

DEVELOPMENT OF L-BAND, 10MW MULTI BEAM KLYSTRON

M.Irikura¹, S.Miyake, A.Yano, Toshiba Electron Tubes & Devices Co., Ltd., Japan

S.Kazakov, A.Larionov, V.Teryaev, BINP, Russia

Y.H.Chin, KEK, Japan

Abstract

A 10-MW, L-band multi beam klystron (MBK) for TESLA linear collider and TESLA XFEL has been under development at Toshiba Electron Tubes & Devices Co., Ltd.(TETD) in collaboration with KEK. The TESLA requires pulsed klystrons capable of 10 MW output power at 1300 MHz with 1.5 ms pulse length and a repetition rate of 10 pps.

The MBK with 6 low-perveance beams in parallel enables us to operate at lower cathode voltage with higher efficiency. The design work has been accomplished and the fabrication is under way. We are going to start conditioning and testing of prototype #0 in the middle of July 2004. The design overview will be presented.

Lバンド,10MW マルチ・ビーム・クライストロンの開発

1. はじめに

東芝電子管デバイス株式会社は高エネルギー加速器研究機構と共同で、DESYが計画中のTESLA計画^[1]およびXFEL計画^[2]に使用するLバンド10MWのマルチ・ビーム・クライストロン(MBK) E3736を開発中である。MBK E3736の設計パラメータを表1に示す。

Litton社のSymonsによるRFへの変換効率 η とビームパービアンس P ($I/V^{3/2}$)の関係を以下のようなスケールリング則として報告している^[3]

$$\eta(\%) = 90 - 20 \times P(\mu\text{perv.})$$

通常のクライストロンで1本の電子ビームを用いた場合は、パービアンスが $3.4 \times 10^{-6} I/V^{3/2}$ となるため30%以下の効率しか期待できない。動作電圧を上げることでパービアンスを下げ効率を向上させることが可能であるが、電子銃の耐電圧等を考えると実現可能な効率は最大50%程度と推定される。MBKでは複数の低パービアンスの電子ビームを用いることで、低い動作電圧で高効率動作が行えるのが最大の利点である。本クライストロンでは6本のパービアンス

以上の効率を目指している。本論文では以下にこのような特性を得るための設計の概要について述べる。

2. 電子銃部の設計

MBK E3736は円周上に等間隔に配置された6個のカソードを有している。通常のクライストロンのように中心軸上を電子ビームが通過しないため、以下に示す検討が必要である。

- 個々の電子銃にとって磁極形状が軸対象でないため、他の電子銃部ビームトンネルからの漏れ磁界の影響
- 他の電子銃の電子ビームが作る磁界の影響
- 個々の電子銃にとって電極形状が対象でないための電界分布の偏りと、他の電子ビームが作る空間電荷の影響

以上を検討した結果、これらの影響は無視できるほど小さく、個々の電子ビームの軌道は2次元モデルでの解析で十分である。図1に2次元モデル(DGUN^[4])で計算したシングルビームの電子軌道シミュレーションの例を示す。リップルの少ない良好な電子ビームが得られている。電子銃部に設置したバックリング・コイルによってビーム軌道を改善している。また、電子銃と入力空洞とのあいだに位置するマッチング・コイルによって軌道を調整可能である。



図1. E3736の電子銃設計

構造設計ではさらに、熱膨張による電子銃そのものの軸方向、径方向への移動、集束電極の非対称な

表1. 東芝E3736の設計パラメータ

Operating Frequency	1300	MHz
Peak Output Power	10	MW
Average Output Power	150	kW
Beam Voltage	115	kV
Beam Current	132	A
Efficiency	>65	%
RF Pulse Duration	1.5-2.0	ms
Repetition Rate	10	pps
Saturation Gain	47	dB
Number of Beams	6	
Number of Cavities	6	
Cathode Loading	<2.1	A/cm ²
Solenoid Power	<4	kW

が $0.56 \times 10^{-6} I/V^{3/2}$ の電子ビームを用いることで65%

¹ masao.irikura@toshiba.co.jp

膨張がMBKでは問題となる。単一ビーム管と異なることは、各カソードが中心軸からずれているので、実際の動作温度における位置が組み立てるときの位置と異なるためである。そこで、ANSYSにより熱解析をおこなうことによって室温における寸法を決定した。図2はANSYSによる熱解析結果の例である。カソードが動作温度(約100°C)に達した場合には、径方向で最大1.1mm、軸方向には最大1.7mm膨張することがわかった。そこで、この熱膨張による寸法変化を見込んで電子銃の部品および組み立て寸法を決定した。

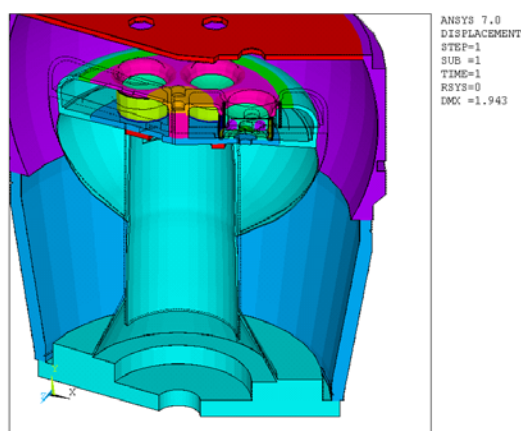


図2. ANSYSによるシミュレーション結果

3. 中間空洞設計 FCI シミュレーション

E3736は6空洞をもつクライストロンである。各空洞は各ビームに共通なリング形状をした、 TM_{010} モードで動作する同軸空洞を採用した。同軸構造をとることで空洞径を大きくとれ、6本のビームを空洞内に等間隔に配置したことで、ビーム管の間隔を大きくすることができ、その結果、カソード・ローディングを $2.1A/cm^2$ 以下とすることができた。カソードローディングは電子銃の寿命を決定するとなる重要なパラメータであり、 $2.1A/cm^2$ 以下に低減できたことで、要求される期待寿命40,000時間を達成できる値である。

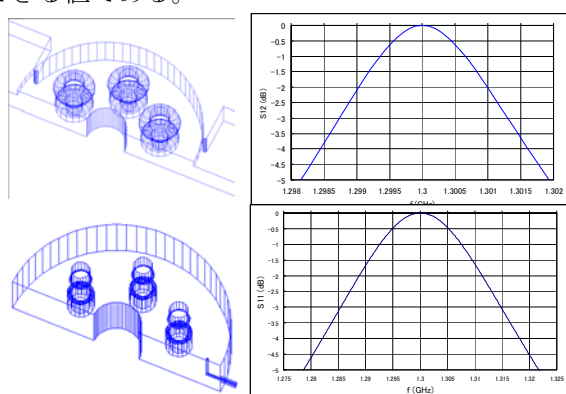
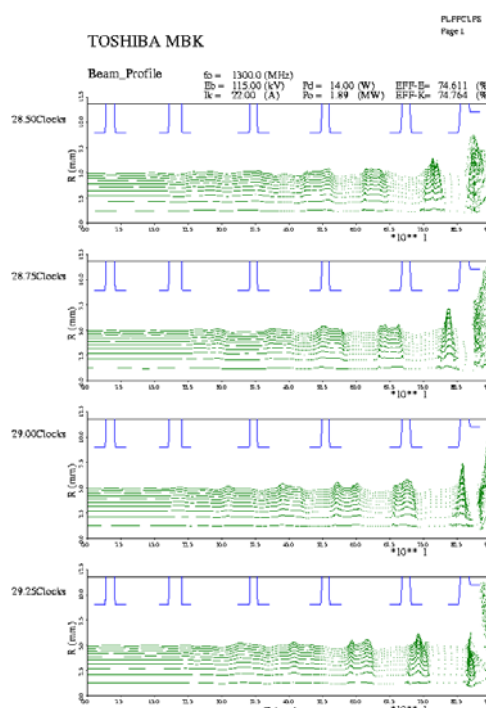


図3. 入力空洞および出力空洞のモデル

図3は入力空洞と出力空洞をHFSS^[5]で計算したモデルと結果を示している。空洞の Q_{ext} は相互作用シミュレーションからの要求を満足するよう空洞カップリングを調整した。

空洞配置はビーム電圧の変化に伴う位相感度の要求を満たすために、第3空洞を高調波空洞とし全長を短くしている。空洞の相互作用のパラメータはFCI(2+1/2次元 PICコード)^[6]にて最適化した。シミュレーションによれば、励振電力150Wにおいて効率は75%が期待できるという結果が得られている。また、このときの出力空洞のギャップ電圧は115kV/cmで実用上問題ない値である。図4にFCIでのシミュレーション結果を示す。出力空洞部で逆行する電子も認められず安定した動作が期待できる。



4. 出力窓

E3736はパルス幅が長く平均パワーが高いため、電圧のピーク値を半減させるために2つの出力窓を備えている。

出力窓はpillbox窓とし、出力導波管はWR650である。空間配置の制限から、出力空洞とは扁平導波管で結合させている。また、扁平導波管側にポストを設けて反射が最小になるよう調整した。図5は出力部のHFSSでのモデルと計算結果を示したものである。

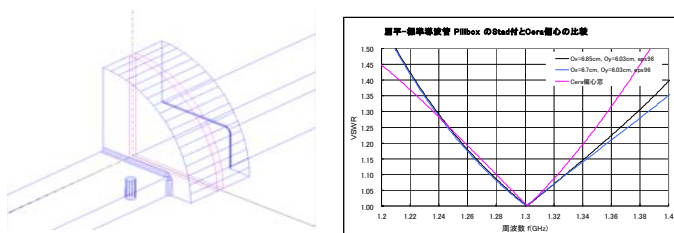


図5. 出力部のモデルと計算結果

5. まとめ

以上、MBK E3736の設計をKEKと共同して行った。各空洞は各ビームに共通なリング形状をした、 TM_{010} モードで動作する同軸空洞を採用することで、カソード・ローディングを $2.1A/cm^2$ 以下とすることができ、これによって長寿命動作が期待できる。通常の単ビームのクライストロンと異なり、中心軸を通らない各ビームの相互作用等の検討から、2次元の計算での十分な精度が得られるよう、磁場設計を行った。カソードが動作温度に達した際の電極の熱変形はMBK設計において重要である。

本設計はDESYとの間で2003年7月にレビューを行い、本設計に基づいてプロトタイプを試作することを合意した。図6は試作したプロトタイプ1号機の



図6. MBK E3736の外観

外観写真で2004年7月中旬より試験を開始する予定である。試作管の全長は2.2m、重量は約330kgである。

参考文献

- [1] TESLA, "The superconducting Electron-Positron Collider with Integrated X-ray Laser Laboratory, Technical Design Report, DESY 2001-011, ECFA 2001-209, TESLA report 2001-23, TESLA-FEL 2001-05, March 2001
- [2] TESLA XFEL, First Stage of the X-Ray Laser Laboratory, Technical Design Report Supplement, DESY 2002-167, TESLA-FEL 2002-09, October 2002
- [3] R.S. Symons, "Scaling laws and power limits for klystrons", IEDM, 1986
- [4] BINP, VLEPP DGUN User's Manual
- [5] Ansoft Corporation, HFSS 3 D EM Simulation software for Rf 6 wireless design
- [6] T. Shinkake, KEK Report 90-3, May 1990