

Development of a C-Band 50 MW Pulse Klystron using Traveling-Wave-Type Output Structure

K. Yoshida^{1,A)}, K. Hayashi^{A)}, H. Asano^{A)}, M. Hino^{A)}, N. Matsuzaki^{A)}, M. Sato^{A)}, Y. Pu^{A)},
S. Fukuda^{B)}, S. Michizono^{B)}, M. Yoshida^{B)}, S. Matsumoto^{B)}, K. Nakao^{B)}, Y. Wang^{C)}

^{A)} Mitsubishi Electric Corporation

8-1-1 Tsukaguchi-Hommachi, Amagasaki, Hyogo, 661-8661

^{B)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{C)} IECAS, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences

100080, Beijing, 2702

Abstract

SuperKEKB^[1] requires a new klystron to increase its positron acceleration energy from 3.5 to 8.0 GeV. The C-Band 50 MW pulse Klystron (PV-5050K) has been under development at Mitsubishi Electric Corporation in collaboration with KEK for SuperKEKB. The first tube had been built and evaluated the performances, 50 MW output power and 48.5% power efficiency at pulse width of 2.0 μ s and repetition rate of 50 pps.

進行波型出力空洞を用いたCバンド50MWクライストロンの開発

1. はじめに

C-Band50MWクライストロンPV-5050Kの設計は、EMSYSを用いてシングル出力空洞にて50MWの出力を確認した後、進行波型出力空洞の出力解析をMAGICにて行った。さらにHFSSにて3次元化を実施した。2006年5月にKEKにて1本目の試験を行い、RFパルス幅：2.0 μ s、出力：50MW、効率：48.5%を確認した。

2. 設計

2.1 仕様

PV-5050Kの目標性能を表1に、外形図を図1に示す。電子銃はEGUNとDGUNにて設計を行い、MAGICにて確認を行った。パービアンスは既存電源のインピーダンスと一致するように、1.53 μ A/V^{3/2}とした。

350kV印加時のアノード-ウェネルト間の最大電界強度は21kV/mmとSバンド50MWクライストロン(PV-3050)程度とした。

空洞部は全5空洞からなり、5番目にあたる出力

表1：主要性能

項目	設計値
周波数	5712MHz
出力電力	50MW以上
ビーム電圧	350kV
ビーム電流	320A
パービアンス	1.53 μ P
RFパルス幅	2.5 μ sec
繰り返し	50pps
ドライブ電力	500W以下
利得	50dB以上
効率	45%以上

空洞は、電界強度(35MV/m以下@50MW)を低くするために、4セル(2/3 π モード)の進行波型出力空洞を採用した。シミュレーションはKEKのXバンドクライストロン開発で実績のあるMAGICにて実施した^[2]。出力空洞に接続された2個の導波管から取り出されたRF出力は、合成器を介して、1個の高周波窓から出力される(図2)。

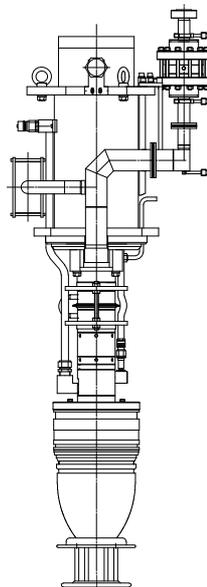


図1：PV-5050K 外形図



図2：出力回路写真

2.2 高周波窓

高周波窓(RFW-6)はセラミック部の電界強度が低い、ミックスモード型(TE₁₁+TM₁₁)を搭載した^[3]。RFW-6は2004年にレゾナントリング試験におい

¹ E-mail: Yoshida.Kiyohiko@ak.MitsubishiElectric.co.jp

て、パルス幅： $2\mu\text{s}$ 、繰り返し： 50Hz で通過電力： 350MW を達成した。

2.3 進行波型出力空洞設計

MAGICにて入力空洞から出力空洞まで計算すると約1日かかる。そこで、空洞設計時間を短縮するために、EMSYSとJAPANDISKで 350kV 、 320A の電子ビームを用いて、シングル出力空洞にて出力 50MW を確認した後、シングル出力空洞を進行波型出力空洞に置き換えてMAGICにて計算した。入力空洞、中間空洞はEMSYSのパラメータを用いた。それぞれの出力計算結果を図3（ビーム軌道）、図4（入出力特性）に示す。最適化の結果、進行波型出力空洞にて出力： 50.6MW 、効率： 45.3% 、出力空洞内最大電界： 34.7MW/m を得た。

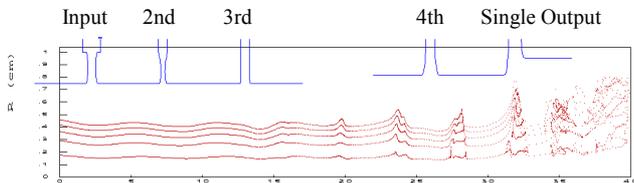


図3(a)：シングル出力空洞計算結果（EMSYS）

（ビーム電圧： 350kV 、入力電力： 200W 、出力電力： 51.4MW 、効率 46.9% ）



図3(b)：進行波型出力空洞計算結果（MAGIC）

（ビーム電圧： 350kV 、入力電力： 168W 、出力電力： 50.6MW 、効率： 45.3% 、最大電界： 34.7MW/m ）

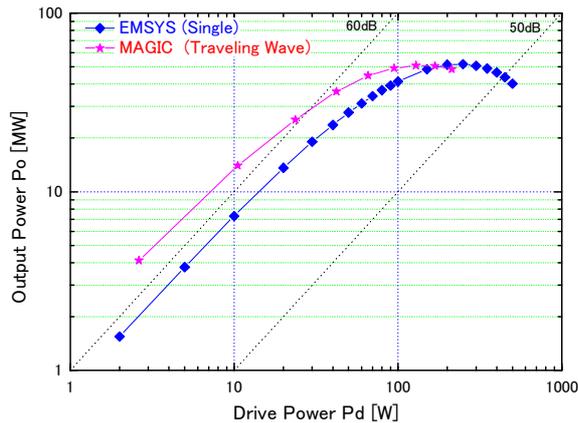


図4：出力計算結果（シングル、TW）

進行波型出力空洞の3次元化の手順を図5に示す。MAGICモデルと等価な2次元のモデル（抵抗体モデル）をHFSSにて作成し、これと同等な出力導波管をつけた3次元モデル（導波管モデル）を設計した。

MAGICモデル、抵抗体モデル、導波管モデルにおいて、第4セル中心（Line B、C）の電磁界分布を比較した結果（図6）、同等の分布であることを確認した。

導波管モデルにおいて、第1セルから第3セルま

でを元の形状に戻すことで、進行波型出力空洞の3次元化（最終形状）を完了した。

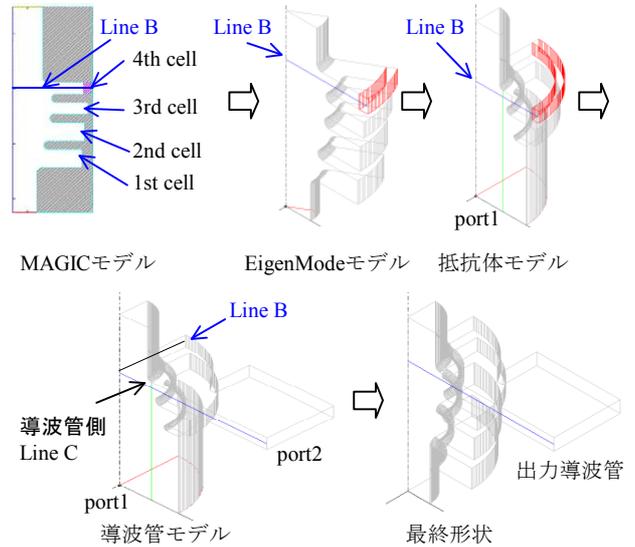


図5：進行波型出力空洞3次元手順

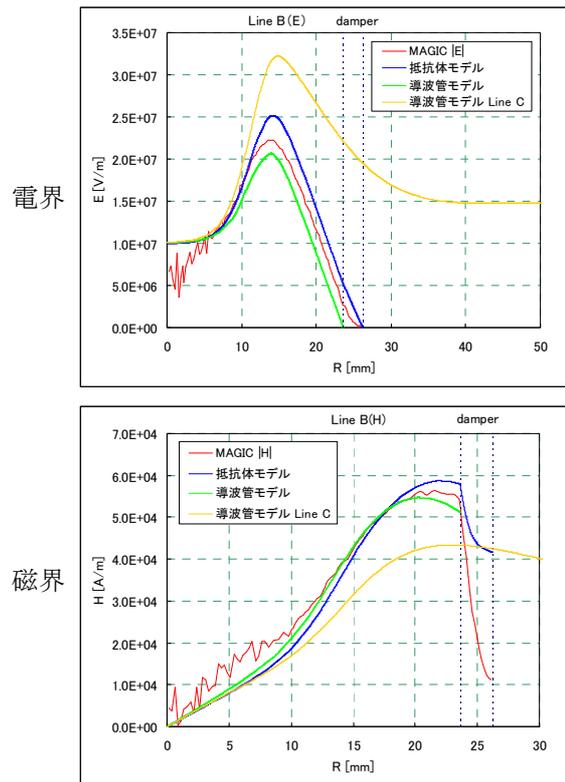


図6：第4セル電磁界分布比較

3. 試験結果

PV-5050Kの1本目は、2006年5月にKEKにて評価試験を実施した。出力電力の測定は水負荷の温度上昇から求めた。さらに、方向性結合器でも出力を測定した。

図7にRFパルス幅： $2.0\mu\text{s}$ 、繰り返し： 50pps 時のビーム電圧に対する出力電力の変化を示す。ビー

ム電圧：338kV (Es : 43.1kV)、ビーム電流：305A (パービアンス：1.55 μP)、入力電力：229Wにて出力電力：50MW (効率：48.5%)を得た。計算結果よりも低い電圧で50MWに達している。50MW出力時の電子ビームのボディーロス約3%である。また、ゲインは53.4dBである。一方、入出力特性(図8)は計算とほぼ同じ結果が得られた。

図9にRFパルス幅：2.0 μs、繰り返し：50pps、出力電力：50MW時のビーム電圧・電流、RF入力・出力波形を示す。出力波形の先頭の凹みはドライバンプの特性によるものであることを考慮すると、出力波形は良く安定している。

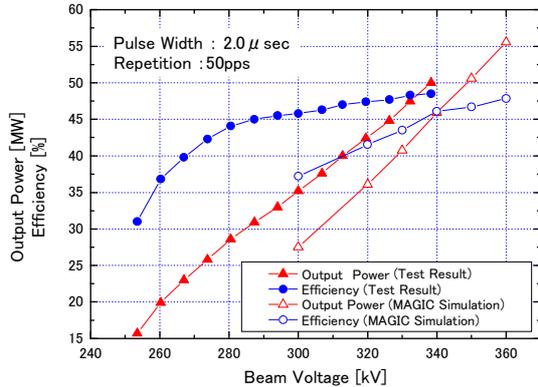


図7：RF出力と効率の電圧依存性

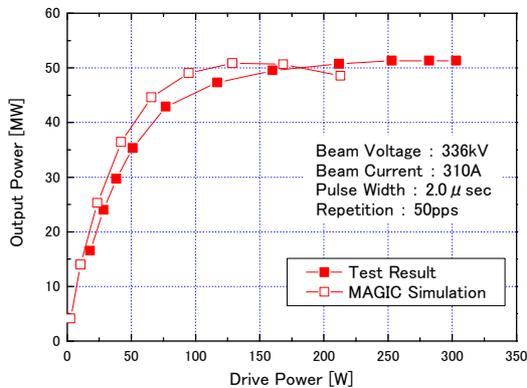


図8：RF出力の入力電力依存性

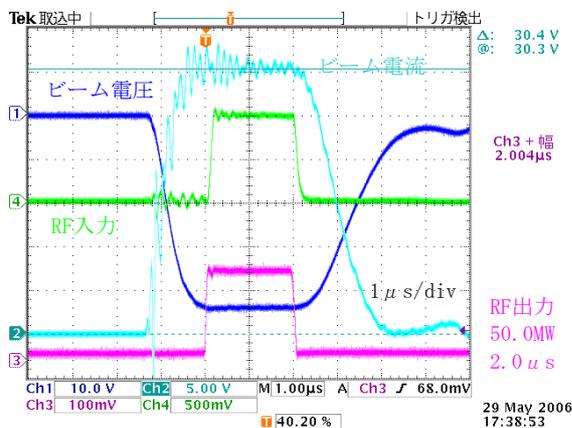


図9：ビーム電圧・電流、RF入力・出力波形

図10にRF出力の周波数依存性を示す。今回は試験時間の都合で十分なエイジング(クライストロン

高周波窓、水負荷)が出来なかったため、出力電力40MW程度において、周波数を5712MHz±1.5MHz変化させて測定した。

表2に設計値と試験結果の比較をまとめた。RFパルス幅は試験電源の関係で2.0 μsまでしか行えなかったが、既存電源、既存集束コイルを使用して電氣的仕様を満足した。一方、X線シールドが不十分であることが判明し、シールドの強化を実施している。

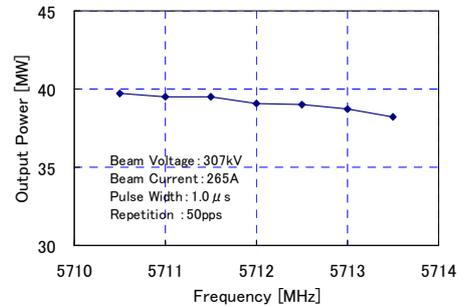


図10：RF出力の周波数依存性

表2：PV-5050K 試験結果

項目	設計値	試験結果	評価
周波数	5712MHz	5712MHz	○
出力電力	50MW以上	50.0MW	○
ビーム電圧	350kV	338.3kV	○
ビーム電流	320A	305A	○
パービアンス	1.53 μ P	1.55 μ P	○
RFパルス幅	2.5 μ sec	2.0 μ sec	△
繰り返し	50pps	50pps	○
ドライブ電力	500W以下	229W	○
利得	50dB以上	53.4dB	○
効率	45%以上	48.5%	○
集束コイル	既存品	既存品	△
X線漏洩	20 μ Sv/h以下	大	×

4. まとめ

4セルの進行波型出力空洞と1個の高周波窓を搭載したCバンドパルスクライストロンPV-5050Kは、RFパルス幅：2.0 μs、出力：50MW、効率：48.5%を1本目で確認することができた。この成果は、複数の計算コードの組み合わせによる確認と、計算コードの高精度化によるものである。

本クライストロンは性能確認試験後の2006年6月に、加速管試験のRF源として約1ヶ月間使用され、負荷のVSWRの変化に対しても安定に動作することが確認できた。今後はKEK入射器にて連続運転を行う予定である。

参考文献

- [1] T. Kamitani et al, "Present status of the C-Band accelerator R&D of the KEKB injector linac for SuperKEKB project", Proceedings of the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi, August 4-6, 2004
- [2] H. Tsutsui., "Two-Dimensional Modeling of a Klystron Traveling-Wave-Type Output Structure and its Empirical Justification", KEK Report, August 1999
- [3] T. Takenaka et al., "High Power test of C-Band RF window Using Resonant Ring", Proceedings of the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi, August 4-6, 2004