

## リニャック用クライストロンおよび加速管の信頼性

三菱電機株式会社    小野寺俊男    家喜洋司

[要旨] リニャック用クライストロン2012(先端出力5MW)と2014(先端出力25MW)はS42年度より納入を開始して現在迄に数10本の納入実績を有するが、今回その平均寿命を算出した所2012は7000時間・2014は3000時間であった。一方リニャック用加速管の信頼性試験として加速管の輸送・格付・運転に対応する振動・耐荷重・ヒートサイクル試験を実施した結果、通常の取扱条件では共振周波数のずれや不可逆的変形が発生しないことが判った。

1. まえがき

製品の具備すべき4つのポイントは下記の通りである。

- 性能
- 納期
- 価格
- 信頼性

特に最後の信頼性はシステムの大型化に伴って近年特に重要視されるようになってきた。信頼性とはシステム・機器・部品が規定の条件のもとで意図する時間、規定の性能を遂行する確率と定義される。信頼性を定量的に表わすには故障率を導入する。故障率λとはある単位時間当りの故障発生率であって、時間の逆数の次元を持つ。一般に故障率λは時間の関数であるが、製造中の欠陥とか摩耗によらない偶発故障は時間に関係せずほぼ一定である。この偶発故障期の故障率と平均寿命MTTF (Mean Time To Failure) との間には次の関係が成り立つ。

$$\lambda = \frac{1}{MTTF} \quad \dots (1)$$

更にシステムの故障率は構成される部品のすべての故障率を加えて求められるので、部品はブラックボックスとしてその動作条件と環境ストレスに応じたMTTFを求めることが重要となる。表1にクライストロンの動作条件を示す。次節でこの動作条件での平均

項目 \ 形名	PV-2012W	PV-2014B
周波数	2856 MHz	2856 MHz
ビーム電圧	130 kV	240 kV
ビーム電流	95 A	235 A
ピーク出力	5.5 MW	24 MW
平均出力	6.6 kW	28.8 kW
パルス幅	4 μs	4 μs
パルス率	0.0012	0.0012
高周波入力	50 W	200 W
鋭利利得	50 dB	51 dB
能率	44 %	43 %
負荷 VSWR	1.1	1.1
冷却水	本体	水冷 5 1/分
	コリマ	水冷 30 1/分
		蒸気冷却 7 1/分
適用例	ML-15R 工業用ライナック	東北大学 ML-300ライナック

表1. クライストロンの動作条件

形名	加速モード	中心周波数 (MHz)	空洞数	全長 (mm)	入力 (10W)	出力 (10W)	適用ライナック	用途
PIAS-2101B	誘導行波形	2998	5	213	0.8	0.9	ML-15Rライナック	工業用
PIAS-2203A	誘導行波形	2998	7	280	1.8	1.5	ML-30Rライナック	工業用
PIAS-2104B	誘導行波形	2998	18	650	1.8	3.0	ML-5Rライナック	工業用
PIAS-2201A	誘導行波形	2998	63	2,133	1.8	10.0	ML-15Rライナック	工業用
PIAS-2202A	誘導行波形	2856	52	1,892	5	15.0	ML-15Rライナック	工業用
PIAS-4101B	π/2 定在波形	2998	5+(4)	262	1.8	3.0	ML-30Rライナック	医療用
PIAS-2203A	誘導行波形	2856	50	1,820	5	15.0	ML-15Rライナック	医療用
PIAS-2207A	誘導行波形	2856	58	2,115	5	20.0	東大ライナック	研究用
PIAS-3202A	誘導行波形	2856	63	2,280	6	20.0	東北大学ライナック	研究用
PIAS-5201A	誘導行波形	2856	21	777	8	5.0	産研ライナック	研究用

表2 加速管一覧表

寿命を算出する。一方リニヤック用加速管は表2の一覧表に示すようにリニヤックの機種に応じて進行波形・定在波形または全長が異なり、S46年度より現在迄50本近くリニヤックと共に納入して来たが、加速管が故障して交換した例は未だ皆無である。このため加速管の信頼性を平均寿命で表わす段階ではない。今回東北大学を初めとして加速管を単体で販売する機会を得たので、加速管の使用条件・環境条件を明確にする目的で信頼性試験を実施したので報告する。

2. クライストロンの平均寿命

真空管の故障モードは次の2つの混合であると云われている。図1にその様子を示す。

初期故障 ----- 製造時の欠陥による

摩耗故障 ----- 使いまらによる

また真空管の寿命分布にはワイブル分布がよく近似し、その解析はワイブル確率

紙が使われる。図2に2012

の寿命データをワイブルプロットした場合を示す。ここで

$m$ ; 形状パラメータ

$\eta$ ; 特性寿命

$\mu$ ; 平均寿命

と呼ばれる量である。特に代表的初期故障例は次の2つである。

(1) アノード水もれ

(2) カソード落下

これ等は必ずしもメーカー側の設計または品質管理の欠陥によるもので、その後の改良で消失したと考えられる。この効果を考慮したものが、図2の下側のラインである。この結果、表1の動作条件下での2012の平均寿命は7,400時間と推定される。

一方2014の場合は真に寿命終了したサンプル数が少ないこと、或る時間使用後にストックしている管が相当数あることなどのため摩耗故障による平均寿命をワイブル確率紙で推定でき

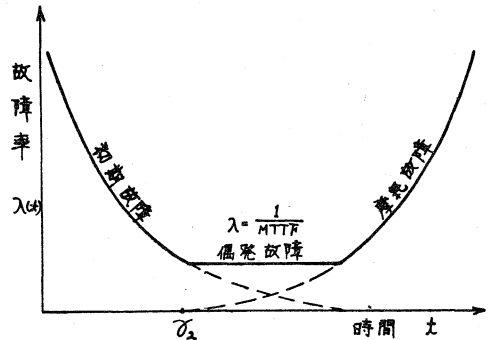


図1. 真空管の故障率曲線

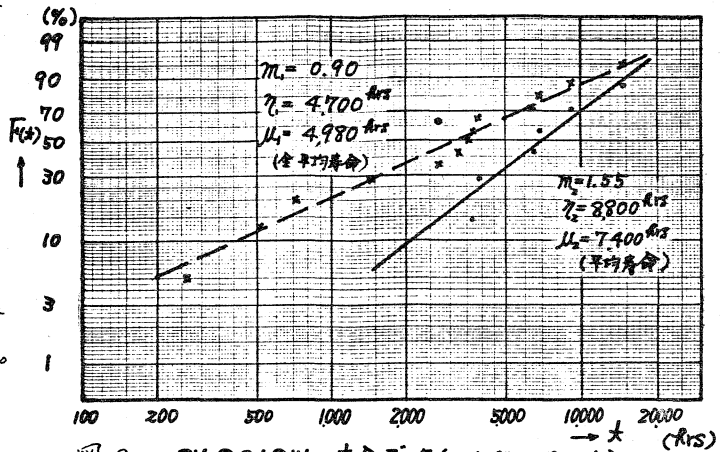


図2. PV-2012Wの寿命データ(ワイブルプロット)

納入年度	納入本数	累積動作時間	故障本数	MTTF [I]	MTTF [II]
1967	1本	730 hrs	1本	730 hrs	730 hrs
1968	1	2246	1	1,123	1,123
1969	4 (1)	4,536	3 (3)	907	1,643
1970	7 (1)	14,219	5 (1)	1,421	1,852
1971	4 (2)	22,217	2 (2)	1,851	2,597
1972	6 (2)	31,852	1	2,450	3,379
1973	4	36,309	1	2,593	3,487
1974	3 (1)	40,134	1 (1)	2,675	3,517
1975	1	40,779	1	2,548	3,278

表3. PV-2014の平均寿命(MTTF)

ない。このため一つの考え方は偶発故障率を想定して、MTTFを求めた方法即ち累積動作時間と累積故障本数で割り方法を採用した。表3のMTTF [II]は上記の2つの初期故障例を除外した場合の数値で、3,300時間で鋭知の傾向を示す。もう一つの考え方は寿命分布は正規分布に従い、その標準偏差はMTTFの半分であるとの仮定の上、中断のある不完全データからMTTFを推定すると<sup>(2)</sup>、3,000時間以上となる。

3. 加速管の信頼性

図3に加速管の構造を示す。また図4にそのフローチャートを示す。この二つから加速管の信頼性上、次のことが言える。

- (1)カプラが一体構造であるため、据付・交換時の調整が不要であり、特性の再現性は確実である。
- (2)カプラの冷却構造が良く、ビームがインタセプトされる可能性のある端板が厚いCu板で構成されているので、破壊故障に致す場合が少ない。
- (3)ディスクとスペーサの構造を検討して、電氣的接触とリークとを分離したロウ付構造にしたので、空洞のQとリークに良い特性を示す。ガス放出も少ない。
- (4)中間焼鈍を実施しているので、加工歪が無い。
- (5)化学的工工程を含まないので、液の残存による程時変化が無い。
- (6)工工程間検査を混在させているので、不良品のまぎれ込みが無い。

以上は主として有利な点であるが、不利な点としては次のものが考えられる。

(7)ロウ付組立なので、ディスクやスペーサが鈍っていて耐荷重性が弱い。このためSUSのパイプでジャケットを構成し、内部支持で強度増加している。

(8)スペーサの一部をスクイズすることにより、空洞の共振周波数を合わせているが、このスクイズが振動・ヒートサイクルで元に戻らないか心配が残る。

上記2点の不安に答えるため、表4に示す機械的信頼性試験を実施した。その結果、振動・ヒートサイクルに因りて試験条件に示すストレスを加えてその前後で空洞の共振周波数を測定し、その

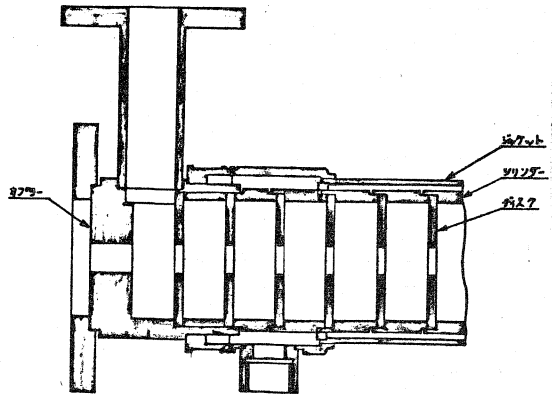


図3. 三基加速管構造図

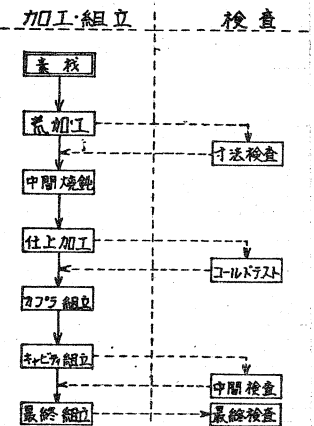


図4. 加速管フローチャート

工程	試験項目	試験条件	結果
輸送	振動試験	振動数: 25 Hz 全振幅: 4mm (5σ) 時間: 各15分 方向: X, Y, Z	良好
据付	耐荷重試験	[I] 中央部の荷重 W=50kg以上	良好 (7-9割)
		[II] Wφフランジの荷重 W=50kg以上	良好 (7-9割)
		[III] Wφフランジの荷重 W=50kg以上	良好
運転	ヒートサイクル試験	温度 時間 圧力 (1) 0℃~+55℃ 84%/min 6.917N (2) 0℃~+95℃ 84%/min 6.917N	良好

表4. 加速管の機械的信頼性試験

間では差の無いことを確認した。この等のストレスレベルは英に実使用時のストレスよりほかに強いレベルなので、加速試験と考えらる。次に耐荷重試験では荷重の加わる3つの場合について、荷重の変化に対して荷重時の変形量と共振周波数を測定した。その結果100 kg迄は変形は可逆的であり、変形時にも共振周波数は変化しない。このことから50 kg迄は許容出来ると言える。  
[謝辞] クライストロン2014の寿命データと御助言を頂いた浦沢先生並びに加速管の信頼性試験の動機を与えて下さった田中先生に深甚なる謝意を表します。

[参考文献]

- (1) J. H. K. Kao ; "A Graphical Estimation of Mixed Weibull Parameters in Life-Testing of Electron Tubes " Technometrics (1959)
- (2) R. W. Bierce ; "The Stanford two-mile Accelerator " P.340