

704 MHz パルスクライストロンの低出力モードにおける効率改善のための設計 DESIGN FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF A 704 MHz PULSED KLYSTRON AT THE OPERATION OF LOWER OUTPUT POWER

柳澤翔吾[#], 浦方弘人, 菊地里紗, 林健一

Shogo Yanagisawa[#], Hiroto Urakata, Risa Kikuchi, Kenichi Hayashi

Toshiba Electron Tubes & Devices Co., Ltd.

Abstract

A 704-MHz long-pulse klystron aimed to obtain efficiency of 60% or more for three different output powers, 0.325, 0.6 and 1.5 MW was designed and tested, which is an RF amplifier for the Medium Beta section of the linac of the ESS project. Two methods, increasing beam current density by reducing beam diameter and raising an external Q factor of the output cavity by installing irises to the output waveguide were employed to keep efficiency optimized for the higher output power at the operation of the lower output power. Efficiency of 60% was achieved for all the three output powers under maximum duty condition with an RF pulse width of 3.5 ms and a repetition rate of 14 Hz. Test results are good agreement with those expected from the simulation.

1. はじめに

東芝電子管デバイス株式会社は、欧州核破砕中性子源(ESS)計画の Medium Beta 加速器空洞に用いられる RF 源として、周波数 704 MHz、出力 1.5 MW パルスクライストロンを開発した[1]。加速器空洞への投入電力は 200 kW から 1.1 MW が予定されている。

初号機では出力 1.5 MW、600 kW の各動作のモードで効率 60%以上を目標とし、2016 年に本学会で動作評価結果を報告している[2]。投入電力 300 kW 付近での使用を踏まえ、2 号機では更に出力 325 kW の動作モードでも効率 60%以上を満たすことを目標とした。初号機の相互作用部は、出力 1.5 MW と 600 kW に対応する動作電圧で効率 60%以上を満たす設計となっており、この設計で 325 kW を出力すると効率は 54%まで低下してしまう。

2 号機以降で 325 kW 出力時の効率を改善するため、(i)集束コイル電流によりビームパラメータを調整するとともに、(ii)出力導波管フランジにアイリスを付加して出力空洞インピーダンスを調整できる設計とした。

動作評価の結果、325 kW の出力動作モードにて目標の効率 60%に達していることを確認した。本報告では、本クライストロン 2 号機の設計と動作評価結果について述べる。

2. 設計

ESS 計画の加速空洞のうち、Medium Beta では RF 源としてクライストロンが、High Beta ではクライストロンまたは IOT が使用される計画である。空洞の周波数はともに 704.42 MHz であり、RF 入力電力は Medium Beta では 207 kW~866 kW、High Beta では 835 kW~1.1 MW である。High Beta の RF 源としてクライストロンが選択された場合、Medium Beta と同一仕様のクライストロンが使用される計画である。Medium Beta で 36 台、High Beta で

44 台と多数のクライストロンが使用される計画であり、クライストロンに対しては各セクションにおいて高効率が要求されている。

通常、クライストロンは最大出力に対応する電圧において、高効率で不安定動作が生じないような空洞設計やビームパラメータ設定を行う。したがって低出力に対応する電圧では動作効率が低下してしまう。初号機では出力 1.5 MW、600 kW の各動作モードで最適化設計を行ったため、初号機で 325 kW を出力すると効率は 54%まで低下する。

Medium Beta の投入電力 300 kW 付近での使用を踏まえ、2 号機では更に 325 kW の出力動作モードでも効率 60%以上を満たすことを目標とした。出力 1.5 MW、600 kW、325 kW の 3 つの動作モード、すなわち、これらの出力電力に相当する各ビーム電圧での動作を想定し、各動作電圧での効率を 60%以上にすることを開発方針とした。Table 1 に出力 1.5 MW、600 kW、325 kW の各動作モードの設計目標を示す。

Table 1: Design Target

Operation mode	1.5 MW	600 kW	325 kW
Output power	≥1.5 MW	≥600 kW	≥325 kW
Beam perveance	0.6 $\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$	0.6 $\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$	0.6 $\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$
Efficiency	65%	60%	60%
Gain	≥43 dB	≥40 dB	≥40 dB
Beam voltage	110 kV	75.0 kV	60.0 kV
Beam dia/drift tube dia	62%	68%	72%
Ext Q factor	1.00	1.28	1.54
Load condition	-	With iris 1	With iris 2

[#] shogo1.yanagisawa@etd.canon

2.1 電気設計

クライストロンを設計の動作点と異なるビーム電圧 V_b で動作した場合に効率が低下する原因は主に以下の 1), 2) の 2 点である。

- 1) 低出力に対応するビーム電圧 V_b では電子のバンチングが空胴の配置と適合しない。

電子のバンチングはドリフト管内を通過する電子のプラズマ振動の波長で決まるので、各々の空胴共振器の最適な間隔は低減プラズマ波長 λ_q で決まる。低減プラズマ波長 λ_q は次式で与えられ、電子速度 v_k と電子ビーム半径 r_b の関数である[2]。

$$\lambda_q \propto 1 / \sqrt{\frac{I_k}{\pi r_b^2} \cdot \left(\frac{1}{v_k^2/c^2} - 1 \right)^{1.5}}$$

出力 600 kW、325 kW 相当のビーム電圧 V_b では、低減プラズマ波長 λ_q が 1.5 MW 出力時の値に対してそれぞれ 91%、86%まで低下してしまう。そこで電子ビーム半径 r_b を拡大することで、600 kW、325 kW 出力時の低減プラズマ波長 λ_q を 1.5 MW 出力時の値に維持することができる。許容される電子ビーム径の最大値はドリフト管径の 70%程度であり、これを 325 kW 出力時の電子ビーム径とする。このため 1.5 MW 出力時の電子ビーム径を 62%まで小さくする設計とした(Table 1)。電子ビーム径の調整は本クライストロンの外部に設けた集束用コイル磁場分布の調整による設計とした。本コイルでは主磁場とカソード磁場を独立に可変とし、電子ビーム径を調整する設計である。

- 2) 低出力に対応するビーム電圧 V_b では出力空胴のインピーダンスが最適値から変化してしまう。

最適効率となる出力空胴インピーダンス Z_{opt} には次式の関係がある[2]。

$$Z_{opt} = (R/Q) \cdot Q_{ext} \propto \frac{1}{M(b, V_b)^2} \cdot \frac{V_b}{I_b} \cdot \frac{1}{(I_o/I_b)}$$

最適な出力空胴インピーダンス Z_{opt} は、ビームインピーダンス (V_b/I_b) 、空胴と電子ビームとの結合係数 $M(b, V_b)$ 、高調波電流比 (I_o/I_b) により決まる。上式の間係を保つにはビーム電圧 V_b に応じて出力空胴インピーダンス Z_{opt} を調整する必要がある。出力空胴のシャントインピーダンス R/Q は固定と考え、出力空胴の外部 Q 値 Q_e を変化させることで出力空胴インピーダンス Z_{opt} を調整する。必要な外部 Q 値 Q_e は、1.5 MW 出力時の外部 Q 値 Q_e を基準として、600 kW 出力時で 1.28、325 kW 出力時で 1.54 である(Table 1)。本クライストロンでは 600 kW、325 kW 出力時に出力導波管フランジ端部にアイリスを付加し、このアイリスによる反射波により外部 Q 値 Q_e を目標の値に変化させて出力空胴インピーダンス Z_{opt} を調整する設計とした。ここでは出力 600 kW に対応するアイリスを「アイリス 1」、出力 325 kW に対応するアイリスを「アイリス 2」としている。アイリス 1、2 ともに出力導波管フランジ端部に付加する点は共通だが、導波管内部への突き出し量は 1 と 2 で異なり、それぞれ 600 kW 出力と 325 kW 出力時に最

適な外部 Q 値 Q_e を与える設計となっている。

2.2 シミュレーションによるビーム径の評価

325 kW 出力時に電子のバンチングが空胴配置に適合することを確認するため、FCI によるシミュレーションを実施した。クライストロン相互作用空間内で高調波電流成分が増幅されていく様子をシミュレーションした結果を Fig. 1 に示す。上段が電子ビーム径調整前(ドリフト管径比 $\approx 62\%$)の結果であり、下段が電子ビーム径調整後(ドリフト管径比 $\approx 72\%$)の結果である。電子ビーム径が 62% のままでは低減プラズマ波長が最適値の 86%まで低下し、高周波電流成分のピークが出力空胴と合致しない結果となっていることが分かる。一方、電子ビーム径を 72% に調整すると低減プラズマ波長が最適値に維持され、高周波電流成分のピークが出力空胴と合致していることが分かる。出力効率も 64%まで改善され、電子ビーム径をドリフト管径の 72%とすれば良いことがシミュレーションから確認できた。

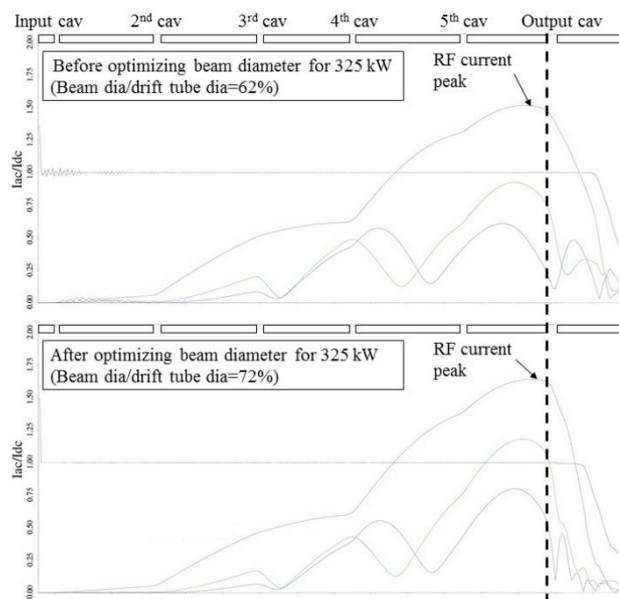


Figure 1: Simulation results for alternating current component amplified by cavities of klystron.

2.3 シミュレーションによる外部 Q 値の評価

325 kW 出力時に 60%の効率が得られ、かつ不安定現象が生じないよう、電子ビーム径と外部 Q 値に対する効率、出力空胴ビームロス、逆行電子の有無のシミュレーションを実施し、結果の一例を Fig. 2, 3 に示す。電子ビーム直径 $R_a \sim R_c$ は 325 kW 出力のために調整した後の電子ビーム直径であり、ドリフト管直径に対して 72%程度で、 $R_a < R_b < R_c$ の関係がある。外部 Q 値 $Q_{e1} \sim Q_{e3}$ は 325 kW 出力のために調整した後の外部 Q 値であり、1.5 MW 出力時のその 1.54 倍程度で、 $Q_{e1} < Q_{e2} < Q_{e3}$ の関係がある。

電子ビーム直径と外部 Q 値に対する出力空胴のビームロスのシミュレーション結果を Fig. 2 に示す。グラフ縦軸は電子ビームパワーに対する出力空胴でのビーム損失をパーセンテージで示す。電子ビーム直径が大きくな

るに従い、出力空洞ビームロスの増加率が大きくなることが分かる。よってビーム損失の増加率が低い電子ビーム直径 R_a , R_b をパラメータとして残し、出力効率と逆行電子の有無をシミュレーションから求めた。

電子ビーム直径と外部 Q 値に対する出力効率のシミュレーション結果を Fig. 3 に示す。黒塗りされたマーカーは逆行電子が存在したことを示す。Figure 3 より、電子ビーム直径が大きくなると効率も高くなることが分かる。また電子ビーム直径 R_a に比べて R_b の方が逆行電子が現れにくく、出力効率も高いことが分かる。この結果から電子ビーム直径の設計値を R_b と決めた。

Figure 3 より、外部 Q 値が高いほど効率も高くなるが、その分ビーム損失も増え、逆行電子も生じ易くなる。したがって外部 Q 値の設計値は最低値の Q_{e1} と決めた。外部 Q 値= Q_{e1} でも効率は 64% であり、目標としては十分である。

最後に 1.5 MW、600 kW、325 kW 出力時の効率を予測するため、各々のビーム電圧に対する飽和効率特性のシミュレーションを実施し、計算結果の例を Fig. 4 に示す。出力 1.5 MW 相当のビーム電圧での効率は 68% である(Fig. 4 (1))。この条件のまま出力が 600 kW になる

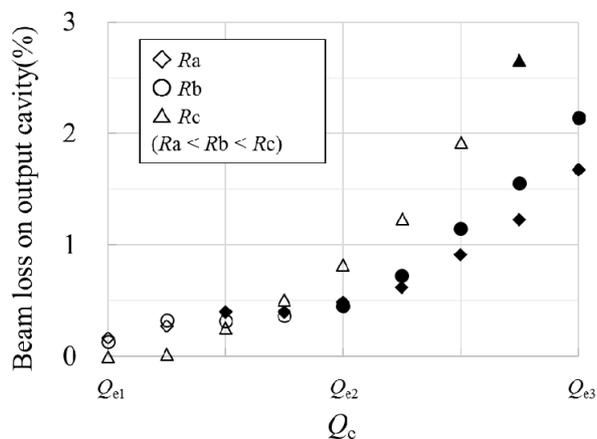


Figure 2: Dependence of beam loss on output cavity on beam diameter. Black filled marker indicates there are back-going electrons.

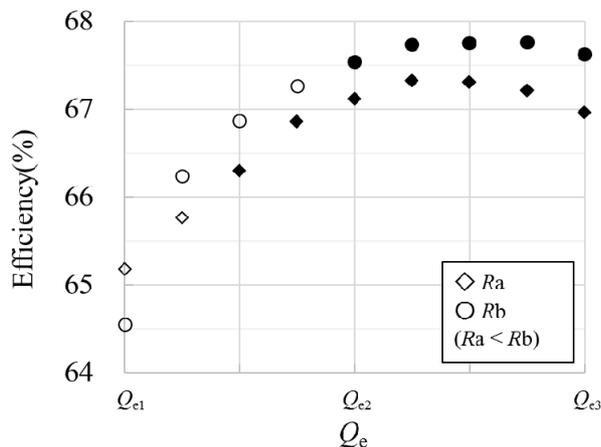


Figure 3: Dependence of efficiency on beam diameter. Black filled marker indicates there are back-going electrons.

ビーム電圧まで下げると効率は 55% に低下する(Fig. 4 (2))。ここで電子ビーム径を調整し、アイリス 1 で外部 Q 値 Q_e を調整すると効率は 67% になった(Fig. 4 (3))。また Fig. 4 (3) の条件のまま出力が 325 kW になるビーム電圧まで下げると効率は 54% に低下する(Fig. 4 (4))。ここで電子ビーム径を R_b に調整し、アイリス 2 で外部 Q 値を Q_{e1} に調整すると効率は 64% になった(Fig. 4 (5))。この結果から出力 1.5 MW、600 kW、325 kW に相当する各ビーム電圧で、電子ビーム径と外部 Q 値を調整する設計とすれば効率の低下分を改善できる見込みを得た。

2.4 構造設計

本クライストロンは主として、二極管形の電子銃、6 空洞の相互作用部、強制水冷式のコレクタから構成される。

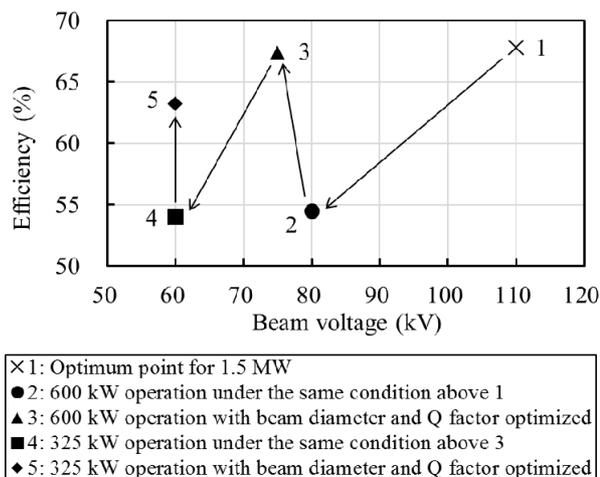


Figure 4: Saturation characteristics.

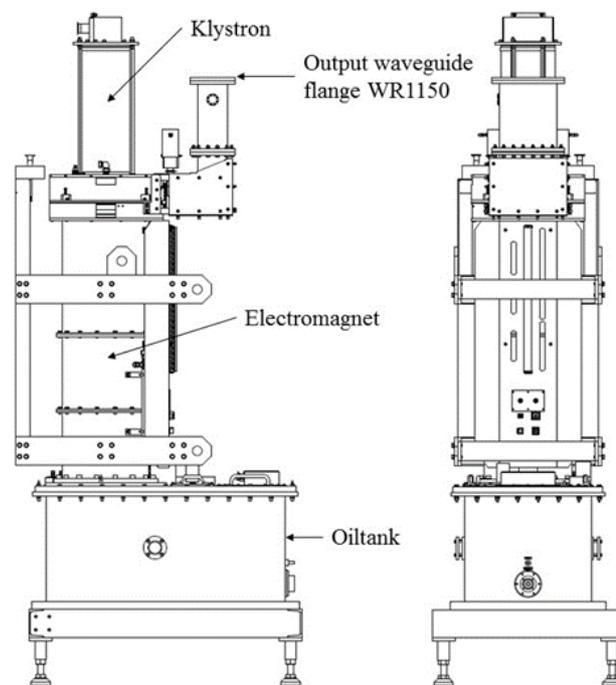


Figure 5: Drawing of the klystron set.

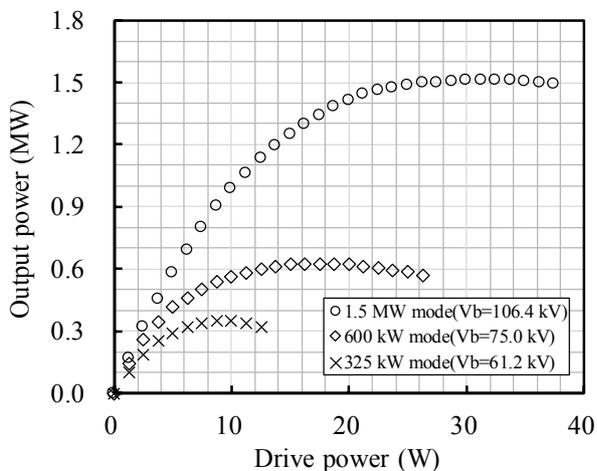


Figure 6: Transfer characteristics.

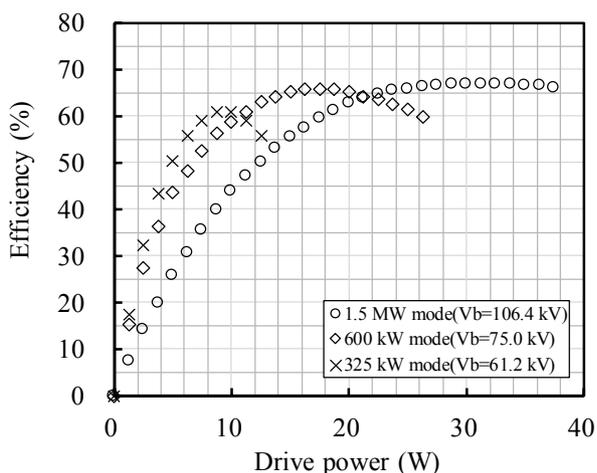


Figure 7: Dependence of efficiency on drive power.

Fig. 5 に本クライストロンを専用集束コイルとオイルタンクに組合せた外形図を示す。

3. 動作評価結果

出力 1.5 MW、600 kW、300 kW 動作モードの入力出力特性を Fig. 6 に示し、それぞれの入力に対する効率を Fig. 7 に示す。出力 1.5 MW 動作モードではビーム電圧 V_b が 106.4 kV でアイリスは未装着の状態であり、出力飽和点の効率が 67% に達した。出力 600 kW 動作モードではビーム電圧 V_b が 75.0 kV で出力導波管フランジにアイリス 1 を付加して外部 Q 値を調整し、かつ磁場分布を調整して出力飽和点で効率 66% に達した。出力 325 kW 動作モードではビーム電圧 V_b が 61.2 kV で出力導波管フランジにアイリス 2 を付加して外部 Q 値を調整し、かつ磁場分布を調整して出力飽和点で効率 61% に達した。この動作評価結果から、出力 1.5 MW、600 kW、325 kW のいずれの動作モードでも目標 60% 以上に達していることを確認できた。

出力 1.5 MW、600 kW、325 kW それぞれの動作条件でのビーム電圧 V_b に対する飽和効率を Fig. 8 に示す。

出力 1.5 MW、600 kW、325 kW のいずれの動作条件でもシミュレーションの結果によく一致した効率と傾向になった。この結果から、本クライストロンの設計で目的の効果を確認することができた。

本報告の 2 号機と同一設計のクライストロンは 2018 年 7 月までに 5 本の製作実績があり、Table 2 のように 4 本のクライストロンで 325 kW 出力時の効率が 60% 以上になる結果であった。

4. おわりに

2016 年に本学会で報告したプロトタイプ管に引き続き、本報告の 2 号機では出力 1.5 MW、600 kW、325 kW の全ての動作モードで効率 60% 以上を目標として開発した。製作の結果、出力 1.5 MW、600 kW、325 kW の全ての動作モードで効率 60% 以上を達成した。325 kW 出力時の低出力 325 kW に対応する動作電圧で効率 60% 以上を満たすため、集束コイル磁場で電子ビーム径を最適化し、アイリスで出力空洞の外部 Q 値を最適化する設計とした。設計段階では不安定現象を回避するため、電子ビーム径と外部 Q 値に対する出力空洞ビーム損失やビームプロファイルの依存性をシミュレーションし、パラメータを決定することが重要である。また広い動作範囲で高効率を実現するためには、低出力時の電子ビーム径を許容可能最大径とし、この電子ビーム径から最大出力時の電子ビーム径を決定する設計が有効であると分かった。

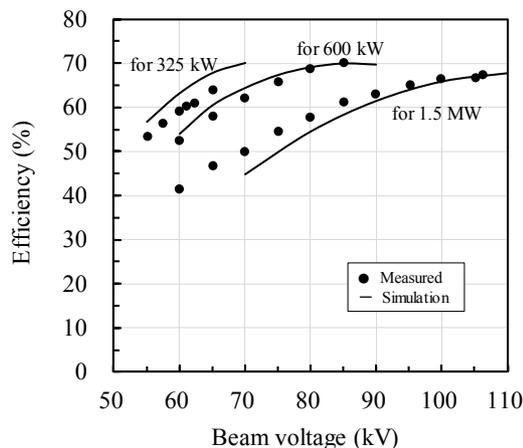


Figure 8: Comparison between simulation and experimental results; dependence of efficiency at saturation on beam voltage.

Table 2: Experimental Results for Efficiency of Mass-produced Klystrons

No.	1.5 MW	600 kW	325 kW
1	66.4%	64.5%	-
2	67.4%	65.6%	60.8%
3	65.2%	65.2%	56.2%
4	65.8%	62.4%	60.4%
5	65.7%	65.5%	60.8%
6	64.8%	65.0%	60.0%

参考文献

- [1] M. R. F Jensen *et al.*, “Results from the 704 MHz Klystron and Multi-Beam IOT Prototype for the European Spallation Source”, Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference, Copenhagen, Denmark, May, 14-19, 2017.
- [2] H. Urakata *et al.*, “Development of a 704 MHz Pulsed Klystron”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016.