

CLIC 計画用 1GHz,20MW マルチビームクライストロンの開発

DEVELOPMENT OF A 20-MW, 1-GHz MULTI BEAM KLYSTRON FOR CLIC PROJECT

青山 真士#, 手塚 勝彦, 林 健一, 大久保 良久

Masato Aoyama #, Katsuhiko Tetsuka, Kenichi Hayashi, Yoshihisa Okubo

Toshiba Electron Tubes & Devices Co.,Ltd.

Abstract

A new multi beam klystron has been developed for the CLIC project at CERN. Aiming to obtain efficiency of 71% for 20-MW output at 999.516 MHz, the klystron was designed to have six beams, with its perveance per beam set on $0.42 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$. The electron gun was a diode with six cathodes arranged in a concentric circle and the interaction circuit consists of six TM010-mode coaxial cavities. A pill box window that tapered toward the output rectangular waveguide at the atmosphere side was employed, reducing the maximum electric field strength in it to 1.6 kV/mm for 20-MW output. Test was started this June and efficiency of 68.3% was obtained for 20-MW and 150- μs pulsed operation with low repetition rate so far. Saturated output characteristics and transfer characteristics are also obtained with an RF pulse width of 5 μs . RF discharge that occurred inside a dummy load prevented high duty operation.

1. はじめに

CERN では次期大型加速器計画として CLIC (The Compact Linear Collider) 計画を推進している[1]。この計画では 1GHz の加速器で加速した電子を用い 12GHz、3GW の RF 波を発生させ電子を加速する。東芝電子管デバイス株式会社では、1GHz 加速器のプロトタイプ用の RF 源として、周波数 999.516MHz、ピーク RF 出力 20MW の MBK (Multi Beam Klystron) の開発を行っている。2014 年に設計を開始し、2015 年から製造に着手した。本クライストロンの設計では、要求仕様から MBK を選択し、当社の既存 MBK (E3736) [2] の設計手法を適用し設計パラメータ確定を行った。また、本開発に伴い試験電源の改造および立体回路の新設を実施した。本報告では 1GHz MBK の設計と特性確認結果について報告する。

2. クライストロン

2.1 概要

Table 1 に本 MBK の仕様と設計目標を示す。パルス幅 150 μs 、ピーク出力電力 20MW のパルス RF を繰り返し 50pps で出力する。平均出力電力は 150kW である。20MW 出力時に 67%以上の動作効率を要求されており、設計では 71%を目標とした。ビーム電圧は CERN 電源の性能から 180kV 以下とする必要がある。パービアンスの目標値は $2.52\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ (単ビーム当たり $0.42\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$) とした。

当社は、European XFEL 向けの MBK として、既に 1.3GHz、10MW 管を開発している。この管の効率は 66%である。当社 MBK の基本的構造は空胴の共振モードに TM010 モードを採用し、同心円上に配置した個々の電子ビームを空胴に入射する。これにより、全ての電子ビームを軸方向の電界強度が最も高くなる径方向位置に入射し、個々の電子ビームに同じ強度の軸方向電界を与えることができるため、安定で高効率の動作

を実現している。

一般にクライストロンはパービアンスを下げると効率が上がる。本 MBK は目標効率 71%達成のため、パービアンス/効率の経験則式[3]から単ビームあたりのパービアンスを $0.42\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ とした。電源電圧に対する制約内 (ビーム電圧 180kV 以下) で 20MW 出力時に効率 71%を達成するため、6ビーム以上の MBK として設計することとした。

ビーム数を増やすことで、単ビーム当たりのパービアンスは小さくできる。しかし、同心円周上にビームを配置するため、ビーム本数が増えるとカソード径が小さくなり、カソード電流密度が大きくなる。これを避けるには同心円を大きくする必要があるため、管径が大きくなる。また、個々の電子ビームパービアンスを下げると相互作用部 (すなわち、管の全長) が長くなる。これらのことから、高効率化は管の幾何学的大きさとのトレードオフとなる。以上を検討し、6ビーム設計を採用することに決定した。

Table 1: Specification and Design Target

Parameters	Unit	Specifications	Design target
RF frequency	MHz	999.516	999.516
Peak RF power	MW	≥ 20	20
Power efficiency	%	≥ 67 (*)	71
Power gain	dB	> 48 (*)	> 48
RF pulse width	μs	150	150
Pulse repetition rate	pps	50	50
Peak beam voltage	kV	≤ 180	166
Peak beam current	A	-	170.4
Beam perveance [per beam]	$\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$	-	2.52 [0.42]
Number of Beam	-	-	6

(*) at 20 MW

masato.aoyama@toshiba.co.jp

Figure 1 にクライストロン単体の写真と 3 次元モデルを示す。下から電子銃、相互作用部、出力窓、コレクタで構成されている。全長(コレクタ頂点から電子銃部底面まで)は 2.8m、重量 500kg である。電子銃はカソード 6 個を同心円周上に配置した 2 極管構造である。相互作用部は 6 空洞構成で共振モードは同軸 TM010 モードである。出力窓は大気側の矩形導波管との接続箇所をテーパ形状としたピルボックスタイプである。

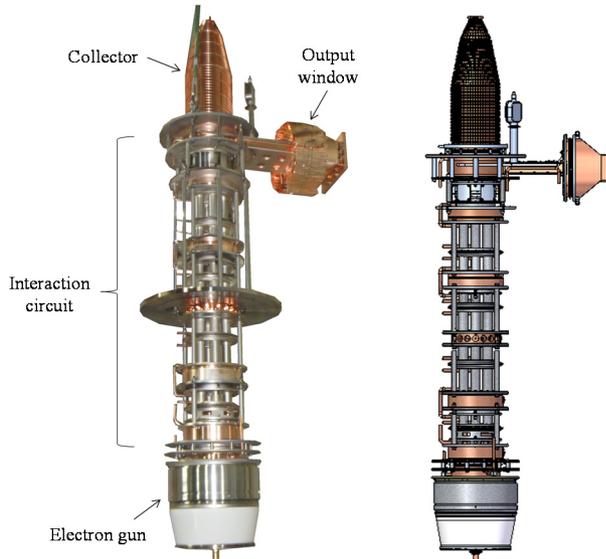


Figure 1: Picture and 3D drawing of the klystron.

2.2 詳細設計

電子銃のカソードには当社製の M タイプカソード[4]を採用し、電子ビームの集束は電磁石集束方式で行う。電子銃設計の結果を Table 2 に示す。

MBK はクライストロンの中心ではない位置を電子ビームが通過するため、単ビームクライストロンで用いられる集束磁場分布では電子ビームは管軸に平行な軌道とならない。本 MBK では電子銃から相互作用部までの磁場を平行磁場とした。そのため、電子ビーム軌道計算は 2 次元モデルでの取り扱いが可能であり、シミュレーションコード DGUN[5]を使用してビーム軌道計算を行った。ビーム電圧 166kV での電子ビーム軌道の計算結果を Figure 2 に示す。リップルの計算結果は 0.9%であり、良好な電子ビームが得られた。

Table 2: Electron Gun Simulation

Parameters	Unit	Result
Beam ripple	%	0.9
Cathode loading	A/cm ²	1.75
Electric field strength (Wehnelt)	kV/mm	64
Electric field strength (Ceramic)	kV/mm	14

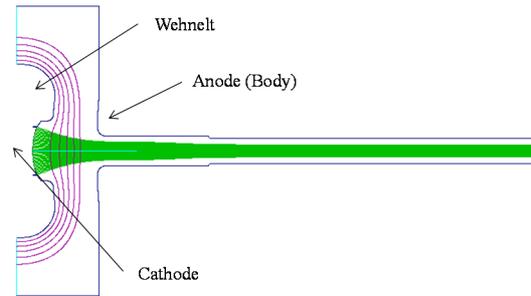


Figure 2: Beam trajectories calculated by DGUN.

相互作用部は 6 空洞で構成されており、第 3 空洞を高調波空洞とすることで全長を短くしている。Figure 3 に入力空洞の 1/2 モデルを示す。Figure 3 に示したモデルのように、各空洞は 6 つのビームホールが同心円周上に配置されている。

本 MBK の最終的なシミュレーション結果を Table 3 に示す。相互作用部のパラメータ決定にはビームシミュレーションコード FCI[6]を使用した。既存 MBK の動作効率の FCI シミュレーション値と実績値の差から、本 MBK の目標効率 71%を達成できるように、シミュレーション目標値を 75%以上とした。Figure 4 に入出力特性のシミュレーション結果を示す。ビーム電圧 166kV、ビーム電流 170.4A、励振電力 192W で RF 出力 21.5MW、動作効率 76.1%の計算結果を得た。Figure 5 に励振電力 192W における RF 出力と動作効率のビーム電圧依存性を示す。RF 出力 20MW での動作効率はおおよそ 75%である。Figure 6 に Figure 4 と同じビーム条件で励振電力 192W のときのビームプロファイル、エネルギープロファイル、ビーム電流プロファイルの計算結果を示す。

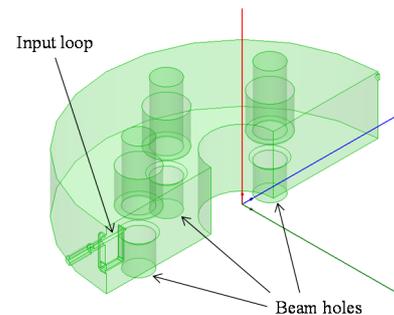


Figure 3: A half model of input cavity structure.

Table 3: Simulation Result of Interaction Circuit

Parameters	Unit	Target	Result
RF frequency	MHz	999.516	999.516
Peak RF power	MW	20	21.5
Power efficiency	%	≥ 75	76.1
Power gain	dB	> 48	50.5
Peak beam voltage	kV	166	166
Peak beam current	A	170.4	170.4
Beam perveance	$\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$	2.52	2.52

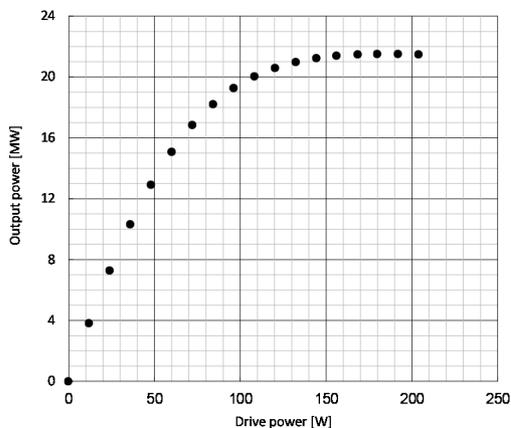


Figure 4: Simulation result of transfer characteristics for beam voltage 166 kV and beam current 170.4 A.

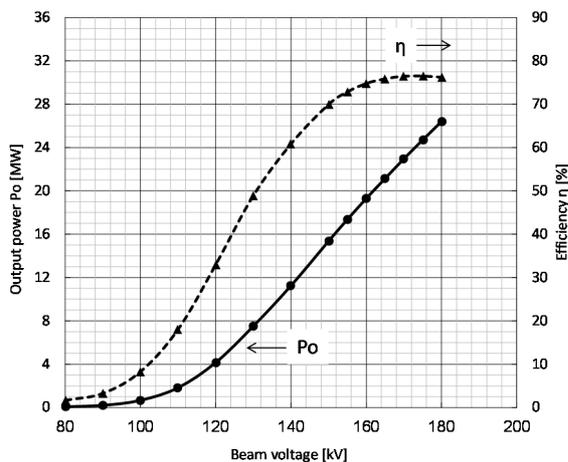


Figure 5: Simulation result; dependence of output power and efficiency on beam voltage for drive power of 192 W.

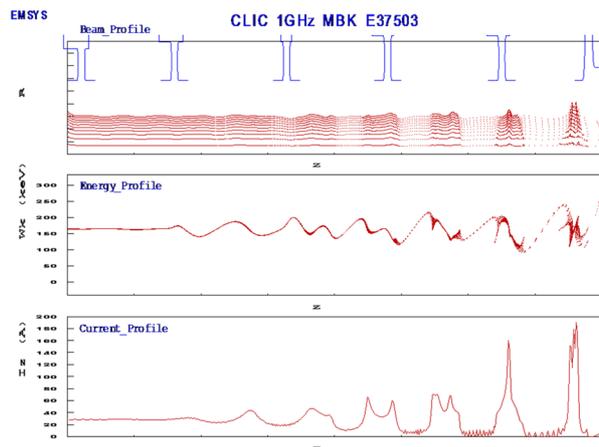


Figure 6: Simulation results; beam profile, energy profile and current profile by FCI code. Beam voltage is 166 kV, beam current 170.4 A and drive power 192 W.

出力窓には 99.7%以上の高純度低損失アルミナセラミックスを使用しており、出力導波管は矩形 WR975 である。本 MBK は 1 つ窓で 20MW が透過可能な設計とした。大気側の矩形導波管との接続箇所をテーパ形状としたことで、20MW 透過時に矩形導波管接続箇所の長辺中央部電界強度は 1.6kV/mm となる。Figure 7 にこのときの電界強度分布を示す。通常のパルボックスタイプでの計算結果と比較して大気側最大電界強度をおよそ 70%まで低減しており、大気側導波管雰囲気を乾燥空気加圧で使用する上限と考えている 2kV/mm 以下とすることができた。動作周波数での VSWR は 1:1.01 である。

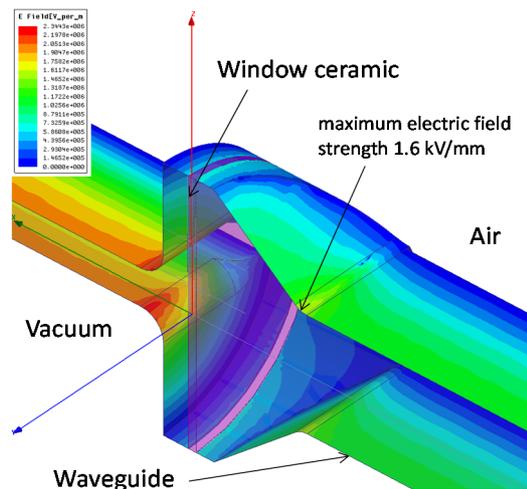


Figure 7: Electric field strength profile of the output window.

3. 試験装置

当社は大電力クライストロンの評価試験用として最大出力電圧 120kV の電源を所持している。今回 180kV (パルス)出力用に Figure 8 に示すようなパルストランス /IGBT スイッチ方式の電源を追加した。パルストランスの大きさ、重量の現実的な制約により励磁インダクタンスが決まるため、2 次側の電圧 / 電流の立ち上がり時間は 170 μ s 程度となり、Figure 14 に示すように、RF パルス幅 150 μ s のフラットトップを得るには 340 μ s のビームパルス幅が必要である。パルストランスに集束コイルを取り付け、本 MBK をソケットインした状態の写真を Figure 9 に示す。クライストロン頂点からパルストランス底面までは 4.6m で重量はコイル 3.1t、パルストランス 14t である。

RF 系の構成を Figure 10 に示す。立体回路の写真は Figure 11 に示す。立体回路内は放電抑制のため、SF6 もしくは乾燥空気で加圧する設計としている。放電が生じた場合には、立体回路上部と下部の E コーナビューポートに設置されたアークセンサが光を検知し、PIN モジュレータで励振電力を停止する。クライストロンの RF 出力はダミーロードの冷却水の入水温度と出水温度を測定し、入出水の温度差からカロリメトリックに求める。

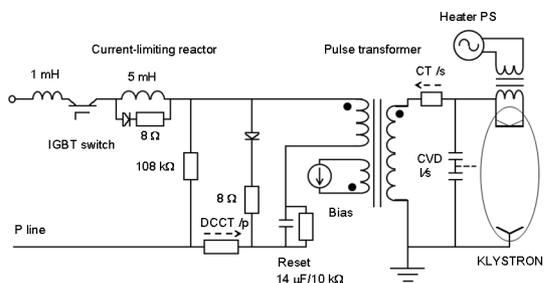


Figure 8: Skeleton diagram of the power supply.

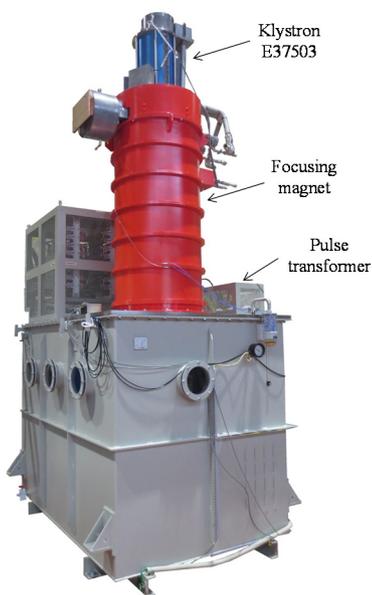


Figure 9: Picture of the pulse transformer, focusing magnet and klystron E37503.

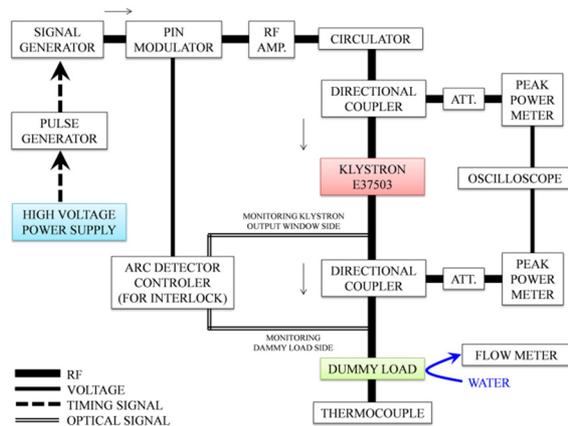


Figure 10: Configuration of RF transmission system.

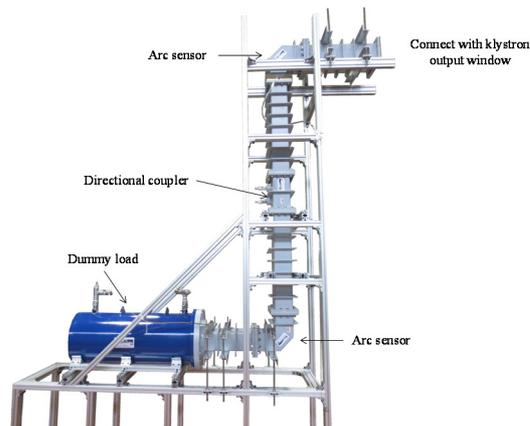


Figure 11: Picture of the waveguide circuit.

4. 評価試験結果

2016 年 6 月から性能評価を当社で実施している。前述のとおり、パルストランスの特性により RF パルス幅 150 μ s に対して約 2 倍のビームパルス幅が必要となる。このため、この評価試験では繰返しの上限を 25pps とした。

RF なしのビーム特性はフルデューティの 161.4kV / 183.2A、ビームパルス幅 340 μ s、繰返し 25pps まで安定に動作することを確認した。パービアンスは 2.82 μ A/V^{3/2} で設計値より高い値となっている。

RF 試験はダミーロード内の RF 放電の制約により、ハイデューティでの試験ができていない。これまでに RF パルス幅 5 μ s、繰返し 5pps での入出力特性などの基本性能の確認と、RF パルス幅 150 μ s、低繰返し (0.5pps) での動作を確認した。Figure 12 にビーム電圧に対する出力電力、動作効率、利得の飽和特性を示す。ビーム電圧 161.4kV で RF 出力 20.2MW、動作効率 68.3%、利得 53.5 dB を確認した。Figure 13 にビーム電圧 161.4kV のときの入出力特性を示す。不連続な部分のない入出力特性であることを確認した。Figure 14 に RF パルス幅 150 μ s 時の波形を示す。Table 4 に設計値と性能評価試

験結果の比較を示す。フルデューティでの試験はダミーロードの放電対策実施後に再開し、熱負荷の増加による特性変化がないことを確認する予定である。

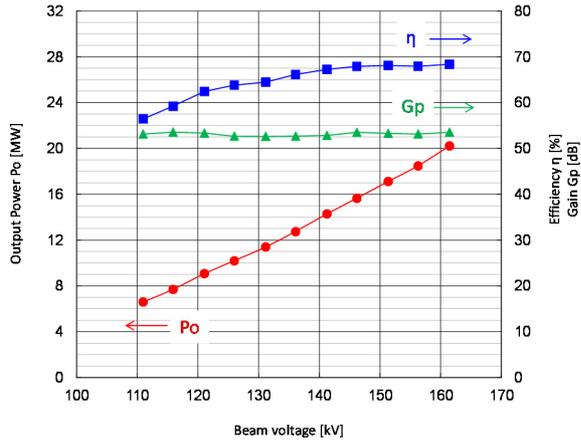


Figure 12: Test result of saturated output characteristics.

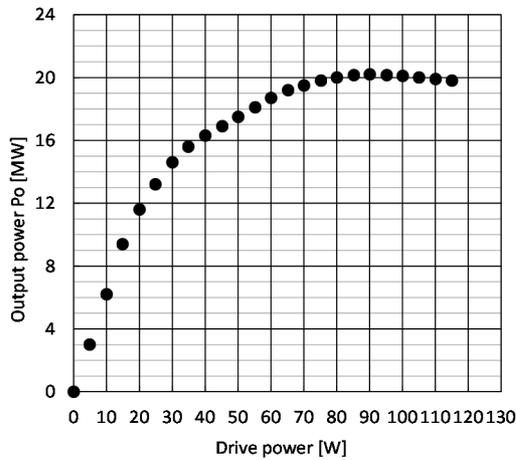


Figure 13: Test result of transfer characteristics.

Table 4: Design and Performance Test Results

Parameters	Unit	Design	Result
RF frequency	MHz	999.516	999.516
Peak RF power	MW	21.5	20.2
Power efficiency	%	71(*)	68.3
Power gain	dB	50.5	53.5
Peak beam voltage	kV	166	161.4
Peak beam current	A	170.4	183.2
Beam perveance	$\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$	2.52	2.82

(*) at 20 MW

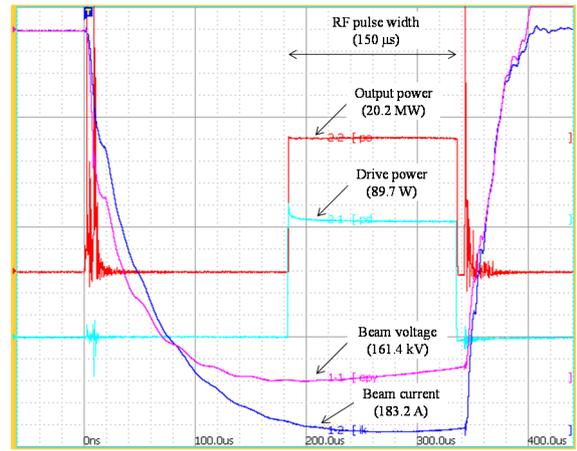


Figure 14: Waveforms of output power, drive power, beam voltage and beam current.

5. おわりに

1GHz MBK E37503 は 20MW 出力時の動作効率が 67%以上を要求されており、CERN 電源の電圧仕様値を考慮し、効率を満足させることが可能なパービアンズ値を選択した。本開発のために試験電源改造および立体回路の新設も行い、本 MBK の評価試験を実施中である。評価試験の条件 (RF パルス幅: 150 μs 、繰返し: 25pps) に対し、RF パルス幅 5 μs 、繰返し 5pps での特性確認まで完了している。また、RF パルス幅 150 μs 、繰返し 0.5pps で 20.2MW 出力、効率 68.3%も確認できている。今後は放電対策がされたダミーロードを使用して、引き続き定格試験条件での動作確認を実施する予定である。

参考文献

- [1] <http://clic-study.web.cern.ch/content/conceptual-design-report>
- [2] Y.H. Chin *et al.*, "Development of 10MW L-Band Multi-Beam Klystron (MBK) for european X-FEL project", Proc. 2007 PAC, June, 2007, Albuquerque, NM, USA.
- [3] A. Beunas *et al.*, "A high power long pulse high efficiency multi-beam klystron", presented in the 5th MDK Workshop, 2001.
- [4] S.Kimura *et al.*, "Long-Life High-Reliability Ir-Coated Dispenser Cathode", IEDM, 1987.
- [5] BINP, VLEPP DGUN User's Manual.
- [6] T.Shintake, KEK Report90-3, May 1990.