

704MHz パルスクライストロンの開発

DEVELOPMENT OF A 704 MHz PULSED KLYSTRON

浦方弘人[#], 菊地里紗, 手塚勝彦, 林健一, 大久保良久

Hiroto Urakata [#], Risa Kikuchi, Katsuhiko Tetsuka, Kenichi Hayashi, Yoshihisa Okubo
Toshiba Electron Tubes & Devices Co., Ltd.

Abstract

A 704-MHz long-pulse klystron aimed to obtain efficiency of 60% or more for two different output powers, 0.6 and 1.5 MW was designed and tested, which is a klystron prototype for the Medium Beta section of the linac of the ESS project. Two methods, increasing beam current density by reducing beam diameter and raising external Q factor of the output cavity by installing an iris to the output waveguide were employed to keep the optimization for the higher output power at the operation of the lower output power. Efficiency of 65% was achieved for both the 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 Section 加速器空洞に用いられる RF 源の周波数 704MHz、出力 1.5MW パルスクライストロンのプロトタイプを開発した。High Beta Section への対応も含め、加速器空洞への投入電力は 207kW から 1.1MW が予定されていることから、本クライストロンの開発目標は 1.5MW、600kW の各出力動作のモードで、ともに効率 60%以上を満たすことにした。

良好な効率を得るためには、動作モードに合わせた相互作用部設計とする必要があるが、通常的设计手法では、いずれかの動作モードを対象に最適化すると他の動作モードでの効率が低下する。本クライストロンの初号管では、複数の動作モードに対応するため、動作モードに応じてビームパラメータの特性を外部から調整を行なうとともに、出力空洞インピーダンスが調整可能な設計とした。

動作評価の結果、両動作モードにて目標の効率に達していることを確認した。本報告では、このクライストロン初号管の設計と動作評価結果について述べる。

2. 設計

ESS 計画では High Beta Section の RF 源としてクライストロンが選択された場合、加速器空洞への RF 入力電力が 207kW から 866kW の Medium Beta Section と 835kW から 1.1MW の High Beta Section で同一仕様のクライストロンが使用される計画である。High Beta Section で 84 台 Medium Beta Section で 36 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の要求がある。プロトタイプの仕様では最大出力の 1.5MW 動作モードで効率 60% 以上、低出力領域の 600kW 動作モードでも効率を高めることを要求されている。通常クライストロンは不安定のリ

スを回避するため、最大出力の動作モードで最適化設計を行なうが、この場合は低出力領域での動作効率が低下してしまう。本クライストロンでは出力 1.5MW と 600kW の二つの動作モード、すなわち、これらの出力電力に相当するビーム電圧での動作を想定し、各動作モードともに効率を 60%以上にするのを開発方針とした。Table 1 に出力 1.5MW、600kW の各動作モードの設計目標を示す。

Table 1: Design Target

Operation	1.5 MW mode	600 kW mode
Output power	≥ 1.5 MW	≥ 600 kW
Beam perveance	$0.6 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$	$0.6 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$
Efficiency	65 %	65 %
Gain	≥ 47 dB	≥ 40 dB
Beam voltage	110 kV	76.5 kV
Beam current	21.9 A	12.7 A
Beam diameter	Larger	Smaller
Load condition	-	With iris

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で動作した場合に効率が低下する原因は主に以下の2点がある。

- 1) 電子ビームのバンチング不足若しくは過バンチングとなり高周波電流成分比が低下するとともに出力空洞部で減速位相に入らない電子が多くなる。
- 2) 以下のパラメータの変化により最適効率となる出力空洞のインピーダンスが動作電圧により変化する。

[#]hiroto.urakata@toshiba.co.jp

- ビームインピーダンスが電圧の平方根に反比例し変化する。
- 電子速度が変わるため電子と空胴の結合係数が変化する。
- 電子のバンチング状態の違いによる電子ビームの高調波電流比が変化する。

電子のバンチングはドリフト管中の電子のプラズマ振動によるので次式で与えられる低減プラズマ波長 λ_q の位相で各空胴共振器の間隔を決めることができる。

$$\lambda_q \propto \frac{1}{\sqrt{J_0 \cdot \left(\frac{1}{\beta^2} - 1\right)^{1.5}}}$$

設計と異なるビーム電圧値でも電子のバンチング状態を設計電圧のそれと同様にするには、両電圧での低減プラズマ波長 λ_q を近づける必要がある。電子速度光速比 β はビーム電圧により定まるが、電流密度 J_0 は電子ビーム径に応じて変わる。そこで、電子ビーム径を可変して電流密度 J_0 を調整すれば、基準の低減プラズマ波長 λ_q に近づける調整が可能になる。本クライストロンでは、600kW 出力時に外部に設けた集束用コイルの磁場分布により電子ビーム径を調整する設計とした。

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

$$Z_{opc} = \left(\frac{R}{Q}\right) \cdot Q_c \propto \frac{1}{M(b, V_k)^2} \cdot \frac{V_k}{I_k} \cdot \frac{1}{\left(\frac{I_\omega}{I_k}\right)}$$

最適な出力空胴インピーダンスは、ビーム電圧 V_k 、ビーム電流 I_k 、定まるビームインピーダンス、空胴と電子ビームとの結合係数 $M(b, V_k)$ 、高調波電流比 (I_ω/I_k) により定まるので、式の関係を保つにはビーム電圧 V_k に応じ

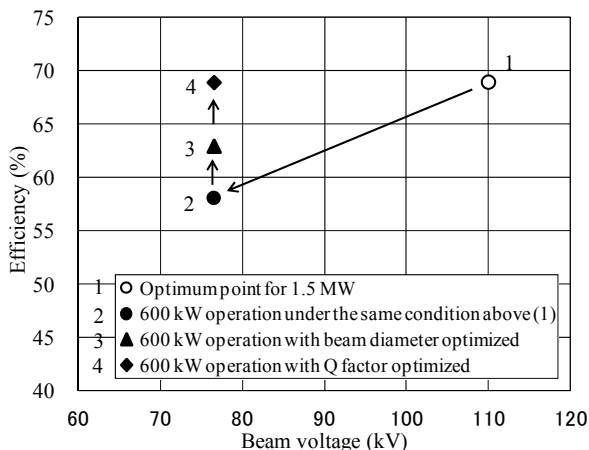


Figure 1: Saturation characteristics.

て出力空胴のインピーダンス Z_{opc} 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 は固定と考えて良いので、出力空胴の外部 Q 値を可変すれば出力空胴のインピーダンス Z_{opc} の調整が可能になる。本クライストロンでは、600kW 出力時に出力導波管フランジ端部にアイリスを付加し、この反射により外部 Q 値を可変してビームインピーダンスとの関係を調整する設計とした。

設計の効果を予測するため、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行った計算結果の例を Figure 1 示す。出力 1.5MW 相当のビーム電圧での効率は 69%である。この条件のまま出力が 600kW になるビーム電圧まで下げると効率は 58%に低下するが電子ビーム径を調整すると 63%へ、さらに外部 Q 値を調整すると 69%になった。この結果から出力 1.5MW と 600kW 相当の異なる動作点のビーム電圧でも、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。

2.2 構造設計

本クライストロンの主な構造は、二極管形の電子銃、6空胴の相互作用部、強制水冷式のコレクタで構成している。Figure 2 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。Figure 3 に本クライストロンセットの写真を示す。

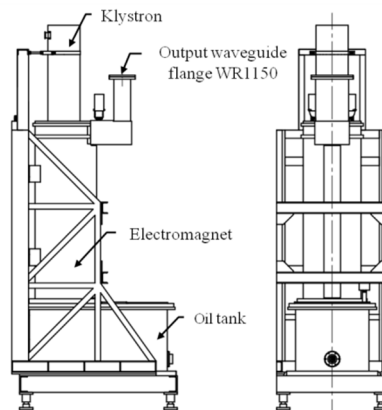


Figure 2: Drawing of the klystron set.



Figure 3: Picture of the klystron set.

3. 動作評価結果

出力 1.5MW、600kW 動作モードの入力出力特性を Figure 4 に、それぞれの入力に対する効率を Figure 5 に示す。出力 1.5MW は、ビーム電圧 V_b が 105.6kV でアイリスは未装着の状態として出力飽和点の効率が 66%に達した。出力 600kW では、ビーム電圧 V_b が 73.6kV で出力導波管フランジにアイリスを付加して外部 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 65%に達した。この動作評価結果から、出力 1.5MW、600kW 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。

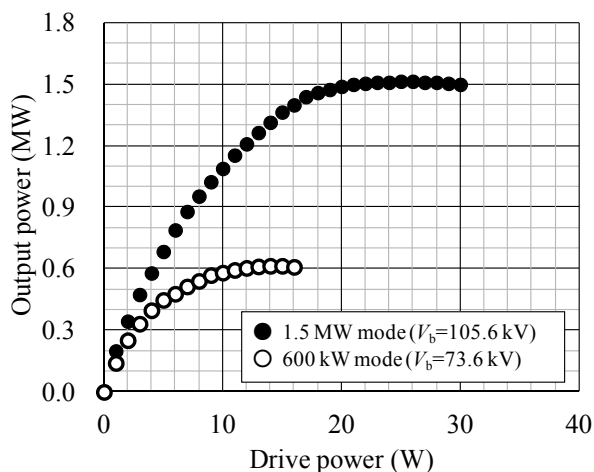


Figure 4: Transfer characteristics.

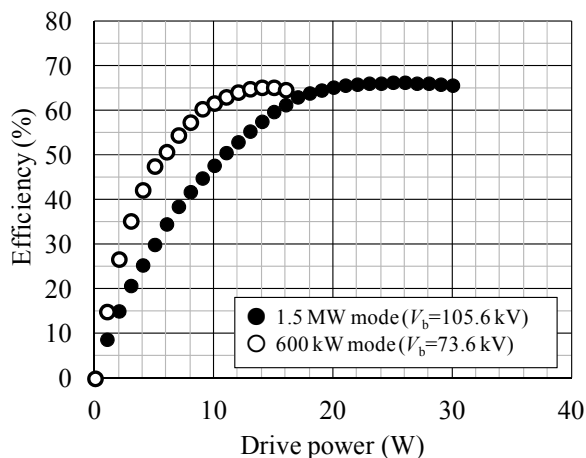


Figure 5: Dependence of efficiency on drive power.

Figure 6 に出力 1.5MW と 600kW それぞれの動作条件でのビーム電圧に対する飽和効率を示す。動作評価結果は、出力 1.5MW、600kW の両動作条件ともシミュレーションの結果に良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とした効果を確認することができた。

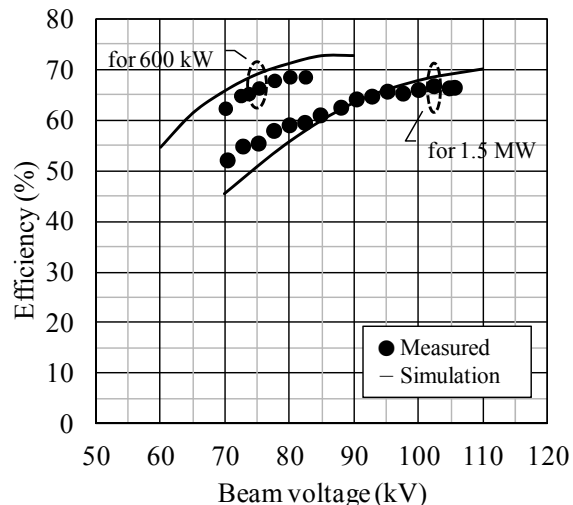


Figure 6: Comparison between simulation and experimental results; dependence of efficiency at saturation on beam voltage.

4. おわりに

出力 1.5MW と 600kW の二つの動作モードともに効率 60%以上を目標に開発した。通常的设计手法では、いずれかの動作点を対象に最適化すると他の動作点での動作効率は低下するため、本クライストロンの設計は 600kW の出力動作時に、ビーム電圧に応じてビームパラメータの特性を外部から調整するとともに、出力空胴インピーダンスを調整するようにした。動作評価結果は、シミュレーションで予測したように目標を満たす効率を達成することができた。

参考文献

- [1] Microwave Tubes, A.S. Gilmour, Jr., Artech House.