

DEVELOPMENT OF 1.3-GHz 25-KW CW KLYSTRON

N.Sakamoto^{1,A)}, S.Miyake^{A)}, A.Yano^{A)}, M.Sakamoto^{A)}, K.Tetsuka^{A)}, S.Fukuda^{B)}

^{A)} Toshiba Electron Tubes & Devices Co.,Ltd.

1385, Shimoishigami, Otawara-Shi, Tochigi 324-8550, Japan

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK

1-1 OHO, Tsukuba-Shi, Ibaraki-Ken, 305-0801, Japan

Abstract

Toshiba Electron Tubes & Devices Co.,Ltd. has been developing with KEK, an L-band CW klystron E3750, RD, which will be employed as an RF source for the main accelerator in ERL (Energy Recovery Linac). The prototype was tested in April 2008, with beam voltage of 20.5 kV and beam current of 2.48 A, the maximum output power reached 30.3 kW, which is more than a required value 25 kW, and efficiency marked about 60%. The design overview and test results will be presented in this paper.

1.3-GHz 25-kW CW クライストロン開発

1. はじめに

現在次世代放射光源として、世界各地にて ERL 型放射光源の研究開発が進められている。高エネルギー加速器研究機構（以下 KEK と記載）においては要素技術の完成と性能実証を目的としたコンパクト ERL^[1]の建設が計画されている。コンパクト ERL の主超伝導加速器では 1 つの加速空洞につき 1 台の RF 源でドライブする方式が採用される計画であり、RF 源に必要な電力は CW で約 25 kW、RF 源としてクライストロンか IOT が候補として挙げられている。東芝電子管デバイス株式会社（以下当社と記載）は KEK と共同で、1.3 GHz 25 kW CW クライストロン E3750 を開発した。本稿において設計と評価試験の結果について報告する。

2. 設計

2.1 機器設計

電子銃は 2 極管方式でカソードは M タイプディスペンサ型を採用し長寿命化を図った。また、電子銃絶縁部絶縁外囲器はシリコン樹脂モールドを行い、強制空冷方式とした。出力導波管は WR-650 で出力窓はサイズを小さくするために C 型窓を採用した。真空側のセラミックス表面には TiN コーティングを施しマルチパクタ対策とした。クライストロンおよび集束コイルの冷却は水冷方式で、クライストロンはコレクタとボディ系（空洞、出力導波管、出力窓）の 2 系統とした。外形図を図 1 に示す。

2.2 電気設計

クライストロンの目標性能を表 1 に示す。電子銃はビームパービアンス $0.8 \mu\text{P}$ 、カソードロー

ディングを $0.7 \text{ A} / \text{cm}^2$ とした。電子ビーム軌道

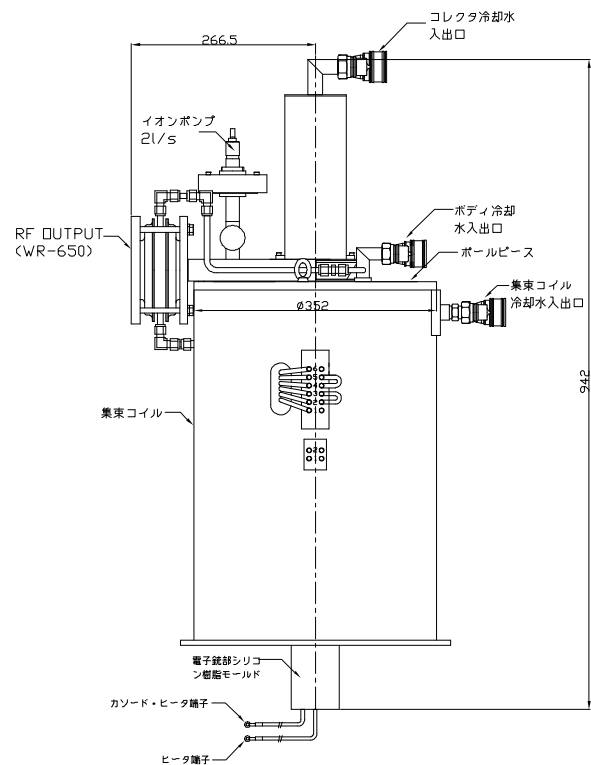


図 1 E3750 クライストロン外形図

計算は D G U N^[2] を使用し、電子ビームリップルが小さくなるよう構造を最適化した。空洞構成は上流から入力空洞、2 つのゲイン空洞、第 2 高調波空洞、2 つのペナルティメイト空洞、出力空洞の 7 空洞からなる。第 2 高調波空洞は効率を高めドリフト管長を短くして位相変化を小さくするために採用した。相互作用部は F C I^[3] を使用し、効率、ゲイ

¹ E-mail: naoki1.sakamoto@toshiba.co.jp

ン及び帯域を確保するため空洞の配置及び離調を最適化した。FCI解析より得られた、ビーム電圧20 kVにおける入出力特性と周波数特性の結果を図2及び図3に示す。

表1 目標性能

動作周波数	1300 MHz
ビーム電圧	20 kV
ビーム電流	2.26 A
飽和出力電力	25 kW以上
飽和入力電力	1 W以下
パーピアン	0.8 μ P
出力変換効率	55%以上(目標60%以上)
瞬時帯域 -1 dB	6MHz(@25 kW)
-3 dB	8MHz(@25 kW)

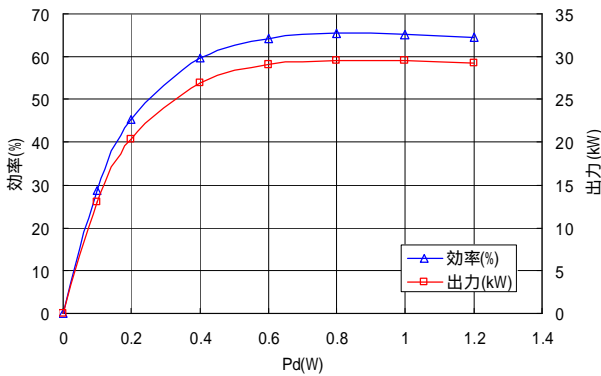


図2 FCI解析による入出力特性

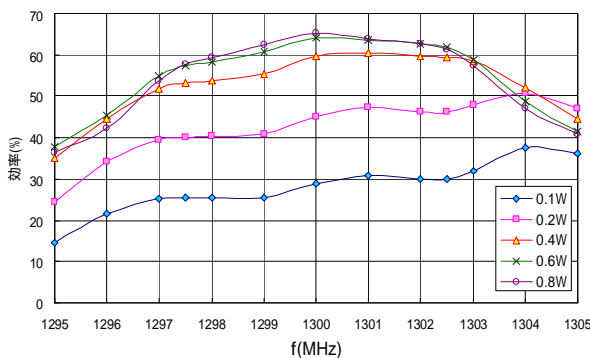


図3 FCI解析による周波数特性

RF入力は同軸N型で入力空洞へ導かれ、RF出力はポールピースの内側、出力空洞上面にカップリングスロットを設けポールピース上面に取り付けた扁平導波管により取り出す方式を採用した。各空洞の形状はHFS^[4]を使用して、FCI解析で決定した共振周波数とQ値となるよう決定した。

RF出力は出力空洞から扁平導波管を経て出力窓

を介しWR-650導波管へと導かれる。出力窓はC型窓を採用し、HFSを使用してVSWRが1.1以下になるよう構造を最適化した。

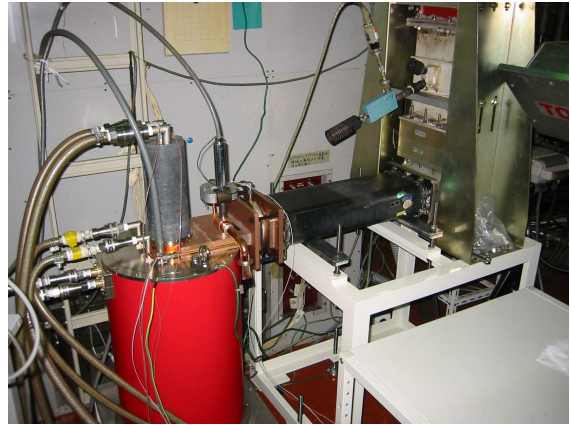


図4 クライストロン試験セットアップ

3. 性能評価

2008年4月にプロト管の性能評価試験を実施した。試験セットアップを図4に示す。出力電力はダミーロードの流量と温度上昇から求め出力窓の温度はEバンドに取り付けたのぞき窓から赤外線カメラで測定した。

図5にビーム電圧に対する出力電力、出力変換効率、利得の飽和特性を示す。ビーム電圧20.5 kV、ビーム電流2.48 Aで出力電力30.3 kW、出力変換効率約60%を達成し、安定に動作することを確認した。出力電力に対する出力窓の温度上昇を図6に示す。30 kW出力電力においてセラミック窓温度上昇は1.3程度と低く、マルチバクタによる急激な温度上昇も観測されず、設計の妥当性を検証できた。

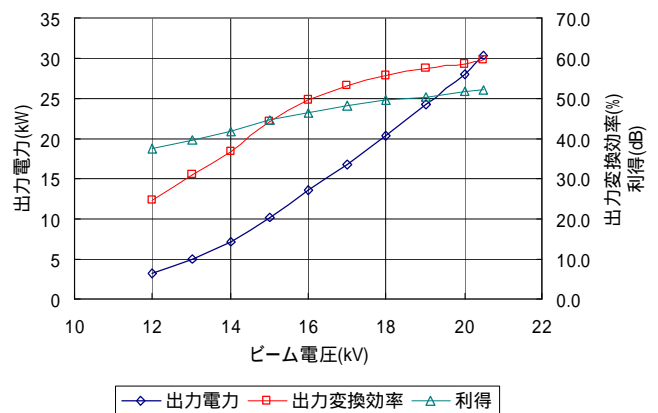


図5 ビーム電圧に対する飽和特性 (出力電力、出力変換効率、利得)

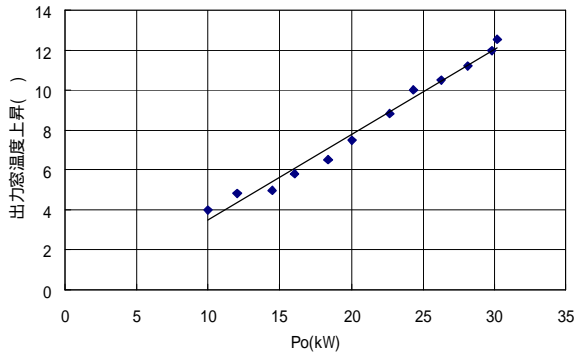


図 6 出力電力対出力窓温度上昇

更に入出力特性を図 7 に、周波数特性を図 8 に示す。F C I 解析より 5 d B 程度ゲインが高かったが、これは第 3 空胴の離調周波数が動作周波数に対し、約 1 M H z 近くなったことが原因と考える。また出力変換効率は F C I 解析より 5 % 程度低い結果となったが、出力空胴や出力回路での高周波損失、ビームロスを抑えるため出力空胴部の磁界を強めたこと等を考慮するとほぼ妥当な結果である。

超伝導加速器ではフィードバックで振幅や位相を制御するため、飽和点の 8 0 ~ 9 0 % の入出力特性が線形に近い領域に動作点が置かれる。飽和出力電力 3 0 k W (カソード電圧 2 0 . 5 k V) の 8 0 % の出力電力におけるインクリメンタルゲインは 0 . 5 と制御に適した値を得ている。またカソード電圧の変動に対する R F 出力位相変化率 (出力位相感度) はカソード電圧 2 0 k V で 0 . 0 5 7 d e g / V であり、R F 励振の変動に対する R F 出力位相変化率は約 1 . 0 d e g / d B である。更に、クライストロンの負荷 V S W R に対する安定性は、クライストロンとダミーロード間に V S W R = 1 . 2 : 1 のアイリスを挿入して 6 等分の位相で安定に動作することも確認している。

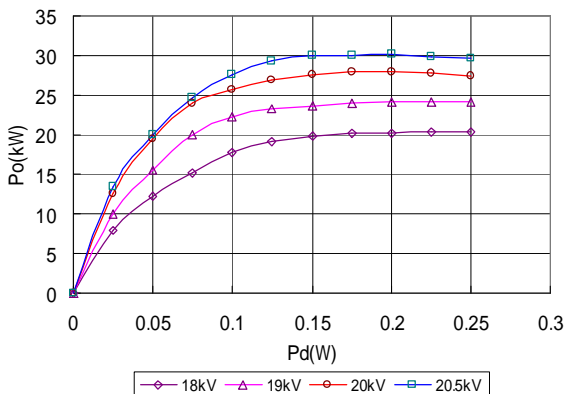


図 7 入出力特性

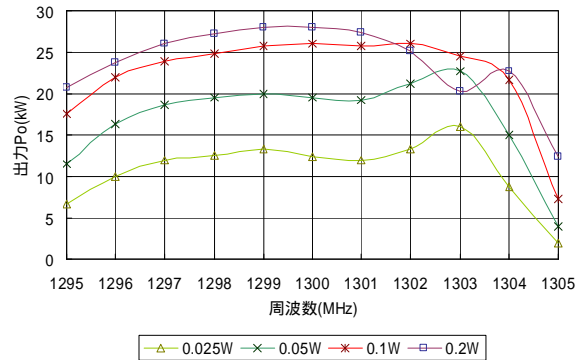


図 8 周波数特性

以上の評価試験結果を表 2 にまとめて示す。

表 2 E 3 7 5 0 評価試験結果

項目	動作例 1	動作例 2
動作周波数 (MHz)	1300	1300
ビーム電圧 (kV)	20.0	20.5
ビーム電流(A)	2.38	2.48
飽和出力電力(kW)	28.0	30.3
飽和入力電力(W)	0.19	0.18
パービアンス(μP)	0.84	0.84
出力変換効率(%)	58.8	59.6
電力利得(dB)	51.8	52.3
瞬間周波数帯域		
-1dB幅(MHz)	6	-
-3dB幅(MHz)	8	-

まとめ

当社は K E K と共同で 1 . 3 G H z 、 2 5 k W C W クライストロン E 3 7 5 0 の開発に成功した。プロト管の評価試験において基本特性を全て満足できる良好な結果を得た。今後、コンパクト E R L の各種コンポーネントの試験の R F 源として運転し、長期の信頼性評価を実施する予定である。

参考文献

- [1]KEK Report 2007-7/JAEA-Research 2008-032,URL: <http://pfwww.kek.jp/ERLOffice/cdr.html>
- [2]BINP,VLEPP DGUN U
- [3]T.Shintake, KEK Report90-3, May1990
- [4]Ansoft Corporation,HFSS 3D EM Simulation software for Rf6 wireless design