

20 MW および高効率 8 MW X バンドクライストロンの設計と試験結果

DESIGN AND TEST RESULTS OF 20-MW AND HIGH EFFICIENCY 8-MW X-BAND KLYSTRONS

阿武俊郎

Toshiro Anno*

Canon Electron Tubes & Devices Co., Ltd.

Abstract

In recent years, compact and high gradient accelerators using high power X-band klystrons as RF sources have been used in various places. There were no X-band klystrons that have approximately intermediate RF power of 10 and 50 MW in the market, and 20-MW klystrons were demanded for research and industrial applications. Canon Electron Tubes and Devices Co., Ltd. has developed 20-MW klystrons at the operating frequency of 11.4 GHz and 12 GHz in 2021 and 2022, respectively. Both klystrons have achieved stable 20-MW output power in the tests. Another development has been started in 2018 in collaboration with CERN to enhance the efficiency of the existing 6-MW klystron and achieve more than 8-MW power by using a modified bunching circuit. Totally eight cavities including a multi-cell second harmonic cavity and a multi-cell output cavity were used. Simulations predicted the output power of 8.16 MW and 56.4% efficiency at the beam voltage of 154 kV and the beam current of 94 A. The first prototype was fabricated and tested in 2021. In the test, some oscillations were observed in the diode mode operation, and the target output power could not be achieved due to the voltage limitation. To mitigate the oscillations, the bunching circuit design was modified at CERN. The second prototype with modified bunching circuit was tested in July 2022. The klystron achieved stable diode mode operations up to the maximum 174 kV and more than 8-MW RF power was obtained. In this report, the design and test results of these klystrons are presented.

1. はじめに

近年 X バンド周波数帯の大電力クライストロンを高周波源に用いたコンパクトかつ高勾配な加速器が各所で使用されている。X バンドでは従来 10~50 MW の中間程度に位置する 20 MW 出力のクライストロンが市場になかったが、研究用や産業用として要求があった。キヤノン電子管デバイス株式会社では、11.4 GHz と 12 GHz の 20 MW クライストロンを 2021 年と 2022 年にそれぞれ開発した。いずれも試験で 20 MW の安定な出力が得られた。

また別の開発として、既存の X バンド 6 MW クライストロンを高効率化し 8 MW 出力を目指す開発を 2018 年から CERN と共同で進めてきた。6 MW クライストロンは CERN の RF コンポーネントテストスタンドの一つである X-box3 で使用されており[1]、X-box3 で利用可能なピーク RF パワーを引き上げることが高効率化の目的である。相互作用部の設計にマルチセル第 2 高調波空洞とマルチセル出力空洞を含む 8 個の空洞を使用し、シミュレーションでは出力 8.16 MW、効率 56.4%を得た。2021 年に初号機を製作し試験を行ったがダイオード運転でいくつかの発振が観測され、電圧が制限されたため目標出力が得られなかった。発振対策のため CERN で空洞の電気設計を変更した。改良した二号機を製作し 2022 年 7 月に試験した。その結果、最大仕様の 174 kV まで発振は無く、8 MW 以上の出力が得られた。

本論文では、これらのクライストロンの設計と試験結果の詳細について報告する。

2. 20 MW クライストロン

2.1 設計

まず電子銃と集束コイルの設計を行った。電子銃を設計するにはまずビーム電圧と電流、すなわちパービアンスを決定する必要がある。市販のモジュレータの電圧・電流の制限、そして 20 MW 動作での効率が 40%程度となることを想定し、パービアンスを $1.25 \mu\text{A}/\text{V}^{1.5}$ とした。動作点のビーム電圧 265 kV でビーム電流が 170.3 A となるように電子銃を設計した。電子ビームの軌道計算は DGUN で行い、集束コイルの磁界と電子銃各部の電界の計算は LANL Poisson [2]で行った。集束コイルの中心軸上磁束密度は出力空洞の位置で 0.42T となる設計とした。Figure 1 に電子銃からコレクタまでの電子ビーム軌道のシミュレーション結果を示す。コレクタはビームパルス幅 4 μs 、繰り返し数 400 pps での DC 動作に対応する設計としているため、全長に対する比率が大きい。目標パービアンスにおいてリップルの小さい電子ビーム軌道が得られた。電子銃の電界強度は 265 kV において金属部 19.2 MV/m、セラミック表面 3.9 MV/m でいずれも設計基準とした 25 MV/m と 5 MV/m をクリアした。電子銃、集束コイル、コレクタは両クライストロンで共通である。

相互作用部の設計は既存の X バンド 6 MW クライストロンからスケールリング則に基づき変更し、シミュレーションで詳細なパラメータを決定した。利得の高いクライストロンは帯域を広くすることができないため、11.4 GHz と 12 GHz のそれぞれ相互作用部を設計した。シミュレーションは二次元軸対称の PIC (Particle-in-cell) コード FCI を用いて行った[3]。空洞数は 5 とし、出力空洞は電界強度

* toshiro.anno@etd.canon

を下げるため 3 セル $\pi/2$ モード進行波型空洞とした。出力空洞の 3 次元形状の設計は HFSS コードで行った[4]。3 セル出力空洞はこれまでに開発した C バンド 50 MW クライストロンや X バンド 6 MW クライストロンでも使用しており実績がある[5-6]。11.4 GHz クライストロンについて、Fig. 2 に FCI による RF 動作時のビームシミュレーション結果を示す。Table 1 の通りいずれの設計も目標 20 MW の出力が得られる見込みを得た。なお 12 GHz クライストロンの周波数は顧客要求によるものである。構造設計を行ったクライストロンは全長約 1.3 m、質量約 300 kg となった。

Table 1: Design Target and Results of 20-MW Klystrons

Parameter	Target	E37116	E37118
Frequency [MHz]	-	11424	11988.889
Beam voltage [kV]	290 max.	265	265
Beam current [A]	190 max.	170.3	170.3
Drive power [W]	400 max.	120	120
Output power [MW]	20 min.	20	20
Efficiency [%]	40 min.	44.3	44.3
RF pulse width [μ s]	1.5 max.	1.5	1.5
Repetition rate [pps]	400 max.	400	400

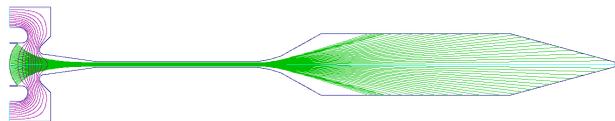


Figure 1: DGUN simulation result of DC beam trajectory from electron gun to collector under focusing magnetic field at beam voltage of 265 kV.

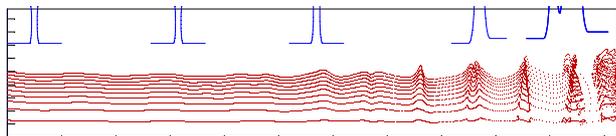


Figure 2: FCI simulation result of beam trajectory in RF operation at beam voltage of 265 kV.

2.2 試験結果

まず 11.4 GHz クライストロン E37116 を製作し 2021 年 5 月に試験した。繰り返し数は試験電源の制約により 30 pps で行った。クライストロンは電圧 270 kV で目標の 20 MW を達成し、RF 出力波形は安定であった。Figure 3 に 20 MW 動作時の波形、Fig. 4 に電圧に対する飽和出力特性を示す。12 GHz クライストロン E37118 はその後製作し 2022 年 2 月に試験を行った。繰り返し数は顧客要求によるものである。このクライストロンも同様に 20 MW の安定動作を達成した。Table 2 に 2 つのクライストロンの試験結果を示す。

Table 2: Test Results of 20-MW Klystrons

Parameter	Target	E37116	E37118
Frequency [MHz]	-	11424	11988.889
Beam voltage [kV]	290 max.	270	270
Beam current [A]	190 max.	183	181
Drive power [W]	400 max.	120	156
Output power [MW]	20 min.	20.0	20.0
Efficiency [%]	40 min.	40.6	40.9
RF pulse width [μ s]	1.5 max.	1.5	1.5
Repetition rate [pps]	400 max.	30	10

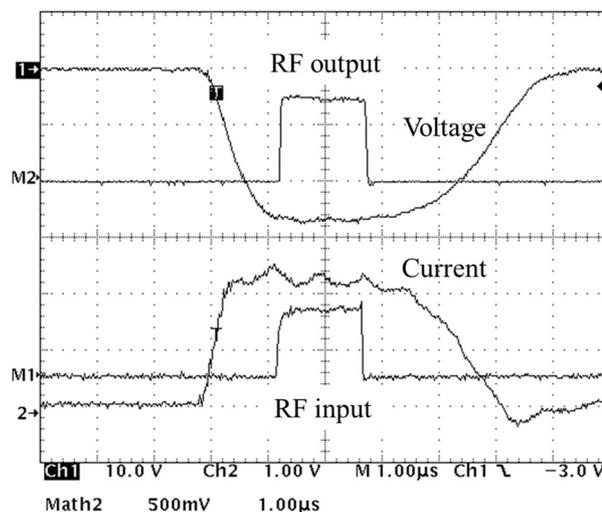


Figure 3: Waveform of 11.4-GHz klystron E37116 at 20-MW operation.

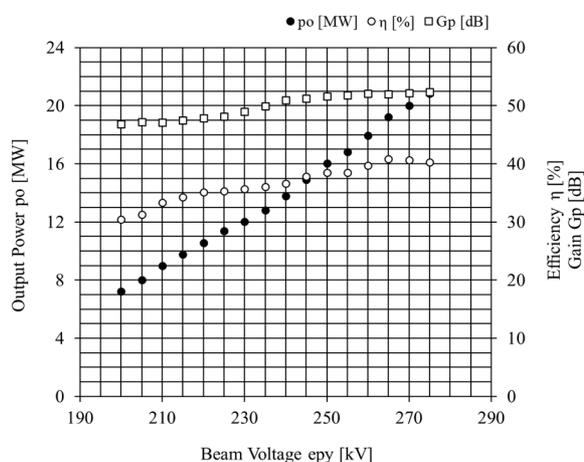


Figure 4: Saturated output characteristics of 11.4-GHz klystron E37116 as a function of beam voltage.

3. 高効率 8 MW クライストロン

3.1 設計

高効率クライストロンの電気設計は CERN が開発したシミュレーションコード KlyC [7]と市販の 3D シミュレーションコード CST Studio Suite [8]を用いて CERN で実施し、当社は FCI でその設計を確認した。なお KlyC は空洞の電磁界を 2 次元軸対称とし、半径の変わらない多層のリング(一層の場合はディスク)による電子ビームとの相互作用を計算するリングモデルシミュレーションコードである。

プロジェクトが始まった 2018 年に、まず長い相互作用部を用いて電子を徐々に集束する COM (Core Oscillation Method)による高効率設計を行った。この設計では合計 9 空洞で出力空洞を 4 セルとし、ビーム電圧 154 kV において約 58%の効率が得られた。各コードによるシミュレーション結果を Table 3 に示す。また FCI のビーム軌道を Fig. 5 に示す。この結果から、3 つのシミュレーションコードで近い効率が得られることが確認された。

Table 3: Simulation Results of First Design by Three Different Simulation Codes

Parameter	KlyC	CST	FCI
Frequency [MHz]	11994.2	11994.2	11994.2
Beam voltage [kV]	154	154	154
Beam current [A]	90	90	90
Drive power [W]	100	100	100
Output power [MW]	8.25	8.05	8.12
Efficiency [%]	59.5	58.1	58.6

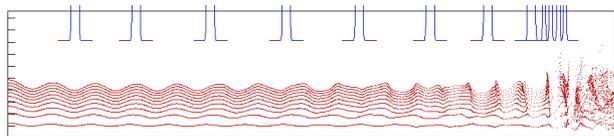


Figure 5: FCI simulation result of beam trajectory of first design at beam voltage of 154 kV.

設計 1 は相互作用部の長さが従来管の 2 倍強あり、集束コイルの大型化によるコストと消費電力の増加が欠点であった。そこで更に短い相互作用部で 8 MW を目指す設計の検討を CERN と行った。相互作用部を短くするためには第二高調波空洞を用いてバンチの中心から外れた電子を集束させることが有効である。電子の集束効果を高めるため、3 セルの第二高調波空洞を用いることにした。マルチセルの第二高調波空洞を用いたハイパワークライストロンは過去に例が見られず、新たな開発要素として取り入れた。この設計 2 では効率は約 56%に下がったものの出力 8 MW が得られ、また相互作用部の長さは設計 1 の約半分と劇的に短くなった。各コードによるシミュレーション結果を Table 4 と Fig. 6-8 に示す。なお設計 1 では CST のビーム軌道計算ソルバーによるビー

ム電流 90 A を用いていたが、設計 2 では既存 6 MW クライストロンの実測値に基づき 94 A に見直した。

設計 2 で相互作用部の長さは短くなったものの依然として従来の 6 MW クライストロンより約 12%長く、既存の集束コイルを使用できない設計であった。その後 CERN とさらに全長短縮化の検討を進めた結果、設計 2 の空洞間の距離をさらに短くしても、空洞の共振周波数を調整することで効率を維持できることがわかった。その結果 6 MW クライストロンと同じ長さで既存の集束コイルを用いても KlyC と FCI で設計 2 と同じ効率が得られた。この電気設計に決定しクライストロンを製作することにした。

Table 4: Simulation Results of Second Design by Three Different Simulation Codes

Parameter	KlyC	CST	FCI
Frequency [MHz]	11994.2	11994.2	11994.2
Beam voltage [kV]	154	154	154
Beam current [A]	94	94	94
Drive power [W]	80	80	80
Output power [MW]	8.31	8.16	8.16
Efficiency [%]	57.4	56.4	56.4

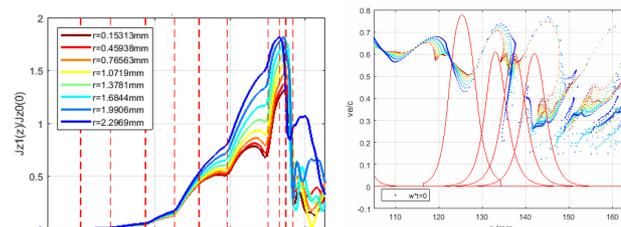


Figure 6: KlyC simulation results of second design at beam voltage of 154 kV. Modulation depth at longitudinal position (left) and electron velocity at output cavity (right) are shown.

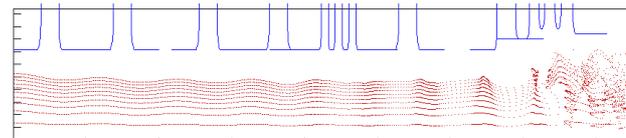


Figure 7: FCI simulation result of beam trajectory of second design at beam voltage of 154 kV.

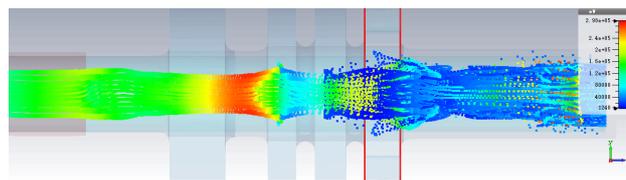


Figure 8: CST simulation result of beam trajectory in output cavity of second design at beam voltage of 154 kV.

3.2 初号機の試験結果

初号機を製作し 2021 年 12 月に試験を行った。クライストロンの試験ではまず電子銃の耐電圧処理のため DC 運転 (RF 入力なしの運転)を行う。この運転の最中、クライストロンの RF フランジに接続した方向性結合器に取り付けたダイオード検波器によりある波形が観測され、その信号強度はクライストロンの電圧によって変化した。この現象からクライストロンが発振していると判断し、ビーム電圧を変えながらスペクトラムアナライザにより発振周波数を調査することにした。

調査の結果、発振は主に 2 つに分けられることが分かった。一つは周波数 22.5 GHz の発振であり、およそ 85 ~ 125 kV の電圧範囲で生じた(タイプ 1 とする)。もう一つの発振は 21.9 ~ 22 GHz の発振であり、およそ 107 ~ 125 kV の電圧範囲で発生した(タイプ 2 とする)。タイプ 2 は集束コイル電流とビーム電圧の組み合わせによっては 21.9 ~ 22 GHz の範囲で 2 つの周波数ピークが同時に現れることがあった。発振の測定結果を Fig. 9-10 と Table 5 に示す。

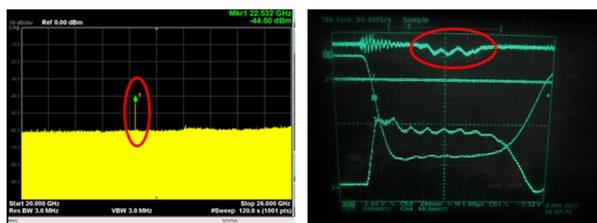


Figure 9: Frequency spectrum and waveform of type one oscillation measured at beam voltage of 92 kV. Red circles indicate oscillation.

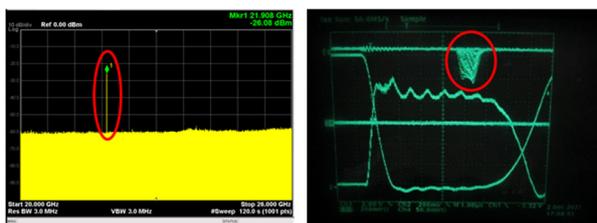


Figure 10: Frequency spectrum and waveform of type two oscillation measured at beam voltage of 125 kV. Red circles indicate oscillation.

Table 5: Frequency of Two Types of Oscillations Measured by Spectrum Analyzer at Different Voltages

Type	Beam voltage [kV]	Frequency [GHz]
1	85 - 125	22.5
2	107 - 125	21.9 - 22.0 (single peak or double peaks)

タイプ 1 のモードについて、第二高調波 3 セル空洞の TM01 $\pi/2$ モード(共振周波数 22.5 GHz)が疑われた。またタイプ 2 のモードについては、2 つの周波数が現れた

ことと、相互作用部の固有モード解析から空洞間で結合する TE モードが疑われた。

RF 試験も行ったが、発振のため RF 波形が安定するビーム電圧が 70 kV 程度に制限され、RF 出力は数 kW しか得られなかった(シミュレーションでも同様)。

3.3 発振の解析と対策設計

CERN でシミュレーションによる発振の詳細な解析と、発振対策のための相互作用部の設計変更を行った。タイプ 1 の発振について推定した第二高調波 3 セル空洞の TM01 $\pi/2$ モードの発振開始電流を KlyC に実装されたモニタリング機能によりシミュレーションした[9]。その結果実測とほぼ一致する電圧範囲で発振することが分かった。ビーム電流を示す黒線を下回ると発振することを意味する。CST による PIC シミュレーションでも発振によりビームが変調を受けることが確認された。Figure 11 にそれらのシミュレーション結果を示す。

対策として、3 セルの空洞間隔を短くすることで発振を回避できることが分かった。しかしこの場合はより発振リスクの低い 2 セルとしても電子の集束効果が変わらず 3 セルのメリットがないため 2 セルに変更した。

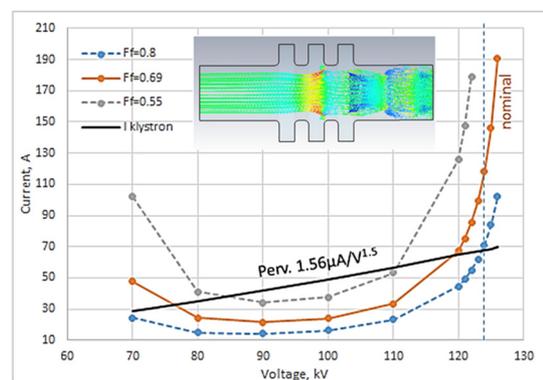


Figure 11: Oscillation threshold currents of TM01 $\pi/2$ mode of second harmonic 3-cells cavity by KlyC simulation in different beam filling factors. Beam trajectory is simulated by CST at 92 kV.

タイプ 2 の発振は固有モード解析から第 2 ~ 第 4 空洞で結合した TE110 モードと $\pi/2$ モードと推定した。各モードの安定性をモードの Q 値 Q_0 とビームローディング Q 値 Q_{beam} から計算する手法[10]で計算し、 $Q_0/Q_{beam} < -1$ となり発振リスクのある電圧範囲が実測とよく一致した。Figure 12 にそのシミュレーション結果を示す。

対策として、当初の設計では同じであった空洞のギャップの長さを $\pm 20\%$ 程度互いに变化させ、RF 特性が変わらないように共振周波数を調整した。その結果 TE11 モードは空洞間でほとんど結合せず、 Q_0/Q_{beam} 解析で 155 kV まで安定となった。さらに安定領域を広げるため高次モードに対して減衰効果の大きいステンレスを入力 ~ 第 5 空洞の間の 4 つのドリフトに導入した。CST による PIC シミュレーションの結果、Fig. 13 の通り電圧 174 kV で発振がないことが確認された(仕様最大電圧 175 kV)。

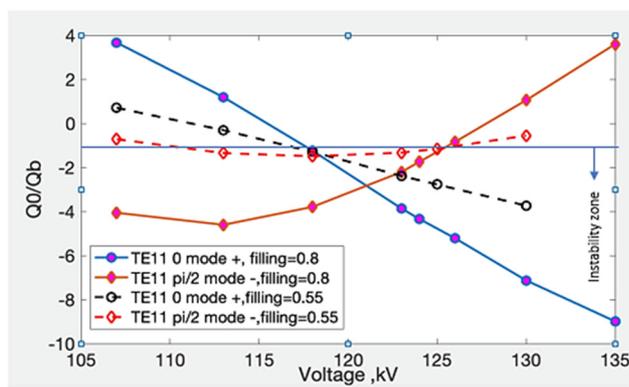


Figure 12: Q_0/Q_{beam} as a functions of beam voltage for 0 and $\pi/2$ of TE11 mode. Here, ‘+’ and ‘-’ signs indicate the different rotation directions of the modes.

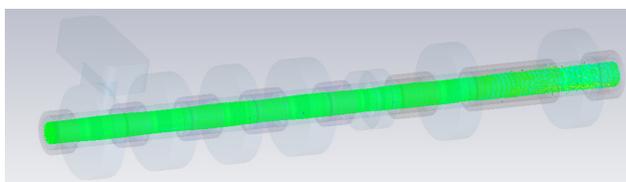


Figure 13: Particle trajectories in modified bunching circuit at 174 kV, beam tunnel filling factor of 0.69 and magnetic field of 0.42 T after 4000-ns simulation time.

3.4 二号機の試験結果

発振対策を導入した二号機を製作し、2022年7月に試験を行った。まずダイオード運転でシミュレーション通り174 kVまで発振がないことを波形と周波数スペクトラム(ピークなし)で確認した。

その後RF試験を行った。出力と効率の確認が目的であるため目標より低いディーティで試験を行った。157 kVで出力8.1 MW、効率53.3%が得られた。また174 kVでは出力10.1 MWが得られた。これらの動作においてRF波形は安定であった。試験結果をTable 6に、飽和出力特性と8.1 MWおよび10.1 MW動作時の波形画像をFig. 14に示す。

Table 6: Test Result of High Efficiency Klystron

Parameter	Spec.	Result 1	Result 2
Frequency [MHz]	11994.2	11994.2	11994.2
Beam voltage [kV]	175 max.	157	174
Beam current [A]	115 max.	96.8	112.8
RF pulse width [μs]	(Target 4)	1	0.5
Repetition rate [pps]	(Target 200)	50	50
Drive power [W]	400 max.	121	68
Output power [MW]	(Target 8)	8.1	10.1
Efficiency [%]	(Target 56)	53.3	51.7

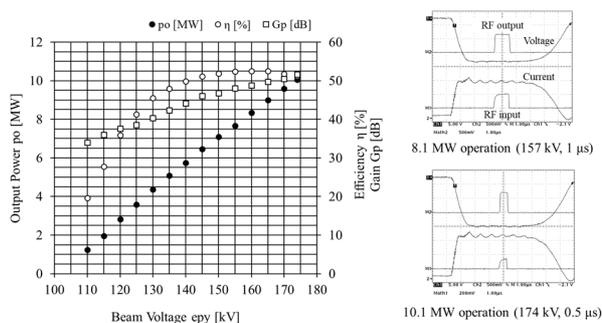


Figure 14: Saturated output characteristics of high efficiency klystron as a function of beam voltage (left) and waveform at 8.1-MW and 10.1-MW operations (right).

4. まとめ

Xバンドクライストロンの新たな選択肢となる20 MWクライストロンを2つの周波数で開発した。またCERNと共同で高効率8 MWクライストロンを開発した。高効率クライストロンの開発では初号機で発振が生じたが、対策設計により二号機で安定化に成功し目標の8 MW出力を達成した。

謝辞

高効率8 MWクライストロンの共同開発ではIgor Syratychev, Jinchai Cai, Zaib Un Nisa, Graeme Burt各氏にご協力をいただきました。ここに感謝いたします。

参考文献

- [1] N. Catalan Lasheras *et al.*, “Commissioning of XBox-3: A very high capacity X-band test stand”, in Proc. of 28th Linear Accelerator Conference, East Lansing, Michigan, USA, 2016.
- [2] https://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml
- [3] T. Shintake, “FCI field charge interaction program for high-power klystron simulation”, Proceedings of 1989 IEEE Particle Accelerator Conf. (PAC89), Chicago, USA, pp.94-96, 1989.
- [4] <https://www.ansys.com/ja-jp/products/electronics/ansys-hfss>
- [5] T. Anno *et al.*, “Efficiency Enhancement of C-band 50-MW Klystron”, Proceedings of the 11th Linear Accelerator Meeting in Japan, Online, 2020.
- [6] Y. Okubo *et al.*, “Development of an X-band 6 MW pulsed klystron”, Proceedings of the 11th Linear Accelerator Meeting in Japan, Aomori, Japan, 2014.
- [7] J.C. Cai, I. Syratychev, “KlyC: 1.5D Large Signal Simulation Code for Klystrons”, IEEE Trans. on Plasma Science, vol.47, no.4, pp.1734-1741, April 2019.
- [8] <https://www.3ds.com/ja/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [9] J.C. Cai, I. Syratychev and G. Burt, “Accurate Modelling of Monotron Oscillations in Small- and Large-Signal Regimes” IEEE Trans. on Electron Devices, vol.67, issue.4, pp. 1797 - 1803, April 2020.
- [10] J.C. Cai, I. Syratychev and G. Burt, “Numerical Analysis of Resonant Multipolar Instabilities in High Power Klystrons”, IEEE Trans. on Electron Devices, vol.68, issue.7, pp. 3617 - 3621, June 2021.