

DEVELOPMENT OF 1 GHz HIGH POWER KLYSTRON

Masato Yoshida ^{#A)}, Kazunori Akai ^{A)}, Shigeru Isagawa ^{A)}, Kiyokazu Ebihara ^{A)},
 Katsumi Marutsuka ^{A)}, Hiroto Urakata ^{B)}, Setsuo Miyake ^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 300-0801

^{B)} Toshiba Electron Tubes & Devices Co., LTD.

1385 Shimoishigami, Otawara, Tochigi, 324-8850

Abstract

1 GHz (1018MHz) high power cw klystron was developed in KEK for one option of the upgrade of KEKB^[1]. Development was begun in 2007, and the first klystron was produced in 2008. As for this klystron, the conversion efficiency of RF was bad. Moreover, the vacuum leakage occurred from the cooling channel in the output window only three months later. The klystron improved to solve these problems was repaired in 2010. An output power of 1.1MW and an excellent characteristic were confirmed with the repaired klystron in 2011. We report on the trouble of the first klystron and the improved point, and the pre-conditioning interim operation and the characteristic about the repaired klystron.

1 GHz 大電力クライストロンの開発

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構の KEKB 加速器のアップグレードのオプションの一つとして、現在の 509 MHz (E3732) の 2 倍の周波数である 1018 MHz で最大出力 1 MW の CW クライストロンを使用する事が検討され、研究開発を行う事になった^[1]。

現在では、509 MHz で高周波システムは構成される事になっており、今後 1 GHz のものが KEKB 加速器に於いて使用されるかは未定であるが、優れた性能のクライストロンを開発出来たので報告する。

2. 開発方針

E3732 クライストロンを基準として、2 倍の周波数とした場合の問題点を検討すると、大電力出力時に出力窓に使用されるセラミックの温度上昇が主と判断し、他は E3732 で採用されている構造や材料を採用する事で開発要素を少なくする事にした。

出力窓の材料としては、熱伝導が優れるベリリアは毒性が強い為、環境問題に配慮し使用を断念した。代わりに E3732 で使用している日本特殊陶業製の HA-95 より損失特性と熱伝導特性を合わせた熱特性が 5 倍程優れる HA-997 を採用する事にした。

出力窓の方式は、ピルボックス型では HA-997 の熱伝導率がベリリアの約 1/10 であり、セラミック中心部の除熱が出来ない為、同軸型の窓に決定した。変換器の構造としては、出力空洞からの取り出しは耐圧の関係で E3732 と同じ同軸型は使用できない為、扁平方形導波管で取り出し、真空と大気の隔壁のセラミック窓部は同軸構造とする為、真空と大気側の方形導波管へ変換はドアノブ構造を採用した。

出力窓以外では、電子銃やコレクターの部分は 1 GHz 用に縮小した電子ビーム径に対応するように変更した以外は E3732 と同じ構造や材料を使用する。

これは既存の E3732 用のソケットを再利用する事と長年に渡る安定性の実績を考慮した為である。電子銃のカソードも同じ M タイプであり、アノード電極も酸化クロムのコーティング処理を行い、入出力のヒステリシスや不安定性を防止する為に、空洞ギャップでのマルチパクタ抑制用のクラウン構造加工、及び出力導波管、同軸部の内外軸、出力窓セラミックへの TiN コーティング処理を行った^[2]。

2007 年から開発を開始したが、この時の目標仕様を表 1 に示す。

表 1 : クライストロン目標仕様

動作周波数	1017.774 MHz
連続飽和 RF 出力	1.0 MW 以上
RF 入力 (N 型接栓)	10 W 以下
ビーム電圧	90 kV 以下
ビーム電流	20 A 以下
パービアンス	0.68×10^{-6}
出力変換効率	56 % 以上
周波数帯域 (-1dB)	0.7 MHz 以上
高調波電力 (対基本波)	-23 dB 以下
負荷 VSWR	1.15 以下
RF 出力導波管	WR975

3. 初号機

3.1 試験及びトラブル

初号機は 2008 年度末に、電子銃電極間の耐圧向上処理 (SK) のみで KEK に納入された後、順調に

masato.yoshida@kek.jp

DC エージングを終了し、RF エージングを開始したが以下のトラブルが発生した。

- ・RF 変換効率が低い

エージング開始より真空のハネが多く、11 日かけて出力 100 kW まで達したが、この時の最大効率は僅か 13% でシミュレーション結果の 57% を大きく下回る。その他、出力窓部の損失が大きく、反射も多かった。以下の真空リークが発生した為、RF エージングは 120 kW までで終了。

- ・出力窓冷却水路より真空リーク

通水開始より僅か 3 ヶ月で真空リークが発生した。リーク箇所は図 1 に示す通り、内径 8 mm φ の銅水路から 2 分岐して内径 5 mm φ の水路となり内軸部冷却水路の壁 (1 mm 厚の銅) に冷却水が当たるところである。図 1 のリーク箇所の拡大写真を見ると銅表面が削り取られて穴が開いているのが分かる。また、銅の削れは外軸入口でも見られた。

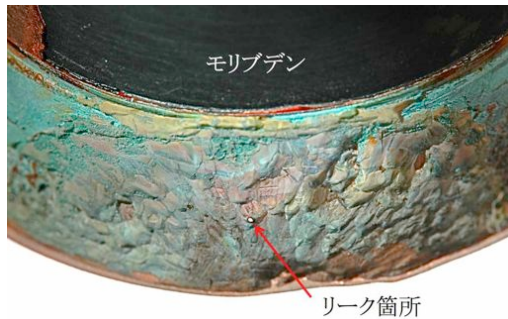
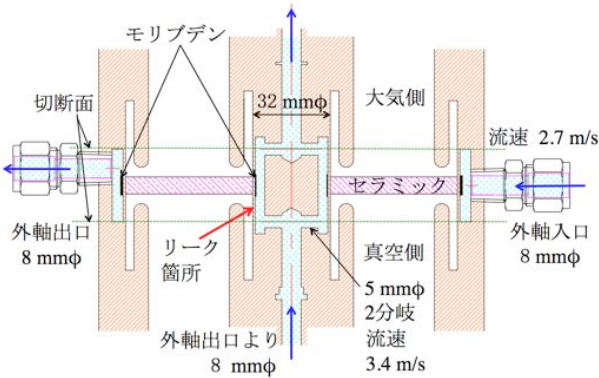


図 1 : 出力窓冷却水路真空リーク箇所

3.3 トラブル調査

RF 変換効率が低い原因は分解調査の結果、出力空洞の共振周波数のずれである事が判明した。実機の共振周波数は設計値から約 22 MHz 低かった。

真空リークの原因は明らかに冷却水の流速が早過ぎる事による銅の潰食と推測されたが、外軸の冷却水路の流速が同じ E3732 では短期間では潰食がまったく見られない。そこで、腐食試験水路を別途用意して腐食の条件を調べた [3]。KEKB 加速空洞の RF カプラーで冷却水が純水の場合、セラミックと銅のロウ付け時の補強材であるモリブデンが接液すると冷却水が強酸性化し、銅が腐食する事が判明している [4]。今回の場合は冷却水には酸性度を pH 6.8 に固定するリン酸系の緩衝剤を添加しており、この場合はモリブデンに接液し、かつ流速が 5 m/s 以上と非

常に早い場合でも潰食が起らないという結果となった。よって、何故、僅か 3 ヶ月で真空リークを起す程の激しい腐食が起きたのか不明であるが、キャビテーションによる壊食の可能性もある。

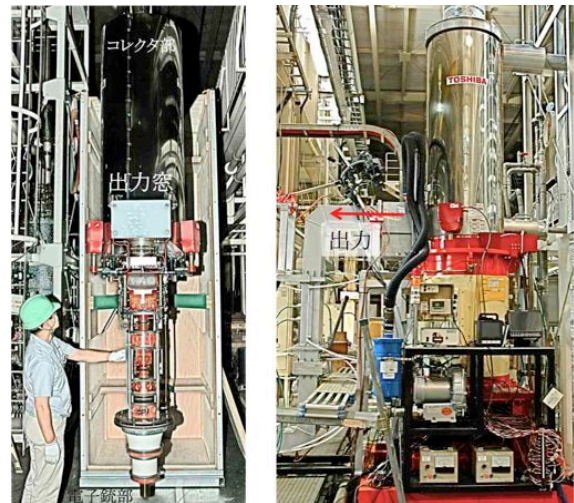
4. 改修機

4.1 初号機トラブル対策

RF 変換効率が低い事や出力窓部の損失が多い事の対策として、出力空洞の共振周波数を正確に設計周波数に合わせる事と大気側の同軸/方形導波管変換をドアノブから T バーへ変更し、同軸部の構造を最適化した。上記の変更によりシミュレーションでは電界強度、周波数帯域、透過特性の改善結果が得られた。その他の改善項目として、E3732 と同じように、出力窓セラミックの TiN コーティングがロウ付け時の高温に曝されないように窓部の接合組み立てをロウ付けから焼き締め方式に変更した。これにより内軸の水路は貫通型から折り返し型となった。

出力窓冷却水路からの真空リーク対策は、流量を減らす事と 2 分岐 5 mm φ から 8 分岐で 4 mm φ の内径の水路に変更する事により流速を初号機の 1/3 以下の 1 m/s となるようにした。同時に外軸の水入口の位置を図 2 の位置より大気側に移動して、外軸出口の位置になるようにし、流速も 2 m/s 以下とした。

初号機は管内全体が腐食していたが、改修機は中間空洞とコレクターを洗浄処理し再利用している。以下に改修機の全体図と試験時の写真を示す。



(a) 全体 (正面) (b) 試験時 (側面)

図 2 : 1 GHz クライストロン改修機

4.2 DC 及び RF エージング

2010 年、改修機が搬入され、KEK で DC と RF エージングを実施して諸特性の測定を行った。

- ・DC エージング

KEK のクライストロン電源は 45 kV 以下のカード電圧を印加できない為、小型の高圧電源を用意して、2 極管接続で DC 入力 7 kW まで実施した後、クライストロン電源に 3 極管として接続し、カソード電圧

とビーム電流を調整しながら DC 600 kW までエージングした。DC エージングの所用時間は3日間で、初号機とほぼ同じだった。

・RF エージング

出力窓セラミック表面の温度を放射温度計で観測し、この温度と真空度を RF オフのインターロックに組入れてエージングを開始した。当初、出力導波管の加工精度の問題で電波漏れがあり、試験を一時中断したが、その改修後は順調に出力を上げられ、日中のみの 9 日間で目標の 1 MW まで到達した。1.1MW は各種特性を測定した後の 1 日で達成した。

唯一の問題は集束磁場が弱い場合、急激にビーム電流を変化させるとガスバースが起る点であるが、集束磁場を強くする事で抑えられる事がわかっている。尚、1140 kW 以上の出力はダミーロードフランジの温度が制限値を超える為に試験していない。

4.3 特性評価

出力 1 MW を確認した後、各種特性を測定した。

・出力窓温度特性

出力と出力窓セラミックの表面温度の関係をプロットすると図3のようになる。この温度上昇からセラミック温度は出力 1.2 MW でもまったく問題ない事が分かる。

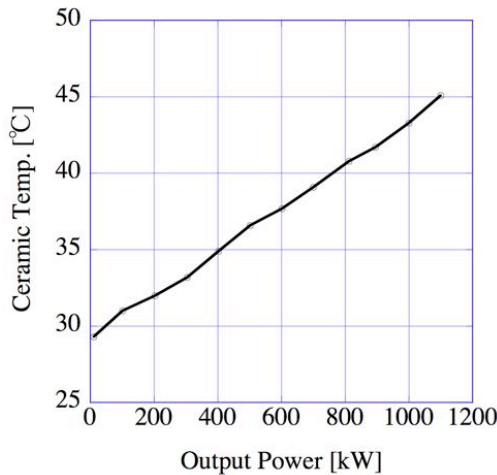


図3：出力と出力窓温度の関係

・入出力特性

図4に最大出力 1 MW 時の入出力特性を示す。他にカソード電圧を変えて特性を取ったが、ヒステリシスや不安定性を示すものはなかった。

1.1 MW 時のゲインは 60 dB 以上で、効率も 67% 以上である。

・高周波特性

動作周波数に対して、5 次までの高調波と動作周波数近くのサイドバンドを測定したが、全て - 23 dB 以下であった。

・周波数帯域幅

動作中心周波数に於いて、1 MW 出力の 1 dB 落ちの帯域 (入力固定) は 1 MHz 以上あった。

表2に出力 1045 kW と 1140 kW 時のパラメータ

と特性を示す。

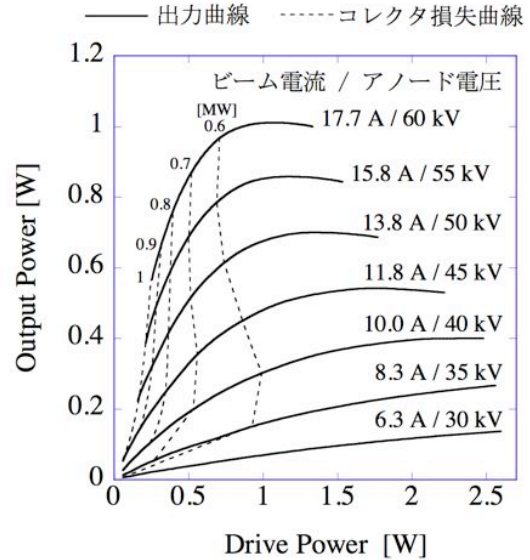


図4：入出力特性 (カソード電圧 88 kV)

表2：運転パラメータ及び特性

	動作例 1	動作例 2
連続 RF 出力	1045 kW	1140 kW
RF 入力	1.10 W	0.96 W
ビーム電圧	88.0 kV	90.6 KV
ビーム電流	17.7 A	18.8 A
パービアンス	0.678×10^{-6}	0.689×10^{-6}
出力変換効率	67.1 % (飽和)	66.9% (未飽和)
RF 電力利得	59.8 dB	60.8 dB
高調波電力	- 23.4 dB 以下	未測定
帯域 (-1dB)	1.0 MHz 以上	未測定

5. まとめ

初号機では効率が低く、出力窓冷却水路からの真空リークも起きたが、これらの問題を解決した改修機では目標仕様を超える性能を確認できた。条件を整えば 1.2 MW 出力も可能である。

参考文献

[1] Kiyokazu Ebihara, et al., "Development of 1GHz RF System for KEKB Upgrade", Proc. 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 6-8, 2008.
 [2] S. Isagawa, et al., "Coating Techniques and Improvement of High Power CW Klystrons for TRISTAN", EPAC94, June 27-July 1, 1994.
 [3] 吉田正人, "KEKB-クライストロン出力窓冷却水", 加速器施設における冷却水問題検討会, KEK 環境安全管理主催, July 21, 2010.
 [4] Y. Takeuchi, et al., "Erosion-corrosion of Copper Material observed in Cooling-water Circuits for RF Windows", Proc. 14th symposium on Accelerator Science and Technology, Nov. 11-13, 2003.