

352 MHz 1.2 MW パルスクライストロンの開発 DEVELOPMENT OF 352MHz 1.2MW PULSE KLYSTRON

松田拳汰[#], 坂本光徳, 手塚勝彦, 大久保良久
Kenta Matsuda[#], Mitsunori Sakamoto, Katsuhiko Tetsuka, Yoshihisa Okubo
Canon Electron Tubes & Devices Co., Ltd.

Abstract

A new high power pulsed klystron has been developed for Boron Neutron Capture Therapy(BNCT). The klystron horizontally-oriented and peak output 1.2 MW, average output 360 kW at 352.2 MHz, designed on the basis of the 350 MHz, 1.6 MW pulsed klystron E37621. It mainly consists of a triode electron gun, a six-cavity interaction circle, a coaxial window, an output waveguide equipped with a T-bar converter and a force-water-cooled collector. The electron gun is a triode tube with a beam perveance of 1.1 μP , the RF interaction circle is optimized to obtain efficiency more than 60% and the RF output power of 1.2 MW at a beam voltage of 80 kV and a beam current of 25 A. The collector can handle up to 800 kW to work with non-RF condition. However, due to the volume reduction design, we succeeded in making it smaller than E37621. Stable operation with an output power of 1.24 MW and an efficiency of 60% was achieved in the test performed in May 2023.

1. はじめに

現在ホウ素中性子捕捉療法(BNCT: Boron Neutron Capture Therapy)について多くの研究開発が進められている。キヤノン電子管デバイス株式会社(以下当社と記載)では、BNCT 向けのクライストロンとして、周波数 352.2 MHz, ピーク出力 1.2 MW, 平均出力 360 kW のクライストロンの開発を行った。本クライストロンの開発は J-PARC 向け 324 MHz-3 MW パルスクライストロン E3740A[1]の派生管である 350 MW-1.6 MW パルスクライストロン E37621 を基本とし、サステナビリティの観点から製品サイズの小型化を目指した。ビームパワーが約 3 倍になることによるコレクタサイズの増大を最小限に留めるために冷却方式の検討を行った。また、プラズマ波長を用いて電子の速度と電流密度を検討することにより、相互作用部長のコンパクト化について検討を行った。その結果類似製品よりも製品全長が約 200 mm 短縮しつつも出力 1.24 MW で動作効率 60%の安定動作を実現した。

本稿において、今回開発したクライストロンの設計内容、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 目標仕様

設計目標値及び類似製品 E37621 の仕様値を Table 1 に示す。ビーム電力は E37621 よりも約 3 倍であり、コレクタサイズ増大は必須であるが、相互作用部長を短縮し、製品全長 4.9 m 以下で目標仕様を達成できるように設計を行った。コレクタはサイズ増大を最小限に留めるために冷却方式を比較検証した。相互作用部長は周波数、電子の速度(ビーム電圧)、電流密度によるプラズマ波長によって必要な長さが決まるが、相互作用部長を短縮しつつ目標仕様を満足するように検討を行った。

Table 1: Target and E37621 Specs

Parameter	Target	E37621
Frequency [MHz]	352.2	350
Output power [MW]	1.2	1.6
Beam voltage [kV]	90 max.	105
Anode voltage [kV]	85 max.	94
Beam current [A]	30 max.	25.5
Efficiency [%]	60 min.	60
Gain [dB]	47	41
Bandwidth [MHz]	1 min.	1
Average output power [kW]	360	144
Collector Dissipation [kW]	800	284
Length [m]	<4.9	4.9
Weight [kg]	<2800	2800

2.2 コレクタのコンパクト化

コレクタ設計は冷却方式により形状やサイズが異なる。冷却方式別に必要なコレクタの延長サイズの検討を行った。冷却方式に対する延長サイズを Table 2 に示す。強制水冷は冷却水の強制対流によりコレクタの冷却を行う。蒸発冷却は気化潜熱を利用してコレクタの冷却を行う。強制沸騰水冷は強制水冷と蒸発冷却のハイブリッド型であり、冷却性能を大きくすることが出来る。コレクタサイズの検討を行った結果、強制沸騰水冷のコレクタ延長サイズが 250 mm とサイズ増大を最小に抑えられることが出来るため、コレクタの冷却方式は強制沸騰水冷方式を採用する。また、DGUN[2]によるコレクタ部の電子ビーム軌道の結果を Fig. 1 に示す。

[#] kenta1.matsuda@etd.canon

Table 2: Cooling Method and Collector Size

Cooling method	Collector size
Water cooling	+950 mm
Vaper cooling	+600 mm
Water and vaper cooling	+250 mm

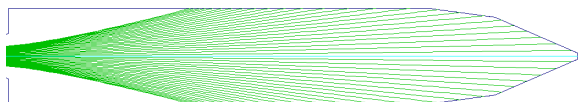


Figure 1: Beam trajectories of DGUN(collector).

2.3 相互作用部のコンパクト化

コレクタサイズの延長が 250 mm と決まったので、相互作用部の短縮サイズの目標は 250 mm 以上とする。ここで相互作用部長を決める要素は主に周波数とプラズマ波長と空洞数である。周波数はクライストロンの動作周波数のことであり、動作仕様で決まるので調整は不可能である。プラズマ波長は電子の速度(ビーム電圧)と電流密度と周波数によって求まるが、周波数以外は調整可能である。空洞数は空洞数を多くすると高効率化を期待できるが相互作用部長が長くなってしまふ。目標の相互作用部長と目標仕様を勘定して決定する。ここで自由空間におけるプラズマ波長 λ_p とプラズマ周波数 ω_p の式を(1)(2)に示す。

$$\lambda_p = c\beta \cdot 2\pi/\omega_p \quad (1)$$

$$\omega_p = \sqrt{e \frac{I_k}{\pi r_b^2} \cdot \frac{1}{\beta c} \cdot \frac{1}{\frac{m_0}{(1-\beta^2)^{3/2}} \epsilon_0}} \quad (2)$$

ここで c :光速, e :電子電荷量, m_0 :電子静止質量, ϵ_0 :真空誘電率である。 β は電子の相対速度でありビーム電圧が高いほど大きくなる。プラズマ周波数 ω_p は相対速度 β と電流密度によって求まり、電流密度はパービアンズとビーム径による。式(1)(2)より、ビーム電圧が高い時にプラズマ波長が長くなり、電流密度が高い時にプラズマ波長が短くなる。実際には金属導体中の電子の空間電荷は鏡面電荷のため実効的に減るのでプラズマ周波数低減因子を導入した低減プラズマ波長を使用して検討を行った。

まず、E37621 を 1.2 MW に最適化した時の相互作用部長をパービアンズと効率は同一として簡易検討した。出力を 1.2 MW に下げた条件でプラズマ波長を計算した時のパラメータを Table 3 に示す。出力が下がるのでビーム電圧とビーム電流を下げられ、プラズマ波長が短くなることが期待できる。プラズマ波長を計算した結果 6.0 m となった。1.6 MW 出力の時は 6.4 m であり、プラズマ波長を使用して相互作用部長をスケールリングすると 150 mm 短縮できる結果となった。目標の 250 mm には届かないので、次にパービアンズを高出した時の相互作用部長の短縮について検討を行う。パービアンズを上げることにより電流密度が高くなるのでプラズマ波長が短くなることが期待できる。パービアンズを 1.1 μP まで高出した時のプラズマ波長は 4.8 m となり、同じくスケールリングを行うと相互作用部長が 600 mm 短縮する結果となった。パー

ビアンズを 1.1 μP に上げた条件でプラズマ波長を計算した時のパラメータを Table 4 に示す。しかしパービアンズが上がると、空間電荷効果が大きくなり、電子の集群作用を妨げるので効率が下がってしまう。経験則からパービアンズを 0.75 μP から 1.1 μP に上げると効率が約 5% 低下するのでシミュレーションコード FCI[3]を使用して空洞の配置、共振周波数を最適化することで効率 60% を目指した。計算の結果、相互作用部長を 455 mm 短縮し、効率 60% とその他目標仕様を全て満足する結果が得られた。短縮した相互作用部の外形図を Fig. 2 に示す。

Table 3: Parameter at 1.2 MW Output Power

Parameter	E37621-1.6 MW	E37621-1.2 MW
Output power [MW]	1.6	1.2
Beam voltage [kV]	105	94
Beam current [kV]	25	21.6
Perveance [μP]	0.75	0.75
Efficiency [%]	60	60
Plasma length [m]	6.4	6.0

Table 4: Parameter at 1.1 μP

Parameter	E37621-1.6 MW	1.2 MW-1.1 μP
Output power [MW]	1.6	1.2
Beam voltage [kV]	105	83
Beam current [kV]	25	26
Perveance [μP]	0.75	1.1
Efficiency [%]	60	55
Plasma length [m]	6.4	4.8



Figure 2: Outline drawing of interaction circuit.

2.4 電子銃

シミュレーションコード DGUN を使用し、パービアンズが 1.1 μP でありビームリップルが小さくなるように電極形状の最適化を行った。また、カソードは E37621 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 Fig. 3 に示す。リップルのない電子ビームが得られている。また、パービアンズを上げたことにより動作電圧を下げる事が出来るので電子銃内の電界強度を下げる事が出来る。シミュレーションコード poisson を使用して電子銃内の電界強度の計算を行った結果、電界強度は約 30% 低減し安定動作、耐電圧寿命の向上を期待できる。poisson による電子銃内の電界分布の計算結果を Fig. 4 に示す。

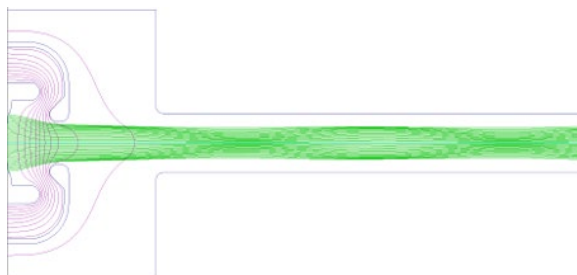


Figure 3: Beam trajectories of DGUN.

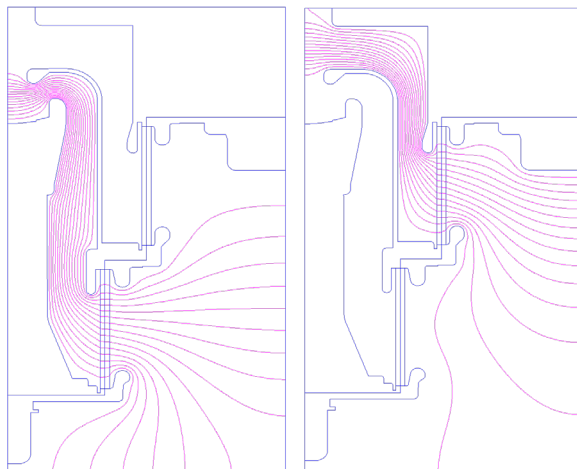


Figure 4: Electric field strength of poisson.

3. 設計結果

コレクタと相互作用部のコンパクト化について検討を行った結果、製品の全長を 200 mm 小型化し目標の設計結果を得ることが出来た。製品全体の外形図を Fig. 5 に示す。また設計目標値に対する設計結果を Table 5 に示す。すべての設計目標値を満足する結果が得られた。FCI により得られたビーム電圧 80 kV における入出力特性を Fig. 6 に示す。励振電力 21 W で飽和し、出力電力は 1.27 MW である。

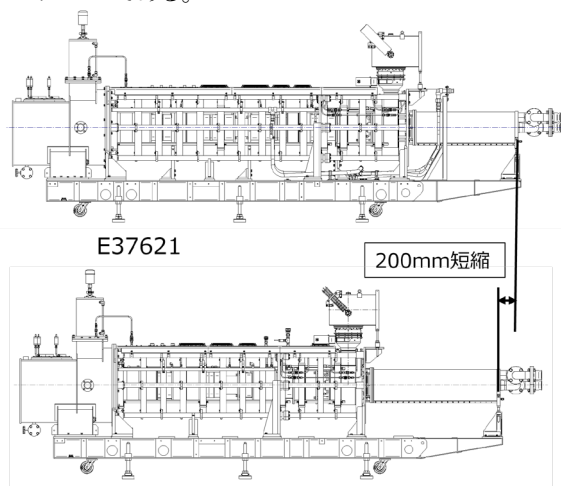


Figure 5: Outline drawing of klystron.

Table 5: Target and Design Results

Parameter	Target	Design
Frequency [MHz]	352.2	352.2
Output power [MW]	1.2	1.27
Beam voltage [kV]	90 max.	80
Beam current [A]	85 max.	68
Anode voltage [kV]	30 max.	24.9
Perveance [μP]	1.1	1.1
Efficiency [%]	60 min.	63.9
Gain [dB]	47	47.8
Bandwidth [MHz]	1 min.	1.6
Average output power [kW]	360	360
Collector Dissipation [kW]	800	800
Length [m]	<4.9	4.7
Weight [kg]	<2800	2700

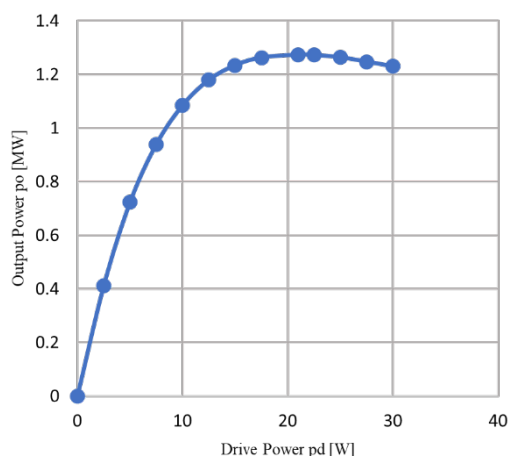


Figure 6: Power transfer characteristics of FCI.

4. 評価試験結果

2023 年 5 月に初号管の性能評価を当社にて実施した。ビーム電圧 82 kV にて出力電圧 1.24 MW、動作効率 60%、ゲイン 47.4 dB(アノード電圧 69.2 kV、ビーム電流 25.3 A)を達成し、安定に動作することを確認した。設計目標値に対する評価結果を Table 6 に示す。

Table 6: Target and Performance Test Results

Parameter	Target	Design
Frequency [MHz]	352.2	352.2
Output power [MW]	1.2	1.24
Beam voltage [kV]	90 max.	82
Beam current [A]	85 max.	69.2
Anode voltage [kV]	30 max.	25.3
Perveance [μP]	1.1	1.1
Efficiency [%]	60 min.	60
Gain [dB]	47	47.4
Bandwidth [MHz]	1 min.	>1
Average output power [kW]	360	360
Collector Dissipation [kW]	800	800
Length [m]	<4.9	4.7
Weight [kg]	<2800	2700

ビーム電圧 82 kV の時の入出力特性を Fig. 7 に示す。励振電力 22 W の時 1.24 MW の出力電力を得られている。マルチパクタ放電は無く滑らかな特性となっている。

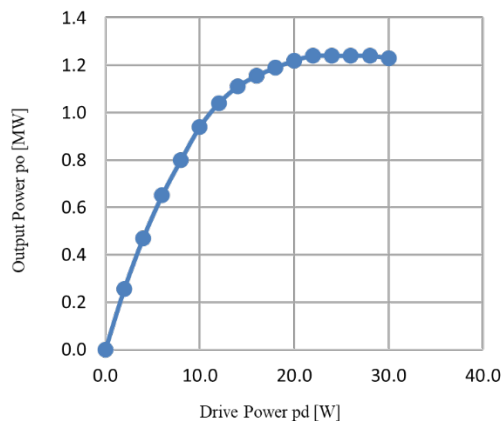


Figure 7: Power transfer characteristics.

Figure 8 に実際に製造した開発製品の写真を示す。実測により製品全長は設計通りの寸法となっており、200 mm 小型化していることを確認した。

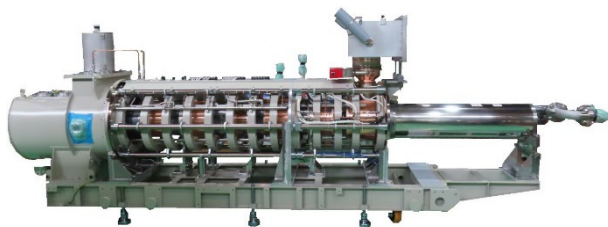


Figure 8: Picture of the klystron set.

5. まとめ

今回 352.2 MHz、1.2 MW パルスクライストロン E37633 の開発に成功した。コレクタ冷却方式検討とパービアンズ(プラズマ波長)を調整することで小型化を実現し、実績のある相互作用部設計を行うことで、計算値だけでなく実機評価においても効率を始めとした目標仕様を全て満足することが出来た。今後、BNCT 用加速器の高周波源として本格的な使用に向け評価が開始される予定である。

参考文献

- [1] 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.
- [2] BINP, VLEPP DGUN User's Manual.
- [3] S. Shintake, KEK Report90-3, May 1990.
- [4] S. Kimura *et al.*, “Long-Life High-Reliability Ir-Coated Dispenser Cathode”, IEDM, 1987.