

# 大電力 CW およびパルスクライストロンの開発と製造 DEVELOPMENT AND MANUFACTUREING OF HIGH POWER

## CW AND PULSE KLYSTRONS

岡本 正  
Tadashi Okamoto

Toshiba, (Incumbent: Microwave Application Technical Consultant)

### Abstract

A 1.2 MW CW and a 100MW pulse klystrons were developed for TRISTAN and SPring-8 programs. The output power of these klystrons should be raised to nearly five times higher than those of the other klystrons at that time. There were large gaps also in size and weight, especially in CW klystrons.

This paper explains troubles and improvement efforts in the development. Multipactoring problem at the surface of output ceramic window was one of the biggest problems that gave extraordinary temperature rise and would clack them. It also introduces other klystrons which were developed afterwards. These klystrons are and/or will be used in the accelerator research institutes worldwide.

### 1. はじめに

1980 年末頃、連続波(CW : Continuous Wave) 出力 1.2MW のクライストロン E3786 の設計に着手した。当時、わが国最大のクライストロン(E3774)から、出力で 6.7 倍、管球の長さで 2 倍、また動作電圧も 2 倍程度高める必要があった。開発当初、機械的、電氣的な多くの問題が発生した。

トリスタン計画に支障を与えないため、KEK から協力チームが派遣され、開発を強力に支援した。東芝は、担当部門を強化し、総合研究所、材料部門、重電部門が参加する全社プロジェクトを発足させた。一連の協力と努力によって、およそ 5 年の歳月を経て、目標性能を達し製造体制を整えることができた。

88 年夏頃、100MW パルスクライストロン E3712 の設計を始めた。このクライストロンでも電子銃の真空と大気との間の壁を形成するセラミックに貫通孔が開いてしまう問題が発生した。E3786 の出力窓の問題と同様、マルチパクタに関する問題であったが、単に電子銃を浸している油面の高さを上げることで解決できた。

E3786 と E3712 は SPring - 8 に供され、E3712 は韓国に輸出された。

これらの開発と製品供給を通して、開発と製造の力が大きく飛躍した。開発は若い世代が引き継ぎ、次々に新開発品を生み出した。周波数域は 324MHz から X バンドに広がり、長さも 5m に達する長大管が開発された。

ビーム収束はもっぱら電磁石よっていたが、永久磁石を使用する PPM クライストロン(X バンド、C バンド)が開発され、さらに 6 本の電子ビームを使用するクライストロンが開発された。

国内はもちろん、欧米亜の加速器研究機関に向け新開発のクライストロンの輸出が進められた。

本報告では、まず E3786、E3712 の開発経緯を述べ、引き続き進められた新開発と海外展開の概要を取りまとめる。

### 2. E3786 の開発 [1], [2], [3]

KEK の指導を受け、機械的強度の向上、真空度の向上を目指した徹底的な改善がはかられた。排気後に起きるリークの対策が進められ、クライストロン排気のための真空系をオイルフリー化した。カソードからの Ba 蒸発を押える方策を進め、蒸発しまわりの電極に付着する Ba の障害を軽減するため電極材料の見直しを行った。電極温度もなるべく低く保つよう配慮した。

出力が増しある値を超えると出力窓の温度が急上昇する問題が発生した。熱歪によってセラミックが内部応力に耐えられず、例えば、試作 1 号管で出力 430kW に達したときに窓が破損した。

セラミックは 2 次電子放射係数が大きいので、セラミック表面で電子増倍が起きるいわゆるマルチパ

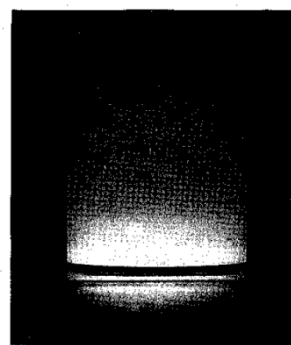


Figure 1: Light Emission by Multifactor on the Surface of Cylindrical Window [1].

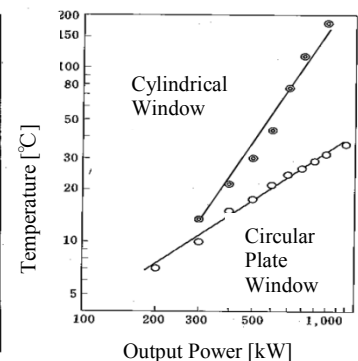


Figure 2: Temperature Rise vs. Output Power [1].

クタによって出力窓の温度が急上昇していることを観測した。Figure 1 はマルチパクタによる紫色の発光状態を撮影した写真、Figure 2 は出力と室温からの温度上昇の関係を示す図である。

Figure 3 に出力窓の構造を示す。セラミック窓は当初、円筒であったが、図に示すような円板に変更された。これによって、出力回路のインピーダンスが下がり、温度上昇に伴う内部応力が圧縮力に変わった。窓材には高純度セラミックを使用した。

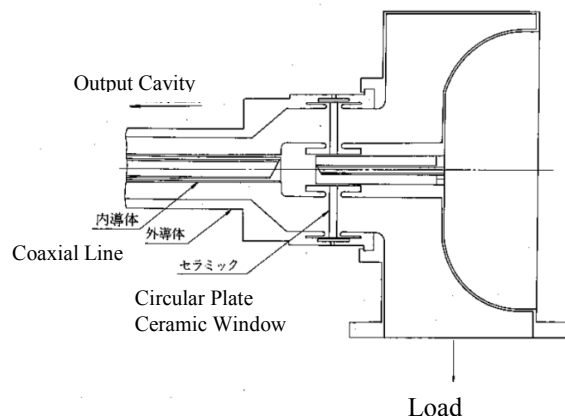


Figure 3: Coaxial type circular plate window.



Figure 4: E3786 (Height 4.5m).

同軸線路部も含めセラミック表面に TiN コーティングを実施し、マルチパクタを防止した。

Figure 4 に E3786 の外観写真を示す。全長は 4.5m で、合計 6 個の空洞を使用している。コレクタは蒸発冷却される。

E3786 はさらに改良され E3732 に名称変更された。

### 3. E3712 の開発<sup>[4]</sup>

パービアンスが高い(2.0 A/V<sup>3/2</sup>)ため、FCI(Field Charge Interaction)プログラムを使用して集群状態を調べ、空洞配置を最適化した。空洞数を 5 とした。電子ビームに対して出力空洞の電界を対称にするため、空洞の中心軸に対称に出力導波管を配置した。それぞれの導波管に 1 つの出力窓を設け、通過後に合成して単一の導波管から出力する構造とした。出力窓は Pill-Box 型である。セラミックの表面にはマルチパクタを抑制するため TiN コーティングを実施した。Resonant Ring を用いて窓の耐電力評価を行い 200MW に耐えることを確認した。

電子銃電極間のセラミックは空洞側でやや径を広げ円錐状とした。

試験中に、マルチパクタによる異常と推測される貫通孔が発生した。この事故は管内で起きるマルチパクタによる導電性シースと管外の空気との間でセラミックを介して放電を起こした結果と考えられる。幸いにも、単に電子銃部分を浸しているオイルの油面を高くすることで問題を解決できた。Figure 5 に E3712 の外観写真を示す。Figure 6 は貫通孔が発生



Figure 5: E3712 (Height 1.9m).

するメカニズムの推測図である。便宜上、説明図は円筒セラミックとした。

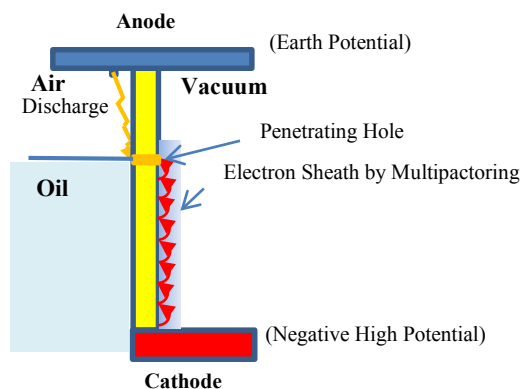


Figure 6: Mechanism of penetrating hole by multipactoring.

#### 4. 新規クライストロンの開発

引き続き開発されたクライストロンのいくつかを紹介する。

##### 4.1 PPM 集束クライストロン<sup>[5]</sup>

大電力クライストロンの電子ビームは通常、電磁石によって集束される。電磁石は重く、電力を消費する。磁石を含め、軽量、小型、省電力化を図ることを目的に、円板状の永久磁石の極性を順次逆に連続した周期永久磁石 (PPM) でビームを集束するクライストロンの開発が進められた。

まず X バンド PPM クライストロンの開発が KEK で進められた<sup>[6]</sup>。

この成果を引き継いで、X バンド管、続いて C バ

ンドのクライストロンの商品化が進められた。一例として、Figure 7 に E3768I を示す。周波数 11.424GHz、出力 50MW、電圧 500kV、電流 270A、長さは約 2m である。

##### 4.2 マルチビームビームクライストロン(MBK)<sup>[7]</sup>

一般にパービアンスを高くすると効率が低下する。このため、複数のビームを用い、各ビームについてパービアンスを低く保つ方法が提案されている。

6 ビームクライストロン E3736 ではこの方法によって効率 68% を達成した。空洞部には 6 本の電子ビームが 60° の間隔で対称的に空洞の中心軸に沿って平行に流れるようになっている。電子銃は 6 個である。

E3736 の外観写真を Figure 8 に、電子銃を Figure 9 に示す。動作周波数は 1.3GHz、ピーク出力は 10.3MW、パルス幅は比較的長く 1.5ms である。動作電圧は 115kV、電流は 131A である。

##### 4.3 C バンドクライストロン<sup>[8]</sup>

SACLA での使用を目的に C バンド 50MW クライストロン E3748/E37202 を開発した。概観写真を Figure 10 に示す。このクライストロンの電圧は 354kV、電流は 315A である。

##### 4.4 J-PARC 向けクライストロン<sup>[9], [10]</sup>

J-PARC 向けに 324MHz (E3740A) および 972MHz (E3766) のクライストロンを開発した。電子銃は三極構造で、ビーム変調を行うことができる。出力はともに 3MW である。

E3740A は、最も長いクライストロンで、全長が 5m に達する。Figure 11 に E3740A の外観写真を示す。E3766 の長さは 3m である。

なお、横置きクライストロンとしては、他に E3736H(1.3GHz、10MW、MBK)、E37619(324MHz、1.2MW) がある。



Figure 7: X-band PPM klystron E3768I.



Figure 8: 6 beams klystron E3736.



Figure 9: Electron gun for E3736.



Figure 10: C-band 50MW klystron E3748/E37202.



## 5. クライストロンの海外展開

クライストロンの輸出は、① 海外加速器研究開発機関による既開発クライストロンの調査あるいは開発品の評判によって始まるものと、② 加速器計画に対する調達リスクを軽減する目的で進められる競合開発品によるものがある。①の例としては、韓国 POSTEC 向けの E3712、②の例としては、DESY 向けの E3736H (E3736 の横置き型)がある。

Figure 12 にコンタクト中の顧客を示す。Table 1 に加速器研究施設におけるクライストロンのソケット数を示す(一部未確定)。\*印を付したものは競合していることを示している。例えば、Euro X-FEL では 7 本が我が国の受注、残りは Thales に受注が決まっている。IHEP には Thales 管も入っている。FAIR はすべて Thales 管に決まっている。

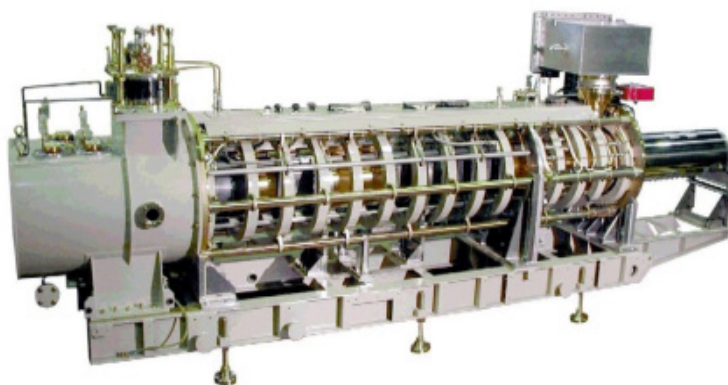


Figure 11: The longest klystron E3740A (324MHz, 3MW, 5m).

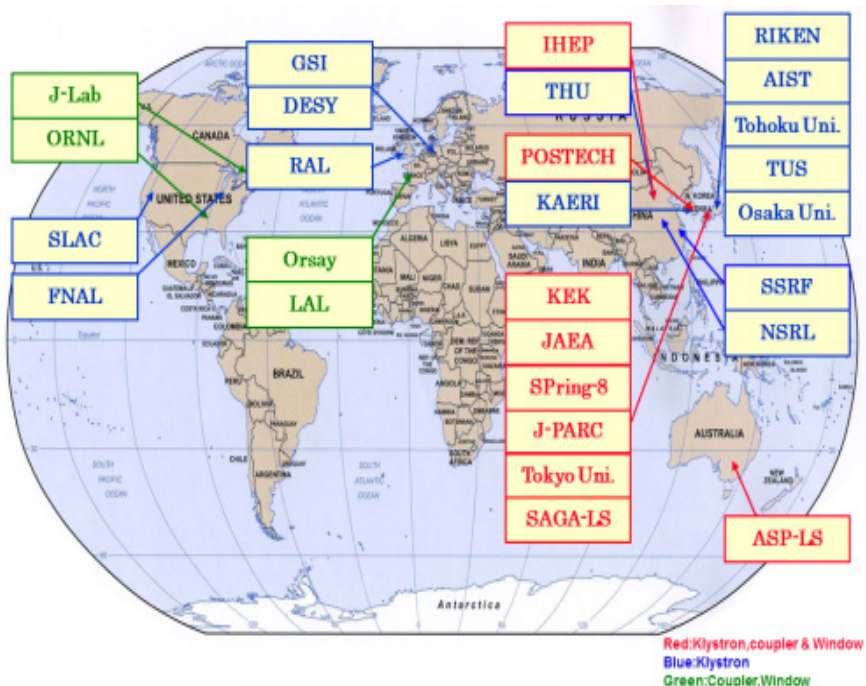


Figure 12: Worldwide customers of Toshiba Electron Tube and Device (TETD).

## 5. 結び

以上、1.2MW CW および 100MW パルスクライストロンの開発と、それに続く一連のクライストロンの開発状況および海外展開の状況を報告した。

クライストロンの開発にあたり、ご指導ご鞭撻と強力なご支援を戴いた各位に深く感謝申し上げます。また、現在、クライストロンの開発と製造に取り組んでいる各位に心からの激励を送りたいと思います。

クライストロンの開発と製造は多くの方々の努力のたまもであります。筆者はその一部に関わっただけですが、今回、特別功労賞を拝受させていただきました。心から関係各位に感謝申し上げます次第です。

参考文献

- [1] T. Okamoto, et al., “1.2-MW CW High-Power Klystron for Accelerator (in Japanese)”, 東芝レビュー, vol.41, no.10, 1986.
- [2] Y. Kawakami, et al., “500MHz 1.2MW CW High Power Klystron for Particle Accelerators (in Japanese)”, 電子技報 ED86-119, 電子情報通信学会, 1986.
- [3] S. Isagawa, et al., “Development of High Power CW klystrons for TRISTAN”, Proc. of IEEE Particle Accelerator Conf., Washington DC, March 1987.
- [4] H. Yonezawa, et al., “Development of a 100MW S-band Pulse klystron”, Particle Accelerator, vol.30, no.1, 1990.
- [5] M. Kanno, et al., “The X-band PPM Klystron Development (in Japanese)”, 信学技報 37-42, 電子情報通信学会, 2001.
- [6] J. Odagiri, et al., “Development of X-Band High Power Pulsed Klystrons”, Proc. Of the 18<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, July 1993.
- [7] Y. Chin, et al., “Development of 10MW L-Band Multi-Beam Klystron (MBK) for DESY European X-FEL Project”, 信学技報 73-76, 電子情報通信学会, 2006.
- [8] Y. Ohkubo, et al., “50MW C-band Pulse Klystron Development (in Japanese)”, 信学技報 73-79, 電子情報通信学会, 1998.
- [9] K. Tetsuka, et al., “大強度陽子加速器 (J-PARC) 用 324MHzクライストロンの開発”, Linac研究会, 2003.
- [10] M. Yoshida, et al., “Oscillation Analysis of J-PARC 972 MHz Klystron (in Japanese)”, Linac 研究会, 2005.

Table 1: Klystron Sockets in the Accelerator Projects (Sockets\* are under competition)

Project	Klystron	sockets
KEK TRISTAN	E3732	34
AR	E3732	2
B Linac	E3730A/E3754	60*
PF	E3774	4
ATF S	E3712	9
XTF X	E3768D	3
Spring-8 Storage R.	E3732	5
Synchrotron	E3732	2
Linac	E3712	13
J-PARC 324MHz	E3740A	20
972MHz	E3766	24
SACLA L	E37612	1
S	E37306	4
C	E37202	64*
DESY	E3736	1
DESY	E3736H	1
Euro X-FEL	E3736H	27*
ASP-LS (AUS)	E3774	4
New-Subaru	E3774	1
SAGA-LS	E3774	1
SAGA-LS	E3712	2
Tohoku Uni.	E3774	1
Tohoku Uni.	E3730A/E3754	1
Tokyo Uni.	E3761/E3768	1
IHEP (China)	E3730A/E3754	16*
SSRF (China)	E37302	3
THU (China)	E3730A/E3754	1
NSRL(China)	E3712	2
MXIS (USA)	E3730A/E3754	2
FNAL (USA)	E3740A	1
SLAC/KEK (USA)	E3736	1
SCSS	E3730A/E3754	1
PLS (Korea)	E3712	16
PAL (Korea) X-FEL	E3712	50
AIST	E3712	2
RAL ISIS (UG)	E3740A	1
GSI FAIR (G)	E3740A	6