

325MHz 大電カクライストロンの開発

DEVELOPMENT OF A 325 MHz HIGH POWER KLYSTRON

田中敏文[#], 林健一, 大久保良久
 Toshifumi Tanaka [#], Kenichi Hayashi, Yoshihisa Okubo
 Toshiba Electron Tubes & Devices Co., Ltd.

Abstract

A new high power CW klystron has been developed for Chinese Accelerator Driven System. The klystron is horizontally-oriented and outputs 600-kW CW power at 325 MHz, designed on the basis of the 324-MHz, 3-MW, pulsed klystron E3740A. It mainly consists of a triode electron gun, a six-cavity interaction circuit, a coaxial window, an output waveguide equipped with a T-bar converter and a force-water-cooled collector. The RF interaction circuit is optimized to obtain efficiency more than 60% for the nominal output power. The collector is capable of handling up to 1.1 MW to work with non-RF condition. Stable operation with an output power of 614 kW and an efficiency of 62.2% was achieved in the test performed in May, 2013.

1. はじめに

現在各国で加速器駆動システム (ADS: Accelerator Driven System) の研究開発が進められている。東芝電子管デバイス株式会社 (以下当社と記載) では、中国 ADS 計画^[1]向けのクライストロンとして、周波数 325 MHz、連続波出力 600 kW のクライストロンの開発を行っている。本クライストロンの開発は当社パルスクライストロン E3740A^[2] (周波数 324 MHz、ピーク出力 3 MW) を基本とし、動作点の最適化による相互作用部の設計変更ならびに連続波動作のためのコレクタ、ドリフトチューブ部の冷却強化の設計変更を実施している。その結果出力 614 kW で動作効率 62.2% の連続波動作を確認した。

本稿において、今回開発したクライストロンの電気設計及び構造設計、製作した初号管の性能評価試験結果について報告する。

2. 設計

2.1 電気設計

仕様値及び設計値を Table 1 に示す。周波数、出力電力、動作効率、ゲインの仕様に対して、ビーム電圧、アノード電圧、ビーム電流の値を仕様の範囲内で、Table 1 に示した値を選んで設計を行った。

電子銃はシミュレーションコード DGUN^[3]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。また、カソードは E3740A と同様当社製の M タイプカソード^[4]を採用した。DGUN による電子ビーム軌道の計算結果を Figure 1 に示す。リップルのない電子ビームが得られている。

高周波相互作用部はシミュレーションコード FCI^[5]を使用し、動作効率、ゲイン、帯域幅を確保するため空洞の数、配置及び離調を最適化した。FCI により得られたビーム電圧 68 kV における入出力特性を Figure 2 に示す。励振電力 27.5 W で飽和し、出力電力は 663 kW である。

Table 1: Specs and Design

| | Specs | Design |
|-----------------------|---------|---------|
| Frequency | 325 MHz | 325 MHz |
| Output power | 600 kW | 600 kW |
| Beam voltage | 90 kV | 68 kV |
| Anode voltage | 65 kV | 60 kV |
| Beam current | 17 A | 14.3 A |
| Efficiency | 60% | 60% |
| Gain | 41 dB | 43 dB |
| Collector Dissipation | 1.1MW | 1.1MW |

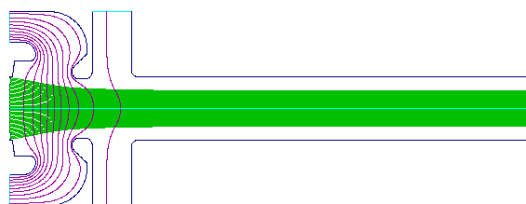


Figure 1: Beam trajectories of DGUN.

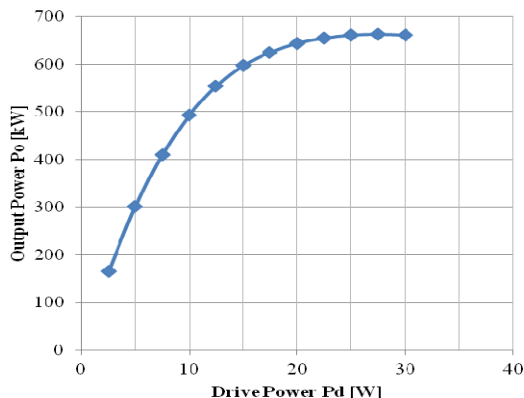


Figure 2: Power transfer characteristics of FCI.

[#]toshifumi2.tanaka@toshiba.co.jp

Figure 3 は励振電力 27.5 W での FCI ビームプロファイルである。逆行電子の無い電子ビーム特性であることが分かる。また、全空洞のノーズにスリットを入れることによりマルチパクタ放電防止を実施している。出力回路は E3740A から変更せず実績のある T-bar 構造を採用した。

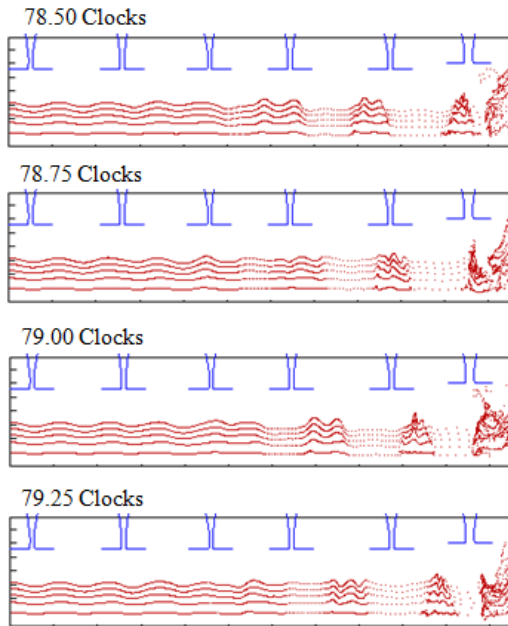


Figure 3: Beam profile of FCI.

2.2 構造設計

Figure 4 にクライストロン単体の外形図、Figure 5 に集束コイル、オイルタンクと組み合わせたクライストロンセットの外形図、Figure 6 にクライストロンセットの写真を示す。

ドリフトチューブ部の冷却構造は当社の 500 MHz 出力 1.2 MW 連続波クライストロンである E3732^[6] の冷却構造を採用し、空洞壁まで冷却することで冷却強化を実施している。コレクタは RF 入力無しでも動作可能とする仕様を満足するために 1.1 MW のビーム入力が可能な設計とした。E3732 では蒸発冷却コレクタを採用したが、今回は横置きと小型化に対応するため強制水冷コレクタとした。

クライストロンと集束コイル、オイルタンクの構造は E3740A と同じとした。また、E3740A は車輪が無く、設置の際クレーンや可動式スタンドが必要であったが、今回車輪を取り付けることでそれらを不要とした。

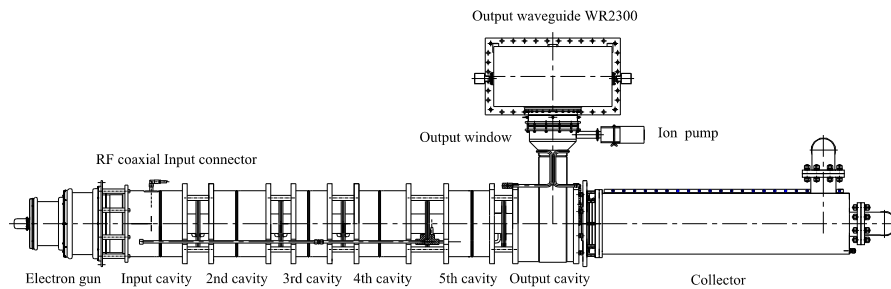


Figure 4: Outline drawing of the klystron.

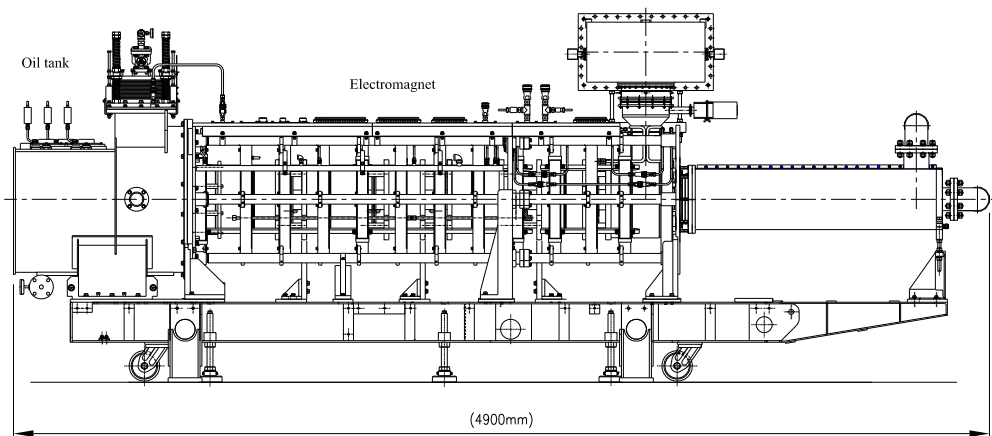


Figure 5: Outline drawing of the klystron set.

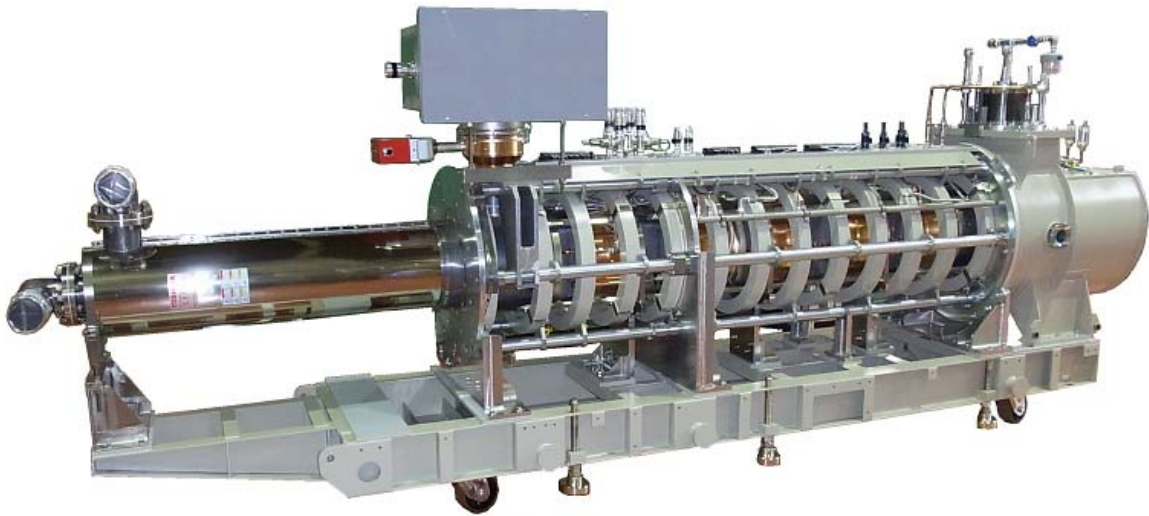


Figure 6: Picture of the klystron set.

3. 性能評価試験結果

2013年5月に初号管性能評価を当社にて実施した。ビーム電圧に対する出力電力、動作効率、ゲインの飽和特性を Figure 7 に示す。ビーム電圧 70 kV にて出力電力 614 kW、動作効率 62.2%、ゲイン 53.3dB (アノード電圧 56 kV、ビーム電流 14.1 A) を達成し、安定に動作することを確認した。

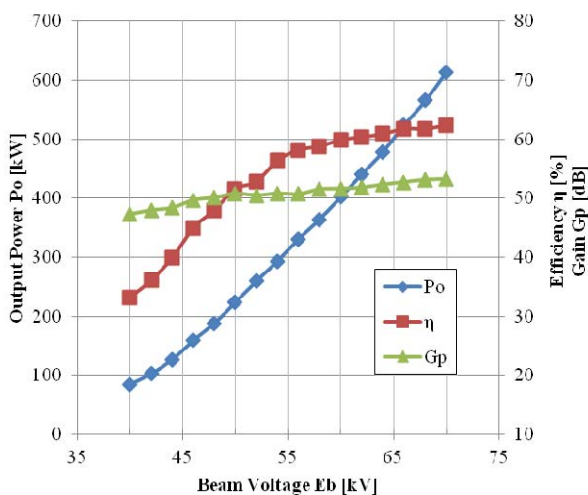


Figure 7: Saturated output characteristics.

ビーム電圧 70 kV のときの入出力特性を Figure 8 に示す。励振電力 2.9 kW で 614 kW の出力電力が得られている。マルチパクタ放電は無く滑らかな特性となっている。

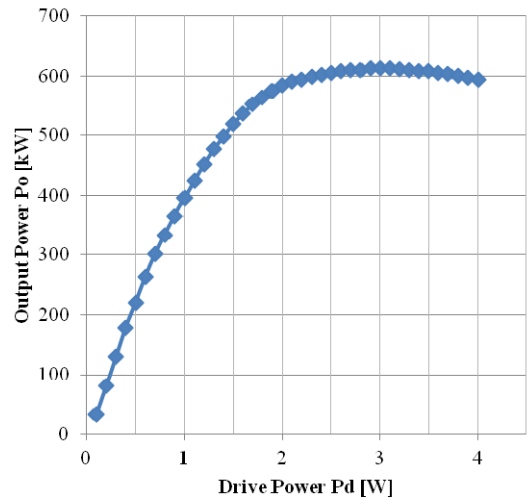


Figure 8: Power transfer characteristics.

設計値と性能評価試験結果の比較を Table 2 に示す。ゲインを除いた他のパラメータは、ほぼ設計値通りの結果が得られている。ゲインは設計値より 10 dB ほど高い結果となった。空洞の共振周波数をホワイトノイズから測定したところ、第 2 空洞の周波数が設計値より 0.9 MHz ほど低いことがわかった。第 2 空洞の共振周波数を実測値としたシミュレーション結果を Figure 9 に示す。この結果では励振電力 4 W で飽和となり、実測値と概ね一致することから第 2 空洞の共振周波数変化により高ゲイン特性となったと考えられる。コレクタの最大損失 1.1 MW、ボディロス (入力空洞～第 5 空洞ロス) 0.04%、出力空洞ロス 0.3% 等、熱的にも安定に動作することを確認した。

Table 2: Design and Performance test results

| | Design | Result |
|-----------------------|---------|---------|
| Frequency | 325 MHz | 325 MHz |
| Output power | 600 kW | 614 kW |
| Beam voltage | 68 kV | 70 kV |
| Anode voltage | 60 kV | 56 kV |
| Beam current | 14.3 A | 14.1 A |
| Efficiency | 60% | 62.2% |
| Gain | 43 dB | 53.3 dB |
| Collector Dissipation | 1.1MW | 1.1MW |

参考文献

- [1] Y. Chi, et al., "Progress of Injector-I and Main Linac of Chinese ADS proton accelerator", IPAC13, Shanghai, May, 2013
- [2] 手塚勝彦, 他, "大強度陽子加速器 (J-PARC) 用 324MHz クライストロンの開発", 第 28 回リニアック技術研究会, Jul. 30-Aug. 1, 2003
- [3] BINP, VLEPP DGUN User's Manual
- [4] S.Kimura, et al., "Long-Life High-Reliability Ir-Coated Dispenser Cathode", IEDM, 1987
- [5] T.Shintake, KEK Report90-3, May 1990
- [6] S.Isagawa, "Operation of the UHF CW Klystron at the World's Highest Power Level", Proc. 14th symposium on Accelerator Science and Technology, Nov. 11-13, 2003

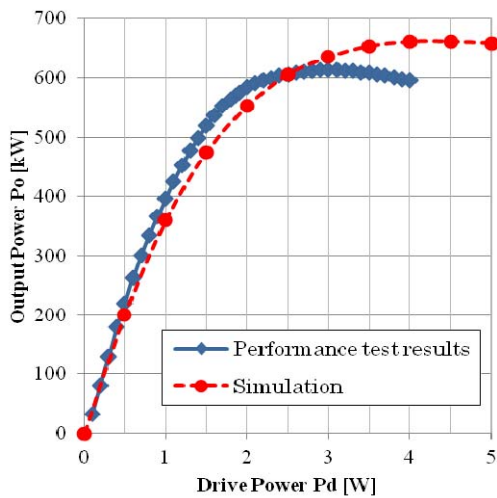


Figure 9: The simulation result using the actual resonance frequency parameters.

4. まとめ

今回 325 MHz、600 kW 連続波クライストロン E37705 の開発に成功した。初号管の性能評価試験において基本特性を全て満足した良好な結果が得られた。今後、中国の ADS での本格的な使用に向け評価が開始される予定である。

大電力の連続波クライストロンでは、冷却構造との兼ね合いから各々の空胴にチューニング機構を設けることは難しい。今回はゲインのズレとして第 2 空胴の共振周波数のズレが顕在化した。製造過程での空胴のチューニング精度の確保が今後の課題と考えている。