

Sバンドパルスクライストロンの現状と将来 —SLACに追いつき追越せを目指して—

三菱電機株式会社 小野寺俊男 家喜洋司 大垣和美

1 まえがき

ここで述べるパルスクライストロンとは、パルス中が数 μS (最大 $10\mu\text{S}$)以下で動作し、デュティサイクルが 10^2 オーダー迄のクライストロンを対象とする。また現状と将来はあくまで三菱電機(以下当社と記す)を背景として考察を進める。

当社はS40年にフランスのトムソンバリエン(現在のトムソン-CSF)と技術提携し、ライナック用PV-2012(5MW-10KW)とPV-2014(25MW-30KW)の2管種を生産して来た。この提携でマッシュ陰極と蒸発冷却コレクタの技術を手に入れた。

これに平行してレーダ用広帯域パルスクライストロン(5MW-100MHz)を独力で開発し、生産して来た。

S53年にKEKの2.5GeV放射光実験施設入射器のRF源として、30MW-シングル出力のPV-3030を開発した。S54年度に4本を納入し、S55年度に20本を受注し、合わせて年間50本を超えるSバンドパルスクライストロンを生産している。

この論文はPV-3030を中心に当社のクライストロンの現状と近い将来に開発出来そうなクライストロンの展望を述べる。

項目	単位	スペック値	達成値
パレビアンズ	$\mu\text{A}/\text{V}^2$	21 ± 0.1	2.1
ビームパルス巾	μS	4以上	7.3
ビームデュティ	—	4×10^{-4} 以上	7.3×10^{-4}
パルス繰返し	PPS	100	100
RFパルス中	μS	4以上	4.0
RFデュティ	—	4×10^{-4} 以上	4.0×10^{-4}
ビーム電圧	KV	(270)	260
ビーム電流	A	(295)	278
励振入力	W	(1000)	240
尖頭出力	MW	30	31
効率	%	40	43
利得	dB	51)	51

表1 PV-3030の特性

項目	単位	#1	#2	
ドリフト長	l_{12}	mm	65	72
	l_{23}	mm	57	72
	l_{34}	mm	178	156
	l_{45}	mm	105	105
効率	%	46 (43)	50	
利得	dB	49 (51)	52	

表2 PV-3030の効率と利得の計算値

(注) 表1の()内の数値は目標値を示す。
表2の()内の数値は実験値を示す。

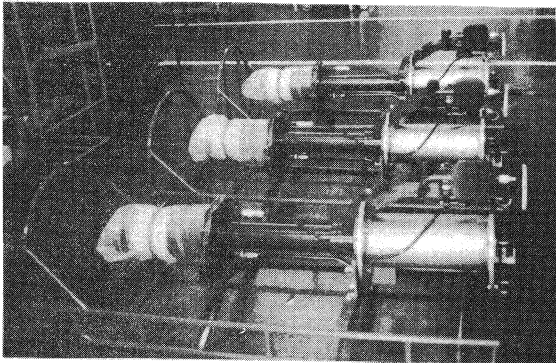


写真1 出荷前のPV-3030

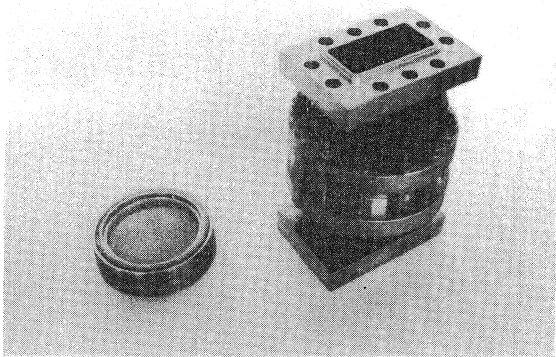


写真2 組立式出力窓

(説明) 左側がチタン蒸着したセラミックのロウ付部。右側が全景。

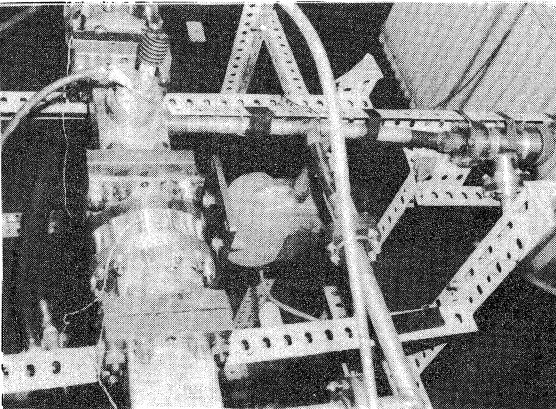


写真3 実験中の出力窓

(説明) 中央部が後試中の出力窓で、上部と下部の方向性結合器より真空マニホールドでイオンポンプに接続されている。RF電力は下部から上部に伝送されている。

2. パルスクライストロンの現状

表1にPV-3030の特性を、写真1に出荷前の外観を示す。外観・特性共に規格を満足しているが、更に今後改良すべき点として利得の向上がある。表2に各空洞間のドリフト長を変化した時の効率と利得をコンピュータシミュレートした結果を示す。#1は54年度に納入したものの値であり、#2は現在実験中のものである。利得で2 dB程度の改善と共に、境界分布のバラツキが減少することを期待している。

PV-3030の開発項目の一つは出力窓であった。従来のPV-2014の平均出力は30 kWで、チタンコーティングの無い窓をデュアルにして且つ出力側を加圧している。この窓を真空-真空で使用した場合には許容最大電力は7.5 kWに低下するため、PV-3030には使えない。写真2に開発した出力窓を示す。セラミック円板(AL-300)を銅の内筒スリーブにロウ付した後、チタンを約80 Åコーティングして、そのまま機械的に組立てられる構造になっている。使用時は自然空冷である。この窓も写真3の実験装置で、通過平均電力に対して銅スリーブの温度上昇を測定した。この結果は $1.8 \pm 0.2^\circ\text{C}/\text{kW}$ で、SLACではスリーブの温度上昇を $70 \sim 80^\circ\text{C}$ 以下に押えていることから、この窓の耐電力は35 kW位と考えられる。また銅スリーブの外周を少量の水を流して発熱量を測定した結果は $2.4 \text{ W}/\text{kW}$ で、経験的に窓の発熱量が80 Wを超えるとクラックあることから、耐電力は33 kWとなる。これ等2つの実験値は良く一致していることから、この出力窓は平均電力で

20KW程度迄は十分使用出来ること判った。

一方PV-3030の先端出力は電子銃の耐電圧で決められる。電子銃の耐電圧は一つはアノードとウェネルトの電極間の放電と、もう一つはセラミック絶縁筒の真空沿面放電のいずれかで決まるが、最終的には真空沿面耐圧が弱く、長時間のコンディショニングの後で30MW以上を発生するのに必要なビーム電圧を安定に印加出来ない。このコンディショニングに要する時間はビームパルス中と繰り返しが小さい程短くて済む。

管種	先端出力	平均出力	パルス中	繰り返し	電界強度	MTBF	平均年令	平均寿命
	MW	KW	μS	PPS	KV/cm	hr	hr	hr
PV-2012	6 (6)	7 (11)	4 (10)	300 (180)	—	11,700	6,020	6,820
PV-2014	20 (26)	24 (31)	4 (4)	300 (300)	250	8,800	3,440	1,430
RCA 8568	20 (21)	9 (19)	2.5 (25)	180 (360)	200	33,000	39,420	16,410
Litton L-3980	20 (21)	9 (19)	2.5 (25)	180 (360)	300	11,500	49,650	10,970
SLAC XK-5	30 (38.5)	13.5 (34.7)	2.5 (2.5)	180 (360)	300	17,500	13,190	11,820

表中の()内の数値は試験条件を示す。

表3 使用条件(試験条件)と寿命の関係

表3に情報入手の出来た5管種の使用条件と寿命の関係を示す。⁽¹⁾ 寿命を示す概念として次の三つを以下のよう定義する。

$$MTBF(\text{MEAN TIME BETWEEN FAILURE}) = \frac{\text{累積稼働時間}}{\text{累積寿命終止本数}}$$

平均年令 = 生きこいるクライストロンの平均稼働時間

平均寿命 = 寿命終止のクライストロンの平均稼働時間

SLACと比較してかなり劣っている感があるが、その英について若干補足する。先づ予防保全のため、PV-2012では27本中10本・PV-2014では9本中5本を寿命終止前に交換しているのど、MTBFと平均寿命を数値的に小さくしている。次にクライストロンに加わるヒートサイクル数の違いである。即ちPV-2012・2014共に従来は毎日スイッチオン・オフして来た。東北大ML-300で2年前よりPV-2014を1週間の連続運転に変更しただけで、他にクライストロンとしての改良無しにMTBFが3,300hrから8,800hrに向上した事実がある。最後にパルス中の違いである。現在SLACでは1セクタのみRFパルス中を2.5μSから5μSに増加して運転しているが、故障の頻度が10倍程度増加した。大電力パルスクライストロンではパルス中の増加と共に放電・スプリング発振・イオン化による不要なビーム収束等の可能性が増大する。

3 パルスクライストロンの将来

出力 \ デュティ	10^{-2} オ-ダ"	10^{-3} オ-ダ"	10^{-4} オ-ダ"
100 MW 級	Very Difficult	Difficult	#2
10 MW 級	#1	PV-2014(D) XK-5 (S)	PV-3030(S)
MW 級	TV-2013(D) VA-938 (S)	PV-2012 (S)	Easy

表4 量産クライストロンの分類

(注) 表中の (S) ; シングルアウトポート
(D) ; デュアルアウトポート
#1 ; 20MW(先端)-100kW(平均)
#2 ; 60MW(先端)-24kW(平均)

表4に量産されている代表的クライストロンを分類して見た。この表から近い将来に、開発・生産される特性が予想される。オ-は高デュティサイクルクライストロンで、例えば20MW-100kW級のものである。出力窓は半波長の厚いベリリアの円板を円筒導波管にロウ付して4タンコートすれば耐電力の面で大丈夫なことは判っている⁽²⁾。後はRF時のビーム透過率を考慮して、ビームダイナミックスの設計に通常より人と時間をかければ何とかなる。オニは高先端出力クライストロンで、例えば現在SLACが日米協同開発を提案している120MW-22kW(1μs × 180 PPS)のスーパークライストロンがその一例である。このクライストロンは口内では需要が無いと思われるが、技術的には非常に興味深い。特に電子銃の耐電圧と出力窓や出力空洞の耐先端電力に大きな開発要素がある。もう一つの開発要素はモジュラータで、最終的にはパルスの立上りと立下りを含めた総合効率で、省エネルギーの面から問題が生ずるようになると思う。パルス波形の面と将来の需要の面から、むしろ60MW-24kW(4μs × 100 PPS)の方が現実的と思われる。このクライストロンはパルス中が広いことから技術的にはSLACのものと同程度高度なものと考えられる。

この等のクライストロンの開発はやれば必ず出来るものであるが、開発期間としては前者で2年間、後者で3年を要する。これは一つはクライストロンの試験装置の製作に1年を要すること、もう一つは電子銃の耐圧やスプリングス発振のように最後はカットアンドトライ的に改良せざるを得ない要素があり、この相当の改良期間を要するためである。

参考文献

- (1) R. Fowkes ; "Quarterly Report of Klystron usage and failure", July 11, 1980 (SLACより入手)
- (2) G. Faillon ; "Klystrons de puissance à large bande", Revue Technique Thomson-CSF vol.8 No.2 Juin 1976