

X-band 6 MW パルスクライストロンの開発

DEVELOPMENT OF AN X-BAND 6 MW PULSED KLYSTRON

大久保 良久[#], 田中 敏文

Yoshihisa Okubo[#], Toshifumi Tanaka

Toshiba Electron Tubes & Devices Co., Ltd.

Abstract

An X-band klystron (TOSHIBA E37113) has been developed for the CLIC project of CERN. The klystron E37113 is designed to be able to generate 6 MW of peak power with frequency of 11.9942 GHz. The first klystron uses a traveling-wave structure in the output circuit, which aims to efficiently extract the rf-power from the electron beam with reduced electric field, and a traveling wave type pill box output window, which aims to reduce electric field and thermal stress in the ceramics. The first klystron has been manufactured and test will be started in August, 2014. This paper describes the design details and measured data in the first klystron manufacturing.

1. はじめに

CERN では次期大型加速器計画として常電導の X バンド加速器による CLIC (The Compact Linear Collider) 計画を推進しており^[1], この計画での X バンド加速器コンポーネントの開発のため、4 台のピーク RF 出力 6 MW の X バンドクライストロンの RF 出力を合成し、数十 MW の RF 源とするテスト施設 Xbox-3 の建設を行っている^[2]。東芝電子管デバイス株式会社では Xbox-3 向けに周波数 11.9942 GHz、ピーク RF 出力 6 MW のパルスクライストロン E37113 の開発を行っている。2014 年に初号管の性能確認を行い、2015 年に 3 式の製造を行う計画である。E37113 の設計では、スケーリングによる動作周波数と電界強度の関係から要求される技術レベルを確認し、従来の S バンドおよび C バンドクライストロンでの実績より設計方針を決定し、詳細設計で設計パラメータ確定を行なった。本報告は、初号管の設計ならびに製作での特性確認結果について行う。

2. 設計

2.1 設計の概要

一般にクライストロンの RF 出力電力の上限は周波数に対して相関があり、同一の RF 出力電力であっても高い周波数で動作するクライストロンの開発難易度は上がる。E37113 設計ではドリフト中の電流密度、出力空洞の電界強度、出力窓での電界強度および熱応力の概算値を計算し、既存のクライストロンとの比較により要求される技術レベルを予測し設計方針を決定した。Table1 に E37113 の仕様値と概略検討により決定した設計目標値を示す。

クライストロンの高周波回路の電圧は RF 出力電力によりおおよそ決まるが、クライストロン動作周波数が高くなると、同じ電圧でも波長が短くなるた

めに高周波回路での電界強度が上がる。波長と高周波電界強度の関係から、周波数と RF 出力電力については、出力空洞、出力窓に対し式(1)~(3)で表せる。これらの式では放電限界の電界強度がパルス幅の 1/3 乗に比例し^[3]、周波数にはよらないと仮定している。また、動作効率の変化は考慮していない。

Table 1: Specification and Design Target

Parameters	Unit	Specification	Design target
RF Frequency	GHz	11.9942	11.9942
Peak RF power	MW	≥6	6
Power Efficiency	%	>40	≥45
Power Gain	dB	-	≥43
RF pulse length	μs	≥5	5
Pulse repetition rate	pps	400	400
RF average power	kW	≥12	12
Peak beam voltage	kV	-	≤175
Peak beam current	A	-	≤115
Output cavity type	-	-	3 cell
Number of window	-	-	one
Waveguide size	-	-	WR-90

出力窓電界強度：

$$f \cdot \sqrt{P_p} \cdot \tau^{\frac{1}{3}} \sim const. \quad (1)$$

出力空洞電界強度：

$$f \cdot \left(\frac{P_p}{perv} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot \tau^{\frac{1}{3}} \sim const. \quad (2)$$

[#]yoshihisa.ookubo@toshiba.co.jp

出力窓熱応力：

$$f \cdot P_{av} \sim const. \quad (3)$$

P_p : Klystron peak output power
 P_{av} : Klystron average output power
 τ : RF pulse duration
 $perv$: Beam perveance

E37113 のパラメータをスケーリング式(1)~(3)により S バンドと C バンドでの RF 出力電力へ換算した値を Table 2 に示す。このスケーリングより出力空胴と出力窓に関しては E37113 では C バンドのピーク RF 出力 50 MW^[4]と同等の設計が必要と判断し出力空胴を 3 セルの $\pi/2$ モードマルチセル空胴とした。出力窓は低い電界強度にできる進行波型窓による単窓構造とした。

Table 2: Scaled Output Power from E37113 Parameter

Parameters	Unit	C-band	S-band
RF Frequency	GHz	5.712	2.856
RF pulse length	μ s	3	4.5
Scaled power			
for window by (1)	MW	37	114
for output cavity by (2)	MW	58	298
for window by (3)	kW	25	50

2.2 設計詳細

電子銃部

E37113 の最終的な設計パラメータを Table 3 に示す。電子銃はパービアンス $1.55 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ の 2 極管で、電子ビームの集束は電磁石集束方式である。動作電圧、カソード電流密度および電極電界強度は工業用途、医療用途で実績のある RF 出力 7 MW 級の S バンドパルスクライストロンと同等の値とした。

相互作用部

相互作用部は 5 空胴構成で、出力空胴は電界強度を下げ動作効率を確保するため Figure 1 に示す $\pi/2$ モード進行波型 3 セル空胴とした。ドリフト径は、ビーム径は細くなるが寄生発振のリスクを下げるため、上流側を TE11 モードの 2 倍高調波に対しカットオフとした。相互作用部のパラメータはビームシミュレーションコード FCI^[5]により決定し、入出力空胴の形状は 3 次元電磁界解析コード HFSS^[6]を用い決定した。Figure 2 にマルチセル出力空胴の導波管と結合する第 3 セルの $\pi/2$ モード共振時の電界強度分布を示す。第 3 セルは、セル中心をオフセンターとし、電界と電子ビームの相互作用が効率良く行われる様ドリフト中の電界分布を対称化した。入力空胴も同様に電界対称化のため同様にオフセンター配置とした。Figure 3 に、FCI で決定した空胴パラメータを用い FCI での空胴電界の取り扱いと同じ等価回路法で計算した軸上電界強度と HFSS で決

定した出力空胴のゼロ、 $\pi/2$ 、 π モードの軸上電界強度の比較を示す。クライストロンの動作周波数に近い $\pi/2$ モードの電界強度分布は、等価回路と HFSS の結果がほぼ一致しており FCI で決定したパラメータを有する空胴形状となっていることが分かる。

Figure 4 に FCI によるビームプロファイル等の計算結果を示す。Figure 5 および Figure 6 に FCI による入出力特性ならびに飽和特性を示す。Figure 7 には瞬時帯域特性を示す。ビーム電圧 150 kV、励振電力 110 W で RF 出力 6.4 MW が期待できる。出力空胴を 3 セル空胴とすることで 6.4 MW 出力時の空胴内の最大電界強度を 49 kV/mm と従来のパルスクライストロンの実績値内とした。

Table 3: Design Parameters

Parameters	Unit	Target	Simulation
RF Frequency	GHz	-	11.9942
Peak RF power	MW	≥ 6	6.4
Efficiency	%	≥ 45	47.5
Gain	dB	≥ 43	47.6
Beam perveance	$\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$	-	1.55
Peak beam voltage	kV	≤ 175	150
Peak beam current	A	≤ 115	90
Cathode loading	A/cm ²		6@90 A
Max. Electric field			
Electron gun	kV/mm	≤ 25	18.4@175 kV
Output structure	kV/mm	≤ 50	49@6.4 MW
On window ceramic	kV/mm	≤ 5.7	4.3@6 MW
Equivalent stress at window ceramics	MPa	≤ 13	10@12 kW

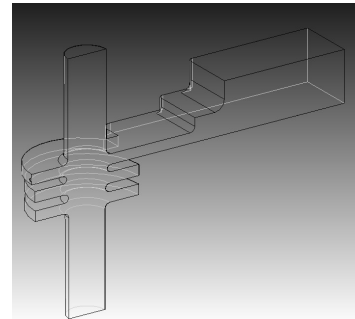


Figure 1: 3-cell type output structure.

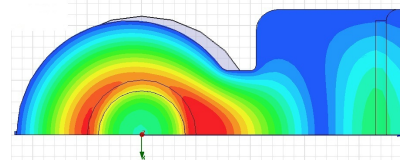


Figure 2: Electric field of 3rd cell at $\pi/2$ mode resonance.

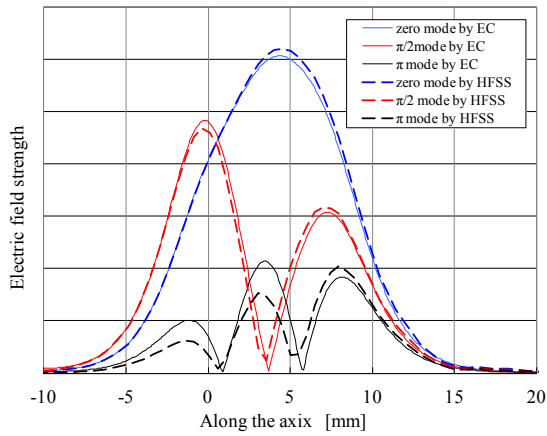


Figure 3: Electric field strength of the output structure.

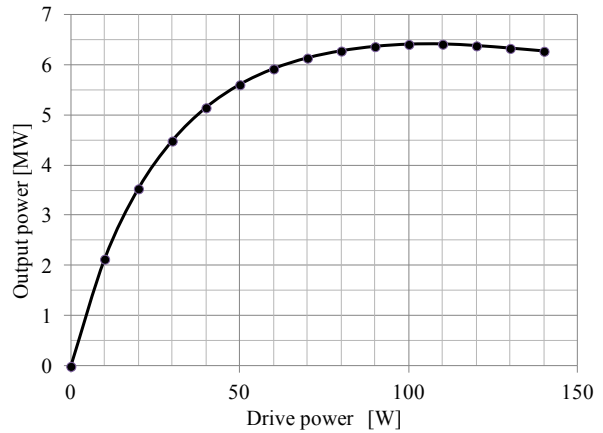
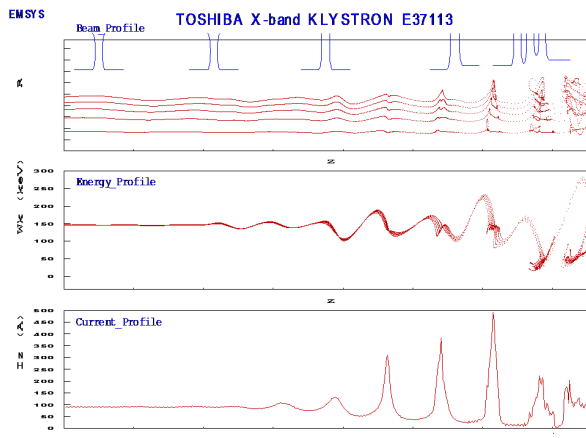
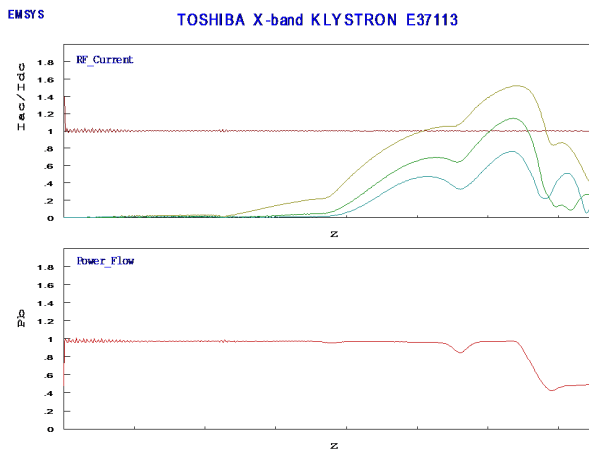


Figure 5: Transfer characteristics (Beam voltage: 150 kV).



a. Beam profile, energy profile and current profile



b. RF current and Power flow

Figure 4: Beam simulation results by FCI code (Beam voltage: 150 kV/ Beam current: 90A, Drive power: 110 W).

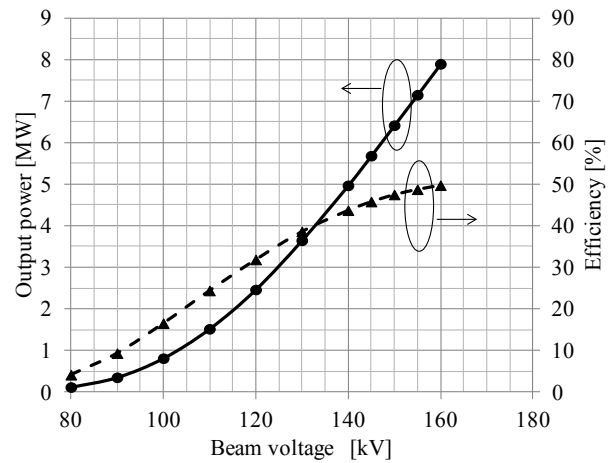


Figure 6: Saturated output (Drive power: 110 W).

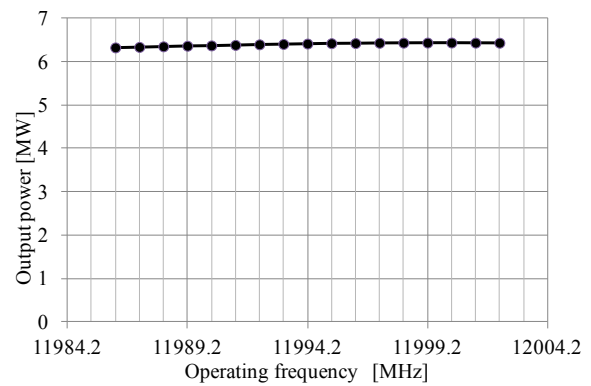


Figure 7: Frequency band width (Beam voltage: 150 kV, Drive power: 110 W).

出力窓部

増幅した RF は WR-90 の導波管から出力される。6 MW の RF 透過時の導波管内の電界強度は S バンドクライストロンの 50 MW の RF 透過時の値とほぼ同じ 6.9 kV/mm である。E37113 では新規に開発した 50 MW C バンドパルスクライストロンと同型の進行波型窓⁷⁾とすることで出力窓中の電界を S バンド 50 MW クライストロンの動作値より低く抑え

た。セラミックは 99.7%以上の高純度低損失アルミナセラミックスを使用している。Figure 8 に HFSS による中心軸上の電界強度分布を示す。6 MW の RF 透過時のセラミック中心の電界強度は 2.9 kV/mm であり、セラミック表面の最大電界強度は 4.3 kV/mm である。S バンド 50 MW パルスクライストロンの出力窓セラミック中心 3.8 kV/mm、セラミック表面最大 5.7 kV/mm に対し各々約 3/4 の値で動作実績内である。出力導波管は真空で使用され、セラミックには 2 次電子によるマルチパクタ抑制のため TiN コーティングを実施した。Figure 9 に出力窓の HFSS による帯域特性の計算結果を示す。セラミックの誘電率 9.8 での動作周波数での VSWR は 1:1.01 である。

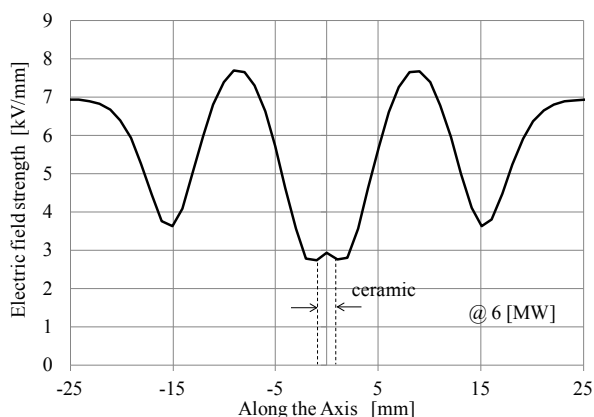


Figure 8: Electric field strength of the output window.

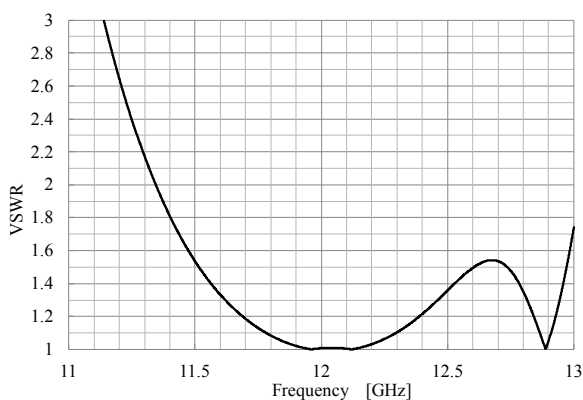


Figure 9: Frequency band width of output window.

全体構成

Figure 10 にクライストロンと集束コイルの全体図を示す。クライストロンは全長 0.94 m、X 線シールドを含め重さ約 150 kg (クライストロン本体のみ約 45 kg) である。

3. 初号管評価

初号管は 2014 年 7 月にベーキングを完了しており、8 月より評価試験を開始する予定である。Figure 11 にクライストロン本体の外観写真を示す。初号管製作において各部の特性確認を行い設計パ

ラメータ通りであることを確認した。ここでは、主要な部位である出力空洞と出力窓の特性確認結果を示す。

出力空洞

出力マルチセル空洞の周波数特性は第 3 セルの導波管より励振し、第 3 セルのコレクタ側ドリフトよりプローブにて検出し測定した。この透過特性よりマルチセルのパラメータの確認ができる^[4]。第 3 セルの透過特性の測定結果とシミュレーション結果を Figure 11 に示す。初号管の特性とシミュレーション結果は良く一致しており所望のパラメータであることが確認できた。

出力窓部

Figure 12 に出力窓の反射特性の測定結果とシミュレーション結果を示す。動作周波数 11.9942 GHz での VSWR の測定値は 1:1.04 であり良好な特性である。

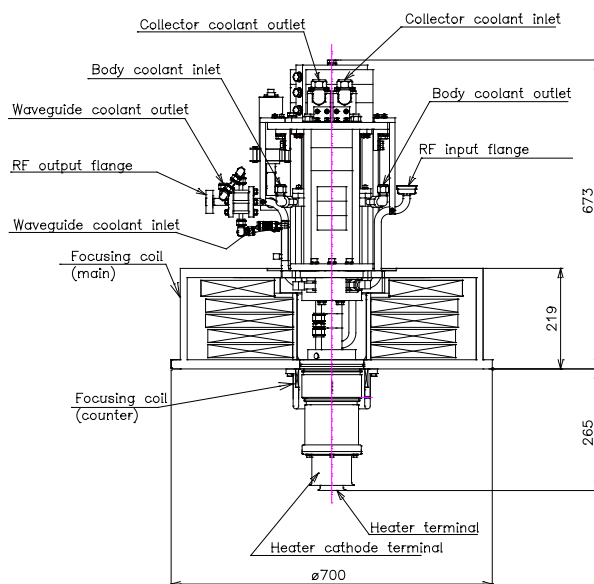


Figure 10: Klystron E37113 and focusing magnet.



Figure 11: Picture of the first klystron.

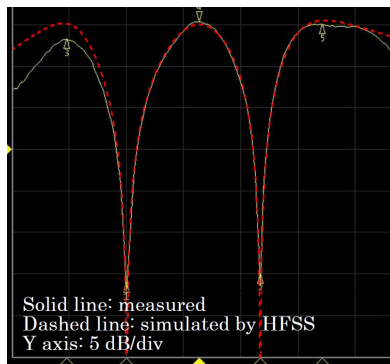


Figure 12: Transmission characteristics of output structure (solid-measured data, dashed- by simulation).

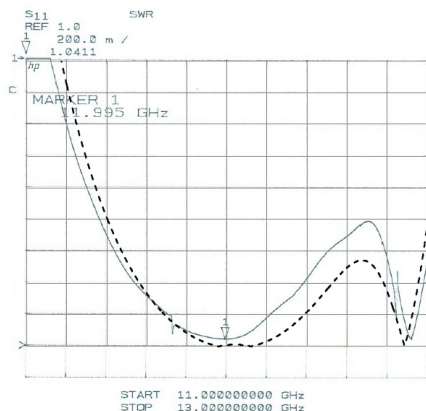


Figure 13: Reflection coefficient of output window (solid-measured data, dashed- by simulation).

4. おわりに

Xバンドパルスクライストロン E37113 は RF 出力電力が 6 MW と比較的小出力ではあるが、動作周波数が高いことから出力空洞と出力窓が高い電界強度となる。電界強度を低減するため、出力空洞は 3 セル進行波型、出力窓は進行波型窓とし、従来の C バンド、S バンドクライストロンで実績のある値内とし高い信頼性の期待できる設計とした。本設計の初号管は組み立て時のパラメータ確認で、クライストロン動作に於いて重要な部位である、出力空洞、出力窓が設計通りのパラメータであることを確認した。初号管は本年 7 月にベーキングを完了しており、8 月より評価試験を開始する。今後は、初号管の評価を進め、結果を確認後、Xbox-3 用としてさらに 3 本の製作を行う計画である。

本クライストロンの開発にあたりましては、CERN Xbox-3 の関係各位には種々のご協力をいただきました。深く感謝いたします。

参考文献

- [1] <http://home.web.cern.ch/about/accelerators/compact-linear-collider>
- [2] N. Catalan, “Progress on X-box-2 and 3”, CLIC Workshop 2014, Geneva, Swiss, 2014.
- [3] Y. Ohkubo, et. al. “S-band Long Pulsed Klystron for the FELI linac”, Proc. the 20th linac meeting in Japan, 1995.
- [4] 大久保他, “50MW C バンドパルスクライストロンの高効率化”, 信学技報, ED99-498 (1999-12), pp7-12.
- [5] T. Shintake, “FCI field charge interaction program for high-power klystron simulation”, Proc. 1989 PAC, March, 1989, Chicago, USA.
- [6] <http://ansys.jp/products/electromagnetics/hfss/>
- [7] H. Matsumoto, et. al., “Development of the C-band (5712 MHz) high power waveguide components”, Proc. 1997 PAC, May, 1997, Vancouver, BC, Canada, 1997.