

解説

大電力電子管 —古くて新しい電磁波源—

林 健一, 加藤 昭夫, 大久保 良久, 樋口 敏春¹⁾

東芝電子管デバイス株式会社, ¹⁾元 網東芝

(原稿受付: 2008年 3月20日)

真空中の電子の運動を利用して電波を発振・増幅する電子管は、大容量で高速の電子ビームを取り扱えることから、大電力と高周波が必要な分野で発展を続けている。実用化されている主な電子管である送信管、マグネトロン、進行波管、ジャイロトロンの基本構成と主な用途を述べる。特にマイクロ波管については、電子がマイクロ波によって集群しマイクロ波の減速位相に落ち込む様子を、それぞれの管について示す。また、使用されている材料、製造プロセスの概要、ならびに電子管の信頼性と寿命に密接に関係するカソード技術について紹介する。

Keywords:

electron tube, grid tube, microwave tube, TWT, BWO, magnetron, klystron, gyrotron, impregnated cathode

1. はじめに

電子管は、「大電力と高周波」で特徴づけられる限られた分野で今も進化を続けている。核融合もその分野のひとつで、プラズマの生成、加熱/電流駆動には、色々な種類の電子管が使用され、また、実験装置の発展とともに、電子管自体の開発も進められている。イオンサイクロトロン周波数帯用の極管、低域混成加熱用のクライストロン、電子サイクロトロン共鳴加熱用のジャイロトロン、プラズマ生成用のマグネトロンなどである。これらの電子管の多くは、放送、通信、レーダー、誘導加熱や誘電加熱などの産業分野で生まれ、核融合、加速器、宇宙などの巨大科学領域のニーズにより高性能化され、一部は、医療などの新しい分野で応用されつつある。

極管はラジオ放送とともに発展してきた。小形の受信管は半導体に淘汰されたが、大電力用の送信管は、用途の中心を工業加熱にかえ、今も使われている。このことから、大型の極管を送信管と呼んでいる。カソードからプレート(陽極)に向かう電子流を、途中に設けたグリッド(格子電極)に印加される高周波電圧によって変調する最も古典的な増幅管である。動作周波数は、カソードとグリッド間を走行する電子が、変調電圧の時間的変化を顕著に感じない周波数領域の 250 MHz 以下が一般的である。

これ以上の周波数では、高周波(マイクロ波)の時間的・空間的変化を積極的に利用するマイクロ波管の領域となる。図1は、東芝電子管デバイス(株)で製品化されているクライストロンとジャイロトロンの出力と動作周波数である。クライストロンは、大電力、高利得、高効率を特長とする増幅管、ジャイロトロンは動作周波数が 100 GHz 以上の領域でも大電力が得られる発振管である。この他にも、高利得で広帯域の進行波管と後進波管、高効率で安価な発

振管のマグネトロンなどが実用化されている。電子ビームとマイクロ波の結合様式や電子の運動形態に違いはあるものの、「一様な密度とエネルギーをもつ電子ビームが、マイクロ波電磁界によって集群(パンチング)され、集群された電子群がマイクロ波電界の減速位相に入ることによって、その運動エネルギーあるいは位置エネルギーがマイクロ波に変換される」という基本原理は、どれを取っても同じである。

電子管の基本は「真空中の電子ビームの利用」、管内は超高真空に維持され、高電圧大容量の電子ビームを発生させる。これらの性能は、酸洗い、メッキなどの化学処理、真空あるいは水素雰囲気中での熱処理とろう付け、排気ベキング、電子銃の耐電圧処理、エイジングと呼んでいる管内ガスの枯化作業など、電子管特有の古くから確立された製造プロセスとともに、超高真空や高電圧技術などの最先端の要素技術に支えられている。電子放出源の熱カソードもその一つで、本解説の最後で、電子管の高信頼性と長寿命化に不可欠な含浸形カソードについて解説する。

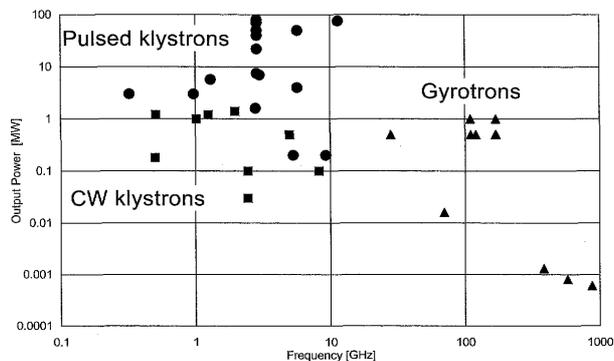


図1 クライストロンとジャイロトロンの出力と動作周波数。

Classic and Novel Electromagnetic Source "The High Power Electron Tube"

HAYASHI Kenichi, KATO Akio, OKUBO Yoshihisa and HIGUCHI Toshiharu

corresponding author's e-mail: kenichi1.hayashi@toshiba.co.jp

2. 送信管

送信管は1919年に国内初の試作に成功してから無線通信・放送などの送信機に多く使われてきたが、半導体デバイスの開発により新設の送信機にはほとんど採用されることがなくなってきた。しかし大きな出力が必要な工業用の高周波発生装置、特に動作周波数が高い誘電加熱装置では数十MHzで数kWから百kW以上の出力が必要であり、また負荷変動が大きいことから送信管に替わる適切な半導体デバイスは今のところはなく、送信管が多く使用されている。誘電加熱の応用としては、浮き輪やプール、靴などのビニール用品の溶着、食品の加熱、木材・繊維の乾燥など、誘導加熱では、金属の焼入れや焼鈍、高周波ろう付け、電縫管の溶接などがあり、送信管の用途は広い。また、核融合プラズマ発生装置のイオンサイクロトロン共鳴加熱、半導体のプラズマエッチング装置、炭酸ガスレーザーの励起用高周波源としても使われている。図2は誘導加熱装置で使用されている高周波出力240kW三極管9T38Aの写真である。

送信管は電子を密度変調することによって高周波を増幅する機能を持った極管で、陽極高周波電圧の一部を入力側に帰還させることにより自励発振もできる。三極管(Triode)は陰極(Cathode)と陽極(Anode)の間に格子状または網状の制御グリッド電極(Control Grid)を配置し、この制御グリッドの電位を変化させることにより、電子流すなわち陽極電流を制御する。四極管(Tetrode)は、三極管の制御グリッドと陽極の間に遮蔽グリッド(Screen Grid)と呼ばれる第二のグリッド電極を挿入し、これによって制御グリッドを陽極から静電的に遮蔽して、三極管よりも高い周波数で安定に動作できるようにしたものであ

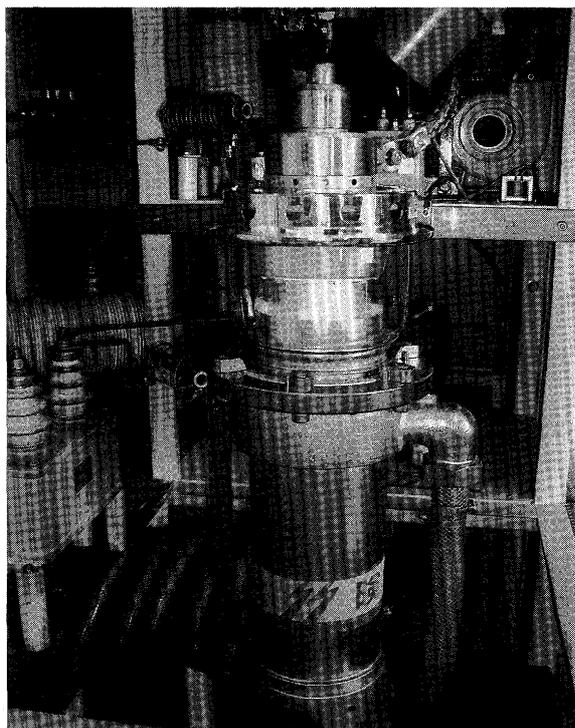


図2 高周波出力240kW三極管9T38A.

る。遮蔽グリッドには一定の正電圧を加える。図3は四極管の構造図である。送信管の各電極について次に説明する。

1. 陰極

陰極には直熱型と傍熱型があるが、送信管の陰極には直熱型のタングステンフィラメントが用いられることが多い。タングステンフィラメントは所要の放射電流を得るためには、動作温度を高くする必要がある(約2,200°C)加熱電力が大きくなるので、送信管の陰極はタングステンに1~2%の酸化トリアを混入したトリウムタングステンワイヤーを使っているものがほとんどである。トリウムタングステンの表面をある程度炭化処理することで、還元されてきたトリウム原子がタングステンの表面を覆うことにより、タングステンより低い温度(約1,700°C)で10倍程度の放射電流が得られる。

2. グリッド

グリッドはフィラメントの近傍に配置されるので、フィラメントの輻射熱とグリッドの損失により高温(約1,000°C)になる。グリッドの材料は高融点金属のタングステンやモリブデンを使用するが、グリッドの温度が上昇したり、グリッドに電子が衝突するとグリッドから不用な二次電子が放出されてしまう。これは送信管の動作を不安定にし、ダイナトロン発振などの異常発振につながる可能性があるため、グリッドからの電子放出を低減する目的で、グリッド表面に特殊な処理を施している。

3. 陽極(プレート)

陽極の材質は電子管用無酸素銅で、陽極損失による発生する熱を冷却するタイプにより空冷管、水冷管、蒸発冷却管がある。空冷管で最大のものは陽極損失が30kWまでで、それ以上は水冷または蒸発冷却になる。

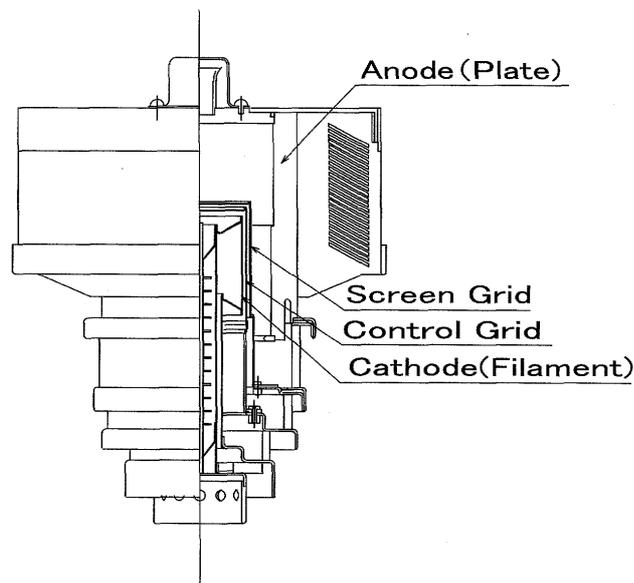


図3 四極管の構造図.

送信管はマグネトロンやクライストロンと違い外部共振回路により高周波を発生する。装置の設計にあたっては、寄生振動の防止策を実施し、異常発振のない状態で使うことが最も重要である。またフィラメントの温度が高く、各電極の電流損失による熱の発生量も多いので、冷却には十分注意を払う必要がある。

3. 進行波管、後進波管とマグネトロン

進行波管 (TWT, Traveling Wave Tube) は、効率はあまり高くないが動作帯域が広いことが特徴で、衛星通信やレーダーに使用されている。数 GHz から 30 GHz までの周波数で、数 10 W から数 kW 程度の出力をもつものが一般的である。これに対して、マグネトロンは、電子レンジ用に量産されていることは周知で、高効率、安価、小型なことから、連続動作管は、工業用マイクロ波加熱装置や半導体製造プロセス用のプラズマ発生装置に使用されている。工業周波数 2.45 GHz で 10 kW 程度までの出力をもつものがよく使われている。パルス動作管は、レーダーや放射線治療器に使用されている。最近では、治療器用として X バンドで MW 級の出力のものが開発されている。

進行波管は増幅管、マグネトロンは発振管で、形も直線形と同軸形と異なるが、電子ビームとマイクロ波の作用形態 (電子ビームとマイクロ波とのエネルギー交換の仕方) は、同じ種類に分類される。図 4 (a) と (b) は、通常の進行波管 (O 形進行波管, Ordinary type TWT) と進行波形マグネトロン (M 形進行波管, Magnetron-type TWT) の概念図である。両者とも、管軸 (z 方向) に進行するマイクロ波と電子ビームが徐々に結合し、電子ビームからマイクロ波へのエネルギー変換が行われる。これには、マイクロ波の位相速度 V_{ph} を電子ビームの進行速度 V_z と同程度まで遅くすることが必要で、らせん回路 (ヘリックス) や分布結合空洞などの遅波回路 (SWC: Slow Wave Circuit) が用いられる。

通常の進行波管 図 4 (a) では、電子ビームの上流側で入力されたマイクロ波は遅波回路を進行するにしたがって徐々に電子ビームの運動エネルギーを得て、図 4 (c) に示

すように、その電界は指数関数的に大きくなる。図 5 (a) にその過程を示す。遅波回路の入口では、(1) のように軸方向のマイクロ波電界の位相にわたって黒丸で示す電子が一樣に分布しているが、進行するにしたがってマイクロ波電界によって加減速される。図 5 (2) に示す $V_z = V_{ph}$ の場合、マイクロ波電界による加減速を受けて a 点や c 点に集まる (集群するあるいはバンチングする) が、加減速位相にある電子の数は同じなので電子ビームとマイクロ波のエネルギーの正味のやりとりは零である。図 5 (3) のように $V_z > V_{ph}$ では、集群した電子はマイクロ波の減速位相に入るため、電子ビームからマイクロ波に受渡されるエネルギーの方が多くなり、マイクロ波は増幅される。

図 4 (b) の進行波形マグネトロンは、マイクロ波の入口側に配置されたカソードに対して、正電圧が加えた遅波回路 (アノード) と零または負電圧が印加されたソール (Sole) と呼ばれる板電極から構成され、紙面と垂直方向に静磁場 B が加えられている。これらの静電磁界によって、カソードを出た電子はサイクロイド運動を行うが、電子ビームは全体として平均速度 $V_z = E/B$ の速度 (旋回中心の移動速度) で軸方向に進行する。この過程で遅波回路上のマイクロ波と相互作用を行うが、この場合、 $V_z = V_{ph}$ の時に電子ビームの位置エネルギー変化分がマイクロ波のエネルギーに変換される。

通常の TWT では軸方向のマイクロ波電界成分と電子ビームとの相互作用を利用しているが、M 形進行波管では、横方向のマイクロ波電界成分も重要な役割を果たしている。図 5 (b) にその様子を示す。 $V_z = V_{ph}$ では、相対的にはマイクロ波は電子ビームに対して止まっている。図にはマイクロ波電界中の色々な位置にある電子の旋回中心の動き方を示している。b では進行方向に d では逆方向に、また、a ではカソード方向に c ではアノード方向に移動する。結局、下図のように、電子ビームは、a 点近傍でカソード方向に圧縮され細くなり、集群点 c 近傍ではアノード方向に膨張し太くなる。したがって、ビーム全体としては低い位置エネルギーのアノード側に引伸ばられてその位置エネルギーの減少分をマイクロ波電界に与えることになる。この過程において、電子の速度はほとんど変化しないので電子ビームとマイクロ波電界との運動エネルギーの授受はない。これが、他のマイクロ波管とマグネトロンタイプのマイクロ波管との大きく異なる点で、高い変換効率が得られる理由である。

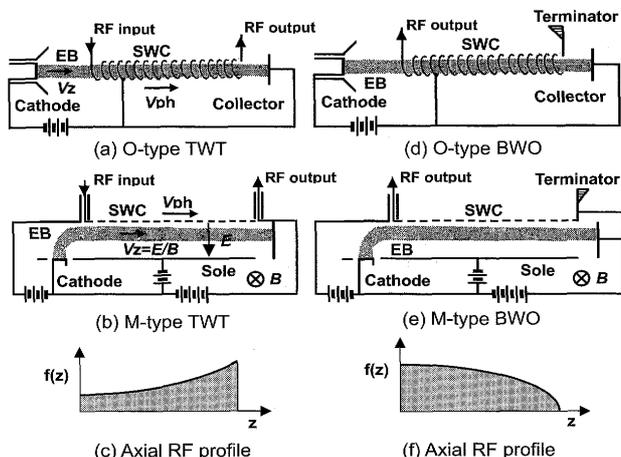


図 4 進行波管と後進波管の概念図。EB: 電子ビーム, SWC: 遅波回路。

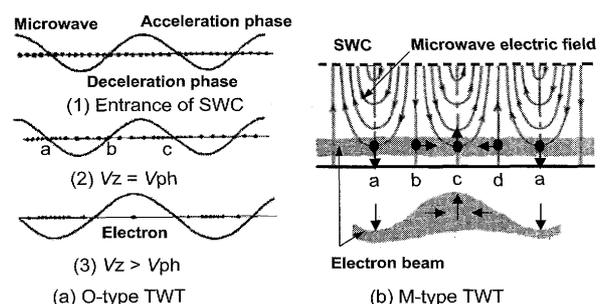


図 5 電子の集群とエネルギー交換の仕方。

実用化されている一般的なマグネトロンは、ソール電極がカソードに置き換えられた円筒状カソードの外側に同軸状に共振回路を兼ねたアノードが配置されている。動作モードはB型振動と呼ばれているが、本質的には上述した進行波増幅作用をしている。ただ、進行波タイプで遅波回路に相当する共振回路は入口側と出口側がはじめから接続されているのと、電子ビームが作用空間をひと回りしてまた入力側にもどることにより帰還がかかり発振管として働く。

遅波回路を伝わる波には、位相速度と群速度が反対の向きに伝播する後進波と呼ばれる波が存在する。この波の位相速度と電子ビームの直進速度を対応させたものが後進波管(BWO, Backward Wave Oscillator)で、進行波管と同様、図4(d)と(e)に示すようにO形後進波管(Ordinary type BWO)とM形後進波管(Magnetron-type BWO)が存在する。出力は電子ビームの上流側となることから、電子ビームへ自然と帰還がかかるため通常は発振管として働く。図4(f)に示すように、遅波回路でのマイクロ波電界は、出力端で最大となるコサイン分布となる。共振構造を持たないので、動作帯域の広い発振器として用いられている。後進波管はフランスにおいて開発が熱心に行われ、カルシノトロン(Carcinotron)と呼ばれている。カルシノはギリシャ語でザリガニのことで、その後進する性質を表している。

4. クライストロン

4.1 クライストロンの特徴

送信管の高周波動作では、陰極とグリッド間の電位で電流を制御するため、制御電極での電極間容量やリード線インダクタンスが大きくなり、陰極とグリッドの走行時間が長いという問題がある。これらを改善したのがクライストロンである。クライストロンは1939年にバリアン兄弟により発明された電子管で、電子の変調に空洞共振器を用いており、以下の特徴を持つ。

- ① UHF帯からSHF帯で、数百kWを超える大電力高周波の発生が可能である。
- ② 増幅管であるため、コヒーレントな電磁波を発生させることができる。
- ③ 空洞共振器を用いているためゲインは比較的高いが周波数帯域は狭い。
- ④ 動作効率がTWTやジャイロトロンと比較すると高い。

用途としてはレーダー、放送機、加速器、マイクロ波加熱装置などの高周波源に使用される。かつてはUHFテレビ放送などに数多く用いられたが、近年の放送装置では固体化が進んでおり、産業用途としてはレーダや治療用加速器、電子線滅菌装置、研究用としては大型加速器用途、核融合プラズマ加熱用途が主となっている。これらの要求により、高周波数化・大電力化・高効率化への開発が進められている。プラズマ実験装置用としては、最近、韓国KSTAR向けに、周波数5GHzで出力空洞に進行波型3セル空洞を採用したクライストロンが開発されている[1]。

4.2 クライストロンの原理および開発の動向

クライストロンは下記の動作により高周波増幅を行う[2]。

- ① 直進する電子に最上流に配置した入力空洞に発生する電場で速度変調を行う。
- ② 速度変調された電子の速度の違いが電子の走行により密度変調となり、集群(バンチング)され直流の電子流が高周波成分を持つ。入力と出力空洞の間には複数の空洞を設け、電子の高周波成分により誘起される電圧でさらに速度変調することにより、バンチングがさらに進む。
- ③ 最下流の出力空洞で、バンチングされた電子ビームのもつ高周波電流成分により誘起される電圧で電子を減速し、減速された分のエネルギーをマイクロ波として外部に取り出す。

クライストロンは原理上、2空洞で増幅可能であるが、動作効率やゲインを改善するため複数の空洞を有する多空洞クライストロンの構成をとる。出力空洞で電子ビームが集群するように中間空洞を配置することで高ゲインで高効率動作が可能となる。多空洞クライストロンでの電子の集群の様子を図6に示す。中間空洞では電子ビームが有する高周波成分により電圧が発生し、この電圧により電子ビームが速度変調され電子の走行とともに電子ビームの高周波成分が増大し出力空洞で最大となるように配置されている。

クライストロンは図7に示すように、電子ビームを発生する電子銃部、前述した電子ビームと電磁場の相互作用を行う相互作用部、用済みの電子ビームを熱として吸収するコレクタ部、高周波を伝送し真空気密を行う出力回路・出力窓部からなり、集束磁場を発生させる集束電磁石が相互作用部の周囲に配置される。また、必要に応じ各部位が冷

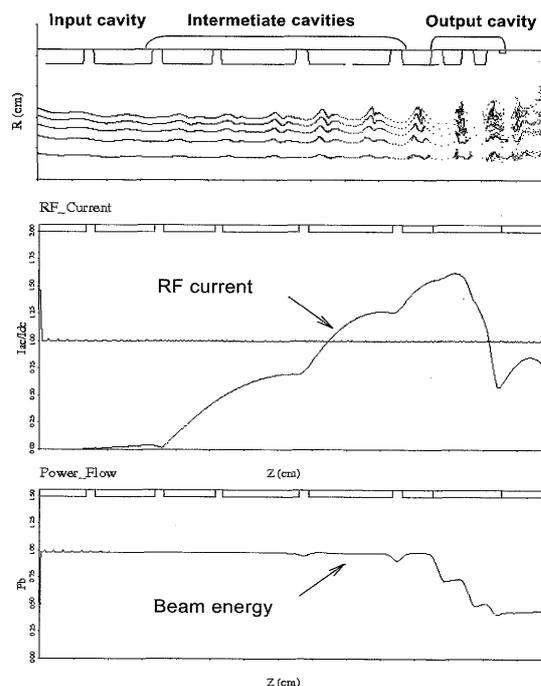


図6 クライストロンの電子ビームの密度変調。

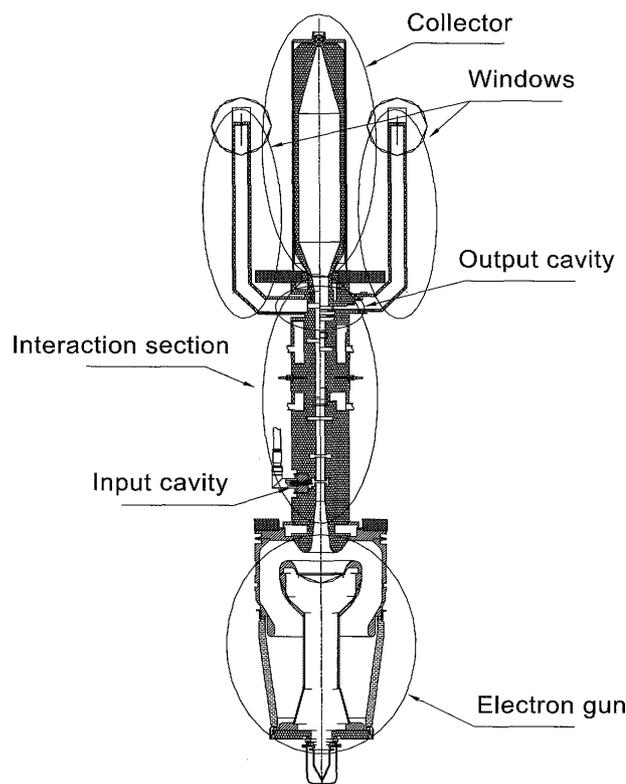


図7 クライストロンの構造.

却される。

クライストロンは、高出力化（パルス）、大電力化（CW）、高周波化、高効率化への開発が進められている。これらの課題としては①高い耐電圧性を有する電子銃、②高出力の電界に耐えられる出力回路、③大電力での高周波損失に耐えられる出力回路、④高効率で不安定現象のない相互作用部があり、各部の技術改良がなされている。

主な用途での開発動向として、治療器用と X 線自由電子レーザー（XFEL, X-ray Free Electron Laser）用のクライストロンについて紹介する。治療器は加速器により加速された電子により発生する X 線や電子線を腫瘍に照射し治療を行う。近年は高周波化による装置の小型化などの利点より、従来の S バンドから、C バンドや X バンドの治療装置が開発されている。C バンドのクライストロンでは集束磁場の発生を電磁石でなく進行波管で用いられる周期永久磁石（PPM）集束型としており、使用電力を低減し総合効率を向上させたものが開発されている [3]。

XFEL 計画は加速器で数～十数 GeV まで加速した電子をアンジュレータに通し X 線を発生させる計画である。米国 SLAC は既存の 2 マイル加速器を利用した LCLS 計画で 2009 年 4 月に世界初の X 線レーザー光を発生させており [4]、日本では SPring-8 に C バンド加速器による FEL 装置を建設中である [5]。また、ドイツ DESY を中心にしてヨーロッパでは、L バンド超伝導加速器による EURO-XFEL の建設が進められている [6]。さらには中国、韓国、スイスなどの国々でも同様な計画が検討されている。

EURO-XFEL 向けには、L バンドの 10 MW 出力のマルチビームクライストロンが開発されている [7]。クライスト

ロンは原理的に電流密度が低く高速な電子ビームの場合に動作効率が高くなるため、マルチビームクライストロンでは複数の電子ビームを用い、単ビームあたりの電流密度を下げ、複数台並列運転するのと等価とし、あまり動作電圧を高くすることなく高効率動作を可能としている。SPring-8/XFEL 計画は、従来の S バンドの 2 倍の周波数である C バンド加速器を用いた世界初の大型加速器であり、出力 50 MW のクライストロンが開発されている [8]。

4.3 クライストロンの設計およびプロセス技術

高出力・大電力を得るためには、高い電界で放電がなく、大電力の電子ビームや高周波損失による熱の発生に対して、クライストロンが良好な真空度に保たなければならない。そのため、クライストロンの製造は以下の手順で行われ、材料の選定や部品の処理に大電力での動作に対し配慮されている。

- ① 部品の洗浄・メッキ等の処理
- ② 部品やサブアセンブリでの真空脱ガス処理
- ③ ロウ接や溶接による組み立て
- ④ ベーキングによる脱ガス処理
- ⑤ 電子銃耐電圧やコレクタ・出力窓のコンデショニング処理
- ⑥ 特性確認試験

クライストロンは銅、ステンレス、鉄などの金属およびセラミックを主とした部品を用い、高温でのロウ接による組み立てや高温でのベーキングを行う。このため、大型の製品では熱膨張率の違いに対する配慮が必要である。また、電子銃のカソード付近は温度が 1000°C 以上となるため高温での動作に対する配慮、脱ガス処理や高電界がかかる部品の表面処理が重要である。出力窓や空洞共振器にはマルチパクタ放電を抑制する目的で、2 次電子抑制のための TiN コーティング処理を行う場合がある [9]。

5. ジャイロトロン

ジャイロトロンは、電子サイクロトロン共鳴メーザ（ECM, Electron Cyclotron Maser）の原理を利用するマイクロ波発振管である。従来形のマイクロ波管と同様、ジャイロクライストロン、ジャイロ TWT、ジャイロ BWO なども開発されてきたが、共鳴条件に含まれるドップラー拡がりの影響を受けない単空洞構造が実用化された。これを発明した Gapanov のグループがジャイロトロンと名づけた [10]。空洞はオーバサイズの円形導波管を用いた単純な形状のため、ミリ波領域でも大電力動作が可能である。専ら、電子サイクロトロン共鳴加熱用として開発されてきたが [11]、高調波発振によりさらに周波数の高いサブミリ波領域の発振も得られており、物性研究、イメージング、新機能性材料創成などへの応用研究が盛んになっている [12]。

図 8 は、大型管に採用されている電位降下形コレクタを搭載したモード変換器内蔵ジャイロトロン構成である。MIG (Magnetron Injection Gun) と呼ばれる電子銃部、ビームトンネル、空洞共振器、モード変換器、コレクタ、および出力窓から構成される。発振に必要な外部磁場は、超伝導マグネット (SCM) によって発生し、電子銃部から空

胴にかけて緩やかに増大し空洞で最大となる分布をもつ。MIG から出射した中空の旋回電子ビームは、ビームトンネル内を管軸方向の外部磁場にガイドされて次第に旋回方向の速度を大きくしながら走行し空洞に入射する。空洞では、電子の旋回周波数より少し高い周波数をもつ円形 TE モードのマイクロ波と相互作用を行い、電子の旋回エネルギーの一部がマイクロ波電力に変換される。エネルギー変換を終えた電子ビームはコレクタに捕集され残りの運動エネルギーは熱に変わる。一方、空洞で発振したマイクロ波はテーパ導波管、コレクタを通して出力窓から取り出される。

空洞の下流のモード変換器によって、マイクロ波と電子ビームは分離され、マイクロ波は管軸に並行に配置された出力窓から外部へ出力される [13]。従来形のジャイロトロンでは、コレクタがマイクロ波の伝送路を兼ねるためむやみに大きくすることができなかつたが、これによりコレクタの形状的制限はなくなり、大容量化と CPD (Collector Potential Depression) が可能となった。モード変換器は、放射器と複数のミラーで構成されており、空洞の発振モードである円形 TE モードをガウシアンビームモードに変換する。初期のモード変換器内蔵管では、ヴラソフ形放射器を使用したモード変換器を搭載したが、放射器の矩形開口面で発生するサイドローブによる回折損をなくすことができないため、モード変換効率は80%に止まっていた [14]。ミラー伝送系において回折損の小さくするには、放射器出口でガウス分布をもつマイクロ波ビームを放射することが必要で、最近では、放射器の内面形状を数値的に最適化する計算機コードの開発によってモード変換器のモー

ド変換効率は 97% 以上まで向上している [15]。

空洞は、図 9 (b) に示すように、円形の直線導波管の両端に円形の直線アップテーパ導波管を接続した単純な形状で、左端が空洞入口、右端が出口である。直線導波管のカットオフ周波数に近い共振周波数をもつ円形 TE モードのマイクロ波が励振される。入口側テーパで反射、出口側テーパでは分布的に一部が反射されながら出口に向かって進行する。共振状態のマイクロ波電界の軸方向のプロファイルは、直線部にまたがったコサインあるいはガウシアン分布に近い形状となる。この中を、軸方向の静磁界にガイドされて円環状の電子ビームが通過するが、個々の電子は、磁力線の周りを磁場強度 B_0 に相当するサイクロトロン角速度 $\omega_c = eB_0/\gamma m_e$ で旋回運動をしながら進行する。ここで、 γ は電子のローレンツ因子、 e は電荷素量、 m_e は電子の静止質量である。

ジャイロトロンは、旋回運動する電子の位相が速度空間で集群することによって、旋回エネルギーをマイクロ波に与えることによって発振する。図 9 (a) は、その様子を表している。(1)の空洞入口では、横方向速度空間内で、電子は直流旋回速度に相当する円周上に一様に分布し、角速度 ω_c で反時計回りに回っている。角周波数 ω のマイクロ波電界は図の y 軸方向に加えられているとする。実際には、空洞中のマイクロ波の横方向構造は円形 TE モードの電磁界である。これを旋回中心を原点とした局在座標に展開すると、図において x 方向成分も存在するが、この成分は電子に位相の変化を与えるだけでエネルギーの授受には寄与しない。

1. $\omega_c = \omega$ では、電子はマイクロ波と同期し常に同じ電界を感じている。したがって、図の右半面に存在す

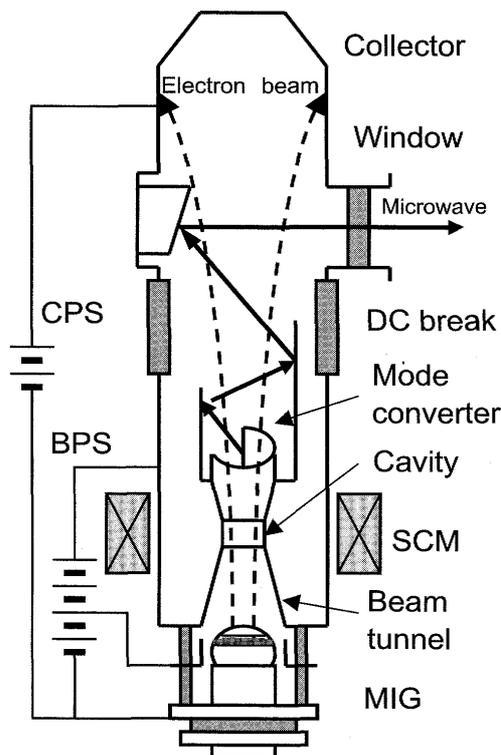


図 8 電位降下形コレクタ搭載モード変換器内蔵ジャイロトロン。

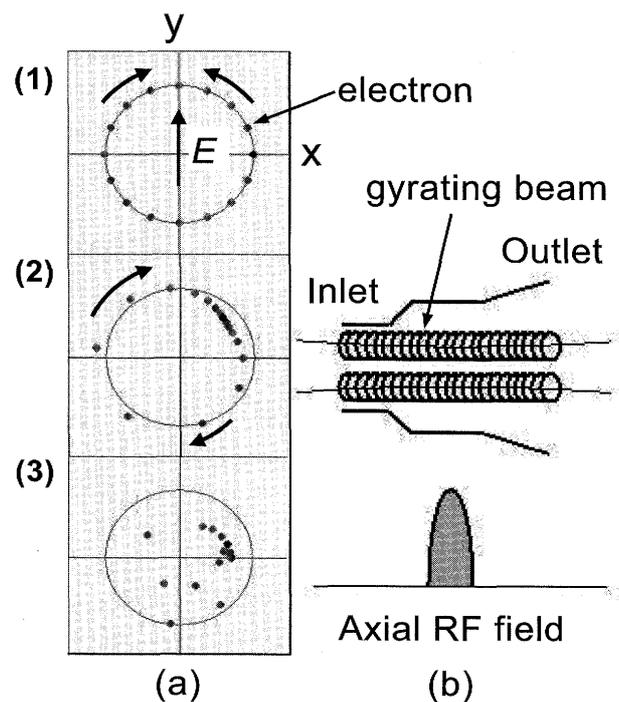


図 9 ジャイロトロン動作原理：(a)電子の速度空間内の位相集群、(b)単空洞形状。

る電子は、マイクロ波により減速され相対論的質量が軽くなるため、旋回速度が増す。一方、加速位相にある左半面の電子は、マイクロ波電界からエネルギーを得、旋回速度が減少する。その結果、電子は数周期後には位相90度のy軸上に集群されていくが、加減速位相にある電子数は等しいため、マイクロ波との正味のエネルギーの授受はない。

2. ω が ω_c よりも幾分大きい場合は、加減速を受けたすべての電子の旋回位相がマイクロ波電界の位相に対して遅れる。電子は位相差 $\omega - \omega_c$ で時計回りに回るため、図9(a)(2)に示すように電子は右半面の減速位相で集群する。さらに、減速位相の電子は、減速電界により ω_c が大きくなるため、時計回りの回転が抑制され減速位相に留まろうとする。逆に、加速位相にある電子は ω_c が小さくなるため、時計回りの回転が助長され加速位相から追い出される。
3. このようにして、電子は減速位相に入り込み、エネルギーを失い旋回速度半径も小さくなる。最終的に図9(a)(3)の空洞出口付近では、ほとんどの電子が減速位相でそのエネルギーを失い、その分マイクロ波のエネルギーが大きくなる。

ジャイロトロンにおいて高い動作効率を得るには電子の旋回速度を大きくする必要があるのであるが、カソードのエミッションベルト上の温度均一性、表面粗さ、電界の一様性、ビーム自身の空間電荷効果などによる速度のばらつきのため、周波数が高くなるほど、あるいは大電力になるほど、旋回速度を大きくすることが難しくなる。これを補うために、大型管では、空洞で相互作用を終えたスペントビームの運動エネルギーを回収して総合効率を上げることを目的として、CPD (Collector Potential Depression) が採用されている[16]。図8において、DCブレークによってボディ(空洞、モード変換器)とコレクタ間は絶縁されている。発振に必要なビーム電圧はカソード-ボディ間に接続された高インピーダンスの加速電源BPSによって印加され、電子ビームへの電力はカソード-コレクタ間の主電源CPSによって供給される。BPSとCPSの出力電圧差が回収電圧となり、回収電圧が大きいほど総合効率も改善される。CPDは、動作効率の低い進行波管では不可欠な技術として多段コレクタが実用化されている。ジャイロトロンで単段CPDがうまく動作する理由は、エネルギー交換に寄与しない進行方向の電子ビームのエネルギーを回収するからである。

6. カソード

6.1 カソード開発の歴史

図10は過去1世紀に亘る熱電子放出源の限界電流密度の発展の歴史を示すものであり、研究開発努力によって3桁半に及ぶ限界電流密度の増大が可能となった[17]。図に示すように熱カソードにはWカソード、Th-Wカソード、オキサイドカソード、含浸形カソードなどがあるが、大電力電子管には含浸形カソードが主に用いられている。含浸形カソードの発展の歴史はLカソードの改良として1952年、Leviによって発明されたカソードに端を発する[18]。

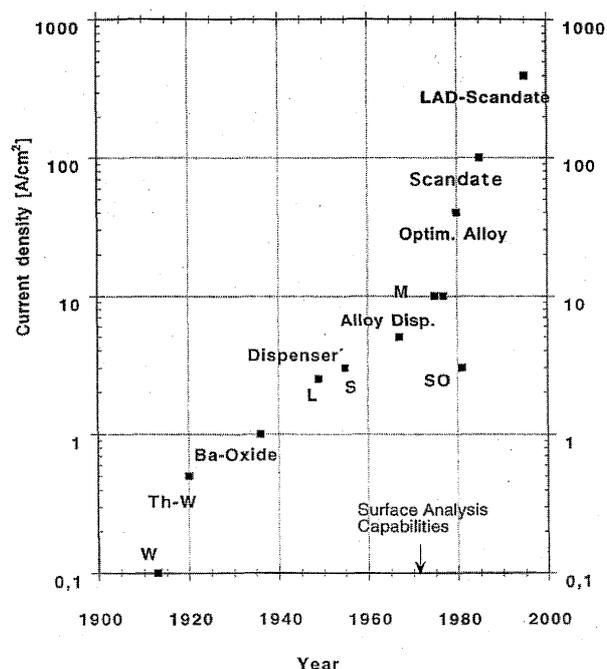


図10 過去1世紀に亘る熱電子放出源の限界電流密度の歴史: G. Gaertner, P. Geitner and H. Lydtin, Appl. Surf. Sci. **111**, 11 (1997).

その後1980年頃より Space TWT 用高信頼性・長寿命カソードの開発[19]をきっかけとして研究開発の熱は一気に盛り上がった。丁度この頃は表面分析技術の急速な進歩があり、これも大きな引き金となった。この技術開発の影響を受け1990年代よりは応用技術の段階へと進んでいった。クライストロン、ジャイロトロン、TWT、マグネトロンに代表されるマイクロ波管には一部を除き含浸形カソードが使用されている。また量産品種であるCRT用含浸形カソードは1990年代より実用化段階に移りハイエンドCRTに使用された。

6.2 含浸形カソードの構造および動作メカニズム

含浸形カソードには多くの種類があるが、大電力電子管にはM型カソードとスカンデートカソードの2種類のカソードが主に使用されている。図11に含浸形カソードの破断面のSEM写真を示した。平均粒径が3から5 μm のタングステン粉末を、空孔率が17~20%になるように高温で焼結し、その孔部に電子放射物質を含浸したものである。M型カソードの場合は、BaO, CaO, Al₂O₃よりなる電子放射物質が含浸され、カソード表面にはOs(-Ru), Irなどの金属薄膜が形成されている。スカンデートカソードの場合は、上記電子放射物質にスカンジウム酸化物が添加されている。金属薄膜の形成およびスカンジウム酸化物の添加の目的は仕事関数を低下させるためである。

含浸形カソードの構成物質であるWおよびIrの仕事関数はそれぞれ4.5 eV, 5.4 eV, またBaの仕事関数は2.5 eVである。これに対しM型カソードの仕事関数は1.9 eVと構成材料のどちらよりも低い仕事関数を達成している。含浸形カソードの動作メカニズムは単原子(分子)吸着層型カソードとして説明できる。即ち、空孔部を通ってきたBa

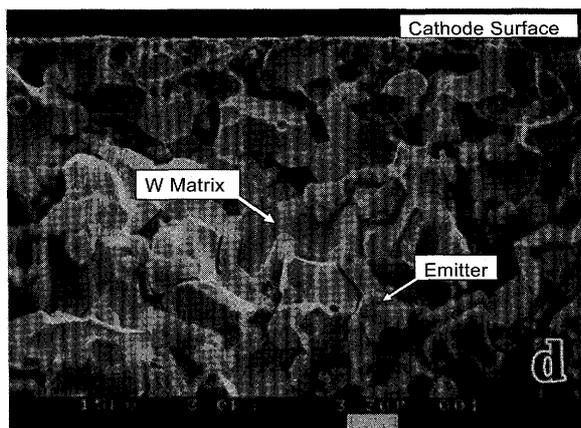


図11 含浸形カソード破断面のSEM写真。

はカソード表面を拡散し、電荷交換により電気二重層を形成し、表面近傍に強い電場を形成する。電気二重層の形成による仕事関数の低下は

$$\phi_{\text{cathode}} = \phi_{\text{substrate}} - 4\pi e \cdot n \cdot \mu$$

によって説明できる。ここで、 n は substrate 表面に形成される Ba-O の表面濃度、 μ は電気二重層の電気双極子モーメントであり、 μ および n を大きくすることによって、カソードの仕事関数 ϕ_{cathode} を低下することができる。Cortenraad の測定および計算によると、Ir コート型 M カソードの場合、 $n = 2.86 \times 10^{14}$ (個/cm²)、 $\mu = 6$ D (debye)、 $\phi_{\text{substrate}} = 5.4$ eV として、 $\phi_{\text{cathode}} = 1.89$ eV を得ている [20]。

6.3 カソード応用

カソードの種類は使用される電子管の動作条件 (CW あるいはパルス、電流密度、動作温度、電圧) や、期待寿命によって選択される。一般的にスカンデートカソードは電子放射能力は高いが、イオン衝撃に弱い傾向にあるためパルス動作のみで使用されることが多い。M 型カソードは CW とパルス動作共に使用されている。スカンデートカソードは、寿命等の信頼性を重視し実用的に、最大 10 A/cm² (パルス) で設計されている。M 型カソードの場合は、最大 10 A/cm² (パルス)、3 A/cm² (CW) で設計されている。スカンデートカソードの場合は電子放射能力が高いため、動作温度は M 型カソードより低めに設定されている。

図12は東芝で製造されている含浸形カソードである。直径 1 mm オーダから 100 mm 程度のカソードが製造されている。実際のカソード設計では電子放射特性のみではなく低消費電力、低熱膨張構造、低磁場ヒータ設計などが重要であり工夫がなされている。またジャイロトロン用カソードでは不要電子ビームを抑制するためにエミッションベルトとその両側の電極部分を熱絶縁することが重要であり、構造的な工夫がなされている。

7. おわりに

電子管の動作時には、その温度は、陰極周りで 1000℃ 以上、送信管では 2000℃ 近くに達する。このような高温動作においても、管内真空度 10^{-6} Pa 以下に維持されている。こ

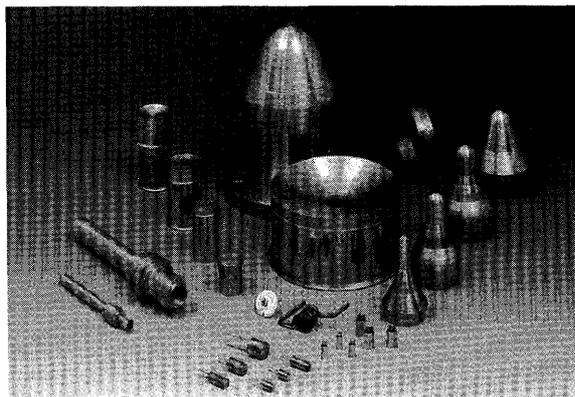


図12 東芝製含浸形カソード。

れを実現するための電子管特有の材料、製造プロセス、含浸カソードについて紹介したが、古くから培ってきたノウハウが多く、一部歯切れの悪い表現になったことに対しては容赦いただきたい。

マイクロ波管の動作原理の説明には、放射の種類 (チェレンコフ放射、遷移放射、制動放射) で分類したものや電子ビーム中に存在する空間電荷波あるいはサイクロトロン波と回路波とのモード結合を ω - β ダイアグラムで議論したエレガントなものがあるが、ここでは、物理的イメージのわかりやすいマイクロ波中の電子の運動、即ち、マイクロ波による電子の集群が減速位相に入り込む様子を図を用いて説明した。

最近、環境分野での電子管の応用が進んでいる。しかし、電子管自体、環境に優しい製品かと言われると、化学処理に使われる薬品類、材料としてのレアメタルの使用、熱を消費するだけの大型コレクタなど、マイナス面がかなりあることは事実である。電子管の開発・製造に関わるものとして、環境負荷の少ない製造プロセスの構築や小型化で高効率の電子管の開発を進めていきたい。

参考文献

- [1] 林 健一: プラズマ・核融合学会誌 **86**, 104 (2010).
- [2] 柴田幸男: 電子管・超高周波デバイス (コロナ社, 1983), 113-123.
- [3] 藤井令史 他: 信学技報 **103**, 65 (2003).
- [4] https://slacportal.slac.stanford.edu/sites/lcls_public/Pages/Default.aspx
- [5] <http://www.riken.jp/XFEL/>
- [6] http://www.xfel.eu/overview/in_brief/
- [7] A. Yano *et al.*, "DESIGN AND TESTING OF THE HORIZONTAL VERSION OF THE MULTI BEAM KLYSTRON FOR EUROPEAN XFEL PROJECT", Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy, 544, (2008).
- [8] 大久保良久 他: 信学技報 **99**, 7 (1999).
- [9] 斎藤芳男 他: 真空 **30**, 406 (1987).
- [10] V.A. Flyagin, A.V. Gaponov, M.I. Petelin and V.K. Yulpatov, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-25, 514 (1977).
- [11] K. Sakamoto *et al.*, Nat. Phys. **3**, 411 (2007).
- [12] 斎藤輝雄 他: プラズマ・核融合学会誌 **84**, 853 (2008).
- [13] 林 健一 他: プラズマ・核融合学会誌 **70**, 659 (1994).

- [14] S.N. Vlasov, L.I. Zagryadskaya and M.I. Petelin, *Radio Eng. Electron. Phys.* **21**, 14 (1975).
- [15] R. Minami *et al.*, *Int. J. Infrared and mm Waves* **27**, 13 (2006).
- [16] K. Sakamoto *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 3532(1994).
- [17] G. Gaertner, P. Geittner and H. Lydtin, *Appl. Surf. Sci.* **111**, 11 (1997).
- [18] R. Levi, US Patent 2, 700, 000.
- [19] A.M. Shuroff *et al.*, *Appl. Surf. Sci.* **8**, 36 (1981).
- [20] Cortenraad, "Surface analysis of thermionic dispenser cathodes," Dr. Thesis of Technische Universiteit Eindhoven, 2000. - Proefschrift. ISBN 90-386-1689-9. NUGI812 <http://alexandria.tue.nl/extra2/200013819.pdf>.

~~~~~ 執筆者紹介 ~~~~~



ひ ぐち とし はる  
樋口 敏 春

1964年、現(株)東芝入社、2002年定年退職。その間一貫してカソード技術開発業務を担当。以後、東芝関連会社および派遣社員として、東芝カソード技術開発業務に従事。2010年3月退社。現在筑波大学でカソードの基礎的な研究を続行中（非常勤研究員、博士（工学））。



お お く ほ よ し ひ さ  
大 久 保 良 久

1987年、現(株)東芝入社、2003年東芝電子管デバイス(株)に移籍。その間一貫して大電力電子管、主として加速器用のクライストロンの開発業務を担当し現在に至る。



か と う あ き お  
加 藤 昭 夫

1987年、東芝電子デバイスエンジニアリング(株)に入社、(株)東芝 電子管技術部に駐在し、5年間レーダ用クライストロンを設計、その後送信管の開発業務を15年間行った。現在は東芝電子管デバイス(株)の一員として送信管を中心とした電力管の営業技術を担当している。



は や し け ん い ち  
林 健 一

1979年、東芝総合研究所に入社以来、プラズマ加熱装置の開発に従事。1998年から現東芝電子管デバイス(株)電力管技術部、イオン源の開発で当時のプラズマ研究所に半年、ジャイロトロン開発でJAEAに3年お世話になりました。単身赴任歴12年。