電界の解析結果を示す。電界強度を下げるためアノードの曲率半径は外側で大きくとっている。電圧 550 kV 印加時のアノードにかかる最大電界強度は約 275 kV/cm である。アノードおよびウェネルトは電界強度が特に高くなるため鏡面研磨し、さらに高真空中で加熱脱ガス処理を施している。

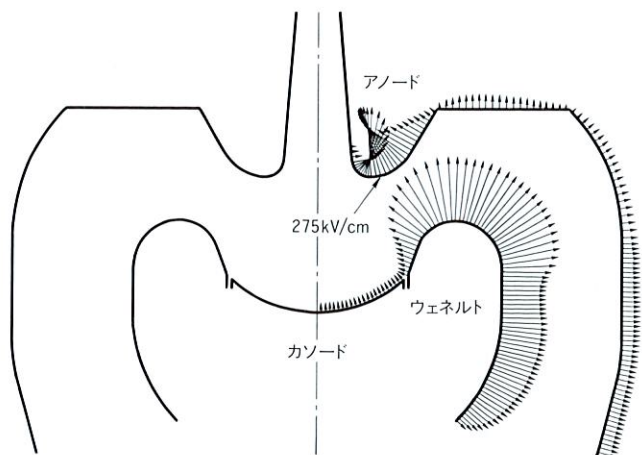


図 2. 電子銃電極表面の電界強度分布 電極構造を大型化することにより、550kV という高電圧でも表面電界を最大 275kV/cm と従来のクライストロン並みに押さえている。

Calculated electric field in gun section

カソード直径は、クライストロンの寿命を決める要因の一つであるカソード面電流密度と、電子ビーム集束の困難さの尺度であるビーム集束比 (カソード面積とビーム断面積との比) を検討し、72 mm とした。このときビーム集束比は 110 : 1 となる。E3712 と比べると電流密度は約 1.6 倍、ビーム集束比は約 5.5 倍にも達する。

カソードには東芝製 M タイプインプレカソード (イリジ

ウムをコーティングした含浸型カソード)<sup>(3)</sup>を採用した。カソード動作温度が低く、バリウムの蒸発が少ないのでクライストロンの寿命を延ばすことが期待できる。

電極形状は上記電界解析とビーム軌道シミュレーションにより決定した。図3に電子ビーム軌道のシミュレーション結果を示す。

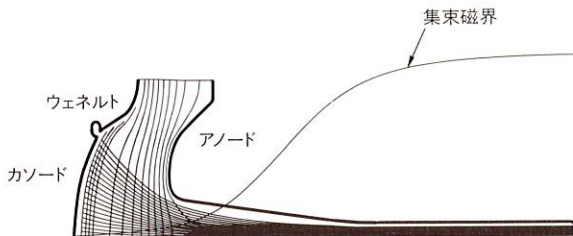


図3. 電子ビーム軌道シミュレーション シミュレーションで電極形状を最適化し、ビーム集束比 110 : 1 と従来例のない高い値でリプルがほとんどない良質のビームを達成している。

Calculated electron beam trajectory

### 3.2 相互作用部

図4に電子銃と空洞の概略配置を示す。一般的には空洞の形状はギャップ長を小さく取り、電子ビームとの結合を上げるため、ノーズコーンのあるリエントラント型が用いられるが、E3717では空洞表面電界を下げるため、入力空洞以外はノーズコーンのないピルボックス型を採用した<sup>(4)</sup>。

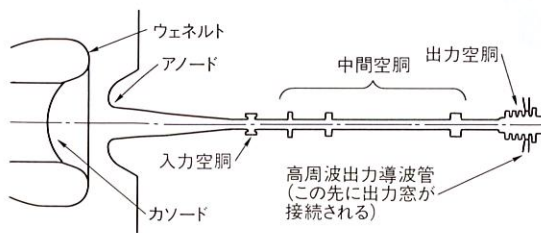


図4. 電子銃と空洞の概略配置 出力空洞には五つのセルからなるディスク装荷型進行波出力回路を採用し、空洞内に発生する電界を大幅に低減して耐電力性能を高めた。

Schematic view of bunching system

各空洞の配置と共振周波数の値は効率向上の大きな要因である。試作管で出力空洞にもピルボックス型の単一空洞を用いて製作し、短パルス、低デューティで出力と効率を測定した。その結果それぞれ 70 MW, 35% の値を得て、空洞配置、共振周波数が適正であることを確認した<sup>(5)</sup>。その後出力空洞にロシア BINP 研究所 (Branch of Institute of Nuclear Physics) の S.Kazakov 氏と V.Teryaev 氏が設計した

ディスク装荷型進行波出力回路を採用した。これのメリットとして、電界を管軸方向に長く分布させることにより空洞内の最大電界を低減できること、およびドリフト管の内径を大きくできることが上げられる。内径を大きくできることにより電子ビームの透過率が向上し、電子衝撃を低減できる。

出力回路出口でのドリフト管内径は単一空洞と比較して約 50% 拡大でき、また空洞内最大電界も大幅に低減できた。

### 3.3 出力窓

通常のパルボックス窓では方形と円形導波管変換部にエッジがあり、このためセラミック板に垂直な電界成分が大きくなる。この電界成分がセラミック板表面でマルチパクタ放電を引き起こす原因となると考えられる。これを防ぐために KEK では TE11 ホーン型出力窓を開発し<sup>(6)</sup>、E3717 に搭載した。図5に概略の断面を示す。これは、方形導波管の TE10 モードから円形導波管の TE11 モードに変換し、さらに円形テーパ導波管により窓径 51 mm まで拡大した構造である。伝送主モードを TE11 モードとすることによりセラミック板に垂直な電界を低減させ、かつセラミック板表面での電界強度を低減させている。

窓は単体で KEK のレゾナントリングで大電力試験を実施した。その結果透過電力 84 MW, パルス幅 700 ns, および 132 MW, 300 ns を達成している。

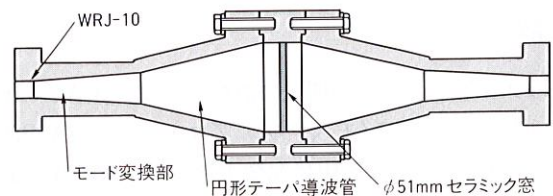


図5. TE11 ホーン型出力窓の概略断面 セラミック窓を φ 51 mm にまで拡大し、さらに伝送主モードを TE11 モードとすることにより、透過電力を大幅に高めた。

Schematic drawing of TE11 horn type output window developed by KEK

## 4 試験結果

図6に得られた特性結果を示す。ビーム電圧 505 kV, RF パルス幅 100 ns, 出力 54 MW で安定に動作することを確認した。またシミュレーションともよく一致している。RF パルス幅 300 ns では出力 30 MW レベルまで達成している。出力窓も発光など異常現象はなく、KEK で各種コンポーネントの試験用の仕様を達成した。

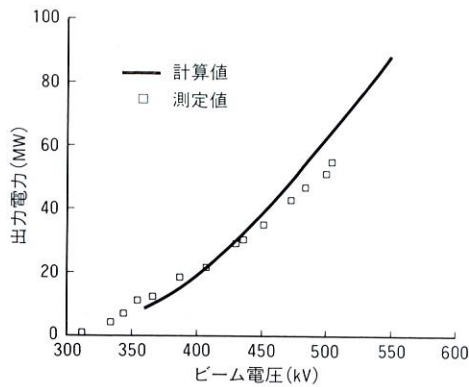


図6. E3717の動作特性結果 シミュレーションと実測値とはよく一致しており、さらに設計の最適化により大幅な性能向上を目指す。  
Measured and calculated performance of E3717

## 5 あとがき

LC用の80 MW級Xバンドパルスクライストロンの開発を行っている。今回、ディスク装荷型進行波出力回路、およびTE11ホーン型出力窓を搭載したクライストロンを製作し、ビーム電圧505 kV、RFパルス幅100 nsで出力電力54 MWを確認し、Xバンドリニアックなどのコンポーネント試験用としての仕様を達成した。また、さらにRFパルス幅を300 ns以上に延ばして試験、評価を続けている。

引き続き、効率出力向上を図ること、信頼性の向上を図ることを主眼にLC用のクライストロンの開発に取り組んでいく。

## 謝辞

このクライストロンの開発にあたっては、SLACのG.A. Loew 副所長、BINP (モスクワ、プロトビノ)のV.Balakin 所長、およびKEKの高田研究総主幹から多大の技術指導、

情報提供をいただいた。ここに謝意を表する。

## 文献

- (1) JLC Group: JLC-I, KEK Report 92-16, (1992)
- (2) J. Odagiri, et al: FCI Simulation on 100 MW Class Klystron at X-band. Proceedings of the 1994 International Linac Conference, 1, pp.469-471 (1994)
- (3) 木村 栄, 他: 電子管用含浸型カソード, 電子情報通信学会研究会資料, ED89-120, pp.15-22 (1989)
- (4) T. Shintake: Nose-Cone Removed Pillbox Cavity for High-Power Klystron Amplifiers, IEEE Trans. on Electron Devices, 38, 4, p.917 (1991)
- (5) H. Mizuno, et al: X-band Klystrons for Japan Linear Collider, 4th European Particle Accelerator Conference (EPAC94), London, U.K. June 27-July 1 (1994)
- (6) Y. Otake, et al: Development of TE11 Mode X-band RF Window, Proc. of the 9th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp.87-89 (1994)



水野 元 Hajime Mizuno, Ph.D

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設教授, 学術博。  
加速器の真空, 高周波の研究に従事。  
High Energy Accelerator Research Organization



岩瀬 光央 Mitsuo Iwase

電子デバイス事業部 電子管技術部主務。  
大電力クライストロンの開発設計に従事。  
Electron Tubes & Devices Div.



米澤 宏 Hiroshi Yonezawa, D.Eng.

電子デバイス事業部 電子管技術部グループ長, 工博。  
大電力クライストロンの開発設計に従事。電子情報通信学会会員。  
Electron Tubes & Devices Div.



大家 圭司 Keiji Ohya

電子デバイス事業部 電子管技術部参事。  
大電力クライストロンの開発設計に従事。電子情報通信学会会員。  
Electron Tubes & Devices Div.