

S バンド 7.5 MW 高効率クライストロンの追加試験結果

ADDITIONAL TEST RESULTS OF S-BAND 7.5MW HIGH EFFICIENCY KLYSTRON

鈴木健一郎[#], 大久保良久
Kenichiro Suzuki[#], Yoshihisa Okubo
Canon Electron Tubes & Devices Co., Ltd.

Abstract

Some efforts for reduction of power consumption in klystron systems are carried out in Canon Electron tubes & Devices Co., Ltd. (CETD). One of the key factors is the RF efficiency of klystron, and new high efficiency design was applied to one of our conventional klystrons for evaluation of feasibility of the high efficiency design. The conventional klystron is 7.5MW S-band model which efficiency is 45%, and its interaction section was replaced by the high efficiency design. The number of cavity was increased from 5 to 10 including 2 second-harmonic cavities, and expected efficiency was more than 60% by simulation results. Prototype klystrons were tested from 2017 to 2019, and the RF efficiency reached 59%. In this paper, detailed results are reported.

1. はじめに

キャノン電子管デバイス株式会社では、クライストロンの消費電力削減を目指して各種の研究開発を実施している。クライストロンの消費電力に関わる要素のうち、クライストロンの電子ビーム電力から出力 RF 電力への変換効率は一般的に 40%から 70%程度であり、これを向上させることが非常に有効である。

RF 変換効率を向上させるには電子が集群した際の空間電荷効果が主な障壁となるが、これによる制限を緩和するために低いパービアンスの電子ビームを複数使用するマルチビームクライストロンが開発されている[1]。

一方で、パービアンスの高いクライストロンでも効率を向上させられる手法が提案されており[2-5]、従来型クライストロンの高効率化が大変関心を集めている。当社でも既存クライストロンに高効率設計を適用し、その有効性を実証することを計画した。

対象としたクライストロンは S バンド 2856MHz、ピーク出力電力 7.5MW、パービアンス 1.8uP のパルスクライストロンで、シミュレーションの結果からは高効率設計を適用すると効率が 45%から 60%以上へ向上することが期待された。この設計結果に基づいて試作クライストロンを製作し、2018 年に一次試験を実施した。その結果は 2018 年度の加速器学会年会で報告済みであるが[6]、電子ビームを集束する磁場分布を調節した場合の試験を行ったので、これについて報告する。

2. 高効率設計と一次試験結果

高効率設計と一次試験結果については先述の通り既報であるため、ここでは簡単な説明にとどめる。

2.1 高効率設計

クライストロンの RF 変換効率を向上させる上で集群した電子による空間電荷効果が主な障壁となるが、パービアンスの高い大電力パルスクライストロンにおいてはその影響が顕著である。従来の5ないし6個の空洞を使用す

る設計では集群させられなかった電子が多数存在し、出力空洞を加速位相のタイミングで通過することが効率向上を阻害する主な要因となっている。これに対して Core Oscillation Method[2] や Bunch-Align-Collect 法[3]といった手法では、電子のデバンチングや高調波空洞の作用を利用してより多くの電子をエネルギー分散を抑えて出力空洞の減速位相に集め、効率を向上させている。

当社では高効率設計の実証のために既存クライストロンへの新規設計の適用を検討した。対象のクライストロンは、第2高調波空洞を搭載可能なドリフト径であること、量産実績があり性能比較が容易なことから E3772A を選定した。このクライストロンは5空洞の S バンドパルスクライストロンで、RF 周波数は 2856MHz、RF ピーク出力電力は 7.5MW、電子銃のパービアンスは 1.8uP、典型的な効率は 45%である。このクライストロンの相互作用部を2個の第2高調波空洞を含む10空洞の高効率設計に置き換えることで 60%以上の効率を期待することができた。

Figure 1 に従来設計と高効率設計の相互作用部断面図を示す。相互作用部の長さは同一としたため、集束コイルは既存のものを使用可能としている。相互作用部のシミュレーションには 2.5 次元 Particle-in-Cell シミュレーションコードである FCI[7]を使用した。Figure 2 に位相図、Fig. 3 にビームプロファイルのシミュレーション結果を示す。位相図からは、従来の設計では電子ビームの下流

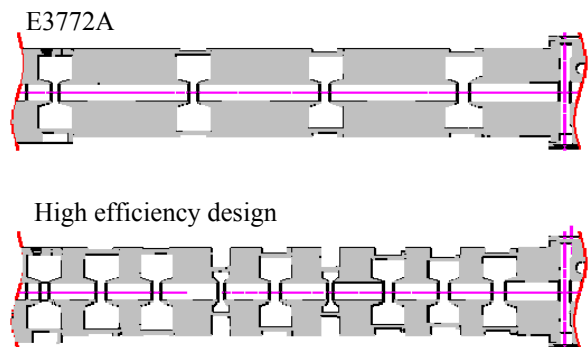


Figure 1: Cross section drawing of E3772A and high efficiency design.

[#] kenichiro2.suzuki@etd.canon

側の短い区間でバンチングを進めているのに対し、高効率設計では上流側の高調波空洞周辺からコアオシレーションを発生させ、下流側ではゆるやかに電子をバンチングさせていることが分かる。コアオシレーションによって空間電荷効果の強いバンチ中心の電子をデバンチさせつつ、空間電荷効果の弱いバンチ外側の電子をバンチ内に集めることができる。バンチングが進んだ電子ビーム下流側では、ゆるやかにバンチングさせることによってバンチ中心の電子のエネルギー分散を小さくしながらバンチ外側の電子をさらにバンチ内に集めている。以上の作用により、従来設計よりも多くの電子をエネルギーの揃った状態でバンチングさせることができ、結果として効率を向上させることができる。ビームプロファイルにはより多くの電子がバンチ内に集められている様子が顕著に現れている。

Table 1 に従来設計のシミュレーション結果と設計の目標およびシミュレーション結果のパラメータを示す。ビーム電圧 145kV のときに RF ピーク出力電力 8.9MW、効率率 62%となる結果を得た。

2.2 一次試験結果

前節の設計による試作クライストロンを製作し、2018 年に一次試験を行った。一次試験結果を Fig. 4 に示す。ビーム電圧 140kV の際に出力電力が 7.3MW、効率率は

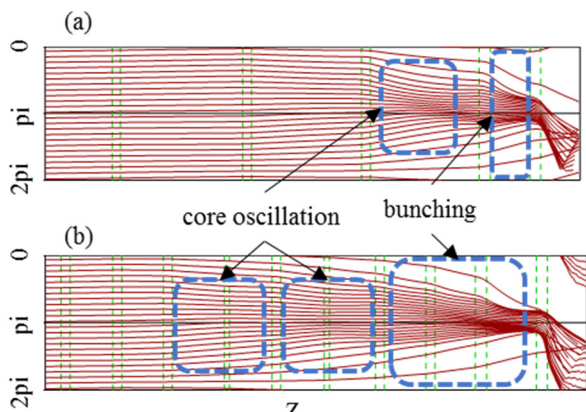


Figure 2: Phase diagrams of FCI simulations. The upper (a) is E3772A, the lower (b) is high efficiency design.

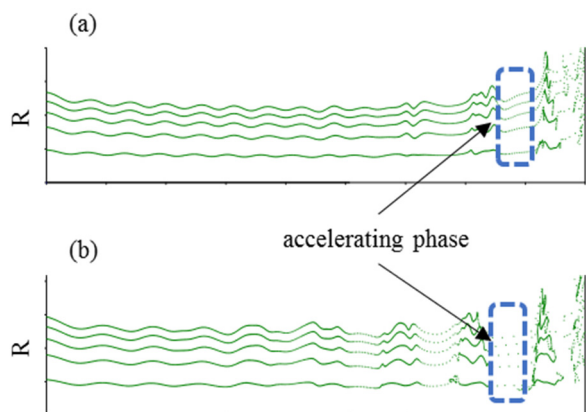


Figure 3: Beam profiles of FCI simulations. The upper (a) is E3772A, the lower (b) is high efficiency design.

Table 1: The Parameters of E3772A Simulation, Design Target and Simulation Result

Parameter	Unit	E3772A Simulation	Design Target	Simulation Result
Frequency	MHz	2856	2856	2856
Output power	MW	8.1	≥7.5	8.9
Efficiency	%	48	≥60	62
Beam voltage	kV	155	~145	145
Beam current	A	110	~100	100
Perveance	μA/V ^{3/2}	1.8	1.8	1.8
Drive power	W	80	≤160	130

59.2%となる結果を得た。高効率設計は有効に働き、既存クライストロンの実績よりも効率が約 14%向上した。また、ビーム電圧と効率の変化傾向に着目すると概ね設計通りの特性であり、ビーム電圧を設計値である 145kV まで上昇させることができればさらに効率が向上すると予想される。ビーム電圧を 140kV 以上に上昇させられなかった原因は自励発振が発生したためであり、集束磁場の調整によって発振を避けつつ効率の高くなる条件に調整した。Figure 5 にクライストロンと集束コイルの組み合わせ図を示す。集束コイルは主としてカソード磁場を調整するためのカウンターコイルと、主集束磁場を生成する3つのメインコイルの計4つのコイルから構成されている。一次試験での調整は既存クライストロンと同様にメインコイルを直列に接続する方式で行った。この方式では集束コイル電源の数を増やすことなく高効率化を達成でき、既存 RF 源の高効率化を意図したものである。一方で3つのメインコイルに独立した電源を接続して電流値を各々調整すれば、集束磁場の分布をより細かく調整することができる。集束磁場を細かく調整すればビーム軌道を変化させて、自励発振の発生条件や RF 増幅特性を変化させられる。そこで、集束磁場の分布をより細かく調整し、効率向上の可能性を探るべく追加試験を実施した。

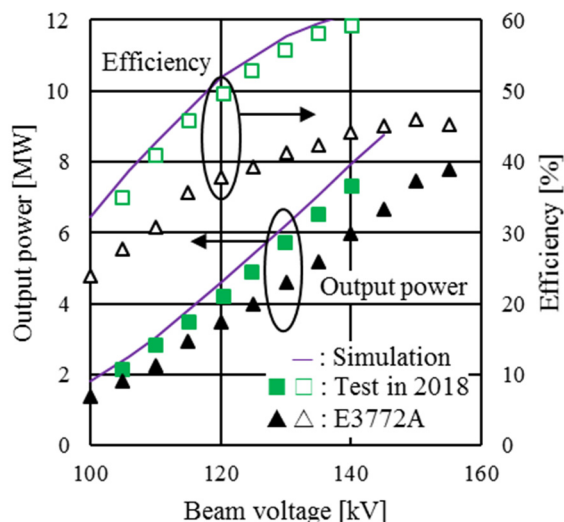


Figure 4: Saturated characteristics of simulation, conventional E3772A and test in 2018.

3. 追加試験

3.1 追加試験の方法

追加試験では、先述の通り集束磁場分布を細かく調整して各特性の変化を調査した。

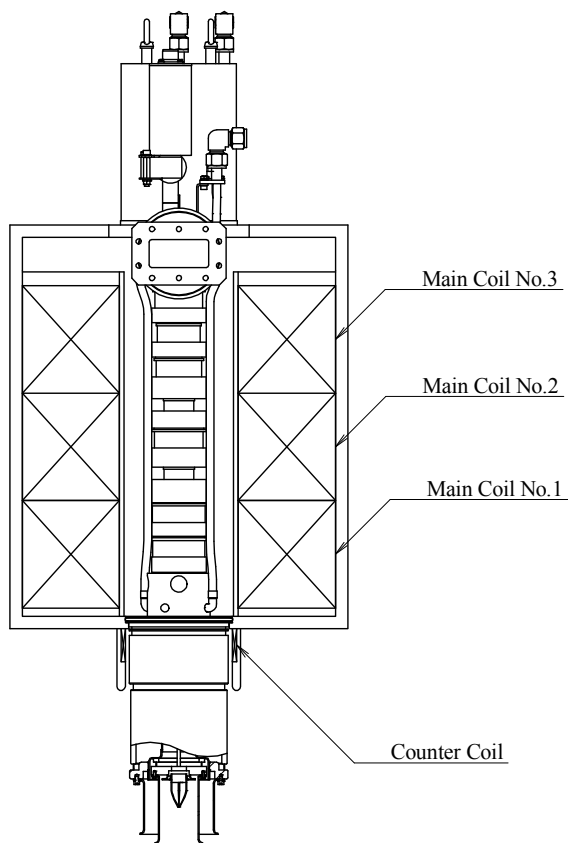


Figure 5: Combination drawing of the klystron and the focusing solenoid.

3.2 試験結果

集束磁場の分布を細かく調整することで電子ビーム軌道が変化し、自励発振の発生閾値や RF 増幅特性を変化させることができる。大まかな傾向としては、電子ビームを細くする調整にすると発振し始めるビーム電圧は上昇するが、効率が低くなるトレードオフのような関係があった。比較的効率が高くなるような調整では概ねビーム電圧 140kV が発振閾値であったが、その中で低ビーム電圧側において効率の高くなる範囲を広げることができたので、これについて述べる。一次試験と追加試験の結果の比較を Fig. 6, Table 2 に示す。効率は一次試験の結果よりも下がってしまうものの、20kV 以上の範囲にわたって効率が 50%を超え、ビーム電圧が 135kV のときに効率が 57.7%で極大になるような特性を得ることができた。発振閾値の 140kV に対してマージンを確保でき、効率も高く良好な特性であるといえる。また、一次試験時からパービアンスが上昇しているが、運転継続によるエージング効果や試験装置の定期検査におけるキャリブレーションの影響などの可能性がある。

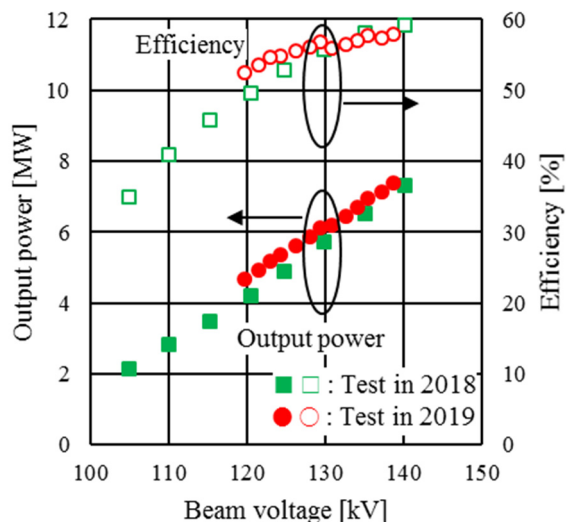


Figure 6: Saturated characteristics of test results of in 2018 and in 2019.

Table 2: Test Results of in 2018 and in 2019

Parameter	Unit	Design result	Test in 2018	Test in 2019
Frequency	MHz	2856	2856	2856
Output power	MW	8.9	7.3	7.0
Efficiency	%	62	59.2	57.7
Beam voltage	kV	145	140	135
Beam current	A	100	88.0	89.1
Perveance	$\mu\text{A}/\text{V}^{-3/2}$	1.8	1.68	1.79

3.3 試験結果に対する考察と課題

一次試験で得られたビーム電圧特性からは、ビーム電圧を 140kV 以上に上昇させることができればさらに効率を向上させられることが予想される。そのため、自励発振を解消できれば効率が最高となるビーム電圧で運転できるので、今回の高効率設計の実力を確認する点で重要な課題となっている。ビーム電圧を設計値である 145kV まで上げることができれば、効率が 60%程度で RF ピーク出力電力は既存クライストロンと同等の 7.5MW 以上になるような特性が得られているので、既存クライストロンを高効率クライストロンに置き換えることができる。

追加試験においてはビーム電圧特性を変化させることができたが、これは集束磁場分布を調整することで電子ビーム軌道が変化し、空洞との結合度や電子密度が変化したために RF 増幅特性も変化したためであると考えられる。自励発振に関しては、RF 励振電力を投入しないダイオード運転の状態が発生し、既存クライストロンでは発生しない現象であるため多空洞構造が関係していると思われる。詳細な発振メカニズムは現時点で解明できていないが、磁場を細かく調整した際の発振閾値の実測データが得られたのでシミュレーションと照らし合わせながら調査を進めていきたい。

4. 今後の展望

試作クライストロンの試験を通して、高いパービアンスのクライストロンに適用できる高効率設計が有効であることを確認できた。ここでは今回の設計を応用した際の展望について述べる。

今回試験した試作クライストロンのベースモデルはピーク出力電力が7.5MWであるが、数MW~10MW級のクライストロンは科学技術用のほかに医療用や産業用にも応用例がある。既存クライストロンの置き換えによって装置能力の向上や消費電力の削減を実現することができる。特にデューティの高い工業用途では高効率化の恩恵が大きくなるため、積極的な展開をしていきたい。

5. おわりに

高パービアンスのクライストロンに適用可能な高効率設計の実現可能性を調査し、2018年の本学会で報告した内容に加えて追加試験を実施した。試験した結果、自励発振の発生する条件はあるものの、設計時の見込みとほぼ同様に効率が向上する特性を得ることができた。効率は既存クライストロンよりも約14%向上し、高効率設計が有効に機能していることが分かった。この高効率設計はパービアンスの高いクライストロンに適用できることが特徴であり、科学技術用に留まらず工業用、医療用のクライストロンにも展開していきたい。

参考文献

- [1] A. Beunas *et al.*, "A high power long pulse high efficiency multi-beam klystron", presented in the 5th MDK Workshop, 2001.
- [2] A.Y. Baikov *et al.*, "Simulation of conditions for the maximal efficiency of decimeter-wave klystrons." *Technical Physics* 59.3 (2014): 421-427.
- [3] I. A. Guzilov, "BAC method of increasing the efficiency in klystrons," 2014 Tenth International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC), St. Petersburg, 2014, pp. 1-2.
- [4] F. Peauger, "High Efficiency-High Perveance Klystron (X-band)", *EnEfficiency RF sources Workshop*, June 2014.
- [5] A. Y. Baikov *et al.*, "Toward high power klystrons with RF power conversion efficiency on the order of 90%", *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 62, No. 10, 2015.
- [6] K. Suzuki *et al.*, "The efficiency enhancement of S-band 7.5MW pulsed klystron", *Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Niigata, Japan, Aug. 7-10, 2018.
- [7] T. Shintake, "FCI field charge interaction program for high-power klystron simulation", *Proc. 1989 PAC*, Mar. 1989, Chicago, USA.