

[P7-25]

Development of the 50MW C-band Pulse Klystron

Yoshihisa OHKUBO, Hiroshi YONEZAWA, Hiroshi MATSUMOTO* and Tsumoru, SHINTAKE*

TOSHIBA Corporation, Display Devices and Components Company
1385, Shimoishigami, Ohtawara-shi, Tochigi-ken, 324-8550, JAPAN
*High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
*1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305, JAPAN

ABSTRACT

The third tube of the C-band 50 MW klystron (TOSHIBA E3746 series) has been developed for the high-energy accelerator applications. In the third tube design, the circuit-impedance in the output cavity was optimized to increase the power efficiency. This tube generated the rf power of 52 MW peak with 2.5 μ sec pulse width, and 47 % power efficiency at 50 pps repetition rate. The power efficiency could be increased about 3% as compared to the second tube, and the test performance of the developed klystron agreed well with the predictions of FCI-code.

50MW Cバンドパルスクライストロンの開発

1. はじめに

Cバンド加速器¹⁾用高周波源として開発を進めている50MW級のCバンドパルスクライストロンE3746は、1997年にシングルセル出力空洞を搭載した1号管²⁾³⁾にて、rfパルス幅1 μ sでrf出力51MW動作を、rfパルス幅2.5 μ sでは出力46MWを確認し、1998年には出力空洞を3セルの進行波型空洞とした2号管⁴⁾にてrfパルス幅2.5 μ s、出力54MWの動作を確認した。次いで開発を行った3号管では動作効率の向上、動作点の最適化のため、進行波型出力セルの設計変更を行い、1999年3月に実施した評価試験においてrfパルス幅2.5 μ s、出力53.5MW、効率47%の動作を達成し、2号管に対し3%の効率向上を確認した。

2. 設計

表1にE3746の目標性能を示す。2号管において、動作効率以外の目標は達成しており、3号管では効率向上を図るため、出力空洞部の設計変更を行っている。

図1にE3746シリーズの外観を示す。3号管は出力空洞部以外2号管と同構造であり、空洞部は全5空洞構成、出力回路は2つの出力導波管と出力窓からなり、出力窓からのRF出力は出力合成器により合成され1ポート出力として取り出される。3号管の出力空洞部は空洞のインピーダンスの見直しを行った3セルの進行波型空洞としている。

表1. 主要性能

Parameter		Unit
Output Power	50	MW
Operating Frequency	5712	MHz
Beam Voltage	350	kV
Beam Perveance	1.53	μ A/V ^{3/2}
RF Pulse Width	2.5	μ s
Pulse Repetition Rate	50	pps
Drive Power	< 500	W
Power Efficiency	45	%
Gain	> 50	dB

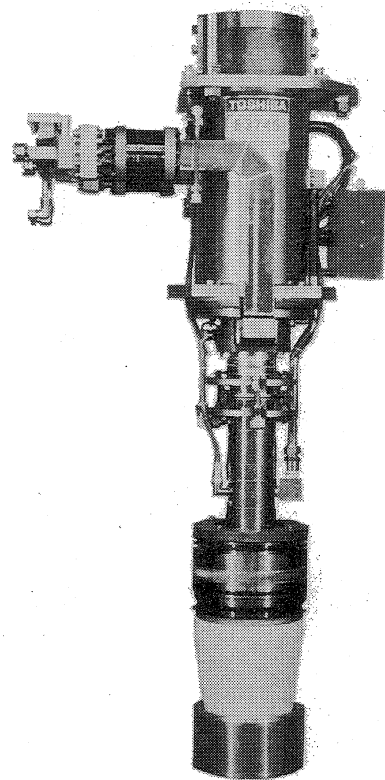


図1. E3746シリーズ外観

3号管での出力回路設計は2号管同様等価回路による設計手法⁴⁾⁶⁾に従った。この手法では電子ビームにより励振される各セルの高周波電流と各セルでの電子ビームの運動エネルギーを見積もり、各セルに発生させたい電圧を仮定することにより、各セルの結合係数、外部回路への結合係数(Q値)等を決定する。

3号管では空洞のインピーダンスを変更している。電子ビーム最外径のビーム結合係数Mを用いた各セルでの電子ビームの減速量の等価回路からの推定値を表2に示

す。2号管では電子銃にて加速された350keVの電子ビームを出力部にて平均エネルギー80keVまで減速する設計であるのに対し、3号管では出力セルにて加速エネルギーに等しい350keVの減速を行う設計とした。2号管では従来のシングルセル出力空洞での減速比並みとし不安定の原因となる戻り電子の発生し難い設計であるが、3号管では進行波型出力セルの電子ビームの加減速が進行波に乗って行われるので出力セルから電子銃側に戻る電子が発生し難いという特性を利用し、出力セルでの減速量を電子銃での加速電圧と同程度とし、高効率化を図っている。表2の括弧内に示した値はリングモデルシミュレーションコードFCI⁵⁾⁶⁾による各セル電圧より求めた最大径電子ビームの減速量である。等価回路による設計で目標値とした電圧がほぼ得られる出力回路となっている。

図2に出力セル断面図を示す。2号管と同様に第3セルの空洞壁をオフセンターとした2つの円で構成しており、2つのアイリスをドリフト管中心に近づけ、アイリスの影響により電界のしみ出しを補正し、電界分布を軸対称に近づけている。

表3によるFCIシミュレーション結果を示す。出力セルのインピーダンスを上げているため、各セルでの電界強度は2号管より平均で約25%増大しているが、シングルセルである1号管での値(45kV/mm)よりは低い値に抑えられている。3号管ではビーム電圧350kVの動作で出力52.5MW、効率47%が期待された。

表2 出力セルでの減速量見積もり
(設計目標値とFCIによる結果(括弧内))

Parameter	2nd tube	3rd tube	Unit
Total decelerating Voltage (FCI)	270 (256)	350 (332)	kV
1st Cell (FCI)	116 (106)	140 (131)	kV
2nd Cell (FCI)	93 (91)	128 (123)	kV
3rd Cell (FCI)	61 (59)	82 (78)	kV

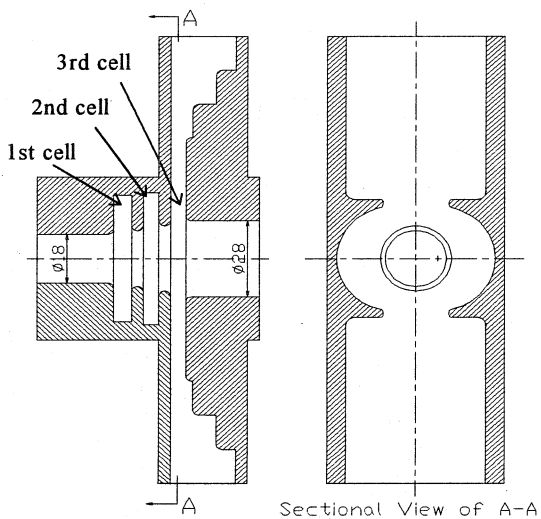


図2. 出力セル断面図

表3. FCIによるシミュレーション結果

Parameter	2nd Tube	3rd Tube	Unit
Output Power	49	52.5	MW
Operating Frequency	5712	5712	MHz
Beam Voltage	350	350	kV
Beam Current	317	317	A
Drive Power	300	300	W
Power Efficiency	44	47	%
Electric Field Gradient in Output Cavity	1st cell	27.5	33.1 kV/mm
	2nd cell	33.2	41.7 kV/mm
	3rd cell	26.9	34.3 kV/mm

3. 試験結果

2号管は1999年3月にKEKにて評価試験を行った。出力電力測定は熱量置換法を用いて平均電力測定により行った。図3にパルス繰り返し50ppsで測定した2, 3号管飽和出力特性を示す。3号管は2号管に比べ、低電圧での効率が改善し、350kVの動作点に効率のピークが設定されていることがわかる。ビーム電圧350kVでの効率は2号管の43%から46.5%に向上しており、ビーム電圧350kVで目標の出力50MWを達成している。また、飽和特性は2, 3号管のFCIシミュレーション結果と良く一致しており、出力電力の差は2%程度である。

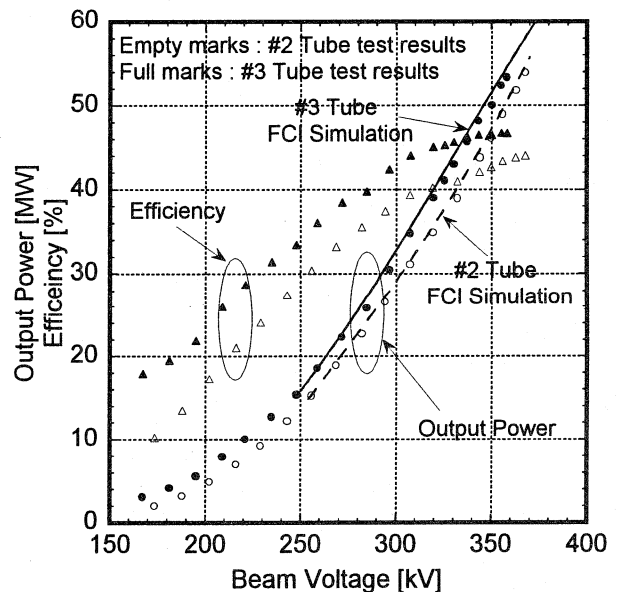


図3 2, 3号管の飽和出力特性

図4にビーム電圧354kV、rfパルス幅2μs、パルス繰り返し50ppsでの入出力特性を、図5にrfパルス幅2.5μs、rf出力53.5MW、パルス繰り返し50ppsでの出力波形とビーム電圧波形を示す。出力特性は滑らかで、出力波形は安定であり、不安定動作は見られず、動作は非常に安定である。

図6にビーム電圧350kVでの飽和出力の周波数特性を

示す。周波数 $5712 \pm 5\text{MHz}$ での出力電力の変動は 0.4dB 以内である。

表4に試験結果をまとめる。3号管ではビーム電圧 358kV で出力電力 53.5MW 、効率 47% 、ゲイン 54dB を確認し、2号管に対し 3% の効率向上を図ることができた。

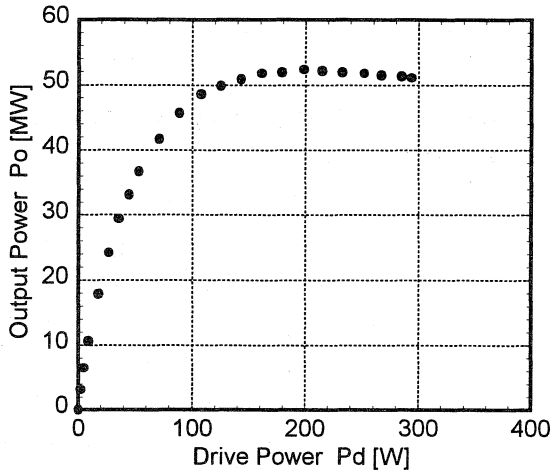


図4 3号管入出力特性
(ビーム電圧 354kV 、ビーム電流 315A)

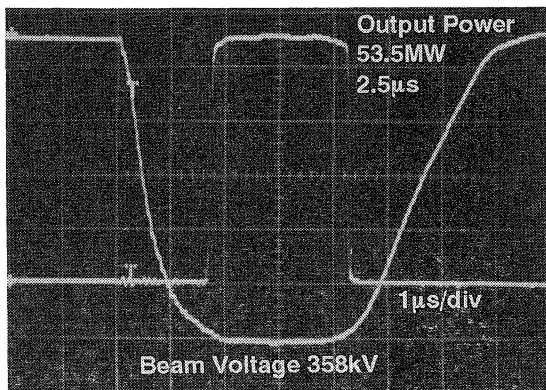


図5 3号管ビーム電圧及び出力電力波形

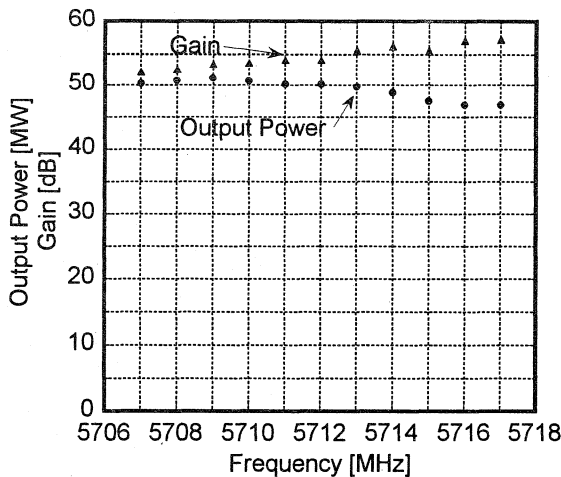


図6 飽和出力の周波数特性
(ビーム電圧 350.2kV 、ビーム電流 308.4A)

表4. 試験結果

Parameter	2nd	3rd	Unit
Operating Frequency	5712	←	MHz
Beam Voltage	368.7	358.1	kV
Beam Current	333.0	319.2	A
Output Power	53.9	53.5	MW
RF Pulse Width	2.5	2.5	μs
Pulse Repetition Rate	50	50	pps
Drive Power	259	238	W
Power Efficiency	43.9	46.8	%
Power Gain	52.2	54.1	dB
Beam Perveance	1.49	1.49	$\mu\text{A/V}^{3/2}$
Solenoid Coil Power	4.55	5.37	kW

4. おわりに

Cバンドパルスクライストロン E3746 の3号管は、3セル進行波型出力空洞のインピーダンスの見直しにより動作の最適化を行い、低電圧側の効率を改善、およびパルス幅 $2.5\mu\text{s}$ 、出力電力 53.5MW 、効率 47% と目標を超える性能を確認した。また、試験結果は2, 3号管ともシミュレーションと良い一致を見ており、等価回路によるマルチセル出力空洞設計の妥当性も確認することができた。

今後は、マルチセル出力空洞を搭載した PPM 管の開発を進め、さらに高効率化を図っていく予定である。

謝辞

本クライストロンの開発にあたりましては、KEK 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) T.Shintake, et. al. "C-band Main Linac System for e⁺e⁻ Linear Colliders", EPAC96, Barcelona Spain, 1996.
- 2) T.Shintake, et. al., "Development of C-band 50MW Pulse Klystron for e⁺e⁻ Linear Collider", PAC97, Vancouver, BC, Canada, 1997
- 3) H.Matsumoto, et. Al., "Operation of the C-band 50MW Klystron with Smart Modulator", '1st Asian Particle Accelerator Conference, Tsukuba, Japan, 1998'
- 4) Ohkubo, et.al., "50MW C-band Pulse Klystron Development", Proc. of the 23th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Japan, 1998
- 5) T. Shintake, "FCI field charge interaction program for high-power klystron simulation", Prc. 1989 PAC, March, 1989, Chicago, USA
- 6) T.Shintake, "Resent Status of FCI: PIC Simulation of Coupled-Cavity Structure", Proc. Of Linac96, pp.181-183