

衛星通信用進行波管の高性能化と
長寿命・高信頼化に関する研究

1995年2月

三田 長久

準ミリ波帯の衛星通信においてはその広帯域、高出力・高効率性能から広く進行波管(TWT: traveling wave tube)が使われている。このTWTでは高温に加熱されている熱陰極から電子ビームを取り出しており、この陰極の寿命がTWTの寿命を決定している。本論文では最も長寿命が得られる熱陰極として表面被覆含浸形陰極を選択し、この劣化要因を解明した。この結果、陰極温度と寿命の関係を定式化して寿命が最も長くなる最適陰極動作温度の存在を明らかにし、陰極電流密度と寿命の関係を明確にした。更に、これらの陰極劣化理論を応用して長寿命・高信頼度の衛星搭載用TWT、高性能な衛星地上局用TWTを実現した結果を述べた。

第1章ではTWTにおける陰極の位置付け、陰極劣化に関する従来の研究、本研究の目的と推移を述べた後、本論文の概要を述べている。

第2章では含浸形陰極の概略と長寿命陰極品種の選択について述べている。また、この品種選択等のため、含浸形陰極をTWTに組み込んだ場合と同条件で経済的に寿命試験ができる2極管の設計とその効果についても述べる。更に表面被覆含浸形陰極の劣化要因について検討し、表面被覆の劣化と含浸材の消耗の2種の劣化要因の存在を示す。

第3章では表面被覆含浸形陰極の寿命要因の一つである表面被覆の劣化について述べている。表面被覆中を陰極基板金属のタングステンが拡散することによって劣化するが、改良した境界条件を用いて拡散方程式を解いた結果、実測値と良い一致を得、この結果から表面被覆が劣化を開始する時間の温度依存性を求める。

第4章では含浸形陰極の主たる寿命要因である含浸材の消耗について述べている。劣化した陰極の断面分析結果から含浸材とタングステン基板の反応により遊離バリウムが生じることを示す。また、バリウム蒸発速度とバリウム表面被覆率の実測結果から含浸材の消耗は遊離バリウムがタングステン基板中の細孔を通過するKnudsen流により律速されており、表面バリウム濃度の低下に伴って仕事関数が増加し、温度制限電流が低下していくことを示す。更に温度制限電流の低下を精度よく測定できる物理量である、陰極電流が空間電荷制限電流の90%になる陰極温度 T_{90} の経時変化を実測する。この実測値は仕事関数の増加から導いた理論計算結果とよく一致し、 T_{90} の初期値からの変化量を時間に対して両対数図に示すと傾斜が約0.6の直線で近似できることを明らかにする。この直線を用いれば寿命推定が可能となり、これは含浸材の配合比や表面被覆が異なる

場合、陰極電流密度を変えた場合にも成り立つことを明らかにする。これらの結果から、陰極温度と寿命の関係を定式化し、寿命が最も長くなる最適動作温度の存在を明らかにする。

第5章では第3、4章の結果を用いて表面被覆含浸形陰極の2種の寿命要因を定量的に比較している。含浸材の消耗による寿命に対して求めた最適動作温度は使用する陰極電流密度に対して一義的に定まり、これから陰極電流密度と寿命の関係を求める。表面被覆の劣化はかなり高温でないと生ぜず、 42 A/cm^2 以下の電流密度で使用する場合には寿命は含浸材の消耗で決まることを明らかにする。

更に、陰極温度を最適値より高くした場合の寿命も求める。これは温度加速試験を行う場合に相当し、表面被覆の劣化による寿命より含浸材の劣化による寿命が短い領域において加速試験を行えば加速率の推定が容易となる。この範囲では、陰極電流密度 0.6 A/cm^2 の場合には最大の加速率が31倍になることを示す。また、実際の加速試験の結果は計算値とよく一致し、 T_{90} による寿命推定の有効性の検証も併せて行う。

第6章では陰極電流密度を低く設定して長寿命・高信頼度を達成した20 GHz帯衛星搭載用TWTの開発結果について述べ、更に、含浸形陰極劣化理論のTWT高信頼化への応用について述べている。最長寿命陰極品種の選択、陰極電流密度とビーム集束比の最適化、陰極の最適動作温度設定により長寿命化し、更に T_{90} の初期値および T_{90} の経時変化による選別を行って高信頼化する。また、加速試験による寿命分布の予測を行い、これら的高信頼化技術を用いて製造した通信衛星3号(CS-3)衛星搭載用TWTの衛星軌道上データによる信頼度の推定を行い、長寿命・高信頼性能の実証を行う。次に、このように高信頼化したTWTと固体電力増幅器との比較を行い、出力4 W以上ではTWTが有利であることを明らかにする。

第7章では衛星地上局用TWTの高性能化について述べている。まず、中程度の電流密度での設計として14 GHz帯の超低消費電力TWTについて述べる。多段コレクタの消費電力推定方法を提案し、それに基づいて従来の1/7という大幅な消費電力低減が可能となることを示す。また、電流密度を中程度(1.3 A/cm^2)にまで高め、ビーム集束比を小さくすることができたためビーム透過調整が容易となり、価格削減にも寄与している。次に高電流密度での設計として30 GHz帯出力100 Wというヘリックス形TWTの限界性能を達成した結果を述べる。系統的に許容できる50,000時間以上の寿命が得られる限界設計によりこのような高性能のTWTを実現することができた。

場合、陰極電流密度を変えた場合にも成り立つことを明らかにする。これらの結果から、陰極温度と寿命の関係を定式化し、寿命が最も長くなる最適動作温度の存在を明らかにする。

第5章では第3、4章の結果を用いて表面被覆含浸形陰極の2種の寿命要因を定量的に比較している。含浸材の消耗による寿命に対して求めた最適動作温度は使用する陰極電流密度に対して一義的に定まり、これから陰極電流密度と寿命の関係を求める。表面被覆の劣化はかなり高温でないと生ぜず、 42 A/cm^2 以下の電流密度で使用する場合には寿命は含浸材の消耗で決まることを明らかにする。

更に、陰極温度を最適値より高くした場合の寿命も求める。これは温度加速試験を行う場合に相当し、表面被覆の劣化による寿命より含浸材の劣化による寿命が短い領域において加速試験を行えば加速率の推定が容易となる。この範囲では、陰極電流密度 0.6 A/cm^2 の場合には最大の加速率が31倍になることを示す。また、実際の加速試験の結果は計算値とよく一致し、 T_{90} による寿命推定の有効性の検証も併せて行う。

第6章では陰極電流密度を低く設定して長寿命・高信頼度を達成した20 GHz帯衛星搭載用TWTの開発結果について述べ、更に、含浸形陰極劣化理論のTWT高信頼化への応用について述べている。最長寿命陰極品種の選択、陰極電流密度とビーム集束比の最適化、陰極の最適動作温度設定により長寿命化し、更に T_{90} の初期値および T_{90} の経時変化による選別を行って高信頼化する。また、加速試験による寿命分布の予測を行い、これらの高信頼化技術を用いて製造した通信衛星3号(CS-3)衛星搭載用TWTの衛星軌道上データによる信頼度の推定を行い、長寿命・高信頼性能の実証を行う。次に、このように高信頼化したTWTと固体電力増幅器との比較を行い、出力4 W以上ではTWTが有利であることを明らかにする。

第7章では衛星地上局用TWTの高性能化について述べている。まず、中程度の電流密度での設計として14 GHz帯の超低消費電力TWTについて述べる。多段コレクタの消費電力推定方法を提案し、それに基づいて従来の1/7という大幅な消費電力低減が可能となることを示す。また、電流密度を中程度(1.3 A/cm^2)にまで高め、ビーム集束比を小さくすることができたためビーム透過調整が容易となり、価格削減にも寄与している。次に高電流密度での設計として30 GHz帯出力100 Wというヘリックス形TWTの限界性能を達成した結果を述べる。系統的に許容できる50,000時間以上の寿命が得られる限界設計によりこのような高性能のTWTを実現することができた。

目 次

内容梗概	i
目次	iii
主要記号表	vii
第1章 序論	1
1. 1 研究の背景	1
1. 2 従来の研究	2
1. 3 本研究の目的と推移	3
1. 3. 1 表面被覆含浸形陰極の劣化要因の解明	3
1. 3. 2 陰極劣化理論を用いた高性能進行波管の実現	5
1. 4 論文の構成	7
第1章の参考文献	9
第2章 含浸形陰極の概要	11
2. 1 含浸形陰極の品種	11
2. 2 長寿命品種の選択	15
2. 2. 1 試験用2極管の設計	15
2. 2. 2 陰極品種の選択	19
2. 3 劣化要因分析	20
2. 3. 1 含浸形陰極の断面分析	20
2. 3. 2 表面分析	21
2. 4 まとめ	22
第2章の参考文献	23
第3章 表面被覆の劣化による寿命	25
3. 1 実験	25
3. 1. 1 実験装置	25
3. 1. 2 実験結果	28

3. 2	拡散理論	30
3. 3	拡散理論と実験の比較	32
3. 4	まとめ	35
	第3章の参考文献	35
第4章	含浸材の消耗による寿命	37
4. 1	実験方法	38
4. 1. 1	積算法による断面分析	38
4. 1. 2	バリウム蒸発速度とバリウム陰極表面濃度の測定	39
4. 1. 3	T_{90} の測定	40
4. 2	実験結果と考察	41
4. 2. 1	含浸材とタングステン基板の反応	41
4. 2. 2	バリウム蒸発速度と表面濃度	45
4. 2. 3	T_{90} の経時変化	48
4. 3	含浸材配合比の寿命への影響	50
4. 4	表面被覆含浸形陰極への適用と電流密度依存性	51
4. 5	まとめ	54
	第4章の参考文献	55
第5章	表面被覆含浸形陰極の寿命	57
5. 1	最適動作温度における寿命予測	57
5. 1. 1	表面被覆の劣化による寿命	57
5. 1. 2	陰極電流密度と最適動作温度の関係	58
5. 1. 3	最適動作温度と寿命の関係	59
5. 2	温度加速を行う場合の寿命推定	61
5. 3	加速試験による寿命推定の実証	62
5. 3. 1	試験方法	62
5. 3. 2	試験結果	63
5. 3. 3	理論と実験の比較・検討	64
5. 4	まとめ	66

第5章の参考文献	67
第6章 衛星搭載用進行波管の高性能化と高信頼化	68
6. 1 衛星搭載用進行波管の高性能化	69
6. 1. 1 通信衛星3号搭載用進行波管の設計	69
6. 1. 2 技術試験衛星6号搭載用進行波管の設計	70
(1) 陰極	71
(2) 集束磁石	71
(3) 遅波回路	71
6. 1. 3 次期通信衛星搭載用3段コレクタ進行波管	71
(1) 3段コレクタ	71
(2) 集束磁石と電子銃	71
(3) 進行波管の底板	72
6. 1. 4 進行波管の性能	72
6. 2 衛星搭載用進行波管の高信頼化とその実証	77
6. 2. 1 進行波管の信頼性設計	77
(1) 長寿命陰極品種の選択	77
(2) 陰極電流密度と集束比の最適化	77
(3) 陰極の最適動作温度設定	78
(4) 選別方法	78
6. 2. 2 加速試験による寿命分布の予測	79
6. 2. 3 衛星軌道上データによる信頼度の推定	81
6. 3 固体電力増幅器の開発と進行波管増幅器との比較	83
6. 3. 1 固体電力増幅器	83
6. 3. 2 進行波管増幅器と固体電力増幅器の比較	85
6. 4 まとめ	86
第6章の参考文献	87
第7章 衛星地上局用進行波管の高性能化	89
7. 1 Ku帯使用者宅設置局用超低消費電力進行波管	89

第5章の参考文献	67
第6章 衛星搭載用進行波管の高性能化と高信頼化	68
6.1 衛星搭載用進行波管の高性能化	69
6.1.1 通信衛星3号搭載用進行波管の設計	69
6.1.2 技術試験衛星6号搭載用進行波管の設計	70
(1) 陰極	71
(2) 集束磁石	71
(3) 遅波回路	71
6.1.3 次期通信衛星搭載用3段コレクタ進行波管	71
(1) 3段コレクタ	71
(2) 集束磁石と電子銃	71
(3) 進行波管の底板	72
6.1.4 進行波管の性能	72
6.2 衛星搭載用進行波管の高信頼化とその実証	77
6.2.1 進行波管の信頼性設計	77
(1) 長寿命陰極品種の選択	77
(2) 陰極電流密度と集束比の最適化	77
(3) 陰極の最適動作温度設定	78
(4) 選別方法	78
6.2.2 加速試験による寿命分布の予測	79
6.2.3 衛星軌道上データによる信頼度の推定	81
6.3 固体電力増幅器の開発と進行波管増幅器との比較	83
6.3.1 固体電力増幅器	83
6.3.2 進行波管増幅器と固体電力増幅器の比較	85
6.4 まとめ	86
第6章の参考文献	87
第7章 衛星地上局用進行波管の高性能化	89
7.1 Ku帯使用者宅設置局用超低消費電力進行波管	89

7. 1. 1	コレクタ消費電力の予測理論	90
(1)	飽和動作時のコレクタ消費電力	90
(2)	パルス動作時のコレクタ消費電力	93
7. 1. 2	進行波管の設計	96
(1)	コレクタ構造	96
(2)	管球構造	96
(3)	電子銃	97
7. 1. 3	進行波管の特性	97
7. 2	30 GHz帯100 W出力超広帯域ヘリックス形進行波管	102
7. 2. 1	進行波管の設計	103
(1)	遅波回路	104
(2)	入出力回路	105
(3)	電子銃	105
7. 2. 2	進行波管の特性	106
7. 3	まとめ	109
第7章の参考文献		110
第8章 結論		112
謝辞		117
関連論文リスト		118

7. 1. 1	コレクタ消費電力の予測理論	90
(1)	飽和動作時のコレクタ消費電力	90
(2)	パルス動作時のコレクタ消費電力	93
7. 1. 2	進行波管の設計	96
(1)	コレクタ構造	96
(2)	管球構造	96
(3)	電子銃	97
7. 1. 3	進行波管の特性	97
7. 2	30 GHz帯100 W出力超広帯域ヘリックス形進行波管	102
7. 2. 1	進行波管の設計	103
(1)	遅波回路	104
(2)	入出力回路	105
(3)	電子銃	105
7. 2. 2	進行波管の特性	106
7. 3	まとめ	109
	第7章の参考文献	110
	第8章 結論	112
	謝辞	117
	関連論文リスト	118

主要記号表

記号	説明	記号	説明
A_0	Dushman定数	p_1	偶発故障の比率
$A_1(T), A(T)$	ΔT_{90} 経時特性の温度依存性	p_2	磨耗故障の比率
a, b	$\ln A(T)$ の温度依存性定数	R	気体定数
C	表面被覆中のフック・ステン濃度	r	反応生成物中の細孔の半径
C_0	フック・ステン初期濃度	r_0	含浸材の半径
C_b	陰極表面のBa濃度	r_b	電子ビーム半径
C_1, C_2	使用済みビームの速度分布定数	r_c	陰極半径
D	表面被覆中のフック・ステン拡散係数	T	陰極温度
d	陰極表面被覆の厚さ	T_{opt}	最適陰極動作温度
E_{cath}	第3コレクタ電圧	T_x, T_{90}	陰極電流が空間電荷制限電流のx, 90%になる陰極温度
F	複合累積分布関数	T_{90c}	T_{90} の初期値
F_1	偶発故障の累積分布関数	t	経過時間
F_2	磨耗故障の累積分布関数	t_0	陰極寿命
F_b	Baの流出速度	t_{max}	最適動作温度での陰極寿命
J_k	陰極電流密度	v	陰極からのBa蒸発速度
J_{it}	温度制限電流密度	v_0	陰極からのBa蒸発速度の初期値
k	Boltzmann定数	X, X_i	(i段の)正規化コック電圧
l	含浸材消耗部分の長さ	Y, Y_i	(i段の)正規化累積コック電流
M	Baの原子量	α	Ba蒸発速度経時特性の定数
M_0	含浸材の分子量	β	ΔT_{90} 経時特性の傾斜、約0.6
m	Weibull分布の形状パラメータ	ΔT_{90}	T_{90} の初期値からの変化量
n	コレクタ段数	δ	零電位コック電極への流入割合
P	Baの蒸気圧	θ	Baの表面被覆率
P_C	コレクタ消費電力	ρ	含浸材の密度
P_{90}	陰極電流が初期値の90%になるヒータ電力	σ	陰極寿命の分散
P_{90c}	P_{90} の初期値	ψ	陰極表面の仕事関数

第1章 序論

1.1 研究の背景

日本は世界に先駆けてKa帯（衛星への上り回線30 GHz帯／衛星からの下り回線20 GHz帯）の衛星通信を実用化しており、通信衛星2号(CS-2)、通信衛星3号(CS-3)を打ち上げて商用に供してきた⁽¹⁾。更に、これらを発展させた次期通信衛星も1995年に打ち上げが予定されている。また、近年Ku帯（上り14 GHz帯／下り12 GHz帯）の増幅器を搭載した各種商用衛星が打ち上げられ、Ku帯の衛星通信の利用が爆発的に増加している⁽²⁾。

これらの周波数帯においてはその広帯域性、高出力・高効率性能から広く進行波管(TWT: traveling wave tube)が使われている。このTWTは図1-1に概略断面図を示すように、陰極から陽極により引き出した電子流を細い電子ビームに形成する電子銃、細い電子ビームの集束を維持するための磁石および高周波信号を電子ビームと相互作用させて増幅する遅波回路、使用済みの電子ビームを捕捉するコレクタの3部分から成る。本論文で取り扱う通信用のTWTでは遅波回路には製造が容易で広帯域の周波数特性が得られるヘリックスを用いている。陰極は常に高温に加熱されて熱電子放射により電子ビームを発生しているため、TWTの寿命は陰極の寿命により決定されている。

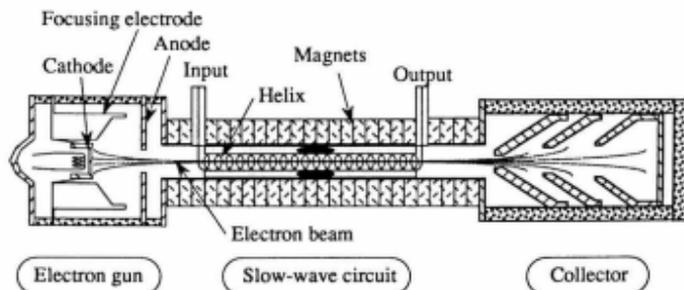


図1-1 進行波管の概略断面図。電子銃部、遅波回路部、コレクタ部から成る

現在このTWTをはじめとする電子管に使用されている熱陰極のほとんどは酸化物形と含浸形の2種類で占められている。酸化物形は日本電信電話株式会社(NTT)においてもマイクロ波中継用TWTのほとんどすべてに使用されており、 0.2 A/cm^2 以下の電流密度で使用すれば数万時間以上の寿命が得られる製造技術が確立している。一方、含浸形陰極は1953年にLeviにより発明されたものであり、その構造は多孔質タングステンにバリウム化合物を溶融合浸させたものである⁹⁾。酸化物陰極に比較して製造が難しく、また仕事関数が若干大きいため使用温度を 200°C 程度高くしなければならないという欠点を有するが、陰極表面に酸化物被覆のような抵抗性物質を有しないため高電流密度での使用に耐える。このため 0.5 A/cm^2 以上の電流密度を必要とする場合にはこの含浸形陰極が主として使われている。更に、1966年にはZalm等により白金族の金属を含浸形陰極の表面に被覆すると仕事関数が低下し、動作温度を低下させることができることが発見された¹⁰⁾。この高性能な表面被覆含浸形陰極の劣化機構を解明し、寿命性能を把握することができれば、TWTの寿命をシステム寿命以上にして摩耗による寿命を考慮する必要をなくしたり、システムとして許容できる範囲でのTWTの寿命設定を行って最大限の出力を得る等、TWTの高性能化に大きく寄与することができる。

1. 2 従来の研究

従来は陰極電流密度と寿命の関係が明確ではなかったため、TWTの設計は経験的に行われ、実現したTWTを寿命試験したり、実運用データにより寿命や信頼度を見積もるという方法が行われてきた^{11), 12), 13)}。また、TWTの使用周波数が高くなるにつれて細い電子ビームが要求されるようになり、電子ビーム集束比と陰極電流密度の最適化が非常に重要となっている。この最適化を行うためにも陰極電流密度と寿命の関係の把握が不可欠である。

陰極寿命を把握するため、寿命予測モデルの提案が行われてはいるが^{14), 15)}、これらは陰極表面の仕事関数の変化から陰極電流の変化を予測するものであり、陰極電流密度と寿命の関係を求めることができなかった。また、表面被覆含浸形陰極の表面被覆の劣化に関しては50,000時間程度まで動作させた陰極の表面分析が行われている¹⁶⁾のみで、寿命性能について明らかにされるには至っていなかった。

1. 3 本研究の目的と推移

前節で示した問題点を解決するため、本論文ではまず表面被覆含浸形陰極の劣化要因の解明を行い、次にその劣化理論を応用して高性能な通信用TWTを実現することを目的としている。

1. 3. 1 表面被覆含浸形陰極の劣化要因の解明

表面被覆含浸形陰極の劣化要因の解明に関する目的と検討事項および得られた結果についての関連を図1-2に示す。含浸形陰極には含浸材の配合比、表面被覆の有無等が異なる多数の品種があり、これらのうちから最も寿命が長い品種を選択する必要がある。経済的に寿命試験を実施するため、TWTに陰極を組み込んだ場合と同様の経時変化が得られる2極管を新たに開発して試験を行った。この結果、最も寿命が長い表面被覆含浸形陰極を選択した。更に、長時間動作させた表面被覆含浸形陰極の表面と断面の分析を行うことにより、含浸材の消耗と表面被覆の劣化という2種の寿命要因があることを明らかにした。

まず、表面被覆の劣化については、陰極表面のタングステン濃度の経時変化を温度4水準にて実測した。タングステン基板の表面被覆側の境界においてタングステンの濃度が常に1であるという適切な境界条件により理論と実験結果が良く一致し、その結果から表面被覆劣化の温度依存性を定量的に明らかにすることができた。

次に、含浸材の消耗については、長時間動作させた陰極を新しく開発した積算法により断面分析した結果から、BaO、CaO、Al₂O₃の混合物である含浸材からバリウム(Ba)とカルシウム(Ca)の一部が消耗することを見いだした。また、陰極からのBaの蒸発速度と陰極表面のBa濃度の経時変化を実測することによりBaの蒸発速度が時間の-1/2乗に比例して減少することならびに、Ba蒸発速度と表面Ba濃度の間に一定の関係がなりたつことを明らかにした。この結果から仕事関数と温度制限電流の経時変化を導出し、陰極電流が空間電荷制限電流の90%となる陰極温度 T_{90} の経時変化を導出することができた。一方、新しく開発した寿命試験用の2極管を用いて、陰極温度、電流密度等を変化させて T_{90} の経時変化を実測した。この実測結果は理論値と良く一致し、 T_{90} の経時変化により寿命を予測する方法を確立することができた。更に、陰極温度と寿命の関係を定式化し、寿命が最も長くなる最適動作温度の存在を明らかにした。

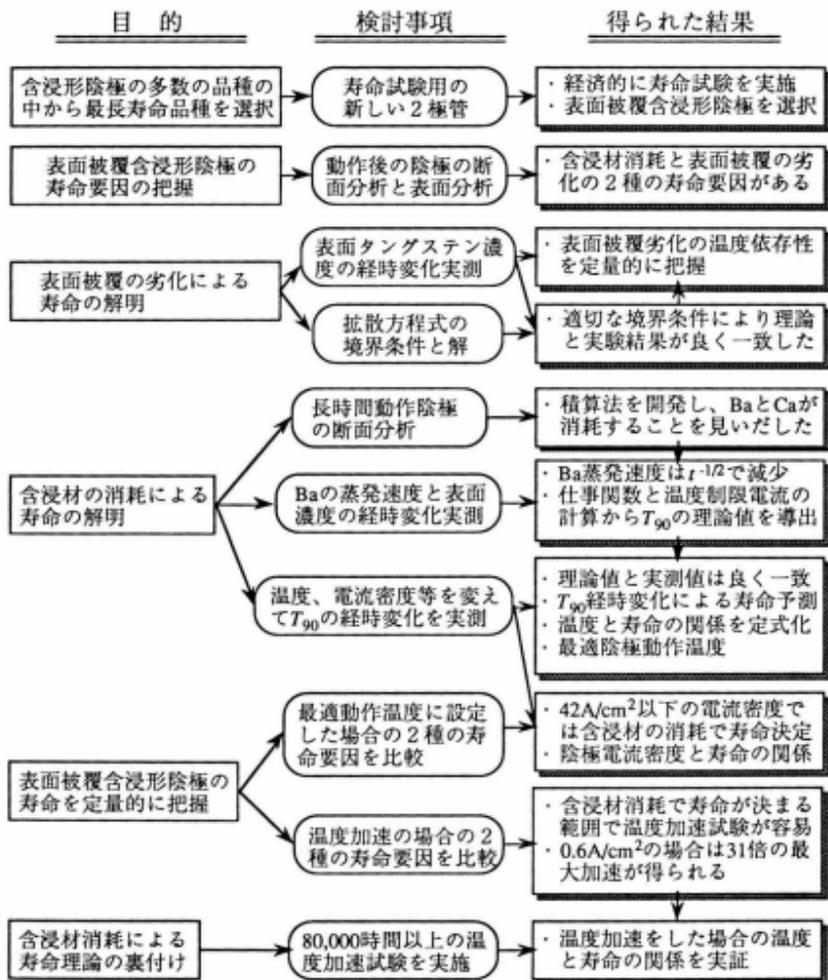


図1-2 表面被覆含浸形陰極の劣化要因解明の研究推移

表面被覆含浸形陰極の2種の寿命要因を最適動作温度に設定した場合において比較することにより、 42 A/cm^2 以下の電流密度では含浸材の消耗で寿命が決まることを明らかにした。また、TWTの設計に有用な陰極電流密度と寿命の関係を明らかにすることができた。

最適動作温度より陰極温度を高くして温度加速を行った場合の2種の寿命要因を比較することにより、含浸材の消耗で寿命が決まる範囲では温度加速試験が容易であり、 0.6 A/cm^2 の電流密度で使用する場合は $1100^\circ \text{ C}_b^{\text{th}}$ にて31倍の最大加速が得られることを明らかにした。更に、主たる寿命要因である含浸材の消耗による寿命理論の裏付けとして、80,000時間以上の温度加速試験を実施した。この結果、温度加速をした場合の温度と寿命の関係を実証することができた。

1. 3. 2 陰極劣化理論を用いた高性能進行波管の実現

表面被覆含浸形陰極の劣化理論を応用して高性能な通信用TWTを実現した。用いた陰極劣化理論の項目および検討・実施事項と実現したTWTの関係を図1-3に示す。まず、衛星搭載用としては、通信衛星3号(CS-3)、技術試験衛星6号(ETS-VI)、次期通信衛星(N-STAR)用の20 GHz帯TWTを順次開発した。陰極電流密度と寿命の関係をを用いて、低電流密度 0.6 A/cm^2 にて長寿命化をはかると共に陰極電流密度とビーム集束比の最適化を行って高信頼化している。また、 T_{90} の経時変化による寿命予測方法と、定式化した温度と寿命の関係をを用いて長寿命陰極品種の選択を行うと共に短寿命品を取り除く選別を行い、長寿命化した。更に、寿命が最も長くなる最適陰極動作温度に設定することによっても長寿命化をはかった。明確化した温度加速条件と加速率を用いた加速寿命試験により寿命分布を予測し、CS-3の衛星軌道上での6年間にわたる実運用データと併せて解析することにより7~10年間の故障率1000 fit以下という高信頼性能を実証することができた。

地上局用としては14 GHz帯40 W出力の使用者宅設置局用の超低消費電力TWTを開発した。陰極電流密度と寿命の関係から、地上局用として十分な寿命が得られる 1.3 A/cm^2 程度の電流密度に設定することによりビーム集束比を下げることができた。これにより、ビーム透過調整が簡単化され、経済化することができた。この場合も最適

th 本論文で使用している温度の単位 ($^\circ \text{ C}_b$) は光高温計で650 nmの光学フィルターを通して測定した輝度温度の値である。

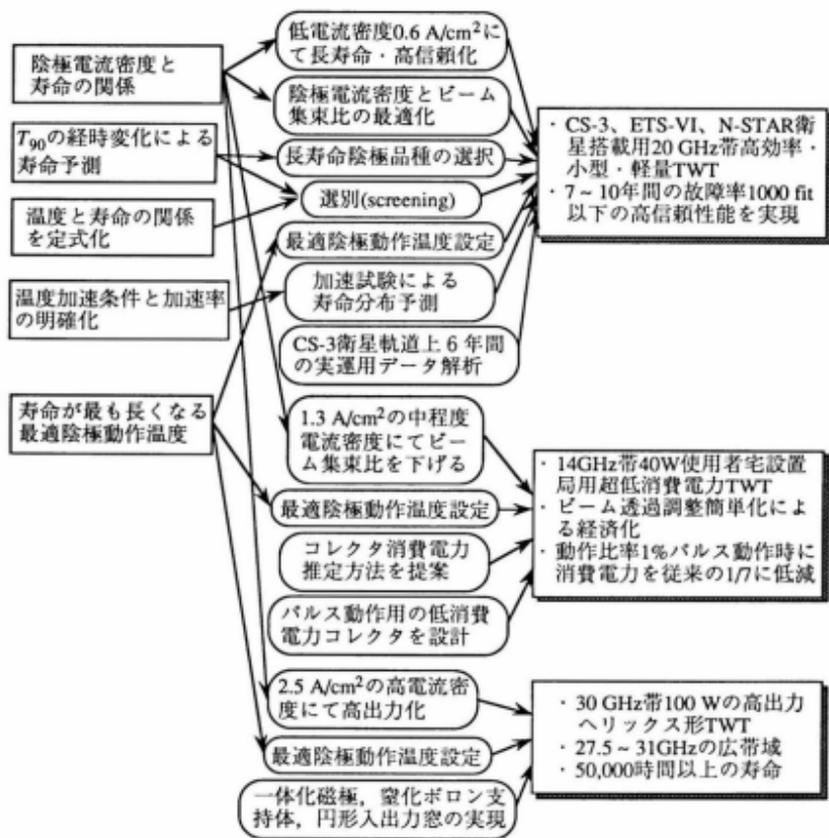
劣化理論の項目検討・実施事項実現したTWT

図1-3 表面被覆含浸形陰極劣化理論を用いた高性能進行波管の実現

陰極動作温度設定を行うことにより100,000時間以上の十分な寿命が推定できる。また、多段コレクタのコレクタ消費電力推定方法を提案し、これに基づいて高周波信号のパルス動作にて使用する場合に適した低消費電力コレクタを開発した。この結果、動作比率1%のパルス動作時に消費電力を従来の1/7に低減することができた。

もう一種の地上局用として30 GHz帯100 W出力のヘリックス形TWTを開発した。この性能は、広帯域が得られるヘリックス形TWTでは高周波、高出力の限界であり、2.5 A/cm²の高い陰極電流密度に設定した。このような高電流密度においても最適陰極動作温度設定により50,000時間以上の寿命が推定されている。また、一体化磁極、窒化ボロンヘリックス支持体、円形入出力窓等を新しく開発することにより27.5~31 GHzのKa帯衛星上り回線全周波数帯域で100 W以上の出力が得られるという広帯域・高出力性能を実現することができた。

1. 4 論文の構成

本論文の構成は本章序論を含めて8章から成る。各章の関連を図1-4に示し、各章の概要を述べる。

第2章では含浸形陰極の開発の経緯と長寿命陰極品種の選択について述べる。また、この品種選択等のため、含浸形陰極をTWTに組み込んだ場合と同条件で経済的に寿命試験ができる2極管の設計とその効果についても述べる。更に表面被覆含浸形陰極の劣化要因について検討し、表面被覆の劣化と含浸材の消耗の2種の劣化要因の存在を示す。

第3章では表面被覆含浸形陰極の寿命要因の一つである表面被覆の劣化について述べる。表面被覆中を基板のタングステンが拡散することによって劣化するが、改良した境界条件を用いて拡散方程式を解いた結果、実測値と良い一致を得た。この結果から表面被覆が劣化を開始する時間の温度依存性を求める。

第4章では含浸形陰極の主たる寿命要因である含浸材の消耗について述べる。劣化した陰極の断面分析結果から含浸材とタングステン基板の反応により遊離Baが生じ、含浸材の消耗は遊離Baがタングステン基板中の細孔を通過する際に平均自由行程より小さい半径を有する筒中の流れであるKnudsen流により律速されていることを示す。また、Ba蒸発速度とBa表面被覆率の実測結果から、表面Ba濃度の減少に伴って仕事関数が増

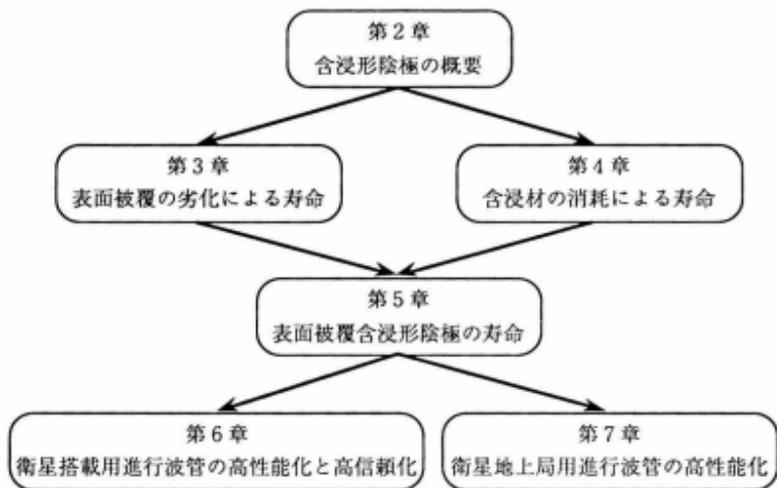


図1-4 本論文の構成

加し、温度制限電流が低下していくことを示す。更に、温度制限電流の低下を精度よく測定できる物理量である、陰極電流が空間電荷制限電流の90%になる陰極温度 T_{90} の経時変化を実測する。この実測値は仕事関数の増加から導いた理論計算結果とよく一致し、 T_{90} の初期値からの変化量を時間に対して両対数図に示すと傾斜が約0.6の直線で近似できることを明らかにする。この直線を用いれば寿命推定が可能となり、これは含浸材の配合比や表面被覆が異なる場合、陰極電流密度を変えた場合にも成り立つことを明らかにする。これらの結果から、陰極温度と寿命の関係を定式化し、寿命が最も長くなる最適動作温度の存在を明らかにする。

第5章では第3、4章の結果を用いて表面被覆含浸形陰極の2種の寿命要因を定量的に比較する。含浸材の消耗による寿命に対して求めた最適動作温度は使用する陰極電流密度に対して一義的に定まり、これから陰極電流密度と寿命の関係を求める。表面被覆の劣化はかなり高温でないと顕著にはならず、 42 A/cm^2 以下の電流密度で使用する場合には寿命は含浸材の消耗で決まることを明らかにする。

更に、陰極温度を最適値より高くした場合の寿命も求める。これは温度加速試験を行

う場合に相当し、陰極電流密度 0.6 A/cm^2 の場合、表面被覆の劣化による寿命より含浸材の劣化による寿命が短い領域において最大加速が得られるのは 1100°C_0 であり、その場合に加速率は31倍になることを示す。また、加速試験の結果は計算値とよく一致し、 T_{90} による寿命推定の有効性の検証も併せて行う。

第6章では陰極電流密度を低く設定して長寿命・高信頼度を達成した20 GHz帯衛星搭載用TWTの開発結果について述べ、更に、含浸形陰極劣化理論のTWT高信頼化への応用について述べる。最長寿命陰極品種の選択、陰極電流密度とビーム集束比の最適化、陰極の最適動作温度設定により長寿命化し、更に T_{90} の初期値および T_{90} の経時変化による選別を行って高信頼化する。また、加速試験による寿命分布の予測を行い、これらの高信頼化技術を用いて製造したCS-3衛星搭載用TWTの衛星軌道上データによる信頼度の推定を行い、長寿命・高信頼性能の実証を行う。次に、このように高信頼化したTWTと固体電力増幅器との比較を行い、出力4 W以上ではTWTが有利であることを明らかにする。

第7章では地上局用TWTの高性能化について述べる。まず、中程度の電流密度での設計として14 GHz帯の超低消費電力TWTについて述べる。多段コレクタの消費電力推定方法を提案し、それに基づいて従来の1/7という大幅な低消費電力化ができることを示す。また、電流密度を中程度(1.3 A/cm^2)にまで高め、ビーム集束比を小さくすることができたためビーム透過調整が容易となり、価格削減にも寄与している。次に高電流密度での設計として30 GHz帯出力100 Wというヘリックス形TWTの限界性能を達成した結果を述べる。システムの許容できる50,000時間以上の寿命が得られる限界設計によりこのような高性能のTWTを実現することができた。

最後に第8章では本論文で得られた成果をまとめて述べる。

第1章の参考文献

- (1) 宮内一洋: "国内衛星通信方式の研究実用化," 電気通信研究所研究実用化報告, Vol. 29, No. 4, pp. 531-539, 1980.

- (2) T. Otsu, M. Umehira, M. Onuki and H. Nakashima: "An advanced satellite communication system for ISDN subscriber and trunk applications -DYANET II-," in *Proc. 14th AIAA International Communications Satellite Systems Conference*, 92-1826-CP, pp. 175-184, 1992.
- (3) R. Levi: "New dispenser type thermionic cathode," *J. A. P.*, Vol. 24, pp. 233-233, 1953.
- (4) P. Zalm and A. J. A. van Stratum: "Osmium dispenser cathodes," *Philips Tech. Rev.*, Vol. 27, No. 3/4, pp. 69-75, 1966.
- (5) R. Strauss and J. R. Owens: "Past and present INTELSAT TWTA life performance," *J. Spacecraft*, Vol. 18, No. 6, pp. 491-498, 1981.
- (6) E. Illokken: "TWT reliability in space," in *Proc. 1986 International Electron Devices Meeting*, pp. 690-692, 1986.
- (7) R. Forman and D. H. Smith: "Thermionic cathode life-test studies," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-26, No. 10, pp. 1567-1572, 1979.
- (8) R. T. Longo, E. A. Adler and L. R. Falce: "Dispenser cathode life prediction model," in *Proc. 1984 International Electron Devices Meeting*, pp. 318-321, 1984.
- (9) A. M. Shroff and G. Firmain: "Long-life travelling-wave tubes. Use of "M" type cathode. Life prediction model," in *Proc. 1985 International Electron Devices Meeting*, pp. 346-349, 1985.
- (10) L. R. Falce: "Dispenser cathodes: the current state of the technology," in *Proc. 1983 International Electron Devices Meeting*, pp. 448-451, 1983.

第2章 含浸形陰極の概要

現在進行波管 (TWT: traveling wave tube)をはじめとする電子管に使用されている熱陰極のほとんどは酸化物形と含浸形の2種類で占められている。酸化物形は日本電信電話株式会社 (NTT)においてもマイクロ波中継用TWTのほとんどすべてに使用されており、 0.2 A/cm^2 以下の電流密度で使用すれば数万時間以上の寿命が得られる製造技術が確立している。一方、含浸形陰極は1953年にLeviにより発明されたものであり、その構造は多孔質タングステンにバリウム(Ba)化合物を溶融含浸させたものである^{1), 2)}。酸化物陰極に比較して製造が難しく、また仕事関数が若干大きいため使用温度を 200°C 程度高くしなければならないという欠点を有するが、陰極表面に酸化物被覆のような抵抗性物質を有しないため高電流密度での使用に耐える。このため 0.5 A/cm^2 以上の電流密度を必要とする場合にはこの含浸形陰極が使われている。

1966年にはZalm等により白金族の金属を含浸形陰極の表面に被覆すると仕事関数が低下することが発見された³⁾。この表面被覆含浸形陰極の性能を最大限引き出すためには陰極電流密度と寿命の関係を定量的に明らかにしてTWTの性能目標を的確に設定する必要がある。また、その結果を用いれば、第6章と第7章で詳細に述べるように、多彩な衛星通信用TWTの実現が可能となる。このように、陰極電流密度と寿命の関係は高性能なTWTの実用化にとって重要な意味を持っている。

本章ではこの含浸形陰極の動作機構と劣化要因に関する検討結果を述べる。2. 1節では動作機構の概略と含浸形陰極の品種について説明する。2. 2節ではTWTに陰極を組み込んだ場合と同様の経時変化が得られる2極管の設計とその効果について述べ、更にそれを用いて最も長寿命が得られる表面被覆含浸形陰極を選択した結果について述べる。2. 3節ではこの表面被覆含浸形陰極の劣化機構について検討し、2種の寿命要因が存在することを明らかにする。

2. 1 含浸形陰極の品種

含浸形陰極の代表的な構造を図2-1に示す。基板となる多孔質タングステンは20%

程度の空孔率を有し、その空孔部にBa化合物の含浸材(impregnant)を熔融含浸させてある。この陰極基板のヒータ側はそこから蒸発するBaによりヒータ周辺の絶縁が低下することを防ぐため、ろう材あるいはモリブデンの板等で遮蔽されている。

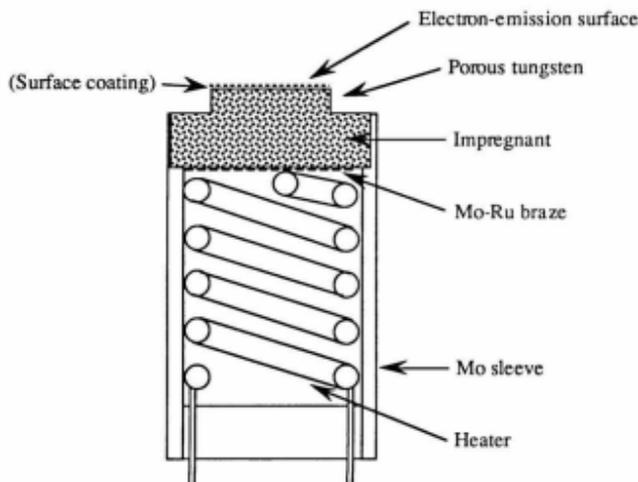


図2-1 含浸形陰極の代表的な構造図

基板の多孔質タングステンは粉末冶金で作られ、粉末の粒度、プレス圧力、焼結温度、時間により空孔率が制御される。このタングステン基板を機械加工するために銅やプラスチックを保護材として充填する。タングステン基板とモリブデンの袴(sleeve)はBa化合物を含浸する際に融けないMo-Ruろうのような2000°C程度の高融点ろうを用いてろう付けする。その後陰極を最終的な形状に加工した後、真空中で加熱することにより保護材を取り去る。含浸材は $BaCO_3 \cdot CaCO_3 \cdot Al_2O_3$ を所定のモル比で混合、焼成して BaO 、 CaO 、 Al_2O_3 の混合物にした後、タングステン基板に熔融含浸する。

このような工程を経るため、含浸材はタングステンとの反応が適度で、融点が低くかつ空気中で安定なものが望ましい。この条件を満たす含浸材として最初 BaO と Al_2O_3 の混合物が発見された¹⁾。この混合物の二元相図を図2-2に示す²⁾。 BaO と Al_2O_3 のモル比

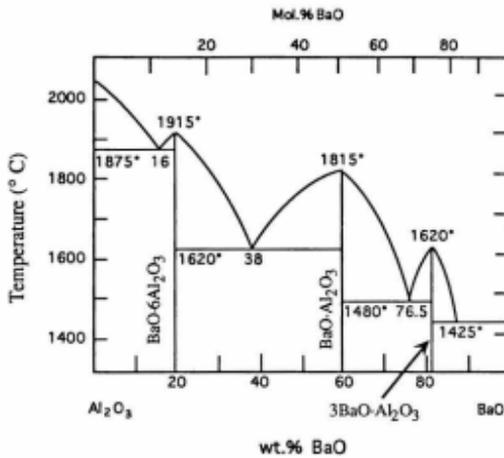


図 2-2 Al_2O_3 と BaO の2元相図⁽⁴⁾

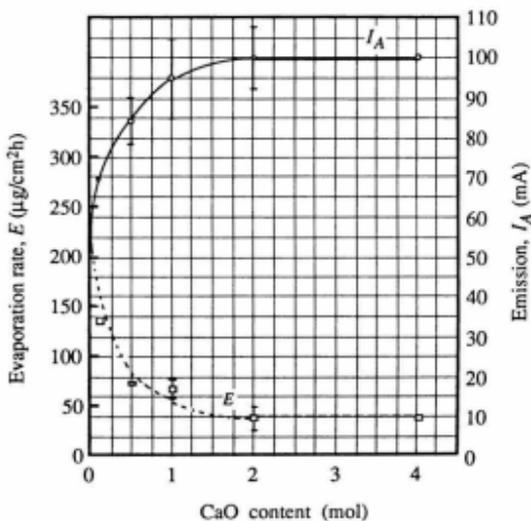


図 2-3 Ba蒸発速度(E)と電子放射(I_A)のCaO配合比依存性⁽⁵⁾

率が4対1あるいは5対2付近で融点が低くなっている。次に、この2種にCaOを加えた3元化合物が良好な特性を示すことが発見された⁽²⁾。4BaO・Al₂O₃にCaOを加えていった含浸材を使用した含浸形陰極からの電子放射とBa蒸発速度のCaOモル比との関係を図2-3に示す⁽³⁾。この図に示すようにCaOを少量加えることによりBa蒸発速度が大幅に減り、電子放射は2倍に向上している。このような経過から現在含浸材はBaO・CaO・Al₂O₃のモル比率が5:3:2、4:1:1のものが主として使用されている。CaOを含まない含浸材を用いた陰極をA形と呼び、含浸材 5BaO・3CaO・2Al₂O₃を用いたものをB形と呼んでいる。含浸材 4BaO・1CaO・1Al₂O₃を用いた陰極は米国のSemicon社から発表されたためS形と呼ばれている。

図2-4には多孔質タングステン基板の空孔率(porosity)を変えた場合に含浸形陰極からのBa蒸発速度がどのように変化するかを示している⁽³⁾。空孔率を増した場合含浸材の含有量はそれに比例して増すが、蒸発速度はそれより大きい比率で増すため、含浸材の消耗割合は大きくなる。またこのようにタングステン基板の空孔率を増しても電子放射はほとんど変化しない⁽³⁾。従って、空孔率は小さい方が良いことがわかる。しかしあまり小さくするとタングステン基板中の空孔の連結性が悪くなるため含浸材の含浸が困難となる。これらのことからタングステン基板の空孔率は18~20%が最適であることが判明している。

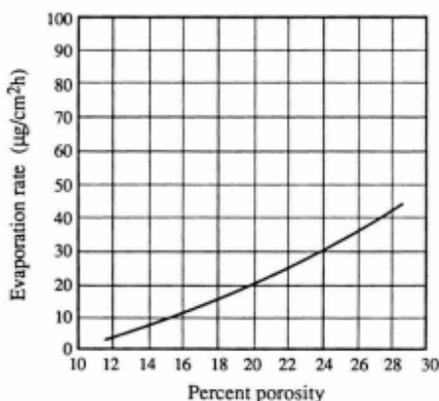


図2-4 タングステン基板の空孔率とバリウム蒸発速度の関係⁽³⁾

B形やS形の含浸形陰極は酸化物陰極に比べて動作温度が200°C程度高いという欠点があるため、この温度を低下させるための各種の試みがなされている。最初にZalm等がイリジウム(Ir)、オスミウム(Os)等の金属膜を含浸形陰極の表面に被覆すると、その仕事関数が0.2 eV程度低下し、温度が一定ならば電子放射が数倍となり、電子放射を一定とすれば動作温度を100°C程度下げうることを発見した⁹¹⁾。OsやIrは白金族であるが、白金(Pt)を被覆した場合は逆に仕事関数は増加することが判明しており⁹²⁾、OsやIrの表面被覆を施した含浸形陰極はMagicの頭文字からとってM形と呼ばれている。この表面被覆による電子放射増加の機構に関して、部分的にOsを被覆した場合は被覆した部分と被覆しない部分の境界部で特に仕事関数が低くなることが報告されており⁹¹⁾、XPS(X-ray Photo Spectroscopy)による分析結果からBa₃OsO₆が表面に生成されており、そのため陰極表面でのBa原子の存在確率が高くなって仕事関数が低下するとの報告もある⁹³⁾。

Osをスパッタリングにより0.5 μm被覆し、1050°C_g⁹⁴⁾で数千時間連続動作させたものは、Osがタングステン基板との化合物OsW₂になってしまい仕事関数低減の効果がなくなるという報告があり⁹⁵⁾、更にOsは酸化されやすく、酸化物のOsO₄は毒性を有するという欠点がある。この欠点を除去するため、Os-Ir合金あるいはOs-Ru合金を被覆することが発明された¹⁰⁰⁾。これらの合金は安定で酸化され難く、陰極表面被覆としての寿命も長いとされている。現在では最も仕事関数低減の効果が大きいOs-Ru合金を被覆したものが実用化されている。本論文ではS形(B形)含浸陰極にこのOs-Ru合金を被覆したものを研究対象として取り上げ、MS形(MB形)と呼んでいる。

2. 2 長寿命品種の選択

2. 2. 1 試験用2極管の設計

陰極寿命を試験する場合には経済性の点から2極管が主として用いられてきた。このとき、電源設備を安価にするためには陽極駆動電圧を500 V程度以下にする必要があり、陰極電流密度1 A/cm²付近で動作させるとすれば陰極・陽極間距離は2 mm程度となる。このような試験用2極管を用いると含浸形陰極の陰極電流は実際に含浸形陰極をTWT

⁹¹⁾ 本論文で使用している温度の単位(°C_g)は光高温計で650 nmの光学フィルターを通して測定した輝度温度の値である。

に組み込んだ場合と経時特性が異なるとされている⁽¹¹⁾。2極管においてTWTに組み込んだ場合と異なる経時変化を示すのは、陰極から蒸発したBa原子が近接した陽極からはね返るためであるという報告があり⁽¹²⁾、含浸形陰極の寿命試験のためTWTのヘリックス部の代わりに直管を取り付けた構造の試験用管球も作られている^{(13), (14)}。しかしこのような構造の管球を用いたのでは、管球と電源の製造に多額の費用がかかるため、Ba原子がはね返らない構造の2極管を新たに設計してこれらの影響を除去した^{(15), (16)}。

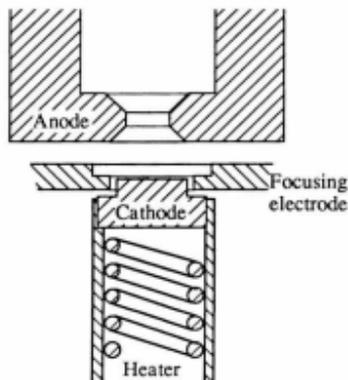


図 2-5 新しい陰極試験用2極管の断面図

陰極寸法は実際のTWTの設計寸法を考慮して直径3 mmとし、陰極電流密度が 0.6 A/cm^2 となるように設計した。なお、陰極表面はTWTに用いられるPierce電子銃においては凹面となるが、この試験用2極管では分析に便利なように平面とした。陽極電圧500 V程度で陰極電流密度 0.6 A/cm^2 が得られるようにするには、陰極・陽極間距離を2 mmとする必要がある。Baが陽極からはね返らないようにするためには陽極に陰極の直径より大きい穴をあければよいが、それでは陰極・陽極間距離と陽極孔径がほぼ等しくなり陰極電流密度が均一にならない、そこで図2-5に示すように、陽極孔径は陰極径よりも小さくして、その陰極側をすりばち状にしてBaのはね返りを防ぐことにした。陰極

と同電位の集束電極(focusing electrode)と陽極孔の形状を微調整しながら電子軌道計算を繰り返し、陰極電流密度分布が均一になるようにした。この最終的に得られた試験用2極管の陰極電流密度分布を図2-6に示す。設計値 0.6 A/cm^2 に対し $\pm 3\%$ 以内ではほぼ均一な陰極電流密度分布が得られている。

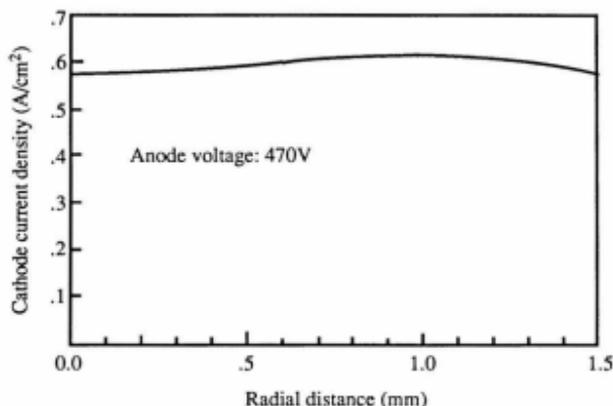


図2-6 新しい2極管の陰極電流密度分布の計算値

陰極の劣化に敏感な物理量は温度制限領域の陰極電流であり、これにかわる測定に便利な量として陰極電流が空間電荷制限電流の90%に低下する陰極温度 T_{90} がある。動作温度を 1100°C_B としてS形陰極を改良型2極管、従来の平板陽極を持つ2極管に組み込んで連続動作した場合の T_{90} の初期値からの変化 ΔT_{90} の経時変化を図2-7に示す。従来の平板陽極を持つ2極管に組み込んだ陰極は2000時間程度で ΔT_{90} の増加傾向が飽和しており、これは陰極から蒸発したBa原子が近接した陽極からはね返るためであると考えられる。一方、改良型2極管に組み込んだ陰極はほぼ直線的な ΔT_{90} の増加傾向を示している。図2-8には改良型2極管とTWTに含浸形陰極を組み込んで 1050°C_B にて連続動作させた場合の ΔT_{90} の経時変化を示す。両者はほぼ同様に直線的な増加傾向を示し、改良型2極管の含浸形陰極寿命試験における有効性を確認することができた。

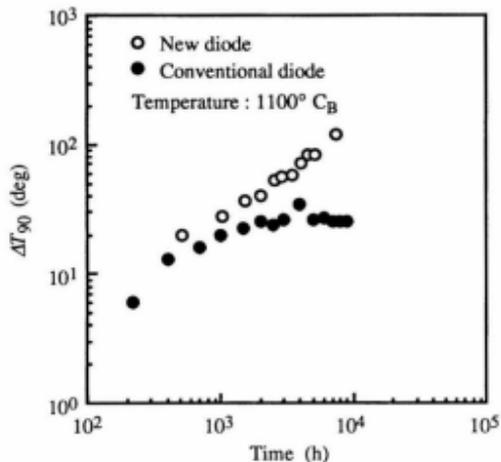


図 2-7 ΔT_{90} の経時変化, 改良型2極管と従来構造の平板陽極を持つ2極管に組み込んだ場合の違い

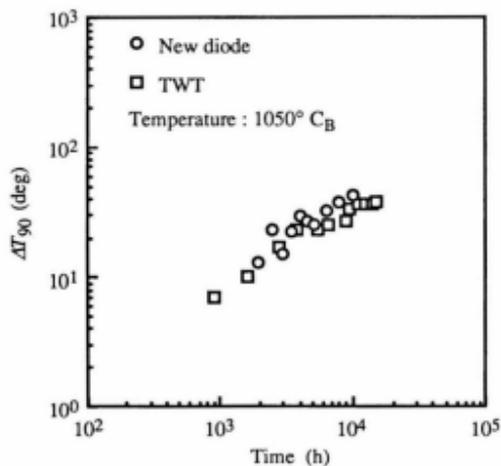


図 2-8 ΔT_{90} の経時変化, 改良型2極管とTWTに組み込んだ場合の比較

2. 2. 2 陰極品種の選択

前節で示したように含浸形陰極には多数の品種が存在するが、その中から衛星搭載用TWTの陰極製造に実績のある2社の製造業者から各2品種の合計4品種を比較対象として取り上げた。この4種類の内容を表2-1に示す。ここでタングステン基板の空孔率は各製造業者で主として製造しているものを採用したため若干異なっている。

表2-1 寿命を比較した陰極の品種

品種	MS	S	MB	B
製造業者	A社		B社	
含浸材配合比	4BaO · CaO · Al ₂ O ₃		5BaO · 3CaO · 2Al ₂ O ₃	
タングステン基板空孔率	18%		20%	
Os-Ru被覆	有	無	有	無

第4章において述べるように、これらの4品種の寿命試験を行い、その結果をまとめて考察した結果、陰極寿命は T_{90} の初期値である T_{90i} で決定されることがわかった。表2-2には T_{90i} の測定結果と実効仕事関数の測定結果を、各品種6本の平均値として示した。ここで実効仕事関数とは零電界飽和電流を求めて、Richardsonの式(4-9)においてDushman定数を理論値の $120 \text{ (A/cm}^2 \text{K}^2)$ と仮定した場合の仕事関数である。表面被覆があるMS形とMB形では被覆がないS形とB形に比べて仕事関数が $0.1 \sim 0.2 \text{ eV}$ 小さくなっており、この結果 T_{90i} が 100°C_B 程度低くなっている。表2-2からMS形が最も T_{90i} が低く、寿命が最も長いと考えられるので採用することとした。本論文ではこれ以降、単に表面被覆含浸形陰極と呼ぶ場合にはこのMS形を指すものとする。

表2-2 陰極品種間の比較

品種	MS	S	MB	B
T_{90i}	810°C_B	910°C_B	820°C_B	930°C_B
実効仕事関数	2.0 eV	2.1 eV	2.0 eV	2.2 eV

2. 3 劣化要因分析

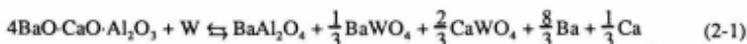
含浸形陰極は基板のタングステンと含浸してあるBa化合物が反応して遊離Baが生成され、これが陰極表面に吸着して表面の仕事関数を低下させていると考えられている。そこで、実際に使用した陰極の断面と表面の元素を分析して劣化要因の検討を行った。

2. 3. 1 含浸形陰極の断面分析

タングステン基板に熔融含浸させた含浸材中のBaが消耗すると表面の仕事関数が増加し、電子放射が低下すると考えられる。そこで、陰極断面における含浸材の消耗状況をEPMA(Electron Probe Micro Analysis)により測定した。含浸形陰極では、分析対象である含浸材が散在しており、その分布密度も低いため、通常行われているような線分析では、陰極断面における軸方向の含浸材構成元素 (Ba, Ca, Al) の濃度変化を把握することができない。そこで、電子ビームを半径方向に走査したときの特性X線強度を積算することにより、平均的な濃度を求める方法 (積算法)⁽¹⁶⁾を用いた。

図2-9は、1050°C_gにて29,000時間動作させたS形陰極断面におけるBa, Ca, Alの濃度分布を積算法により測定した結果を示したものである。Alの濃度分布がほぼ一定であるのに対し、Ba, Caは表面から100 μm付近まで濃度が減少していることから、含浸材とタングステンの反応では、遊離Baと共に遊離Caも生成されると考えられる。

Shroff等の報告⁽¹⁷⁾に基づく、含浸材とタングステン基板の反応は例えば次式で示すことができる。



この反応は、遊離Ba, Caが生じ、Alは消耗せず、積算法による測定結果と一致する。このように含浸形陰極では含浸材が基板のタングステンと反応し、一部は遊離Ba, Caとなって流出し、残部は利用不可能な反応生成物となることにより劣化していくという機構を考えることが最も合理的である。本論文では、この劣化要因を含浸材の消耗と呼ぶ。

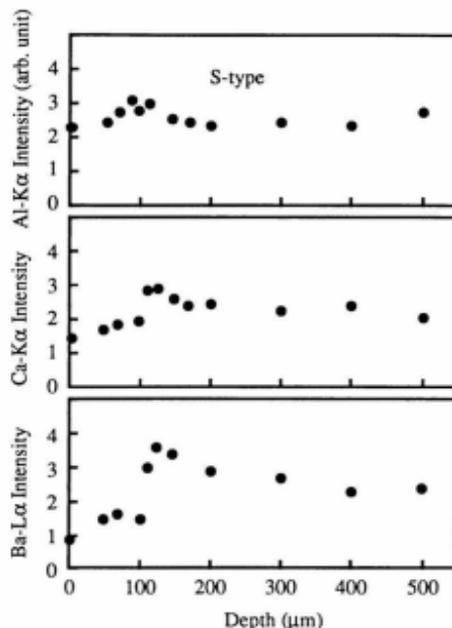


図 2-9 積算法による含浸形陰極の断面分析結果

2. 3. 2 表面分析

表面被覆含浸形陰極を数万時間連続動作させた後にその表面の元素分析を行うと、基板のタングステンが大きな割合で検出される⁽¹⁸⁾。これは、拡散により基板のタングステンが表面に到達したものと考えられる⁽¹⁹⁾。この表面被覆中のタングステンの拡散については第3章で詳細に論じるので、ここでは測定結果の一部を示す。

図 2-10 には陰極温度1140°C₉にて連続動作した場合の陰極表面元素の経時変化を示す。ここでは表面被覆金属であるOs、ルテニウム(Ru)と基板金属のタングステン(W)のみに着目し、この3元素の比率合計を100%として示している。この図に示すように、表面被覆含浸形陰極を使用すると、基板のタングステンが表面に拡散してくるため、最終的には表面被覆の効果がなくなってしまう。表面被覆の効果がなくなった場合は、

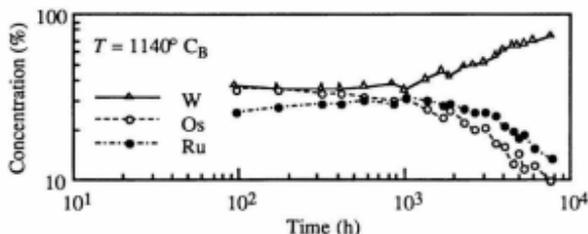


図 2-10 陰極温度1140°C_Bの場合の陰極表面元素比率の経時変化。
W、Os、Ruの比率合計を100%とする

MS形 (MB形) がS形 (B形) に変化することになり、表2-2から T_{90} は100°C_B程度高くなってしまふと考えられる。通常、 T_{90} と陰極動作温度の差は100°C_B程度であるため、この表面被覆の劣化により陰極電流が10%程度低下し、寿命終了となる。

2.4 まとめ

含浸形陰極の開発の経緯と長寿命品種の選択、寿命要因の検討結果について述べた。製造が容易で、Ba等の蒸発速度が低く、電子放射が良好な含浸材や陰極基板の材料が検討されてきた。これら多数の品種の中から宇宙での使用実績がある4品種を取り上げて長寿命品種の選択を行った。この結果選んだ陰極は含浸材が4BaO·CaO·Al₂O₃であり、基板の多孔質タングステンの空孔率は18%、陰極表面にはOs-Ru合金を被覆した表面被覆含浸形陰極 (MS形) である。この陰極寿命を比較検討するにあたっては陽極にすりばち状の穴を設けた新しい2極管を考案し、TWTに陰極を組み込んだ場合と同様の経時変化を経済的に測定できるようにした。

また、表面被覆含浸形陰極の寿命要因の検討結果から、表面被覆含浸形陰極には「含浸材の消耗」と「表面被覆の劣化」という2種の寿命要因があることを明らかにした。

- (1) R. Levi: "New dispenser type thermionic cathode," *J. A. P.*, Vol. 24, pp. 233-233, 1953.
- (2) R. Levi: "Improved impregnated cathode," *J. A. P.*, Vol. 26, No. 5, pp. 639-639, 1955.
- (3) P. Zalm and A. J. A. van Stratum: "Osmium dispenser cathodes," *Philips Tech. Rev.*, Vol. 27, No. 3/4, pp. 69-75, 1966.
- (4) E. M. Levin, C. R. Robbins and H. F. McMurdie: "Phase diagrams for ceramists," The American Ceramic Society, Inc., p. 97, 1964.
- (5) K. Dudley: "Emission and evaporation properties of a barium calcium aluminate impregnated cathode as a function of its composition," *Adv. in Electron Tube Techniques*, pp. 154-158, 1961.
- (6) V. N. Nekrasov and A. V. Druzhinin: "Emission characteristics of distributor thermocathodes with sputtered metallic films," *Radio Eng. & Electron Phys.*, Vol. 15, No. 2, pp. 361-363, 1970.
- (7) M. C. Green and R. A. Tuck: "Recent studies of the chemical and physical processes in thermionic cathodes," in *Proc. 8th European Microwave Conference*, pp. 730-744, 1978.
- (8) M. C. Green: "The M-type cathode--No longer magic?," in *Proc. 1980 International Electron Devices Meeting*, pp. 471-474, 1980.
- (9) A. J. A. van Stratum and P. N. Kuin: "Tracer study on the decrease of emission density of osmium coated impregnated cathodes," *J. A. P.*, Vol. 42, No. 11, pp. 4436-4437, 1971.
- (10) U. S. Pat., 3,497,757: "Tungsten dispenser cathode having emission enhancing coating of osmium-iridium or osmium-ruthenium alloy for use in electron tube".
- (11) E. S. Rittner: "On the mechanism of operation of the type B impregnated cathode," *J. A. P.*, Vol. 48, No. 10, pp. 4344-4346, 1977.
- (12) R. T. Longo: "Long life, high current density cathodes," in *Proc. 1978 International Electron Devices Meeting*, pp. 152-155, 1978.
- (13) R. Forman and D. H. Smith: "Thermionic cathode life-test studies," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-26, Vol. 10, pp. 1567-1572, 1979.

- (14) D. H. Smith: "Design, construction and long life endurance testing of cathode assemblies for use in microwave high-power transmitting tube," *NASA Tech. Rep. CR-135371*, 1977.
- (15) N. Mita and K. Shimokawa: "Reliability improvement and evaluation of TWTs for communications satellites," in *Proc. International Symposium for Testing and Failure Analysis*, pp. 47-52, 1986.
- (16) 三田長久, 下川清志: "含浸形陰極の劣化機構解析法," *電子情報通信学会論文誌 C-II*, Vol. J77-C-II, No. 12, pp. 585-590, 1994.
- (17) A. M. Shroff, P. Palluel and J. C. Tonnerre: "Performance and life tests of various types of impregnated cathodes," *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 8, pp. 36-49, 1981.
- (18) L. R. Falce: "Dispenser cathodes: the current state of the technology," in *Proc. 1983 International Electron Devices Meeting*, pp. 448-451, 1983.
- (19) N. Mita: "Degradation of coated impregnated cathode's surface coating," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-38, No. 11, pp. 2554-2557, 1991.

第3章 表面被覆の劣化による寿命

表面被覆含浸形陰極を長時間動作させた後にその表面を分析すると、陰極基板のタングステンが大きい割合で検出される。これは、拡散により陰極基板のタングステンが表面に到達したものと考えられ、更に進行すると表面被覆の効果が失われてしまう。本章ではこのような表面被覆含浸形陰極の表面被覆の劣化による寿命について検討する^{(1),(2)}。

表面被覆含浸形陰極の表面被覆の劣化に関して、Longo等は表面被覆中を陰極基板のタングステンが拡散し、表面におけるタングステンの濃度が経時的に増加するとして、その理論式を提案している⁽³⁾。しかし、拡散方程式を解く際に、界面における境界条件が適切ではなく、実際とは異なると考えられる。

本章では、3.1節にてOs-Ru合金被覆含浸形陰極をAuger分析装置を備えた真空容器中で温度4水準にて最大20,000時間まで連続加熱し、表面被覆の組成の時間変化をその場観察により測定した方法について述べる。3.2節では、従来考慮されていなかったタングステン基板の表面被覆側の境界においてタングステンの濃度が常に1であるという境界条件を設けて拡散方程式を解き、タングステン表面濃度の経時変化を表す理論式を新たに導出する。3.3節において、タングステン表面濃度の経時変化の実測値を、導出した理論式と比較して良く一致することを示す。理論と実験の比較によりOs-Ru-W合金中のタングステンの拡散係数が求まり、この拡散係数の活性化エネルギーとしては8.4 eVと比較的大きな値を得た。

3.1 実験

3.1.1 実験装置

実験で使用した表面被覆含浸形陰極は、表面被覆の厚さがばらつかないように同一スパッタリング工程で製造したものをを用いた。スパッタリング工程において測定された膜厚は0.475 μm である。

実験装置の概念図を図3-1に示した。陰極は熱遮蔽板、加熱ヒータを組み込んだ陰

極組立とし、中央の駆動機構に取り付けた。これは外部からの電流で加熱できる。駆動機構を回転し、陰極を覗き窓に向けて陰極温度の測定を行う。また、Auger分析装置(AES: Auger electron spectrometer)に向けて陰極表面の組成分析をその場観察により行う。この表面分析は不純物の付着を防ぐため、加熱しながら行った。更に、水冷陽極に向けてることにより電流活性が可能である。

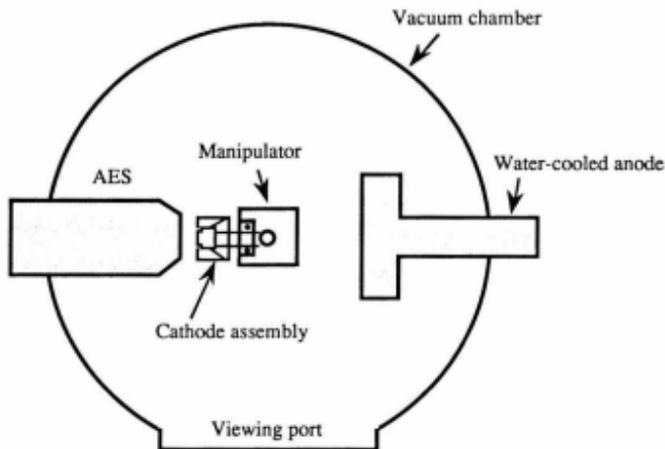


図3-1 実験装置の概念図

Auger分析結果は各元素に対応する尖頭値をAD変換器により読み取り、Augerハンドブック⁽⁶⁾の感度係数を用いて相対比率を計算した。検出される元素はタングステン基板と表面被覆に含まれるタングステン(W)、オスミウム(Os)、ルテニウム(Ru)の他にバリウム(Ba)、酸素(O)等が含まれるが、ここでは表面被覆の組成変化に着目しているのので3元素(W、Os、Ru)の比率の合計を100%としてこの3元素の相対的な比率を求めた。

陰極温度は覗き窓を通して光高温計により測定した。本論文で使用している温度の単位 $^{\circ}\text{C}_s$ は陰極表面をこの光高温計で650 nmの光学フィルタを通して測定した輝度温度の値である。陰極温度は陰極の電子放射面で測定した。Os-Ru被覆含浸形陰極は表面に

Os-Ru合金が被覆しており、基板からタングステンが拡散してくるので、表面のタングステンの濃度が経時的に変化する。これにより、もし輻射率が変化していれば、輝度温度を一定に保っても真温度は変化してしまう。そこで、Os-Ru被覆含浸形陰極を連続的に加熱し、表面タングステン濃度を測定すると共に、図3-2に示す陰極の肩の部分A（タングステン）と陰極表面部B（Os-Ru-W合金）の輝度温度を測定した。図3-2には陰極表面のタングステン濃度とA部とB部の輝度温度の差の関係を示しており、A部の方が温度が高い。陰極全体の温度はほぼ一定であると考えられるが、A部の輝度温度が約 40°C_B 高く測定されている。これは、A部が熱遮蔽板に囲まれており、細い間隙を通して覗いているため細線効果が生じているためと考えられる。タングステン濃度が30%~70%の間で輝度温度の差はほとんど一定であり、陰極表面の輻射率が変化していないことがわかる。この結果、タングステン拡散の実験においては陰極表面すなわちOs-Ru-W合金の輻射率にはタングステンの輻射率0.43を使用した。

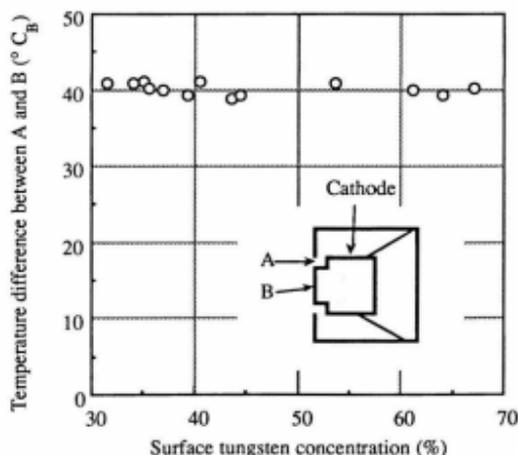


図3-2 表面タングステン濃度とA、B部の輝度温度の差。

A部は純タングステン、B部はOs-Ru-W合金。

A部の方が高温

3. 1. 2 実験結果

新しい陰極について、表3-1に示す温度測定、温度活性、電流活性の各活性化工程を実施した場合の表面分析結果を図3-3に示す。最大1100°C_B、全部で40分程度の温度測定において陰極表面のタングステン濃度はすでに20%を越えており、活性化工程がすべて終了した時点では30%程度になっている。すでに、Os-Ru合金被覆⁵⁾やイリジウム(Ir)被覆⁶⁾に関して報告されているように、短時間の加熱でOs-Ru合金被覆はOs-Ru-W合金に、Ir被覆はIr-W合金にそれぞれ変化しているものと考えられる。

表3-1 陰極活性化工程の内訳

工程名	陰極温度 (°C _B)	電流密度 (A/cm ²)	所要時間
温度測定	800 ~ 1100	0	40分
温度活性	600 ~ 1150	0	2時間
電流活性	1020	0.6	4時間

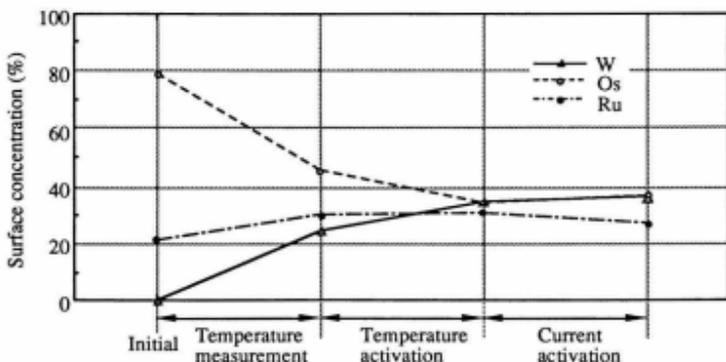
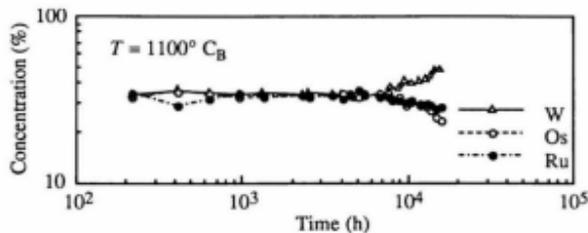
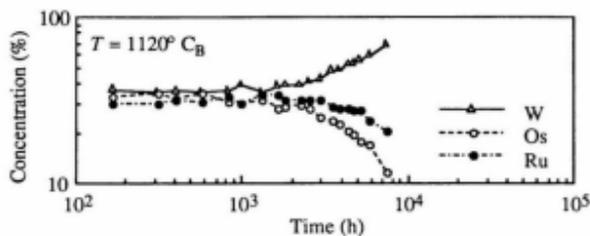


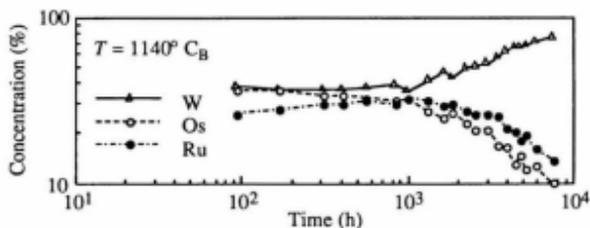
図3-3 陰極活性化工程における陰極表面元素比率の変化。
タングステン基板と表面被覆金属のみに着目した場合



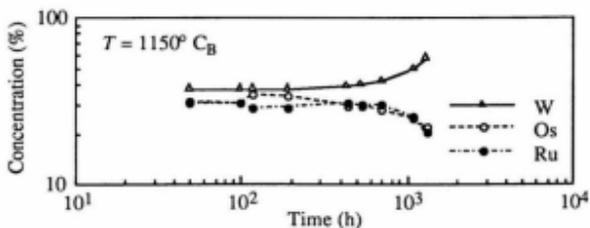
(a) Cathode temperature is $1100^{\circ} C_B$



(b) Cathode temperature is $1120^{\circ} C_B$



(c) Cathode temperature is $1140^{\circ} C_B$



(d) Cathode temperature is $1150^{\circ} C_B$

図 3-4 陰極表面元素比率の経時変化。W、Os、Ruの比率合計を100%とする

このように、活性化が終了した陰極を温度4水準（1100、1120、1140、1150° C_g）にて連続的に加熱し、陰極表面組成の経時変化をその場観察にて測定した。測定結果を図3-4に示す。経過時間は活性化終了後の時間である。両対数図においては、初期には組成比率が一定であり、その後タングステンの比率がほぼ直線的に増加を始め、OsとRuが減少する傾向を示している。基板のタングステンが表面被覆のOs-Ru-W合金中を拡散してくるによりタングステンの表面濃度が増加するものと考えられる。

3.2 拡散理論

図3-3に示したように、Os-Ru合金を被覆した含浸形陰極では陰極を活性化する工程においてすでに基板のタングステンと表面被覆金属の合金化が生じ、表面被覆はOs-Ru-W合金となっている。この後陰極を定常的に加熱すると基板のタングステンはOs-Ru-W合金中を拡散していく。表面被覆の厚さ方向をx軸とした図3-5に示す一次元モデルを考え、経過時間をtとすると、表面被覆中のタングステンの濃度Cは次の拡散方程式で記述できる。

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{1}{D} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3-1)$$

ここでDはOs-Ru-W合金中のタングステンの拡散係数である。

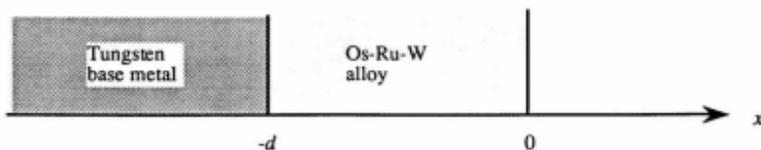


図3-5 表面被覆中におけるタングステン拡散のモデル図

タングステン中のOsの拡散係数に比べて、Os中のタングステンの拡散係数が非常に大きいため⁷⁾、基板の表面被覆側の境界においてタングステンの濃度は常に1とした。表面被覆の厚さを d とし、表面被覆中のタングステンの初期濃度を C_0 とすると、表面($x=0$)においてはタングステンの流出が無いことから、境界条件は次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dx} &= 0 \quad (x=0), \\ C &= 1 \quad (x=-d), \\ C &= C_0 \quad (-d < x \leq 0, t=0). \end{aligned} \quad (3-2)$$

この境界条件における拡散方程式の解⁸⁾から、表面($x=0$)におけるタングステンの濃度 C として次式を導出した。

$$\begin{aligned} C(x=0) &= 1 - (1 - C_0) f(\tau), \\ f(\tau) &= \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{16\tau^2}\right), \\ \tau &= d \sqrt{4Dt}. \end{aligned} \quad (3-3)$$

Longo 等は同様のモデルにおけるタングステンの表面濃度を次式で与えている。

$$C(x=0) = 1 - (1 - C_0) \operatorname{erf}(\tau), \quad (3-4)$$

これはOs-Ru-W合金中のタングステンの拡散係数とタングステン基板中のOs-Ruの拡散係数が等しいとして相互拡散を考えた場合の結果である。

3. 3 拡散理論と実験の比較

図3-4の実験結果において、タングステンの表面濃度に着目し、理論解析結果と比較したものを図3-6に示す。温度4水準の測定結果を○等の記号で示し、式(3-3)を実線で示した。式(3-3)と実測値を適合させる定数は初期濃度 C_0 と拡散係数 D であり、 C_0 には初期において経時的に変化を示していない部分の平均値を用い、 D は $C=0.5$ 付近で式(3-3)が実測値と一致するように選んだ。表面被覆層の厚さ d は $0.475\ \mu\text{m}$ とした。また、Longo等の与えている式(3-4)について同様の実測値との適合をした結果を破線で示した。破線はいずれの温度においても実測値と傾斜が異なっている。実線で示した新しく求めた式(3-3)は実測値と非常に良く一致している。

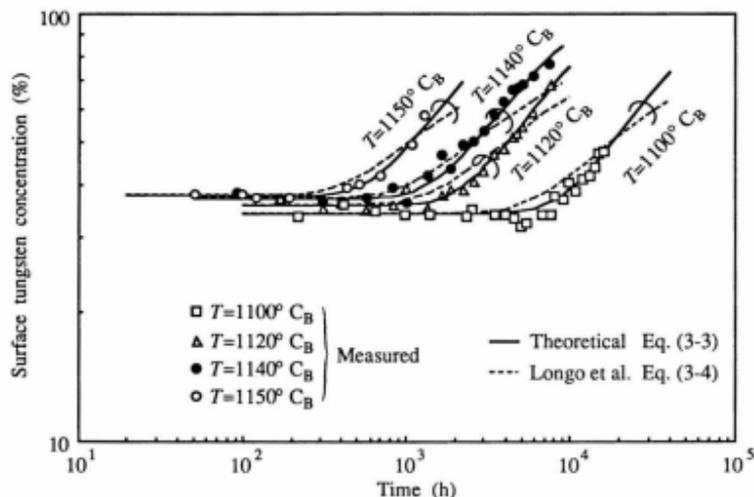


図3-6 陰極表面タングステン濃度経時変化の実測値と理論値の比較

式(3-3)と実測値が良く一致することから、「Os-Ru被覆は初期の活性化で Os-Ru-W合金となる。この後、一定温度で加熱しておくこととOs-Ru-W合金中を基板からタングステンが拡散してくることにより表面のタングステン濃度が増加する。このとき、タングス

テンの蒸気圧は陰極の動作温度程度では非常に小さいので、表面からタングステンの流出は無い。」という表面被覆の劣化モデルが正しいものと考えられる。

また、上記の理論と実験の対比からOs-Ru-W合金中におけるタングステンの拡散係数 D が求められる。この結果のArrhenius図を図3-7に示す。ここで、輝度温度を絶対温度に換算する際に、陰極表面の輻射率にはタングステンの輻射率0.43を使用した。最小二乗法により求めた拡散係数 D (cm^2/s) は動作温度を T (K) とすると、

$$D = 1.34 \times 10^{12} \exp(-9.74 \times 10^4 / T) \quad (3-5)$$

で示され、その活性化エネルギーは8.4 eVである。このように、活性化エネルギーが大きいため、実際の陰極動作温度である 1000°C_B 付近においては表面被覆が長期間にわたって安定であるものと考えられる。

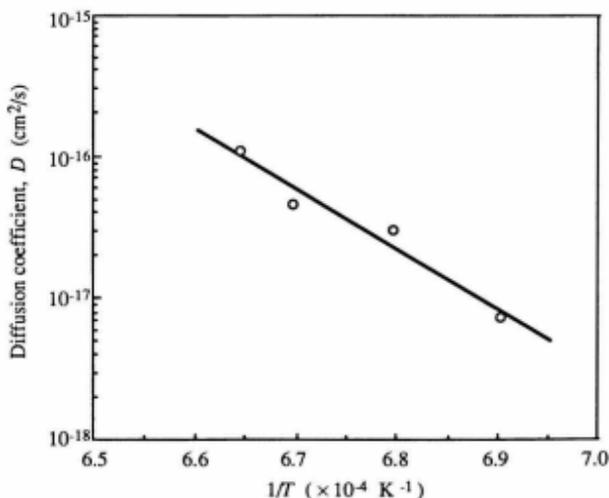


図3-7 Os-Ru-W合金中のタングステンの拡散係数

実用的にはこの表面被覆の寿命の温度依存性が必要である。ここでは、タングステン表面濃度の経時変化を、両対数図において理論曲線と接する、傾斜が0と約0.5の2本の直線で近似し、これ等が交わる時点を表面被覆の寿命と定義した。このようにすると、この時点以前には表面被覆の劣化を全く考慮する必要が無いので実用的である。このようにして求めた表面被覆が劣化を開始する時間のArrhenius図を図3-8に示す。この表面被覆が劣化を開始する時間は拡散係数にはほぼ反比例しており、みかけ上8 eV程度の活性化エネルギーを示す。この結果から、1050° C_Bにおいても、表面被覆が劣化を開始する時間は100,000時間以上であることがわかった。Longo等のモデルにより図3-6から表面被覆が劣化を開始する時間を同様にして求めた場合には、実測値との適合を行う位置により値が異なると共に、得られる値は実際より小さくなってしまふ。界面での正しい境界条件を考慮した本モデルによれば、理論と実測値が良く一致しているため表面被覆が劣化を開始する時間を正しく求めることができる。

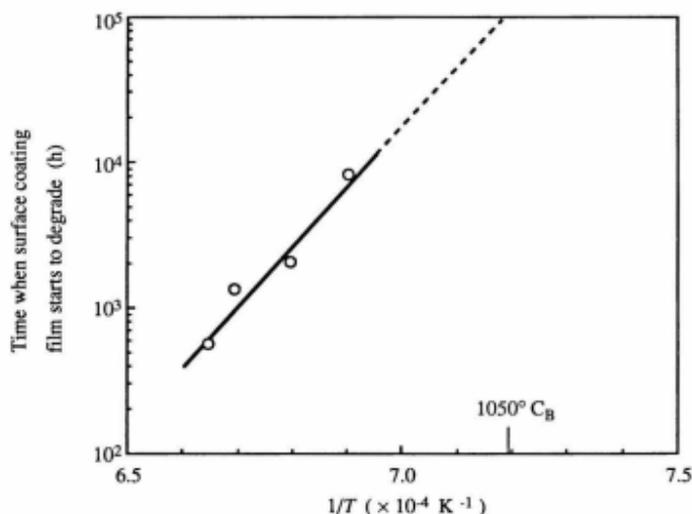


図3-8 表面被覆が劣化を開始する時間と温度の関係

Os-Ru合金を被覆した表面被覆含浸形陰極は活性化工程において表面被覆がOs-Ru-W合金となる。この後、定常的に加熱すると基板のタングステンが表面に拡散し、タングステンの表面濃度が経時的に増加する。基板の表面被覆側界面においてタングステンの濃度が常に1であるという境界条件を与えて拡散方程式の解を求め、タングステン表面濃度の経時変化を与える式を新たに導出した。この式は実測値と良く一致した。理論と実験の比較によりOs-Ru-W合金中におけるタングステンの拡散係数を求めたところ、その活性化エネルギーとして8.4 eVが得られた。この大きな値が実際に陰極を使用する場合に長期間安定な表面被覆が維持されている理由であると考えられる。

タングステン表面濃度の経時変化を同対数図において2本の直線で近似し、この交点を表面被覆が劣化を開始する時間と定義した。この時間以前においては、表面被覆の組成は活性化終了時からほとんど変化していない。この表面被覆が劣化を開始する時間はタングステンの拡散係数にほぼ反比例するため、活性化エネルギーは8 eV程度の大きな値となる。この結果から表面被覆含浸形陰極を温度1050°C₂にて動作した場合でも表面被覆が劣化を開始する時間は100,000時間以上となることがわかった。

第3章の参考文献

- (1) 三田長久: "表面被覆含浸形陰極における表面被覆の劣化," 信学技報, R90-22, 1990.
- (2) N. Mita: "Degradation of coated impregnated cathode's surface coating," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 38, No. 11, pp. 2554-2557, 1991.
- (3) R. T. Longo, E. A. Adler and L. R. Falce: "Dispenser cathode life prediction model," in *Proc. 1984 International Electron Devices Meeting*, pp. 318-321, 1984.
- (4) L. E. Davis, N. C. MacDonald, P. W. Plamberg, G. E. Riach and R. E. Weber: "Handbook of Auger electron spectroscopy," *Phys. Electron. Div., Perkin-Elmer Corp.*, p. 13, 1978.

- (5) L. R. Falce: "Dispenser cathodes: the current state of the technology," in *Proc. 1983 International Electron Devices Meeting*, pp. 448-451, 1983.
- (6) Y. Ouchi, S. Kimura, T. Higuchi and K. Kobayashi: "Long-life high reliability iridium-coated M-type dispenser cathode," *Toshiba Rev.*, No. 159, pp. 25-29, Spring 1987.
- (7) 本田幸雄, 会田敏之, 田口貞憲, 山本恵彦: "オスミウム被覆タングステン板における拡散と酸化," 第29回春季応用物理学関係連合講演会, 講演番号3p-C-9, p. 293, 1982.
- (8) H. S. Carslaw and J. C. Jaeger: "Conduction of heat in solids," Oxford at the Clarendon Press, p. 101, 1959.

第4章 含浸材の消耗による寿命

含浸形陰極の動作機構は、基板の多孔質タングステンとその中に含浸してあるバリウム(Ba)化合物が反応することにより遊離Baが生成され、これが陰極表面に吸着して表面の仕事関数を低下させていると考えられている。本章では含浸形陰極の主たる寿命要因である含浸材の消耗による寿命について検討する^{(1),(2),(3)}。

最初に4.1節において、長期間使用した、含浸材BaO、CaO、Al₂O₃の配合比が4:1:1のS形含浸陰極と5:3:2のB形含浸陰極の断面分析により含浸材が基板金属のタングステンと反応して消耗する現象を検討する。次にS形含浸陰極を用いて、真空中で加熱した場合のBa蒸発速度と陰極表面のBa濃度を測定する。これらの結果から、4.2節において温度制限電流の経時変化を理論的に導く。この温度制限電流を再現性良く測定するのは困難なため、測定が簡単な物理量として T_x （陰極電流が空間電荷制限電流値の $x\%$ になる陰極温度）を用いた。この x の値は、 T_x において陰極の電子放射が温度制限電流になっており、進行波管で測定する場合、ヘリックス電流があまり増えない値にする必要があるため、90とした。また、 T_{90} の経時変化を測定すれば、 T_{90} が陰極動作温度 T に一致する時点で陰極電流が初期値の90%に低下し、進行波管の高周波出力が約1 dB低下するので、その時点寿命終了と定義することができる。これらのことから、以下では T_{90} を用いて議論する。陰極電流が空間電荷制限電流の90%になるまで陰極温度を下げた場合には陰極の電子放射はほぼ温度制限領域となるので、 T_{90} の経時変化は温度制限電流の経時変化から求められる。このようにして得られた T_{90} の理論値は実測値と良く一致し、この理論直線により含浸材の消耗による寿命を推定できることを示す。4.3節においては、含浸材の配合比が異なる場合にも同じ寿命推定方法が使えることを示す。4.4節において、表面被覆がある場合と、陰極電流密度を変えた場合にもこの寿命推定法が成り立つことを明らかにし、更に、陰極温度と寿命の関係を定式化し、寿命が最も長くなる最適動作温度の存在を明らかにする。

4. 1 実験方法

4. 1. 1 積算法による断面分析

含浸形陰極では、分析対象である含浸材が散在しており、その分布密度も低いため、通常行われているような線分析では、陰極断面における軸方向の含浸材構成元素（Ba、Ca、Al）の濃度変化を把握することが困難である。そこで、EPMA (Electron Probe Micro Analysis)で測定する際に図 4-1 に示すように、電子ビームを半径方向に走査したときの特性 X 線強度を積算することにより平均的な濃度を求める方法（積算法）を採用した⁶⁾。含浸材 (impregnant) が数 μm ~ 数 $10 \mu\text{m}$ の大きさで $20 \sim 30 \mu\text{m}$ おきに鳥状に散在していることを考慮し、加速電圧 20 kV 、ビーム直径 $2 \mu\text{m}$ 、ビーム移動速度 $100 \mu\text{m}/\text{min}$ 、分析領域幅 $150 \mu\text{m}$ とした。

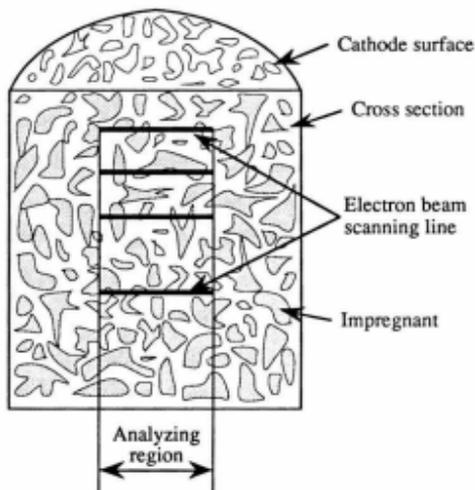


図 4-1 積算法による含浸形陰極の断面分析

4. 1. 2 バリウム蒸発速度とバリウム陰極表面濃度の測定

実験用真空装置の概念図を図4-2に示す。これは、直径34 cmの円筒状真空容器の中央部に駆動機構、外周部に水冷陽極、Auger分析器（AES: Auger electron spectrometer、PHIモデル10-155）、4重極子質量分析器（quadrupole mass spectrometer: 日本真空MSQ-400）、覗き窓を取付けたものである。240 l/sのスパッタイオンポンプにより 4×10^{-8} Pa以下に排気できる。駆動機構先端には陰極組立を取り付ける。この陰極組立は陰極、加熱用ヒータ、集束電極、熱遮蔽板から成る。

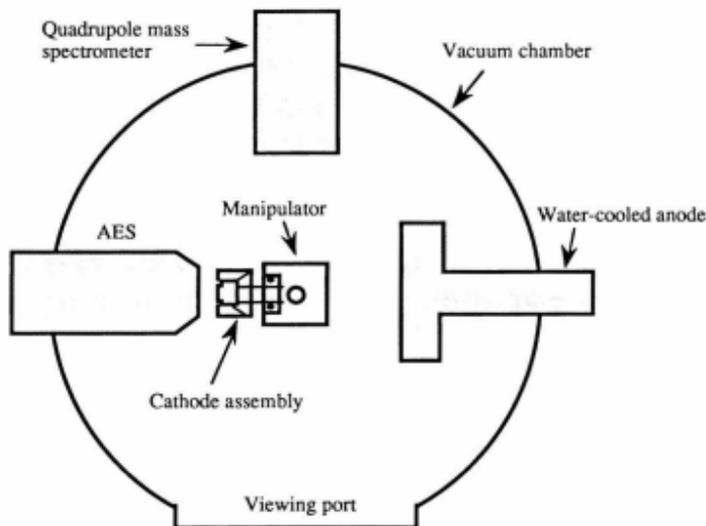


図4-2 実験用真空装置の概念図

駆動機構を回転して、陰極を水冷陽極に対向させると2極管として動作させることができ、初期の活性化に用いる。陰極温度は覗き窓を通して光高温計により測定した。本論文で使用している温度の単位 $^{\circ}\text{C}_b$ は陰極表面をこの光高温計で650 nmの光学フィルタを通して測定した輝度温度の値である。Ba蒸発速度は4重極子質量分析器を陰極から

の蒸発物が直線的に入射するように配置して測定した。この方法はLOS RGA (Line of Sight Residual Gas Analysis) とも呼ばれている。4重極子質量分析器と多チャンネル分析器(キャンベラ社:シリーズ35)を組み合わせてパルス計数を行うことにより陰極からの蒸発物の蒸発量を感度良く測定できる。陰極表面のBa濃度はAESを用いて測定した。陰極を動作温度に加熱した状態で測定することにより残留ガスの吸着を防ぎ、動作状態でのBa表面濃度を求めることができた。Augerハンドブック⁶⁾により相対感度を求め、測定により得られた各元素に対応する検出値をこの相対感度で割ることにより各元素の割合を求めた。用いたAESは電子ビーム直径が0.1 mm程度と比較的大きいため、表面濃度の平均値が得られる。

4. 1. 3 T_{90} の測定

図4-2に示した真空装置の駆動機構は寸法精度があまりよくないため、2極管を構成して電子放射特性等の経時変化を測定するのは困難である。そこで、図4-3に断面図を示す新しく考案した寿命試験用の2極管を用いた。これは、陽極を陰極に近接させて500 V程度の電圧で動作可能とし、陽極にすりばち状の穴を設けることにより、陰極表面の電流密度の均一性を保ちながら、陰極から蒸発したBa原子の反射を防ぐという機能を有している。この2極管の設計とその効果については第2章で詳細に述べた。

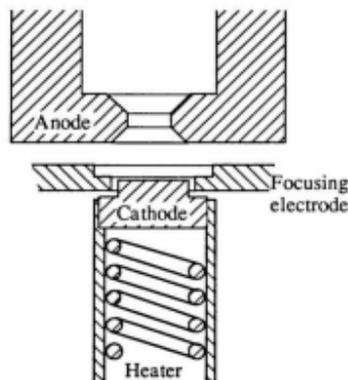


図4-3 寿命試験用2極管の断面図

この2極管に含浸材BaO、CaO、Al₂O₃の配合比が4:1:1のS形含浸陰極を組み込んで一定温度で動作させ、陰極電流を定期的に測定した。T₉₀は陰極温度を低下させて測定しており、陰極電流が設定動作温度における初期の空間電荷制限電流の90%になる陰極温度をT₉₀と定義した。

4. 2 実験結果と考察

4. 2. 1 含浸材とタングステン基板の反応

基板のタングステンとその中に含浸してあるBa化合物が反応して遊離Baが生成され、これが陰極表面に吸着して表面の仕事関数を低下させていると含浸形陰極の動作機構は考えられている。そこで、実際に使用した陰極の断面における含浸材の消耗状況をEPMAを用いた積算法により測定して劣化要因の検討を行った。ここで使用した陰極は含浸材BaO、CaO、Al₂O₃の配合比が4:1:1のS形と5:3:2のB形である。

図4-4は、1050° C_Bにて29,000時間動作させたS形陰極の断面におけるBa、Ca、Alの濃度変化を積算法により測定した結果を示したものである。BaについてはLα線強度、CaとAlについてはKα線強度を任意目盛りで陰極表面からの深さに対して示した。

図4-5には1100° C_Bにて14,000時間動作させたB形陰極断面の分析結果を示す。図4-4、図4-5共にAlの濃度分布がほぼ一定であるのに対し、Ba、CaはS形では表面から100 μm付近まで、B形では同じく200 μm付近まで濃度が減少していることがわかる。この結果から、含浸材の配合比の違いにかかわらず含浸材とタングステンの反応では、遊離Baと共に遊離Caも生成されると考えられる。Shroff等は含浸材とタングステンの反応では最終的に、BaAl₂O₄、BaWO₄、CaWO₄が生成されると報告している⁹⁾。また、S形陰極から蒸発したBaとCaの比率は8:1であると報告されている⁶⁾。これらを考慮すると、S形陰極の含浸材とタングステン基板の反応は、例えば次式で表すことができる。



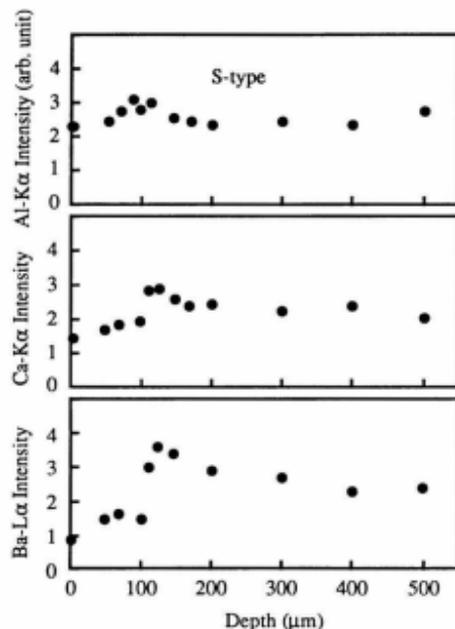


図4-4 S形陰極の積算法による断面分析結果

この反応は、遊離Ba、Caが生じ、Alは消耗しないという積算法による測定結果と良く一致している。このように含浸形陰極では含浸材が基板のタングステンと反応し、一部は遊離Ba、Caとなって流出し、残部は利用不可能な反応生成物となることにより劣化していくという機構を考えることが最も合理的である。本論文では、この劣化要因を含浸材の消耗と呼んでいる。

つぎに、この分析結果に基づいた含浸形陰極の劣化モデルを考察する。図4-6は陰極劣化のモデルを示す図であり、タングステン基板の細孔の形状を円筒形に単純化した断面図である。本モデルにおいて、Ba供給速度の経時変化を以下に示す機構により生じるとして検討した。基板の空孔部(半径 r_0)には含浸材(impregnant)がつまっており、これが基板のタングステンと式(4-1)のごとく反応して遊離Baを生成する。反応した部

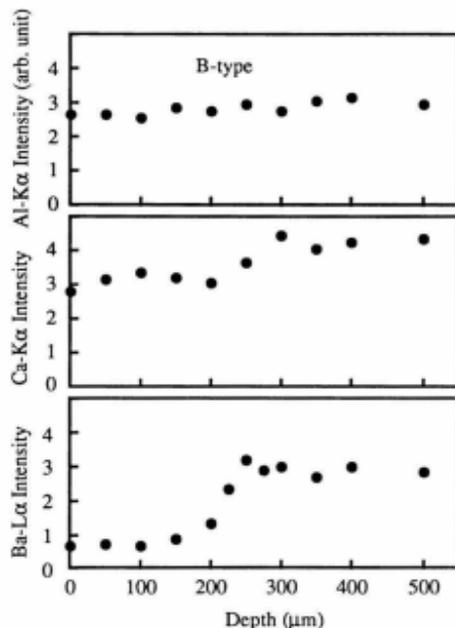


図4-5 B形陰極の積算法による断面分析結果

分には反応生成物(reactive products)が残り、この反応によって生じた空洞部は半径 r 、長さ l の円筒状になるとした。空洞部の半径 r は非常に小さいため、遊離 Ba は平均自由行程より小さい半径を有する筒中の流れである Knudsen 流により流出すると考えられるので、その流出速度 F_b (mol/s) は次式で与えられる¹⁰⁾。

$$F_b = \frac{2 \pi r^3 P}{3 \cdot l} \left[\frac{8 R T}{\pi M} \right]^{1/2}, \quad (4-2)$$

ここで、 R : 気体定数、 M : Ba の原子量、 T : 陰極温度(K)、 P : 温度 T における Ba の蒸気圧である。

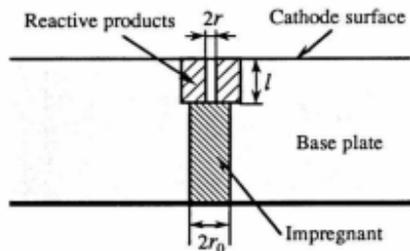


図4-6 含浸形陰極の含浸材消耗モデルの断面図

Baが1 mol流出すると含浸材は式(4-1)より $3/8$ mol消費する。ここで含浸材が詰まっている基板の空孔は半径 r_0 の円筒を仮定しているので、この含浸材消費により単位時間 dt に増加する含浸材消費部分の長さ dl は次式となる。

$$dl = \frac{3}{8} \frac{M_0 \cdot F_b}{\pi r_0^2 \cdot \rho} dt \quad (4-3)$$

ここで M_0 は含浸材の分子量であり、 ρ は含浸材の密度である。

式(4-3)に式(4-2)を代入して積分すると含浸材消費部分の長さ l と時間 t の関係が得られる。

$$l = \left[\frac{M_0 P r^3}{r_0^2 \rho} \right]^{1/2} \cdot \left[\frac{2RT}{\pi M} \right]^{1/4} \cdot t^{1/2} \quad (4-4)$$

式(4-4)は含浸材消費部分の長さ l が時間 t の1/2乗に比例して増加し、陰極温度を変えてもこの傾向は変化しないことを示している。また、式(4-4)を式(4-2)に代入すると、Ba流出速度は $t^{-1/2}$ に従って減少していくことがわかる。

この経時変化の考察はS形についてのみ説明したが、B形についても係数を変更する

だけで同様の結果が得られる。

4. 2. 2 バリウム蒸発速度と表面濃度

タングステン基板の空孔の中でタングステンと酸化Baを含む含浸材が反応して遊離Baが生成される。長期間動作を続けると、含浸材はこの反応により消耗していき、反応する場所が陰極表面から深い場所へと移行する。この結果、前項で示したようにBaの流出がKnudsen流で制限され、Ba蒸発速度も低下していく。S形含浸陰極を図4-2の真空装置中で連続的に加熱し、このBa蒸発速度と陰極表面のBa濃度の経時変化を測定した。真空装置に組み込んだ陰極と2極管に組み込んだ陰極の初期状態を等しくするために、両方の陰極は同一の工程で活性化した。この初期活性化工程は前章の表3-1に示したものと同一である。

一定温度に加熱したS形含浸陰極からのBa蒸発速度の経時変化を図4-7に示す。動作初期は含浸材とタングステン基板の反応部分は表面付近なので、経時変化は陰極温度と蒸発エネルギーで決まる蒸発速度で律速されるため、蒸発速度は経時的にはほぼ一定である。時間経過に従って反応部分がタングステン基板の内部に移動していくので、遊離BaのKnudsen流で律速されるようになり、 $t^{-1/2}$ の経時変化に移行していくものと考えられる¹⁹⁾。これらを併せて考えると、Ba蒸発速度 v (Counts/s)は次式で示される。

$$v = v_0 / (1 + \alpha t)^{1/2}, \quad (4-5)$$

ここで t は時間(h)、 v_0 は v の初期値(Counts/s)、 α は定数(h^{-1})である。 $v_0 = 900$ 、 $\alpha = 0.04$ を仮定して、式(4-5)を計算した結果を図4-7に実線で併せて示す。この理論値は実測値と良く一致している。

次にBa蒸発速度と陰極表面のBa濃度の比較を行った。図4-7に示すBa蒸発速度の経時変化を測定した期間においてBa表面濃度の経時変化を同時に測定した。この結果から得たBa蒸発速度とBa表面濃度の関係を図4-8に示す。蒸発速度の対数と表面濃度の関係はほぼ直線となる。図4-8において実線で示す直線は最小二乗法によるものであり、Ba蒸発速度と表面Ba濃度 C_s (%)の関係は次式となる。

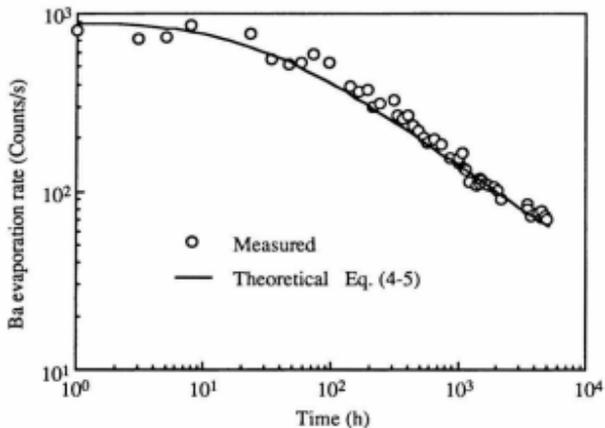


図 4-7 バリウム蒸発速度の経時変化

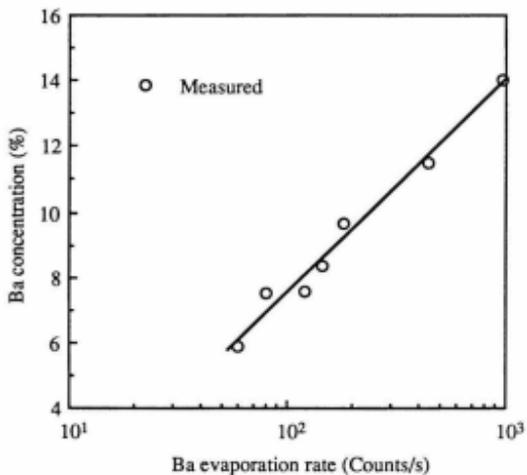


図 4-8 バリウム蒸発速度とバリウム表面濃度の関係

$$C_b = -0.0524 + 0.0279 \cdot \ln v \quad (4-6)$$

図4-8に示すように、陰極が十分に活性化された初期においてはBa表面濃度は約14%であった。また、Baの表面被覆率 θ は表面濃度に比例する。従って、近似的には $\theta = 1$ のとき $C_b = 14\%$ と考えられるので、この場合に式(4-6)は次式となる。

$$\theta = 0.2 \cdot \ln(0.15 \cdot v) \quad (4-7)$$

Ba表面被覆率 θ と仕事関数 ψ (eV)の関係はSchmidtが求めており⁹⁾、次式で与えられる。

$$\psi = 2.0 + 2.5 \exp(-6\theta) \quad (4-8)$$

仕事関数がわかるとRichardsonの式から温度制限電流密度 J_{it} (A/cm²)が求められる。

$$J_{it} = A_0 \cdot T^2 \exp(-\psi/kT) \quad (4-9)$$

ここで、 A_0 はDushman定数、 T は陰極温度(K)、 k はBoltzmann定数である。

式(4-5)、(4-7)、(4-8)を式(4-9)に代入すると陰極温度を変数とする温度制限電流密度 J_{it} と時間の関係が次式で与えられる。

$$kT \cdot \ln \left(\frac{A_0 \cdot T^2}{J_{it}} \right) = 2.0 + \frac{2.5 \cdot (1 + \alpha \cdot t)^\beta}{(0.15 \cdot v_0)^{1.2}} \quad (4-10)$$

ここで $(1 + \alpha \cdot t)$ の指数は上記の導出過程で0.6が得られるが、後の議論のために β として示した。

4. 2. 3 T_{90} の経時変化

前節の実験に使用したのと同じ構造の陰極を、図4-3に示した2極管に組み込んで同じ温度で連続動作させた。 T_{90} の値を定期的に測定し、初期値からの変化量 ΔT_{90} の経時変化として図4-9に示す。動作させた陰極電流密度は 0.6 A/cm^2 である。同図に実線で示したのは前項で述べた理論式から計算したものである。式(4-9)の J_{ii} が初期の陰極電流密度の90%に等しくなる陰極温度が T_{90} となる。すなわち、 $J_{ii} = 0.54 \text{ (A/cm}^2)$ を与える式(4-10)の温度 T の値が T_{90} の理論値である。図4-9においてこの理論値と実測値は良く一致している。

式(4-10)において、 $\ln T^2$ の項は T の項に比べて T の変化に対する変化が小さい。このことから、 $\ln T^2$ の項を定数として式(4-10)を T に関して解くと、 ΔT_{90} は次式となる。

$$\Delta T_{90} = A_1(T) \cdot [(1 + \alpha t)^\beta - 1] \quad (4-11)$$

ここで、 $A_1(T)$ は T の関数である定数である。 $\alpha t > 1$ の場合、式(4-11)は次式で近似できる。

$$\Delta T_{90} = A(T) \cdot t^\beta \quad (4-12)$$

ここで、 $A(T) = A_1(T) \alpha^\beta$ である。

図4-9に実線で示している、数値計算により式(4-10)から得られた結果は式(4-11)とはほぼ一致している。式(4-12)を破線で図4-9に併せて示した。この直線も実測値を良く近似できており、2000時間程度以上では式(4-11)とはほぼ一致している。この結果から、 ΔT_{90} の経時変化を測定して図4-9のごとく両対数図で示せば、傾斜0.6の直線でこれを近似することができる。陰極の劣化が進み、 T_{90} が連続動作している陰極温度 T と一致した時点では陰極電流は初期値の90%となるので、この時点を生寿命終了と定義できる。つまり、傾斜0.6の直線を用いると含浸材消耗による寿命の推定ができる。

図4-10にはS形陰極を電流密度 0.6 A/cm^2 、陰極温度3水準にて ΔT_{90} の経時変化を測定した例を示す。結果は式(4-12)で表される傾斜0.6の直線で近似でき、陰極温度に応じて平行移動しており、 ΔT_{90} の経時変化は動作温度の関数である定数 $A(T)$ と $t^{0.6}$ の積で表されることを示している。

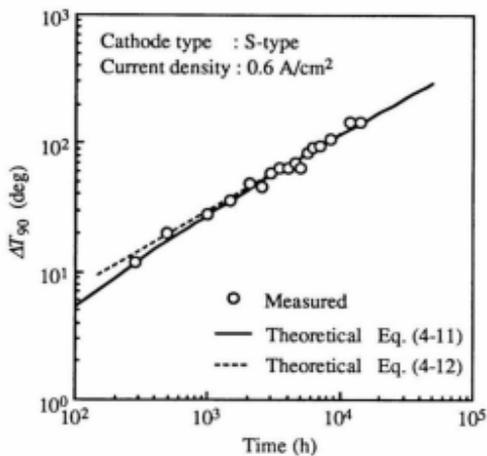


図 4 - 9 ΔT_{90} の経時変化

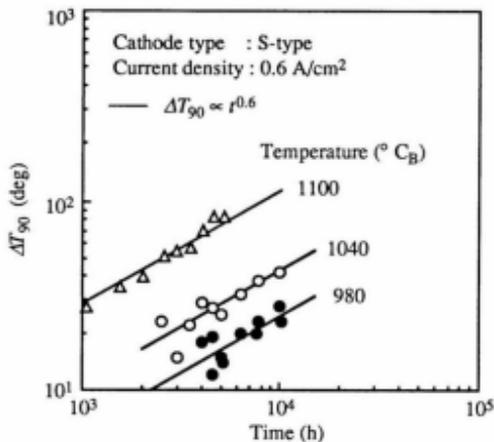


図 4 - 1 0 ΔT_{90} の経時変化. 陰極温度を変えた場合

4. 3 含浸材配合比の寿命への影響

含浸材の違いによる寿命性能を比較するため、S形とB形陰極を新構造の2極管に組み込み、 1040°C_B 、 1100°C_B の温度2水準にて連続動作試験を行った。この試験結果の ΔT_{90} の経時変化を図4-11に示す。各温度水準でのS形とB形の試験結果はほとんど一致し、 ΔT_{90} の経時変化は含浸材の配合比に依存しないことがわかった。この結果から、 ΔT_{90} を用いた寿命推定方法は含浸材の配合比が異なるB形にも適用が可能であることが明らかになった。これは4.2.1項で示したように、含浸形陰極の経時変化は遊離Baがタングステン基板細孔を通過する際のKnudsen流により律速されているため、含浸材の配合比には依存しないものと考えられる。

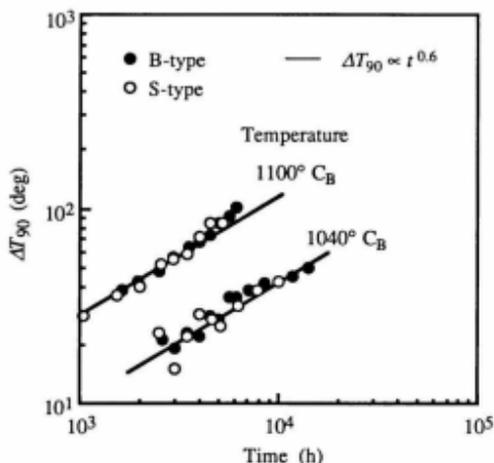


図4-11 ΔT_{90} の経時変化. S形とB形の比較

表面被覆を施した含浸形陰極に対しても含浸材消耗による寿命は、4. 2節で述べた寿命推定法を適用できる。この場合には、前章で述べた表面被覆の寿命より短い動作期間においてこの寿命推定を行う必要がある。ただし、次章で示すように、動作温度が 1100°C_B 以下では表面被覆の劣化はほとんど考慮する必要がない。

図4-12にはOs-Ru合金被覆を施した表面被覆含浸形陰極(MS-type)を電流密度 0.6 A/cm^2 にて連続動作し、 ΔT_{90} の経時変化を測定した結果を示す。結果は図4-10とはほぼ同様であり、この寿命推定法が表面被覆含浸形陰極にも適用できることがわかる。

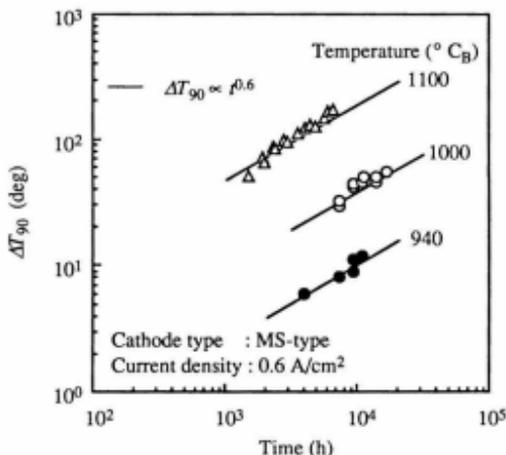


図4-12 表面被覆含浸形陰極の ΔT_{90} の経時変化。
陰極温度を変えた場合

図4-13には表面被覆含浸形陰極を陰極電流密度 $0.8, 2.0, 2.5\text{ A/cm}^2$ にて連続動作し、 ΔT_{90} の経時変化を測定した結果を示す。この場合も図4-10と同様の傾向を示し、電流密度を変えた場合にも T_{90} を用いる寿命推定法が適用できることがわかる。

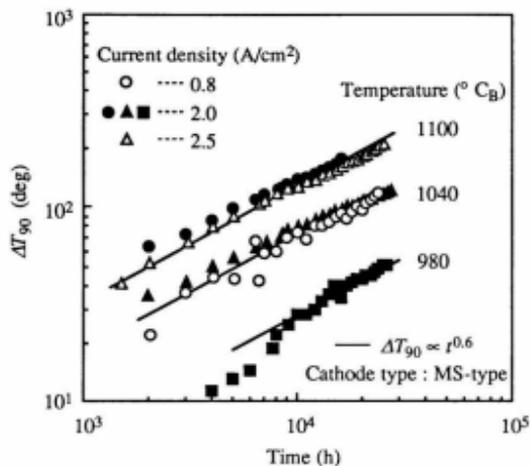


図 4 - 1 3 ΔT_{90} の経時変化. 陰極温度と電流密度を変えた場合

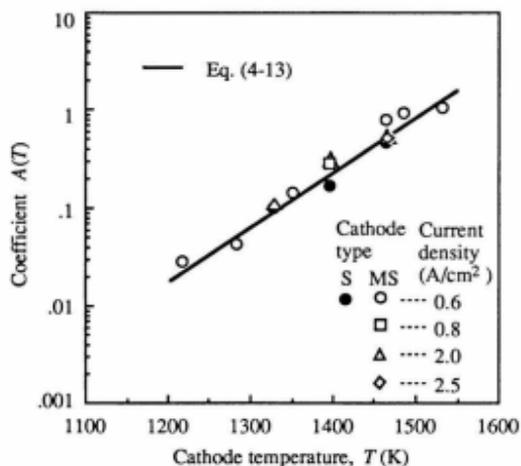


図 4 - 1 4 定数 $A(T)$ と陰極温度の関係

これらの結果から、式(4-12)における定数 $A(T)$ を求め、陰極温度に対して示したものを図4-14に示す。この図から明らかなように、 $A(T)$ は表面被覆の有無や電流密度の違いにかかわらず次の実験式で示される直線ではほぼ近似できる。

$$\ln A(T) = a \cdot T + b \quad , \quad (4-13)$$

ここで、 a 、 b は定数である。

陰極の劣化が進み、 T_{90} が連続動作している陰極温度 T と一致した時点では陰極電流が初期値の90%となるので、この時点を生寿命終了と定義している。この定義による寿命 t_0 は、 T_{90} の初期値を T_{90i} とすると、式(4-12)において ΔT_{90} が $T - T_{90i}$ と一致する時間であり、次式となる。

$$\ln t_0 = [\ln(T - T_{90i}) - a \cdot T - b] / \beta \quad (4-14)$$

これは表面被覆の有無にかかわらず成り立ち、電流密度を変えた場合にも成り立つ。この式(4-14)を T で微分し、極値を与える T を求めることにより寿命 t_0 が最大となる最適動作温度 T_{opt} が求められ、次式となる。

$$T_{opt} = T_{90i} + 1/a \quad (4-15)$$

この最適動作温度 T_{opt} にて陰極を動作させれば、寿命は次式で示される最大値 t_{max} となる。

$$\ln t_{max} = -(a \cdot T_{90i} + 1 + b + \ln a) / \beta \quad (4-16)$$

式(4-16)から明らかなように、最適動作温度に設定した場合には、この含浸材消耗による寿命は T_{90i} のみの関数となる。式(4-15)を式(4-16)に代入し、陰極温度を最適値 T_{opt} に

設定した場合の含浸材の消耗による寿命と陰極温度の関係を求めた結果を図4-15に示した。式(4-15)から明らかなように、 T_{op} は T_{90} により決まり、 T_{90} は陰極の種類と使用電流密度により決まる。陰極電流密度を高くすると温度制限領域から空間電荷制限領域に移行する温度が高くなるため T_{90} が高くなり、寿命が短くなる。また、表2-2に示したように、陰極基板金属に表面被覆を施すと T_{90} が低下するため寿命が長くなると考えられる。

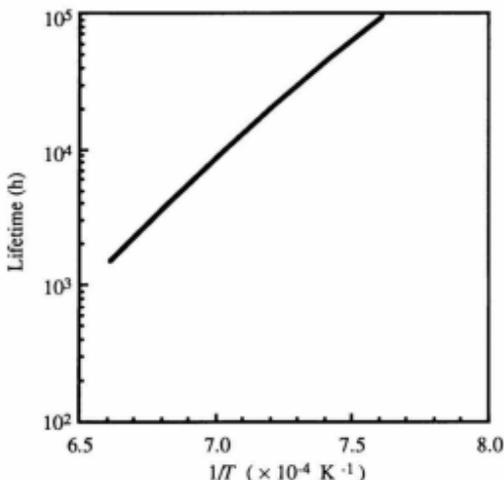


図4-15 含浸材消耗による寿命、
最適な陰極動作温度に設定されている場合

4.5 まとめ

長期間使用した含浸形陰極の断面分析を新しく考案した積算法により行った。劣化の原因となっているBa供給速度の低下は、含浸材の消耗により含浸材とタングステン基板の反応箇所が表面から遠ざかることにより生じ、その経時特性はBaがタングステン

基板中の細孔を通過する際に平均自由行程より小さい半径を有する筒中の流れである Knudsen流により律速されていることを明らかにした。

含浸材の消耗による寿命について、 T_{90} を用いた寿命推定法を提案した。Knudsen流による遊離Baの流出の律速と、陰極からのBa蒸発速度と陰極表面のBa濃度の経時変化の測定結果から理論的に計算した T_{90} の経時変化は実測値と良く一致した。この T_{90} の経時変化から寿命が推定できることを示した。この寿命推定法は含浸材配合比を変えた場合、表面被覆のある場合、陰極電流密度を変えた場合にも適用できることを示した。

これらの結果から、陰極温度と寿命の関係を定式化し、寿命が最も長くなる最適動作温度を明らかにすると共に、最適動作温度にて動作した場合の一般的な陰極寿命を示すことができた。

第4章の参考文献

- (1) N. Mita and K. Shimokawa: "Reliability improvement and evaluation of TWTs for communications satellites," in *Proc. 1986 International Symposium for Testing and Failure Analysis*, pp. 47-52, 1986.
- (2) N. Mita: "Degradation factors of a coated impregnated cathode," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 39, No. 9, pp. 2172-2175, 1992.
- (3) 三田長久, 下川清志: "含浸形陰極の劣化機構解析法," *電子情報通信学会論文誌 C-II*, Vol. J77-C-II, No. 12, pp. 585-590, 1994.
- (4) L. E. Davis, N. C. MacDonald, P. W. Plamberg, G. E. Riach and R. E. Weber: "Handbook of Auger electron spectroscopy," *Phys. Electron. Div., Perkin-Elmer Corp.*, p. 13, 1978.
- (5) A. M. Shroff, P. Palluel and J. C. Tonnerre: "Performance and life tests of various types of impregnated cathodes," *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 8, pp. 36-49, 1981.
- (6) G. L. Jones and J. T. Grant: "Determination of barium and calcium evaporation rates from impregnated tungsten dispenser cathodes," *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 16, pp. 25-39, 1983.
- (7) S. Dushman and J. M. Lafferty: "Science foundations of vacuum technique, second edition," John Wiley & Sons, Inc., pp. 87-88, 1962.

- (8) I. Brodie, R. O. Jenkins and W. G. Trodden: "Evaporation of barium from cathodes impregnated with barium-calcium-aluminate," *J. Electron Contr.*, Vol. 6, pp. 149-161, 1959.
- (9) L. D. Schmidt: "Adsorption of barium on tungsten: measurements on individual crystal planes," *J. Chem. Phys.*, Vol. 46, No. 10, pp. 3830-3841, 1967.

第5章 表面被覆含浸形陰極の寿命

本章では第3章、第4章で求めた表面被覆含浸形陰極の2種の寿命要因である「表面被覆の劣化」と「含浸材の消耗」による寿命を定量的に比較し、動作条件に応じた寿命予測を行う。進行波管(TWT: traveling wave tube)の設計を行う場合にはビーム集束比と陰極電流密度の最適化を行う必要があり、陰極電流密度と陰極寿命の関係が重要である。このため、5.1節においては、表面被覆含浸形陰極を使用する陰極電流密度に対応した最も寿命が長くなる最適動作温度に設定した場合の寿命推定を行う¹⁾。

衛星搭載用TWTでは、使用期間の7~15年間における信頼度をあらかじめ推定する必要がある。これまでこの表面被覆含浸形陰極の加速寿命試験の方法が確立していなかったため、この信頼度推定のためには、実動作で多数のTWTを長期間試験する必要があった。このため表面被覆含浸形陰極の加速試験方法を確立し、少数のTWTを短期間試験することにより信頼度を推定することが望まれていた。5.2節においては陰極電流密度を固定して、陰極動作温度を最適値より高めて設定した場合の寿命推定を行う。含浸材の消耗で寿命が決まる温度加速の範囲を求め、その範囲内で陰極温度2水準の加速試験を寿命終了まで実施し、含浸材消耗による寿命推定の実証も併せて行う²⁾。

5.1 最適動作温度における寿命予測

5.1.1 表面被覆の劣化による寿命

第3章では表面被覆が劣化を開始する時点を寿命と定義しており、これでは実際の寿命評価としては厳しすぎると考えられる。そこで、実用的な寿命の定義を検討した。Thomas等はOs-W合金の表面金属成分とそれを基板とする陰極の仕事関数の関係を考察している。その結果から、仕事関数が最低になるのは表面タングステン濃度が40%付近であり、30~60%の範囲では仕事関数はほぼ等しいという結果が得られている³⁾。

温度4水準にて表面被覆含浸形陰極の表面タングステン濃度を測定した結果を示した図3-6から実測値と理論値を図5-1に改めて示す。動作初期においてはタングステン濃度は最も仕事関数が低くなる40%程度であり、その後増加する傾向にある。文献(3)

からタングステン濃度60%までは表面金属成分に依存する仕事関数の変化はほとんど無いと考えられるため、実用的にはタングステン濃度60%を表面被覆劣化による寿命と考えることができる。

第3章で示したように、陰極表面のタングステン濃度の経時変化は表面被覆の一次元モデルから得られた理論式(3-3)で示される。これを図5-1に実線で示し、これが60%になる時間を表面被覆の劣化による寿命と定義した。

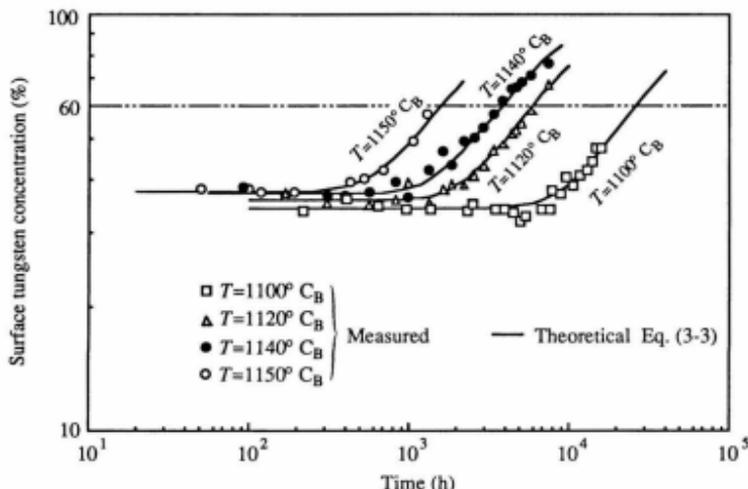


図5-1 陰極表面タングステン濃度の測定値と理論値

5. 1. 2 陰極電流密度と最適動作温度の関係

使用する陰極電流密度を増すと、空間電荷制限領域から温度制限領域へ遷移する温度が上昇する。図5-2には陰極電流密度 J_k と、陰極電流が空間電荷制限電流の90%になる陰極温度 T_{90} の初期値 T_{90i} の逆数の関係を実測した結果を示す。陰極の温度を T_{90i} にすると電子放射はほぼ温度制限領域となるので、 J_k と T_{90i} はRichardsonの式(4-9)の関係となる。従って、図5-2に示したように $1/T_{90i}$ と $\ln J_k$ の関係がほぼ直線となる。

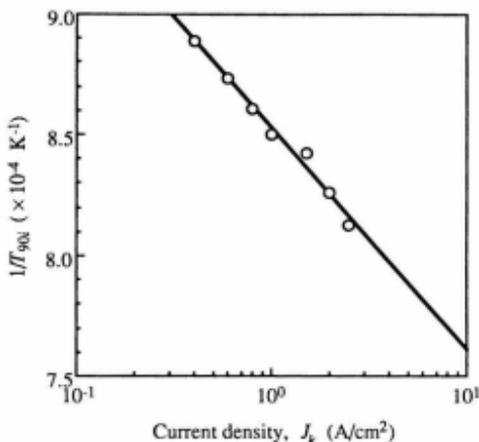


図 5-2 陰極電流密度と T_{90} の初期値 T_{90i} の関係

この関係から、使用する陰極電流密度に対して T_{90i} が定まり、第4章で求めたように式(4-15)から最適動作温度 T_{opt} が、式(4-16)から含浸材消耗による寿命が求められる。

図 5-2 の J_k (A/cm²)と T_{90i} (K) の関係は次式となる。

$$10^4 / T_{90i} = 8.53 - 0.915 \log(J_k) \quad (5-1)$$

この式を用いれば、 J_k の関数として最適動作温度と寿命を示すこともできる。

5. 1. 3 最適動作温度と寿命の関係

式(4-16)に式(4-15)を代入して得られる含浸材の消耗による寿命と陰極温度の関係を図 5-3 に実線で示した。陰極温度は式(4-15)で示す最適値 T_{opt} に設定されている場合であり、対応する陰極電流密度を上部に示した。使用する陰極電流密度 J_k に対して図 5-2 の直線から T_{90} の初期値 T_{90i} が求められ、式(4-15)から最適動作温度 T_{opt} が、式(4-16)から含浸材消耗による寿命が求められる。一方、表面被覆の劣化による寿命は図 5-1

に実線で示した式(3-3)が60%になる時間であり、得られた値を○にて図5-3に示し、その最小二乗法による近似直線を破線で示した。

図5-3において表面被覆の劣化と含浸材の消耗による2種の寿命要因を比較すると、最適動作温度が1500 K ($1/T = 6.67 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$)以下、すなわち使用電流密度が 42 A/cm^2 以下では表面被覆の劣化による寿命よりも含浸材の消耗による寿命の方が短い。つまり、陰極電流密度 42 A/cm^2 以下で使用する場合には表面被覆の劣化を考慮する必要はなく、含浸材の消耗により寿命が決まることがわかる。

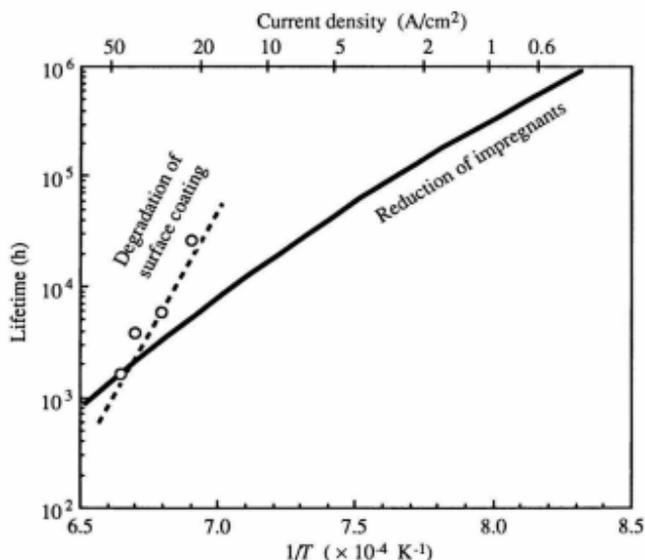


図5-3 表面被覆の劣化と含浸材の消耗による2種類の要因による寿命と陰極温度・電流密度の関係。

各電流密度に対して最適な動作温度に設定されている場合

5. 2 温度加速を行う場合の寿命推定

筆者等が開発してきた衛星搭載用TWTは、第6章で示すように、寿命性能を考慮して陰極電流密度を 0.6 A/cm^2 と低く設定してある。この陰極電流密度においては最適動作温度で動作させれば寿命は含浸材の消耗で決定される。この含浸材の消耗による寿命 t_s は第4章で示したように式(4-14)となる。

陰極電流密度を 0.6 A/cm^2 に固定し、陰極温度の逆数に対して式(4-14)を計算した結果を図5-4に実線で示した。陰極寿命は $T = 1210 \text{ K}$ ($1/T = 8.25 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$)で寿命が最大となり、最適動作温度の存在を示している。

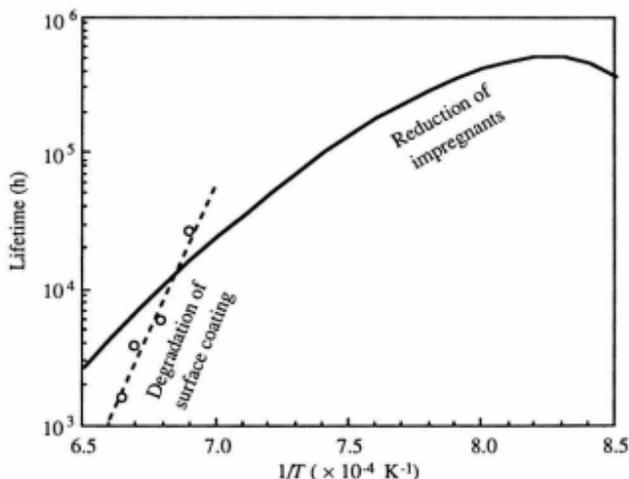


図5-4 温度加速した場合の表面被覆の劣化と含浸材の消耗による2種類の要因による寿命と陰極温度の関係。
陰極電流密度は 0.6 A/cm^2

表面被覆含浸形陰極は2種の寿命要因を持ち、通常使用する陰極温度付近では含浸材の消耗により寿命が決まっている。このため、陰極温度を最適値より上げて加速試験を行う場合には、寿命が含浸材の消耗により決まる領域であれば加速率の決定が容易である。前節で求めた表面被覆の劣化による寿命も破線により図5-4に併せて示した。この結果、約1460 K (1110° C_B[®]) 以下では寿命は含浸材の消耗により決まり、加速試験の実施が容易であることがわかる。

5.3 加速試験による寿命推定の実証

5.3.1 試験方法

実験に使用した陰極はタングステン基板の空孔率が約18%、含浸材が4BaO・CaO・Al₂O₃であり、その基板表面に厚さ約0.5 μmのOs-Ru合金(元素比3:1)を被覆した表面被覆含浸形陰極である。

表面被覆含浸形陰極はビーム試験管(BTT: beam test tube)に組み込んで試験を行った。このBTTはTWTと同じ電子銃とコレクタを直管で接続したものであり、陰極をTWTと同じ環境で動作させることができる。また、BTTの組み立て前の電子銃だけの状態で、ガラス球に封入して陰極温度とヒータ電力の関係を測定しておき、最終組み立て後の陰極温度はヒータ電力から換算して求めた。

分散を求めて信頼度を推定するため、連続動作する温度とBTTの数は、最も大きい加速が得られる1100° C_Bで16本、この温度と最適動作温度のほぼ中間である1000° C_Bで4本とした。

陰極電流密度が0.6 A/cm²となる条件で連続動作させ、定期的に電子放射特性の測定とディップ(dip)試験を行った。ディップ試験においてはヒータ電力を断って陰極温度が冷却していく際の陰極電流の変化を測定する[®]。このとき、ヒータ電力を切断してから陰極電流が初期値の90%となるまでの時間 P_{90} を求める。ヒータ電力を切断した直後では陰極温度はほぼ直線的に低下していくと考えられるので、 T_{90} の初期値 T_{90i} からの変化 ΔT_{90} は次式で与えられる。

[®] 本論文で使用している温度の単位 (° C_B) は光高温計で650 nmの光学フィルターを通して測定した輝度温度の値である。

$$\Delta T_{90} = (T - T_{90i})(P_{90i} - P_{90}) / P_{90i}, \quad (5-2)$$

ここで P_{90i} は P_{90} の初期値である。

5. 3. 2 試験結果

陰極電流が初期値の90%になる時点を寿命終了とし、陰極温度 1100°C_B のBTTについては寿命終了となるまで連続動作試験を行った。図5-5には陰極温度 1100°C_B にて連続動作したBTTの陰極電流経時変化の例を示す。最短寿命と最長寿命および中間の寿命が得られたBTTのデータを重ねて示した。陰極電流は初期値に対する百分率で示しており、ほぼ100%の定常値が続いた後に急激な低下が生じている。含浸材の消耗により仕事関数が増加し、陰極の動作が空間電荷制限領域から温度制限領域に移行した時点から急激な電子放射の低下が生じているものと考えられる。BTTの寿命は7000~22,000時間、平均16,000時間であった。

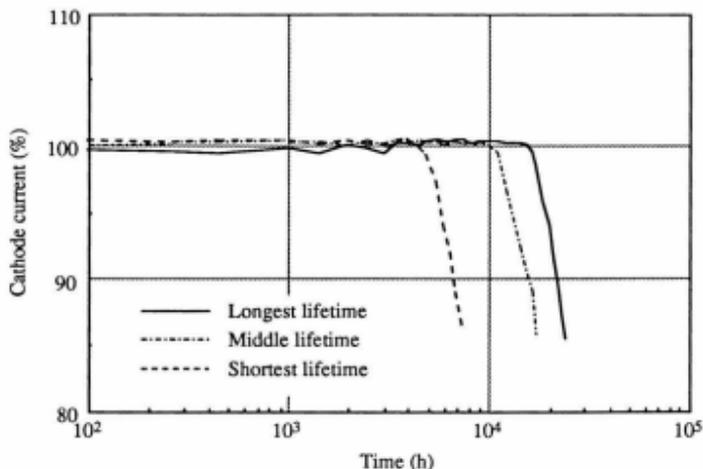


図5-5 陰極電流の経時特性。陰極温度は 1100°C_B であり、初期値を100%とした

図5-6には陰極温度 1000°C_n で連続動作したBTTの陰極電流の経時特性を示す。1本のBTTのみは陰極電流が低下して初期値の90%以下になっており寿命を求めることができたが、他のBTTは陰極電流の低下が全く見られない。この陰極電流の低下が見られないBTTについては T_{90} を用いた寿命推定を行った。ディップ試験により P_{90} を測定し、式(5-2)により求めた ΔT_{90} を時間に対して両対数で示した例を図5-7に示す。データは実線で示した $t^{0.6}$ に良くのっており、これを用いて寿命を推定した。図中 T は陰極動作温度を示し、破線で示した $T - T_{90i}$ に ΔT_{90} が一致する時点が寿命終了であり、これは陰極電流が初期の空間電荷制限電流の90%になる時点と等価である。この推定結果を含めると、 1000°C_n 動作でのBTTの寿命は76,000~200,000時間であり、平均140,000時間であった。

5. 3. 3 理論と実験の比較・検討

前節で得られた加速した場合の寿命の計算値に、ここで得られた寿命の実測値を図5-8に併せて示す。分散 σ も併せて示しており、得られた寿命は含浸材の消耗による寿命の計算値と良く合っている。この寿命の計算値は T_{90} を用いた寿命の推定値に基づくものであるが、陰極温度 1100°C_n の水準の実測値は実際に陰極電流が90%に低下する寿命を求めたものであり、両者は良く合っている。実寿命を求めた試料数は大きく、 T_{90} を用いて推定した寿命は実際の寿命を示すものといえる。陰極温度 1000°C_n の水準で得られた寿命は1本を除いては T_{90} を用いた推定値であるが、計算値と良く合っている。このことから計算値の温度依存性が正しいこともわかる。

1100°C_n の水準で試験したBTTの寿命は含浸材の消耗により決まっており、表面被覆の劣化による寿命よりも短くなっている。このことから、陰極基板表面のタングステン濃度が60%になる時点と仮定した表面被覆の劣化による寿命の定義も妥当であることがわかる。これらのことから、陰極電流密度 0.6 A/cm^2 の場合は最大 1100°C_n までの加速試験であれば加速率の推定が容易となることも併せて確認することができた。

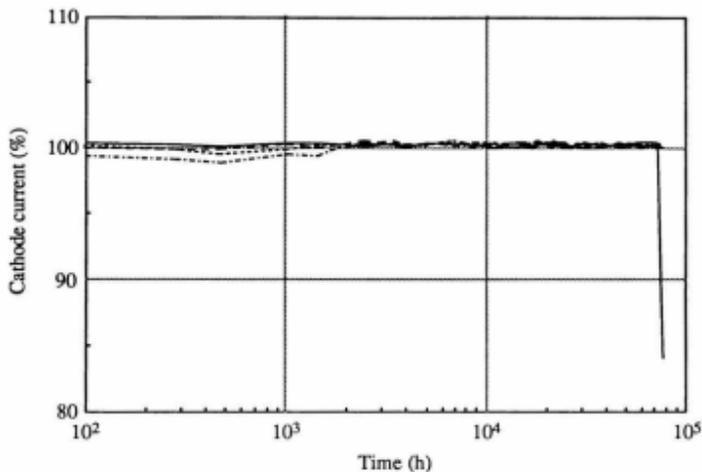


図5-6 陰極電流の経時特性. 陰極温度は 1000°C_b であり、初期値を100%とした

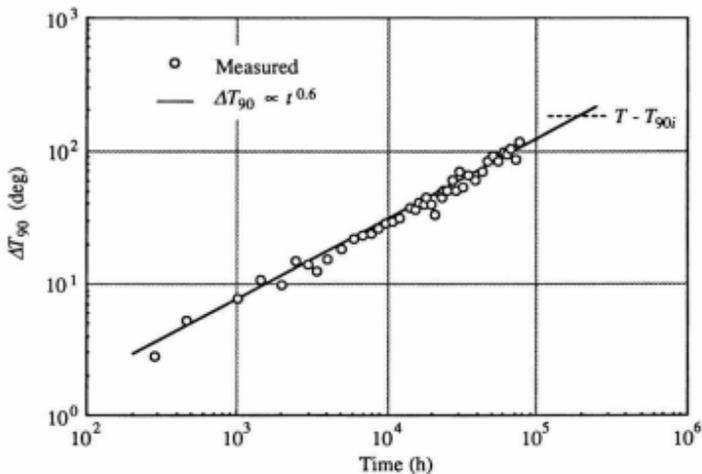


図5-7 ΔT_{90} の経時変化. 傾斜0.6の直線により寿命が推定できる

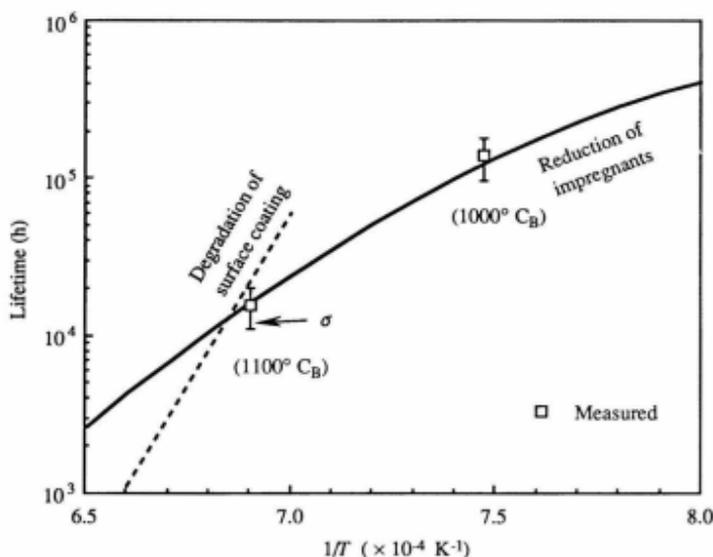


図5-8 加速試験により得られたBTTの寿命の理論値との比較

5.4 まとめ

表面被覆含浸形陰極には「含浸材の消耗」と「表面被覆の劣化」の2種の寿命要因があり、これらの温度依存性を定量的に比較した。表面被覆の劣化による寿命については、実用上有効な陰極基板の表面タングステン濃度が60%となる時点をも寿命と定義した。この結果、陰極電流密度に応じた最適動作温度で使用する場合、陰極電流密度約42 A/cm²以下では表面被覆の劣化を考慮する必要がなく、含浸材の消耗により寿命が決まることを明らかにした。

次に、表面被覆含浸形陰極の加速寿命試験とその応用について検討した。含浸材の消耗による寿命については、 T_{90} を用いた推定に基づく理論値は陰極電流が90%以下になるまで実施した連続動作試験結果と一致し、理論が正しいことを証明した。表面被覆の

劣化による寿命については、陰極基板の表面タングステン濃度が60%となる時点との寿命の定義が実用上有効であることを示し、試験結果により確認することができた。

これら2種の寿命の計算結果から、最も寿命が長くなる最適動作温度付近では寿命は含浸材の消耗で決まり、高温領域では表面被覆の劣化で寿命が決まることを示した。このため、温度加速は含浸材の消耗で寿命が決まる範囲に設定すれば加速率の推定が容易である。例として、陰極電流密度が 0.6 A/cm^2 においては 1100°C_g が最大加速を与え、そのとき加速率は31倍が得られる。

第5章の参考文献

- (1) N. Mita: "Degradation factors of a coated impregnated cathode," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 39, No. 9, pp. 2172-2175, 1992.
- (2) N. Mita: "An accelerated life test method for highly reliable on-board TWTs with a coated impregnated cathode," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 41, No. 7, pp. 1297-1300, 1994.
- (3) R. E. Thomas and J. W. Gibson: "Work function variation versus alloy concentration for dispenser cathodes," *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 29, pp. 49-66, 1987.
- (4) M. G. Bodmer, J. P. Laico, E. G. Olsen and A. T. Ross: "The satellite traveling-wave tube," *Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 42, pp. 1703-1749, 1963.

第6章 衛星搭載用進行波管の高性能化と高信頼化

衛星搭載用進行波管(TWT: traveling wave tube)は長寿命と高信頼度が必要であり、衛星打ち上げ前に寿命・信頼度を把握しておく必要がある。しかし、従来この信頼度については、実績データに基づく故障率の推定がなされているだけである^{6),7)}。また、主として使われている表面被覆含浸形陰極⁸⁾についても寿命予測モデルの提案が行われているのみであり^{6),9)}、陰極の劣化理論に基づいたTWTの高信頼化設計や選別方法については十分な検討がなされていなかった。

本論文において、前章までに表面被覆含浸形陰極の寿命要因を解明し^{6),7)}、陰極電流密度と寿命の関係を明らかにした。この結果を用いて、特に長寿命・高信頼度が必要な衛星搭載用TWTでは陰極電流密度を 0.6 A/cm^2 と低くした設計を行った。6. 1節においては通信衛星3号(CS-3)、技術試験衛星6号(ETS-VI)、次期通信衛星(N-STAR)用に順次開発してきた20 GHz帯衛星搭載用TWTの高性能化について述べる。6. 2節では前章までに示した表面被覆含浸形陰極劣化理論に基づき、TWTの高信頼化設計と選別方法を確立し、実績データにより長寿命・高信頼性能を実証した結果について述べる。陰極電流密度と寿命の関係から陰極電流密度とビーム集束比の最適化を行って高信頼化した。また、 T_{90} の経時変化による寿命予測方法と定式化した温度と寿命の関係を用いて長寿命陰極品種の選択を行うと共に短寿命品を取り除く選別を行い、長寿命化した。更に、寿命が最も長くなる最適陰極動作温度に設定することによっても長寿命化をはかった。また、明確化した温度加速条件と加速率を用いた加速寿命試験結果から寿命分布を予測し、CS-3の衛星軌道上での6年間にわたる実運用データと併せて解析することにより7~10年間の故障率1000 fit (failure unit: 10^9 時間当たりの故障率) 以下という高信頼性能を実証することができた。

更に、6. 3節では20 GHz帯衛星搭載用固体電力増幅器(SSPA: solid state power amplifier)の開発結果とTWT増幅器との比較について述べる。表面被覆含浸形陰極の劣化理論を応用してTWTの信頼度を十分高めた結果、4 W以上の出力を必要とする場合にはSSPAよりTWT増幅器の方が有利であることを明らかにした。

6. 1 衛星搭載用進行波管の高性能化

TWTの重量、消費電力および故障率は衛星搭載中継器において大きな割合を占めるため、TWTの軽量化、高効率化および高信頼化は搭載中継器の性能向上のために極めて重要である。そこで、20 GHz帯、出力10 W級の高効率、軽量化した衛星搭載用TWTの研究開発を行い、1988年に打ち上げられた通信衛星3号(CS-3)用として2段コレクタにて重量790 g、効率30%を実現し⁽⁹⁾、1994年に打ち上げられた技術試験衛星6号(ETS-VI)⁽¹⁰⁾用として2段コレクタにて重量640 g、効率33%を実現した⁽¹¹⁾。更に、1995年打ち上げ予定の次期通信衛星(N-STAR)用として重量590 g、効率38%の3段コレクタTWTを実現した⁽¹²⁾。前章までの表面被覆含浸形陰極の劣化理論を応用してこれらのTWTは高信頼化されており10年以上の寿命を得ている。その高信頼化方法と長寿命・高信頼性能の実証結果については6. 2節で詳細を述べる。

6. 1. 1 通信衛星3号搭載用進行波管の設計

通信衛星2号(CS-2)搭載用TWTは出力5 W、効率25%であり、5年の使用期間を無故障にて1988年に動作を完了した。CS-3搭載用TWTは出力10 W以上、使用予定期間を7年以上とし、効率を改善することを目標にして設計を行った。このCS-3搭載用TWTの概略断面図を図6-1に示す。

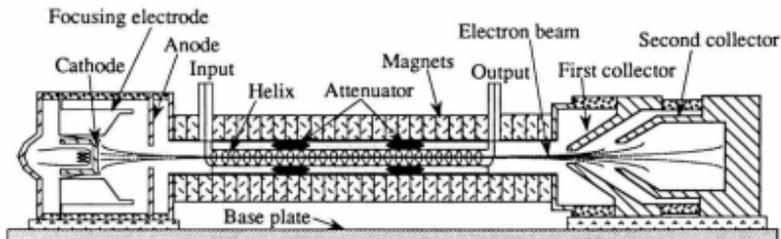


図6-1 通信衛星3号搭載用進行波管の概略断面図

周波数17.7～19.3 GHzにおいて出力10.5 W以上を目標に設計しており、ヘリックス回路の設計の結果、ビーム電流28 mA、ヘリックス平均直径約1 mmが得られた。ヘリックス材料には厚さ0.15 mm、幅0.25 mmのモリブデンテープを使用した。また、入力電力をCS-2搭載用TWTと同じく-8 dBm^注としたため、飽和出力時の利得は約50 dBである。このように利得が高いため、ヘリックス回路は2箇所には減衰器(attenuator)を設けて発振を防止している。

CS-2搭載用TWTでは酸化陰極が用いられていたが、表面被覆含浸形陰極を採用して陰極電流密度を0.6 A/cm²と低く設定することにより、次節で述べるように長寿命性能を得ている。電子ビーム集束用の周期磁石にはCS-2搭載用TWTにて実績のある1-5系サマリウムコバルト(SmCo₅)磁石を採用した。

TWTの消費電力の大部分を占めるのはコレクタ部である。このため、コレクタを多段電位低下型として電子ビームを速度別に捕捉することによりコレクタ消費電力を低減している。ただし、コレクタ段数を増すとTWTと電源の重量が増してしまう。コレクタ段数に対する効率と重量の関係を検討した結果、単位重量当たりの効率が最も大きい2段コレクタを採用した⁹⁾。

6. 1. 2 技術試験衛星6号搭載用進行波管の設計

TWTの信頼性を確保するため、実績のあるCS-3搭載用2段コレクタTWTの基本構造を継承した。更に、以下で述べる新技術を用いてETS-VI用の2段コレクタTWTの軽量化、高効率化、高信頼化を実現した。このTWTの概略断面図を図6-2に示す。

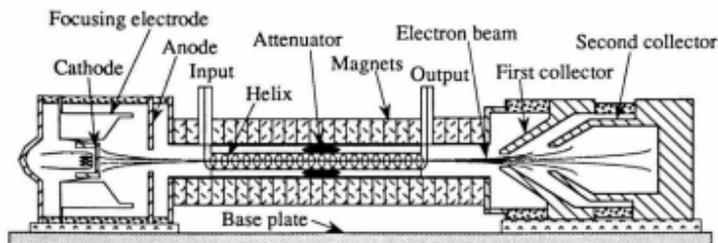


図6-2 技術試験衛星6号搭載用進行波管の概略断面図

^注 高周波電力の単位(dBm)は1 mWを基準とするdB表示である。

(1) 陰極

陰極にはCS-3搭載TWT用として選択した最も長寿命が得られる表面被覆含浸形陰極を使用した。この陰極の加熱ヒータ部の体積をCS-3用の1/2以下に縮小し、輻射遮蔽を増して、陰極加熱電力をCS-3用の80%以下に低減した。また、6.2節で詳細に述べるように陰極電流密度を 0.6 A/cm^2 と低く設定して高信頼性能を得ている。

(2) 集束磁石

電子ビーム集束用永久磁石として、磁束密度の可逆温度係数が $-0.02\%/^{\circ}\text{C}$ である2-17系サマリウムコバルト(Sm_2Co_7)磁石を新たに開発した^{03,04}。この温度係数は従来の1-5系サマリウムコバルト(SmCo_5)磁石の1/2である。この低温度係数磁石を用いることにより、ヘリックス電流の温度依存性を大幅に改善することができた。

(3) 遅波回路

CS-3搭載用TWTのようにTWTの飽和利得が40 dB以上になると、発振防止のためのヘリックス回路の減衰器が2箇所が必要となる。このため、飽和利得が40 dB以下となるように利得を設定することにより減衰器を1箇所とし、ヘリックス長すなわち管長を大幅に短縮し、重量の低減をはかった。

6.1.3 次期通信衛星搭載用3段コレクタ進行波管

1995年打ち上げ予定の次期通信衛星(N-STAR)に搭載することを目的に、ETS-VI用2段コレクタTWTを基本として、更に高効率化と軽量化を進めた3段コレクタTWTを開発した。本TWTは効率が38%と大幅に向上しており、コレクタ段数が増加しているにもかかわらず軽量化することができた。このTWTの概略断面図を図6-3に示した。

(1) 3段コレクタ

TWT用電源の軽量化技術が進歩し、CS-3搭載用TWT設計時に比べて約1/2の重量となっている⁰⁵。このためコレクタ段数と効率および全重量の関係を見直した結果、3段が最適であるとの結果を得た。このため、セラミック円筒外囲器の内部に3種のコレクタ電極を取りつけた新しい構造の3段コレクタを開発した。これを用いることにより高効率化すると共に軽量化することを可能にした。

(2) 集束磁石と電子銃

前記低温度係数磁石の採用とヘリックス長の短縮、ならびに電子銃電極形状の改良により電子ビーム透過特性を改善した。この結果、ヘリックス電流増を伴わずにヘリッ

ス内径を約10%縮小することができ、効率を改善すると共に、CS-3用TWTの2倍に広帯域化し、Ka帯の全周波数帯域(17.7~21.2 GHz)で使用可能とした。また、このTWTについても陰極電流密度は 0.6 A/cm^2 以下と低く設定して長寿命性能を得ている。

(3) 進行波管の底板

化学的に活性なマグネシウム合金の表面処理方法を確立し、TWTの底板材料として使用可能とした。これにより軽量化を達成した。

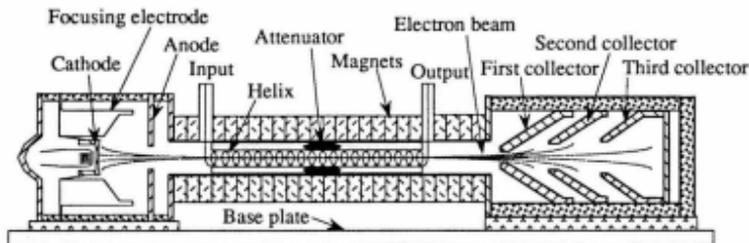


図6-3 次期通信衛星N-STAR搭載用進行波管の概略断面図

6. 1. 4 進行波管の性能

図6-4、図6-5にはCS-3用、ETS-VI用、N-STAR用TWTの重量と消費電力の内訳を比較して示す。N-STAR用3段コレクタTWTはマグネシウム合金の底板を用いており、他のTWTは2段コレクタであり、アルミニウム合金の底板を用いている。また、図6-5においては比較のため、出力11.7 Wの場合に消費電力を換算し、CS-3用TWTの全消費電力を100%として表示した。

ETS-VI用TWTは管長の短縮による軽量化の効果が大きく示されており、N-STAR用TWTは新構造の3段コレクタによる消費電力低減の効果が大きい。また、マグネシウム合金により軽量化された底板を除いた本体部分においても、コレクタ段数が増したにもかかわらず軽量化されている。

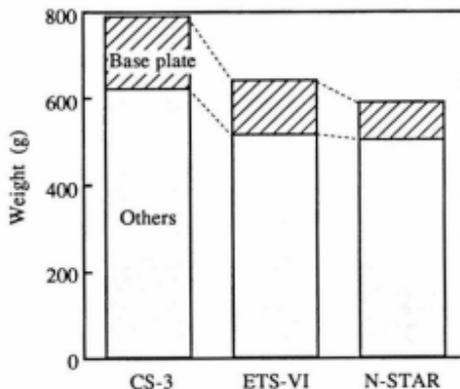


図6-4 進行波管の重量比較. N-STAR用進行波管の底板はマグネシウム合金、他の進行波管の底板はアルミニウム合金

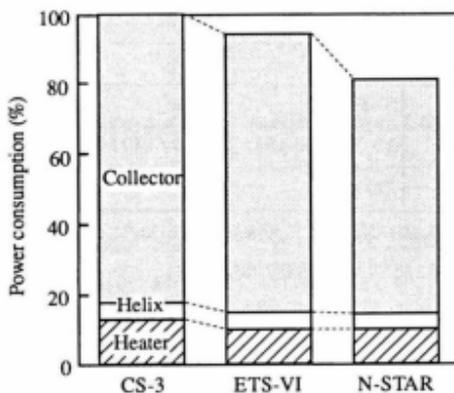


図6-5 進行波管の消費電力の比較. 出力11.7 Wの場合に換算し、CS-3用進行波管の消費電力を100%とした

代表的な電気的特性を表6-1に示す。利得偏差や三次混変調歪を小さく保ちながら、高効率化と軽量化が達成できている。2段コレクタのCS-3用TWTは効率30%、重量790g、ETS-VI用TWTは効率33%、重量640gであり、3段コレクタのN-STAR用TWTは効率38%、重量590gを実現している。

表6-1 進行波管の代表的な特性

進行波管の種別	CS-3用TWT	ETS-VI用TWT	N-STAR用TWT
周波数	18.4 GHz	18.4 GHz	21.0 GHz
出力電力	10.5 W	10.5 W	11.7 W
ビーム電流	28 mA	26 mA	25 mA
ヘリックス電圧	4.9 kV	4.9 kV	4.9 kV
ヘリックス電流	0.4 mA	0.4 mA	0.4 mA
消費電力	35 W	32 W	31 W
総合効率	30%	33%	38%
三次混変調歪*	-20 dBc [†]	-20 dBc	-23 dBc
飽和利得	50 dB	37 dB	37 dB
利得偏差 (飽和出力)	0.3 dB / 100 MHz	0.2 dB / 240 MHz	0.2 dB / 240 MHz
重量	790 g	640 g	590 g

*: (標準入力電力 - 13 dB)の電力にて周波数差 5 MHzの2波を入力

†: dBcは信号(carrier)に対する歪み強度のdB表示

以下ではN-STAR用TWTの詳細な電気的特性について述べる。図6-6には代表的な温度特性を示す。衛星搭載用TWTは底板から伝導により冷却するので、温度は底板の温度を示している。低温度係数磁石を用いることによりヘリックス電流と消費電力の温度変化が非常に小さく抑えられている。

図6-7には入力電力に対する出力電力、総合効率、ヘリックス電流の関係を示す。日本での衛星通信においてはパルス動作が主であり、飽和点において効率が高いことが

重要である。しかし、直線増幅器として使用される可能性もあるため、入力電力が低い場合の直線性も重視しており、このTWTは入力電力が低いところで良好な直線性を示している。効率は出力の増加に伴って向上し、飽和点付近で最大値38%を示している。ヘリックス電流は0.4 mAと小さく、更に出力電力の変化によるヘリックス電流の変動も非常に小さい。これらはTWTの高い信頼性と安定性を示す重要な指標である。

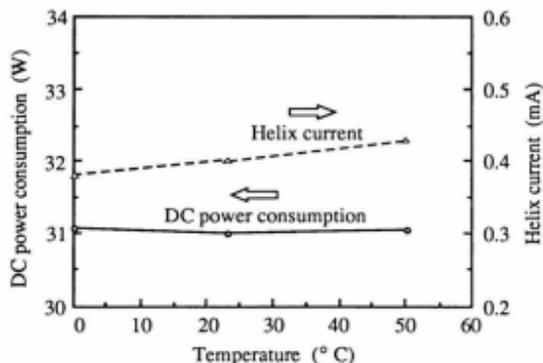


図6-6 進行波管の温度特性、横軸は進行波管の底板の温度

図6-8には飽和出力の周波数特性を示す。出力偏差は1 GHz以上の帯域にわたって小さく、ヘリックス内径を約10% 縮小したことによりKa帯の上端である21.2 GHzまでこのようなすぐれた周波数特性が得られるようになった。通信衛星ではTWTを100 MHzから200 MHzの周波数チャンネルで使用するため、本TWTは同調を変えることなく数個の周波数チャンネルで使用することが可能である。

本TWTは温度試験、ランダム振動試験、熱真空試験等の環境試験においても変化は非常に小さい。また、次節で詳細に述べるように、最適な陰極温度設定と選別の実施により、10年以上の寿命を有することが推定できている。これらのことから、このTWTは衛星搭載用として十分な高信頼性能を有していることがわかる。

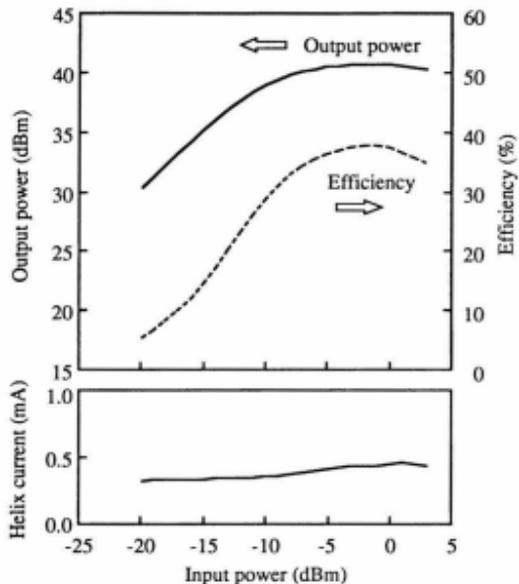


図 6-7 進行波管の入力電力に対する特性変化

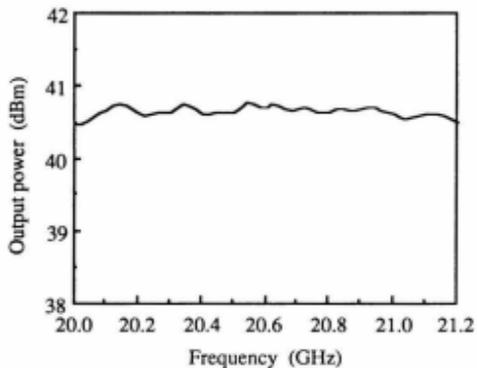


図 6-8 飽和出力の周波数特性

6. 2 衛星搭載用進行波管の高信頼化とその実証

本節で述べる高信頼化手法は前節で述べたCS-3、ETS-VI、N-STAR用TWTすべてに共通しており、CS-3搭載用TWTを例にとり、陰極電流密度と電子ビーム集束比の最適化、陰極の最適動作温度設定、更に陰極の劣化モデルに基づいた選別を行い高信頼化する方法を示す⁶⁹。また、加速試験による寿命分布の推定を示し⁷⁰、更に長寿命・高信頼化の手法を適用して製造したCS-3搭載用TWTの衛星軌道上データを用いて高信頼性能を実証する。また、この実証データと加速試験により得られた寿命分布とを複合して評価することにより使用期間中の故障率分布を予測できることを併せて示した。

6. 2. 1 進行波管の信頼性設計

前節で述べたように、CS-3搭載用TWTは周波数17.7~19.3 GHzにおいて出力10.5 W以上を目標に設計した。ヘリックス回路の設計の結果、陰極電流28 mA、ヘリックス平均直径約1 mmが得られた。この電気的特性を満たしながら、7年間1000 ftの目標信頼度を得るための長寿命・高信頼化方法について述べる。

(1) 長寿命陰極品種の選択

CS-2搭載用TWTでは酸化陰極を使用していたが、CS-3用では陰極電流密度を1 A/cm²程度に設定しても目標の信頼度を得ることができるようにするため、含浸形陰極を採用することとした。この陰極には第2章で述べたように含浸材料、陰極基板の空孔率、陰極基板の表面被覆の違いにより多数の品種が存在するが、その中から衛星搭載用として実績のある4品種を取り上げて、最も寿命が長い品種を選定した。この含浸形陰極では陰極電流が空間電荷制限電流の90%に低下する陰極温度 T_{90} の初期値 T_{90i} を用いて寿命 t_{90} が式(4-16)で与えられる⁷¹。この式から T_{90i} が小さいほど寿命は長くなるので、 T_{90i} が最も小さい品種を選べばよい。選んだ品種はタングステン基板の空孔率18%、含浸材4BaO・CaO・Al₂O₃、陰極基板表面被覆Os-Ru合金の表面被覆含浸形陰極である。

(2) 陰極電流密度と集束比の最適化

電子銃はPierce銃であり、そのビーム集束比 $(r_e/r_b)^2$ (r_e :陰極径、 r_b :ビーム径)は陰極の動作条件を決める重要な因子である。このビーム集束比を大きくすると陰極劣化に起因するビーム径の増大、ヘリックス電流の増加が生じやすくなり、寿命が短くなる⁷⁰。逆にビーム集束比を小さくすると陰極電流密度が高くなり陰極寿命が短くなる。

前節で選んだ表面被覆含浸形陰極は2種の寿命要因を持ち、使用電流密度と寿命の関係はすでに求めており、図5-3に示してある。この図から陰極電流密度 42 A/cm^2 以下では含浸材の消耗により寿命が決まることがわかる。

使用期間7年間における目標信頼度が1000 fitであり、打ち上げ前の試験期間も考慮して70,000時間の間、故障率1000 fit以下を目標とした。陰極の摩耗に基づく故障分布は形状パラメータ $m \approx 3$ のWeibull分布⁸⁾を示す⁹⁾。この摩耗故障による使用期間内の故障率は、6、2、3項において複合Weibull分布の検討結果により明らかにするように、偶発故障分布の1000 fitに相当する故障率を越えてはならない。この結果、70,000時間において累積故障率を7%以下とする必要がある。この場合、摩耗故障が $m = 3$ のWeibull分布であればその平均寿命は150,000時間以上が必要である¹⁰⁾。実際には4倍の余裕を持たせて600,000時間の陰極寿命が得られるように、図5-3から陰極電流密度を 0.6 A/cm^2 とした。このときビーム集束比は24となり、これはCS-2搭載用TWTの集束比の約60%であり更に安定な経時特性を期待できる¹¹⁾。

(3) 陰極の最適動作温度設定

含浸形陰極にはその寿命が最も長くなる最適動作温度 T_{opt} が存在する¹²⁾。この最適動作温度は式(4-15)で示したように T_{90} に定数 $1/a$ を加えた値である。

CS-3用TWTでは、陰極と集束電極のみを組み立てた電子銃組立をガラス球に組み込んで、ヒータ電力と陰極温度の関係をあらかじめ測定した。TWTに組み立てた後に陽極電圧を所定の値としてヒータ電力と陰極電流の関係を測定し、陰極電流が所定の値の90%になるヒータ電力を求める。このヒータ電力に対応する陰極温度が T_{90} である。この T_{90} に $1/a$ を加えた T_{opt} を各TWTごとに決定し、陰極温度が T_{opt} となるヒータ電力を求めて、以降そのヒータ電力で使用する事とした。この結果、すべての陰極は最適動作温度で使用されるため、長寿命が期待できる。

(4) 選別方法

陰極温度を最適値に設定した場合には陰極寿命は式(4-16)で示すように T_{90} で決定される。この関係を用いて短寿命品を除く選別を行った。最低寿命は70,000時間であればよいが、信頼度を高めるため T_{90} の選別規格は製造実績を考慮した可能な限り低い値であ

⁸⁾ 図6-10に示すWeibull分布図において、傾斜 m を形状パラメータと呼ぶ。 $m > 1$ の場合は摩耗故障型の寿命分布となり、 $m = 2 \sim 3$ 以上では正規分布に近い。 $m = 1$ の場合は指数分布となり、偶発故障型の寿命分布となる。

る $880^{\circ}\text{C}_g^{\text{th}}$ 以下とした。この T_{90} の規格値に相当する寿命は図5-3から約200,000時間であり、これにより選別すれば高い信頼度を期待することができる。

図6-9に示すように、 T_{90} の初期値 T_{90} からの変化量 ΔT_{90} は時間 t に対して両対数図で直線的に変化する⁽⁷⁾。陰極温度は最適値である T_{opt} に設定してあるので、式(4-15)から ΔT_{90} が $1/a$ に到達した時点で陰極電流が初期の空間電荷制限電流の90%となり、寿命終了となる。上で示した T_{90} を用いた選別(screening)は、 T_{90} が 880°C_g 以下の場合には200,000時間において ΔT_{90} が $1/a$ より小さいということであるが、念のため連続動作を行ってこれを確認するのが ΔT_{90} による選別である。具体的には、図6-9に示すように目標最低寿命を200,000時間とし、合計3000時間の動作を行った場合の ΔT_{90} の規格を6度以下として選別を行った。

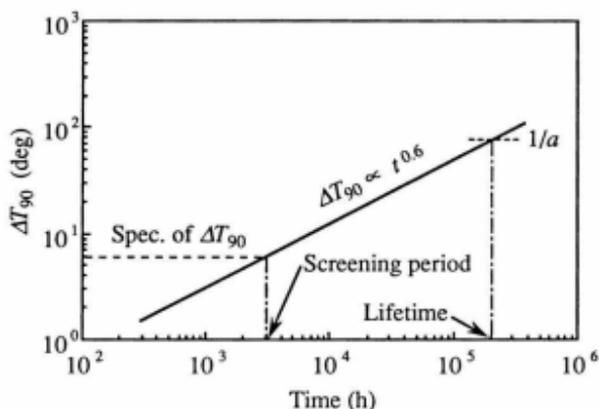


図6-9 ΔT_{90} の経時変化による選別

6. 2. 2 加速試験による寿命分布の予測

この項では陰極温度を最適値より高く設定して動作させた温度加速試験により得られた結果を示す⁽⁷⁾。表面被覆含浸形陰極は最適動作温度付近では含浸材の消耗で寿命が決

⁽⁷⁾ 本論文で使用している温度の単位 ($^{\circ}\text{C}_g$) は光高温計で650 nmの光学フィルターを通して測定した輝度温度の値である。

まり、高温領域では表面被覆の劣化で寿命が決まる。このため、加速温度を含浸材の消耗で寿命が決まる範囲に設定すれば加速率の決定が容易である。

この含浸材の消耗による寿命 t_0 は式(4-14)で与えられる。この寿命 t_0 の最適設定温度における値と加速温度における値との比から加速率が得られる。陰極電流密度は 0.6 A/cm^2 であり、この場合は 1100°C_B が最大加速を与える陰極温度であり、加速率は31倍である。

加速試験はビーム試験管(BTT: beam test tube)に表面被覆含浸形陰極を組み込んで行った。このBTTはTWTと同じ電子銃とコレクタを直管で接続したものであり、陰極をTWTに組み込んだ場合と同じ環境で動作させることができる。温度水準と試料数は、最大加速を与える 1100°C_B で16本、この温度と最適動作温度のほぼ中間である 1000°C_B で4本とした。

陰極温度を 1100°C_B と 1000°C_B に設定したBTTの陰極電流経時変化の測定結果は図5-5と図5-6にそれぞれ示した。陰極電流が初期値の90%になる時点を寿命終了とし、陰極電流が初期値の90%にまで低下していないものは図5-7に示した T_m を用いた推定方法により寿命を求めた。得られた寿命に加速率を乗じたものが最適動作温度における推定寿命である。このようにして推定されたBTTの寿命のWeibull分布を図6-10に示す。ここで白丸は 1100°C_B 、黒丸は 1000°C_B の試験結果から求めたものである。傾斜約3.2の直線によくのっており、摩耗故障の分布を示している。

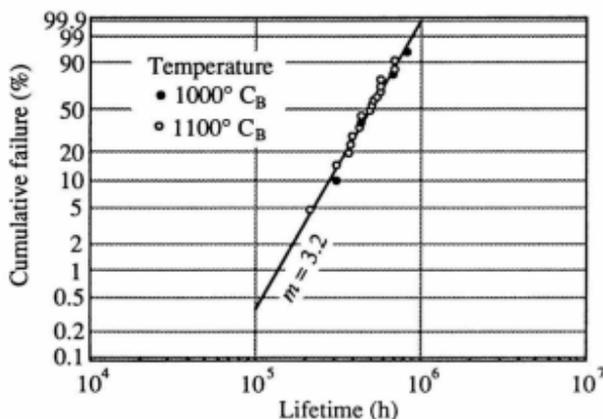


図6-10 加速試験から推定されたBTTの寿命のWeibull分布

6. 2. 3 衛星軌道上データによる信頼度の推定

2機のCS-3に搭載されたTWTはCS-3aについては1988年3月17日からCS-3bについては1988年10月13日から動作を開始している。各衛星に現用10本、予備5本のTWTが搭載されており、現在に至るまで合計20本のTWTが約6年の間軌道上で連続動作している。

このTWTの動作状態を監視するため、ヘリックス電流や出力電力等の遠隔測定信号を受信している。このうち出力電力の遠隔測定信号は動作初期の性能確認試験のためには役立つが、その後実際に運用されている場合には入力レベルが大幅に変化しているので、どの状態の電力値を示しているのかが判断できない。このため、TWTの劣化の指標としてはヘリックス電流の遠隔測定信号を用いている。20本のTWTのヘリックス電流は極めて安定で、動作初期からの増加分は最大が0.07 mA、最小が-0.02 mA、平均で0.02 mAである。このうち最大の増加を示している2本のTWTのヘリックス電流増加分の経時変化を図6-11に示した。この増加傾向が続いたとしても設計寿命7年間での増加分は0.1 mA以下が予想される。このヘリックス電流の増加分は2 mA程度まで許容できるので、20本のTWTは極めて安定に動作を続けているということが出来る。半導体素子を用いた増幅器を宇宙で使用する場合は放射線による損傷が問題となるが、TWTでは静止軌道上で照射される程度のエネルギーの放射線によって損傷する部分は

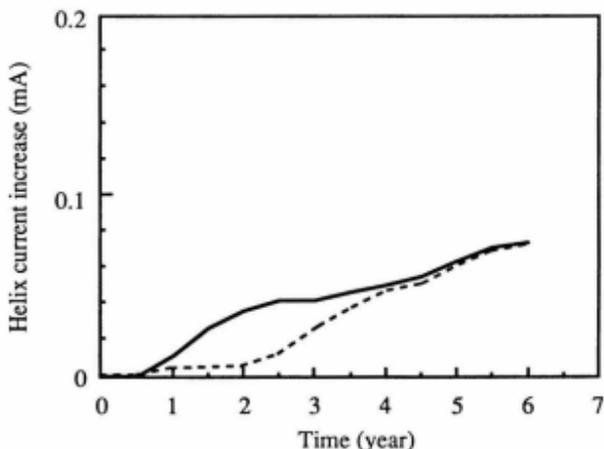


図6-11 CS-3搭載進行波管のヘリックス電流増加分経時変化

存在しない。実際上記の遠隔測定信号データにおいても放射線照射による劣化は観測されていない。これらのことから、CS-3搭載用TWTの1994年11月1日現在までのコンポーネント時間は1,111,200 hであり、故障数は0である。信頼水準60%における故障率の上限推定値は825 fitとなる⁽²¹⁾。

ここで得られた偶発故障(random failure)による累積分布関数 F_1 と前項で得た摩耗故障(wear-out failure)による累積分布関数 F_2 を図6-12に併せて示す。偶発故障と摩耗故障が混合して生じる場合、累積分布関数 F は次式で示す混合Weibull分布となる⁽²⁰⁾。

$$F = p_1 \cdot F_1 + p_2 \cdot F_2, \quad (6-1)$$

ここで $p_1 + p_2 = 1$, $p_1, p_2 > 0$ である。

この p_1 を0.2, 0.5とした計算結果を図6-12に併せて示した。偶発故障と摩耗故障がどのような比率で発生するのかは推定できないので、最悪値としては、所要の時間において F_1 と F_2 の大きい方を考えておけばよい。この結果、偶発故障と摩耗故障の両者を考慮しても使用期間7年間に於いて目標とした故障率1000 fit以下を達成していることがわかった。また、この図から本節で述べた高信頼性設計を行えば、次期通信衛星(N-STAR)で必要な10年間の使用期間においても1000 fit以下の高い信頼度が得られることもわかる。

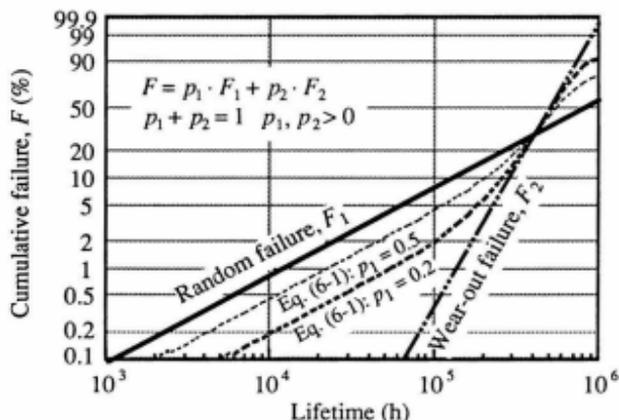


図6-12 推定された混合Weibull分布

6. 3 固体電力増幅器の開発と進行波管増幅器との比較

固体電力増幅器(SSPA: solid state power amplifier)は進行波管と電源を組み合わせた進行波管増幅器(TWTA: traveling wave tube amplifier)に比較して高信頼・小型軽量の特徴があるといわれている。しかし、前節で示したように表面被覆合浸形陰極の劣化理論を応用してTWTの信頼度を非常に高くすることができた。そこで、20 GHz帯において3 W出力のSSPAを開発し、TWTAとの比較を行って両者の適用領域を検討した⁽²⁾。

6. 3. 1 固体電力増幅器

出力電力3 Wの項目を除いて高周波性能規格をTWTと同一に設定し、効率・重量に重点を置いて改善をはかった。表6-2に開発したSSPAの主要性能を示す。

表6-2 SSPAの主要性能

項目	性能
周波数帯域	18.365 GHz \pm 100 MHz
出力電力	3.2 W
効率	21 %
三次混変調歪*	-20 dBc
飽和利得	35 dB
利得偏差(飽和出力)	0.1 dB / 240 MHz
入力電圧範囲	31 ~ 50 V
重量	750 g
外形	114 \times 188 \times 36 mm

*: (標準入力電力 - 13 dB)の電力にて周波数差 5 MHzの2波を入力

図6-13に本増幅器の構成を示す。全体は7段の増幅回路となり、能動回路は全て複合ICモジュールに収められている。出力部は0.8W出力のモジュールを導波管によって4合成し、3Wの出力を得ている。

0.3 dBmの入力信号は導波管型のアイソレータを通り、入力モジュールで約7dB増幅される。入力モジュールの初段には双ゲートFETを置き、利得の温度特性を補償している。3段の駆動モジュールで約16dB増幅したのち導波管回路で分岐され4個の出力モジュールを並列駆動する。増幅回路の高効率化をはかるため、MBEウェハを使用した高効率のFETを採用した。更に、FETの入力レベルおよびゲートバイアス等の動作点を三次混変調歪の許容できる範囲で高効率となる点に設定した。高周波損失を最小に抑えるため出力モジュールの入力および出力は導波管回路によって分配・合成している。この結果、出力モジュールの効率27%、増幅回路の効率24%を実現した。

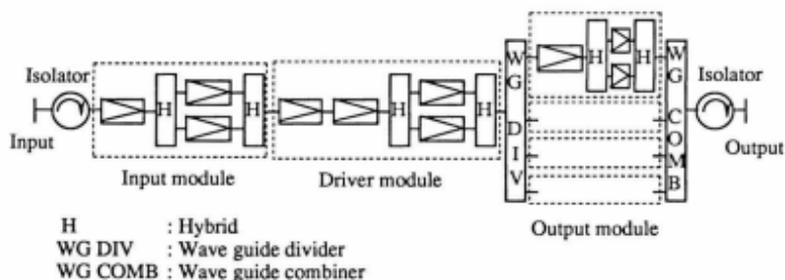


図6-13 SSPAの回路構成概念図

図6-14には、23°Cにおける入力電力に対する出力電力と効率を示す。入力電力の動作点は0.3 dBmで、この時の出力電力は35 dBm、効率は21%である。なお、0~50°Cにおける効率は18%以上である。三次混変調歪はTWTと同じ定義で、(標準入力電力-13 dB)の電力にて周波数差5 MHzの2波を入力した場合に20 dBcである。

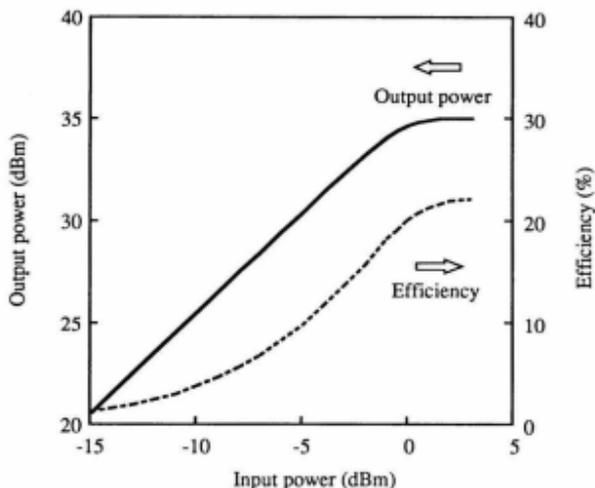


図 6 - 1 4 SSPAの入力電力に対する出力電力と効率の関係

6. 3. 2 進行波管増幅器と固体電力増幅器の比較

本章に示した衛星搭載用TWTAとSSPAを実現するために開発した技術と実現した性能を基に、20 GHz帯のTWTAとSSPAの現時点での性能を比較する。なお、ここではTWTに電源を加えたTWTAの特性をSSPAと比較した。TWT用電源は重量970 g、効率80%が得られている⁽¹⁵⁾。

衛星搭載用機器では駆動する電力を得るためには太陽電池や二次電池を必要とする。このため、消費電力を重量に換算し、自身の重量に加えた等価重量を指標として用いることができる。図 6 - 1 5はこの等価重量の出力電力に対する関係を推定した結果を示す。ここでは消費電力1 Wを等価重量0.2 kgに換算している。出力電力が4 W以上必要な場合にはTWTAの方が等価重量が小さくなり有利であることがわかる。

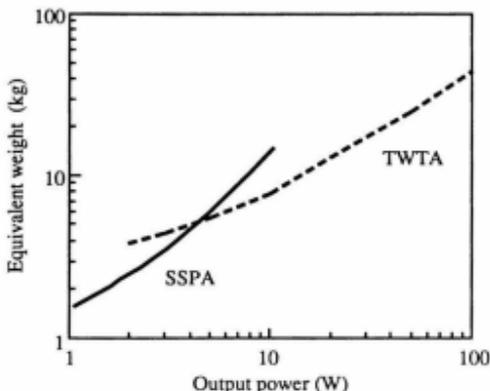


図6-15 等価重量の出力電力に対する関係。
消費電力1 Wを重量0.2 kgに換算した

6.4 まとめ

衛星搭載用TWTでは特に長寿命・高信頼度が必要なため、陰極電流密度を 0.6 A/cm^2 と低くした設計を行った。まず、CS-3用2段コレクタTWTでは表面被覆含浸形陰極を用いた最初のTWTとして重量790 g、効率30%を実現した。次に、ETS-VI用の2段コレクタTWTでは管長の短縮、低温度係数磁石の実現等により重量640 g、効率33%を実現した。更に、次期通信衛星N-STAR用として開発した3段コレクタTWTでは、新規構造3段コレクタ、マグネシウム合金底板、ヘリックス内径縮小等を実現し、重量590 g、効率38%を達成した。

これらの衛星搭載用TWTにおいては、表面被覆含浸形陰極の劣化理論に基づいて最長寿命陰極品種の選択を行い、更に陰極電流密度と寿命の関係を用いて、電子銃の集束比と陰極電流密度の最適化を行った。また、同理論に基づいた最適陰極動作温度設定と選別によってTWTを長寿命・高信頼化する方法を明らかにした。この高信頼化設計を実証するため、温度加速試験により摩耗故障分布を推定した。また、この高信頼化設計を適用したCS-3搭載用TWTの軌道上の実績データを用いて偶発故障による故障率を推

定した。これらの混合Weibull分布による解析の結果、7年間の使用予定期間において目標とした故障率1000 fit以下が達成できることを明らかにした。更にこの高信頼化設計によれば、使用期間を10年間としてもその期間中の故障率は1000 fit以下となることも明らかにした。

更に、SSPAについても20 GHz帯の衛星搭載用として高性能化をすすめ、TWTと比較したところ、出力4 W以上ではTWTの方が有利であることを明らかにした。

第6章の参考文献

- (1) R. Strauss and J. R. Owens: "Past and present INTELSAT TWTA life performance," *J. Spacecraft*, Vol. 18, No. 6, pp. 491-498, 1981.
- (2) E. Illokken: "TWT reliability in space," in *Proc. 1986 International Electron Devices Meeting*, pp. 690-692, 1986.
- (3) P. Zalm and A. J. A. van Stratum: "Osmium dispenser cathodes," *Philips Tech. Rev.*, Vol. 27, No. 3/4, pp. 69-75, 1966.
- (4) R. T. Longo, E. A. Adler and L. R. Falce: "Dispenser cathode life prediction model," in *Proc. 1984 International Electron Devices Meeting*, pp. 318-321, 1984.
- (5) A. M. Shroff and G. Firmain: "Long-life travelling-wave tubes. Use of "M" type cathode. Life prediction model," in *Proc. 1985 International Electron Devices Meeting*, pp. 346-349, 1985.
- (6) N. Mita: "Degradation of coated impregnated cathode's surface coating," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-38, No. 11, pp. 2554-2557, 1991.
- (7) N. Mita: "Degradation factors of a coated impregnated cathode," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-39, No. 9, pp. 2172-2175, 1992.
- (8) 石堀宏一, 三田長久, 酒寄三雄, 山本克彦: "20 GHz帯10 W衛星搭載用進行波管増幅器," *電気通信研究所研究実用化報告*, Vol. 32, No. 4, pp. 899-907, 1983.
- (9) 石堀宏一, 三田長久, 酒寄三雄, 山本克彦: "通信衛星3号搭載用進行波管増幅器," *電気通信研究所研究実用化報告*, Vol. 34, No. 11, pp. 1649-1657, 1985.

- (10) M. Tanaka, M. Nakamura, M. Kawai and I. Ohtomo: "Experimental fixed and mobile multibeam satellite communications system," in *Proc. 1989 IEEE International Conference on Communications*, pp. 1587-1594, 1989.
- (11) H. Makishima, N. Mita and T. Yamashita: "Lightweight traveling-wave tube amplifier for a multi-beam communications satellite," in *Proc. 16th International Symposium on Space Technology and Science*, pp. 975-980, 1988.
- (12) N. Mita and H. Makishima: "Ka-band on-board traveling-wave tubes," in *Proc. 17th International Symposium on Space Technology and Science*, pp. 989-994, 1990.
- (13) 小野堅一, 星野耕一: "進行波管用低温度係数希土類磁石," 電気通信研究所研究実用化報告, Vol. 38, No. 3, pp. 327-334, 1989.
- (14) 川島富士男, 巻島秀男, 小野堅一: "低温度係数希土類磁石による進行波管温度特性の改善," 信学技報, ED 86-126, 1986.
- (15) K. Yamamoto, S. Ohtsu and T. Yamashita: "A high-efficiency and light-weight TWT power supply for ETS-VI," in *Proc. 17th International Symposium on Space Technology and Science*, pp. 977-982, 1990.
- (16) 三田長久: "衛星搭載用進行波管の高信頼化とその実証," 電子情報通信学会論文誌C-II, Vol. J77-C-II, No. 12, pp. 580-584, 1994.
- (17) N. Mita: "An accelerated life test method for highly reliable on-board TWTs with a coated impregnated cathode," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-41, No. 7, pp. 1297-1300, 1994.
- (18) 三田長久, 菅原勉: "陰極劣化がビーム銃のビーム集束に及ぼす影響," 昭和57年度電子通信学会総合全国大会, 講演番号295, 1982.
- (19) 中村親市, 川島富士男, 菅原勉: "衛星搭載用進行波管," 電気通信研究所研究実用化報告, Vol. 29, No. 4, pp. 843-860, 1980.
- (20) 日科技連編: "信頼性データの解析," 日本科学技術連盟, pp. 38-53, 1967.
- (21) 塩見弘: "信頼性概論," 東京電機大学出版局, pp. 32-35, 1972.
- (22) H. Makishima and N. Mita: "Development of 20 GHz-band on-board power amplifiers," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp. 1303-1306, 1991.

第7章 衛星地上局用進行波管の高性能化

表面被覆含浸形陰極という高い電流密度でも長寿命の動作ができる陰極が開発され、陰極電流密度と寿命の関係を明らかにした結果、進行波管(TWT: traveling wave tube)の性能目標設定が容易となり多彩なTWTの開発を可能とすることができるようになった。

前章では低い陰極電流密度にて特に長寿命・高信頼度を得た衛星搭載用TWTに関して述べた。本章ではまず、7. 1節において中程度の電流密度(約1.3 A/cm²)で設計した例として14 GHz帯40 W出力の使用者宅設置局用TWTについて述べる。この周波数帯では固体電力増幅器(SSPA: solid state power amplifier)と激しい競合関係にあり、陰極電流密度を高めを設定することによりビーム集束比を下げてビーム透過を容易にし、経済化をはかっている。しかしながら、表面被覆含浸形陰極の長寿命性能と併せて最適陰極動作温度設定を行うことにより、十分長い寿命を有していると考えられる。また、SSPAと競合しているため、特に低消費電力化を進めて大幅な消費電力削減に成功している。

30 GHz帯においては降雨減衰が大きくなるため大電力送信が要求される。7. 2節では2 A/cm²以上の高い電流密度で表面被覆含浸形陰極を用いた例として30 GHz帯、100 W連続出力TWTの開発結果を述べる。この分野になると、SSPAでは実現が不可能な領域になるため、システムの許容できる範囲で寿命を短く設定し、高出力化をはかった。

7. 1 Ku帯使用者宅設置局用超低消費電力進行波管

使用者宅設置局のような衛星通信小規模地上局では64 kb/s程度の伝送速度で使われることが多く、時分割多重(TDMA: time domain multiple access)パルス動作では高周波動作比率は1%以下で使われている。また、映像伝送のように、連続出力で使用する場合も、送信出力制御を行うので、降雨時以外において10 dB程度の出力低減状態で使われることが多い。また、使用者宅設置局では電力料金を抑え、運用経費を削減するためにも可能な限りの消費電力低減が望まれている。

多段コレクタの消費電力の予測方法を検討し、それに基づいて消費電力を大幅に低減

できるコレクタを開発することができた。動作比率が小さいパルス動作時では、無信号時の消費電力低減が重要であり、多段コレクタにおいて、最終段の電圧を可能な限り低下することができれば無信号時の大幅な消費電力低減が可能であることを明らかにした⁹⁾。このためには、全電子ビームが通過する初段コレクタと無信号時に理想的にはすべての電子ビームが入射する最終段コレクタの間に遮蔽効果を有する電極を持つ3段コレクタが最適であることを示す。この3段コレクタを持つKu帯出力40WのTWTを実現し、動作比率1%のパルス動作の場合、消費電力を従来の1/7に低減することに成功した¹⁰⁾。連続出力動作の場合も、出力電力を10dB低減した場合の消費電力は従来の1/2以下に減少することができた。

7. 1. 1 コレクタ消費電力の予測理論

(1) 飽和動作時のコレクタ消費電力

多段コレクタの消費電力を予測し、消費電力を低減する方法を検討した。飽和動作時のコレクタに入射する使用済み電子ビームの速度分布の実測例を図7-1に示す。横軸Xはヘリックス電圧で正規化したコレクタ電圧、縦軸Yはコレクタ電流の合計値で正規化したコレクタ電流の累積値である。測定に用いたTWTはFaraday箱形の3段コレクタを持つ20GHz帯、出力12Wのヘリックス形TWTであり、ヘリックス電圧は4900Vである⁹⁾。測定に際しては、まず第1コレクタ電圧を全ての電子ビームが捕捉できる最低電圧である1680V(正規化電圧 $X = 0.34$)とし、第2コレクタ電圧を第1コレクタ電圧の約50%である800V($X = 0.16$)とする。第3コレクタ電圧を0Vから700Vまで変化し、この範囲では第3コレクタ電流を累積コレクタ電流とした。次に、第2と第3コレクタ電圧を共に800Vから1600Vまで変化し、この範囲では第2、第3コレクタ電流の合計値を累積コレクタ電流とした。この測定方法からもわかるように、正規化コレクタ電圧Xに対する累積コレクタ電流は正規化電圧 $1-X$ に相当する電子速度以上の速度を持つ電子の累積値となる。

Ku帯以上の高い周波数では、電子ビームの持つエネルギーを高周波出力に変換することができるビーム効率は20%以下であり、使用済み電子ビームの速度分布は図7-1に示すごとくほぼ直線的な分布になっている。この分布を次式で示す直線で近似した。

$$Y = C_1 X + C_2, \quad (7-1)$$

ここで C_1 と C_2 は定数である。

第 i 段のコレクタ電圧は X_i 、コレクタ電流は $Y_i - Y_{i-1}$ である。第1コレクタ電圧 X_1 は使用済み電子ビームを全て捕捉できるようにするため、 $C_1 X_1 + C_2 = 1$ とする必要があり、 $(1 - C_2)/C_1$ に設定した。

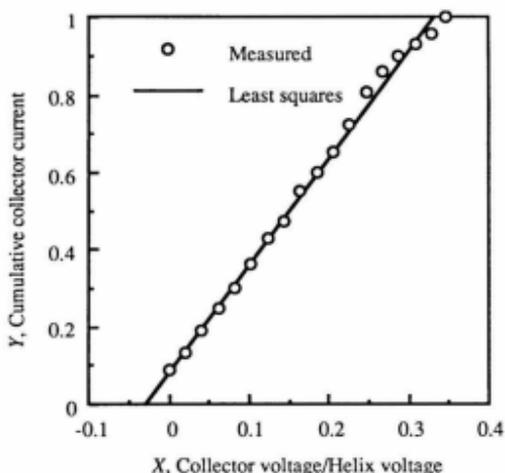


図7-1 使用済み電子ビームの速度分布の実測値と近似直線

ここでは零電位電極が存在する場合にまで一般化してコレクタ消費電力を導出する。ただし、この零電位電極はコレクタ電源が不要なため、コレクタ段数には含めないことにする。この零電位電極には突起(spike)形のようなFaraday箱形以外の電極形状を用いることが多く、2次電子の放出を考慮する必要がある。従って、零電位電極電流は理想的には C_2 となるが、実際には2次電子の放出があるため、 δC_2 流れ込むとする。ここで $0 \leq \delta \leq 1$ であり、 $\delta = 0$ の場合は零電位電極がない場合に相当する。また、零電位電極以外のコレクタ電極は2次電子も捕捉することができるFaraday箱形を仮定しており、

以下の計算では零電位電極以外のコレクタ電極における2次電子放出は無視している。

各コレクタ電極電圧の関係は、

$$X_i > X_{i+1}, X_n > 0 \quad (7-2)$$

であり、 n はコレクタ段数である。コレクタでの消費電力 P_C は、

$$P_C = X_n \cdot (Y_n - \delta C_2) + \sum_{i=1}^{n-1} X_i \cdot (Y_i - Y_{i+1}) \quad (7-3)$$

となる。式(7-3)に式(7-1)を代入すると、

$$P_C = C_1 \left[X_n^2 + X_n \cdot (1 - \delta) C_2 / C_1 + \sum_{i=1}^{n-1} X_i \cdot (X_i - X_{i+1}) \right] \quad (7-4)$$

となる。これが最低になるためには、

$$dP_C / dX_i = 0 \quad (i = 2, \dots, n) \quad (7-5)$$

の条件から、

$$\begin{aligned} X_n + (1 - \delta) C_2 / C_1 &= X_{n-1} - X_n, \\ X_{i+1} - X_{i+2} &= X_i - X_{i+1} \quad (i = 1, \dots, n-2) \end{aligned} \quad (7-6)$$

が成り立てばよい。このためには X_1 から $-(1 - \delta) C_2 / C_1$ の間を n 等分した値を X_i がそれぞれとれば P_C が最低となる。すなわち、

$$X_i = \left[(n+1-i)(1-\delta C_2) - n(1-\delta)C_2 \right] / C_1 n \quad (i=1, \dots, n), \quad (7-7)$$

このとき、コレクタ消費電力は

$$P_c = \frac{(1-\delta C_2)(1-2C_2+\delta C_2)}{2C_1} + \frac{(1-\delta C_2)^2}{2C_1} \cdot \frac{1}{n}. \quad (7-8)$$

ただし、 $X_n > 0$ の条件から

$$(1-\delta C_2)/n > (1-\delta)C_2 \quad (7-9)$$

のときに成立する。図7-1からもわかるように C_2 ($X=0$ における Y の値)は0.1未満なので、零電位電極が無い場合、すなわち $\delta=0$ のとき n が10以下で成立する。この条件が成立しないときには $\delta \neq 0$ 、つまり零電位電極を設けないとコレクタ消費電力が最低にならないことになる。

式(7-8)に示したように、飽和動作時においては、コレクタ段数 n の増加によるコレクタ消費電力の低下は $1/n$ に依存しており、段数が増すにつれて消費電力の低下割合は小さくなる。コレクタ構造や電源の複雑化を考慮すると、コレクタ段数の大幅な多段化による消費電力低減は得策ではない。

(2) パルス動作時のコレクタ消費電力

高周波信号をパルス動作で使う場合には、消費電力は飽和動作時と無信号時の消費電力の動作比率に応じた平均値となるため、無信号時の消費電力を低減することが重要である。無信号時の場合はコレクタ消費電力は理想的には最終段のコレクタ電圧に比例する。しかし、2段コレクタの場合は第2コレクタ電圧を下げると図7-2に示すように飽和動作時に戻り電子が発生してヘリックス電流が増加したり出力が低下したりする等の不安定動作を示す。従って、第1段と最終段のコレクタ電極の間に遮蔽効果を有する

電極を持つ3段コレクタが適切である。また、無信号時には零電位電極には電子ビームは流れ込めないで、役に立たない。これらのことから、低動作比率の高周波パルス動作を行う場合には零電位電極を持たない3段コレクタが最適である。

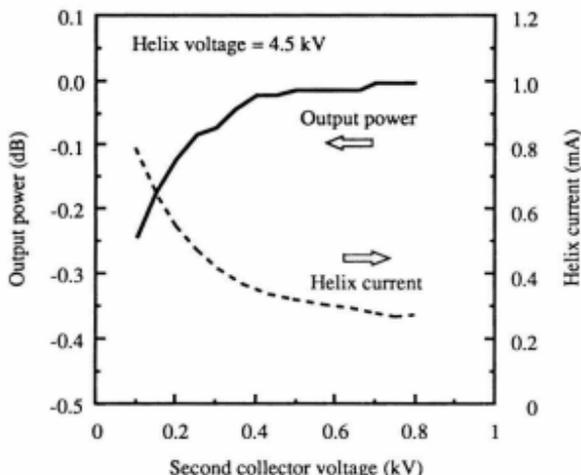


図7-2 2段コレクタの第2コレクタ電圧を下げた場合の不安定性。
出力電力は最大出力電力からの相対値で示す

この3段コレクタにおける消費電力の第3コレクタ電圧 X_3 依存性を次に求める。 X_3 を式(7-7)で示される飽和出力動作時の最適値から変化させる場合、式(7-7)の導出と同様にして、与えられた X_3 に対して $X_2 = (X_1 + X_3)/2$ の場合に P_C が最低になる。この条件と $n = 3$ 、 $\delta = 0$ を式(7-4)に代入して、飽和出力動作時におけるコレクタ消費電力の第3コレクタ電圧 X_3 依存性が次式で与えられる。

$$P_c = \frac{3}{4}C_1 \cdot X_3^2 + \frac{3C_2 - 1}{2}X_3 + \frac{3(1 - C_2)^2}{4C_1} \quad (7-10)$$

無信号動作時のコレクタ消費電力は、理想的には全ての電子ビームが第3コレクタに入射する場合であり、次式で与えられる。

$$P_c = X_3 \quad (7-11)$$

これらの式(7-10)、式(7-11)の計算結果を図7-3に示す。第3コレクタ電圧 X_3 の低下による飽和動作時のコレクタ消費電力の最低値からの増加はわずかであり、 X_3 を可能な限り下げられるコレクタ構造を実現すれば高周波パルス動作時の消費電力を低減できることがわかった。

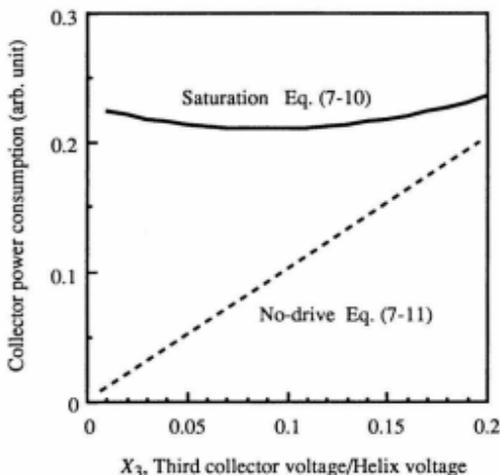


図7-3 第3コレクタ電圧の低下による消費電力の変化

7. 1. 2 進行波管の設計

(1) コレクタ構造

従来のコレクタは飽和動作時に消費電力を小さくして効率を高めるように設計されてきた。一方、高周波パルス動作をして動作比率が低い場合には無信号の割合が大きいため、無信号時の消費電力低減により平均消費電力が低下する。このような場合、前項での検討の結果零電位電極を持たない3段コレクタが最適であり、第3コレクタの電圧を可能な限り低下できる構造を実現すればよい。

第3コレクタ電圧を大幅に低下した場合にも、第1コレクタ入り口の電位分布への影響を少なくし、戻り電子の発生を最小限に抑えるため、第2コレクタの軸方向寸法は比較的長く設計した。実際にはコレクタ内の電子軌道計算により、第3コレクタ電圧を100 V程度に低下しても戻り電子が発生しないように電極各部の寸法を微調整した。得られたコレクタ電極形状に対応するコレクタ内部の電子軌道計算結果を図7-4に示した。

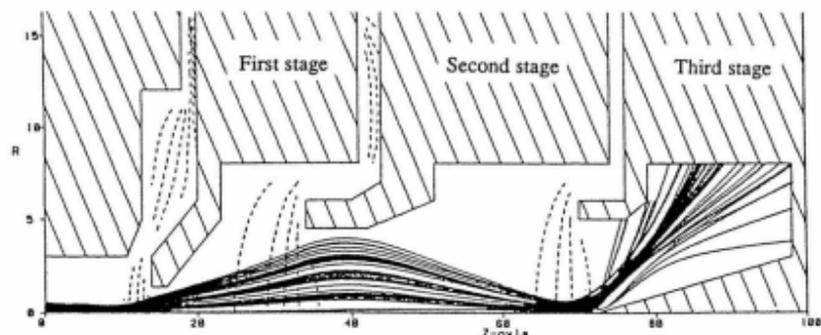


図7-4 コレクタ内部の電子軌道計算結果

(2) 管球構造

消費電力が大幅に削減できたため、取り扱う熱量が小さくなったので、コレクタ外周を小さくすることができる。図7-5に概略断面図を示すように、電子銃とコレクタの外径を周期磁石の外径と同様に小さくすることにより、全体の体積を小さくすることが

できた。この結果、従来のTWTに比べて体積を40%にまで低減することができた。

(3) 電子銃

電子ビーム透過調整を容易にするために電子銃のビーム集束比を低くした。この結果、陰極電流密度が 1.3 A/cm^2 と若干高めの設定になった。しかし、第5章で詳細に述べたように、表面被覆含浸形陰極を使用し、これを最適動作温度に設定して運用すれば200,000時間以上の陰極寿命が得られることが予想できるので地上で使用するには十分であると考えられる。また、このようにビーム集束比を低くできたため、ビーム透過調整が容易となり経済化を可能とした。

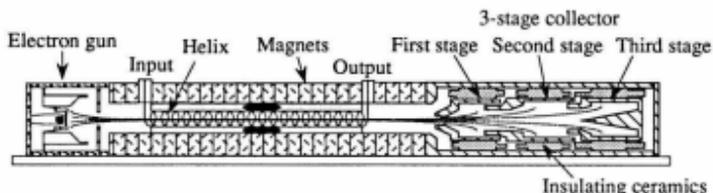


図7-5 Ku帯超低消費電力進行波管の概略断面図

7. 1. 3 進行波管の特性

開発した新しい3段コレクタをもつTWTは、周波数14.0～14.5 GHzのKu帯で、ビーム電流47 mA、ヘリックス電圧4.9 kVにて出力40 Wが得られる。

無信号動作時における第3コレクタ電圧とヘリックス電流および消費電力の関係を図7-6に示す。この項では戻り電子による消費電力増加の効果も評価するため、TWTの全消費電力を示す。コレクタ電極構造の適切な設計の結果、第3コレクタ電圧を80 Vにまで低下しても戻り電子の発生によるヘリックス電流の増加はなく、無信号時の消費電力を10 W程度に低下することができた。

飽和動作時における第3コレクタ電圧とヘリックス電流および消費電力の関係を図7-7に示す。飽和動作時には3段電位低下コレクタとして働き、高い効率を得られている。第3コレクタ電圧を大幅に低下しても戻り電子の発生によるヘリックス電流の増加はなく、飽和動作時における最適値からはずれることによる消費電力の増加もわずかである。

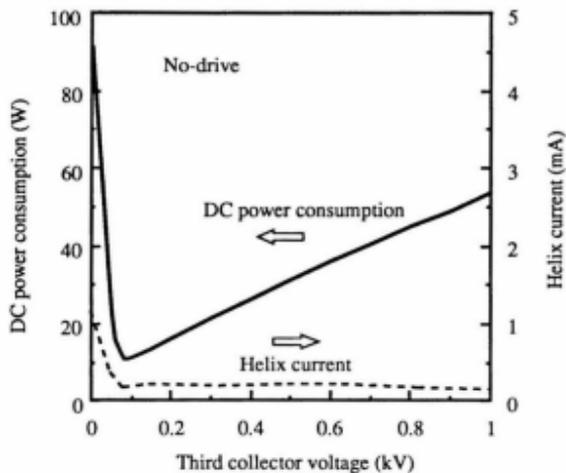


図 7-6 無信号時における消費電力とヘリックス電流の第3コレクタ電圧依存性

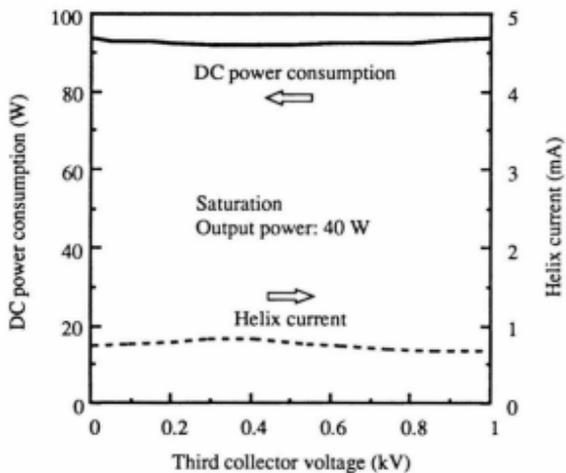


図 7-7 飽和動作時における消費電力とヘリックス電流の第3コレクタ電圧依存性

図7-8には入力電力を変えた場合の出力電力とヘリックス電流の変化を示す。入出力特性の直線性は良く、無信号から飽和出力までヘリックス電流は小さく、ビーム透過率は98%以上である。

図7-9には入力電力を変えた場合の第1～第3コネクタ電流の変化を示す。入力電力の低下に伴いほとんど全ての電流が第3コネクタに入射するようになっており、無信号時の低消費電力性能が達成できている。

高周波パルス動作時における平均消費電力と動作比率の関係を図7-10に示す。従来の2段コネクタTWTと比較して出力40Wの場合を示している。ここで比較に用いた従来のTWTは14～14.5GHz帯にて34W以上の出力が得られる2段コネクタのヘリックス形TWTである⁽⁴⁾。開発した3段コネクタTWTは低い動作比率のパルス動作時に消費電力を低減するため、無信号時にコネクタ消費電力が最低となる第3コネクタ電圧(E_{c03})が80Vの設定にて使用し、この場合の平均消費電力の動作比率依存性を実線で示した。破線で示した従来の2段コネクタTWTと比較して、無信号時の消費電力が非常に小さいために、特に低い動作比率の場合には消費電力低減の度合いが著しい。

従来の設計によるコネクタが仮に3段であった場合にも、飽和出力時のコネクタ消費電力が最低となるような従来のコネクタ電圧設定がなされるものと考えられる。そのような場合と比較するため、開発した3段コネクタTWTを、飽和出力時にコネクタ消費電力が最低となる、第3コネクタ電圧を500Vに設定した場合における平均消費電力の動作比率依存性を一点鎖線で示した。この結果を第3コネクタ電圧が80Vに設定されている実線と比較すると、第3コネクタ電圧をできる限り低下できるコネクタ電極構造を選び、無信号時にコネクタ消費電力が最低となるコネクタ電圧設定を行うことにより、1%以下の低い動作比率において平均消費電力を約1/3に低減できていることがわかる。

図7-11では高周波パルス動作比率1%の場合の平均消費電力の内訳を従来の2段コネクタTWTと比較して示す。開発した3段コネクタTWTの第3コネクタ電圧は80Vに設定した場合である。全体の消費電力は従来の1/7になっており、尖頭出力40Wのとき、平均消費電力はわずかに12Wである。コネクタ消費電力だけを比較すると従来の1/12以下になっており、新しいコネクタの効果がいかに大きいかが見える。

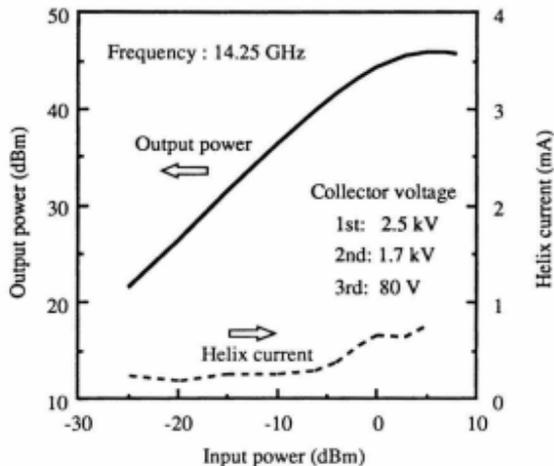


図 7-8 出力電力とヘリックス電流の入力電力依存性

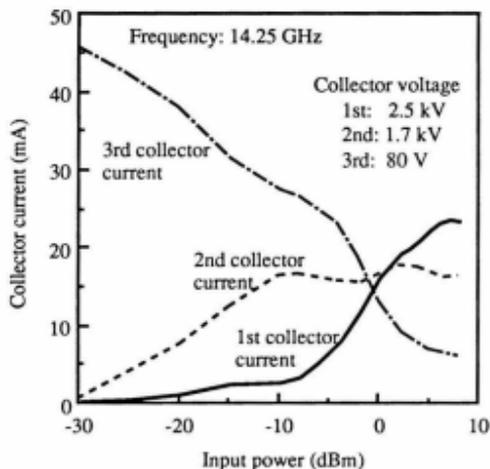


図 7-9 入力電力に対する各コレクタ電流の変化

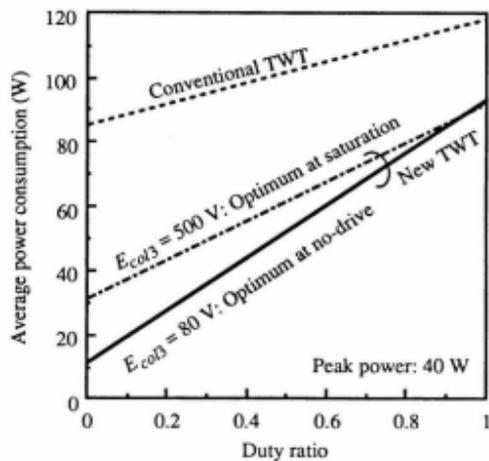


図 7 - 1 0 平均消費電力の動作比率依存性. E_{col3} : 第 3 コレクタ電圧

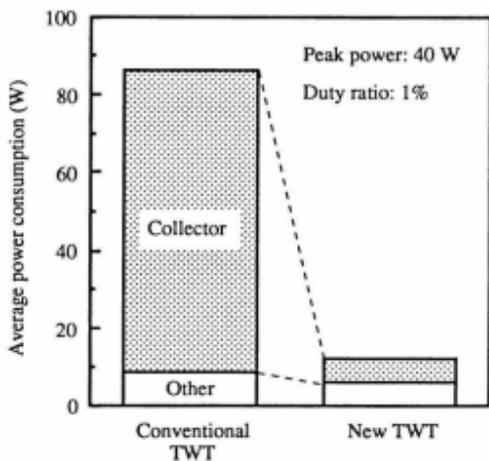


図 7 - 1 1 動作比率1%の場合の平均消費電力の内訳

映像伝送等で連続動作で使われるような場合も、晴天時には出力電力を低減する送信出力制御をする場合が多い。図7-1-2には連続出力動作時において出力電力を10dB低減した場合の消費電力の内訳を従来の2段コレクタTWTと比較して示した。この図においても新しい3段コレクタTWTの第3コレクタ電圧は80Vである。全体の消費電力は従来の1/2以下になっている。

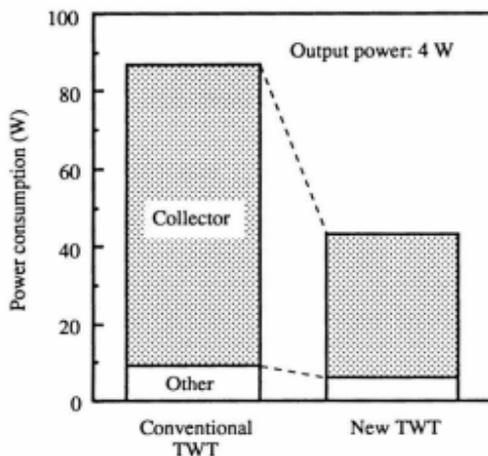


図7-1-2 連続動作、出力電力を10 dB低減した場合の消費電力の内訳

7. 2 30 GHz帯100 W出力超広帯域ヘリックス形進行波管

1988年に打ち上げられた通信衛星3号(CS-3)はKa帯の下半分の周波数帯を利用しており、これを用いた衛星中継網方式(DYANET: DYnamic channel Assigning and routing satellite aided digital NETWORKs)⁵⁾の地上局用として27.5～28.7 GHzの周波数帯域で動作できる100 W出力連続動作ヘリックス形TWTを開発して使用してきた。更に、次期通信衛星N-STARではKa帯の全周波数帯域(27.5～31 GHz)を使用して衛星通信の需要の増加に応じようとしている。このような衛星を用いた次世代衛星通信方式に用いる地上局に使用

できる、Ka帯の全周波数帯域で100 W連続出力可能なヘリックス形TWTを実現した。

システム寿命からみて充分長い陰極寿命が得られる 2.5 A/cm^2 に陰極電流密度を設定して31 GHzにおいて100 Wという高出力を実現した。また、このような超広帯域性能を得るために、入出力回路用の円形窓(pill-box window)を開発し、更に高効率、高安定性能を実現するために、一体化磁極(IPP: integral pole piece)や窒化ボロン(PBN: pyrolytic boron nitride)ヘリックス支持体を開発した。この結果、最大では150 Wの連続出力が可能という高い耐電力性能を有し、27.5 ~ 31 GHzにおいて無調整で100 W以上の連続出力が得られる超広帯域のヘリックス形TWTを実現することができた^{(6),(7)}。

7. 2. 1 進行波管の設計

ヘリックス形にて連続出力100 Wという高出力を得るために強制空冷を採用しており、全体の概略断面図を図7-13に示す。冷却が必要なヘリックスを用いた遅波回路部とコレクタ部には放熱ひれ(fin)を取り付けてある。27.5 GHzから31 GHzという高い周波数までの広帯域性能、高出力・高安定性能を実現するため次のような技術を開発、使用した。

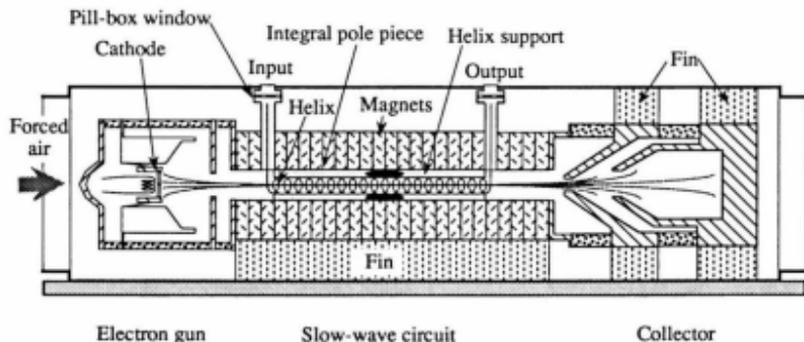


図7-13 30 GHz帯100 W出力超広帯域ヘリックス形進行波管の概略断面図

(1) 遅波回路

ビーム透過を向上するため、一体化磁極(IPP)を30 GHz帯にて実現した。このIPPの断面図を図7-14に示す。従来は真空外周器としてのステンレス管中にヘリックスと支持体を挿入してその外部に磁極をはめ込んでおり、周期磁界の中心軸の直線性が悪いという欠点があった。IPPは磁極(pole piece)と間隔板(spacer)を交互に重ねてろう付けし、その中心に穴を開けたもので、真空外周器をかかっている。ヘリックスと支持体は熱ばめ法で挿入される。これを用いた結果、周期磁界の中心軸の直線性が良く、ビーム透過が容易となった。

IPPの実現により、従来の組立方法では折れ易くて用いることができなかった長方形断面のPBNをヘリックス支持体採用することができた。PBNは従来用いられてきたベリリアに比べて誘電率が20%以上小さく、更に、断面を長方形にすることによりヘリックスを伝搬する電波とヘリックス中心を通る電子ビームとの結合を大きくすることができ、ビーム効率(電子ビームのエネルギーを高周波出力に変換する比率)を増すことができた。この結果、少ない電子ビーム量で100 Wの出力電力が得られるようになり、安定な動作が可能となった。また、IPPを真空外周器とし、熱ばめ法で組み立てると、ヘリックスと支持体とIPPが強固に固定されるので、従来に比べて熱抵抗が減り、耐電力性能を向上することができた。

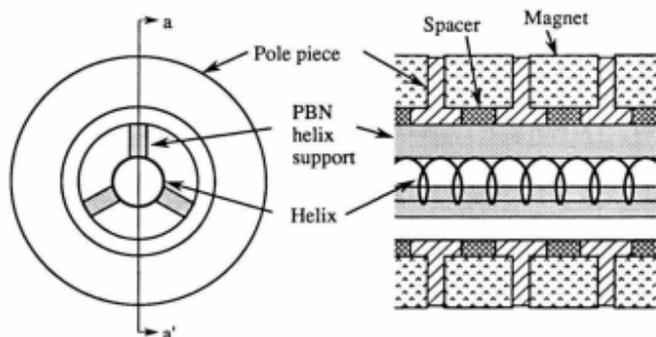


図7-14 一体化磁極(IPP)の断面図

周期磁界用磁石には2-17系サマリウム・コバルト($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$)磁石を開発して用いた^{(8),(9)}。この磁石の温度係数は $-0.02\%/^{\circ}\text{C}$ と小さく、従来の1-5系サマリウム・コバルト(SmCo_5)磁石の温度係数の1/2である。この磁石を用いた結果、 $-15^{\circ}\text{C} \sim +45^{\circ}\text{C}$ の動作温度範囲でヘリックス電流の温度変化はほとんど無く、高い安定性を得ることができた。

(2) 入出力回路

従来に比べて3倍近い27.5~31 GHzの3.5 GHz帯域幅でヘリックスと入出力導波管とが整合するように、広帯域が得られる円形窓(pill-box window)と同軸導波管変換器を組み合わせた入出力回路を新たに開発した。図7-15に断面図を示したこの構造では、ヘリックスに接続されている同軸の中心導体を導波管壁に直結することにより、冷却効率を高め、高出力時の安定動作を実現することができた。更に、従来の同軸窓に比べて窓に使われるセラミックの沿面距離を大きくとれるため、広帯域性能の実現と併せて耐電力性能を改善することができた。

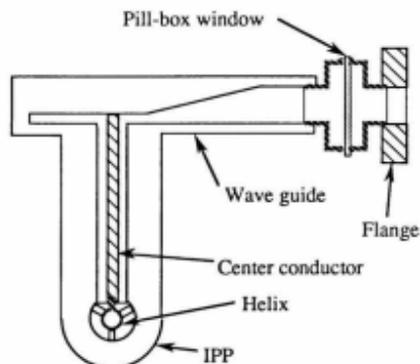


図7-15 円形窓(pill-box window)入出力回路の断面図

(3) 電子銃

30 GHz帯という高い周波数帯で使用するため、ヘリックス内径は0.9 mm程度に小さくせざるを得ない。また、100 Wという高い出力が要求されるため、ビーム電流も100 mA以上となる。電子銃の集束比をあまり大きくすると不安定性が増してしまう。これ

らの条件を考慮して、陰極電流密度を $2\sim 2.5\text{A}/\text{cm}^2$ と比較的高く設定した。しかし、第5章で述べたように、表面被覆含浸形陰極を用いて最速動作温度で使用すればその陰極寿命は100,000時間以上が得られるので、ばらつきを考慮しても地上用のTWTとしては十分な寿命が得られるものと考えられる。

7. 2. 2 進行波管の特性

図7-16には27.5~31 GHzのKa帯衛星上り回線全帯域の周波数特性を示す。全周波数帯域において出力偏差は0.3 dB、ヘリックス電流は約0.5 mAと、31 GHzという高い周波数であるにもかかわらず広帯域、高安定な特性が得られている。

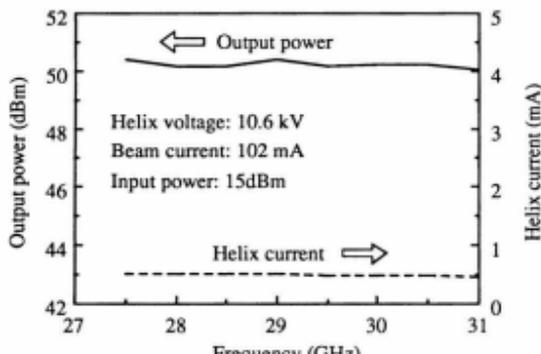


図7-16 Ka帯衛星上り回線全帯域の周波数特性

図7-17は30.8 GHzを中心とする200 MHzのチャンネルにおける周波数特性を示す。チャンネル内の出力偏差は0.2 dBと小さく、周波数に対する傾斜も0.004 dB/MHz以下と非常に小さい。

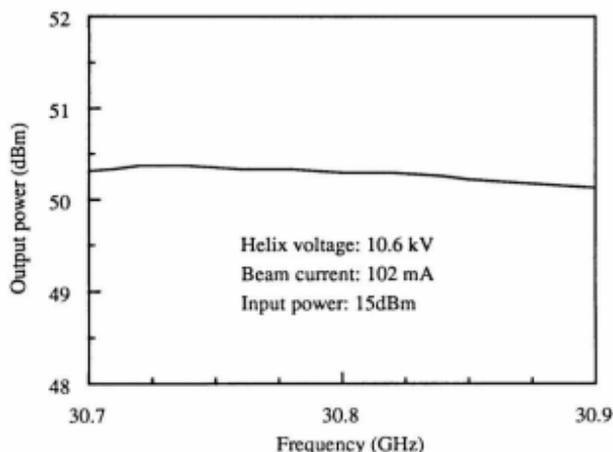


図 7-17 200 MHzチャンネル周波数特性

図 7-18 には周波数27.5 GHzにおける入出力特性を示す。ヘリックス電圧をこの周波数における最適値の11 kVにすることにより、効率が向上して102 mAのビーム電流にて150 Wの連続出力が得られた。総合効率36%が得られており、ヘリックス電流も飽和点で1 mA程度と少ない。このように150 W連続出力時においても安定に動作する高い耐電力性能を確認することが出来た。

図 7-19 には周波数30.8 GHzにおける入出力特性を示す。冷却風温度を -15°C 、 $+25^{\circ}\text{C}$ 、 $+45^{\circ}\text{C}$ と変化した場合の3種類のデータを重ねて示している。いずれの温度においても飽和出力は100 W以上が得られており、ヘリックス電流は飽和点においてもわずかに0.5 mAと少なく、温度による変動も極めて小さい。

図 7-20 には周波数30.8 GHzにおいてヘリックス電圧を変えた場合の出力電力とヘリックス電流の特性を示した。この図も冷却風温度 -15°C 、 $+25^{\circ}\text{C}$ 、 $+45^{\circ}\text{C}$ の各データを重ねて描いた。温度に対する変化は小さく、特に動作点であるヘリックス電圧10.6 kV付近での変化は極めて小さい。この図から、本TWTは電源電圧の変動や周囲温度の変化に対しても特性の変化は極めて小さく、高い安定性を有していることがわかる。

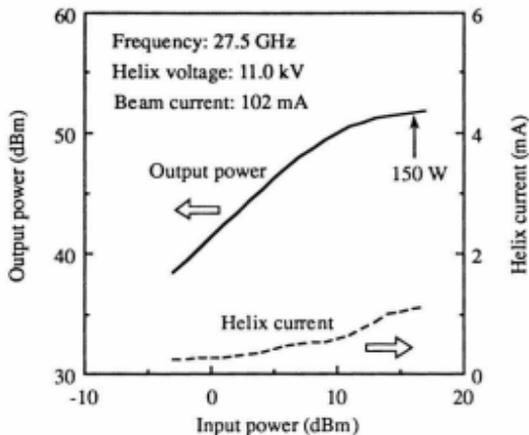


図 7 - 1 8 周波数27.5 GHzにおける入出力特性

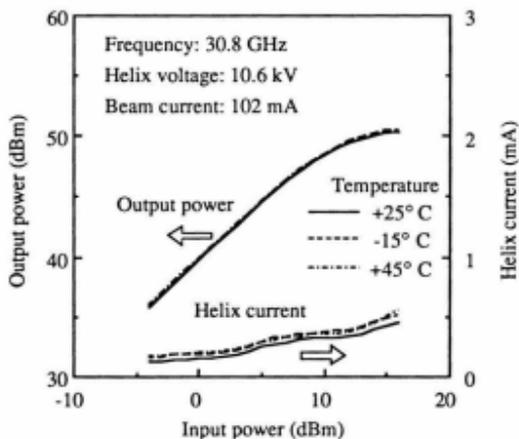


図 7 - 1 9 入出力特性の冷却風温度に対する安定性

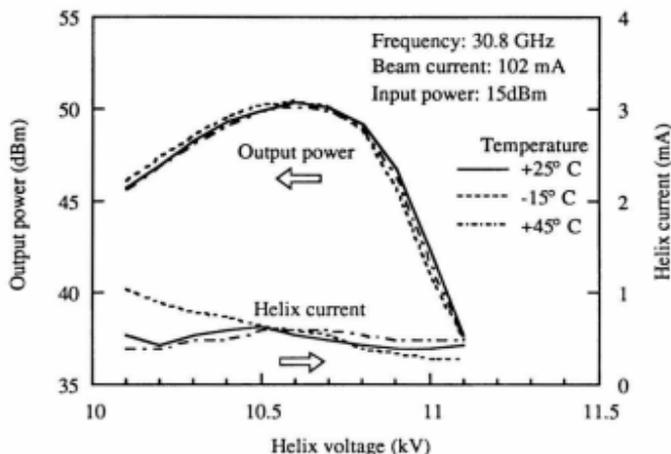


図7-20 ヘリックス電圧に対する出力電力とヘリックス電流の関係

7.3 まとめ

表面被覆含浸形陰極の長寿命性能を最大限に生かして各種の衛星地上局用TWTを開発した。中程度の陰極電流密度に設定し、ビーム集束比を小さくして電子ビームの透過調整を容易にして経済化した設計としては、14 GHz帯、出力40 Wの超低消費電力TWTを実現した。高い陰極電流密度の設定としては、ヘリックス形TWTの限界ともいえる、30 GHz帯、出力100 Wの高出力TWTを実現した。

使用者宅設置局用TWTとして、特に無信号時に消費電力が小さくなる新しいコレクタを持つ14 GHz帯、出力40 WのTWTを開発した。これは、小規模地上局ではパルス動作で動作比率が小さい場合が多いため、無信号時の消費電力低減が平均消費電力の低減に大きく寄与するためである。このため、コレクタに入射する使用済み電子ビームの速度分布を直線で近似し、多段コレクタのコレクタ消費電力を予測する方法を提案した。

実現したTWTでは動作比率1%のパルス動作時には平均消費電力が従来の1/7になるという大幅な消費電力削減に成功した。また、連続動作の場合も10 dBの出力電力低減を行った場合には消費電力を従来の1/2以下に低減できた。更に、取り扱い熱量の低下を考慮した小型化設計により、TWTの体積を従来の40%に縮小することができた。

高い陰極電流密度に設定した30 GHz帯TWTでは、次世代衛星通信方式に必要とされるKa帯衛星上り回線全周波数帯域(27.5 – 31 GHz)において動作可能な100 W連続出力のヘリックス形TWTを開発した。円形入出力窓、PBNヘリックス支持体、一体化磁極等の新技術を開発することによりこのような広帯域および高効率を実現した。帯域を狭めた場合、150 Wの連続出力が可能であり、高い耐電力性能を確認することができた。更に、低温度係数の磁石を用いることにより周囲温度-15°C ~ +45°Cの範囲でほとんど特性は変化せず高い温度安定性も確認した。本TWTを用いれば、Ka帯の衛星上り回線全帯域での周波数瞬時移動が可能となり、柔軟な方式設計を容易にすることができる。

第7章の参考文献

- (1) 三田長久: "多段コレクタ進行波管増幅器の低消費電力動作法の検討," 1991年電子情報通信学会秋季大会, 講演番号C-328, 1991.
- (2) N. Mita: "A mini-TWT amplifier with super-low power dissipation for Ku-band user earth stations," in *Proc. 24th European Microwave Conference*, pp. 1849-1854, 1994.
- (3) N. Mita and H. Makishima: "Ka-band on-board traveling-wave tubes," in *Proc. 17th International Symposium on Space Technology and Science*, pp. 989-994, 1990.
- (4) 板垣泰弘, 浜田定憲, 高橋雅明, 菊地利元: "14 GHz帯, 34 W衛星地球局用進行波管," 1991年電子情報通信学会春季全国大会, 講演番号C-484, 1991.
- (5) 森広芳照, 岡坂定篤, 塩田宏明, 上野健治: "衛星中継網方式-DYANET-の開発とシステム構成," *NTT R&D*, Vol. 39, No. 2, pp. 169-176, 1990.
- (6) H. Makishima, K. Shimokawa, N. Mita and T. Inoue: "Development of a 30 GHz 100 W cw helix TWT for satellite earth stations," in *Proc. 3rd Asia-Pacific Microwave Conference*, pp. 1153-1156, 1990.

- (7) N. Mita: "A wide-band, 150 W cw helix TWT in the 30 GHz band," in *Proc. 2nd Asia-Pacific Conference on Communications*, to be presented on June 1995.
- (8) 小野堅一, 星野耕一: "進行波管用低温度係数希土類磁石," *電気通信研究所研究実用化報告*, Vol. 38, No. 3, pp. 327-334, 1989.
- (9) 川島富士男, 巻島秀男, 小野堅一: "低温度係数希土類磁石による進行波管温度特性の改善," *信学技報*, ED 86-126, 1986.

第8章 結論

衛星通信用進行波管(TWT: traveling wave tube)の高性能化のためには高電流密度で使用しても長寿命が得られる陰極が必要であった。この要求に応じて従来使われていた酸化物陰極にかえて含浸形陰極、更には表面被覆含浸形陰極が発表されたが、これらの寿命性能が明らかではなかったためTWTの設計は経験的に行われており、実運用データにより寿命・信頼度の確認が行われている状況であった。本論文ではこの表面被覆含浸形陰極の寿命要因を解明して陰極寿命推定方法を確立することにより、寿命が最も長くなる最適動作温度を明らかにすると共に陰極電流密度と寿命の関係を定式化することができた。更に、この陰極劣化理論を応用して長寿命・高信頼度の衛星搭載用TWTや高性能な衛星地上局用TWT等の多彩な衛星通信用TWTを実現した結果について述べた。

含浸形陰極については製造が容易で、バリウム等の蒸発速度が低く、電子放射が良好な含浸材や陰極基板の材料が検討されてきた。表面被覆の有無を含めたこれら多数の品種の中から長寿命品種の選択を行った。この結果選んだ陰極は含浸材BaO、CaO、 Al_2O_3 の配合比が4:1:1であり、陰極基板の多孔質タングステンの空孔率は18%、陰極表面にはOs-Ru合金を被覆した表面被覆含浸形陰極である。この陰極寿命を比較検討するにあたっては陽極にすりばち状の穴を設けた新しい2極管を考案し、TWTに陰極を組み込んだ場合と同様の経時変化を経済的に測定できるようにした。

また、表面被覆含浸形陰極の寿命要因の検討結果から、表面被覆含浸形陰極には「表面被覆の劣化」と「含浸材の消耗」という2種の寿命要因があることを明らかにした。

まず、この表面被覆含浸形陰極の「表面被覆の劣化」の寿命要因について検討した。このOs-Ru合金を被覆した含浸形陰極は初期の活性化工程において表面被覆がOs-Ru-W合金となり、この後、定常的に加熱すると陰極基板のタングステンが表面に拡散し、タングステンの表面濃度が経時的に増加する。この結果、最終的には表面被覆の効果がなくなってしまう。

タングステン基板の表面被覆側の境界においてタングステンの濃度が常に1であるという境界条件を新たに与えて拡散方程式の解を求め、タングステン表面濃度の経時変化

を与える式を導出した。この式は実測値と良く一致した。理論と実験の比較により Os-Ru-W合金中におけるタングステンの拡散係数を求めたところ、その活性化エネルギーとして8.4 eVが得られた。この大きな値が実際の陰極使用時に長期間安定な表面被覆が維持されている理由であると考えられる。

次に、もう一種の寿命要因である「含浸材の消耗」について検討した。まず、長期間動作した含浸形陰極の断面分析を行った。新たに考案した積算法により陰極表面から深さ方向の含浸材の消耗状況を明確にすることができた。BaO、CaO、 Al_2O_3 からなる含浸材からバリウムとカルシウムが消耗しており、含浸材が陰極基板のタングステンと反応して遊離バリウムとカルシウムが生じる反応式が考えられる。この遊離バリウムが反応生成物中の細孔を平均自由行程より小さい半径を有する筒中の流れであるKnudsen流により流出するものと考え、バリウム流出速度が時間の $-1/2$ 乗($t^{-1/2}$)に従って減少していくことを導出した。次に、真空容器中にて含浸形陰極からのバリウム蒸発速度と含浸形陰極表面のバリウム濃度の経時変化を測定した。バリウム蒸発速度の経時変化は初期においては一定であるが、次第に $t^{-1/2}$ に従って減少するようになり、バリウムのタングステン基板中からの流出がKnudsen流により律速されていることを裏付けている。

一方、この含浸材の消耗による寿命に対し、陰極電流が空間電荷制限電流の90%になる陰極温度である T_{90} を用いた寿命推定法を提案した。この含浸形陰極の経時変化の測定は、陽極にすりばち状の穴を設けた新しい2極管を使用し、TWTに陰極を組み込んだ場合と同様の経時変化を経済的に測定した。バリウム蒸発速度の経時変化とバリウム表面濃度の関係から陰極の仕事関数、更に温度制限電流の経時変化を求めて T_{90} の経時変化を理論的に導出した。この結果は新しい2極管を用いて実測した T_{90} の経時変化と良く一致した。この結果から、 T_{90} の初期値からの変化量を時間に対して両対数図に示すと、傾斜約0.6の直線により含浸材の消耗による寿命が推定できることが明らかになった。陰極動作温度を変えた場合にもこの T_{90} の経時変化の傾斜は変わらず平行に移動する。この温度依存性を決める実験式を導入することにより陰極動作温度と寿命の関係を定式化することができた。更に、この寿命推定式は含浸材の配合比を変えた場合、表面被覆のある場合、陰極電流密度を変えた場合にも適用できることを示した。この陰極動作温度と寿命の関係式から寿命が最大となる最適動作温度の存在を明らかにし、その温度は T_{90} の初期値に T_{90} 経時変化の温度依存性により決まる定数を加えた値で

あることを示した。

以上の検討の結果から得られた、表面被覆の劣化と含浸材の消耗の2種の寿命要因の温度依存性を定量的に比較した。表面被覆の劣化による寿命については、電子放射に影響を与えないと考えられる範囲である陰極基板表面被覆の表面タンクステン濃度が60%となる時点と寿命と定義した。含浸材の消耗による寿命については、使用する陰極電流密度と T_{90} がRichardsonの式の関係になることから、陰極電流密度に対して最適動作温度を求め、それに対する陰極寿命を求めることができた。この結果、陰極電流密度と陰極寿命の関係を明確にすることができ、陰極電流密度 42 A/cm^2 以下では寿命は含浸材の消耗で決まり、実用上表面被覆の寿命は考慮する必要がないことを明らかにした。

表面被覆含浸形陰極の温度加速試験についても検討した。含浸材の消耗による寿命については、 T_{90} を用いた寿命推定値から導かれた理論値は、陰極電流が初期値の90%以下になるまでの80,000時間におよび実施した寿命試験による結果と一致し、理論が正しいことを実証した。表面被覆の劣化による寿命についても、表面タンクステン濃度が60%となる時点との寿命の定義が実用上有効であることを加速試験の結果により確認した。この結果、最も寿命が長くなる最適動作温度付近では寿命は含浸材の消耗で決まり、高温領域では表面被覆の劣化で寿命が決まることを示した。このため、含浸材の消耗で寿命が決まる範囲にて温度加速試験を行えば加速率の推定が容易となる。例として、陰極電流密度が 0.6 A/cm^2 の場合は陰極動作温度 1100°C_p ¹⁾が最大加速を与え、そのとき加速率は31倍が得られることを示した。

表面被覆含浸形陰極の陰極電流密度と寿命の関係を明確にすることができたのでTWTの性能目標設定が容易となり多彩な衛星通信用TWTを実現することができた。特に長寿命・高信頼度を必要とする衛星搭載用としては、この陰極電流密度と寿命の関係をを用いて電子銃のビーム集束比と陰極電流密度の最適化を行い、陰極電流密度を 0.6 A/cm^2 と低く設定している。1988年に打ち上げられた通信衛星3号(CS-3)搭載用TWTとしては2段コレクタにて重量790 g、効率30%、1994年に打ち上げられた技術試験衛星6号(ETS-VI)搭載用TWTとしては管長の短縮により重量640 g、効率33%を20 GHz帯、

¹⁾ 本論文で使用している温度の単位 ($^\circ \text{C}_p$) は光高温計で650 nmの光学フィルターを通して測定した輝度温度の値である。

出力10 Wにて実現した。更に、1995年打ち上げ予定の次期通信衛星(N-STAR)搭載用TWTとしては20 GHz帯、出力12 Wにて、新規構造3段コレクタを用いて重量590 g、効率38%を実現した。これらのTWTは上記の表面被覆含浸形陰極の劣化理論に基づいて最長寿命陰極品種の選択を行っており、同理論を用いた最適陰極動作温度設定と T_{90} の初期値および T_{90} の経時変化による選別を行って高信頼化している。この高信頼化設計を実証するため、温度加速試験により摩耗故障分布を推定した。また、この高信頼化設計を適用したCS-3搭載用TWTの衛星軌道上の実績データを用いて偶発故障による故障率を推定した。これらの混合Weibull分布による解析の結果、7年間の使用予定期間において目標とした故障率1000 fit以下が達成できることを明らかにした。更にこの高信頼化設計によれば、ETS-VI、N-STAR等の使用予定期間10年間においてもその期間中の故障率は1000 fit以下となることも明らかにした。

このように高信頼化した結果、TWTは固体電力増幅器と同等の信頼度を有するに至った。そこで、20 GHz帯の固体電力増幅器についても衛星搭載用として高性能化を進め、電源を含めたTWTと比較し、出力4 W以上ではTWTの方が有利であることを明らかにした。

中程度の陰極電流密度 1.3 A/cm^2 の設定においては、使用者宅設置局用として特に無信号時に消費電力が小さくなる新しいコレクタを持つ14 GHz帯、出力40 WのTWTを実現した。これは、小規模地上局ではパルス動作で動作比率が小さい場合が多いため、無信号時の消費電力低減が平均消費電力の低減に大きく寄与するためである。このため、コレクタに入射する使用済み電子ビームの速度分布を直線で近似し、多段コレクタのコレクタ消費電力を予測する方法を提案した。このTWTでは動作比率1%のパルス動作時には平均消費電力が従来の1/7になるという大幅な消費電力削減に成功した。また、連続動作の場合にも10 dBの出力低減を行った場合には消費電力を従来の1/2以下に低減することができた。更に、取り扱い熱量の低下を考慮した小型化設計により、TWTの体積を従来の40%に縮小することができた。

高い陰極電流密度 2.5 A/cm^2 に設定した30 GHz帯TWTでは、次世代衛星通信方式に必要とされるKa帯衛星上り回線全周波数帯域(27.5~31 GHz)において動作可能な100 W連続出力のヘリックス形TWTを開発した。円形入出力窓、窒化ボロンヘリックス支持体、一体化磁極等の新技術を開発することによりこのような広帯域および高効率を実現した。

帯域を狭めた場合、150 Wの連続出力が可能であり、高い耐電力性能を確認することができた。更に、低温度係数の磁石を用いることにより周囲温度 $-15^{\circ}\text{C}\sim+45^{\circ}\text{C}$ の範囲ではほとんど特性は変化せず高い温度安定性も確認した。本TWTを用いれば、Ka帯の衛星上り回線全帯域での周波数瞬時移動が可能であり、柔軟な方式設計を容易にすることができる。

このように表面被覆含浸形陰極の劣化要因を解明することにより、寿命推定方法を確立し、更には寿命性能、特に陰極電流密度と陰極寿命の関係を定量的に明らかにすることができた。この結果、長寿命・高信頼度の衛星搭載用TWTや地上局用としては14 GHz帯40 W出力の超低消費電力TWT、30 GHz帯100 W出力の高出力・広帯域TWT等多彩な衛星通信用TWTを実現することができ、衛星通信の発展に大きく寄与することができた。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、懇切なるご指導、ご鞭撻を賜りました京都大学工学部電子工学教室石川順三教授に深く感謝致します。本論文のご査読を頂き、有益なご討論とご助言を頂きました京都大学工学部電気工学教室佐々木昭夫教授、同学電気工学第二教室木村磐根教授に深く感謝致します。また、京都大学在学当時、研究者として育成して頂き、本論文のとりまとめに際してご助言頂きました小川徹京都大学名誉教授、京都大学理学部物理学教室葦崎努教授にお礼申し上げます。

本研究の機会を与えて頂くと共に、本論文のとりまとめに対して終始ご鞭撻を頂いたNTTワイヤレスシステム研究所小檜山賢二所長、衛星通信研究部鮫島秀一部長、水野秀樹グループリーダー、田中符義グループリーダーに深く感謝致します。

含浸形陰極の劣化要因解明に関して、共同研究者としてデータの取得とご討論を頂いたNTTワイヤレスシステム研究所衛星通信研究部下川清志主幹研究員に心からの感謝の意を表します。通信衛星3号からの遠隔測定信号の受信にご協力頂きました同所同部坂本宏主幹研究員にお礼申し上げます。進行波管の設計に関して、ご教示ご協力頂きました元NTT無線システム研究所巻島秀男氏（現日本電気株式会社）、川島富士男氏、元日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所石堀宏一氏（現電気興業株式会社）、平田仁氏、NTT境界領域研究所通信エネルギー研究部酒寄三雄主任研究員にお礼申し上げます。

関連論文リスト

(A) 論文

- (1) N. Mita: "Degradation of coated impregnated cathode's surface coating," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-38, No. 11, pp. 2554-2557, 1991.
- (2) N. Mita: "Degradation factors of a coated impregnated cathode," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-39, No. 9, pp. 2172-2175, 1992.
- (3) N. Mita: "An accelerated life test method for highly reliable on-board TWTs with a coated impregnated cathode," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-41, No. 7, pp. 1297-1300, 1994.
- (4) 三田長久: "衛星搭載用進行波管の高信頼化とその実証," 電子情報通信学会論文誌C-II, Vol. J77-C-II, No. 12, pp. 580-584, 1994.
- (5) 三田長久, 下川清志: "含浸形陰極の劣化機構解析法," 電子情報通信学会論文誌C-II, Vol. J77-C-II, No. 12, pp. 585-590, 1994.
- (6) 三田長久: "Ku帯ユーザ局用超低消費電力進行波管," 電子情報通信学会論文誌C-II, Vol. J78-C-II, No. 7, 1995 掲載予定.

(B) 国際会議

- (1) N. Mita and K. Shimokawa: "Reliability improvement and evaluation of TWTs for communications satellites," in *Proc. International Symposium for Testing and Failure Analysis*, pp. 47-52, 1986.
- (2) H. Makishima, N. Mita and T. Yamashita: "Lightweight traveling-wave tube amplifier for a multi-beam communications satellite," in *Proc. 16th International Symposium on Space Technology and Science*, pp. 975-980, 1988.
- (3) N. Mita and H. Makishima: "Ka-band on-board traveling-wave tubes," in *Proc. 17th International Symposium on Space Technology and Science*, pp. 989-994, 1990.

- (4) H. Makishima, K. Shimokawa, N. Mita and T. Inoue: "Development of a 30 GHz 100 W cw helix TWT for satellite earth stations," in *Proc. 3rd Asia-Pacific Microwave Conference*, pp. 1153-1156, 1990.
- (5) H. Makishima and N. Mita: "Development of 20 GHz-band on-board power amplifiers," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp. 1303-1306, 1991.
- (6) N. Mita: "A mini-TWT amplifier with super-low power dissipation for Ku-band user earth stations," in *Proc. 24th European Microwave Conference*, pp. 1849-1854, 1994.
- (7) N. Mita: "A wide-band, 150-W cw helix TWT in the 30-GHz band," in *Proc. 2nd Asia-Pacific Conference on Communications*, to be presented on June 1995.

関連論文-章別対応表

章番号	関連論文
第2章	A-1, A-5, B-1
第3章	A-1
第4章	A-2, A-5, B-1
第5章	A-2, A-3
第6章	A-3, A-4, B-2, B-3, B-5
第7章	A-6, B-4, B-6, B-7