

X-band 6 MW パルスクライストロンの開発 DEVELOPMENT OF THE X-BAND 6 MW PULSED KLYSTRON

阿武 俊郎[#], 大久保 良久, 田中 敏文
Toshiro Anno[#], Yoshihisa Okubo, Toshifumi Tanaka
Toshiba Electron Tubes & Devices Co., Ltd.

Abstract

The X-band pulsed klystron (Toshiba E37113) has been developed for the Compact Linear Collider (CLIC) project for CERN. The klystron is designed to generate 6 MW of peak power with RF pulse width of 5 μ s at frequency of 11.9942 GHz. Four klystrons are planned to be used in the test stand, called Xbox-3, under construction at CERN. RF power generated from the klystrons will be combined to 80 MW with 300 ns pulse width in the test stand. We manufactured the first tube based on the design reported previously and tested the tube in August 2014. The first tube achieved the target performance of 6 MW peak power with 5 μ s pulse width. The beam voltage was 152 kV and the efficiency was 41 %. Three tubes of the series production followed by the first tube also achieved the target performance. In this report, we show the detailed results of the klystron tests.

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 Compact Linear Collider (CLIC) 計画を推進している^[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、80 MW-300 ns の RF 源とするテスト施設 Xbox-3 の建設が CERN で進められている^[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 年の本学会においてこのクライストロンの設計について報告し^[3]、初号管の評価試験を 2014 年 8 月に実施した。その結果 RF パルス幅 5 μ s の動作で RF 出力 6 MW の目標性能を確認した。その後初号管と同設計の量産管を 3 台製造しいずれも目標性能を確認した。本報告はクライストロンの試験結果について行う。



Figure 1: X-band pulsed klystron E37113.

2. 試験方法

クライストロンの外観写真を Figure 1 に示す。全長は約 940 mm、重量は約 150 kg である。2014 年の本学会で報告の通り、空洞ならびに出力窓の特性は設計通りであることを確認している^[3]。このクライストロンは電磁石集束方式であるため、専用の集束コイルとともにクライストロン試験装置のオイルタンクに設置し、Figure 2 に示す構成で試験を行った。立体回路に接続したダミーロードに一定流量の冷却水を流し、ダミーロードへの冷却水の入水温度と出水温度をサーミスタで測定した。冷却水の温度上昇からカロリメトリック法でクライストロンの RF 出力を求めた。

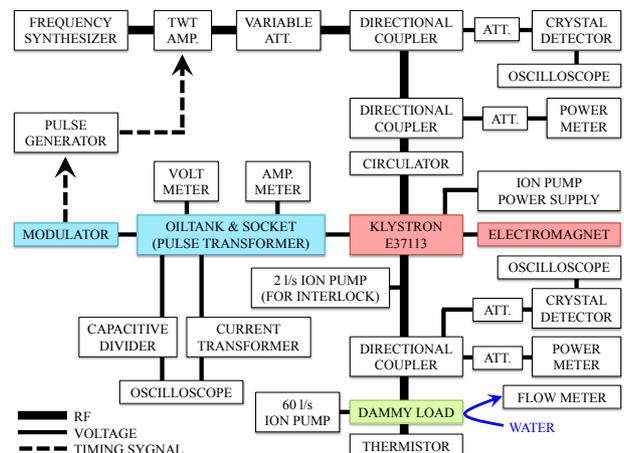


Figure 2: Configuration of klystron test stand.

[#] toshiro.anno@toshiba.co.jp

3. 試験結果

3.1 初号管の試験結果

2014年8月に初号管の評価試験を実施した。試験結果を Table 1 に示す。RF パルス幅 5 μs において RF 出力 6.0 MW がビーム電圧 152.4 kV で得られ、効率は 41.3%であった。定格運転における RF 出力波形を Figure 3 に示す。この波形は定格運転中安定していた。この結果から初号管で目標性能が得られたことを確認した。

ビーム電圧に対する飽和出力特性を Figure 4 に示す。パルス幅 3 μs の試験では 7 MW の RF 出力が 158.6 kV で得られた。入出力特性を Figure 5 に示す。入出力特性に不連続は見られなかった。周波数を ± 1 MHz 変化させた場合についても試験を行い、飽和出力の変化は見られなかった。また集束磁場強度を $\pm 5\%$ 変化させた場合の飽和出力の変化は 6 MW に対して 0/ +0.1 MW であった。初号管は CERN で 400 pps にてダイオード運転後、定格での RF エージングが行われている。

Table 1: Test Results of the First Tube

Parameters	Unit	Target	Test results
RF Frequency	GHz	11.9942	11.9942
Peak Output Power	MW	≥ 6	6.0
Power Efficiency	%	≥ 40	41.3
Power Gain	dB	≥ 43	49.7
RF Pulse Width	μs	5	5
Pulse Repetition Rate	pps	400	200
Peak Beam Voltage	kV	≤ 175	152.4
Peak Beam Current	A	≤ 115	96
Beam Perveance	$\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$	1.55	1.61
Drive Power	W	≤ 300	64

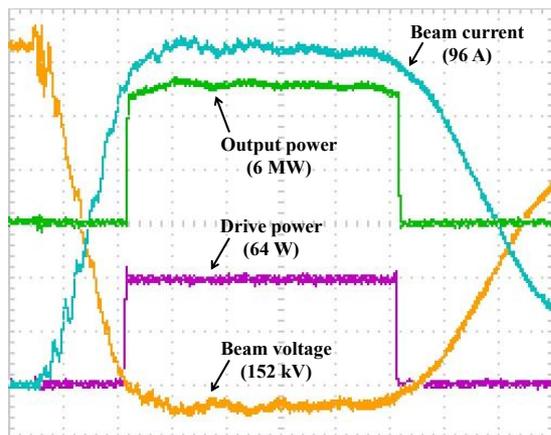


Figure 3: Waveforms of output power, drive power, beam voltage and beam current. (RF pulse width: 5 μs)

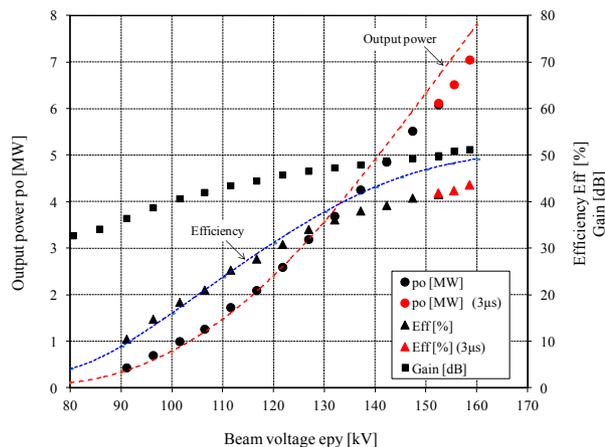


Figure 4: Saturated output characteristics. (Drive power: at saturation, Dashed line: beam simulation result)

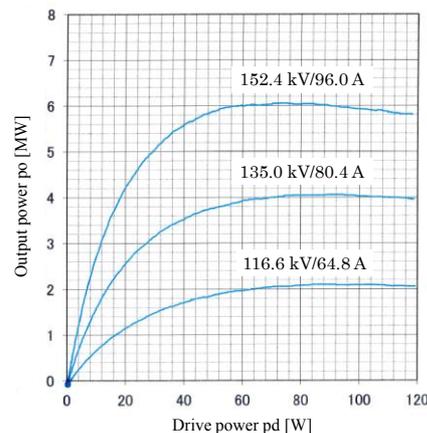


Figure 5: Input-output characteristics.

初号管の試験においてビーム電圧を 160 kV 以上に上昇させたところ、ビーム電圧と RF 出力の波形に変化が現れた。Figure 6 にこの波形を示す。ビーム電圧を上げるとパルス波形が立ち下がり側から立ち上がり側へ向けて変化し、それに伴い RF 出力が低下した。詳しく調査したところオイルタンクから RF 信号が検出された。この信号の波形を Figure 7 に示す。この結果からクライストロンでガンオシレーションが発生したと考えられる。ガンオシレーションは電子銃の寄生モードに電子ビームからエネルギーが供給されることで生じる発振である。スペクトラムアナライザでオイルタンクからの RF 信号の周波数を測定したところピークは 4.917 GHz であり、ドリフト管のカットオフ周波数よりも小さかった。クライストロンの RF 出力波形と比較すると発振は遅れて発生している。発振波形のパルス幅は電圧の上昇に伴いパルスの立ち上がり側に増加した。

発振開始電圧は集束磁場強度、励振電力および RF パルス幅とは関係がなく、カソードのヒータ電圧と関係が見られた。Figure 8 にヒータ電圧と発振開始電圧との関係を示す。ヒータ電圧の上昇とともに発振開始電圧も上昇した。ヒータ電圧の上昇により電子銃のホットディメンジョンが変化するため、

発振開始電圧に影響したと考えられる。

量産管では定格での電圧変動を考慮し、発振開始電圧を 165 kV 以上とすることを目標とした。

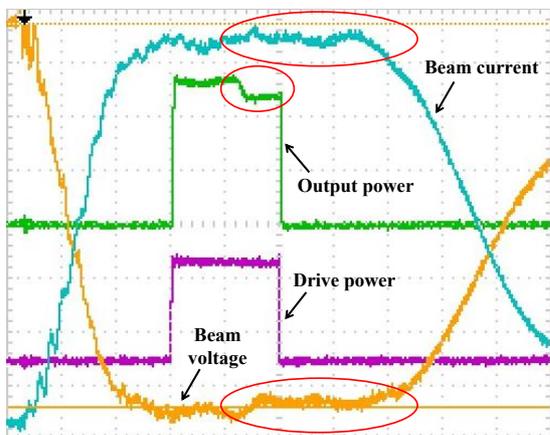


Figure 6: Waveforms of more than 160 kV beam voltage operation of the first tube. Circles mean instabilities. (RF pulse width: 2 μ s)

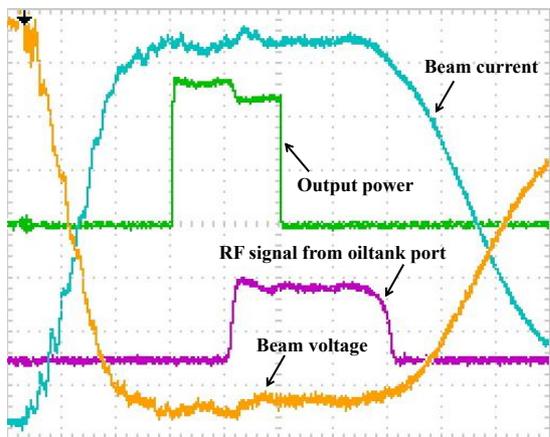


Figure 7: RF signal detected from oiltank port at more than 160 kV beam voltage operation of the first tube. (RF pulse width: 2 μ s)

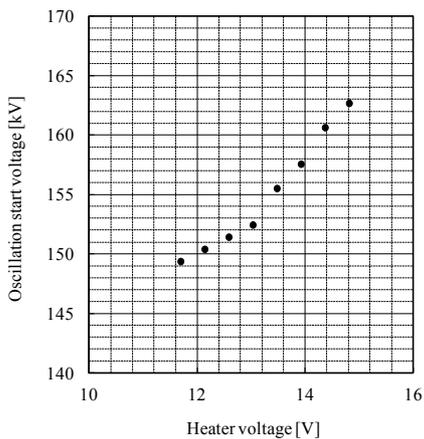


Figure 8: Relationship between heater voltage and oscillation start voltage of the first tube.

3.2 量産管の試験結果

クライストロンの量産にあたり、ガンオシレーション開始電圧を目標値以上とするための対策を行った。初号管のパービアンスは目標値の $1.55 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ に対して 3.9%大きい値であったが、パービアンスが高いとガンオシレーション開始電圧が低くなり定格のビーム電圧に近づくと考えられる。そこで2号管では初号管よりもパービアンスを下げ目標値の $1.55 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ に近づけるように組立て時に調整を行った。その結果ガンオシレーション開始電圧が目標値を満たす 165 kV となり、パービアンス調整によりガンオシレーション開始電圧を引き上げることができた。動作電圧に対する余裕は 6.1%であり初号管の 5%を上回った。

3号管および4号管でも同様の対策を行った結果、ガンオシレーション開始電圧はそれぞれ 168 kV、166 kV であり目標値を達成した。動作電圧に対する余裕はそれぞれ 8.7%、7.4%であった。

初号管から4号管のパービアンスとガンオシレーション開始電圧および電流の関係を Figure 9 に示す。パービアンスが小さい方がガンオシレーション開始電圧は高くなった。またガンオシレーションが始まるビーム電流はいずれも約 103 A であり、このビーム電流が閾値であると考えられる。以上の結果から、パービアンスは $1.54 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ 以下に管理すればよい。

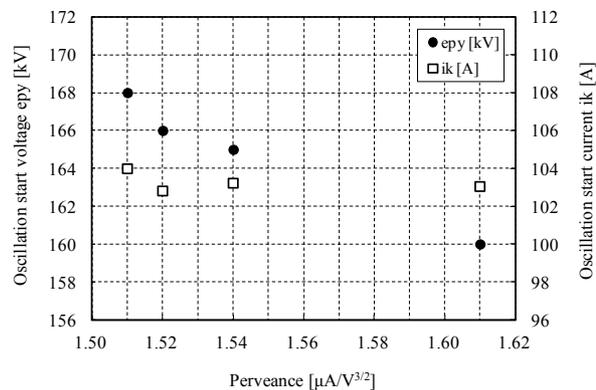


Figure 9: Relationship between beam perveance and gun oscillation start voltage or current.

2号管から4号管の評価試験は2015年5月~6月に実施した。試験結果を Table 2 に示す。また Figure 10 にビーム電圧に対する飽和出力特性を初号管の結果とともに示す。初号管と同様にいずれも目標性能が得られた。またパルス幅 4 μ s 以下の試験では RF 出力 7 MW で動作することを確認した。

Table 2: Test Results of Tubes of Series Production

Parameters	Unit	Target	Test results
			2 nd / 3 rd / 4 th
RF Frequency	GHz	11.9942	11.9942
Peak Output Power	MW	≥6	6.3/ 6.2/ 6.1
Power Efficiency	%	≥40	42.2/ 43.6 /43.0
Power Gain	dB	≥43	48.7/ 48.2/ 49.0
RF Pulse Width	μs	5	5
Pulse Repetition Rate	pps	400	200
Peak Beam Voltage	kV	≤175	155.5/ 154.5/ 154.5
Peak Beam Current	A	≤115	94.2/ 91.8/ 92.4
Beam Perveance	μA/V ^{3/2}	1.55	1.54/ 1.51/ 1.52
Drive Power	W	≤300	83/ 94/ 77

参考文献

- [1] <http://home.web.cern.ch/about/accelerators/compact-linear-collider>
- [2] N. Catalan, “Progress on Xbox-2 and 3”, CLIC Workshop 2014, Geneva, Swiss, 2014.
- [3] Y. Okubo, et al., “Development of an X-band 6 MW pulsed klystron”, Proceedings of the 11th Linear Accelerator Meeting in Japan, Aomori, Japan, 2014.

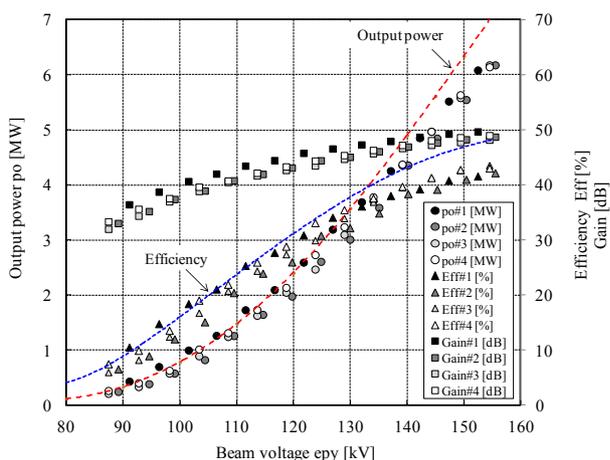


Figure 10: Saturated output characteristics of four tubes. (Drive power: at saturation, Dashed line: beam simulation result)

4. おわりに

CERN の CLIC 計画向けに X バンドパルスクライストロン E37113 の開発を行った。初号管の評価試験において RF パルス幅 5 μs の動作で RF 出力 6 MW の目標性能を確認した。初号管で判明したガンオシレーションに対して量産管で対策を行い、ガンオシレーションの開始電圧を目標値以上に引き上げることができた。2号管から4号管の評価試験でも目標性能を確認した。開発したクライストロンは今後 CERN のテスト施設 Xbox-3 で使用される。

本クライストロンの開発にあたり CERN Xbox-3 の関係各位にご協力をいただきました。深く感謝致します。