

放送用送信管の信頼度

Reliability of Broadcasting Power Tubes

Recent investigations of the field data at NHK (Japan Broadcasting Corporation) revealed that broadcasting power tubes for TV or FM translator station service showed a mean failure rate of $2-6 \times 10^{-6}$ in a scheduled replacement period of two years. Also, travelling wave tubes, 1W 65(1W 67), proved in the abovementioned replacement period to be of a decreasing failure rate type. The mean failure rate of those tubes for FM translation use was almost $\frac{1}{2}$ of those for TV station service.

The conduction cooling system which had been put to a trial use for the first time in Japan proved fully serviceable for regular service.

宇佐恒臣* Tsuneomi Usa
小田原正春* Masaharu Odawara
大塚信治** Shinji Ôtsuka
内海宏** Hiroshi Uchiumi

1 緒 言

テレビ難視地域を解消するため、昭和35年ごろから各地に送信管を使用したテレビサテライト局が建設されてきたが、局数の増加とともに放送中継所の無人化や合理化が進むにつれ送信管の信頼性の問題がクローズアップされてきた。その一環としてガラス封止の送信管に代わってセラミック送信管が使用されるようになった。さらに従来の送信管 2C39A や 4F15R がテレビ中継局用としては比較的短寿命であることから、日本放送協会（以下NHKと略す）技術研究所および保全部の指導のもとに、昭和37年にテレビ中継局用に適した特性と長寿命を目的として、同軸同筒形セラミック封止三極管 2T72R、2T72が開発され、昭和39年には新管種 4F64R、4F64が開発された。

一方、極管は利得が低いこと、付属高周波回路（空胴）を有しているため調整がむずかしいという問題があり、サテライト局用の送信管は高利得、広帯域で調整のきわめて容易な進行波管に移行するすう勢が強くなってきたので、昭和39年に10W用進行波管 1W65が開発された。このような状況のな

かで、日立送信管は特性の改良や製作技術の向上により、信頼性も著しく向上したと考えているが、新旧送信管の改良効果や冷却方法（強制空冷と伝導冷却）の差異による信頼性、進行波管と極管の信頼性比較などについて定量的な稼（か）動実績の把（は）握は行なわれていなかった。

日立製作所製品のものについて、比較的使用ひん度の高い送信管について稼動実績の調査と解析を行なった。調査対象管の外観は図1に示すとおりである。本報告ではNHK各中継局における実装時の累積故障率、計画補給時点の平均故障率、故障内容などについて管種、用途、冷却法の違いによる信頼度の解析結果について述べる。

2 稼動実績データの集積と調査方法

2.1 調査対象管の概要

NHKにおける送信管の補給は、一定期間動作したものを定期的に全数交換する計画補給方式が採用されている。計画補給の周期は管種により1年補給と2年補給とに分けられて

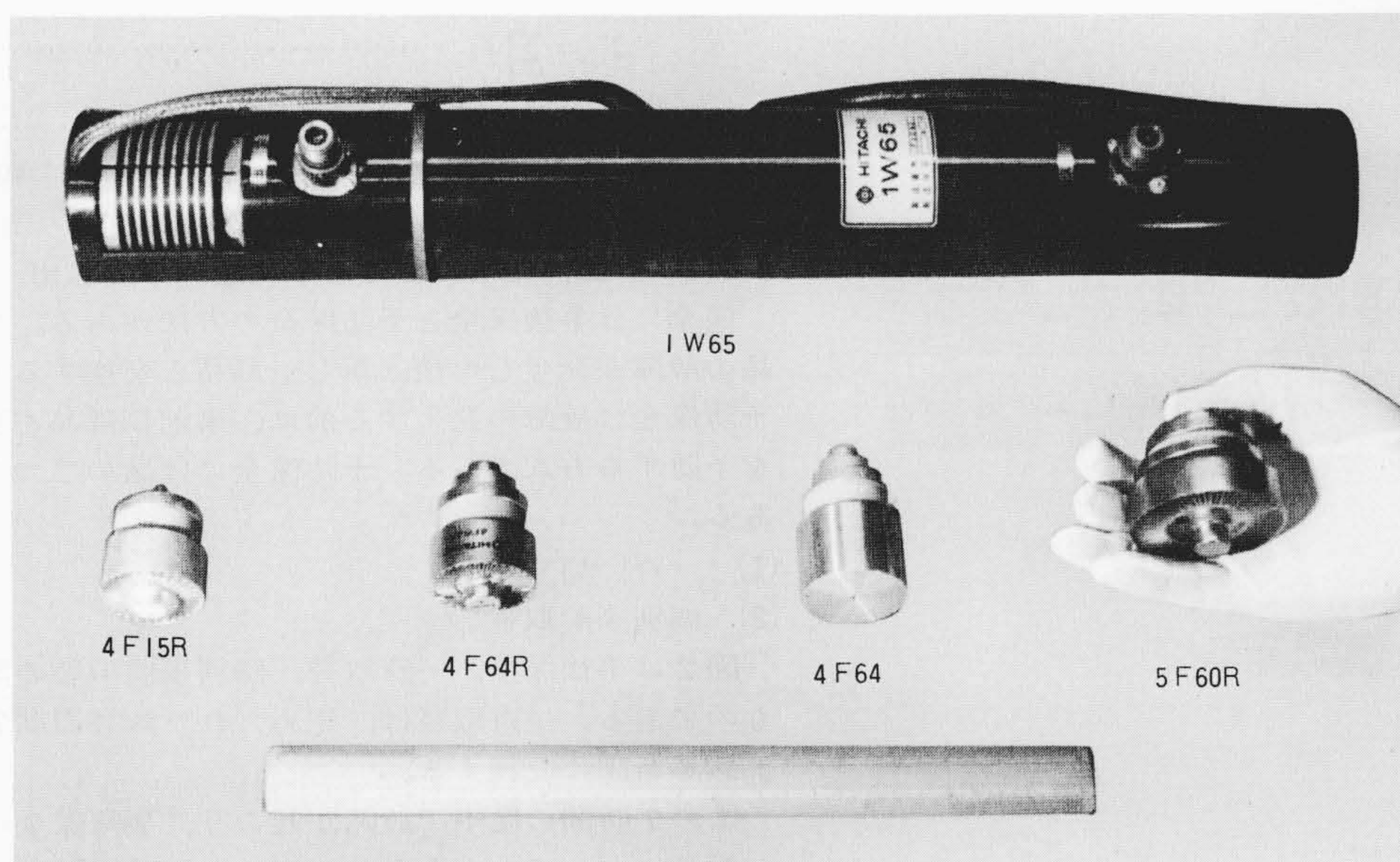


図1 調査対象管の外観
調査対象管4F15R、4F64、4F64R、5F60R、1W65の外観を示したものである。

Fig. 1 Outside View of 4F15R, 4F64, 4F64R, 5F60R and 1W65

* 日本放送協会技術本部保全部 ** 日立製作所茂原工場

表1 調査対象管の概要 調査対象管の主要な電気的特性および用途について示したものである。

Table 1 Specifications of Tubes Investigated

品名	調査対象数 (本)	電気的特性	許容陽極損失(W)	冷却方法	用途
4F15R	280	f : 150 ~ 500MHz g_m : 12m Ω μ : 5	250	強制空冷	10W VHFテレビ中継用
4F64R	467	f : ~ 500MHz g_m : 30m Ω μ : 16.5	180	強制空冷	30W VHFテレビ中継用 100W FM中継用
4F64	135	f : ~ 500MHz g_m : 30m Ω μ : 16.5	180	伝導冷却	100W FM中継用
5F60R	219	f : ~ 1,250MHz g_m : 25m Ω μ : 15	450	強制空冷	30W VHF, UHFテレビ中継用
1W65	126	f : 660 ~ 770MHz G_p : 30dB	420	強制空冷	10W UHFテレビ中継用

表2 放送用送信管系列 NHKにおけるVHFサテライト局, UHFサテライト局, FM中継局の送信管系列図を示したものである。

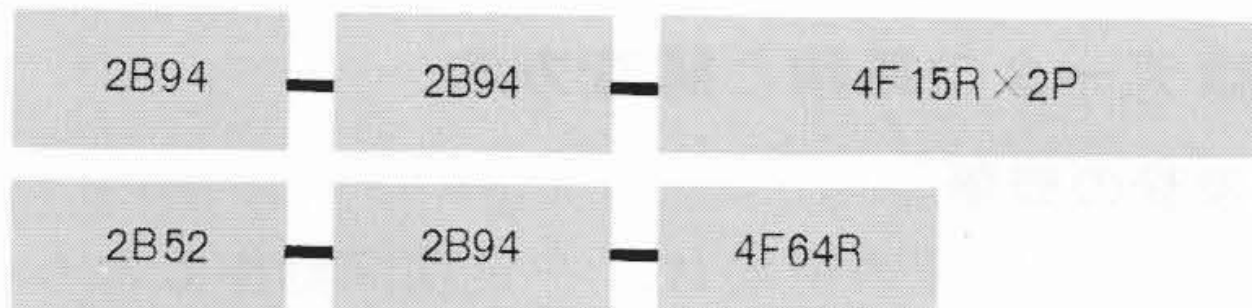
Table 2 Line-up of Broadcasting Power Tubes

(1) VHFサテライト局

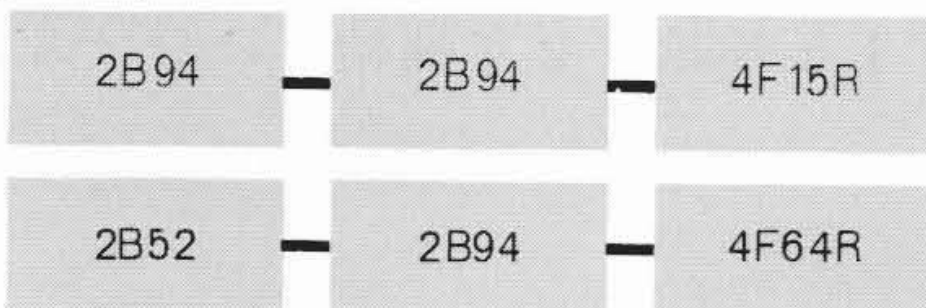
(a) 100W局



(b) 30W局



(c) 10W局

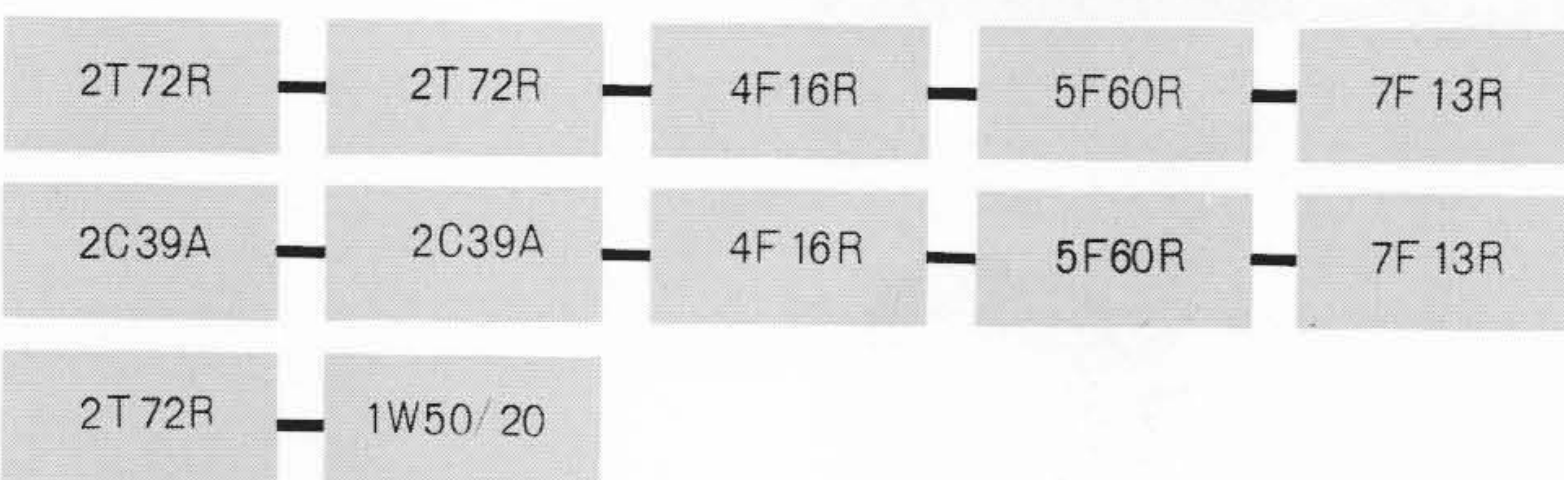


(2) UHFサテライト局

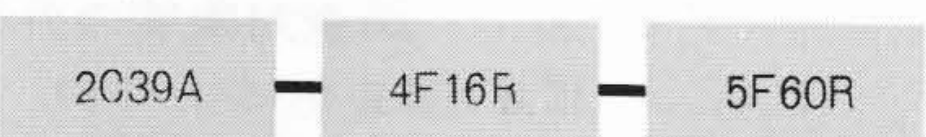
(a) 300W局



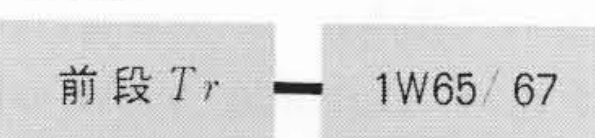
(b) 100W局



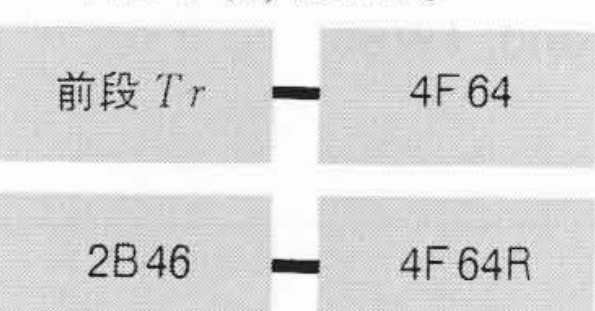
(c) 30W局



(d) 10W局



(3) FM中継局 (a) 100W局



いる。したがって、昭和43年度以前にNHKに納入した送信管は、45年はじめまでに現用に供されることになる。この前提のもとに調査対象期間は、昭和40～43年の間にNHKに納入した送信管とした。納入数は工場出荷台帳より調べ、使用情報および故障情報はNHK送信管整理カード、工場返品受付台帳ならびに工場返品取調べ書により調査した。調査対象管種は、NHK納入送信管のうち特に無人局であるため高信頼度が要求される中継局に使用されている管種を選んだ。調査対象管の概要は表1に、当該送信管を用いた放送系列図は表2に示すとおりである。

2.2 稼働実績解析の方法

2.2.1 ワイブル解析

フィールドにおける送信管の使用開始時期が各局まちまちであること、途中で使用を打ち切っているものがあることおよび現用中のものがあることから、比例方式⁽¹⁾によるワイブル解析法⁽²⁾を採用した。

比例方式によるワイブル解析法の考え方は、現用球あるいは中途打ち切り球の寿命は従来の消耗実績に比例すると考え、全部のデータを利用することである。比例方式による実際のワイブル解析手順について述べる。

- (1) 表3のような様式の欄を作り、各時間区分内の消耗数および現用数を記入する。
- (2) 消耗数および残存数から各時間区分における瞬間消耗率を算出する。

時間区分 i における残存数は、

$$N_{Ri} = N - \left(\sum_{j=i}^{j=i-1} r_j + \sum_{j=1}^{j=i} C_j \right) \quad \text{.....(1)}$$

したがって、

$$\lambda_i = \frac{r_i}{N_{Ri}} \quad \text{.....(2)}$$

ここに λ : 瞬間消耗率 r : 消耗数 C : 現用数 (中途打ち切りを含む)

- (3) λ_i および残存率 (R_{i-1}) から次式により f_i を求める。

$$f_i = \lambda_i \cdot R_{i-1} \quad \text{.....(3)}$$

ここに、 f_i = 時間区分 i における消耗確率密度

- (4) 累積消耗率 F_i は f_i を累積したものであるから、

$$F_i = \sum_{j=1}^i f_j \quad \text{.....(4)}$$

- (5) 残存率 R_i は $R_i = 1 - F_i$ (5)

- (6) 各時間区分の F_i を順次求め、ワイブル確率紙にプロットする。

2.2.2 計画補給下における平均故障率の算出

保全には事後保全と予防保全の方法がある。事後保全は部品の故障が発生した後、新しい部品と交換する方式であり、予防保全は故障の発生する前に、事前に部品を交換して故障を予防する方式である。予防保全には次の二つの取替方式がある。

- (1) 一斉(せい)取替
- (2) 個別事前取替

図2は事後保全、一斉取替、個別事前取替の関係を示したものである。一斉取替は、定められた取替周期 T 時間ごとに部品を新品に交換する。

この T 時間の途中で故障が起こり、事後保全により故障品が新品になってもあらかじめ定めた取替時間を変えない。したがって事後保全によって取り替えられた部品は、 T 時間以下で再び新品に取り替えられることになる。個別事前取替は、部品が故障すれば事後保全によって取り替えられるが、取替

表3 4F15R計算表 比例方式によるワイブル解析の計算例を示したものである。

Table 3 Example of Calculation for 4F15R

i	時間区分 t	現用数 C	消耗数 r	残存数 N_R	瞬間消耗率 λ_i	残存率 $R=1-F$	消耗確率密度 f	累積消耗率 F
1	1~1,000	1	1	279	0.0036	0.9964	0.0036	0.0036
2	1,001~2,000		2	278	0.0072	0.9892	0.0072	0.0108
3	2,001~3,000		9	276	0.0325	0.9571	0.0321	0.0429
4	3,001~4,000	1	6	266	0.0225	0.9356	0.0215	0.0644
5	4,001~5,000		2	260	0.0077	0.9284	0.0072	0.0716
6	5,001~6,000	1	4	257	0.0155	0.9140	0.0144	0.0860
7	6,001~7,000	1	6	252	0.0237	0.8923	0.0217	0.1077
8	7,001~8,000	1	4	245	0.0163	0.8778	0.0145	0.1222
9	8,001~9,000		2	241	0.0083	0.8705	0.0073	0.1295
10	9,001~10,000		1	239	0.0042	0.8668	0.0037	0.1332
11	10,001~11,000	1	2	237	0.0084	0.8595	0.0073	0.1405
12	11,001~12,000		3	235	0.0127	0.8486	0.0109	0.1514
13	12,001~13,000							
14	13,001~14,000							
15	14,001~15,000							
16	15,001~16,000		1	232	0.0043		0.0036	0.1550
17	16,001~17,000							
18	17,001~18,000							
19	18,001~19,000							
20	19,001~20,000							
21	20,001~21,000							
22	21,001~22,000							

注：調査対象数 $N=280$

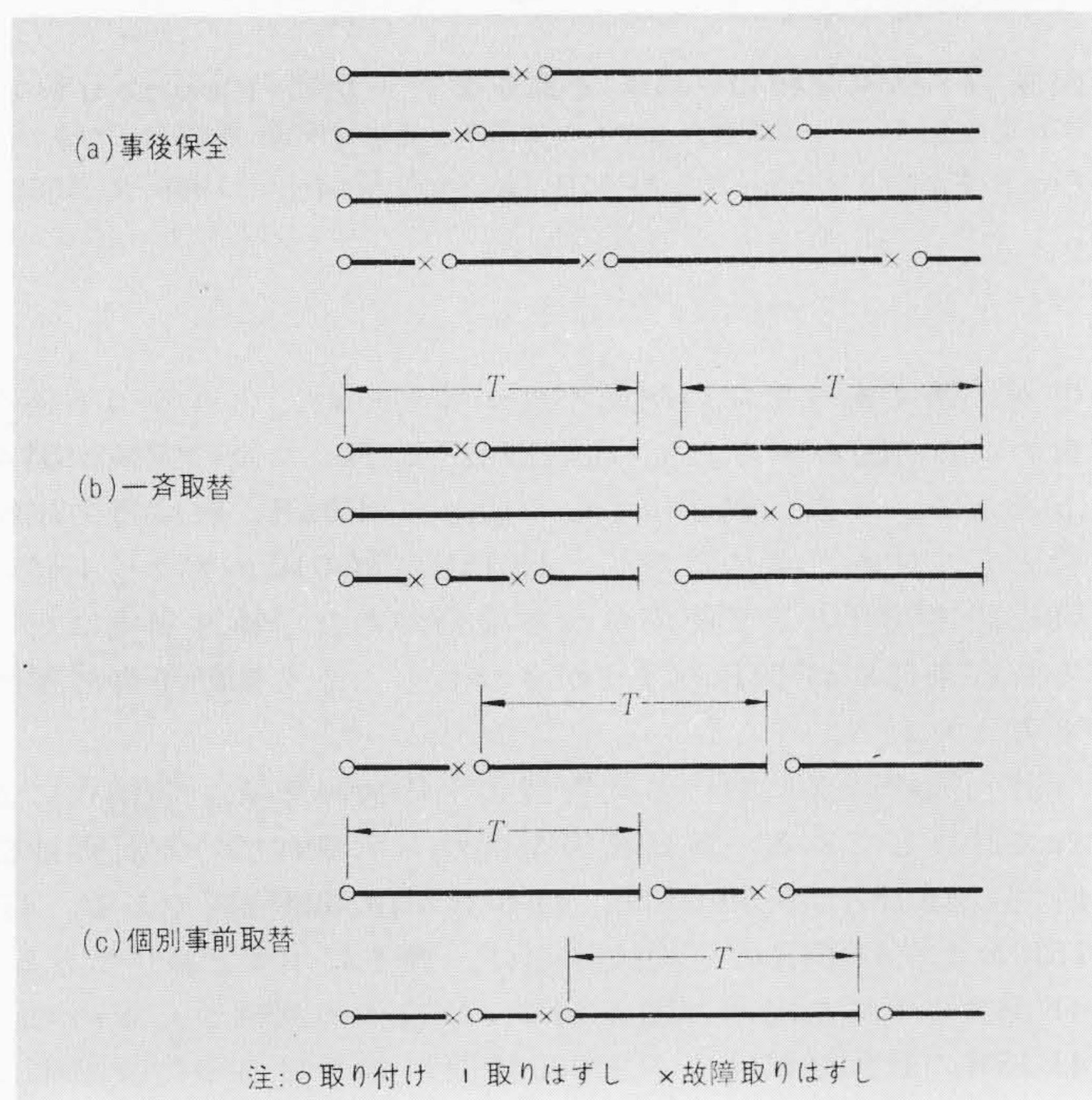


図2 取替え方式 事後保全、予防保全（一斉取替、個別事前取替）の関係を図示したものである。

Fig. 2 Methods of Replacement

えの時点から定められた T 時間故障がなければ、 T 時間経過後新品に取り替える方式である。NHKで採用されている計画補給方式は、予防保全のうち一斉取替方式で取替周期 T は1年管種（約9,000時間）と2年管種（約18,000時間）がある。計画補給時点で取りはずされた管球は、使用を途中で打ち切ったとしてワイブル解析を行なったので、この計画補給期間内における平均故障率 λ_{ip} は次式で計算される⁽³⁾。

$$\lambda_{ip} = \frac{1-R(t)}{\int_0^T R(t) dt} \quad \text{.....(6)}$$

$R(t)$ ：使用部品の t 時間後の信頼度関数

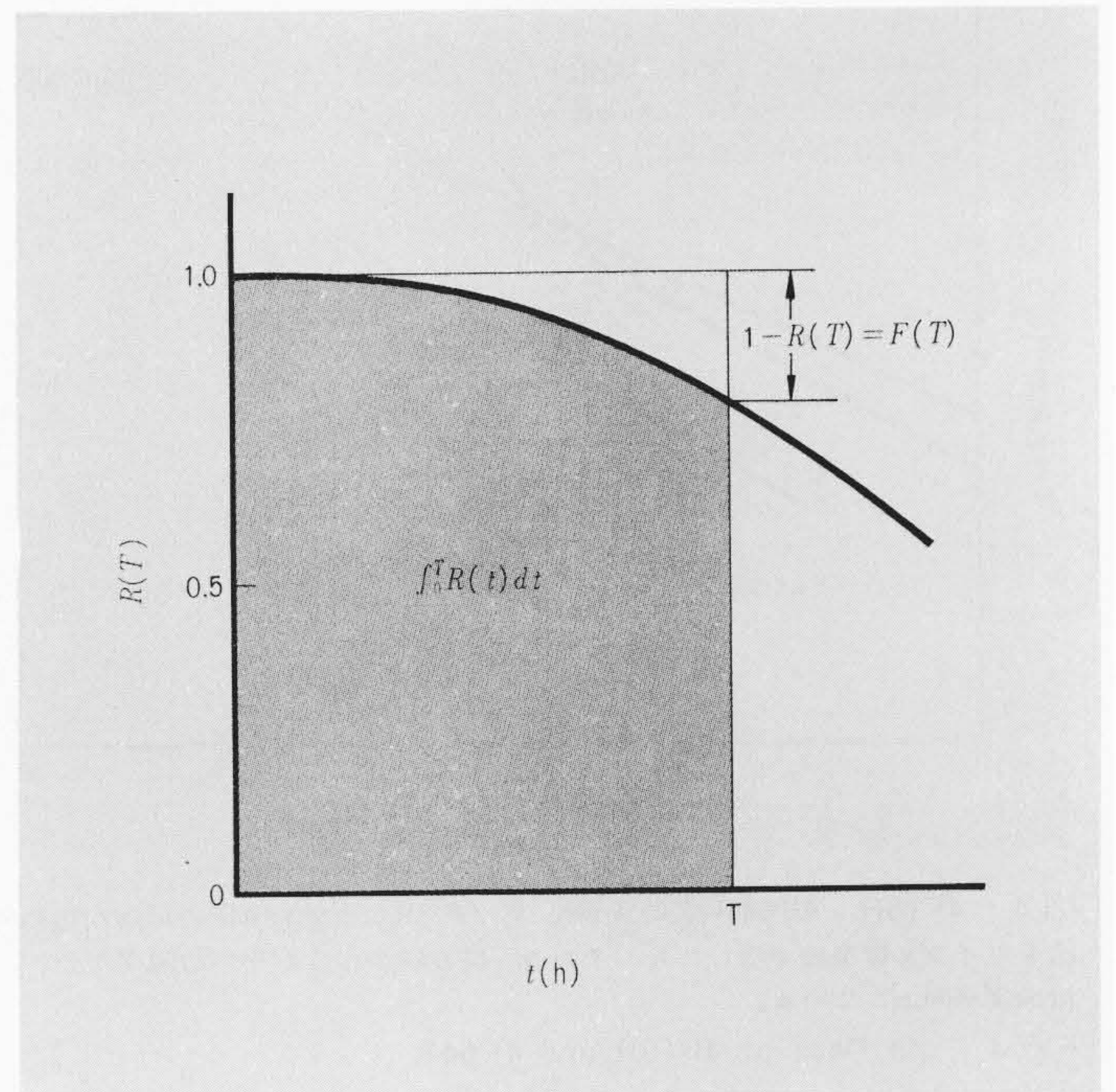


図3 事前取替の故障率 事前取替の故障率を算出するため、 $\int_0^T R(t) dt$ を求める説明を示す図である。

Fig. 3 Failure Rate for Preventive Replacement

$\int_0^T R(t) dt$ ：図3のように0とTの間の信頼度の面積

3 調査結果

3.1 管種による信頼性の比較

3.1.1 4F15Rと4F64Rの信頼度

4F15Rはアメリカ・Eimac社で開発された四極送信管で、VHF帯、UHF帯の電力増幅管として広く使用されてきた。しかしながらテレビ中継用電力増幅管としては、直線性劣化やエミッション寿命などの点でNHKの目標である2年間での取替方式を満足する品質が得られなかった。昭和39年NHK

の要請により直線性のよい、しかもエミッション寿命も改善された同軸構造の新管種4F64Rが、NHK技術研究所の指導のもとに開発された。

4F15R、4F64Rの稼動実績は図4に示すとおりである。4F64Rは表2で示すように30W、10Wのテレビ中継用のほかに、100WのFM中継用にも使用されている。4F15Rがテレビ用であるため、4F64Rについても図4(a)(b)と比較した。4F15Rの形状パラメータは $m=1.3$ で故障率増加形であり、4F64Rは図4(a)では $m=1.0$ で故障率一定形を示しているが、図4(b)では4F15R同様 $m=1.25$ で故障率増加形となっている。図4(a)(b)の違いは図5の不良現象図に示されるように、4F64Rの開発当初4F15Rが使用されている装置を改造して4F64Rが使用されたため、カソード側を強制空冷しないで使用したものがあつたり、4F64Rの使用ソケットとヒータ電極との接触不良があつた。このためカソード側の管球温度が異常に上昇し、カソードからのスパッタにより電極間容量 C_{g2-p} が増加し出力低下の短寿命を生じたことなど、4F64Rの周辺部分との相

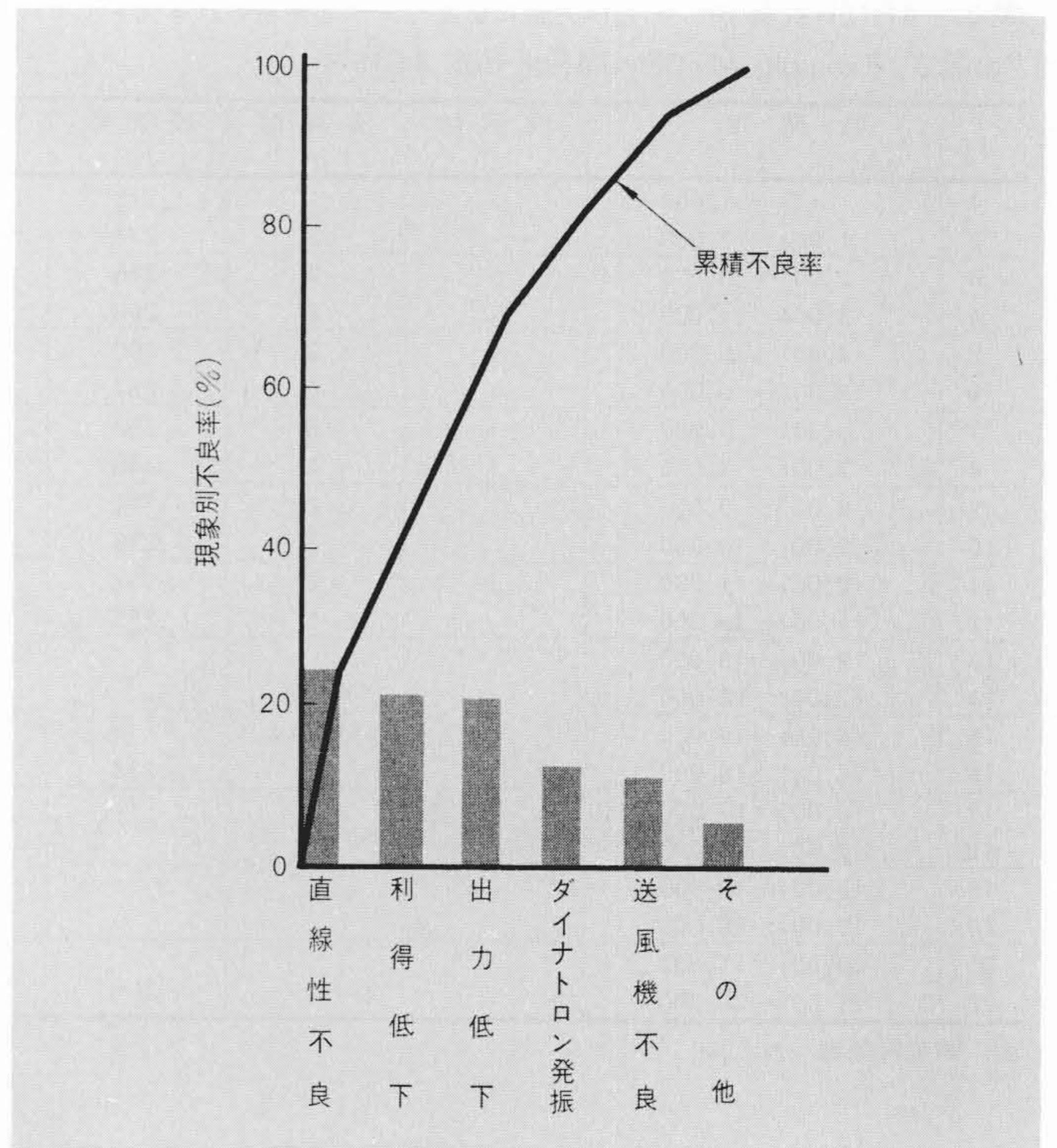


図5 4F64R(昭和40～43年)不良現象 フィールドにおける4F64Rの不良現象をパレート図で表わしたものである。直線性不良，利得低下が多い。
Fig.5 Failure Modes of 4F64R (in service from 1965 to 1968)

性が不適であったため初期不良が多かった。これらの不良を含めたのが図4(a)であり、周辺部分を改良した後の実績が図4(b)である。また、表2に示したように4F64Rが終段電力増幅管として使われるのに対し、4F15Rは100Wサテライト局の励振段増幅管として使用される場合があり、特性変化に対する許容条件が4F64Rのほうがきびしいことも初期不良の要因と考えられる。

計画補給時点における両管種の平均故障率 λ_{ip} を(6)式によって計算してみる。NHK保全部から示されている計画補給時間は4F15Rが9,000時間、4F64Rが18,000時間である。4F15Rおよび4F64Rの平均故障率は、表4に示すとおりである。4F64Rの平均故障率は図4(b)で、改良後の実績から求めた。4F15Rの計画補給時点(9,000時間)における平均故障率は1.65%/1,000時間であり、4F64Rの計画補給時点(18,000時間)における平均故障率は0.6%/1,000時間で4F64Rの信頼度が向上しており、従来球4F15Rに比べ4F64Rの長寿命対策の効果が明確に認められる。

3.1.2 送信管と進行波管の信頼性比較

昭和36年日立市に、100WのUHFテレビ中継局が開局して以来次々とサテライト局が設置されてきたが、そのテレビ中継機の系列は当初送信管(極管)が主体とされてきた。しかしながら、送信管系列は電力利得が低いため励振用電力増幅部が3～4段となること、付属高周波回路(空胴)を外部に有するため、テレビ帯域幅をとるための調整が困難であるなど保守上の問題があつた。このため、高利得でしかも広帯域である進行波管の開発が行なわれた。表2からも明らかなように送信管系列に比べ進行波管は段数が少なく、かつ付属高周波回路を持たないので無調整でよいなどの利点を持っている。

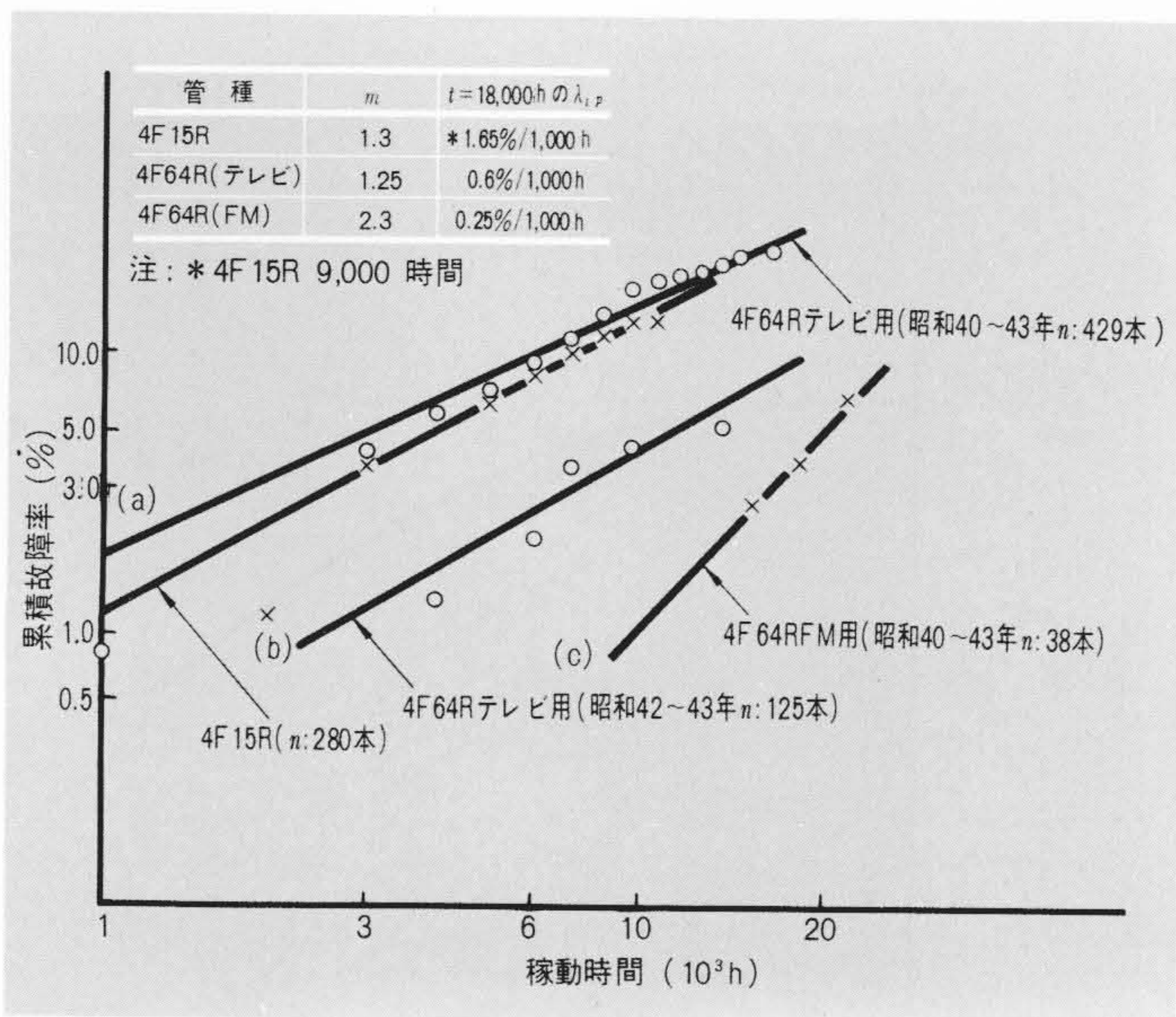


図4 4F15R、4F64R稼動実績 4F15Rおよび4F64Rの用途別稼動実績をワイブル確率紙で示したものである。4F64Rのほうが平均故障率が小さく、信頼度が向上している。

Fig.4 Field Data of 4F15R and 4F64R

表4 送信管平均故障率 放送用送信管のワイブル分布形状パラメータおよび平均故障率を示したものである。

Table 4 Mean Failure Rate of Broadcasting Power Tubes

管種	形状パラメータ (m)	$t=5,000h$ の 平均故障率	$t=9,000h$ の 平均故障率	$t=18,000h$ の 平均故障率
4F15R	1.3	1.3 %/1,000h	1.65%/1,000h	— %/1,000h
5F60R	1.25	0.45 "	0.55 "	0.65 "
1W65	0.25	1.45 "	0.9 "	0.54 "
4F64R(テレビ用)	1.25	0.42%/1,000h	0.5 "	0.6 "
4F64R(FM用)	2.3	—	0.1 "	0.25 "
4F64	1.3	0.6 %/1,000h	0.66%/1,000h	0.75%/1,000h

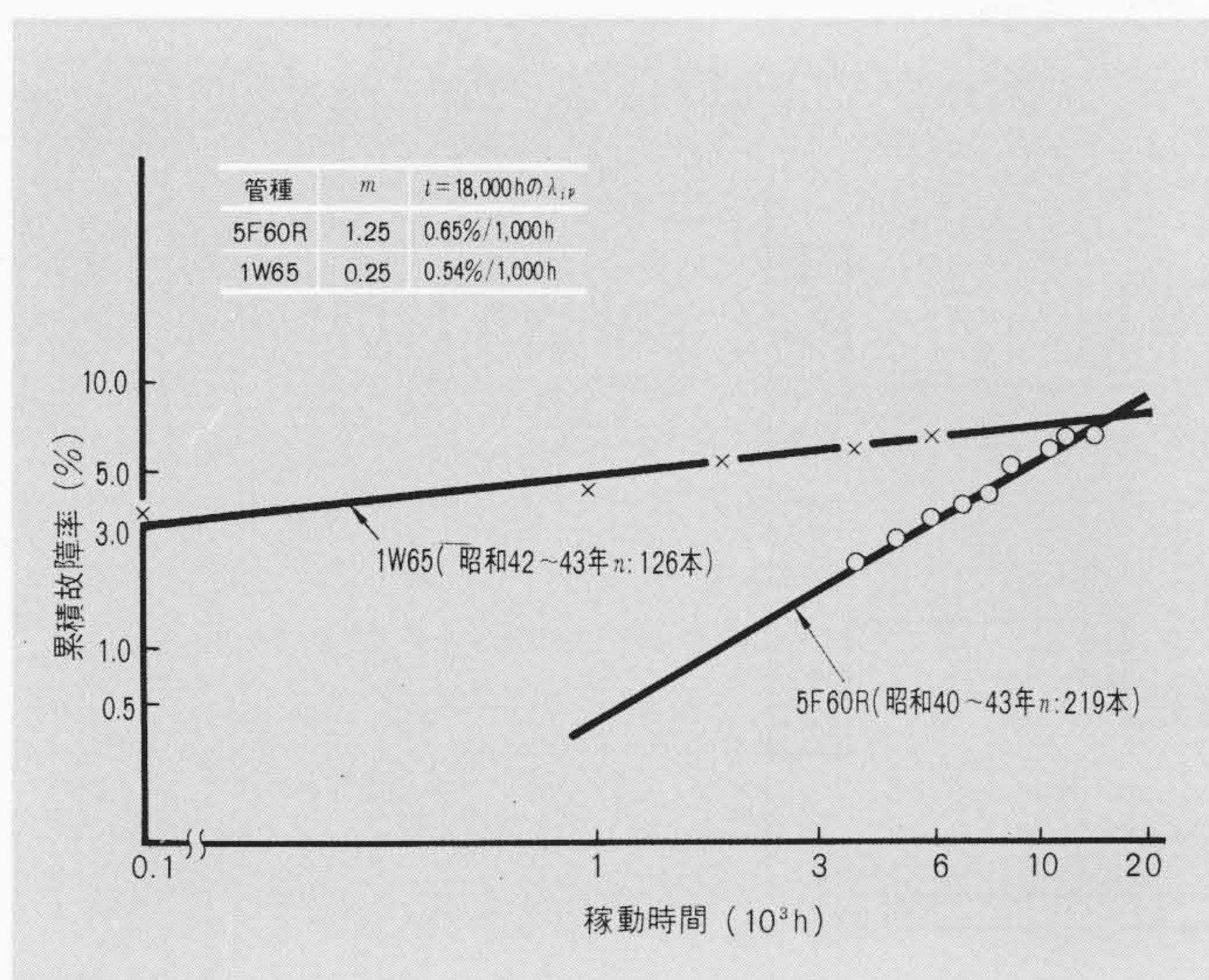


図6 5F60R, 1W65稼働実績 5F60R, 1W65の稼働実績をワイブル確率紙で示したものである。1W65は初期不良が多い。

Fig. 6 Field Data of 5F60R and 1W65

5F60R (30W) と進行波管1W65 (10W) の稼働実績は図6に示すとおりである。寿命分布形状は、5F60Rが $m=1.25$ で故障率増加形であるのに対し、1W65は $m=0.25$ で故障率減少形を示している。特に1W65の $t=1,000$ 時間における累積故障率は4.6%で、5F60Rの累積故障率に比べて数倍の高率である。5F60R, 1W65の平均故障率を(6)式によって算出し比較した値は、表4に示すとおりである。計画補給時点(18,000時間)における5F60Rの平均故障率 λ_{ip} は、0.65%/1,000時間であり、1W65の λ_{ip} は、0.54%/1,000時間である。フィールドにおける1W65の不良現象について分析すると図7のようになり、1,000時間以内の累積故障率が18,000時間までの累積故障率の半分を占めている。さらに1,000時間以内の故障について時間経過的に調べてみると、動作時間0時間における故障が圧倒的に多い。つまり予備球として保管されているときに特性がドリフトし劣化しているという現象である。これは進行波管が電子ビーム集束用の周期磁界(永久磁石)を内蔵しているため、ヘリックス電流(I_{hel})、雑音(S/N)特性が経時的に変わりやすいこと、送信管に比べ製作工程中での管球部品のガス出しがしにくいことなどによると考えられる。S/N劣化についてはスクリーニング法の改善および排気、エージング方法の改善により、 I_{hel} 増加についてはフェライトマグネットをアルニコマグネットに変更して温度特性の改善を図り、さらに周期磁界の改良を行ない、現在は著しく安定してきたが対策後の稼働実績については調査中である。

1W65は、18,000時間程度ではまだ摩耗期にはっていないことがわかった。最近、NHKにおいても計画補給期間の見直しが行なわれている。特に1W65(1W67)は使用モデル局を選定して寿命がどこまで持つかの実績把握が行なわれている。

3.2 テレビ中継用とFM中継用の信頼性比較

4F64Rは、テレビ中継用およびFM中継用に使われているが、図4(b)(c)の稼働実績から明らかなようにテレビ中継用の寿命分布形状は、 $m=1.25$ 、FM中継用の寿命分布形状は、 $m=2.4$ で両者とも故障率増加形となっている。18,000時間における平均故障率 λ_{ip} はテレビ中継用0.6%/1,000時間に対し、FM中継用は0.25%/1,000時間でFM中継用の平均故障

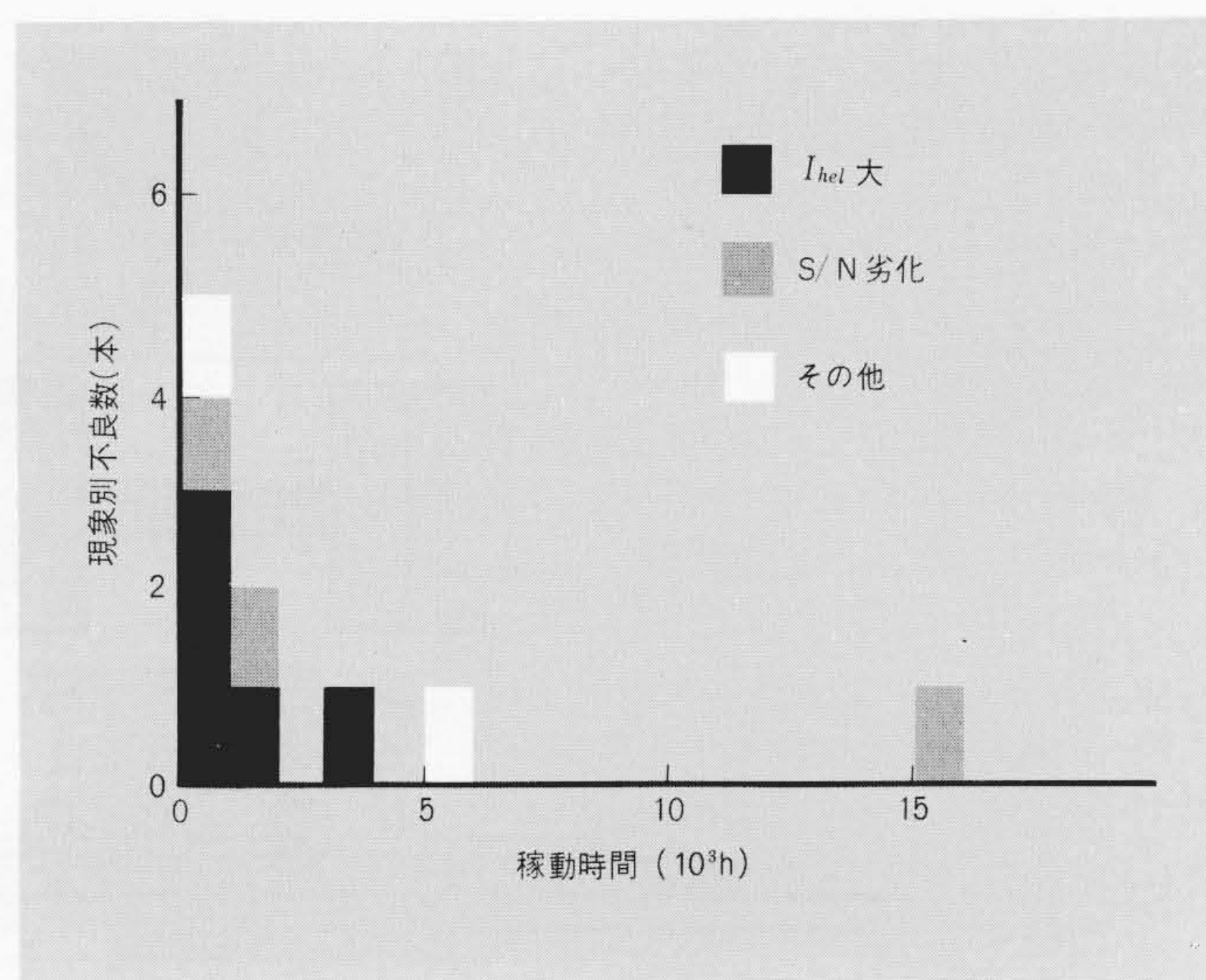


図7 1W65不良現象 フィールドにおける1W65の稼働時間と不良現象の関係について示したものである。初期における I_{hel} が多い。

Fig. 7 Failure Modes of 1W65

率は非常に小さい。同一管種での比較であるから動作条件の差がでているものと考えられる。FM中継用の場合C級動作となるため陽極能率がよいが、テレビ中継用はAB₂級で動作し、陽極能率が悪く、したがって陽極損失が多くなる。またテレビ中継用の場合、画質の向上に関連し動作直線性の劣化や利得低下など、わずかな特性変動が動作状態の変化として現われる。したがって不良現象も図5から明らかなようにテレビ中継用の場合、直線性の劣化や利得の低下など動作特性のドリフトにより生ずる不良が多いことがわかる。

3.3 管球冷却方法と信頼性

送信管の伝導冷却は宇宙通信用として発展した方式で、図8の伝導冷却構成に示されるように陽極に熱伝導の良好な物体を結合して熱を取り出し、必要に応じてベリリア磁器などで電気的に絶縁したうえ、きょう体など表面積の大きい部分に熱を伝え、放射と自然対流により熱を放散する。この方式によって冷却扇(送風機)が不要になる。しかし当時放送用に使用された実例がなく、また伝導冷却送信管の信頼性がどの程度であるかというデータは、今日までほとんど公表されていない。今回の稼働実績調査により、強制空冷方式と伝導冷却方式の信頼性を比較してみた。表2に示されている同一用途の100W FM中継局用として使用された4F64Rと4F64(内部構造は全く同じで、陽極外圍構造のみ異なる)のワイブル解析は、図8に示すとおりである。図9(a)(b)は同じ4F64であるが、図9(a)は、管球とクランプ(銅材+Niめっき)間の接触不良のため熱抵抗が大きくなり、4F64の管球温度が異常に高くなり管球内の真空度劣化によるエミッション低下やガスイオン衝撃によるスパッタにより電極間容量が増大し、出力低下となったものである。図9(b)は、これらの対策を実施した後の稼働実績である。18,000時間における対策前の平均故障率 λ_{ip} は、4%/1,000時間(推定)に対し、対策後の λ_{ip} は0.75%/1,000時間まで低減し著しい対策効果が認められる。

特に対策前 $m=0.85$ で故障率減少形の寿命分布形状に対し、対策後は $m=1.3$ で故障率増加形となっている。4F64Rと4F64対策後(図9(b))とを比較すると、表4に示されるように4F64Rの λ_{ip} 0.25%/1,000時間に対し、4F64は λ_{ip} 0.75%/1,000時間で4F64のほうがやや高い。これは伝導冷却のほうが全

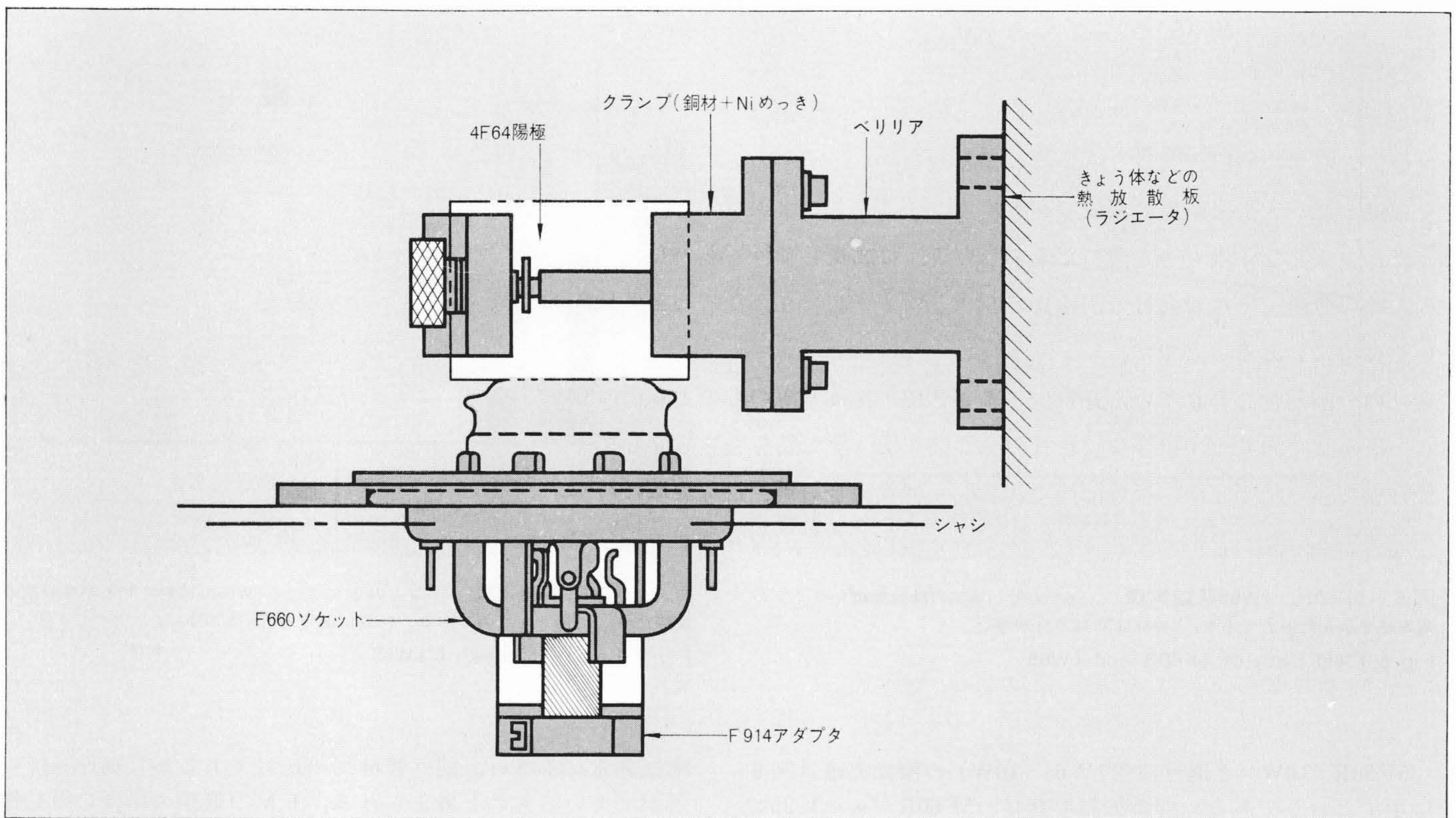


図8 4F64伝導冷却部の構成 4F64伝導冷却部の構成と熱放散について示したものである。

Fig.8 Composition of 4F64 Conduction Cooling Section

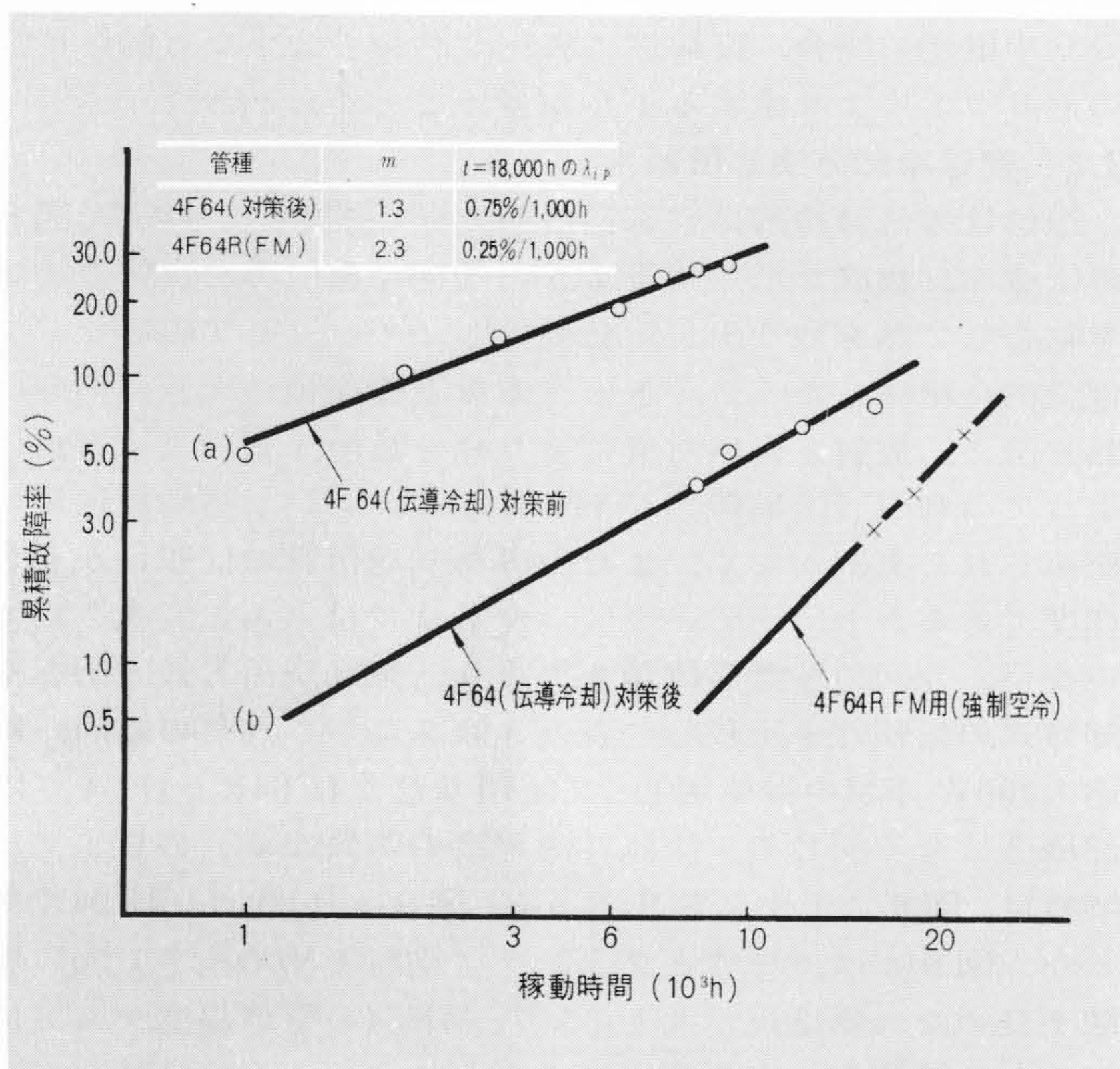


図9 4F64R(FM)と4F64冷却方式の比較 強制空冷と伝導冷却の比較を示したものである。強制空冷(4F64R)のほうが信頼度が高い。

Fig.9 Comparison of Cooling System between 4F64R(FM) and 4F64

一般的に管球温度が高いことおよび4F64Rの場合、カソード側も強制空冷しているためヒータ端子温度は 180°C 以下であるが、4F64の場合、 200°C 以上にも上昇しているものがある。このため管球内カソード温度が強制空冷の場合より高く、エミッション寿命による出力低下など寿命の信頼性が低くなっ

ていると推定される。しかしこの場合でも、4F15Rの平均故障率 $1.65\%/1,000$ 時間よりも小さく、また、4F64RのTV用と同程度で、伝導冷却方式も十分実用レベルにあるといえる。

4 結 言

テレビ中継用およびFM中継用に使われている送信管、進行波管の稼動実績データに統計的分析を加え、信頼度、保全性ならびにその問題点について明らかにした。これまでに得られた結論を要約すれば、

- (1) NHK計画補給時点における平均故障率は、送信管 $0.6\sim 0.7\%/1,000$ 時間できわめて小さい。進行波管も $0.54\%/1,000$ 時間で平均故障率は小さい。しかしながら進行波管は、故障率減少形であるため交換するとかえって初期不良がふえるなど、予防保全の効果を十分に発揮していないが、初期不良低減の対策を実施したのでその効果が期待される。
- (2) 4F15Rの信頼度改善のため開発された4F64Rは計画補給時間が2倍で、かつ平均故障率は $\frac{1}{2}\sim\frac{1}{3}$ となり、その効果を十分に発揮している。
- (3) FM中継用の平均故障率は $0.25\%/1,000$ 時間で、テレビ中継用の平均故障率の半分である。
- (4) 4F64(伝導冷却)の平均故障率は $0.75\%/1,000$ 時間で4F64Rよりやや高いが十分実用できる信頼性がある。

終わりにのぞみ、本調査に関し種々ご教示いただいたNHK保全部のかたがたに厚くお礼申し上げる。

参考文献

- (1) 島崎：品質管理，19，133（1968-11）
- (2) 日科技連編：信頼性データの解析，21（昭-45日科技連）
- (3) 市田嵩：信頼性・保全性工学，114（昭-45日本能率協会）