

■ 要旨

17世紀後半に始まった電子管の研究は19世紀末から20世紀初頭にかけて放電管からX線管、ブラウン管、二極管、三極管など、急速に多様化した。電子管は固体デバイスに先立って先導的役割を果たし、今世紀の電子技術に最も貢献したデバイスのひとつとなった。すでに受信管やブラウン管に対するニーズはほぼ他のデバイスに移っているが、引き続き、X線管やマイクロ波管などの電子管が重要な技術貢献を果たすと見られる。

電子管の中で、極管、マイクロ波管など、電波の発生、増幅に関わる電子管は、放送、通信、レーダのニーズに応えるとともに、近年はマイクロ波エネルギー応用の分野のニーズにも応えて大きく発展を遂げている。本報告では、この分野のおよそ100年の盛衰の歴史をたどり、技術の系統的な発展経緯を調査する。

マグネトロンの高効率化、量産化技術、進行波管の高度化と世界に向けた市場展開、クライストロン、ジャイロトロンの大電力化への開発過程で生み出された日本の発明や技術とその蓄積は特筆すべきものがある。マグネトロンでは分割陽極の発明があり、これによってマグネトロンの高効率化が現実のものとなって、今日の発展の道が開けた。進行波管では、周期磁界集束の発明により小型軽量化が可能となり、発展の礎が築かれた。大電力クライストロンでは、1979年に将来の大型化を見通した投資が行われ、受電設備や超大型管を開発製造するための建物を含めた設備や装置の整備が進められ、大型管の真空度や出力窓に関する基盤的な技術向上がはかられた。一連の技術はジャイロトロンの開発にも引き継がれた。ジャイロトロンでは、いち早く、モード変換器やミラー系を管内に取り入れ、コレクタ電位低下動作技術を採用して、大電力、高効率性能を一段と高めた。さらにダイヤモンド出力窓の有効性を実証し、2006年には国際熱核融合実験炉ITER計画の目標性能を達成した。

今後に予定される超大型計画では、これらの大電力管とその技術が重要な働きを担うことは明らかである。すでに世界的に、高い電子管の技術的地位を築いているが、今後も引き続き、そのポテンシャルを維持し、発展と貢献の道を歩むと期待したい。電子管の開発と製造は寡占化されていて、国際協力の場で、技術の維持、強化、発展を進める段階になってきていると思われる。

■ Abstract

Research and development on electron tubes diversified rapidly at the end of 19th and beginning of 20th centuries. Electron tubes were important components in electronics before the appearance and acceptance of solid-state devices. Electron tubes achieved their largest contribution to electronic technologies in the last century. Though the market for receiving and Braun tubes has disappeared because other devices have replaced these tubes, electron tubes such as X-ray tubes and high power microwave tubes are expected to continue being important components into the future.

Gridded tubes and microwave tubes, related to the oscillation and amplification of electro-magnetic waves, have responded to the needs of broadcasting, communications and radar systems. Further, in recent years, electron tubes have found applications in microwave energy.

There have been many important contributions made by Japanese researchers and engineers to the development of electron tubes. For example, the invention of the severed anode, which contributes to high operating efficiency, the mass-production technology for the magnetron, the invention of PPM focusing technology, the world-wide export of traveling-wave tubes for ground stations, and the excellent performance attained by high-power klystrons and gyrotrons, .

Japanese high-power klystrons, gyrotrons and their technologies already have been appreciated, which are now gaining attention from other countries.

It is expected that Japan will make more important international contributions in the future.

■ Profile

岡本 正

Tadashi Okamoto

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

昭和35年3月	大阪大学工学部通信工学科卒業
昭和35年4月	東京芝浦電気株式会社入社 以降、マツダ研究所、中央研究所、 電子部品研究所、電子事業部に配属
昭和49年4月	電子事業部 電子管技術部 技術主査
昭和52年3月	電子管技術部 電力管技術課長
昭和57年4月	電子管技術部長
昭和58年4月	要素部品事業部 技術主幹
昭和62年4月	電子事業本部 電子管担当副技師長
平成1年4月	電子事業本部 電子管担当技師長
平成3年4月	電子管事業部 技監
平成9年5月	アイテル技術サービス技術顧問
平成13年12月	東京電子 顧問
平成16年12月	IDX 理事

学会：プラズマ・核融合学会、日本加速器学会、IMPI

■ Contents

1.はじめに	55
2.電子管事業の盛衰	56
3.極管	60
4.マグネトロン	68
5.クライストロン	76
6.進行波管	84
7.ジャイロトロン	92
8.まとめと系統化	99
9.おすび	106
登録候補一覧	111

1 | はじめに

真空管は電子装置の重要な部品として広く使用されてきた。

真空管は、広義では、X線管、ブラウン管、撮像管等を含む真空封止された全電子管、狭義では、ラジオ、テレビ、音響機器、通信機等に使用された受信管と一部の空冷の小型送信管を指すようである。真空管は広く使われた名前であるが、本系統化調査では、放電管を含むさらに広い範囲のデバイスの一般的な名称として電子管という名前を使用することにする。また、本報告では、二極管や、三極管をはじめグリッドを使用する電子管をまとめて極管と呼ぶことにする。

広く行き渡った電子管としては、極管のほかに、テレビや計算機出力表示用のブラウン管と電子レンジ用のマグネトロンがある。極管やブラウン管は良く知られているが、マグネトロンは、電磁波を発生し高電圧を扱う関係から、電子レンジの中の、隔離された見えないところに組み込まれていて、一般にはあまり知られていないと思われる。

電子管の研究は、17世紀後半から進められた低圧ガス中の放電研究に端を発したと言えよう。19世紀末から20世紀初頭にかけて進められた一連の研究の中で、①X線が発見され、②電波の存在が実験的に確認されて無線通信事業が始まり、③熱電子放射が観測され、④電子の性質や概念が把握され、さらに、⑤光電効果にかかわるいくつかの現象も観測された。

これに対応して、X線管、極管、放電管、ブラウン管、表示管、光電変換管などが誕生し、それぞれが大きく成長した。続いて、より高い周波数帯のニーズに応じて、マグネトロン、クライストロン、進行波管等のいわゆるマイクロ波管が開発され、レーザ管が登場した。また1974年にはジャイロトロンが発表されて、ミリ波領域で従来、不可能とされた高出力を発生できるようになった。

X線管は、医療、非破壊検査、分析等のニーズに支えられて発展した。また、X線の透過像を可視像に変換し増強するイメージ増倍管が開発され、医療や非破壊検査の分野で発展した。

極管は初期の真空度が余り良くないものから、高真空のいわゆるハードチューブへ進化し、通信、放送の分野で、次第に高い周波数帯の要求に応えながら、一方では受信管としてより小型化し、他方では送信管としてより大きい出力領域で活躍した。

極管は検波、増幅、発振、周波数変換等の機能を果たす唯一のデバイスとして、技術的にも事業としても大きく発展した。極管は、通信、放送分野のみでなく、レーダ、電子計算機、測定器等、エレクトロニクスの極めて広い範囲で使用された。1950年代中頃まで、まさに極管の独壇場であった。

しかし、トランジスタが発明され、1953年頃から実用に供されるようになって、状況は一変した。トランジスタはゲルマニウムからシリコンに進化した。固体デバイスの進展に伴って事業環境が大きく変化し、70年代後半には、受信管の生産が急減した。

放電管、撮像管、表示管、光電変換管の分野でも同様に固体装置化が進んだ。送信管、マイクロ波管も低電力、中電力のものは固体装置に市場を奪われた。事業として最も大きく成長したブラウン管も、液晶やプラズマ表示デバイスが急速に伸びたため、2005年には、国内生産を終息した。

しかしながら、電子管ならではの領域があり、現在でも、特定の分野での使用が続いていて、新しい開発も進められている。引き続き、特定の分野で重要な働きを維持していくものと考えられる。

本系統化調査では、このような電子管のうち、特に電波に関わる電子管に焦点を当て、発展、盛衰、事業の推移を調査し、産業技術史上の位置付けを行うとともに、あわせて、今後の動向を見定めることにする。

2章では、電子管事業の盛衰を概観する。

電子管には大別して、電磁波の発生や増幅にかかわるものと、撮像管や映像管のようにイメージを扱うものがある。また前者は光やX線領域で動作するものと、直流を含む電波の領域で動作するものに分けられる。

3、4、5、6、7章では、極管、マグネトロン、クライストロン、進行波管、ジャイロトロンを取り上げ、それぞれの開発推移をたどる。

8章で、調査のまとめと系統化を試みる。

調査にあたって、大学、博物館、ユーザ、メーカーのいくつかを訪問し、電子管関連の資料の提供を受けた。また、展示物、年史、社史、刊行物、インターネット情報等を利用した。特に1980年代中頃までの歴史については、日本電子機械工業会電子管史研究会が編纂した「電子管の歴史」に負うところが大きかった。

2 電子管事業の盛衰

本章では電子管の主なものについて、開発概況、発展経緯、事業の盛衰を概観する。電波の発生、増幅に関わる電子管は3.7章でさらに詳細に取り上げる。

2.1 電子管の発展の概要^{(1)、(2)}

わが国における極管の開発は、欧米諸国の技術を追う形で1910年頃に通信用三極管の研究から始まった。東京電気（現東芝）、続いて日本無線電信電話（現日本無線）が極管の生産を開始し、1920（大正9）年頃には数社が生産に加わった。

関東大震災の被害を受けて、メーカーは上記の2社になったが、その後、日本電気、川西機械（現富士通）、日立などが生産に復帰、あるいは参入した。

1925（大正14）年に、東京をはじめ、大阪、名古屋で、相次いでラジオ放送が始まった。この需要に応じて、1930年代半ばにかけ、四極管、五極管など、送信管の大電力化と受信管の多様化が進んだ。

長波帯から始まった極管の応用は、中波の時代を経て、次第に、短波、極超短波帯へ展開された。しかしながら、極管は高い周波数帯での大電力の要求に、十分に應えることはできなかった。

1921（大正10）年に米国で発明されたマグネトロンは性能的に必ずしも満足なものではなかった。1927（昭和2）年に当時、東北大の岡部金治郎がマグネトロンの陽極を分割し、性能を大きく向上させた。マグネトロンはレーダの要求に応じて20kW程度のものが製作されるようになった。1940（昭和15）年には東京工大の西巻正郎が均圧環を考案し、朝永振一郎らがマグネトロンの理論解析を集中的に進めた。出力100kWのマグネトロンが試作され、終戦直前に500kW管の開発も実施された。

イメージ関連の電子管としては、浜松高等工業学校（現静岡大）の高柳健次郎による1926（昭和元）年の「イ」の字の送像、受像実験と、これに続く高真空多極型ブラウン管、さらにアイコノスコープの試作などの先駆的な研究が進められた。幻に終わった1940年の東京オリンピックに向けたNHK技術研究所によるテレビ研究の貢献も大きかった。やがてブラウン管の研究は軍事研究に向けられ、終戦を迎えた。

戦争末期や戦後の混乱で電子管の開発はかなりの遅れをとったが、ラジオ、続いてテレビの需要に支えられ急速に力を回復した。復興と再開には、欧米の技術

に負うところが少なくなかった。

戦後復興、景気回復、神武景気、岩戸景気、皇太子ご成婚、東京オリンピックなどを経て、エレクトロニクスの全盛期を迎えた。特にラジオ、テレビ用の電子管は、量産技術を確立し、急速に需要を伸ばした。

戦後、マイクロ波管の開発はGHQ（General Headquarters、連合国最高司令官総司令部）により禁止されたが、まず通信用のマグネトロンの開発が解禁され、1950（昭和25）年にはレーダ開発が解禁された。これを契機に、米国マグネトロンの国産化が始まった。クライストロンの研究が再開され、進行波管の研究も開始された。

マグネトロンはレーダ、続いて、マイクロ波加熱、特に電子レンジ用のニーズに支えられて大きく発展した。電子レンジ用マグネトロンは性能的にも生産数量でも世界を凌ぐ実績を達成した。

進行波管はマイクロ波中継のニーズを受けて発展し、衛星通信、衛星放送分野でさらに大きく成長した。

クライストロンはUHF-TV、続いてレーダ、通信分野で活躍し、また核融合や加速器のニーズを受けて、大電力化、巨大化の道をたどった。

マイクロ波管は周波数が高くなると急速に出力が低下し、特にミリ波大電力の要求に應えられなかったが、1970年代に入ってジャイロトロンが登場し、特に核融合のニーズに應え得る大電力の達成に十分な見通しが得られるようになった。

ブラウン管は1953（昭和28）年の白黒テレビ本放送、1960（昭和35）年のカラーテレビ本放送を経て大きく発展し、大型化、広角化、高輝度化、高精細化、高解像度化に向け、性能的に大きく成長し、事業的にも巨大化した。用途もCPT（Color Picture Tube）からCDT（Color Display Tube）へと広がった。蛍光面はドット形状からストライプ形状に、電子銃もデルタ型からインライン型へ進展した。映像面の口径も40インチを越えるものが登場した（図2.1）。トリニトロンが開発され、マイクロフィルタ内蔵のディスプレイ管⁽³⁾が考案された。

ブラウン管関連では、ほかに、観測用ブラウン管、投射管の開発と実用化が進められた。

撮像管は戦前に開発されたアイコノスコープから1951（昭和26）年に開発が開始されたイメージオルシコン、さらに小型化の道を歩んで、ビジコン、プランビコン、カルニコン、サチコン、ニュービコン、ニュー

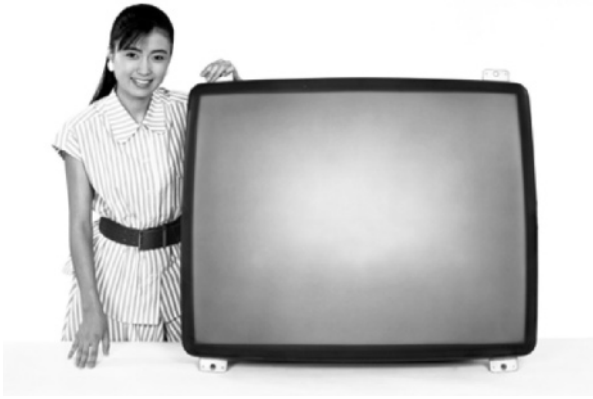


図2.1 43インチ型カラーブラウン管
(写真：松下東芝映像ディスプレイ)

ーコスビコン、トリニコンなどが誕生した。最近の開発では、光が極めて弱いところで力を発揮できる高感度HARP (High-Gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor) 撮像管がある⁽⁴⁾。この撮像管は1985 (昭和60) 年に開発が始まり、現在も開発が継続されている。図2.2はHARP管の外観写真である。



図2.2 2/3インチ型HARP管⁽⁴⁾

光電子増倍管の研究は戦前から始まっていたが、1950年代後半からわが国独自の開発が進められ、1970 (昭和45) 年頃にはマルチチャンネルプレートを組み込んだ製品が発表されている。特筆すべき開発品のひとつに、過去にカミオカンデで使用され、引き続き、スーパカミオカンデで使用されている光電子増倍管がある (図2.3)。図2.4はこの光電子増倍管11,200本を実装したスーパカミオカンデの内部写真である⁽⁵⁾。



図2.3 光電子増倍管
R3600-05 (写真：浜松ホトニクス)

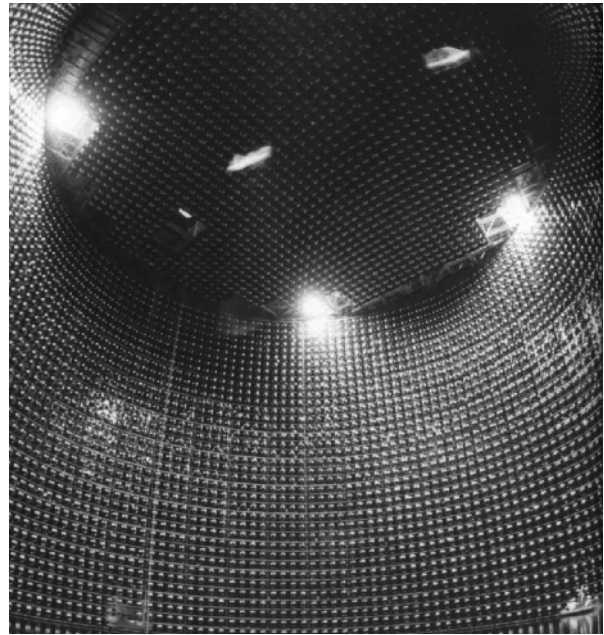


図2.4 スーパカミオカンデ⁽⁵⁾

X線管は1915 (大正4) 年のガス入りX線管 (図2.5)、1920 (大正9) 年の高真空クーリッジ管に始まった。1938 (昭和13) 年には回転陽極管が開発された。戦時中の空白を脱却し1950年代には完全に力を盛り返した。性能も向上し、診断用、歯科用、治療用、工業用、分析用などへ向けて多様化が進んだ。

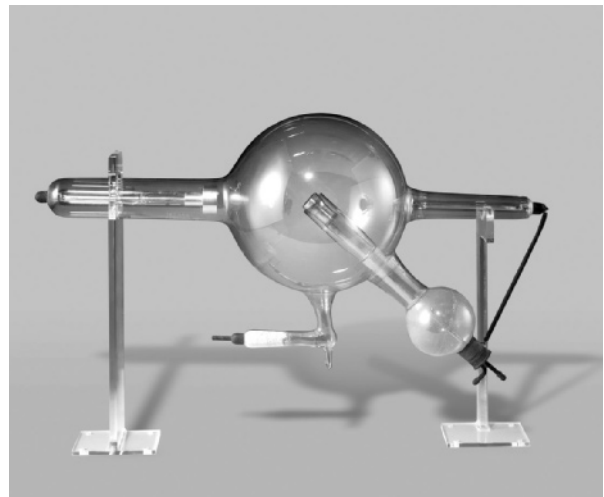


図2.5 ガス入りX線管 (写真：東芝科学館)

回転陽極管は、金属製のベアリングを使用するものであったが、1989 (平成元) 年に、液体金属潤滑軸受けを利用するX線管の開発が始められた。図2.6にこのX線管の基本部を示す。回転によってヘリンボーンと呼ばれる溝に発生する液体金属の動圧の作用を受け、軸受けの金属が互いに接触することなく回転部が液体金属中に浮かんだ状態となるユニークな軸受けである。高真空中で機械的磨耗なしに使用できる特長を持っている⁽⁶⁾。すでに数100本を越す製品が市場に出ている。

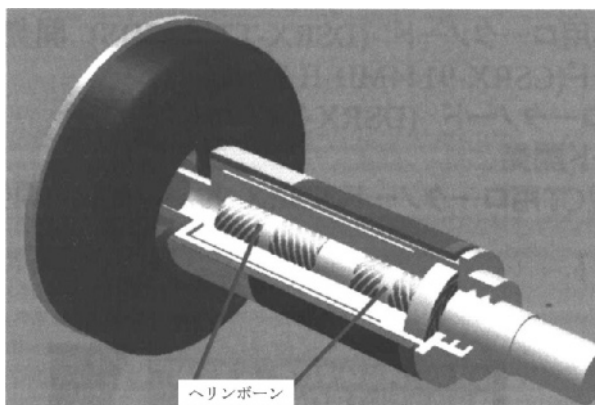


図2.6 液体金属潤滑X線管

1948（昭和23）年にWH社が発表したX線イメージ増倍管は、日本では1950（昭和25）年代中頃に東京芝浦、島津製作所、日立が研究を開始した。これはX線のイメージを可視像に変換する機能を果たす電子管で、X線管とともに、医療、工業、手荷物検査等に広く利用された。画像面の径は6ないし16インチにわたっている。

放電管も早くから開発を開始された電子管である。日本ではすでに1920（大正9）年頃に整流管として利用され、水銀陰極、熱陰極、冷陰極の放電管として、整流、定電圧、点灯、避雷、放射線検出・計数、表示など、広範囲に利用されてきた。現在は放電管が活躍する範囲は大幅に狭くなっているが、高電圧のスイッチング用としてサイラトロン、イグナイトロン等が重要な働きを担っている。

1963（昭和38）年に開発が始められたレーザ管も放電管の一種である。このほか、特殊な放電管では、原子炉の内の中性子を検出する中性子検出インコアモニタがある。これは管内で起きる中性子による核分裂を利用する極めて特殊な電子管である。

2.2 競合と事業の盛衰

受信管は、ラジオやテレビの不可欠な部品として量産され、1959（昭和34）年には、年間で2億5000万本の生産を達成した。ブラウン管は、テレビやコンピュータの画像表示に使用され、最盛期には、年間の生産高が7,000億円に近い事業へと発展した。

1947（昭和22）年に点接触型トランジスタ、1951（昭和26）年に接合型トランジスタが発明され、1953（昭和28）年頃から実用に供されるようになった。1954（昭和29）年にシリコントランジスタ、1962（昭和37）年には電界効果トランジスタが出現した。

1955（昭和30）年には東洋通信工業（現ソニー）が

トランジスタラジオの発売を開始し、60年代に入るとテレビのトランジスタ化が急速に進んだ。この固体化の影響を受け、受信管の生産は1959（昭和34）年をピークに急速に減少した。1970（昭和45）年末には、各メーカーが相次いで受信管の生産を打切った。なお、音響関係では、現在でも受信管や小型の送信管に対する根強いニーズがあって、もっぱら海外の製品がその需要を満たしているような状況もある⁽⁷⁾。

カラーブラウン管は、高精細化、広角化に向け、多くの努力が傾注され、性能が大幅に向上した。カラーテレビを始め、コンピュータの表示で不動の地位を築いた。しかしながら、フラット化、大画面化の点で液晶表示デバイス（LCD）や、電子管の一種であるプラズマ表示パネル（PDP）に対抗できず、図2.7に示すように、1995（平成7）年をピークに、生産が急速に減少した⁽⁸⁾。2000年代に入ると、日立、東芝、ソニーが相次いで生産を中止し、2005（平成17）年には国内生産が終息した。

放送用送信管の使用はなお続いているが、同様に固体デバイス化が進み、今後、行われる放送機の更新に際して、いっそうの固体化が進むものと予測される。

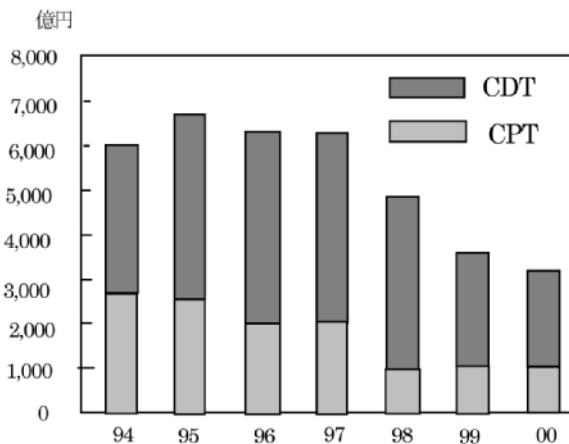


図2.7 カラーブラウン管の生産推移⁽⁸⁾

撮像管も、固体化により活躍の場を狭められた電子管である。1970年代後半から1980年代にかけてCCD（Charge Coupled Device）が大きく成長したため、急速に市場を奪われた。

競合の問題は他の原理で動作するデバイスの間だけでなく、電子管同士でも起きている。たとえば、カラーブラウン管がPDPに置き変わったほか、レーダの高度化に伴って、マグネトロンが進行波管やクライストロンに置き換えられるなどの例がある。

電子レンジ用のマグネトロンに関しては、一時、固体化の検討が進められたが、今では、価格的に無理と判断され、固体化の可能性はなくなっている。しかし、

メーカー間の激しい競争のために価格の低下が進み、生産数では今なお増加方向にあるが、生産自体はほぼ海外に移っている。海外生産も人件費の高い国では成り立たなくなっていて生産中止に追い込まれている。

電子管事業の盛衰は電子管自身の問題にとどまらない。たとえば、ブラウン管のガラスバルブのような関連部品事業に大きい影響を与えたほか、電池のように受信管と協同してトランジスタラジオに使用された製品の事業にも相当な影響を与えた。

今も開発が続いている電子管は、X線管やマイクロ波・ミリ波大電力管等である。これらの電子管は、X線CT、衛星通信、衛星放送、超大型加速器、核融合等のニーズを受け、引き続き、開発が継続されている。

X線管は、線源として价格的に代わるものがない。また、大電力マイクロ波管は、単管当りの出力が大きく、これが存続の路を開いている。

一般に大電力大型システムに利用されるデバイスに求められる出力は、システムの設計や回路方式によって要求のレベルが異なるが、経済性や取り扱い上の見地から、通常、大きい方が望ましい。固体デバイスは数を増すことによってある程度出力を増やすことができるが、容積や重量が電子管よりかえって大きくなるほか、効率が下がってしまうという問題を持っている。たとえば、衛星搭載管の固体化も進みつつあることは否定できないが、次期放送衛星搭載用の進行波管に対し、今なお、開発が継続されている。

以上、述べたような競合と事業環境の変化を反映し、経営的見地から、東芝、日立、日本電気などは、開発と製造の拠点を関係会社に移している。この動きは、わが国だけでなく欧米でも見られ、事業の整理統合、社名の変更、事業の売却、事業場の統合等が行われている。

JEITAの電子部品生産実績のデータ⁽⁸⁾からまとめた各種電子管の生産高比を図2.8に示す。1999および2005年度の電子管の生産高は、それぞれ、4,730、3,038億円で、総額が大きく減少していること、プラズマ表示デバイスがブラウン管に代っていることなどが読み取れる。

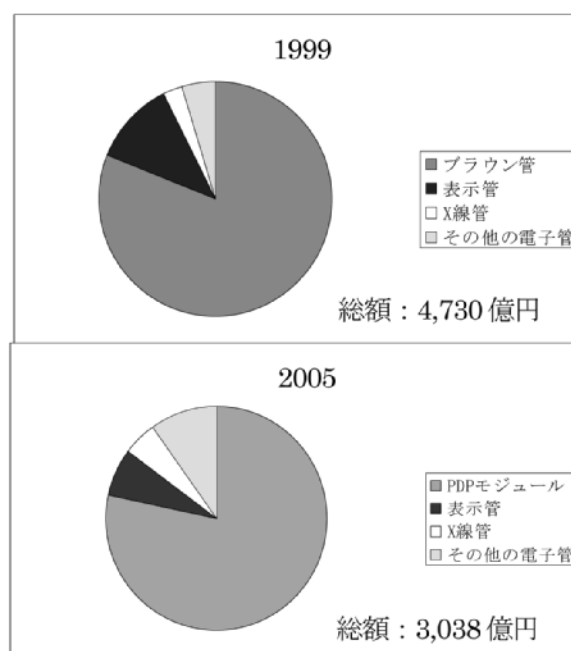


図2.8 電子管生産高比の推移⁽⁸⁾

参考文献

- (1) 日本電子機械工業会電子管史研究会：電子管の歴史、エレクトロニクスの生い立ち、オーム社（1987）
- (2) S. Okamura：“History of Electron Tubes”、Ohmsha Tokyo Osaka Kyoto、IOS Press Amsterdam・Oxford・Washington（1904）
- (3) 岡本：「真空管の移り変わり 電子管の変遷と最近の動向、技術探索、電学誌、116巻 7号、P427-430（1996）
- (4) 谷岡：「超高感度HARP撮像管の研究開発とその応用」、平成18年度技研公開研究発表予稿集、p6-15（2006）
- (5) 高エネルギー物理学研究者会議編：「素粒子が解き明かす万物創成の謎」、加速器研究機構
- (6) 小野、北出、阿武：「液体金属潤滑の滑り軸受を採用したCTスキャナ用回転陽極X線管装置」、東芝レビュー vol. 50 No.1 p.55-58、（1995）
- (7) 諏訪：「真空管 若者をひきつける「やわらかい音」、とれんどサーチ、朝日新聞 6月18日（2006）
- (8) JEITA：「1999～2005年における電子工業の動向」

3 | 極管

極管は、多様化、小型化（受信管）、大電力化（送信管）、高周波化に向けて発展する。

3.1 電球からハードチューブへ

白熱電球には断線とバルブ黒化の問題があった。エジソン (T. A. Edison) はこの現象を詳しく調査した。彼は、(1) 断線がフィラメントのプラス側の特定の位置に限られていること⁽¹⁾、(2) プラス側の近くでバルブが黒く着色し、しかもマイナス側から見たときフィラメントのプラス側の部分の影に当たるところの黒化がやや薄いことに気づいた⁽²⁾。そこで、図3.1に示すように、フィラメントのプラス側とマイナス側の中間に白金の板状電極を挿入した。この電極を電球のプラス側端子に接続すると電流が流れ、マイナス側に接続すると電流が流れないことを観察した。この電球が電圧計に使用できると考え、1883（明治16）年に特許を申請した⁽³⁾。特許に示された電圧計を図3.2に示す。この電球は構造的には二極管そのものであるが、その応用は、単に白金板をフィラメントのプラス側に接続して電圧計として使用するだけにとどまった。彼は1,000を

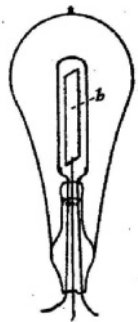


図3.1 エジソンの二極管⁽³⁾

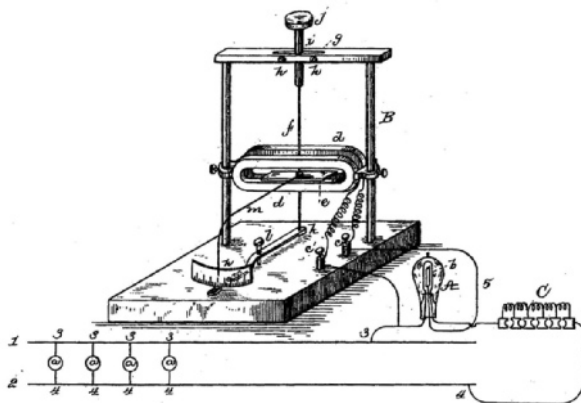


図3.2 エジソンの電圧計⁽³⁾

を超える特許を取得しているが、この二極管をさらに発展させることを考えなかった。

1984年9月に米国電気学会（AIEE）の第1回講演会が開催され、その席で、エジソンが作った電極入り白熱電球が取り上げられ、電位の高い方から低い方へ電流が流れる現象が説明されている。この現象は後にエジソン効果と呼ばれた。当時、陰極線管の研究が進められ、マイナス側の電極から放射された陰極線が電界や磁界の作用で偏向できることがすでに知られていたが、電子が発見される以前のことであった。

フレミング (J. A. Fleming) がエジソン効果を検波に利用できることに気づき、1905（明治38）年に、二極管の特許を取得した⁽⁴⁾。この間、エジソンの発明から実に22年の歳月が流れている。無線通信事業が開始されて以来、検波器としてコヒーラが使用され、いろいろな改良も進められてきたが、フレミングの着想はその流れを大きく変える発明であった。この頃、検波器として、フェッセンデン (R. A. Fessenden) のパレット^{(5)、(6)}、ボーズ (J. C. Bose) の方鉛鉱を用いた鉱石検波器などの発明が行われていた。

図3.3にフレミングの二極管の検波回路を示す。図のcがアルミ製の円筒陽極で、この電極が炭素フィラメント（陰極）bから放出された熱電子を捕集する。電流は陽極から陰極に向かってのみ流れるので、陽極に加えられた高周波が検波され、ガルバノメータ1で検出される。特許の中ではこの二極管を2個使った全波の検波についても言及されている。

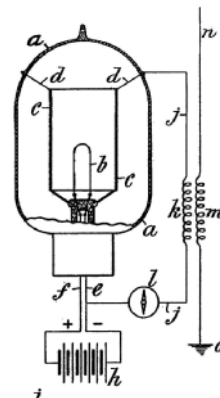


図3.3 フレミングの二極管⁽⁴⁾

1907（明治40）年にドフォレスト (L. de Forest) が三極管を発明した⁽⁷⁾。特許は翌年に登録された。図3.4にドフォレストの三極管の構造とそれを用いた回路を示す。

高周波信号が格子aとフィラメント（陰極）Fの間に加えられ、検波され増幅された電流が陽極bから陰極Fに向かって流れ、指示デバイスTで検出される。彼は管内に封入した低圧ガスが重要な働きをしていると考えていたようである。なお、ここに示した三極管のほか、管外から電磁界を作用させて制御する二極管⁽⁸⁾や三極管⁽⁹⁾などの特許を取得している。彼は1906（明治39）年に外部制御の三極管にオーディオン（audion）という名をつけて発表した⁽¹⁰⁾が、後に、一般に、三極管がオーディオンと呼ばれるようになった。

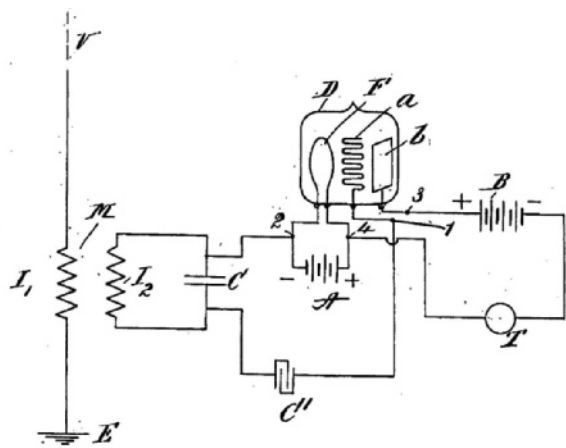


図3.4 ドフォレストの三極管⁽⁷⁾

オーディオンは真空度が低いいわゆるソフトバルブであった。オーディオンはその後、水銀ガスを封入したリーベン・ライス（Lieben-Reiss）管、さらにはサイラトロンのような放電管として発展する道と、真空度を高めたハードバルブとして発展する道に分かれる。

1915（大正4）年、ラングミュア（Irving Langmuir）は、(1) リチャードソン（O. W. Richardson）の熱電子放出理論からガスは不要であること、(2) 高真空の電子管（ハードバルブ）で、陽極電圧の $3/2$ 乗に従う陽極電流が得られることを米国無線学会（IRE）誌で報告した⁽¹⁰⁾。彼は二極管をケノトロン（kenotron）、三極管をプライオトロン（pliotron）と名づけている。この $3/2$ 乗則は、チャイルド・ラングミュア（Child Langmuir）の法則として知られるものである。

オーディオンは1910（明治43）年頃に日本に入っている。電気試験所で評価したところ、感度は鉱石検波器より数倍高かったが、動作が不安定であった。このため、すぐには実用にならないと判断された⁽¹¹⁾。

電気試験所の研究はいったん中断されたが、1916（大正5）年に再開された。メーカーでは、同年、東京電気（現東芝）¹、翌年には日本無線が電子管の研究を開始した。

東京電気は1917（大正6）年に、わが国最初の電子

管を完成し、これをオーディオンバルブと呼んだ。続いて1919（大正8）年には円筒型陽極のオーディオン、翌年にはプライオトロンを製作した⁽¹²⁾。図3.5に1917年に生産されたオーディオンの写真を示す。

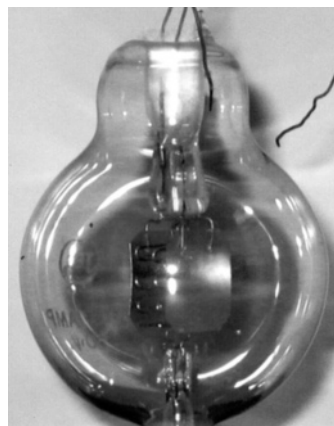


図3.5 球形オーディオンUN100
(写真：電気通信大学歴史資料館)

3.2 多様化

三極管は、(1) 制御格子と陰極の間に、空間電荷格子とよばれる正電位の格子を入れ、陰極前面の負電荷をこの正電位の格子で中和して陽極電圧を下げた空間電荷格子四極管、(2) 制御格子と陽極の間に正電位の格子を挿入して単に利得を高めることを意図した四極管、(3) 制御格子と陽極管との間の静電容量を減らした遮蔽格子四極管へと発展する。遮蔽格子四極管に関して1919年に安藤博が特許を申請している⁽¹³⁾。

遮蔽格子四極管には、陽極に衝突した電子により発生する2次電子が遮蔽格子に流れることにより、陽極電流が減少する問題があった。特に2次電子の発生は電極の汚れにより大きく変化し、時間的にも不安定であった。対策として、1920年代後半から1930年始めにかけ、オランダとアメリカで遮蔽格子と陽極との間に抑制格子を挿入した五極管が作られた。

続いて、四極管ではあるが、制御格子と陽極との間隔を広げ制御格子と遮蔽格子を目合わせしたビームパワー管、周波数変換を行う六極管、七極管、八極管などが考案された。このほか、複数の電子管をひとつにまとめた複合管が作られた。

ハードバルブは、このようにして、二極管の整流・検波から、次第に電極数を増して、増幅管さらには周波数変換管へ向かう系統をたどって発展した。

日本では、たとえば、東京電気が1923（大正12）年にソフトバルブUV-200、ハードバルブUV-201をサイモトロン²の名称で発売し、翌年には、タングステンフ

フィラメントをトリウムタングステンに変えて陰極温度を下げたUV-199、UV-201Aを発売している。これらの受信管を図3.6に示す。

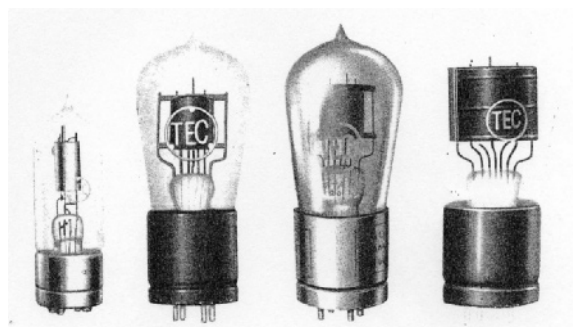


図3.6 初期の受信管⁽¹⁴⁾ 左から UV-199、UV-200、UV-201、UV201A

1925（大正14）年にラジオ放送が開始された。

東京電気は1928（昭和3）年には酸化皮膜フィラメントを用いた交流用の三極管UX112A、UX-226、翌年にUY-227を発売し、1930（昭和5）年に遮蔽格子四極管UY224、1932（昭和7）年に五極管UY-247、UY-247B、その翌年には高周波増幅用五極管UZ-57、UZ-58等を製作して多極化を推進した。ラジオの大衆化に応じて、1934（昭和9）年に小型化した達磨型の多くの製品UX-12A、UX-26B、UY-27A、UY-24B、UY-47B等、フィラメント電圧を2.5Vから6.3Vに変えた受信管Ut-6A7等を市場に送った。また、三極五極管Ut-6F7、双二極三極管UZ-2A6、UZ-75、双二極五極管Ut-2B7、周波数変換用七極管Ut-2A7等を発売した。ビームパワー管としてはUZ-6L6Aを1938（昭和13）年に発売している⁽¹⁵⁾。

1935（昭和10）年にGEが真空外囲器を金属に変えた全金属真空管を開発した。日本では東京電気が全金属真空管の開発を進め、1938（昭和13）年に一連の全金属真空管US-6C5（三極管）、US-6J7（高周波増幅用五極管）、US-6L7（混合管）、US-6V6（ビームパワー管）等を完成し、海軍向けに納入した⁽¹⁶⁾。

通信管は直列に数多く縦続して使用された。このため特に信頼性、均一性、安定性が重要な要件であった。この分野は、1925年にWEの中継器と真空管を輸入して納入し、その後、国産化を進めた日本電気がもっぱら推進した。すなわち、1931年から1933年にD型三極管（101-D等）、1933年から1934年にフィラメント電流を1/2としたF形三極管101-F等を国産化した。1935年にはさらにフィラメント電流を1/4に減らしたTB-600-A等や、無装荷ケーブル搬送電話用の通信管HO-101-F等の生産を手がけた⁽¹⁷⁾。

1937（昭和12）年の支那事変で物資の統制が求められた。特に銅と鉄を使用するトランスを節約する目的

で、フィラメント電流を150mAに統一し、複数の受信管を縦続接続することが考えられ、フィラメント電圧を12Vまたは24Vとした一連の受信管12Y-V1（高周波可変増幅用五極管）、12Y-R1高周波増幅、検波用五極管）、12Z-P1（電力増幅用五極管）、24Z-K2（倍電圧整流管）等が発売された⁽¹⁸⁾。

受信管の小型化については、RCAが1937（昭和12）年にGT管、1939（昭和14）年にミニアチュア（MT）管、さらに1941（昭和16）年にサブミニチュア（SMT）管を発売した。小型化の要求に応じて開発された一連の受信管の外観を図3.7に示す。

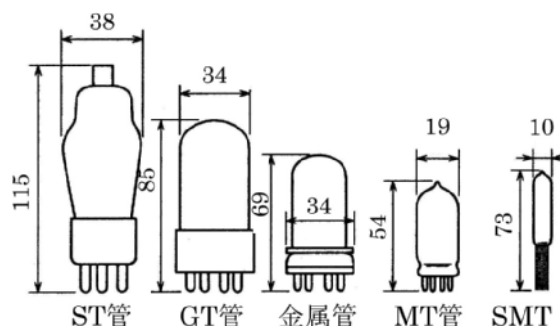


図3.7 受信管の小型化⁽¹⁹⁾

1941（昭和16）年に太平洋戦争が始まり、軍用受信管の開発が進められた。主なものに東京芝浦が発売した金属缶でバルブを覆って機械的強度を向上し、合わせて遮蔽効果を増したRH-2、RH-4等のHシリーズ、金属缶を使用せず、代わりにステムにアカダックを塗布して静電容量を減らして量産性を向上したGT管ソラ、日本無線の万能五極管FM-2A05Aなどが戦時体制化で開発されている（図3.8）⁽²⁰⁾。

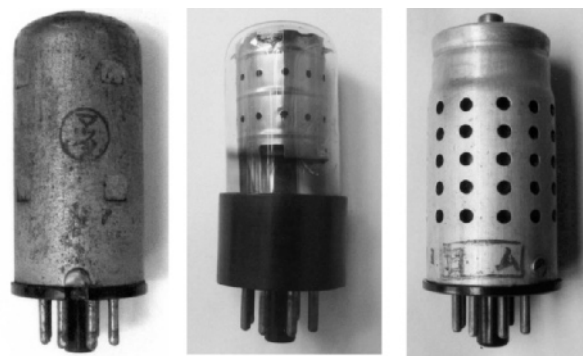


図3.8 太平洋戦争中の電子管
左から、RH-2、ソラ、FM-2A05A
（写真：電気通信大学歴史資料館）

戦後は、品不足を背景に受信管の製造会社が乱立した。国民型受信機用、続いて1948（昭和23）年にはスーパーヘテロダイン方式受信機用の受信管UZ-6C6、6WC5等や、トランスレス受信機用の受信管12WC5、

12Y-V1A等が製造された。また、GT管12G-C5、6V6-GT等が販売された⁽²¹⁾。

1950年代に入ると、MT管の生産が急速に伸びて、この頃、減少に転じたST管、さらに増加傾向にあったGT管を凌いで、50年代半ばには、過半数を超えるようになった。ポータブル受信機用のMT管1T4、1R5-SF等も生産された⁽²¹⁾。

1953（昭和28）年、テレビ本放送が始まった。6J6、6BQ7A等の双三極管、高周波五極管6CB6、ビームパワー管6BQ6-GTBなど多くの受信管が販売され、1955年には、トランスレス用の300mA、600mAシリーズが発売された。1960年代から70年にかけて、受信管は黄金時代を享受した⁽²¹⁾。

UHFテレビ放送、カラーテレビ放送に関連してさらに多くの受信管の開発が進められた。日立製作所によるニュービスタ（MT管より小型、金属外囲器）、東京芝浦のスタックトロン（全セラミック、超小型）など、新しい製造技術を取り入れた小型受信管の開発が進められたほか、陰極から陽極に流れる電子流をビーム状に絞ったゲートドビーム管、1個のガラス管内に2個または3個の受信管を挿入したコンパクトロンなどが開発された⁽²²⁾。

3.3 大電力化

極管の出力は要求されるシステムの回路設計や動作周波数²に依存する。出力が大きいほど、より遠くへ電波を送ることができるので、一般に、より出力の大きい電子管が求められる傾向にある。ここでは、開発の歴史をたどりながら出力レベルを見ていくことにする。

極管の大電力化の取り組みは、無線通信、無線電話の発展に伴って、まず陽極材料をニッケルからモリブデンに変えたり、電極の引き出し方に工夫を加えたりする材料変更のレベルから始まった。当初、電子管の冷却は自然空冷であったが、油浸による冷却も試みられ、やがて、より効果的な冷却法として、強制空冷、水冷等が利用されるようになった³。1923（大正12）年には水冷送信管の試作が逓信省電気試験所で進められた。

長波から始まった無線通信は短波の時代を迎えた。また、ラジオ放送の高出力化が進められた。

東京電気は1926（大正15）年、短波用送信管SN-204、SN-208を製作した。また、同年、トリウムタングステンフィラメントを使用した送信管UV-203A、UV-204A等を試作した。1927（昭和2）年に東京電気はかねてより開発を進めていた陽極入力30kWの水冷管UV-207を完成した⁽²³⁾。

東京電気は、1929（昭和4）年に、四極送信管UX-860、UV-861（図3.9）を開発し、翌年、日本無線電信と協同で40kW短波無線機を完成して、小山送信所に設置した。終段には水冷三極管SN-167を使用した⁽²⁴⁾、⁽²⁵⁾。



図3.9 四極送信管 V-861
（写真：逓信総合博物館）

ラジオの分野では、東京電気が1933（昭和8）年に陽極入力200kWの三極水冷管UV-169を完成し、翌年、東京中央放送局150kW放送機に使用する陽極入力400kW（最大陽極損失200kW）の送信管UV-171を完成した⁽²⁶⁾。図3.10にUV-169、UV-171の外観写真を示す。

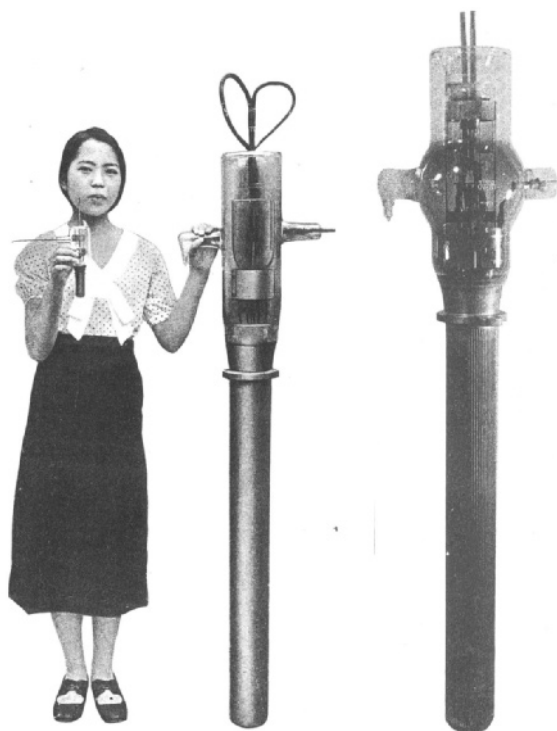


図3.10 150kW放送機用送信管
（左：UV-169 右：UV-171）⁽²⁶⁾

右手に持っているのは超短波水冷管SN-209Cである。

東京電気の送信管は、水冷を行う陽極の片側が閉じた単端型であるが、日本電気は陽極円筒の両側にガラスバルブを設け、一端から格子電極を、他端から陰極を挿入する両端型送信管を製作した⁽²⁷⁾。一例を図3.11に示す。

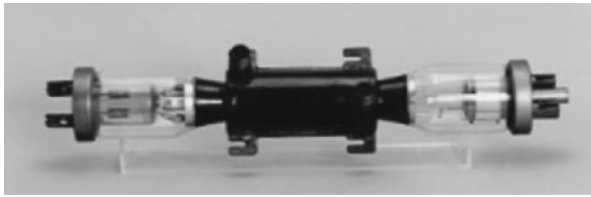


図3.11 両端型送信管 TW-512A
(写真：通信総合博物館)

送信管はもっぱら三極管、四極管であったが、1935（昭和10）年頃から、航空機用、移動無線機器用に五極管が使われるようになり、小出力から200W級に至る五極送信管UZ-47D、UY-510B、UV-1083等が開発された^{(28)、(29)}。

ラジオ用放送機の大電力化が進む中で、フィラメントの交流点火が行われるようになった。たとえば1937（昭和12）年には東京電気がUV-171Dを完成し、京城の50kW放送機に供した。また、1939（昭和14）年には日本電気がTW-558-Aを開発し、台湾民雄の100kW放送機に供した⁽³⁰⁾。

超短波帯の送信管では、1934（昭和9）年に東京電気がSN-610（無線電話実験用）、日本無線が1936（昭和11）年にU 330 T（テレビ放送実験用）を発表している。また、日本電気が1938（昭和13）年に出力17kWのLD-22-E電波兵器開発実験用を開発している⁽³¹⁾。

テレビジョン放送を目的とした超短波送信管では、1936（昭和11）年に日本無線が発表した三極管U 330T、1941（昭和16）年に東京芝浦が発表した#8227、#8222等がある⁽³¹⁾。

戦後にまず復興したのはラジオ放送関係である。以下、「電子管の歴史」を参考に戦後の高出力管開発の推移をたどることにする⁽³²⁾。

送信管不足、資材不足、戦後の混乱から、立ち直るにはかなりの時間を要した。東京芝浦、日本電気、川西機械、日本無線、日立製作所の5社が製造に復帰した。ユーザを含めた送信管技術委員会で命名法⁽³³⁾、試験法案、試験規格などが標準化された。たとえば送信管の名称の第一項の数字は陽極許容損失、第二項の英字のTは三極管、Fは四極管を、第四項のRは強制空冷を意味する。

1949（昭和24）年には、RCAの892が8T92、8T92Rとして国産化された。また、極超短波多重電話中継器、STリンク（Studio to transmitter link）、小型移動無線用の2B29（200MHz/50W）、車載無線機用2E26（125MHz/20W）が、1950（昭和25）年には、FS（Frequency Shift）、あるいはSSB（Single Side Band）等の変調方式を採用した送信機用として7T56R（出力4kW）、8T10（出力10kW）などの開発が各社で進め

られた。またこの年、トリウムタンゲステンを使用した7T54R（40MHz出力4kW）や100kW放送用9T62A（B）が開発された。東京芝浦、日本電気が8T21（出力100kW）を開発し、翌1951（昭和26）年、東京第一放送、第二放送の50kW増力に供した。

アイマックの送信管をもとに、高周波誘電加熱用の5T21、5T30（図3.12）等や、STリンク、移動用送信機用の4F15R（周波数500MHz、出力150W）等が国産化された。



図3.12三極管 5T30
(写真：東芝電子管デバイス)

コバルト、無酸素銅が使用され、また、アーク溶接の使用によって最終封止時の管内部品酸化を防止できるようになった。アメリカの技術を学んで、あるいは技術提携を通して電子管の設計・製造技術、装置の設計技術が大きく向上した。

1950（昭和25）年に電波3法（電波監理委員会設置法、電波法、放送法）が制定された。NHKは全国をラジオでカバーする義務を負い、民間放送が認められた。

翌年、名古屋、中部日本放送、大阪新日本放送等の10kW局がラジオ放送を開始した。続いて各地に多くの民放が誕生し、8T92、8T92Rが標準品として10kW放送機に使用された。

1953（昭和28）年には、トリウムタンゲステン陰極、白金クラッド・モリブデン格子を使用した9T71が国産化され、東京、札幌の50kW機に採用された。図3.13は9T71をセラミック化した改良管9T71Bである⁴。この頃、ジルコニウム、チタニウムゲッタが使用されるようになっていく。

VHFテレビ放送用にNHKが100MHzで出力1kW以上の送信管の開発を求め、1950年に神戸工業、東京芝浦、日本電気が試作品を提出した。神戸工業の7F20R

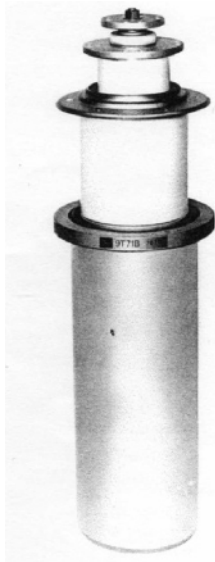


図3.13 三極管9T71B
(写真:東芝電子管デバイス)

(出力800W)を用いて試験放送が実施され、同年11月から毎週金曜日に定時放送が行われた。1951年には、日本電気の7T19Rを用い、映像出力3kW、音声出力1.5kWに増力された。

1952(昭和27)年、東京芝浦は5kWテレビ送信用に7T24Rを開発、NHK技研試作の放送機に供した。映像出力は3kW、音声出力は1.5kWであった。

1953(昭和28)年、東京テレビ局が本放送を開始した。1952(昭和27)年には大阪も6F50Rを用いた放送機を完成している。映像出力は5kW、音声出力は2.5kWであった。

1953(昭和28)年、東京テレビ局が輸入の放送機を使用して10kWに増力した。続いて翌年には、大阪、名古屋で8F66Rを用いた10kW放送機が使用された(図3.14)。その後、1、3、5kWテレビ局が各所で開局された。また、1959(昭和34)年に、東京、大阪で10kW教育テレビ局が開局した。



図3.14 四極管 8F66R
(写真:東芝電子管デバイス)

1kW機の終段、3.5kW機の前段用として、東京芝浦、神戸工業が7F31Rを開発した。

1960(昭和35)年、NHKと東京芝浦が8T54を共同開発し、東京テレビ局が50kWに増力された⁵。

1957(昭和32)年に、VHFカラー実験局が東京で開局された。1959(昭和34)年、日立が全セラミック封止の4F16Rを発表、サテライト10W局に使用した。日立は放電加工で電極を製作した。日立と東京芝浦が30W局用に5F60Rを、東京芝浦、日本電気、神戸工業が、陽極にラジエータを鑲付けし冷却性能を向上した出力250Wの5F20RAを開発した。

1960(昭和35)年にカラーテレビ放送が本放送となり、NHK東京、大阪、日本テレビ、東京放送、朝日テレビが50kW放送を開始した。

VHFテレビ用の送信管として、1966(昭和41)年、東京芝浦により8F67R、翌年、NHKと日立により8F76Rが開発され、10kW放送機の要求が満たされた。1969(昭和44)年には、陽極損失を倍の30kWに上げた蒸発冷却管8F68がNHK、東京芝浦、日本電気により開発され、50kW局に供された(25kW放送機2台並列運転、予備機1台の3台方式)。この送信管は、トリウムタングステンメッシュ陰極、モリブデンカップの放電加工格子、セラミック外圍器、蒸発冷却、冷却槽自蔵など、当時の新技術をすべて採用した新鋭管である(図3.15)⁶。



図3.15 四極管 8F68
(写真:東芝電子管デバイス)

1957(昭和32)年に東京、翌年に大阪でFM実験局が開局された。出力は1kWであったが、1961年に10kWに増力された。送信管は6T34Rが使用された。

UHFテレビ関連では、1956(昭和31)年、実験局がNHK技研で開設された。当初、出力は80Wであったが、1958(昭和33)年に5kWに増力された。

1961年、難視聴地域解消を目的に郵政省指針が出され、96地区のUHFテレビサテライト局にチャンネル割当が行われた。送信管としては1959年に4F16R、1960年に5F60R、7F13R、1963年には8F63R等の強制

空冷四極管が開発された。送信管は利得が低いので、なるべく高利得の電子管が求められた。これに応えたのが進行波管である。1965年頃から進行波管に置き換えが始まり、送信管のニーズは急減した。なお、固体化の波にも押され、進行波管もやがて固体装置に座を譲る道をたどった。

中波ラジオ関係では、1962（昭和37）年、東京第2放送が300kWに増力され、9T38が使用された（図3.16）。



図3.16 三極管 9T38
（写真：東芝電子管デバイス）

B級陽極変調、150kW 2台並列運転方式であった。送信管はNHK、東京芝浦、日本電気が共同開発した。

1968（昭和43）年、NHK大阪第2放送の300kW増力に際し、9T38を蒸発冷却とした9T40が開発された。

1970（昭和45）年にNHK秋田に500kW放送機が増設された。この放送機は250kW放送機を2台並列運転する方式で、それぞれ被変調管、変調管2本、計4本使用することとなり、陽極損失150kWの蒸発冷却管9F45がNHK、東京芝浦、日本電気で共同開発された（図3.17）。



図3.17 四極管 9F45
（写真：東芝電子管デバイス）

9F45は熊本第2、北海道第1、第2、東京第1、東京第2放送でも使用された。この送信管は国内最大の出力性能を持つ四極管である。

高周波加熱用の極管として、誘電加熱用の7T33R（1964年、日立）、8T42（1966年、日立）、7T86R（1967年、東京芝浦）、7T70R（1969年、日本電気）、誘導加熱用の9T27（1962年、日立）、9T64（1963年、東京芝浦）、9T75（1965年、日本電気）等、多くの三極管が開発された。

パルス動作の極管としては、1957（昭和32）年に東京芝浦が7T59RP（南極オーロラ観測用）、1960（昭和35）年に日本無線が7T80R（ロラン用）を開発している。

RCAがUHF帯の増幅管として、カソード、第一、第二格子を各40個、環状に配置し中心部に陽極を配した構造の四極水冷管4616を開発した。これはスーパーパワーチューブと呼ばれ（出力はパルスで2MW）、連続波のほか、パルス動作も可能で、レーダ用として使用された。東京芝浦は1970（昭和45）年頃にレーダ用として国産化し、1985年頃には加速器用としても製作した（M4178/4616）。

3.4 マイクロ波領域に向けた挑戦

周波数が高くなると電極間の静電容量、リード線のインダクタンス、電子の飛行時間等が問題になって所期の動作が行えなくなる。このため、もっぱら電極を小さくする方向をとる。いきおい出力は低下する。

欧米で、第二次大戦中（1943年頃）にマイクロ波帯で動作する板極管が開発された。日本では1952（昭和27）年に板極管2C40、2C43等が実用化された。たとえば、前者は発振で3,000MHz、増幅で1,500MHz程度まで使用できた。ちなみに、陰極-格子間隔は0.1mm、格子-陽極間隔は0.3mmである。海外では、4,000MHz程度のものが実用化された⁽³⁴⁾。出力は0.5-1Wである。

1934（昭和9）年にRCAがエーコン管を開発した⁽³⁵⁾。電極寸法を小さくして電極間静電容量を減らすとともに電極の引出しを径方向にした超短波用受信管である。形状がどんぐりに似ているためこの名称で発売された。日本では1936（昭和11）年に東京電気が試作した。1918（大正7）年、バルクハウゼンがBK振動を発見、600MHzのマイクロ波を得た。日本では1935（昭和10）年に日本無線が65cm/8WのBK管US80Bを作った。

1935（昭和10）年頃、大阪大の岡部が、磁場で電子を拘束する大阪管を考案した。1939（昭和14）年には外部回路に空洞共振器を用いた空洞大阪管も開発された。

1941 (昭和16) 年、RCAがIOT (誘導出力管) を提案した。500MHz/10Wの性能であった。なお、BK管、大阪管、IOTについては8章でさらに詳しく説明する。

このほか1944 (昭和19) 年に日本電気が極超短波三極管TC1507を開発し、670MHz/2Wの性能を得ている。

参考文献

- (1) 村井：真空管の歴史、日本機械学会誌、第84巻、第752号、p32 (1981)
- (2) 電子管の歴史、p6、オーム社、(1987)
- (3) T. A. Edison : Electrical indicator, USP No. 307031, (1883)
- (4) J. A. Fleming: Instrument for converting alternating electric currents into continuous currents, USP No. 803684, (1905)
- (5) R. A. Fessenden: Current actuated wave responsive device, USP No. 706744, (1902)
- (6) R. A. Fessenden: Receiver for electromagnetic wave. USP No. 727331, (1903)
- (7) L. de Forest: Space telegraphy, USP No. 879532, (1908)
- (8) L. de Forest: Wireless Telegraphy, USP No. 841386, (1907)
- (9) L. de Forest: Device for amplifying feeble electrical currents, USP No. 841387, (1908)
- (10) I. Langmuir: The pure electron discharge, Proc. IRE, 3, p.261, (1915)
- (11) 電子管の歴史、p13、p66、(1987)
- (12) 東京電気50年史、p424、東京芝浦電気 (1940)
- (13) 安藤：特許80948、(1919)
- (14) 東京電気50年史、p425、(1940)
- (15) 東京電気50年史、p424-435、(1940)
- (16) 電子管の歴史、p77 (1987)
- (17) 電子管の歴史、p78-79、(1987)
- (18) 東京電気50年史、p436-437、(1940)
- (19) S. Okamura : “History of Electron Tubes”、p86、Ohmsha Tokyo Osaka Kyoto、IOS Press Amsterdam · Oxford · Washington (1904)
- (20) 電子管の歴史、p84-85 (1987)
- (21) 電子管の歴史、p87-90 (1987)
- (22) 電子管の歴史、p90-93、(1987)
- (23) 東京電気50年史、p438、(1940)
- (24) 東京電気50年史、p439-440、447-448、(1940)
- (25) 電子管の歴史、p110-112 (1987)
- (26) 東京電気50年史、p440-442、(1940)

- (27) 電子管の歴史、p112-113 (1987)
- (28) 電子管の歴史、p120 (1987)
- (29) 東京電気50年史、p445、(1940)
- (30) 電子管の歴史、p114、(1987)
- (31) 電子管の歴史、p117-118、(1987)
- (32) 電子管の歴史、p122-147、(1987)
- (33) 電子管の歴史、p123、(1987)
- (34) 電子管の歴史、p95、(1987)
- (35) 電子管の歴史、p76、(1987)

1 東京電気は1939年に芝浦製作所と合併して東京芝浦電気となった。東京芝浦電気は1984年に東芝と改称した。本報告では、当時の名称に従って、東京電気、東京芝浦、東芝と記載する。

2 一般に周波数が高くなると電子管の構造寸法が小さくなり、出力が低下する。したがって、出力レベルを評価するには常に周波数を念頭に入れる必要がある。大電力の極管が関係する電波の主な応用では、誘導加熱が超長波、ラジオ放送が中波、無線が長波と短波、誘電加熱が短波と超短波、VHFテレビが超短波、UHFテレビが極超短波の周波数帯を利用している。超長波から極超短波に向けて名前が変わるにつれ1桁ずつ周波数が高くなる。以下、ほぼ年度を追って各種大電力管の説明を行うので、周波数あるいは出力について、一貫した流れにはならないが、ご容赦いただきたい。

3 一般に冷却能力は自然空冷、強制空冷、水冷、蒸発冷却の順で高くなる。したがって高出力管ほどより冷却性の高い方式を採用する。冷却には、他に伝導冷却がある。この冷却法は、熱を伝える相手の温度に関係するため、上記の冷却法に対し順位はつけられない。

4 ガラス外囲器の場合、排気温度を上げると、ガラスが吸い込まれる問題があったが、セラミック化により、解消され、より高い温度で排気できる利点が得られた。

5 50kW放送機の映像および音声の送信管構成：

映 2B94-2B94-6F50R-7F31R-8F66R-8T54

音 2B94-2B94-5F35R-7F31R-8T54

6 四極管は利得が高いため、何段もの三極管を用いて次第に所定の出力まで高めていく多段構成の必要がない。たとえば、四極管の採用によって、出力レベルにもよるが、固体装置の出力を1本の送信管で増幅し出力する放送機が可能になる。

4 | マグネトロン

マグネトロンはレーダ用のマイクロ波パルス電子管として、また、マイクロ波のエネルギー自体を利用する連続波 (CW: Continuous Wave) のマイクロ波電子管として大きく発展した。

4.1 分割型マグネトロンの発明

1921年、GEのハル (A. W. Hull) がマグネトロンを発明した。岡部金治郎 (当時東北大助教授) は、1927 (昭和2) 年に、陽極を2分割したマグネトロンで強い発振が得られることを見出した。さらに4分割にすると同じ電圧、磁界、陽極径で発振周波数がほぼ倍になることを認めた。このほか、東工大の西巻正郎の均圧環の発明^① や、朝永振一郎らほかのマグネトロンの理論解析などがあり、わが国は、早くから、マグネトロンの発展に大きく貢献した。

ハルのマグネトロンは、図4.1に示すように、円筒状の陽極と、中心軸上のフィラメント (陰極) で構成される二極管において、軸の方向 (紙面の方向) に磁界をかけた構成の電子管である。

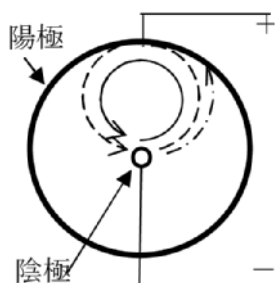


図4.1 マグネトロンの基本構造

陰極から飛び出した熱電子は電界と磁界の作用を受けて軸に垂直な面内で円弧状の軌道を描く。電界と磁界に対し適切な値を与えると、破線で示したように電子の軌道がちょうど陽極に接するようになる。この条件をほぼ満足する電界と磁界を与え、陽極と陰極との間に共振器を接続すると、マイクロ波の発振が得られる。

たとえば、直流電界と共振器によるマイクロ波電界が加算される場合は、1点鎖線で示したように電子が陽極に到達する。逆に相殺するときには実線のように陽極前面を通過して陰極に戻り電流は流れない。すなわち、マイクロ波の電界に同期して電流が流れたり流れなかったりする。このようなメカニズムで共振器にマイクロ波の振動が発生する。

図4.2に岡部が発明した2分割型マグネトロンの写真を示す。陽極がスリットで2分割されている様子が伺える。図4.3はマグネトロンの実験に使用された電磁石である。



図4.2 2分割型マグネトロン (写真: 東北大)



図4.3 電磁石 (写真: 東北大)

図4.4に示すような円筒共振器の共振を考える。共振すると、電界が円周方向成分のみとなるような位置が円周に沿って周期的に発生する。電界の向きは円周方向を基準にして、隣同士互いに逆向きである。円筒共振器壁のこの部分にスロットを切って円筒共振器を複数に分割する。各スロットに小さい共振器を配列し、円筒共振器の中心部に陰極を配置すると、複数分割のマグネトロンになる。ここで、円筒共振器は陽極に相当する (補足説明を付録に記載したので、参照されたい)。

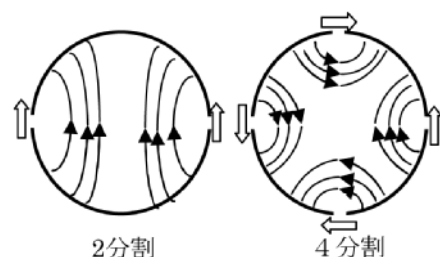


図4.4 2分割、4分割マグネトロンの電界

図4.5に8分割マグネトロンの例を示す。マイクロ波電界の向きは、円周に沿って正、負、8回、変化する。分割部には共振器が接続される。

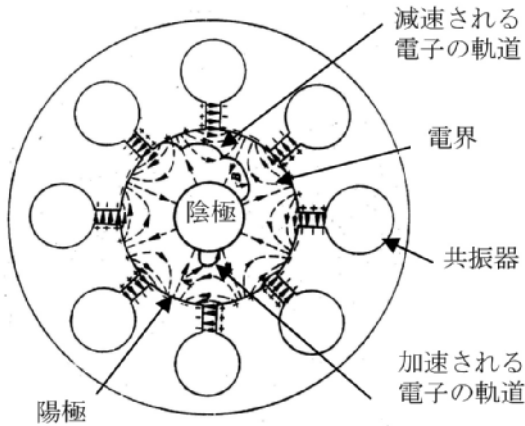


図4.5 8分割陽極マグネトロンと電子の軌道⁽²⁾

各スリットのマイクロ波電界は、その周期に合わせて隣同士で正負が逆転するので、たとえば正方向に向かう電界はマイクロ波の振動に同期して順に隣へ移動する。すなわち、マイクロ波電界があたかも円周に沿って回転しているような状態になる。

一方、電子は、磁界に比例する周波数の回転運動と、回転の中心が円周に沿って電界と磁界の比に相当する速さで周回する運動とが重なったトロコイド状の軌道を描く。マイクロ波の回転速度と電子の周回速度を同期させると、マイクロ波電界の作用によって減速される電子は常に減速される。減速されると、その減少分に相当してマイクロ波のエネルギーが増大する。電子は図4.5に示すような軌道を描いて陰極の周りを周回しながら次第にアノードに近づく。全体として、電子は図4.6に示すような形の空間電荷分布となって陰極の周りを周回する。

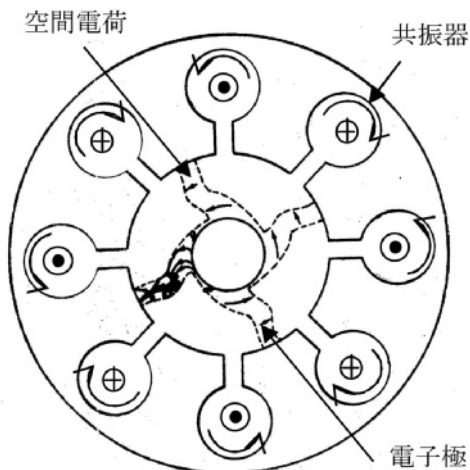


図4.6 マグネトロンの中の空間電荷⁽²⁾

電子は運動エネルギーを失いながら、次第に陽極に近づく。電位の高い方へ動くとき位置エネルギーが低下し、その低下分が運動エネルギーに変わる。この結果、運動エネルギーがほぼ一定に保たれ、位置エネルギーが減少する。この減少分がマイクロ波のエネルギーに変換されたことになっている。位置エネルギーに比較して運動エネルギーはそれほど大きくないので、マグネトロンの効率はこの他のマイクロ波管に比較してかなり高いものになる。

一方、加速された電子は陰極に衝突し、これを加熱する。このため、マグネトロンによっては、発振開始直後にフィラメントの電力を下げることを要求されるものがある。

1934（昭和9）年から1939年にかけて、陽極と共振器の多様化が急速に進んだ。すなわち、橋型、梅鉢型、りんどう型、百合型、椿型、コスモス型、菊型、鈴蘭型等のような名の、さまざまな形の陽極が工夫された⁽³⁾。図4.7に橋型陽極を用いたマグネトロンの一例を示す。

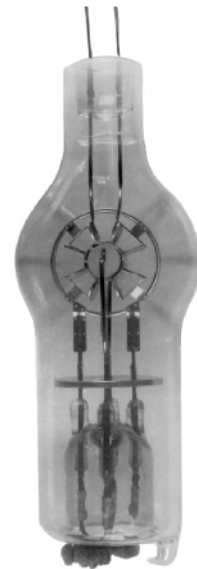


図4.7 8分割橋型陽極マグネトロンM2
(写真 日本無線)

図4.8は1939（昭和14）年に完成されたわが国最初の水冷式マグネトロンM3である。発振周波数は3,000MHz、出力は500Wである。



図4.8 水冷マグネトロン M3
(写真 日本無線)

図4.9は1941（昭和16）年にM3をパルス用に改良したレーダ用のマグネトロンM312である。周波数3,035MHz、出力6.6kWの性能を持ち、図4.10に示す受信機局発振用のM60とともに海軍で使用された。

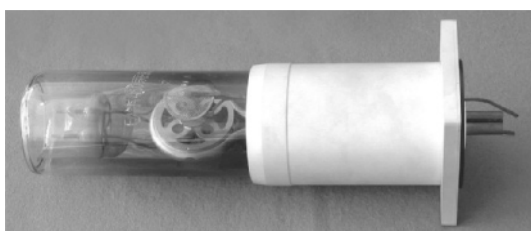


図4.9 レーダ送信用マグネトロン M312
(写真 日本無線)



図4.10 受信機局発用マグネトロンM60
(写真 日本無線)

このほか、出力20kW（波長15cm）、続いて100kW（波長20cm）のCWマグネトロンが試作され、さらに500kW CW管の試作も進められたが、完成には至らず終戦を迎えた。

日本無線以外では、東京芝浦の波長20cm、出力300W、12分割管MV14、波長15cm、せん頭出力数kWの空冷マグネトロンMP15、川西機械の数百MHz帯で出力5Wから1.2kWに至るZ-300B-Z-305シリーズ、日本電気の波長27cm、出力120Wおよび波長65cm、出力250Wのマグネトロン等が開発されている⁽⁴⁾。

4.2 開発の再開と船舶用マグネトロン

戦後の混乱とCHQの禁止命令により、レーダ用マグネトロンの開発と製造が中断されていたが、1946（昭和21）年に日本無線が多重無線通信用のマグネトロンの開発を開始した。

図4.11は1948年に日本無線によって開発された周波数2,600MHz、せん頭出力100Wの橋型陽極のマグネトロンM112である。陰極にトリウムタンゲステンが使用された。局発用として小型のマグネトロンMY112も開発された。変調方式はPTM（Pulse Time Modulation）、PPM（Pulse Phase Modulation）であった。マグネトロンを通信回線に使用したのは世界で初めての試みである。



図4.11 通信用マグネトロンM112
(写真 日本無線)

続いて、1951（昭和26）年には、4,000MHz、100WのM750、1953（昭和28）年には、6,000MHz、100WのM402が開発された（図4.12）。前者ではジルコニウムゲッタが使用された。M402は全金属製で副空洞共振器を陽極に結合して共振周波数を変えられるように工夫されていた。陰極は傍熱型の酸化物陰極であった。このマグネトロンは国鉄、電力会社の多重電話回線に使用され、年間、数100本が生産された。

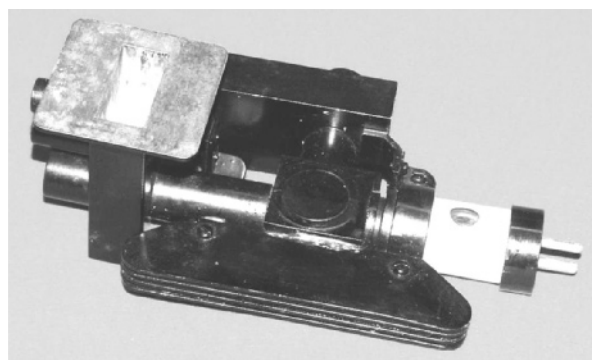


図4.12 通信用マグネトロン M402
(写真 日本無線)

レーダ用のマグネトロンに関しては、1950（昭和25）年にまず船舶用レーダの輸入が認められ、翌年、レーダおよびその部品の開発と生産が認められた。日本無線は、直ちに、永久磁石外付け型のM302、M305を生産し、国産のレーダに供した。

この頃、日本無線が開発したマグネトロンの陽極は、図4.13に示すような大小の空洞を交互に並べた8分割あるいは10分割の橋型であった。

米国レーセオン社は、ベーンストラップ型と呼ばれる図4.14に示すような複数個（図では12枚）の板（ベーン）と2本の均圧環（ストラップ）を組み合わせた

構造のマグネトロンを開発した。図では分かりにくい
が、一方のストラップはひとつおきにベーンに接続さ
れ、他方のストラップはひとつ隣にずれた位置にある
ベーンに同様にひとつ置きに接続されている。橋型に
比べ構造が単純で、量産に適する構造（シリンダーと
ベーンとストラップを鍛付けで一体化する）であった
ため、日本無線、東京芝浦、沖電気がまず、特許契約
を結び、日本電気も後に特許契約した。

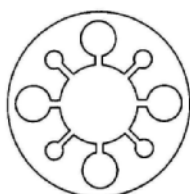


図4.13 橋型⁽⁵⁾

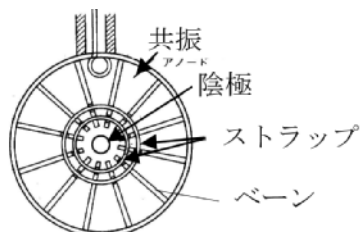


図4.14 ベーンストラップ型⁽⁶⁾

レーダ用マグネトロンの主流であったレーセオンの
2J42、2J55は、ベーンストラップ型陽極を採用してい
たほか、2つの磁極（ポールピース）の間に陽極をは
さみ、さらにこの磁極を真空外囲器の一部として、管
外の磁石と一体に磁気回路を構成するいわゆるパッケ
ージ型であった。各社ともこのパッケージ型の特許も
購入した。

レーダ用マグネトロンの動作周波数は3,000MHz帯
(Sバンド)、5,000MHz帯 (Cバンド)、9,000MHz帯
(Xバンド) で、せん頭出力は3kWないし60kW程度で
ある。最も広く使用されたのはXバンドの2J42 (7kW)、
2J55 (50kW) シリーズである。

マグネトロンはいずれも固定周波数で動作するもの
であったが、60年代中頃に周波数割当ての混雑から帯
域幅を狭くする動きが出てきた。この動きに対応し、
1966 (昭和41) 年に東京芝浦がXバンドとCバンドで、
周波数を変えることができるアジャストロンシリーズ
9M42 (9,375MHz/7kW)、9M56 (9,410MHz/50kW)、
M4508B (5,300MHz/350kW) 等を開発した。

4.3 気象レーダ用マグネトロン

Xバンドが空気中の水分で比較的減衰が大きいこと
から、SバンドとCバンドで比較的、出力の大きいわ
が国独自の気象レーダ用マグネトロンが開発された。
各地気象台用レーダの周波数が5,300MHzに決まり、
東京芝浦と日本無線が各種のマグネトロンを開発し
た。出力は200-350kW程度である。1964年に設置され
た富士山頂レーダには、新日本無線¹が開発したマグ
ネトロンM159Aが使用された。せん頭出力は 2MWで

あった。

1978年に、東京芝浦が同軸型マグネトロン
E3517/5M80 を開発、翌年には新日本無線が同軸型の
M1341/5M80、M1373を開発し、気象用は同軸型が主
流となった。このマグネトロンは図4.15に示すように、
通常マグネトロンの陽極の外側に、これと一つ置き
に結合スリットを持つもうひとつの共振空胴を同軸的
に設けたものである。共振のQが高いため、周波数安
定度が高いという特長を持っている。5M80 の陰極に
は含浸型陰極（インプレカソード）が使用された。

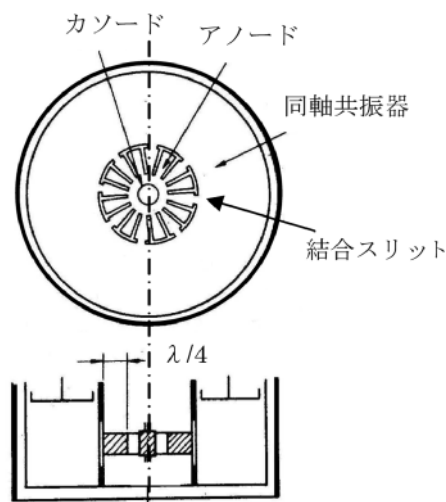


図4.15 同軸マグネトロンの構造⁽⁶⁾

4.4 防衛用マグネトロン

戦時中、すでに防衛用レーダが実用されたが、戦後、
GHQから禁止された関係で、当初、米軍から貸与ま
たは譲渡されたものが防衛用に使用された。解禁とと
もにレーダの国産化が始まったが、マグネトロンは、
まず、輸入品が使用され、やがて国産化が進められた。

1963 (昭和38) 年頃、東京芝浦が6410A (レーセオ
ンのQK338) を、日本電気が6406A (レーセオンの
QK428A) を国産化した。日本電気はLバンド
(1,000MHz帯) のQKH470Aを生産した。

防衛用のマグネトロンに対して同軸マグネトロンも
開発された。すなわち、日本電気、新日本無線、東京
芝浦がCバンド、Xバンド、Kuバンド (15GHz帯) の
国産化または独自設計による同軸マグネトロンを開発
した。

新日本無線は1970 (昭和45) 年に、ECCM
(Enemy Counter-Counter-Measure)² 用として、発振
周波数を周期的に変化させることができるわが国独自
の回転同調マグネトロンM193 (Lバンド)、M1229
(Cバンド) を開発した。

大電力レーダ用マグネトロンにはもっぱら馬蹄形磁石が使用された。一例を図4.16に示す。



図4.16 馬蹄形永久磁石を用いた大電力マグネトロン
(写真：東芝電子管デバイス)

4.5 その他のマグネトロン

沖電気、新日本無線、日本電気等が近距離レーダ用に準ミリ波、ミリ波帯のパルスマグネトロンの開発を進めた。このほか、ミサイル搭載用（日本無線）、線形加速器用（東京芝浦電気、新日本無線）のパルスマグネトロンの開発が進められた。

4.6 電子レンジ用マグネトロン

電子レンジ用のCWマグネトロンは、当初、電磁石を使用する比較的大型の水冷管であったが、やがて、アルニコ磁石を使用するパッケージ型となり、さらにフェライト製の円板状の磁石を採用する方向に進んだ。冷却も空冷に、さらに縦吹きから横吹きへと進化した。小型化、標準化、量産性向上、低価格化に向けた多くの努力が払われた。生産技術も大きく進展した。

1958（昭和33）年に東芝が潜水艦の食品加熱器用マグネトロン2M20を開発した。この加熱器を電子レンジと名付けた。

1962（昭和37）年に東京芝浦の電子レンジが信越線特急、東海道線で採用され、1964（昭和39）年には東海道新幹線でも採用された。図4.17に使用された水冷マグネトロン2M21を示す。

1963（昭和38）年には新日本無線が小型水冷マグネトロン2M65を、1964（昭和39）年には空冷のマグネトロン2M66を開発した。2M66は12分割ベーンストラップ陽極とトリウムタングステン陰極を採用し、出力は800Wで、比較的低い電圧で効率よく動作する電磁石外付けのマグネトロンであった。



図4.17 水冷マグネトロン2M21
(写真：東芝電子管デバイス)

1965（昭和40）年、日本無線が永久磁石を採用したパッケージ型の2M67を開発した。

1967（昭和42）年、東京芝浦、新日本無線、日本電気などがアルニコの棒磁石を使用した強制空冷パッケージ型マグネトロン2M52を開発した（図4.18）。さらに翌年、東京芝浦はアルニコ磁石を放熱体内に取めたコンパクトな2M53を開発した（図4.19）。このマグネトロンは米リットン社の電子レンジに採用された。



図4.18 強制空冷パッケージ型マグネトロン2M52
(写真 ホクト電子)



図4.19 電子レンジ用マグネトロン2M53
(写真東芝電子管デバイス)

レーセオンの特許が切れたのを機に1965（昭和40）年に松下電子、1968（昭和43）年に神戸工業と日立製作所が加熱用マグネトロンの生産に参入した。電子レンジの国内生産は1969（昭和44）年に38万台に達した。

1969（昭和44）年、松下電子が磁石をフェライトに変えて2M88を開発、1971（昭和46）年には日立製作

所が全セラミック金属封じマグネトロン2M71を開発した。出力アンテナ部の真空容器はそれまでは各社ともガラスドームであったが、この部分がセラミックに変わった。(図4.20)。

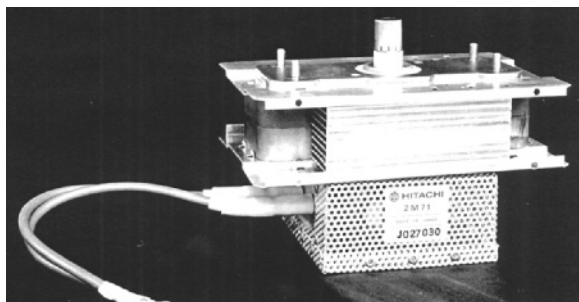


図4.20 全セラミック金属封止マグネトロン2M71
(写真 日立協和エンジニアリング)

1973(昭和48)年、東京芝浦は磁石の改善を行ってフェライト内磁型横吹き空冷のマグネトロン2M57を開発した。この方式が以降、標準的なものになった。

製造技術上の改善では、日立のホビング技術による陽極の一体化成形が挙げられる。日立はこの技術により、1975(昭和50)年に大河内記念技術賞を得ている。図4.21はホビングの工程にしたがって、左から右に順に配列した陽極部品の写真である。



図4.21 陽極のホビング加工
(写真 日立協和エンジニアリング)

小型化の一環で、1983(昭和58)年に東京芝浦は、陽極をこれまでのマグネトロンで標準的に採用されてきた12分割を10分割に変え、陰極も小型化した2M172Aの生産を開始した(図4.22)。

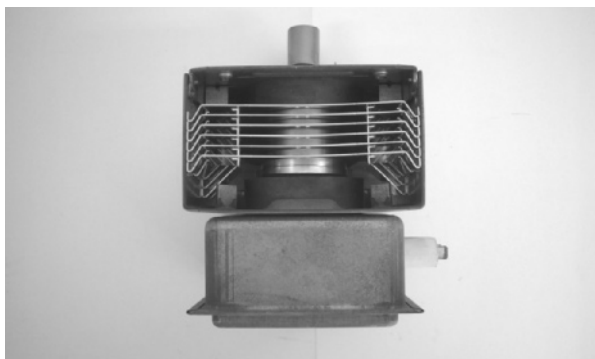


図4.22 電子レンジ用小型マグネトロン2M172A
(写真 東芝電子管デバイス)



図4.23 915MHz 30kW
連続波マグネトロン1M70
(写真 東芝電子管デバイス)

電子レンジの普及に伴って、テレビやラジオの電波障害が問題となった。まず、ヒータのリード線側から出る低周波雑音をチョークの使用により対策した。アンテナ側から出る5次高調波は衛星放送の周波数帯に入るので、その対策も急がれた。東京芝浦はアンテナに同軸チョークを付加した2M240を開発してその対策に成功した⁽⁷⁾。各社ともこの方式を採用した。

マグネトロンの価格競争が激しくなり、1980年代前後には米国メーカーが撤退した。その後、韓国メーカーが参入し、さらに競争が激化した。東芝、日立製作所は事業を関係会社に移管した。さらに海外展開も積極的に推進した。たとえば、1992(平成4)年に東芝から事業移管を受けた東芝ホクトは2000年(平成12)にタイへ製造拠点を移した。同年、東芝ホクトは、効率を改善した2M282、翌年にはノイズ特性を改善した2M253-Zを開発した。

4.7 工業用マグネトロン

大量の食品加熱、ゴムの加硫、殺菌・防霉などの工業応用に使用する目的で、1960年代後半から70年代半ばにかけ、2,450MHzで出力3-5kW、915MHzで30kWのCWマグネトロンを東京芝浦(2,450MHz: 2M60A/4.5kW、915MHz: 1M70)、新日本無線(2,450MHz: 2M12/4.5kW、2M13/5kW、M1446/10kW、915MHz: 1M99/M199)、日本電気(915MHz: LD945)が開発した。

新日本無線は915MHzで、1975(昭和50)、1980(昭和55)、1985(昭和60)年にそれぞれ、85、100、500kWのCWマグネトロンM1287、M1359、M1372を開発した。M1372は、同軸型陽極を採用し、陽極、陰極を大きくして、冷却性能を高めたほか、陰極電流密度を低下させている(図4.24)。

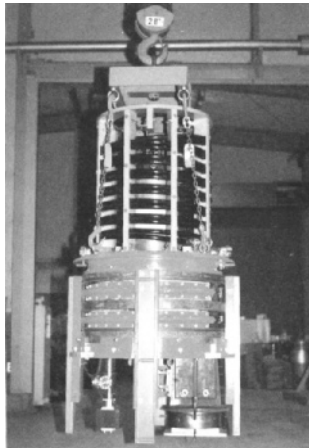


図4.24 500kW連続波
マグネトロンM1372⁽⁸⁾

日立製作所は、1970年代後半頃から産業用の2,450MHz、CWマグネトロンの製造を開始した。同社は、1994（平成6）年に日立ディスプレイデバイスへ事業を移管したが、その後も、1999（平成11）年にH3881/6kW、2001（平成13）年にH0909/7kW、2005年にH0915/10kW等、工業用連続波CWマグネトロンの開発を継続している³。

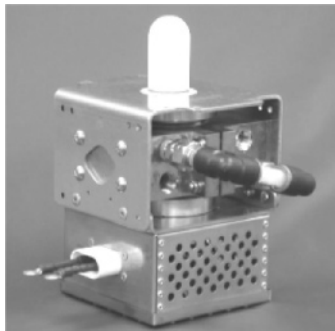


図4.25 10kW工業用マグネトロンH0915
(写真 日立協和エンジニアリング)

4.8 その他のM型管

マグネトロンは直流電圧、直流磁界、マイクロ波の伝達方向（あるいは電子極の周回方向）が互いに直交している。このような形態の電子管を総称してM型管と呼んでいる。M型管にはマグネトロンのほかに、CFAと呼ばれるプラチノトロン、M型進行波管、デマトロン等の増幅管と発振管であるカルシノトロン等がある。日本では余り商品化されなかったが、一部、防衛用に国産化が進められた。図4.26はその一例で、紙面の方向に強い磁場が加えられ、マイクロ波は放射状に突き出た2つの線路の一方から加えられ、他方から出力するようになっている。出力はパルスで1MW、利得は10dB、動作周波数は $1,300 \pm 50$ MHzである。

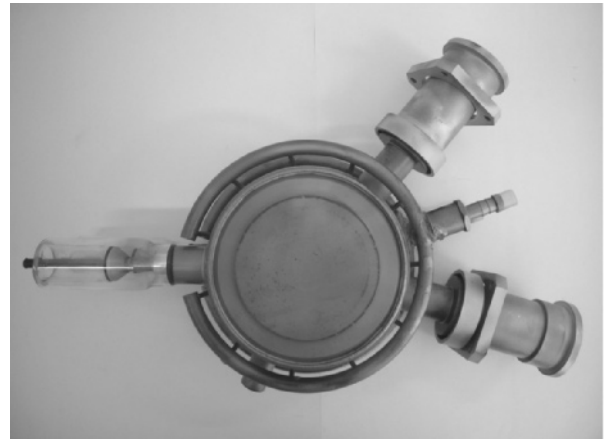


図4.26 プラチノトロン 1AM70
(写真 東芝電子管デバイス)

4.9 技術の動向

マグネトロンの陽極は多分割後、さまざまな形態のものが研究されたが、戦後、量産性に優れたベーンストラップ陽極に集約された。磁石については、電磁石から永久磁石に移り、磁石や磁気回路の小型化がはかられた。電子レンジ用のマグネトロンでは当初の高価なアルニコからフェライトへ変えられ、低価格の要求に応えた。ベーンの枚数も当初の20枚から、1968（昭和43）年頃に12枚に減り、さらに、2M172Aで10分割となって、これが標準の設計となった。

パルスマグネトロンは通信、レーダをはじめ医療用の加速器に使用されたが、要求の高度化に伴って、次第に他の電子管（クライストロン、進行波管）や固体デバイスに市場を奪われ、現在は、もっぱら船舶レーダに使用されているような状況である。

連続波のマグネトロンは、効率と製品価格の点で他のマイクロ波管と比較して、最も優位な位置にあり、固体化にも抵抗できる力を維持している。特に電子レンジ用では、将来とも、ニーズは増加すると見られるが、売価の点から、国内生産では対応できないところに追い込まれている。

最後に、「電子管の歴史」に示されている電子レンジ用マグネトロンの価格、生産数の経緯を図4.27に示す⁽⁹⁾。マグネトロンの単価は1981年ですでに1,000円程度に下がっており、現在もこの傾向が続いている。国内生産は成り立たず、ほとんど海外生産となっている。現在、国内で生産されているマグネトロンは、船舶レーダ用、加速器用のパルスマグネトロン、工業用のCWマグネトロン程度である。

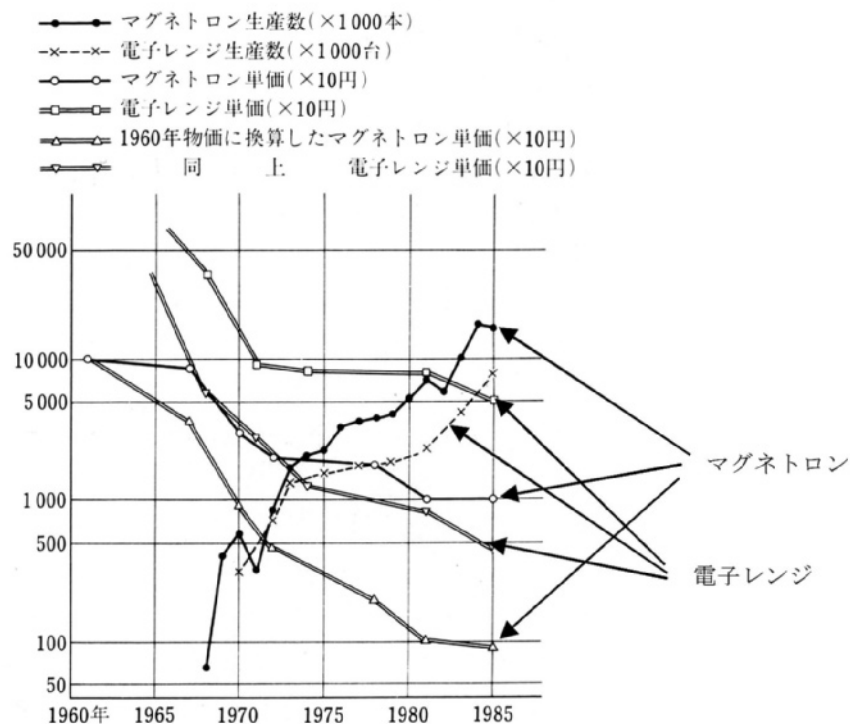


図4.27 電子レンジマグネトロンの生産数と単価の推移⁽⁹⁾

参考文献

- (1) 道家：「東京工業大学でのマイクロ波、ミリ波電子管の研究」、東京工業大学百年記念館収蔵品紹介-その14、No.846、p41、(1989)
 - (2) G. B. Collins：“Microwave Magnetrons”、p26、p28、McGraw-Hill Book Co. Inc. (1948)
 - (3) 電子管の歴史、p159、(1987)
 - (4) 電子管の歴史、p165-166、(1987)
 - (5) 電子管の歴史、p170、(1987)
 - (6) 電気電子工学大百科事典、電子管第5編、p382、(1984)
 - (7) 齊藤、見野、田代：「電子レンジ用マグネトロン」、出願61-088051、特許第2128827 (1997)
 - (8) 電子管の歴史、p187、(1987)
 - (9) 電子管の歴史、p184、(1987)
- 1 マグネトロンの生産を目的に、1961年に日本無線がレーセオンとの合弁で設立した会社。
 - 2 レーダによる探査を妨害する目的で妨害電波が発射される。この手段あるいは行為をECM (Enemy Counter Measure) と呼ぶ。そのECMに対抗するのが、ECCMである。妨害電波と異なる周波数を使って探査の目的を達成しようとした。
 - 3 日立ディスプレイデバイスは2007年に日立協和エンジニアリングへマグネトロン事業を移管した。

5 | クライストロン

5.1 概要

クライストロンは1939（昭和14）年 W. C. HahnおよびG. F. Metcalfと、R. H. VarianおよびS. F. Varianとによってそれぞれ、独立に発明された。大別して反射型と直進型の2種があり、前者は出力数mWから数W程度の連続波出力の発振管で、主として通信装置の局発、測定器用のマイクロ波源に応用された。後者は、出力が大きいものでは、連続波で1MW、パルスで100MWに達する増幅管で、主として、UHF-TV放送、見通し外短波通信、マイクロ波衛星通信・衛星放送、レーダ等の信号を伝送するための媒体としての応用のほか、マイクロ波加熱、核融合のためのプラズマ加熱、加速器のマイクロ波源などの、マイクロ波のエネルギーを直接、利用する分野で使用されている。

クライストロンは速度変調管とも呼ばれる。進行方向に対し均一に分布する電子ビームが共振空胴を通過するときに速度変調を受けることからこの名がついている。電子が空胴の狭い間隙を通過するとき、空胴に印加された微小なマイクロ波の作用を受け、その位相に応じて加速あるいは減速される。加速された電子はより早く進み、減速された電子はより遅く進む。結果として、先へ進むにつれ、電流の密度に次第に濃淡が発生する。たとえば、図5.1に示すように、a点で速度変調を受けるが、この位置ではまだ密度変調は生じていない。b点に近づくにつれ、集団が進んで密度変調の度合いが大きくなる。

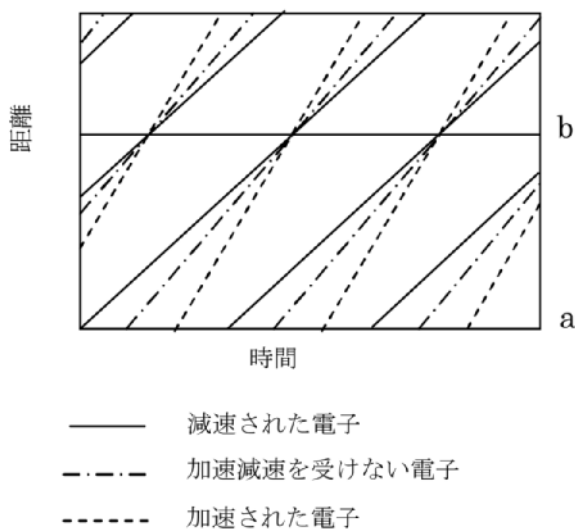


図5.1 速度変調から密度変調に至る電子ビームの集団の様子

5.2 反射型クライストロン

図5.2に反射型クライストロンの概念図を示す。電子銃で形成された電子ビームが空胴を通過する際にマイクロ波と相互作用して速度変調を受ける。適当な距離を進んだときリペラにより反射され、さらに集群しながら再び空胴に戻ってくる。戻るまでの走行距離を適切に定めて、集群した電子が再度、空胴を通過するときに減速を受けるようにする。減速により電子の運動エネルギーが減少し、代わりにマイクロ波がこのエネルギーを貰って増大する。このマイクロ波は電子ビームの速度変調を助長する。このプロセスでうまい具合に正帰還がかかり、発振条件が満たされ発振に至る。空胴に発生したマイクロ波は出力として外部に取り出される。

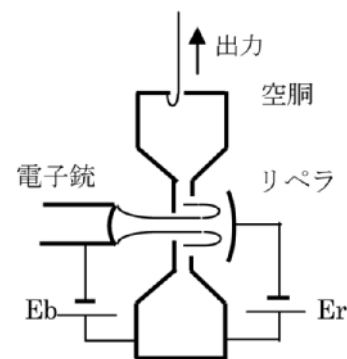


図5.2 反射型クライストロンの概念図

わが国では1941（昭和16）年にNHK技研 福永健男らが初めて反射型クライストロンの発振に成功した⁽¹⁾。試験に使用された反射型クライストロンを図5.3に示す。

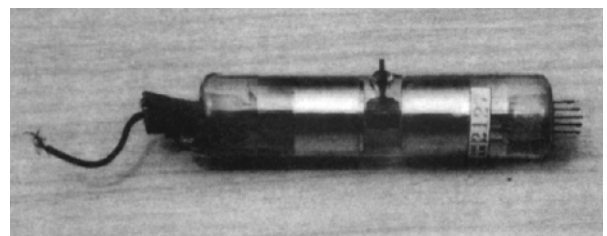


図5.3 NHK技研で開発したわが国最初の反射型クライストロン⁽¹⁾

ほかに、海軍技研、住友通信（現日本電気）が開発を始めている。

戦後、GHQの開禁後、日本無線（現新日本無線）、東京芝浦、神戸工業（現富士通）、日本電気等が開発

に加わった。図5.4に示すような板封止空洞外付け反射型クライストロンが試作され、1949年に箱根双子山-電気通信省通研神代分室間で実施のマイクロ波多重通信実験に供された。この成功を受け4,000MHzの回線網の建設が進められた。

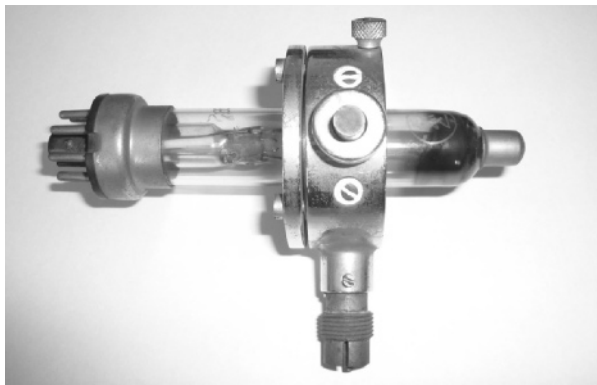


図5.4 板封止空洞外付け反射型クライストロン7803
(写真 東芝電子管デバイス)

1950（昭和25）年から52年にかけて、マイクロ波多重通信あるいはレーダ用の局部発振管として空洞内蔵全金属反射型クライストロン2K25（図5.5）、2K26等の国産化が進められた。



図5.5 空洞内蔵全金属反射型クライストロン2K25
(写真：日本無線)

1955（昭和30）年には短距離マイクロ波回線の変調出力管として、導波管結合型のクライストロンが開発された（図5.6）。

その後、1960年代中頃にかけて、4,000MHzから15GHzにわたる多くのマイクロ波通信回線の建設が進められ、反射型クライストロンの最盛期を迎えた。しかしこの隆盛は長くは続かず、ガンダイオード、インパットダイオードなどの固体装置の進展に伴って、反射型クライストロンは急速に固体デバイスに置き換えられる道をたどった。

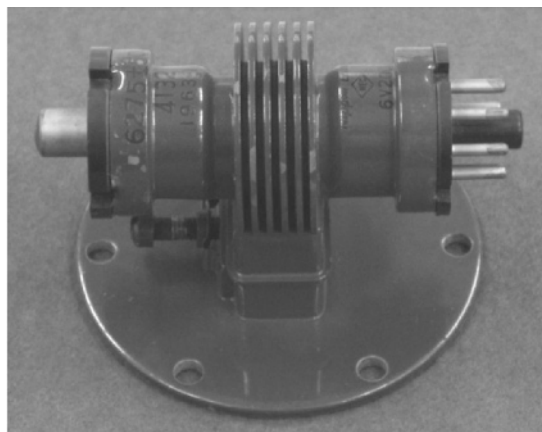


図5.6 導波管結合反射型クライストロン6V200
(写真：NECマイクロ波管)

沖電気は150GHzにいたるミリ波反射型クライストロンの開発を進めた（図5.7）。特に測定用の出力管として重宝された。

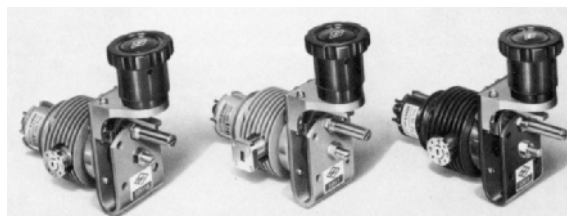


図5.7 ミリ波反射型クライストロン⁽²⁾

5.3 直進型クライストロン

5-3-1 構造と原理

直進型クライストロンの構造の一例を図5.8に示す。

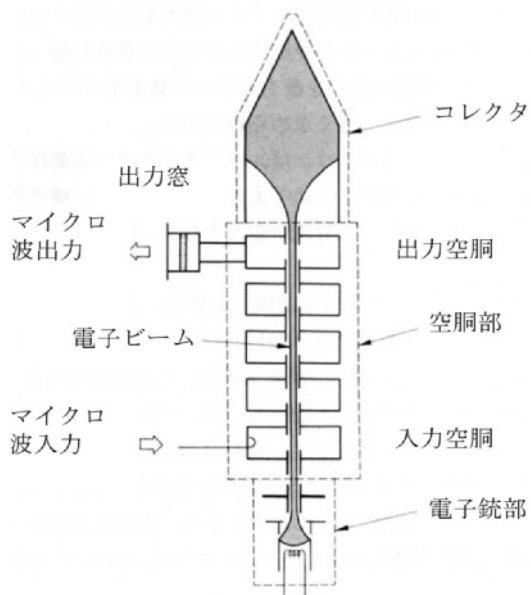


図5.8 直進型クライストロンの構造

電子銃、複数の共振空洞およびコレクタが直線状に並んでいる。図5.9に電子銃、図5.10にコレクタ部の電子軌道を示す。比較的大きい面積を持つ球面状のカソードから放射された熱電子をウェーネルト電極、陽極等で絞りながら加速し、高い運動エネルギーを持つ細い電子ビームを形成する。電子は負の電荷を持つため互いに反発して広がる。これを防ぐため、軸方向に強い磁界をかけて集束し、細いビーム形状を保ったままで空胴部を通過させる。空胴部を出た後は、磁界の作用がなくなるので、電子ビームは広がる。これをコレクタで捕集する。

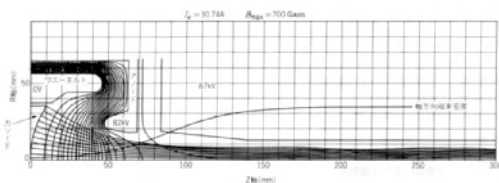


図5.9 電子銃部の電子軌道

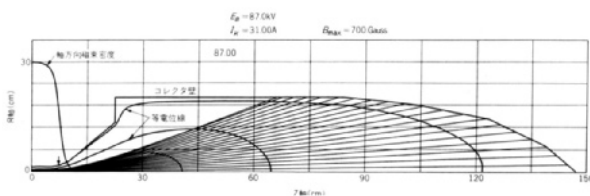


図5.10 コレクタ部の電子軌道

電子銃から出た電子ビームは、空胴部でマイクロ波と相互作用し、電子が持つ運動エネルギーがマイクロ波のエネルギーに変換される。相互作用を終えた電子ビームはコレクタで捕集される。

図5.11に六空胴クライストロンについて求めた電子とマイクロ波の相互作用の様子を示す。図の左端(1で示した位置)に入力空洞がある。

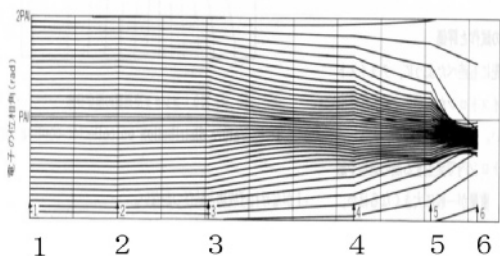


図5.11 空胴部の電子の軌道

入力空洞に外部から弱いマイクロ波を印加する。このマイクロ波により、電子ビームは速度変調を受け、2、3、4、5で示される中間空洞を順に通過する。この過程で速度変調がさらに進み次第に集群して強い密度変調になる。十分に密度変調を受けた電子ビームが出

力空洞6を通過する。このとき、電子ビームが大きく減速され、電子が大部分の運動エネルギーを失う。このエネルギーの減少分がマイクロ波のエネルギーになる。マイクロ波はきわめて強くなって外部へ出力される。出力と入力電力の比を増幅率と呼ぶ。最近のクライストロンの増幅率は50dBすなわち10万倍程度、エネルギーの変換効率は60-70%程度である。

相互作用を終えた後の電子ビームをスペント・ビーム (spent beam) と呼んでいる。このスペント・ビームはコレクタ壁に衝突する際に電子の運動エネルギーが熱になって消費される。これを減らすために、コレクタ電位低下 (CPD: Collector Potential Depression) 動作という手法が採られる。つまり、コレクタの電位を空胴部の電位 (通常、アース電位) より低くして減速して電子を捕集する。

減速で稼いだエネルギーは電源に返される (付録参照)。すなわち、空胴部に入射される際の電子の運動エネルギーからこの回収分を差し引いたものが正味の直流入力となり、この値で、マイクロ波出力を割った値が実際のエネルギー変換効率になる。

スペント・ビームには速度分散があるので、コレクタ電位を低くしすぎると、遅い電子が空胴側に戻ってしまうこととなる。そこで、電子を速度ごとに分類し、早い電子は十分減速し、遅い電子はあまり減速しないで捕集する。通常、3-5段の多段型電位低下コレクタが採用される。

クライストロンの場合、(1) CPDを行わなくても、効率がかかなり高く、(2) スペント・ビームの速度分散がかかなり大きいことから、一時は採用を検討されたが、現状、殆どのクライストロンではCPDを採用していない。次章以降で説明する進行波管、ジャイロトロンではCPDが効率向上のための重要な手法となっている。これらの電子管では、コレクタ入射エネルギーの60-80%がCPDにより回収される。

5-3-2 UHF-TV用クライストロン

直進型クライストロンの研究も、反射型クライストロンとほぼ同時期にNHK技研によって始められた。試作管の写真を図5.12に示す。

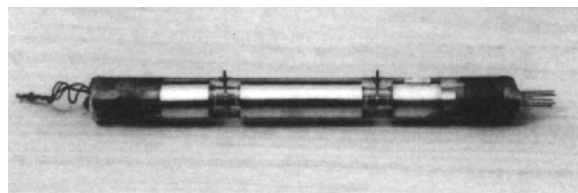


図5.12 NHK技研で開発したわが国最初の直進型クライストロン⁽¹⁾

直進型クライストロンの本格的な研究が始まったのは1950年代中頃以降のことである。

1956（昭和31）年にNHKが700MHz、1.5kWの外部空洞型三空洞クライストロンを開発した。1959（昭和34）年にはNHKと東京芝浦が10kW外部空洞型四空洞クライストロンを開発し、UHF-TV放送実験に使用した。1961（昭和36）年に東京芝浦が20kWの外部空洞型1AV10、1963（昭和38）年に50kWのM4620、1965（昭和40）年には日本電気が30kWの内部空洞型LD698を開発するなど、相次いで開発が進められた¹⁾。

1968（昭和43）年にNHK徳島放送局が開局、東京芝浦の1AV40が使用された。このクライストロンの空洞は出力が20kWで空洞外付け（外部空洞型）であったが、引き続き、空洞自蔵型（東京芝浦、10kW、1AV95、30kW、1AV48）、内部空洞型（日本電気、75kW、1AV80、1AV97）などの開発が進められた。これら各種クライストロンの外観写真を図5.13に示す。コレクタの冷却についても、全強制空冷、蒸発冷却などの方法が採用された。



図5.13 UHF-TV放送用クライストロン⁽⁴⁾

クライストロンの効率を高める目的で、クライストロンの動作をコンピュータプログラムを使用して解析するシミュレーション技術の開発が進められ⁽³⁾、クライストロンの効率は60-70%程度に高まった。いっそうの効率向上を目指してCPD採用のクライストロンの開発も実施された。

1986（昭和61）年、日本電気がUHF-TV放送の全周波数帯（470-860MHz）で動作可能な蒸発冷却型30kW大電力クライストロンを開発した。

クライストロンの性能は一連の開発により大幅に高まり、広く採用されたが、1985（昭和60）年、30kW

全半導体送信装置が完成したのを機に、以降、放送機の更新に伴って、次第に固体化装置に置き換えられる方向を余儀なくされた。

5-3-3 見通し外通信用大電力クライストロン

1961-62年に日本電気によって、バリアン（Varian）の、周波数1,700-2,400MHz、出力1kWおよび10kWの四空洞クライストロンが国産化され、米軍基地間の通信に使用された。

1967（昭和42）年、国際電信電話が、日本と韓国間の国際通信に、周波数2,000MHz、出力1kWのクライストロンを並列運転する2kW送信機を製作した。

その後、日本電気は、1,400から2,700MHzに至る周波数帯で、出力300W-12kWの四空洞および五空洞クライストロンを開発し、高効率化およびPCM方式化への要求に応えた。

しかしながら、衛星通信の発展によって、このニーズも次第に減少方向をたどった。

5-3-4 衛星通信・衛星放送地球局用クライストロン^{(5)、(6)}

1963（昭和38）年、NASAのリレー衛星を用いてKDDによる日米間のテレビ実験が行われた。日本からの送信に1,700MHz、10kWの四空洞クライストロンLD624が使用された。また、翌年、1.700GHz、20kWのクライストロンLD659を用い、日本のテレビ番組を米国に放映した。

NHKと東京芝浦は、1964（昭和39）年に6,000MHz帯3kW四空洞クライストロン6AV50/M4627Aを共同開発し、日欧間のテレビ中継に供した。また、同年、東京芝浦は10kWクライストロンM7863を開発した。

日本電気は1970（昭和45）年に5チャンネルに対応するプリセットチューナを組み込んだLD4011を開発し、1972（昭和47）年には可搬型地球局用として永久磁石集束、空冷、1および2kWクライストロンLD4069、LD4132を開発した。

6,000MHz帯の開発に続き、日本電気は、1977（昭和52）年、放送衛星地球局用として14GHz、2kWの五空洞高効率クライストロンLD4198を、通信衛星地球局用として30GHz帯で車載用に150W、固定局用に500W（図5.14）を電電公社と共同で開発した⁽⁵⁾。30GHz管は永久磁石使用の空冷管で、周波数変更もパルスモータを用いて遠隔で実施できるように工夫された。



図5.14 地球局用30GHz/500Wクライストロン28AV81
(写真NTT情報流通基盤総合研究所)

日本電気の地球局用クライストロンは世界に活躍の場を広げた。1988（昭和63）年にはNd-Fe-B系磁石採用の14GHz 3kWの小型軽量地球局用クライストロンを開発した。また、衛星放送のアップリンクが17GHzへ移行したことに伴って1995（平成7）年に出力1.5kWのクライストロンを開発し、翌年、さらに、高速チューナ付き2.4kWクライストロンを開発した。

5-3-5 レーダ用クライストロン

1961（昭和36）年、Lバンド2MWパルスクライストロンL-3035を防衛庁向けに神戸工業が国産化した。同じ頃、日本電気は近距離航法装置用のLバンド12kW三空胴パルスクライストロンSAL-89Aを国産化した。

1979（昭和54）年には航空路監視レーダ（ARSR：Air Route Surveillance Rader）用のLバンド5MWクライストロンとして、日本電気がVA-963A、東京芝浦が1AV65を製品化した。

1998（平成10）年、東芝は、気象レーダ用として、5,250-5,350MHz、250kW、4 μ sのクライストロンE3734Aを開発した。

5-3-6 マイクロ波をエネルギー源とする用途のクライストロン

この分野の応用には、マイクロ波加熱、核融合のためのプラズマ加熱、加速器のマイクロ波源などがある。

マイクロ波加熱用クライストロン：2.45GHzで、1992（平成4）年に30kW、1993年に100kWの高効率クライストロンが日本電気により開発された。これらのクライストロンの効率は70%以上である。また、東芝も同様のクライストロンを開発している（E3739、E3724）。

1984（昭和59）年、東芝は915MHz、200kWのクライストロンを開発し、運輸省港湾技術研究所の砕岩実験に供した。

核融合関連のクライストロン：1977（昭和52）年頃、800MHz、200kW管（日本電気、LD4262）を2本並列運転した400kW装置が、また、650-750MHz、50kW（東京芝浦、E3756）を4本並列運転した200kW装置が、

それぞれ、名古屋大学プラズマ研究所および日本原子力研究所のプラズマ加熱実験に供された。また35.5GHz、4kW管（日本電気、LD4321）を32本、並列運転し合成出力として60kWを得る実験装置がプラズマ研究所に納入された。

1980（昭和55）年には28GHz、5kWのクライストロンLD4398、45GHz、1kWクライストロンLD4399が京都大学ヘリオトロン核融合研究センターに納入された。

1980（昭和55）年、日本原子力研究所JT-60のLHRH用に、2GHz、長パルス1MWクライストロン（東京芝浦、E3778、日本電気、LD4444）の開発を進め、それぞれ1983、84年に目標の出力性能を達成した。パルス幅は10秒であった^{(7)、(8)}。図5.15はM3778の外観写真で、左下の制御器により、あらかじめ設定された周波数に遠隔制御で設定できるようになっている。



図5.15 核融合用クライストロンE3778
(写真：東芝電子デバイス)

東芝電子管デバイス（TETD）²は2004（平成16）年に8.2GHz、25kW、1秒のクライストロンE3794を東京大学に納入、翌年、韓国KSTAR向けに5GHz、CW500kWクライストロンE3762を開発した。

加速器用クライストロン：パルス動作と連続波動作の2種類がある。以下、特に混乱を生じないと思われるので、これらをまとめて報告する。

東京芝浦は、1959年に、線形加速器用としてSバンド（2,856MHz）、2.5MW四空胴パルスクライストロンM7849を、東京大学核物理学研究所（東大核研）と共同開発した。このクライストロンの改良型管M7849Aは名古屋工業試験所で使用された。

1960年代後半にかけ、東京芝浦がSバンド6MWのM4628を、三菱電機が5MWのPV3105、25MWのPV-2014を開発した。東京芝浦は1977年にM4628の出力を

9MWに上げている。

1980年に、東京芝浦は、通産省電子技術総合研究所との共同研究でSバンド21MWの高効率パルスクライストロンE3776を開発し、同研究所の500MeV線形加速器に供した⁽⁹⁾。このクライストロンでは、出力窓の負担を減らすため出力を2分して取り出された(図5.16)。

1981(昭和56)年から、スタンフォード線形加速器センター、高エネルギー物理学研究所、東京芝浦、三菱電機が、協同して150MWのクライストロン開発を進めた⁽¹⁰⁾。

1980(昭和55)年、文部省高エネルギー研究所(KEK:高エネ研)のフォトンファクトリ³向けに、東京芝浦は500MHzで連続波出力200kWのクライストロンを開発した⁽¹¹⁾。

KEKの指導を受け、東芝は1985年に500MHz、CW1.2MWのクライストロンE3786を完成、トリスタンリング⁴に供した(図5.17)^{(12)、(13)}。このクライストロンはE3732として、Spring-8やBファクトリでも使用された。



図5.16 パルスクライストロンE3776
(写真:東芝電子デバイス)



図5.17 連続波クライストロンE3786
(写真:東芝電子デバイス)

200kW管から1MWへの出力向上に関しては、特に真空度の向上と出力窓の改善に大きいハードルがあった。開発途上では、管内放電が多発した。そこで、真空封止、真空処理、真空排気、コンディショニングについて、根本に立ち返った考察と対応が求められた。窓については、セラミック内に発生するマイクロ波損失が熱歪を生じ、このために出力が上がると窓が破損するという障害に遭遇した。この問題を克服するため

に、(1) セラミック内の電界をできるだけ低く、しかも対称的なものとなるように窓部の構造を改善する、(2) 真空側のセラミック表面で発生するマルチパクタを抑える、(3) できるだけ発熱が少なく応力に強い高純度セラミックを使用するなどの方策が検討され採用された。開発が遅れ、スケジュール上、極めてタイトなものとなったが、一連の対策が功を奏し、開発に成功した。

東芝は1997年にKEKの指導を受け、5,712MHz、50MW、パルス幅2.5 μ sのE3746を完成した⁽¹⁴⁾。

1999年には324MHz、3MWのクライストロンE3740Aを開発しJ-PARKに納入した⁽¹⁵⁾。このクライストロンは世界最大のクライストロンで全長は6m近い大型管である。図5.18に外観を示す。

そのほか、2000年以降に東芝が開発を進めたクライストロンを表5.1に示す。

この表でPPMと記した集束磁石は日本の発明で、クライストロンでの採用例は少ないが^{(16)、(17)}、進行波管では、広く一般に採用された技術である。

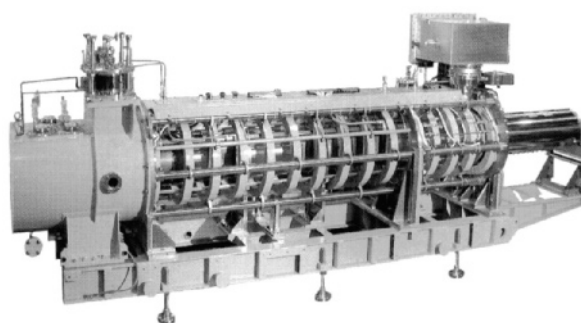


図5.18 加速器用超大型クライストロンE3740A

表 5.1 東芝の加速器用クライストロン

開発年	管名	周波数 MHz	出力 MW	パルス幅 μ s	要求元	集束磁石
2000	E3757	11,424	50	1.5	KEK	PPM
2000	E3758	5,712	50	2.5	KEK	PPM
2000	E3761	11,424	50	1.5	SLAC	PPM
2001	E3768	11,424	75	1.5	KEK	PPM
2001	E3766	972	3	620	J-PARK	
2002	E3773	5,712	5	4	理研	PPM
2004	E3736	1300	10	1,500	DESY	

PPM: Periodic Permanent Magnet

表5.1のDESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron in der Helmholtz-Gemeinschaft) 向けクライストロンは、6本の電子ビームを使用するわが国で初めての多ビームクライストロンである⁽¹⁸⁾。外観と電子銃の写真を図5.19に示す。

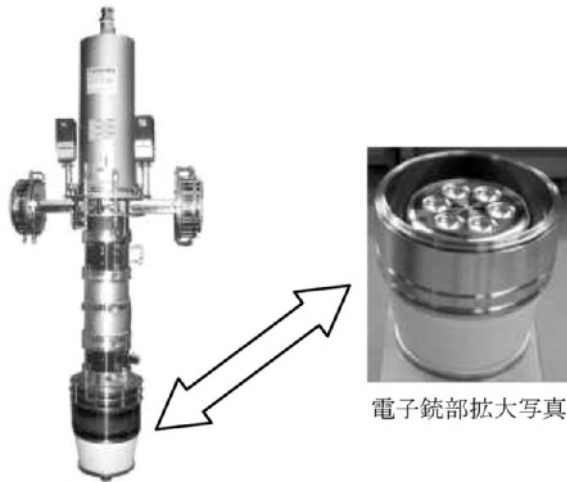


図5.19 マルチビームクライストロンE3736
(写真：東芝電子デバイス)

電子銃部の拡大写真に6個のカソードが並んでいるのが認められる。このカソードから射出された6本の電子ビームが空洞部に入射され、そこでマイクロ波と相互作用する。1本の電子ビームを用いるクライストロンと比較して、より低いビーム電圧で、より効率よくマイクロ波の増幅を行うことができる特長を持っている。

DESYはこのようなクライストロンを現在、建設中のX線自由レーザーに使用する予定である。将来の素粒子の研究では、この種の大電力高効率クライストロンが多数、使用されると見込まれている。

最後に超大型クライストロンの製造技術について記す。

東京芝浦は1979（昭和54）年、通産省補助金を取得し、産業用超大型クライストロンの製造設備を整備した。当時、砕岩、汚泥処理、核融合、大型加速器の分野で、超大電力クライストロンの開発が求められていたが、従来設備ではその要求に応えることができなかった。そこで、東芝は5,000kVAの専用受電設備、5mに達する超大型管の排気を行うための2重真空排気炉、製造のための専用の建屋、超大電力管を試験するための高圧安定化電源、発生したマイクロ波を吸収するための大型水負荷など、一連の製造、試験装置を整備した。産業応用の話は実らなかったが、一連の投資は、原研の核融合クライストロンやジャイロトロン、KEKのトリスタン計画用のクライストロンを始めとする超大電力管の開発に力を発揮した。このクラスの超大電力電子管を製造し、検査できる設備を有しているメーカーは世界でも、米国とフランスに各1社がある程度である。

参考文献

- (1) (社)電子通信情報学会歴史的マイクロ波技術資料保存委員会：日本における歴史的マイクロ波技術資料保存目録、(1998)
- (2) 日本電子機械工業会電子管研究会：電子管の歴史、p206、オーム社（1987）
- (3) 島田：電子ビームと空洞の結合の解析とクライストロンの大信号シミュレーションへの応用、信学論文誌56-B、5、p176（1973）
- (4) 電子管の歴史、p190-191（1987）
- (5) 大類、佐藤、井出：「衛星通信地球局用マイクロ波管」、p57-62、NEC技報。Vol.36 No.12（1983）
- (6) T. Kageyama et. al：“Review of NEC’s Ka-Band Microwave Tubes for Space and Ground Applications”、Second Ka Band Utilization Conf.、Sept. 24-26（1996）
- (7) 岡本、細井、三宅、大野、永島、今井、上原、藤井：「核融合高周波加熱用2GHz 1MWクライストロン」、信学技報 Vol.83 No.213（1983） T.
- (8) Okamoto et al：“Super Power Klystrons for Fusion Plasma Heating”、IMPI 84（1984）
- (9) 富増、畠村、岡本：リニアック励振用高効率パルスクライストロンE3776の開発、信学研資、MW80-34（1980）
- (10) 米沢、岡崎、渡部：ライナック用150MWパルスクライストロンについて、信学技報、Vol.85、No.23（1985）
- (11) 高田、大家、大野、岡本：「500MHz 200kW CW大電力クライストロンE3774の開発」、電学、信学技報 MW80-35、EMC80-45、電子通信学会 p33-38（1980）
- (12) 岡本、大家、川上：「加速器用 1.2MW 連続波大電力クライストロン」、東芝レビュー、41巻 10号、p889-892（1986）
- (13) 高田：「500MHzクライストロン」、加速器、Vol.1 No.2、p109-118（2004）
- (14) 大久保、米沢、松本、新竹：「50MW Cバンドパルスクライストロン」、信学技報、Vol.98 No.467 ED98-179、p73-79（1998）
- (15) 手塚、三宅、坂本、千代、福田、川村、穴見：「大強度陽子加速器（J-PARC）用324MHzクライストロンの開発」、Proc. of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan、Tokai、p372-374（2003）

- (16) 松本、大家、徳本、陳、両角、水野、A. Larionov、S. Kazakov、V. Teryaev、菅、浦方、三宅：「PPM集束Xバンドパルスクライストロンの開発」、Proc. of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tukuba, p 82-84 (2001)
- (17) 藤井、大久保、稲垣、新竹：「7MW Cバンド PPMパルスクライストロンの開発」、信学技報、Vol.103 No.497 P65-70 ED2003-193 (2003)
- (18) A.Yano et. al：“The Toshiba E3736 Multi-Beam Klystron”、Proc. Of Linac 2004, Luebeck, Germany, p706-708 (2004)
- 1 通常、図5.13の一番左側の写真に示すように、クライストロンは空胴なしの状態では排気される。空胴はセラミック円筒の外側に取り付けられる。空胴を付けないで出荷し、放送機組込み直前に空胴を取り付けるタイプを外部空胴型、あらかじめ空胴を取り付けて出荷するタイプを空胴自蔵型と呼んでいる。これに対し、内部空胴型は、真空内に空胴を取り込んだタイプで、空胴壁自身が真空壁になっていて空胴内は真空である。
- 2 東京芝浦は1984（昭和59）年に東芝と社名を変更、2003年に電子管部門を分社した。社名は東芝電子管デバイスである。
- 3 フォトンファクトリは、高速で周回軌道を描く電子から放射される放射光を利用する施設である。KEKに続き、東北大、産総研等で放射光施設が建設された。
- 4 トリスタンはクォークの発見を目標に建設された装置で、その後、自然界に反粒子が存在しない理由（CP不平衡）を研究するためのBファクトリに改造された。

6 進行波管

6.1 概要

進行波管はTWT (Traveling Wave Tube) とも呼ばれる。1941 (昭和16) 年頃に英R. Kompfnerが着想し1944 (昭和19) 年に発表した⁽¹⁾。1947 (昭和22) 年に米 J. R. Pierce が理論をまとめ刊行した⁽²⁾。

進行波管におけるマイクロ波と電子の相互作用は、伝送線に沿う分布結合であるので、クライストロンのような共振器を用いるものと違い、動作周波数帯域がはるかに広い特長を持つ。そのため、マイクロ波中継、地上放送、レーダ、衛星通信、衛星放送、あるいはマイクロ波を利用する測定器等の増幅管として広く利用されてきた。また、比較的高い周波数の信号を増幅する能力を持っていることから、ミリ波帯の増幅管としても開発が進められた。

進行波管は、図6.1に示すように、電子銃、遅波回路、コレクタで構成され、電子銃から射出された電子が遅波回路内をマイクロ波とほぼ同じ速度で進みながら相互作用するようになっている。

一般に、自由空間ではマイクロ波は光と同じ速さで伝播する。一方、電子は光の速さより遅い。そこで、マイクロ波の速度を遅らせ、電子速度がわずかにマイクロ波の速度より大きくなるようにしてある。遅波回路という名前が付けられているのはこの理由による。

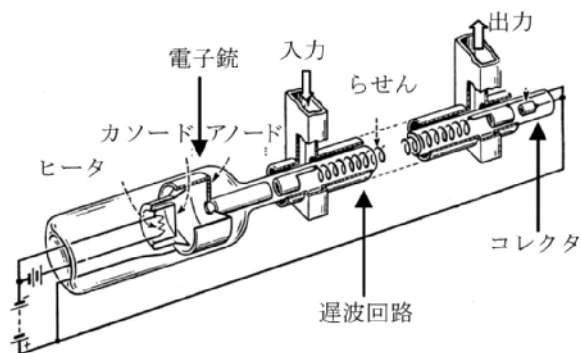


図6.1 進行波管の構造

速度がほぼ等しいので、個々の電子はマイクロ波の特定の位相の電界の作用を受けることになる。加速位相の電子は加速され、減速位相の電子は減速され、その結果、先へ進むにつれて次第に集群して密度変調される。電子の速度をわずかに速くしておく、全体として電子は減速され運動エネルギーを失って、その分、

マイクロ波が増大する。マイクロ波の増大により集群がさらに進む。したがって、デシベル (dB) の単位で表した増幅度は長さに比例して増大する。しかし、やがて電子速度がマイクロ波の速度より遅くなって増幅条件を満たさなくなり、飽和して最大値に達したのちは逆に減少する。

飽和を少しでも遅らせて、より高い増幅度あるいは出力を得るため、終段近くでマイクロ波の速度を次第に、あるいは段階的に低下させる手法がとられる。この方法を位相速度テーパと呼んでいる。

増幅を終えた電子ビームは、スペント・ビームと呼ばれ、コレクタで捕集される。そのエネルギーはコレクタで熱になる。少しでもこの量を減らすため、前章で説明したCPD技術を利用する。通常、3-5段の多段型CPDコレクタが採用される。

位相速度テーパとCPD技術を併用して、最近では効率が50%程度を超える進行波管が作られるようになっている。

代表的な遅波回路は、らせん型と、空洞結合型である。それぞれ、図6.2、図6.3に示す。後者は、マイクロ波が結合スロットによって順に隣の空洞に伝えられていくようになっていて、機械的、熱的に強く、特に大電力の進行波管に用いられる。

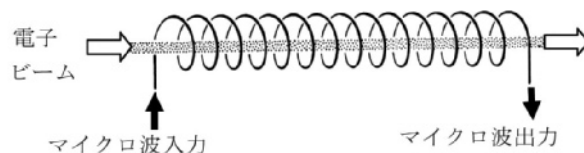


図6.2 らせん型遅波回路

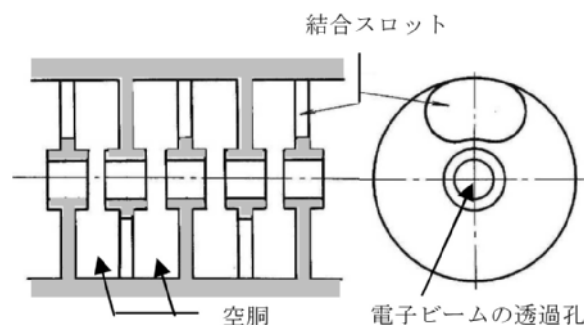


図6.3 空洞結合型遅波回路

ビームを細く絞ったまま、遅波回路部を通すために磁界が使用される。ビーム集束には、当初、電磁石が使用されたが、やがて永久磁石が採用され、さらに周

期永久磁石（PPM：Periodic Permanent Magnet）を用いる方向に進んだ。

PPM集束は、電電公社（現NTT）の電気通信研究所で行われた極めて重要な発明で、現在、この技術は世界的に広く採用されているうえ、大電力直進型クライストロンでも採用される方向にある。

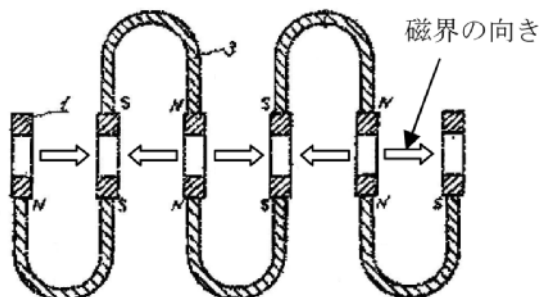


図6.4 周期永久磁石の発明⁽³⁾

進行波管やクライストロンでは、ビーム集束のために、比較的長い距離に渡って強い磁界を発生させる必要があるが、PPMでは、磁界が周期的に変化するため、磁位を低く抑えることができる。PPM技術により磁石の重量、寸法が極めて小さくなったほか、漏れ磁界も小さくなり、経済性でも優れた効果を生んでいる。図6.4に、特許に示された磁石構造を示す⁽³⁾。遅波回路と電子ビームは図の中心部の、軸方向磁界が周期的に変化する部分に置かれる（図6.5参照）。図には小型の馬蹄形磁石が示されているが、近年は磁石材料が良くなったので、中心に穴の開いた円板状の磁石になっている。

参考までに、最近のらせん型進行波管の一例を図6.5に示す。磁石は円板状磁石を用いたPPMで、コレクタはCPDである。

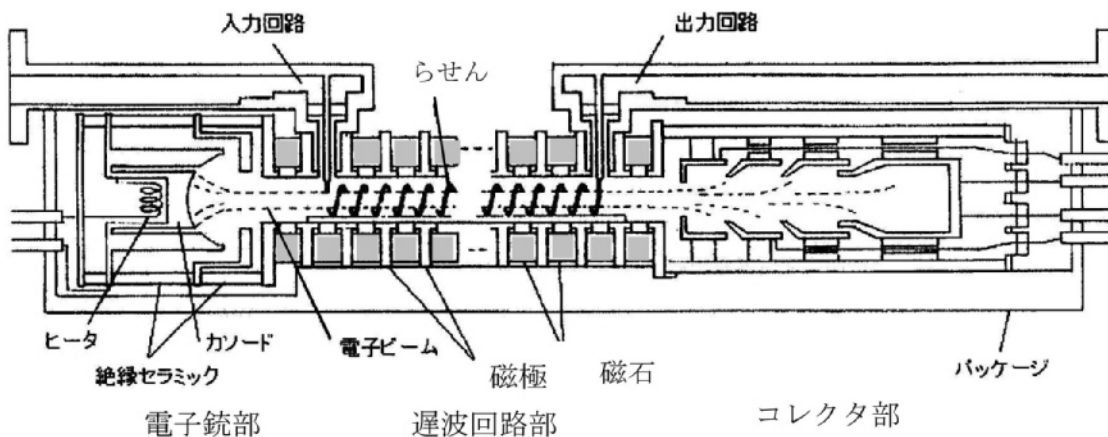


図6.5 PPM CPD 進行波管の構造⁽⁶⁾

6.2 マイクロ波中継回線用進行波管

1947（昭和22）年に東京芝浦がTV中継用進行波管の研究に着手した。また、1950（昭和25）年に電電公社通研が4GHz、出力150mW、利得17dBの増幅に成功し、続いて翌年に1W、18dBの進行波管を試作した（ECL-1085、ECL-1086）。

東京芝浦がNHK技研との共同研究を経て1952（昭和27）年にNHKのTV中継用4GHz管を開発し、翌年初めから、東京-名古屋-大阪間の中継に供した。これはNTTの中継回線の完成まで使用された（4W10、4W11等）。

日本電気が電電公社通研と4GHz管4W85、4W86を開発、1954（昭和29）年に電電公社の商用中継器（東京-名古屋-大阪間の多重電話回線、TV中継回線）に使用した。

1951（昭和26）年、電電公社 関壮夫がPPMを発明し、1954（昭和29）年に米J. T. MendelがPPMの理論を発表した⁽¹⁾。1955（昭和30）年には、早くも4GHzの PPM管4W75Aが実用化された（図6.6）。大きくて重いソレノイド型の電磁石を使用しなくなったため、大幅な軽量化がはかられた。



図6.6 NTT商用中継器用PPM進行波管
（写真：NTT情報流通基盤総合研究所）

東京芝浦は、7Wシリーズ、8Wシリーズ（電磁石集束8W22A、PPM集束8W23、出力2W、国鉄回線に使用）を開発、また、建設省の中継回線用にPPM集束、5W管（3W20）を開発した。

このほか、6GHz帯から15GHz帯に至る多くの中継用進行波管の開発が進められた。しかしながら、1960年代半ば頃から、まず進行波管以外のデバイスの固体化が始まり、やがて進行波管自身も、衛星関連等を除き、低周波、低電力の領域から次第に固体装置に置き換えられる道をたどることになる。

日本電気は電電公社とともに1960年代始めから長寿命化対策を進め1970年代半ばに全金属セラミック化、1980年代に入って小型軽量化、高効率化、高信頼化、大容量化等、一連の努力を展開した。1980（昭和55）年には電電公社で使用する日本電気の進行波管は約15,000本に達した。

日本電気は1960年代から盛んに輸出を進め、北米、中南米、アジア、大洋州、中近東、ソ連など、ほぼ全世界に販路を伸ばし、1980年代半ば以降も中継用進行波管の新しい開発を継続した。

一部の進行波管の外観写真を図6.7-6.10に示す。図6.8-6.10はいずれもPPM管で、図6.10は全金属セラミック進行波管である。

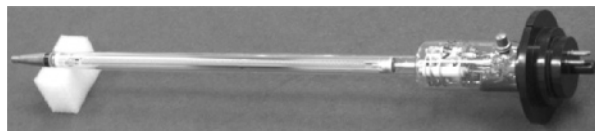


図6.7 4GHz帯中継機用進行波管 4W72A
(写真：NECマイクロ波管)

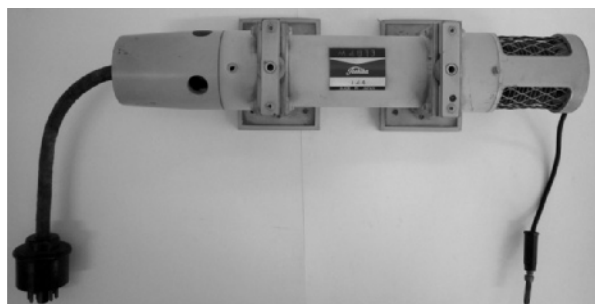


図6.8 7GHz帯進行波管 M4813 (7W411)
(写真：東芝電子管デバイス)



図6.9 6GHz帯 進行波管 6W50
(写真：NECマイクロ波管)



図6.10 11GHz帯全金属セラミック進行波管 LD4389A
(写真：NECマイクロ波管)

ミリ波進行波管の開発

電電公社通研は1950年代前半にミリ波進行波管の開発に着手し、1960年代始めにかけ、その成果をもとにメーカを指導した。日本電気、東京芝浦、沖電気が、らせん型、2重はしご型、交差指型50GHz帯ミリ波進行波管の開発に参加した⁽⁴⁾。ミリ波進行波管のビーム集束には、当初、電磁石が使用され、のちに馬蹄形の永久磁石に置き換えられた（図6.11）。1972（昭和47）年には、茨城通研-水戸間でミリ波導波管伝送試験が行われた。引き続き、70GHz帯の進行波管の開発も実施された。一連の総合的な研究によりミリ波技術が大きく進展したが、ミリ波通信は実用に至らなかった。

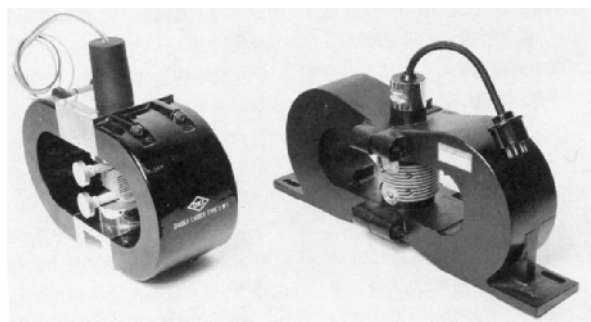


図6.11 50GHz帯2重はしご型進行波管⁽⁴⁾

6.3 低雑音進行波管

1955（昭和30）年頃から、東京大学、電電公社通研、日本電気、東京芝浦などで、通信、レーダ用に低雑音進行波管が開発されたが、固体デバイスの進展によって販路を伸ばせず、1960年代で殆どの開発と生産は終了した。

6.4 レーダ用進行波管

この分野は、主にマグネトロンやクライストロンが使用され、進行波管は輸入品かその国産化管に限られていた。しかし、進行波管は帯域が広く雑音が少ない特長を持っており、日本電気はその特長を生かした表6.1のような一連の進行波管を開発した。図6.12、図6.13に一部の外観写真を示す。

いずれもグリッドにパルス電圧をかけてビームを制御する方式の進行波管である。表の(*)は新日本無線の開発品である。

表6.1 レーダ用進行波管

開発年	周波数 [GHz]	出力 [kW]	特徴
1983	S	125/150	
1983	X	50	
1984	S	3	(*)
1984	C	60	(*)
1985	X	50	空洞結合型
1985	S	150	空洞結合型
1987	X	8	リングループ
1989	X	3	リングループ
1989	—	—	らせん、ミサイル搭載
1992	8.5-16	1.5	らせん、広帯域
1995	6.5-18	400W	らせん、広帯域

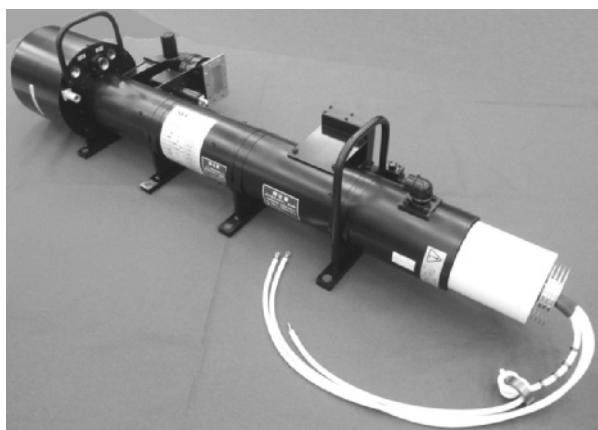


図6.12 Sバンド150kWグリッドパルス空洞結合型進行波管 (写真：NECマイクロ波管)



図6.13 Xバンド3kWグリッドパルスリングループ型進行波管 (写真：NECマイクロ波管)

6.5 加速器用進行波管

東京芝浦は、1959 (昭和34) 年、東京大学原子核研究所、名古屋工業技術試験所向けに2856MHz、2MW クライストロンのための原発振 (M7851A、2W、外部帰還)、中間増幅 (M7850、パルス出力400W、パルス幅10 μ s) 用進行波管を、続いて60年代中頃には出力1kWの進行波管3W80Aを開発した。

6.6 UHF-TV用進行波管

東京芝浦は1962 (昭和37) 年にUHF-TV放送用全金属セラミックPPM集束らせん型進行波管の開発に着手し、翌年、M4803の開発に成功、1964年には1W50として (図6.14)、民放5社のサテライト局向けに納入された計18台の放送装置に供した。

日本電気が1964 (昭和39) 年に電磁石集束のLD-655、翌年にはPPM集束のLD-711を開発し、1W20として量産に入った。

1W50、1W20、神戸工業が開発した1W70は30W/100W局で使用され、多いときは年当り300-400本が製造された。それまで使用されてきた送信管は進行波管に置き換えられた。



図6.14 UHF-TV用進行波管
1W50/M4803
(写真：東芝電子管デバイス)

10Wサテライト局にも、1964-65年に開発された日立製作所、神戸工業、松下電子、日本電気、東京芝浦の進行波管が使用された。1W65 (飽和出力50W、利得28dB)、1W67、1W10等である。10Wサテライト局はおよそ400局になった。

1969 (昭和44) 年、300W/500W/1kW局用に東京芝浦と日本電気が強制空冷型の1W80を開発した。周波数は650MHz、飽和出力は2kW、ビーム集束は電磁石である。また、翌年には日立製作所も蒸発冷却管、強制空冷管の開発を行っている。

UHFテレビ用の進行波管は急速に発展したが、1966 (昭和41) 頃から次第に進行波管以外のところから固体化が進み、やがて進行波管自体も固体化されるようになった。

6.7 衛星搭載用進行波管

この用途の進行波管では、高信頼性、小型、軽量、高効率、高利得はもちろんであり、ロケットで打ち上げられ宇宙空間で使用されることから、耐震性、対環境性等を満たすことが重要な要件である。

1973 (昭和48) 年、電電公社通研と日本電気が通信衛星搭載管の開発を開始し、1975年に4GHzで6W、18GHzで5Wの進行波管を開発し、1977 (昭和52) 年

に、通信衛星「さくら」に米国製の進行波管と混載で打ち上げた。続いて、通研と日本電気は20GHzで5Wの進行波管ECL-1481を完成した。この進行波管は、4GHz 6.3Wの進行波管 ECL-1480とともにCS-2a、2bに搭載され、1983年に打ち上げられた。電子銃には酸化物陰極、遅波回路にらせんが採用された。また、小型軽量化をはかるため、PPM磁石に強力なサマリウムコバルトが使用された。冷却は伝導冷却で、進行波管で発生した熱を衛星に伝え、さらに宇宙空間に放熱する仕組みであった。

CS-3に対し、20GHz 20Wの進行波管を電電公社、NASDA（宇宙開発事業団）、日本電気が進めた。この進行波管（図6.15）は、らせんとこれを支持する3本のベリリア棒を金属管内にわずかな歪を与えて挿入し、挿入後、この歪を開放する方法が採用された¹⁾。

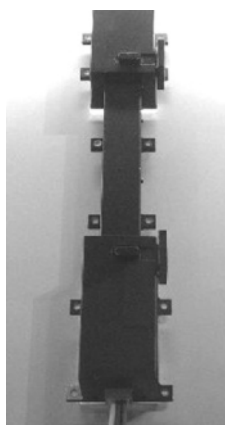


図6.15 20GHz
衛星搭載用進行波管
(写真：NTT情報流通基盤総合研究所)

衛星放送用として、1977年からNHK指導の下に日本電気、東京芝浦が100W管を開発した。出力は後に200Wへ引き上げられた。この進行波管では4段のCPDと位相速度テーパが採用された。

衛星放送用進行波管の出力は通信用と比較して格段に大きく、したがって、コレクタで発生する熱を直接、宇宙空間へ放熱する必要があった。そこで、コレクタを衛星の外に突き出し、太陽からの熱を反射し、コレクタ内で発生した熱を宇宙に向けて放射するための表面処理が行われた（図6.16）。

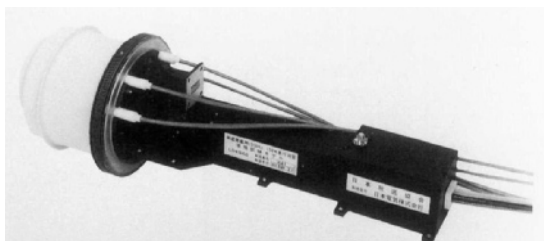


図6.16 放送衛星搭載用150W進行波管LD-4546⁽⁵⁾

1977年打ち上げの放送衛星（BS：Broadcasting Satellite）「ゆり」には米国ヒューズ社の100W空胴結合型進行波管が、1984（昭和59）年打ち上げのBS-2a「ゆり2号」には、仏国トムソンCSF社のらせん型進行波管が搭載された。後者の進行波管で使用されたコレクタ電極の材料はパイロリティック・グラファイトであった²⁾。

BS-2aを打ち上げた後、特に厳しい宇宙環境に関する問題がクローズアップされ、その環境を模擬した地上試験が行われた。BS-2bの打ち上げはスクリーニングを通過した進行波管のみを用いて実施された。BS-2bを用いて1986年12月から試験放送、1989年6月から本放送が始まっている。BS-3では、国産の進行波管が打ち上げられた。経験を踏まえた厳しい信頼性確認試験とスクリーニングが実施された。

将来の放送衛星搭載用進行波管の開発をNHK技術研究所と日本電気が進めている。この衛星では複数個の進行波管の出力がフェーズドアレイアンテナから放射される⁽⁶⁾。図6.17に進行波管の概観写真を示す。内部の構造は図6.5を参照されたい。

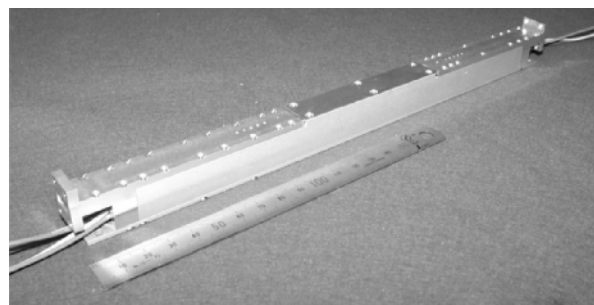


図6.17 21GHz10Wらせん型進行波管
(写真：NECマイクロ波管)

6.8 地球局用進行波管

1962（昭和32）年、東京芝浦、日本電気が通信衛星地球局用の進行波管の開発に着手した。

1967（昭和42）年、東京芝浦が6GHz 3kW M7864、日本電気が2kW LD-844を開発、後者がKDD山口局と高萩局で採用された。

翌年、出力10kWのM7880（東京芝浦、マレーシアに輸出 図6.18）、8kWのLD-793（日本電気、KDD高萩で使用、オーストラリア、台湾、韓国などに輸出）が開発された。1972（昭和47）年には日本電気が出力12kWのLD-4052を開発した。

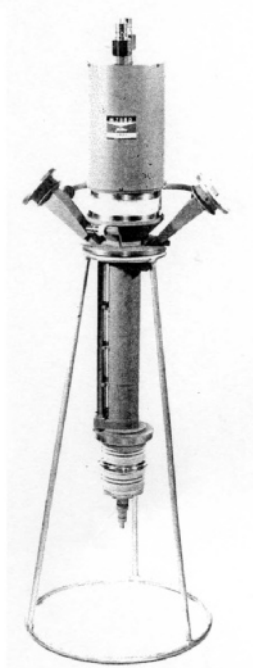


図6.18 地球局用進行波管 M7880
(写真：東芝電子管デバイス)

小型地球局用として、日本電気は1972年に3KW管 LD-4070、翌年に300W管LD-4025（らせん型）、1978（昭和53）年にLD4281、1978年に720W管 LD-4225、1.2kW管LD4228、1982年に500W管 6W81、1983（昭和58）年に150W 管LD4440を開発した。

1980、1983年打上げのインテルサットV、V-AでアップリンクにKu帯が加えられた。この周波数帯の進行波管として日本電気は、出力250WのLD4441をはじめ、130Wから3kWに至る多くの進行波管を製品化した。

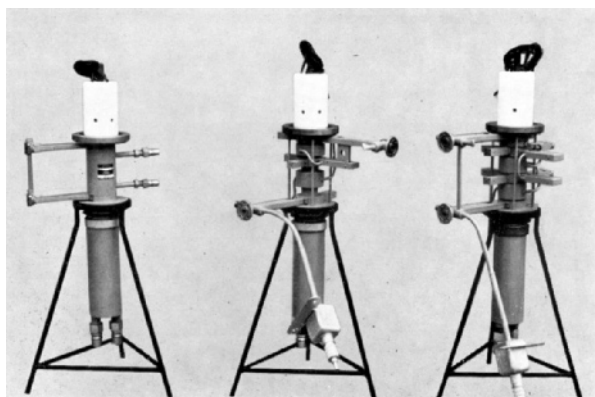


図6.19 30GHz帯通信衛星地球局用進行波管 M7894、M7895A、M7895B⁽⁷⁾

電電公社の国内衛星通信計画に応じて世界に先駆け30GHz帯の進行波管の開発が進められた。東京芝浦は1969（昭和44）年に300W M7894、1971（昭和46）年に600W M7895を（図6.19）、日本電気が1970（昭和45）年に400W LD4012を開発した。

空洞結合型進行波管のPPM化が進められるようになった。電電公社は（昭和53）年1978年頃から、PPM設計の検討を始め、1980年に、東京芝浦と共同で30GHz帯、400Wの全空冷進行波管E3832を開発した（図6.20）⁽⁸⁾。

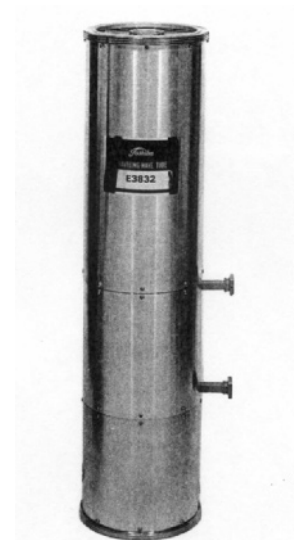


図6.20 PPM集束30GHz帯400W進行波管 E3832
(写真：東芝電子デバイス)

東芝は1983（昭和58）年に空洞結合型遅波回路、PPM、CPDを組み合わせた30GHz 300W進行波管E3840を開発し、建設省、消防庁の非常対策用に納入した。

放送衛星地球局用として、14GHz帯で1975（昭和50）年に東芝が2kW（図6.21）、日本電気が3kW管を開発した。

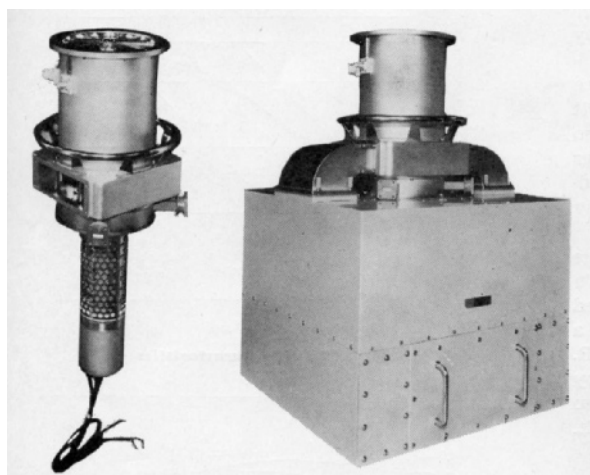


図6.21 14GHz帯放送衛星地球局用進行波管 E3825（右は電磁石装着時）⁽⁹⁾

1985（昭和60）年、次期放送衛星地球局用として、NEC、NHKが22GHz 45Wらせん型進行波管を共同開発した。

その後、日本電気が展開した地球局用進行波管をま

とめて表6.2に示す。図6.22、図6.23、図6.24は一部進行波管の外観写真である。

表6.2 地球局用進行波管

開発年	周波数 [GHz]	出力 [W]	特徴
1985	6	400	CPD、らせん
1986	6	3,000	らせん
1986	14	600	らせん
1988	30	100	らせん、パルス、伝導冷却
1990	30	100	らせん
1993	6	700	らせん
1993	14	300	らせん
1995	14	750	らせん、伝導冷却
1995	14	60/40	小型TWT
1996	17	400	らせん、次世代衛星放送
1996	14	130	らせん、小型TWT
1996	30	150	らせん、効率40% 伝導冷却
1996	14	350	らせん、2段CPD 伝導冷却
1996	14	600	らせん、2段CPD 伝導冷却
2000	6	2,250	らせん
2001	30	250	らせん、伝導冷却

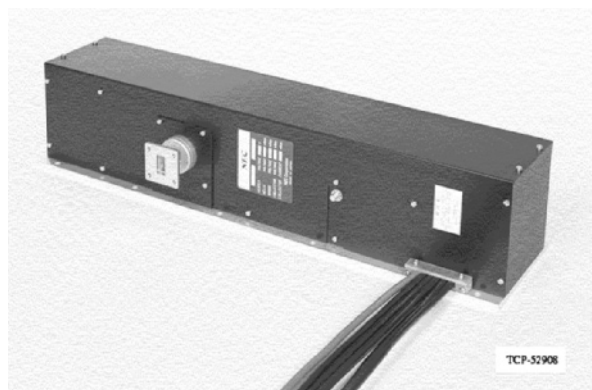


図6.24 14GHz帯600Wらせん型進行波管 (写真：NECマイクロ波管)

6.9 まとめ

進行波管はマイクロ波中継用に始まり、特にUHFテレビと衛星関連で大きく成長した。大別して、比較的小電力の領域ではらせん型、電力の大きいところでは空洞結合型が採用されたが、らせんの支持や冷却の技術が進んで、らせん型進行波管が許容できる電力は次第に大きくなった。

電子ビームを集束するための磁石が電電公社電気通信研究所の発明によってPPM化され大幅に軽量化された。進行波管は帯域が広い特長もあって、特に衛星通信関連で、引き続き重要な地位を維持していくと期待される。現在でも、将来を睨んで新しい開発が進められている。磁石材料もアルニコ、フェライト、さらにはサマリウムコバルト磁石等が加勢し、いっそうの小型軽量化が可能となっている。

進行波管の開発史の中で、日本では、特に東京芝浦と日本電気が激しく競争してきたが、東芝がマイクロ波大電力のクライストロンやジャイロトロンに特化したこともあって、現在、国内では日本電気1社に寡占化されている。世界的にも欧米にそれぞれ1-2社が残っているに過ぎない状況である。



図6.22 6GHz 2.25kW らせん型進行波管 (写真：NECマイクロ波管)

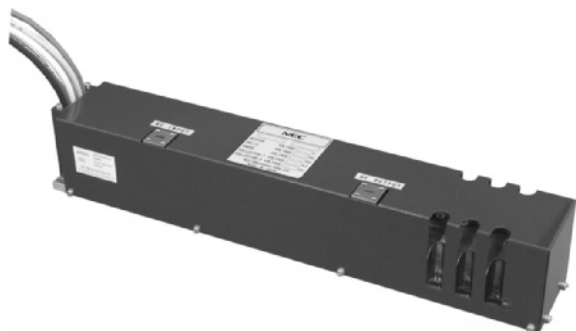


図6.23 30GHz帯250W らせん型進行波管 (写真：NECマイクロ波管)

参考文献

- (1) 小山：「進行波管」、通研叢書2、日本電信電話公社電気通信研究所編、丸善（1964）
- (2) J. R. Pierce：Traveling Wave Tubes、D. Van Nostrand Company, Inc.（1950）
- (3) 関壮夫、近藤厚実、小山次郎：特許出願広告 昭28-3371
- (4) 宇治、東、岡本：XIV 進行波管、電気通信研究所ミリメートル波シンポジウム、p125-136、日本電信電話公社電気通信研究所（1968）
- (5) 「NHKにおける宇宙中継に関する技術開発史」編集委員会：NHKにおける宇宙中継に関する技術開発史、兼六館出版(株)（1994）
- (6) (財) テレコム先端技術支援センター21GHz帯を用いた高度衛星放送システムの概念設計検討報告 H1505、P4-56（2003）
- (7) T. Okamoto et. al：“Millimeter-Wave High-Power Traveling-Wave Tubes”, Toshiba Review, May 1971
- (8) 酒寄、平田、石堀、杉山、藤田、岡本：「PPM集束300GHz帯400W全空冷進行波管」、昭和55年度電子通信学会総合全国大会、310、p2-81（1980）
- (9) K. Sugimori et. al：“High-Power Traveling-Wave Tube, E3825, for Earth Station in Broadcasting Satellite System”, Toshiba Review, No.113, p26-28, Jan-Feb 1978

1 この方法はディストーション・スクイズ (distortion squeeze) 法と呼ばれる。金属管の外側に3方向から圧力を加えてわずかに変形させ、その状態でらせん等の内蔵物を挿入し、挿入後に圧力を開放する方法で、らせんを強固に固定するとともに、熱伝導のよいベリリアを介してらせんに発生する熱を伝導で除去する優れた効果を持っている。冷却性能を上げる目的で、後には、この方法よりさらに冷却性能が良い、らせん、支持棒、金属管をロウ付けする方法が開発された。

2 この材料は軽く熱的に強いという特長があり、しかも大型送信管のグリッドに使用された十分な実績があったため採用されたものである。打ち上げ前の段階で、微小な放電が起きるといった問題が見つかり、詳細かつ慎重な追加の試験と確認が行われ、その後、BS-2aの打ち上げが実施された。

7 | ジャイロトロン

7.1 概要

オーストラリアの天体物理学者R. Q. Twissが1958（昭和33）年にサイクロトロン共鳴メーザ（CRM：Cyclotron Resonance Maser）の原理を提唱した⁽¹⁾。この原理の検証実験が、米国のハーシュフィールド（J. L. Hirshfield）ほかによって試みられたが、出力（～kW）、効率（～2%）ともかなり低かった⁽²⁾。

ソ連の研究者達がマグネトロン入射電子銃（MIG：Magnetron Injection Gun）を使ってCRMの性能を大幅に向上させ、ジャイロトロンとして発表し、一躍、世界の脚光を浴びた^{(3)・(4)}。

ジャイロトロンは、特にミリ波、サブミリ波領域で大電力を発生できる特長を持っている。核融合のためのプラズマ加熱、ミリ波加熱、ミリ波レーダなどの応用で活用できると見られ、特に核融合関係者が強い関心を示した。日本の開発は、京大で1977（昭和52）年頃に始まった。

当初、電磁界分布が回転対称なモード（TE01、TE02、TE03）を利用するジャイロトロンが開発された。続いて、核融合のプラズマ加熱のニーズに応えるため、ウィスパリング・ギャラリー・モード¹、さらには、体積モードと呼ばれる大電力ジャイロトロンの開発に移行し、近年、170GHzで、長パルスあるいは連続波のMW出力が得られるところまで進展した。

ジャイロトロンの基本構造を図7.1に示す。MIGから放射された電子は軸方向の強い磁界にまきついてらせん状の軌道を描きながら空洞部を通過してコレクタに達する。電子の回転の角周波数 Ω は電荷 e と質量 m の比で定義される比電荷 η （ $= e/m$ ）と磁束密度 B の積（ $= \eta B$ ）で与えられる。たとえば、磁束密度が1Tのとき Ω はほぼ28 GHzになる。

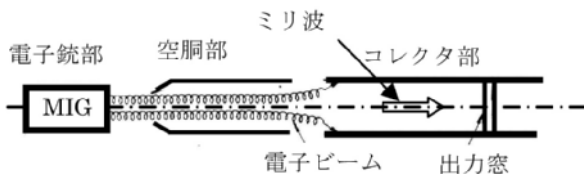


図7.1 ジャイロトロンの基本構造

MIGの構造と電子軌道を図7.2に示す。個々の電子は傾きを持ったリング状のカソードから飛び出し、破線で示した電界と二点鎖線で示した磁界の作用を受け

て、らせん状の軌道を描きながら空洞に向かう。全体としては、中空円筒状の電子ビームになっている。

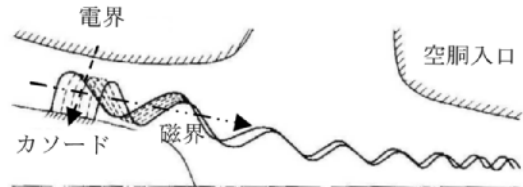


図7.2 マグネトロン入射電子銃と電子の軌道

空洞部で、電子ビームと空洞内のミリ波が相互作用する。ミリ波の電界は円周方向を向いている。なお、ジャイロトロンが扱う電磁波は通常、ミリ波であるため、ここでは、あえてミリ波という言葉を用いた。電波、電磁波、高周波など使い分ける方が、しっかりする場合もあるが、以下、便宜上、ミリ波に統一して記述することにする。

電子がミリ波の電界によって加速されると速度が増して、相対論効果により重くなり、回転の角速度 Ω が減少する。逆に減速されると軽くなって Ω が増大する。この結果、軸方向に進むにつれて、もともと均一に分布していた電子は図7.3に示すように次第に集群するようになる。

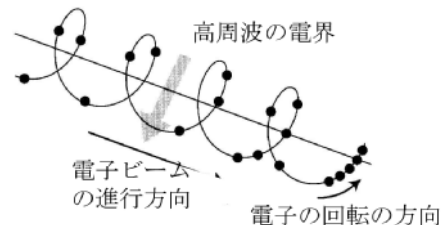


図7.3 電子の集群の様子

ミリ波の角周波数を ω とすると、 ω と Ω が等しいときは、加速される電子と減速される電子は、加速も減速もされない電子を中心に集群する。 ω が Ω よりやや大きいときは電子が減速位相に集群し、全体として電子はエネルギーを失うことになる。この減少分がミリ波のエネルギーになる。ミリ波のエネルギーが増すといっそう集群が進み、それに応じてエネルギーの変換がさらに進行する。このようなメカニズムでジャイロトロンが発振に至る。

7.2 回転対称モードジャイロトロンの開発

本節および7.3、7.4節で取り上げるジャイロトロンは、いずれも円周方向に強さが変化しない均一な電界を利用するものである。これらのジャイロトロンの電磁界分布は回転対称である。そのような電磁界のモードのうち、まずもっとも次数の低いTE_{0,1}モードが利用された。その後、出力増しの要求に応じ、次第に次数を高めて、TE_{0,2}あるいはTE_{0,3}モードが使用されるようになった²。

京都大学は1977（昭和52）年にジャイロトロンの開発を開始した。1979（昭和54）年に、日本電気に35GHzで600Wのジャイロトロンを試作させたが、組立式であったため、真空度が上がらず、不安定な発振しか得られなかった。翌年、東京芝浦が京大の指導を受け、TE_{0,1}モードの22GHzジャイロトロンE3952を開発した⁽⁵⁾。これは国内最初の封止切り管であった。出力は17kW、パルス幅は1msであった。このジャイロトロンは京大の実験に供され、後に出力は50kWまで上げられ、また高調波動作により、発振周波数も41GHzに上げられた。図7.4に22GHzジャイロトロンE3952を示す。

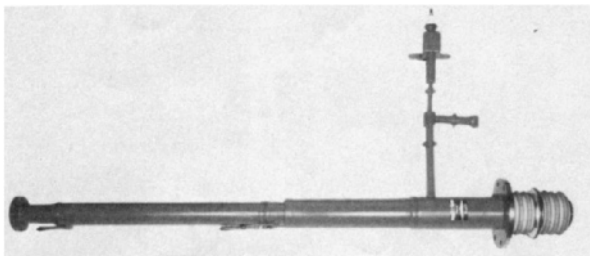


図7.4 22GHzジャイロトロンE3952⁽⁶⁾

1981（昭和56）年に日本電気が京大トカマク実験装置WT-II用に35GHz/55kW/5msのジャイロトロンLD-4427を開発した。続いて、東京芝浦はWT-III用に56GHz/200kWのE3956を開発し、さらに筑波大複合ミラー実験装置ガンマー10向けに、28GHz/200kW/100msのE3955と41GHz/200kWのE3962を開発した。東京芝浦は、福井大の要求を受け70GHzのジャイロトロンの開発も実施した。

1987（昭和62）年、日本原子力研究所（（現日本原子力研究開発機構原子力研究所、以下単に原研と記載）がジャイロトロンの開発に着手した。東京芝浦は、原研と共同でTE_{0,3}モードの120GHz/170kW/10msジャイロトロンを開発した。

三菱電機は、1988（昭和63）年に120GHz/150kW/

10ms（TE_{0,3}モード）、1992（平成4）年に48GHz/200kW/30ms（TE_{0,2}モード）のジャイロトロンを開発した。

7.3 産業応用

ミリ波の応用のひとつに誘電体加熱がある。物質に固有の共振による吸収がない場合、一般に周波数にほぼ比例して加熱効果が高まる傾向がある。そこでマイクロ波では加熱しにくい材料、たとえば純度の高いセラミックスを加熱する応用が研究された。最近では、粉末冶金の加熱焼成にもこのジャイロトロンが使用されている。

ミリ波加熱用に28GHzジャイロトロンを三菱電機が開発し、電磁石型（GT-C0301E）と永久磁石型（GT-C0301）の2種を商品化した。後者では、永久磁石の磁界が温度の影響を受けて変化するため、補正の目的で、小さい電磁石を使用している。モードはTE_{0,2}である。高調波動作のため、磁界は0.5Tである。出力は10kW、効率は30%である。図7.5にこれらのジャイロトロンを示す。2006（平成18）年3月までに13本を納入している。

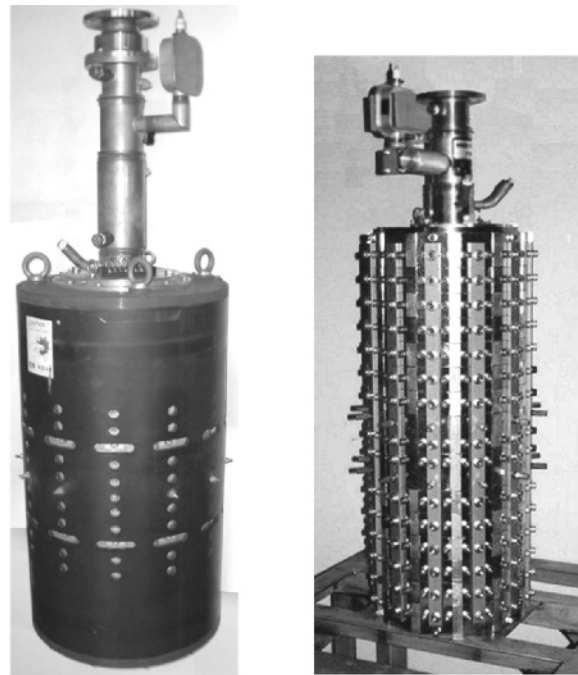


図7.5 28GHz ミリ波加熱用ジャイロトロン
左：電磁石型、右：永久磁石型（写真：三菱電機）

7.4 テラヘルツへの挑戦とその応用

福井大学は1970年代末頃にジャイロトロンの開発を始め、磁石の開発（20Tに至る強磁場超伝導磁石、ヘリウムフリー磁石等）と、テラヘルツに向けた一連のジャイロトロンの研究開発を並行して進めた。

すなわち、1987（昭和62）年には636GHz、1988（昭和63）年には847 GHzを得、2004（平成16）年には、ついに1THzで動作するジャイロトロンを完成した（いずれも2次高調波動作）。図7.6にテラヘルツジャイロトロンを示す。2002（平成14）年には5次高長波の動作を確認し、翌年にはCWで300GHz/1.8kW、また2006（平成18）年には395GHz/100Wのジャイロトロンの開発に成功した（図7.7）。目下、20T（テスラ）の超伝導磁石を用いて、1THzでCW 100 Wの光源開発を目指して研究を推進中である。



図7.6 福井大 テラヘルツ
ジャイロトロン
（写真：福井大）



図7.7 福井大FUCW II
395GHz/100W ジャイロ
トロン（写真：福井大）

これらのジャイロトロンの応用は、電子スピン共鳴計測、プラズマ散乱計測、セラミックの焼結、新医療技術の開発、NMR、タンパク質分子の構造解析など、多岐にわたっており、福井大学は応用開発も含めた総合的な研究を展開している。

7.5 核融合応用

核融合のためのプラズマ加熱に使用されるジャイロトロンは当初、図7.1に示すような構造で、回転対象のモード（TE0,1～TE0,3）を利用するものであったが、さらに大出力の要求に応えるためにいくつかの基本的な構造変化の必要に迫られた。

まず、空洞径を大きくして電磁界のモード次数を高めた。この方策により、より径の大きい電子ビームを使用できるようになり、出力も大きく増大した。

まず、①ウイスパリング・ギャラリー・モード（TE_{m,n}モード、円周方向の次数 m は大きく、径方向の次数 n は通常1か2）ジャイロトロンが開発され、続いて、② m も n もともに大きくした体積モードを採用するようになった。

コレクタは電子を捕集する役目と、発生したミリ波を伝送する2つの役目を持っていた。すなわち、図7.1に示すように、ミリ波と電子は空洞を通過した後、ほぼ同じ径のコレクタ部に入る。電子は、自らの電荷で反発して軌道を広げ、コレクタに捕集される。ミリ波はそのまま伝送し、やはり径がほぼ同じ大きさの出力窓を透過し、真空外に取り出される。この構成では、コレクタが伝送路を兼ねているため、大電力化することができなかった³。

そこで、ミリ波を取り出した後、コレクタを自由に大きくして大電力のビームを捕集する方式へ移行した。

このような改良が行われたほか、CPD、出力窓の耐電力性能向上などの方策が次々に実施された。

以下、原研と東京芝浦（現東芝、後に分社し東芝電子管デバイス株になった）が協力して進めた一連の開発を紹介する。

1989（昭和64）年に、まず、ウイスパリング・ギャラリー・モードTE_{12,2}を用いたジャイロトロンを開発した⁽⁷⁾。続いて、翌年、ミリ波を取り出した後、電子ビームを捕集する大型コレクタを用いた大電力ジャイロトロンを開発した⁽⁸⁾。構造を図7.8に示す。出力548kW、効率30.4%が得られ、パルス幅は前者の1msから100msに広がった。また、窓の熱的な負担を軽減する目的で、出力は、管内に設けたモードコンバータによりガウス分布に変換された。

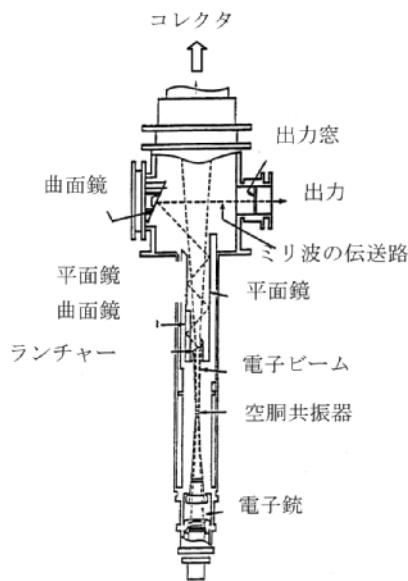


図7.8 ウィスパリング・ギャラリー・モード・ジャイロトロン E3960⁽⁸⁾

1994（平成6）年には110GHzでCPDジャイロトロンE3972を開発した（図7.9）。出力610kWにおいて効率は30%から50%に上がった。パルス幅は50msであったが、やや出力を下げた実施した長パルスの試験で、500kW/3.5s、400kW/4s、350kW/5s等の性能が得られた。ジャイロトロンモードはTE22,2であった。このジャイロトロンは、上記と同様、モード変換器により、ガウシアンビームに変換し管外に出力する方式であった⁽⁹⁾。当時、世界的に、ジャイロトロンCPDは困難との見方が強かったがそれを打ち破った快挙であった。



図7.9 CPD 110GHzジャイロトロンE3972
（写真：原研那珂研）

ITER（International Thermonuclear Experimental Reactor：国際熱核融合実験炉）の目標である170GHzに対し、1995（平成7）年に体積モードを利用したTE22,6モードジャイロトロンを開発し、450kW/50msの性能を得た。続いて、モードをTE31,8に引き上げた⁽¹⁰⁾。モード次数を高めるには、CADによる設計と製造の大幅な精度向上が求められた。

ジャイロトロン開発と並行して出力窓の研究が進められた。当時、高純度アルミナの円板の周辺を水冷する窓が一般的なものであったが、170GHz管の開発では、2枚のサファイア板を使用し、その間にフッロリナートを流して面冷却することを試みた。その他の材料についても検討され、一連の調査、研究の中でダイヤモンド窓が浮上した。ダイヤモンドは熱伝導率が高く、機械的にも強固で、さらにミリ波の損失が少なく、窓の材料として理想的と考えられた。

1998（平成10）年に世界に先駆けてダイヤモンド窓を採用したTE31,8モードのジャイロトロンを開発した。窓の径は96mm厚さは2.23mmで、周辺を水冷する方式が選ばれた。この窓の採用によって、520kW/6.2s、450kW/8s等の性能が得られた^{(11)、(12)}。

2001（平成13）年にはCPDを採用した170GHzジャイロトロンが開発された。1.1MWの動作が確認され、効率は32%から57%に上がった⁽¹³⁾。このジャイロトロン開発では、電子銃と空洞間で発生する寄生振動を吸収体に吸収させる試みが行われ、好結果が得られた。

動作中に真空度が急に劣化する問題についても原因追求が進められた。ガス放出の原因は、出力を送出する最終ミラーの方向調整に使用していたSUS部品の発熱によることが突き止められた。そこで、表面処理により表面抵抗を低下させ、この部分の昇温を押さえる対策が行われた⁽¹⁴⁾。

ジャイロトロン動作を安定化する対策がさらに進められた。(1) ジャイロトロン出力は空洞を出た後、放射器、ミラー系と出力窓を経て管外に取り出されるが、放射器設計のわずかな不整で発生する不用波に着目して、放射器の改良が進められた。これにより不要波を1/5に減らすことに成功し、管内部品の過熱、ガス放出の問題を大きく改善できた。

(2) 電子銃のいっそうの改良によって、ごく一部の不要電子の衝突による二次電子や空洞部からの戻り電子を徹底して減らす努力が進められた。

また、(3) ビームクーリング⁴による電流の減少をヒータ電流の制御で補正し安定化する方策が進められた。

図7.10に示すジャイロトロンを改良したE3993Bで、

上記一連の対策 (1) ~ (3) を実施し、ついにITERの目標を超える600kW/1,000 sの動作確認に成功した⁵。

この成果は、2006 (平成18) 年7月に、日本原子力研究開発機構から新聞発表された。

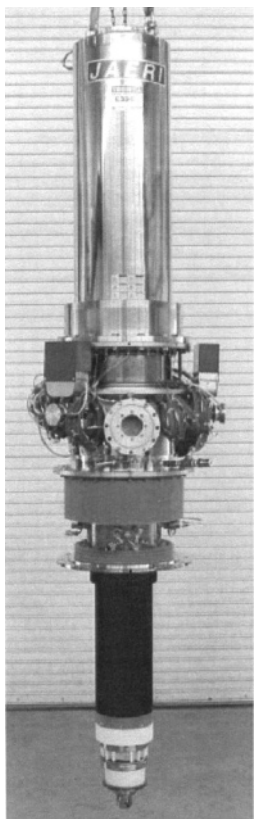


図7.10 170GHzジャイロトロン E3993 ⁽¹⁶⁾

図7.11に新聞発表の際に示された各国の開発進展状況を示す。() 内は西暦年号である。このジャイロトロンは、その後の試験で、連続運転記録をさらに伸ばし、1時間を越えて安定に動作したことを原研が報告している。

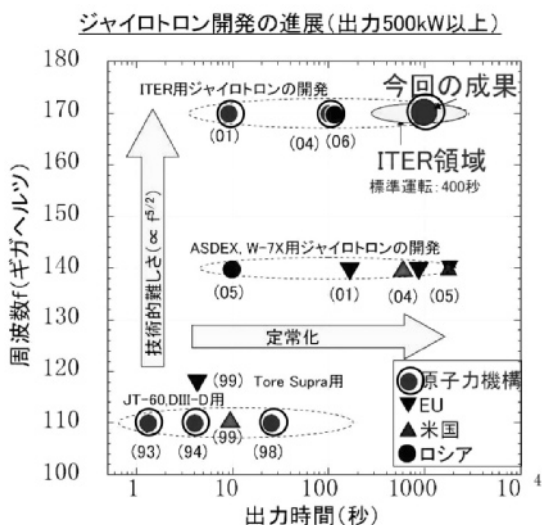


図7.11 ジャイロトロン開発の進展状況 (図: 日本原子力研究開発機構)

最後に、核融合実験用ジャイロトロンの開発の実例を紹介する。

TE31,8モードを使った168GHz/500kWジャイロトロンE3980が核融合科学研究所の大型ヘリカル装置LHD向けに開発された。1999 (平成11) 年までに合計6本が納入された。パルス幅は1s、出力窓の材料はSiNである。図7.12は実装状態を示す写真である⁽¹⁵⁾。上部のコイルは、これがないと電子ビームがコレクタ壁の一部に集中して衝突する問題に対処するため採用されたものである。このコイルにより、コレクタ内で磁界を時間的に変化させてビームを走査し、コレクタ壁の熱負荷を平均化し緩和させることができる。

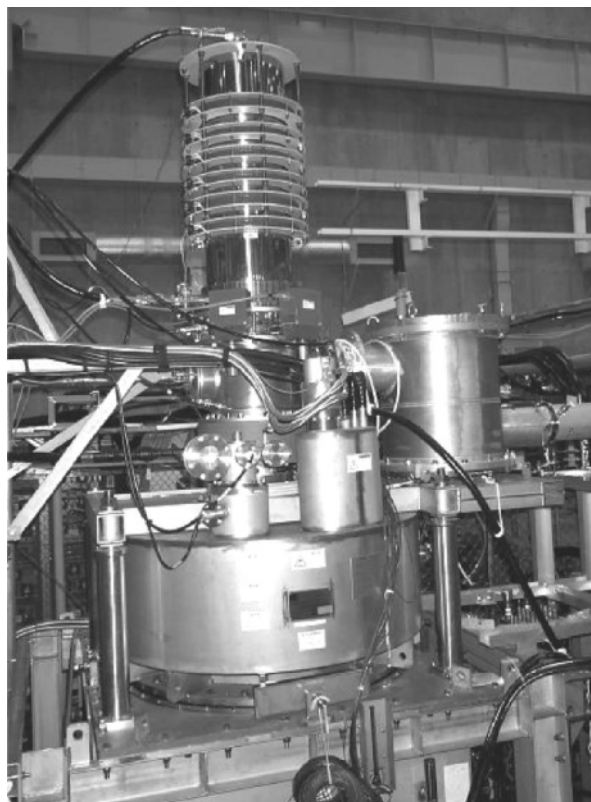


図7.12 168GHzジャイロトロンE3980の実装写真 (写真: 核融合科学研究所)

2001 (平成13) 年には、1MW/3sのジャイロトロンE3990が原研那珂研究所の核融合トカマクJT-60Uに納められた。モードはTE22,6である⁽¹⁶⁾。図7.13はジャイロトロン室の写真である。4系統のジャイロトロンが並んでいるのが見られる。このジャイロトロンでもコレクタ内ビーム走査用のコイルが使用されている。

2005 (平成17) 年には、筑波大プラズマセンターのタンデムミラー装置Γ-10に500kW/100msのTE4,2モードジャイロトロンE3955SUが納められ、3系統が使用された。

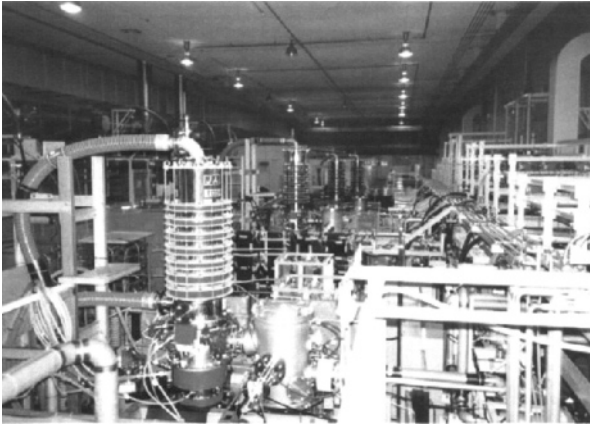


図7.13 JT60UのECR実験用ジャイロトロン⁽¹⁵⁾

参考文献

- (1) R. O. Twiss : “Radiation Transfer and the Possibility of Negative Absorption in Radio Astronomy”, Australian J. Phys. ,vol. 11, p564-579, (1958)
- (2) J. L. Hirshfield et al : “Electron Cyclotron Maser”, Phys. Rev. Lett., vol. 12, No. 19, p 533-536, (1964)
- (3) N. I. Zaytsev et al, “IMillimeter and Submillimeter waveband gyrotrons”, Radiotekhnika I Electronica, vol. 19, No. 5, p 1056-1060, (1974)
- (4) V. A. Flyagin et al : “The Gyrotron.” IEEE Trans. , Microwave Theory Tech., MTT-25, p 514-521, (1977)
- (5) 岡本ほか : 「22GHz帯ジャイロトロンの試作」、電子通信学会技術研究報告、ED80、113 (1980)
- (6) 大野、岡本、山内、山口 : 「高周波加熱装置」、東芝レビュー、38巻9号 (1983)
- (7) T. Sugawara et al : “500kW Whispering-Gallery-Mode Gyrotron”, 14 th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Conf. Digest, pp 336-337 (1989)
- (8) Y. Mitsunaka et al : “A High-power 120GHz Whispering-Gallery-Mode Gyrotron with a Built-in Quasi-Optical Mode Converter”, 15 th International Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Conf. Digest, p318-320 (1990)
- (9) K. Sakai et al : “Development of 110GHz CPD Gyrotron”, 19 th International Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Conf. Digest, 63-64 (1994)
- (10) K. Sakamoto et al : “Development of 170GHz Gyrotron for ITER”, 20 th International Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Conf. Digest, p269-270 (1995)
- (11) K. Sakamoto et al : “Development of High Power Gyrotron with Diamond Window”, 23 th International Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Conf. Digest, p363-364 (1998)
- (12) K. Sakamoto et al : “High Power 170GHz Gyrotron with Synthetic Diamond Window”, RSI, vol. 70, No.1,p208-212 (1999)
- (13) H. Shoyama et al : “High-Efficiency Oscillation of 170GHz High-Power Gyrotron at TE_{31,8} Mode Using Depressed Collector”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 40, p L906-L908, Part 2, No. 8B, 15 August (2001)
- (14) A. Kasugai et al : “Study of Millimeter Wave High-Power Gyrotron for Long Pulse Operation”, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Sect. A,528, p110-114 (2004)
- (15) 下妻 : 「百ギガヘルツ帯ミリ波の利用-電子サイクロトロン共鳴加熱装置技術-」、プラズマ核融合学会誌、Vol. 82 No.8、p. 506-516 (2006)
- (16) K. Sakamoto et al : “Development of 170 and 110GHz Gyrotron for Fusion Devices”, Nucl. Fusion 43, p 729-737 (2003)

1 Whispering Gallery Mode : マグネトロンの原理のところで、円周に沿って1-4周期分、電界が変化し、径方向には1回だけ、電界のピークが出るモードを説明した。WGMでは、径方向におよそ12-25周期分、電界が変化し、径方向には1または2回程度(正負、それぞれ、1回とカウント)、電界のピークが発生する。周期の数やピークの数に次数と読んでいる。WGMは金属円筒面の近傍にのみ電界が存在する。そのため、表面モードとも呼ばれる。電界分布の形状から、このような名が付けられたものである(付録参照)。

2 電磁界のモードは、たとえばTE_{m,n}のように表記される。ここでmは円周方向の周期の数、nは径方向の山および谷の数を表す。0は強さが均一で変化しないときに使用する。m=0の電界は回転対称である。

- 3 コレクタ径を部分的に大きくすると、径が変化する部分で反射が起きて多重反射する結果、コレクタが一種の共振器になってしまう。このため、空洞、コレクタ、出力窓がすべてほぼ同じ径になっている。
- 4 ビームクーリング：電子を放出することにより、カソード温度が低下する現象。電子放射により持ち去られる運動エネルギーに対応する温度の低下がある。

- 5 ITERではECH (Electron Cyclotron Resonance Heating：電子サイクロトロン共鳴加熱) とNBI (Neutral Beam Injection：中性ビーム入射) の、2種の装置を用い、核融合を目指したプラズマの加熱が行われることになっている。ECHは他にプラズマの維持、制御にも利用される。600kW/1,000sの達成によって、ECHに対するITER目標が達成された。

8 | まとめと系統化

8.1 マイクロ波管の比較

マグネトロン、クライストロン、進行波管、ジャイロトロンはそれぞれ固有の特徴を持っていて、たとえば、マグネトロンは高効率、クライストロンは高利得で大電力、進行波管は広帯域、ジャイロトロンはミリ波帯で高出力である。

マグネトロン、ジャイロトロンは発振管、クライストロンと進行波管は増幅管である。

電子の運動に関しては、マグネトロンは直流磁界に直角な平面内の回転および周回運動であり、ジャイロトロンはらせん状の軌道を描く。この2つの電子管では、直流磁界が電子と高周波の相互作用に深い関わりを持っている。進行波管とクライストロンでは、直流磁界は単に電子ビームを集束する役目のみを担っていて、相互作用には関わっていない。

クライストロンでは、電子は入力空洞でマイクロ波と集中結合して速度変調を受け、これが次第に密度変調に成長するが、マグネトロン、進行波管、ジャイロトロンでは、最初から分布的に結合して密度変調が徐々に進行する。

ジャイロトロンは、相対論効果により、らせん軌道上で電子が回転半径と回転速度を変えて集群するユニークな電子管である。マグネトロン、クライストロン、進行波管は、直接的には相対論効果を利用しない。大電力クライストロンでは電子速度が大きくそのため相対論効果を受けるものもあるが、動作に対しては相対論の直接の関与を受けない。

表8.1にこれらのマイクロ波管の比較を取りまとめる。それぞれの動作メカニズムに関しては4-7章を参照されたい。

8.2 その他のマイクロ波管

7章までに取り上げなかったいくつかのマイクロ波電子管を紹介する。

BK管はドイツのバルクハウゼン (H. Barkhausen) とクルツ (U. K. Kurz) の発明による電子管で、1920年に発表されている。陰極と陽極の間に正電位の格子を設け、陰極から飛び出した電子は格子を透過し、直流電界の作用を受けて減速されながら陰極と同電位の陽極に向かう。共振回路が陽極と格子の間に接続されていて (図8.1参照)、高周波電界によって加速された電子は陽極に衝突するが、減速された電子は直流電界の作用を受けて反射し、陰極に向かったのち、再び格子、さらに陽極に向かって戻ってくる。この往復のプロセスで、適切に同期を取っておくと、電子は集群し、高周波にエネルギーを与える。当時としては、最も高い600MHzの発振を得ている⁽¹⁾。

BK管は東北大、東京工大等で研究された。たとえば、東工大の森田が試作したBK管は波長が68cmである。1935年に、大岡山と筑波山との間の通信実験に供された⁽²⁾。

1935年に岡部により大阪管が発明された⁽³⁾。この電子管はBK管の、格子電流が大きいという欠点を改良したもので、陰極と反射電極 (BK管の陽極) の間に正電位の2つの中空の陽極を置き、軸方向に磁界をかけて陽極に電子が流れ込まないようにしてある。2つの陽極間に発生する高周波電界で減速された電子は、陰極と反射電極の間で振動しながら高周波にエネルギーを与える。このプロセスで正帰還がかかり効率よく発振する。BK管の構造を図8.1、大阪管の構造を図8.2に示す。

表8.1 主なマイクロ波管の比較

種別	発表年	主な用途	電子に作用する高周波電界	直流電磁界の関わり	E変換の場
マグネトロン	1921	レーダ、加熱	中心の周りを周回する電界	電磁界がE変換に関与	A-C間
クライストロン	1939	レーダ、加速	空洞の隙間に発生する電界	磁界が集束に関与	共振空洞
進行波管	1944	通信、レーダ	らせんを伝播する波の電界	磁界が集束に関与	らせん
ジャイロトロン	1974	加熱、ECH	空洞固有のモードの電界	磁界がE変換に関与	共振空洞

注) E変換=電子の運動エネルギーから高周波へのエネルギーの変換
A-C間=アノードとカソード間の円環状の空間
ECH=核融合のためのプラズマの電子サイクロトロン共鳴加熱

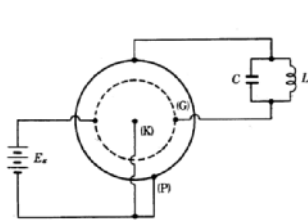


図8.1 BK管⁽⁴⁾

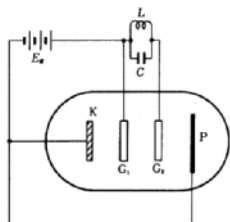


図8.2 大阪管⁽⁴⁾

誘導出力管 (IOT: Induction Output Tube) は日本で研究されなかったが、極管とクライストロンの中間的な電子管で、クライストロードとも呼ばれたことがあり、マイクロ波管への橋渡しとして重要な電子管と考えられる。この電子管は1939年に発表され、当時、小出力ながら500MHzの増幅に成功している。

IOTは1990年代に入って、英、米で、UHF-TV放送あるいはLバンド加速器用の高効率電子管として見直され、新しい開発も行われて、実用に供された⁽⁵⁾。

IOTでは、陰極前面に格子電極を設け、陰極-格子間に印加した弱い高周波で最初から密度変調された電子ビームを空洞に向けて放射する。空洞部では、高周波と相互作用し、電子ビームが減速されて、その運動エネルギーが高周波エネルギーに変換される。結合を終えたスペントビームはコレクタで捕集される。

これらの電子管がマイクロ波帯向けチャレンジする段階で生まれたが、マイクロ波管がミリ波の発振や増幅にむけて飛躍する段階でも、ジャイロトロン以外に、さまざまな電子管が発表されている。たとえば、日本では殆ど研究されなかったユービトロン、ジャイロコンや、大阪大学のラダートロン、東北大学のペニオトロン、ジャイロペニオトロンがある。ユービトロンは自由電子レーザー (FEL: Free Electron Laser) として、引き続き発展している。現在、日、米、EUで並行して建設中の超大型X線FEL施設計画がある⁽⁶⁾。

ラダートロンは電子銃とコレクタの間に多くの間隙を形成するはしご状の開口を持つ共振器を配したもので、1959年から1960年代半ばに、沖電気、三菱電機で試作された。

ペニオトロンは東北大で発明された⁽⁷⁾。この電子管は、電子の集群を用いず、極めて高い効率を得ることができる特長を持つ。この電子管では、らせん状の電子ビームが、図8.3に示すように、電界が極小になる位置に入射される。電子は1回転する間に加速と減速を受け、加速されるとより電界が強い位置に軌道を移し、次の減速でより強く減速される。減速された電子はより電界の弱い位置に軌道を移し次の加速は弱くなる。このようにして加速と減速を繰り返しながら次第

に減速が進んで、電子の運動エネルギーが減少し、その分、マイクロ波のエネルギーが増大する。電子の殆どの回転エネルギーはマイクロ波のエネルギーに変換される。

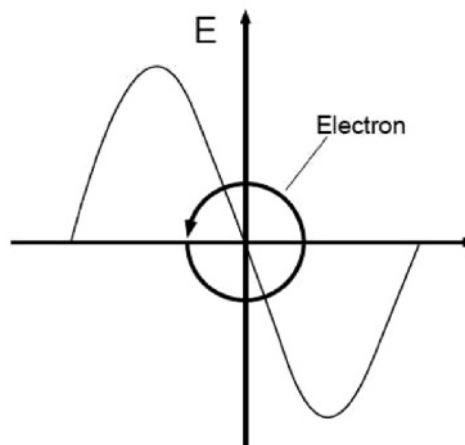


図 8.3 ペニオトロンの動作原理図⁽⁸⁾

ペニオトロン動作は電界が極小値を持つような分布であれば、すべて適用が可能で、たとえば、ペニオトロンの高効率性能とジャイロトロンの高出力性能を合わせたジャイロペニオトロンが開発されている^{(9)、(10)}。

8.3 極管、マイクロ波管の系統化

極管は、二極管、三極管に始まり、多様化、高周波化、大電力化しながら、次第に発展した。しかし、極管は、電子の移動時間、電極間の静電容量、リード線のインダクタンス等の問題があって高周波化が難しく、板極管等の出現でようやくマイクロ波領域に入ったが、構造寸法が小さく、高周波、大電力の要求に十分、応えることができなかった。

極管では、格子と陰極との間の電圧により、陰極から放射される電子の量が制御され、最初から密度変調された電流が陽極へ流れ、この電流が外部回路に流れて、外部回路で高周波出力を得るものである。適切な帰還があると発振し、帰還がないときは増幅の役目を果たす。

マイクロ波管では、陰極から放射される電流そのものは均一で、たとえば、マグネトロンの場合は、マイクロ波を吸収して加速される不要な電子を陰極に戻しこれによって陰極の温度が上がって、結果として、電流が増加するようなこともあるが、とにかく、マイクロ波管では、基本的に、陰極から均一な密度の電子が放射される。この均一な電流がマイクロ波と相互作用して密度変調を受け、この変調電流がマイクロ波と結

合して、発振、増幅を起こす。

ハルが発明した当時のマグネトロンは、構成上、二極管の管軸方向に磁界を加えたものである。この磁界と陽極、陰極間の電界を適切に決めると、わずかな相互関係の差で、陽極に流れる電流が遮断されたり、接続されたりする。この条件を満足する近傍でマグネトロンの発振が得られた。したがって、構造から見て、マグネトロンが二極管から発展したと言えなくもないが、動作原理の上では、かなり異なったものである。

クライストロンや進行波管等の他のマイクロ波管についても、極管が直接、系統的につながってはいないと言ってよい。

マイクロ波管同士の間でも、表8.1に示したように、動作メカニズムが互いにかなり異なっていて、それぞれ、別の系統をたどって発展したと言わざるを得ない。

一方、要素技術の中には、それぞれに共通して利用されているものがある。

たとえば、密度変調された電子ビームと共振器に発生する電界とを結合させ、電子ビームの運動エネルギーをマイクロ波のエネルギーに変換する技術は、BK管、大阪管、IOT、クライストロン等に共通している。これらの電子管を時間軸に沿って並べてみた結果を図

8.4に示す。それぞれの電子管が系統的に発展したかどうかは判然としないが、少なくとも要素技術を通して相互に繋がっていることは確かである。

大阪管はBK管のグリッド部分を高周波的に結合した2つの電極に置き換え、さらにビームの進行方向に磁界をかけたものである。したがって、BK管の改良管が大阪管であると言える。図8.4では、実線の矢印で両者を繋がないだ。BK管の研究を行った研究者たちが大阪管を発明しており、一連の研究活動として繋がっているようであるが、両者には15年の時間的な隔りがある点から、矢印でつなぐことに多少の疑問が残るかもしれない。

次に要素技術と電子管の関連を述べる。

電磁石から永久磁石、さらにPPMへと進んだ磁界関連の技術、カソード、CPD、真空技術、出力窓等に関する要素技術は、個々のマイクロ波管に対し、あるものは他のマイクロ波管に共通して適用されている。この状況を、マグネトロン、クライストロン、進行波管、ジャイロトロンについて1枚の図にまとめたものが図8.5である。ここでは、図が煩雑になるのを避けるため、要素技術のつながりは重要なインパクトを与えたもののみを示すにとどめた。

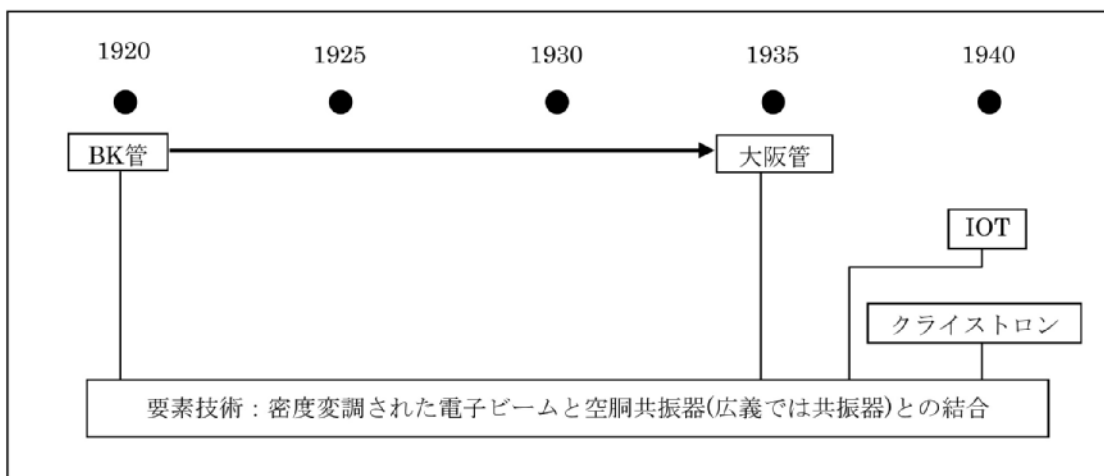


図8.4 要素技術による技術的つながり

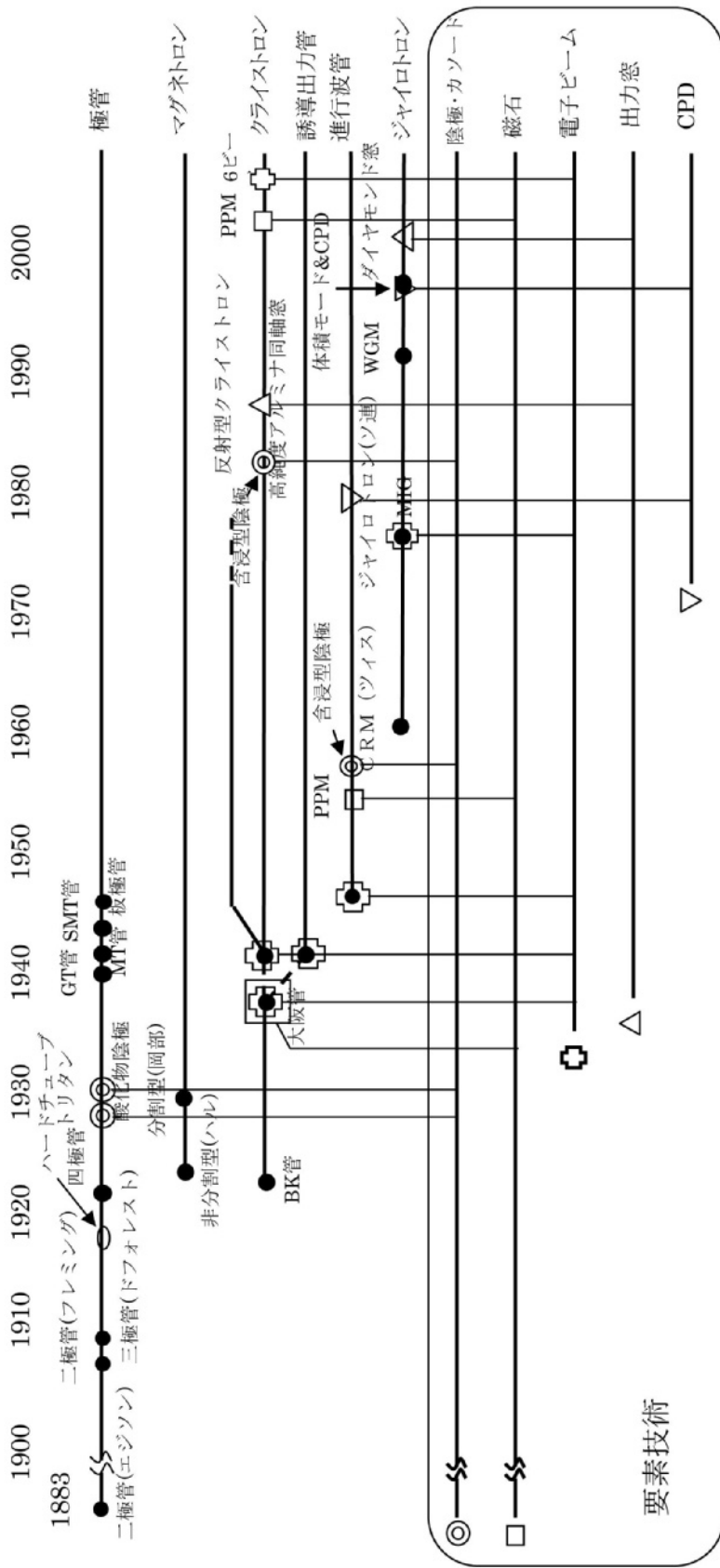


図8.5 電波に関わる電子管の系統化

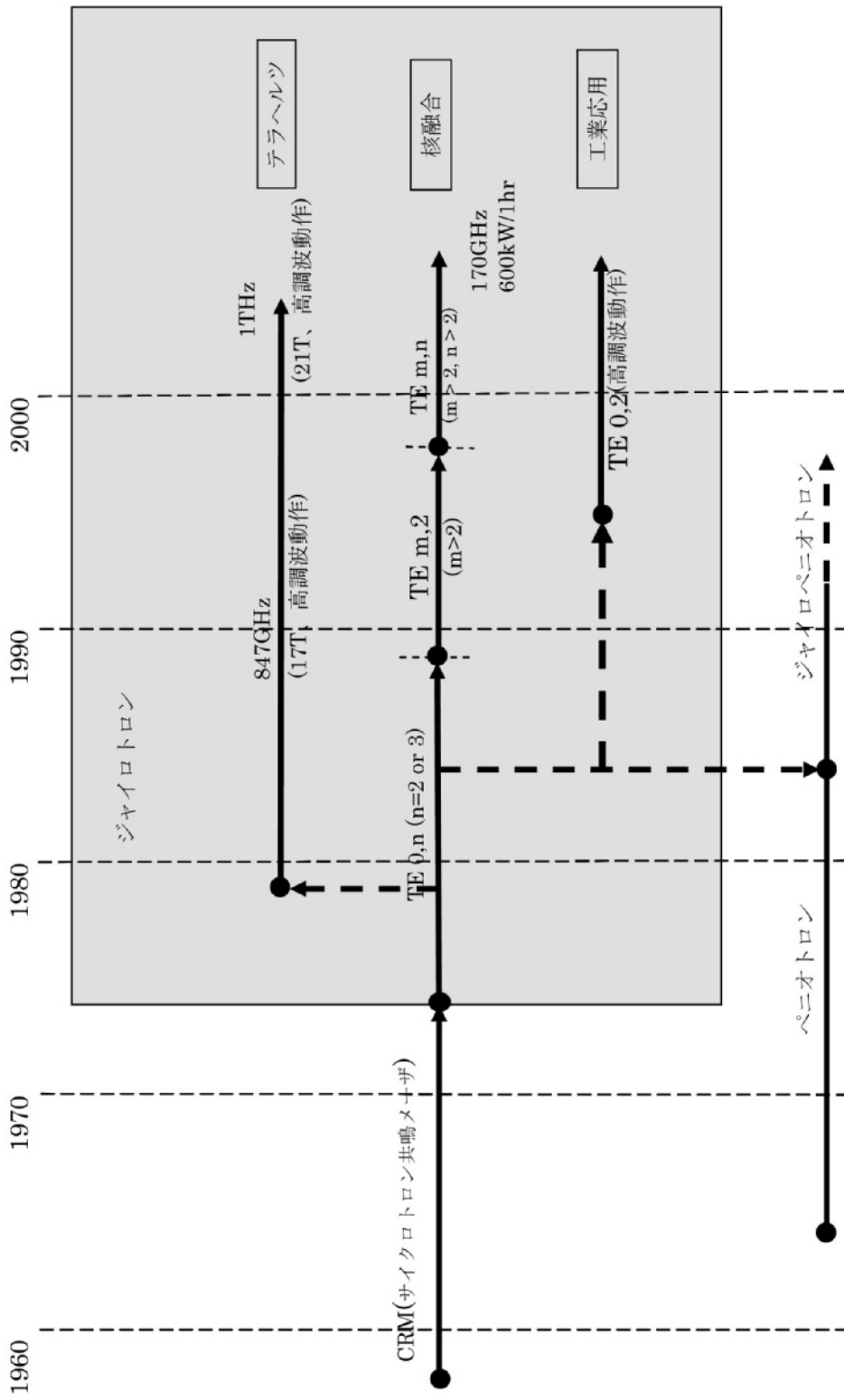


図8.6 ジャイロトロン の 系統化

1920年代半ば頃までは、陰極としてもっぱらフィラメントが使用されていた。材料は、炭素やタングステンであった。フィラメントの動作温度を下げるためにトリウムタングステン線が開発され、さらに酸化物陰極が発明された。つまり、線から面へ発展した。これらの陰極はまず極管に使用された。電子ビームを使用する電子管に関しては、初期には、酸化物陰極が使用され、小さいカソードでより大きい電流を得るニーズに応え、電流密度をより高くすることが可能な含浸型陰極が採用された。含浸型陰極の動作温度を下げるために陰極表面にオスミウムやイリジウムの薄膜をコートしたカソードが大電力クライストロンやジャイロトロンに使用されるようになった。

磁石はマグネトロン、大阪管、クライストロン、進行波管、ジャイロトロン等で不可欠な部品である。当初は電磁石が使用されたが、マグネトロンや進行波管で永久磁石化が進んだ。ジャイロトロンのように極めて強い磁界を必要とする電子管ではもっぱら超伝導電磁石が使用されたが、ジャイロトロンでも工業用のものは永久磁石化された。永久磁石も当初は馬蹄形磁石や棒磁石のような比較的大型の磁石が使用されたが、やがてPPM磁石に進化した。PPM磁石は進行波管に必要不可欠なものとなり、進行波管の小型、軽量化に大いに貢献したが、近年ではクライストロンにも適用されるようになってきている。

電子ビーム技術は大電力化の要求に応えるため、高電圧、大電流、高密度化の方向に進み、進行波管やクライストロンで、技術が大きく進展した。ジャイロトロンではMIGが使用され、クライストロンでは、低電圧化と高効率化の要求から、1本の電子管に6本の電子ビームを使用するものが開発された。

出力窓の技術では、強いマイクロ波を透過させると、発熱による応力破壊の問題が深刻となり、特に大電力クライストロンで、いくつかの技術向上が図られた。この段階では、窓の材料として、高純度アルミナを使用することが選ばれた。ジャイロトロンでは、さらに窓の性能向上が求められ、究極とも見られるダイヤモンドの使用に至っている。

CPD技術は、かつて、クライストロンでも検討されたが、やや変換効率の低い進行波管では不可欠な技術となり、最近ではジャイロトロンでもこの技術が利用される方向となっている。

次に極管やマイクロ波管自身の系統化について述べる。

極管では、多極管、複合管へ進展するとともに、GT管、MT管、SMT管等の小型化に向けて進展した。大電力化の要求に対しては、自然冷却、強制空冷、水冷、蒸発冷却、あるいは水蒸気と熱水を並流させるバボトロン方式などの技術展開がはかられた。高周波化のニーズに応えるため板極管が開発された。

マグネトロンでは、まず、多分割化に向かい、多種の陽極が考案されたが、やがて、ベインアンドストラップ型に集約する方向に進んだ。磁石に関しても、すでに述べたように、永久磁石化、小形軽量化に向けて進展したほか、電子レンジ用のマグネトロンでは、量産に向け、陽極のホッピング技術による生産技術が実用化された。

クライストロンは、シミュレーション技術を駆使した高効率化の検討が行われ、空胴配置が大きく変化した。また、大電力の要求に応え、特に超大型化した電子管が製作された。関連して、超大型管製作の技術も大いに進展した。これは核融合用のジャイロトロンの製造にも貢献した。

進行波管に関しては、遅波回路の耐電力性を上げる努力が進められ、その中で、特に空胴結合型遅波回路が実用化され、特に大電力の進行波管で標準的に使用されるようになった。この回路に対しPPM技術も適用された。ミリ波に適する回路として、交差指型、二重はしご型回路などが開発された。らせんについても、リングアンドバーのような変形が試みられ、らせん自身も、より熱を逃がすことが可能な支持方法が開発されたほか、ブレードヘリックスと呼ばれる、外囲器、支持棒、らせんを鑲付けして固定する方技術が開発された。

ジャイロトロンの系統的な発展状況を図8.6に示す。この電子管は、特にミリ波で大電力を発生できる特徴から、核融合の応用を中心に推進されたが、開発の成果を工業応用に用いることが意図され、高調波動作によって永久磁石化されたものが製品化された。テラヘルツへの応用では、特に強力な超伝導磁石の開発試作が並行して進められ、ついに、電子管の悲願のひとつとなっていたテラヘルツ波発生を実現した。

参考文献

- (1) H. Barkhausen et al : “Die kurzesten, mit Vakuumroehren herstellbaren Wellen”, Phys. Zs., 21, p1-6 (1920)
- (2) 道家 : 「東京工業大学でのマイクロ波、ミリ波用電子管の研究」、百年記念館収蔵品紹介、その14、No846 (1989)
- (3) 岡部、菱田、大脇 : 「極超短波発生の一新法」、電学誌、56、p. 850 (1936)
- (4) 電子管 第5編、電気電子工学第百科事典、p386、電気書院 (1984)
- (5) R.Heppinstall et al : “The Inductive Output Tube, The Latest Generation of Amplifier for digital terrestrial Television Transmission”, EBU Technical Review, P43-52 (1997)
- (6) 第1回X線自由電子レーザーシンポジウム～XFELがあなたにもたらすものとは?～ 予稿集、理化学研究所・高輝度光科学研究センター、X線自由電子レーザー計画合同推進本部 (2006)
- (7) Kazuhiko Yamanouchi, Shoichi Ono, Yukio Shibata : “CYCLOTRON FAST WAVE TUBE. THE DOUBLE RIDGES TRAVELLING WAVE PENIOTRON”, MICROWAVE TUBES, Proceedings of the 5th International Congress, PARIS, pp.96-102 (1964)
- (8) 佐藤、石原、寒河江、嶋脇、横尾 : 「ペニオトロンを用いたミリ波帯の高効率発生」、電通学会信学技報 MW98-90 (1998)
- (9) Shoichi Ono, Kunio Tsutaki and Takao Kageyama : “Proposal of a high efficiency tube for high power millimetre or submillimetre wave generation : The gyro-peniotron”, International Journal of Electronics, Vol.56, No.4, pp.507-519 (1984)
- (10) 佐藤他 : 「70GHzジャイロペニオトロンの動作特性」、電学技報EDD86-61、信学技法ED86-122 (1986)

9 | むすび

特に電波に関わる電子管を取り上げ、その発展の経緯を調査した。これらの電子管のうち、あるものは共通の要素技術を持ち、その技術の発展で自らも発展し、技術を共有する他の電子管の発展を促し、また要素技術をも発展させるといった相補・協調関係にあることを説明した。それぞれの電子管の動作原理は相当に異なっていて、したがって系統的には並行して発展したと考えるのが妥当と思われる点についても言及した。

個々の電子管の発展の系統は、分化しながら発展しているが、発展系統は比較的単純で、発明が次の発明に系統的に繋がりにさらに次の発明を呼び、継続して次々に発展していくような複雑なものではない。したがって、系統化の図は、一例として、ジャイロトロンのみにとどめた。

これらの電子管の発展経緯の中で、日本の貢献には多大なものがあることを強調したい。たとえば、分割型マグネトロンの発明、マグネトロンの均圧環、PPM技術が特に大きい発明例である。

今日のマグネトロンの高効率特性は陽極分割の発明がなければありえないものである。これにより、マグネトロンの出力と効率は格段に向上した。

均圧環の発明は戦時中に行われたこともあって、重要な機密事項と判断され、特許の出願は戦後になってしまった。特許がどうなったのか、残念ながらフォローできなかったが、均圧環の技術は、ペインアンドストラップという米国メーカーの発明と、発振の安定性を確保する上で基本部がまったく同一のものであると見られる。これを発明した日本が特許料を払う流れになってしまった点は残念としか言いようがない。

PPM技術は、磁石を1/100ないし1/1,000に軽量、小型化することを可能とし、小型進行波管の実用化を大いに促進した。地上はもちろん衛星搭載の応用に広がり、まさに世界的かつ不可欠な技術として高く評価される。その貢献には計り知れないものがある。

このほか、大電力クライストロン、ジャイロトロンの大電力性能はすでに世界のトップレベルであり、今後、これらの技術と製品が加速器や核融合の分野で大いに貢献すると期待される。

電子レンジ用マグネトロンの量産も日本の特記すべき技術成果の一例である。このマグネトロンの貢献は改めて説明するまでもないが、今後とも電子レンジの利用が増加することは確かである。問題は値崩れが大きいことである。メーカーは日本、韓国、中国等である

が、日本は、いまや国内生産では事業を継続できないような状況に追い込まれている。

電子管の開発と製造は、国内はもちろん世界的にも相当に寡占化されている。この動きはさらに進むものと見られる。寡占化は国際協力、国際協調への道にも繋がっていくと考える。極管、マグネトロンの生産は、すでに世界のどこでも事業として成り立つというのではなく、地理的に限定されたものになっている

クライストロン、ジャイロトロンのニーズは大型プロジェクトに関係するものが殆どである。計画が大きくなるほど、計画自体の数は少なく、したがって電子管のニーズはかなり特異なものとなってくる。たとえば、大量のクライストロンを必要とする大型リニアコライダに至っては、世界に1台あればよく、建設段階では限られた時間内に所要の数を準備する必要がある、運用段階に入ると、寿命に関連して、必要数が激減するという性質を持っている。計画を確実に進める必要があるので、電子管の開発も製造もスケジュールに着実に従うものでなければならない。将来を見据えた賢明な対応と国際協力が鍵といわざるを得ない。

系統化調査、所在調査を進めるにあたり、大学、博物館、ユーザ、メーカーの関係各位の絶大な支援を戴いた。個人的な私信も利用させて戴いた。ご支援いただいた方々に心よりお礼申し上げます。ご支援、資料を提供いただいた関係機関は以下のとおりである（アイウエオ順）。

大学：上越教育大学、電気通信大学（歴史資料館）、東京工業大学（百年記念館）、東北大学、

博物館：NHK放送博物館、通信総合博物館

ユーザ：NHK放送技術研究所、NTT情報流通基盤総合研究所、核融合研究所、KDDI小山テクニカルセンター、原子力研究機構那珂核融合研究所、高エネルギー加速器研究機構、高輝度光科学研究センター

メーカー：NECマイクロ波管、新日本無線、東芝、東芝科学館、東芝電子管デバイス、東芝ホクト電子、日本無線、浜松ホトニクス、日立協和エンジニアリング、三菱電機

付 録

1. 共振器と分割型マグネトロン

マイクロ波の性質と、伝送線路や共振器について説明し、合わせて、マグネトロンの補足説明を行う。なお、以下のマグネトロンの構造や動作についてはあくまで説明用にまとめたものであって、実際のものと同じというわけではない。

マイクロ波は空間を直進し、金属の表面で反射する。ちょうど光が空間を直進し、鏡で反射するのと似ている。この性質を利用してマイクロ波を送ったり、閉じ込めたりする。マイクロ波を送るためには導波管と呼ばれる線路¹、閉じ込めるためには空洞共振器と呼ばれる共振器を使用する。マイクロ波帯より低い周波数の領域では、共振器はコイルとコンデンサーで作られるが、マイクロ波帯では、共振器は金属の壁で囲われた空間により形成される。マイクロ波になると、インダクタンス L や静電容量 C の効果が周波数に比例して大きくなるため、極めて小さい C や L が有効に働くようになる²、そこで、等価的に金属壁が L になり、空間内の電界分布に従って、異なった位置にある金属壁同士の間には C が形成される。たとえば、図2 (a) の共振器では、円筒の左端 (1の位置) と右端 (2の位置) の間に円周に沿って等価的に L が、水平の中心軸に沿って C が形成される。共振器はこの等価的な L と C で与えられる周波数で共振する。

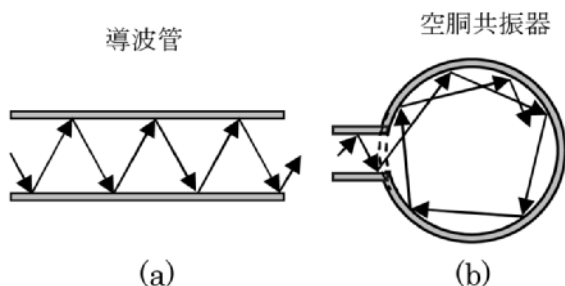


図1 マイクロ波の伝送と閉じ込め

マイクロ波は、図1 (a) に示すように金属表面で反射を繰り返しながら伝送される。金属で囲まれた空間では、図1 (b) に示すように、内部で何度も反射を繰り返す。ちょうど共振条件を満たすと、この空間内にマイクロ波のエネルギーが閉じ込められ、蓄積される。空間内のある位置では強め合い、ある位置で打ち消しあって、周波数に固有の、マイクロ波電界の強弱の分布を形成する。この分布、あるいは共振の様態をモードと呼んでいる。強め合う位置の電界は、導波管から送り込まれる電界に比較して極めて強くなっている。この共振器は空洞共振器と呼ばれる。

円筒状の共振器で、周波数が一番低い共振の際に得

られる電界分布は、図2 (a) に示すようなものである。図で、空洞に発生する電界を矢印で示した。矢印の長さは電界の強さを表しており、円筒中心部の電界の強さは、たとえば、図2の (a) では最大となるが、(b) ではゼロになっている。電界の向きはマイクロ波の周波数に応じて正負が逆転する。電気力線は電界の向きを示す曲線である。ちょうど、円筒のある部分 (図 (a) の1) がプラス、それに対向する部分 (図2 (a) の2) がマイナスになり、プラスからマイナスへ電界が発生していると見ることもできる。ある適切な大きさの半径の円に沿って見ていくと、円周方向の電界は0からプラスの最大値に達し、やがて0となり、さらにマイナスの最大値に達して、その後、再び0に戻るような変化を呈している。これを1周期と呼ぶことにする。

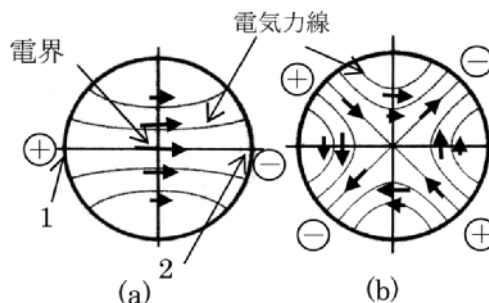


図2 空洞共振器内の電界分布の例

周波数をさらに上げていくと、たとえば図2 (b) のような分布の共振が現れる。この共振では、円周方向に2周期分だけ強さが変化している。さらに周波数を上げていくと、途中、いくつかの共振が現れるが、やがて、円周に沿って、順に3周期、4周期分だけ変化する、より高次のモードの共振が得られる (図4参照)。

図3 (a)、(b) に示すように、円周上で、円周方向の電界が極大値となる角度にあたる金属壁に軸方向のスリットを切り、このスリットによって分割された陽極間に別の共振器 R を接続する。

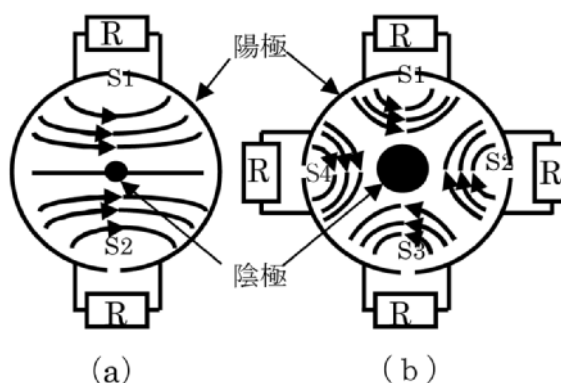


図3 2分割、4分割マグネトロン

円筒と共振器Rの共振周波数を一致させると、円筒共振器と共振器Rとがスリットにより結合し、全体が、元の周波数とほぼ等しい周波数で共振する。電界分布も、スロットを切る前と、ほぼ、等しい。

図3 (a) の円筒の中心にフィラメント状の陰極を置き紙面に直角な方向に磁界を加えると2分割マグネトロンになる。図3 (b) の場合は4分割マグネトロンになる。後者では円筒の中心付近で電界がゼロになっている。このため、陰極の径を適切に大きくする。

図3 (a) と (b) では、円筒の径が同じ場合は、(b) の共振周波数が (a) のおよそ1.7倍になる。周波数と大きさは互いに反比例する関係にあるので、同じ周波数で共振させたい場合は、(b) の大きさを (a) の大きさのほぼ1.7倍にする。

この考えを拡張して、6分割、8分割等のマグネトロンを得ることができる。その構成と電界分布を図4に示す。

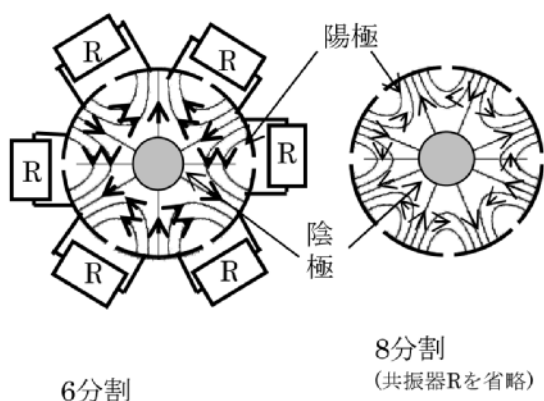


図4 6分割、8分割マグネトロンの電界分布

なお、同じ周波数で、より高次のモードを使用すると、それだけ、構造寸法を大きくできる。ジャイロトロンではかなり高次のモードを利用する。これは、次数を上げることによって、空胴をより大きくできることによる。しかし、電子管として、設計や構造の精度がより厳しくなるため、必ずしも、次数をどんどん上げることは許されない。

以上の説明で、共振器Rについて言及しなかったが、この共振器自身も、空胴共振器である。最後に、4分割マグネトロンの構造と電界分布の一例を図5に示す。

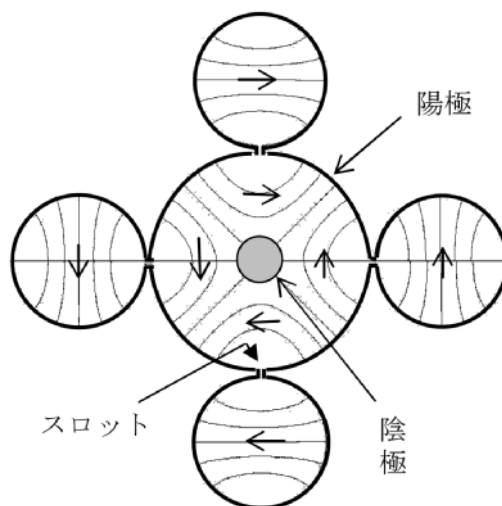


図5 4分割マグネトロンの構造と電界分布の一例

2. 発振に関する補足の説明

マグネトロンは発振管である。発振の種はノイズである。ノイズのうち、共振周波数に一致する周波数成分が極めて弱い共振電界を発生する。この弱い電界と電子が相互作用し、マイクロ波が電子の運動エネルギーを貰ってわずかに強まる。その電界により相互作用が強まって、さらに強い電界を発生する。このような正帰還を経て、急速にマイクロ波が増大し、マグネトロンに与えた直流電圧とマグネトロンに流れる電流で決まる、ある強さのマイクロ波発振まで成長する。マイクロ波は、たとえばマグネトロンに結合するアンテナによって外部に取り出される。これがマグネトロンのマイクロ波出力である。

3. コレクタ電位低下 (CPD)

例として、2段のCPDを取り上げ、説明する。

カソードKから射出された電子はアノードAで加速・整形され、ビーム状になって相互作用空間Bに入射される。この空間Bでマイクロ波と相互作用し、一部の電子が加速され、大部分の電子が減速される。平均的に電子は運動エネルギーを失い、失った分が高周波のエネルギーになる。相互作用を終えた電子ビームをスペントビームと呼ぶ。スペントビームはコレクタ C_1 、 C_2 に入る際に、 E_1 、 E_2 によって減速される。減速された電子のうち、 C_2 の入り口で速度が負になる電子はコレクタ C_2 に入ることができず、コレクタ C_1 で捕集される。これが i_{c1} である。速度が正の電子はさらにコレクタ C_2 に入ってそこで捕集される。これが i_{c2} である。このようにして、コレクタ電流は速度によって分類され、捕集される。

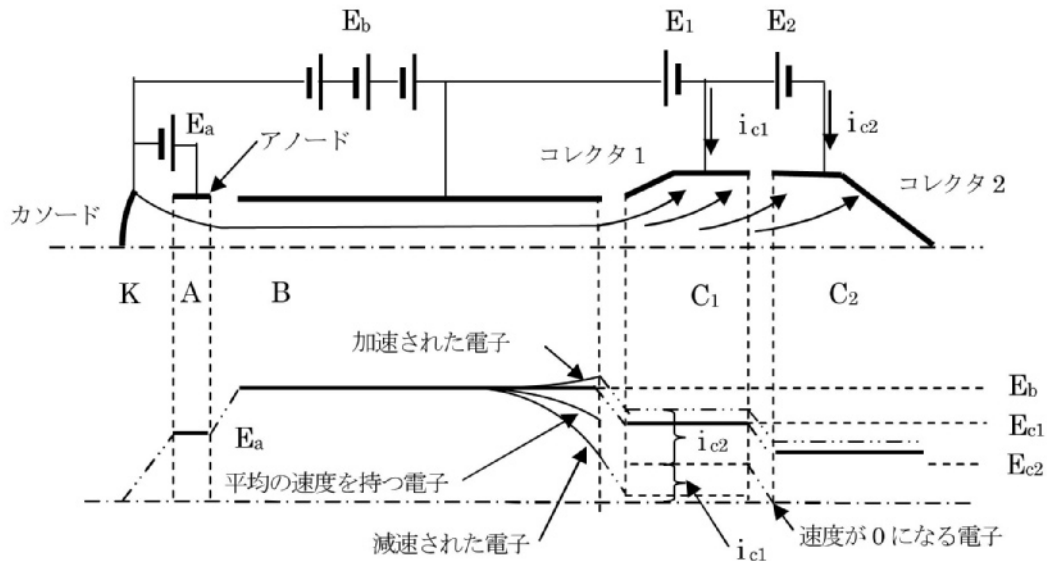


図6 CPD動作の説明図

なお、コレクタ C_1 へ入射するとき電子速度が負になると、電子は相互作用空間Bに戻ってしまうため、そうならない範囲で E_{c1} を設定する。

CPDにより、コレクタで熱に変わる電力は $(E_{c1} \times i_{c1} + E_{c2} \times i_{c2})$ になる。

CPDを行わないときは、コレクタに入る電力は $E_b \times (i_{c1} + i_{c2})$ である。2つの電力を比較すると、明らかに前者の方が小さい。

その差だけ、電源が与える電力が少なくなったのである。そこで、便宜上、CPDによって電力が回収された、あるいは電源に電力を返したという言い方をする。

4. 共振モード

電界分布や共振モードについて、マグネトロンやジャイロトロンの中で、概略、説明した。また、そこで $TE_{m,n}$ のようなモードの表記法を紹介した。

ここでは、この命名法の理解の一助とするため、Whispering Gallery Modeの一種である $TE_{12,2}$ モードの電界分布の計算例（周波数22.36GHz、直径80mm）を紹介する。

まずTEとは、電界が電波の進行方向（図7では紙面に直角な方向）に対し直角であることを意味する Transverse Electric の頭文字である。

図7に一部、矢印を追記して電界の向きを示した。もちろん電界はマイクロ波の振動に応じて向きが逆転する。ここでは、ある瞬間の電界の向きを示している

に過ぎない。

このモードでは、円周方向に2列のそれぞれ24対の電気力線の輪が発生する。ちょうど、山や谷の等高線のようなものである。簡単のためにそれぞれの輪を2本の曲線で表示したが、山の高さや谷の深さをもっと細かく表示するにはさらに多数の曲線を用いる。輪の中心では電界はゼロになる。また空洞壁のところで、電界がすべて壁に垂直になっていて、図示したようにあたかも壁のある点にプラスとマイナスの電荷が発生し、プラスからマイナスへ電界が発生しているような分布を呈している。

マイクロ波は波長が短いため、直流や、ラジオ、VHFテレビの領域の周波数帯で理解されているようなそれほど長くない金属表面上ではどこでも同じ電位になるという法則とかなり異なった様相を呈している。

Whispering Gallery Modeでは、空洞の中心部に電界が存在しない。このことから、このモードは表面モードとも呼ばれる。

隣り合った輪の電気力線同士では、電界の向きが同じ方向になる。この結果、この部分で電界は極大（または極小）になる。

全体として、円周の方向には12周期の変化が発生し、径方向には、たとえば図の一点鎖線上で見ると正の極大値（山）と負の極大値（谷）が合計2回（各1回）、発生する。この12と2がそれぞれ、 m と n で示されるのである。

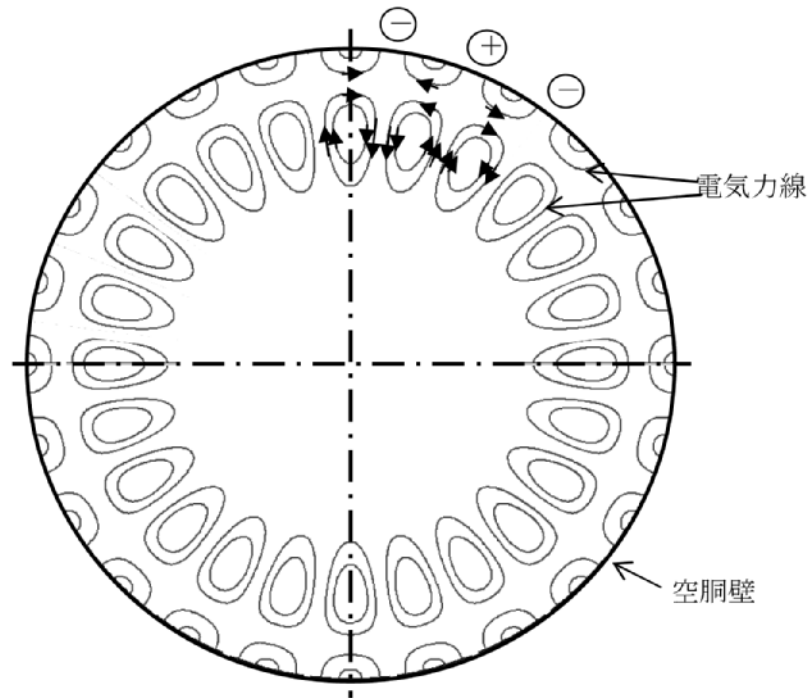


図7 Whispering Gallery Mode TE_{12.2}の電気力線
 (一部追記した矢印は電界の向きを示す)

- 1 マイクロ波を伝送する線路は導波管だけではない。
 他に代表的なものとして同軸線がある。
- 2 周波数を f とすると、それぞれ、電圧電流あるいは電流電圧の比で与えられるリアクタンス ($2\pi fL$) あるいはサセプタンス ($2\pi fC$) が周波数に比例していることから、きわめて小さい L や C が分布定数的に有効に働いて、空洞共振器を構成する。

登録資料候補一覧

番号	登録候補の名称	資料形態	所在地	製作者	選定理由
1	進行波管 1 W50	実物	東芝電子管デバイス(株)	東芝	100W UHF-TV局用として同社が開発した進行波管である。開発時の名称はM4803、工業登録名は1W50。多くの局で使用された実績を持つ。
2	進行波管M7880	実物	同上	東芝	6GHz帯衛星通信用としてわが国で始めて開発した3kW空洞結合型進行波管M7864を10kWに増力した進行波管。登録はM7864でも可。
3	送信管UV171	実物	(株)東芝 東芝科学館	東京電気	1930年代中頃におけるわが国初の放送用大電力超大型水冷送信管。 150kW中波放送用に使用された。
4	三極真空管 (オーディオ)	実物	同上	東京電気	国産化した初めての三極管。大正5年(1916)製。
5	アイコノスコロー プ7015	実物	同上	東京電気	わが国初のアイコノスコープ。
6	1915X線管	実物	同上	東京電気	わが国初のX線管。インドの尊者ギバの名を冠したガス入りX線管である。
7	イメージオルゴン 5820	実物	同上	東京電気	わが国初のテレビ用撮像管(イメージオルゴン)である。
8	白黒TV用アトラウン管 14HP4	実物	同上	東芝	静電集束型70°偏向管。当時(1950年代中頃)、使用されていた電磁集束を静電集束に変え、フォーカスコイルを不要とした。
9	進行波管 4 W72A	実物	NECマイクロ波管(株)	日本電気	1955年頃に開発された4GHzマイクロ波中継用ヘリックス型進行波管で 発振、増幅兼用で使用された。
10	ジャイロトロン GT0301	実物	三菱電機(株) 通信機製作所	三菱電機	永久磁石の磁場で動作する世界最初のジャイロトロンである。工業応用を 意図して開発された。
11	ホビング加工アノード	実物	(株)日立 ディスプレイデバイス	日立 ディスプレイズ	日立はホビング技術を用いてマグネトロンのアノードを作った唯一のメーカー である。この技術によるアノードの製造過程を示す貴重な資料である。
12	マグネトロン M312	実物	新日本無線(株)	新日本無線	最初に実用化された水冷マグネトロンで戦時中、レーダに使用された。厚 板を打ち抜いて作ったアノードを使用。M3のパルス仕様管。量産された。

13	マグネトロン tach10	実物	同上	新日本無線	戦時中、開発された橋型10分割マグネトロン。酸化物陰極を使用。波長4.6cm、出力130Wの性能を持つ初期のマグネトロンである。
14	マグネトロンM3	実物	日本無線(株)	日本無線	M312の前身。当時、世界でもまれに見る大出力管。波長10cm、CW出力500W。
15	マグネトロンM60	実物	同上	日本無線	M312と組み合わせ、局発用としてレーダに使用された。8分割橋型。
16	光電子増倍管 R1449	実物	浜松ホトニクス(株)	浜松ホトニクス	カミオカンデでおよそ1,000本使用された。この光電子増倍管により、世界で始めて超新星爆発によるニュートリノの観測に成功した。
17	光電子増倍管 R3600-05	実物	同上	浜松ホトニクス	ニューカミオカンデに11,200本が使用された。太陽ニュートリノ、つくばの人口ニュートリノの観測に使用されている。
18	送信管UV-201	実物	(財)通信協会 通信総合博物館	東京電気	トリウムタンゲステンカソードの検波・増幅用の国産化受信管。サイモトロン の名で発売された。
19	送信管TW511-A	実物	同上	日本電気	出力5kWの水冷三極送信管。1930年頃、量産された。
20	進行波管4W76A	実物	同上	日本電気	4GHz帯マイクロ波回路用のパッケージ型進行波管。
21	進行波管6W50	実物	NTT 情報流通基盤総合研究所	NTT電子管技術 研究室開発	6GHz帯マイクロ波通信回路用として開発されたPPM集束進行波管である。 マイクロ波中継は4GHzから次第に高い周波数に向け発展した。
22	20GHz衛星搭載管	実物	同上	NTT電子管技術 研究室開発	実験用通信衛星搭載管。これにより、世界に先駆けて準ミリ波帯の衛星通信回路が開拓された。
23	クライストロン E3732	実物	高エネルギー 加速器研究機構	東芝 電子管デバイス	500MHz1MWの世界最大級のクライストロンである。トリスタン、KEK-B 計画に使用された。リング加速器用電子管の標準的存在となっている。
24	クライストロン E3740	実物	同上	東芝 電子管デバイス	324MHz3MWの性能を持つパルスクライストロンで、構造寸法が世界一大きい ため横置き型になっている。J-PARCの陽子線加速器に使用される。
25	ジャイロトロン E3972	実物	日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所	東芝 電子管デバイス	世界で初めてエネルギー回収を実現したCPD型クライストロン。原研と共同 開発され、この開発により、ECHがITER計画の加熱候補となった。

26	ジャイロトロン E3993	実物	同上	東芝 電子管デバイス	原研との共同開発により、ITERの目標性能である600kW 1,000sの動作を 世界で始めて成功させた。
27	ジャイロトロン E3980	実物	核融合科学研究所	東芝 電子管デバイス	NIFS LHDのプラズマ生成、加熱用として開発された168GHz 500kW 1sの 性能を持つジャイロトロンである。CPDを取り入れている。
28	クライストロンE3712 カットモデル	実物	(財) 高輝度光科学 研究センター	高輝度科学 研究センター	三菱電機Sバンド7MWパルスクライストロンのカットモデルである。クライ ストロンの内部構造が観察できる展示資料である。
29	試作マグネトロ ンI、II、III	実物	東京工業大学百年記念館	東工大	東工大で戦前、戦中、戦後にかけて実施した試作マグネトロン、BK管の 資料である。均圧環を使用したマグネトロン、ミリ波マグネトロン等を含む。
30	分割陽極マグネ トロン	実物	東北大学 電気通信研究所	東北大	岡部金治郎が発明した分割型マグネトロンである。開発当時のものとされ る。この発明によりマグネトロンの性能は大幅に向上した。
31	マグネトロン 試験磁石	実物	同上	東北大発注	上記分割型マグネトロンの開発に使用されたマグネットである。長岡半太郎 により設計された。
32	三極管UN100	実物	電気通信大学 歴史資料館	東京電気	3極管の発明者が起業したドフォレスト社が製作した球形オーデーオン両翼 型をモデルにして日本で最初に開発された三極管である。
33	五極管ソラ	実物	同上	東芝	軍用通信機に使用された万能五極管。西堀栄三郎により戦争末期の資源 不足の解決を目指して開発され、大量生産された。

本報告は平成18年度科学研究費補助金特定領域研究『日本の技術革新—経験蓄積と知識基盤化—』
計画研究「産業技術史資料に基づいた日本の技術革新に関する研究」(17074009) の研究成果である。

国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第8集

平成19(2007)年3月30日

- 編集 独立行政法人 国立科学博物館
産業技術史資料情報センター
(担当：コーディネイト・エディット 永田 宇征 田里 誠、エディット 久保田稔男)
- 発行 独立行政法人 国立科学博物館
〒110-8718 東京都台東区上野公園 7-20
TEL：03-3822-0111
- デザイン・印刷 株式会社ジェイ・スパーク

正誤表(第8集2編 電子管技術の系統化調査)

年月日	箇所	誤	正
2007年3月30日	p56 左段上から3行	増幅にかかわる電子管は3. 7章でさらに	増幅にかかわる電子管は3～7章でさらに
	p64 左段下から6行	Studio to transmitter link	Studio to Transmitter link
	p70 右段下から3行	ペーンストラップ型と	ペインアンドストラップ型と
	p85 右段上から16行	電電公社 関壮夫が	電電公社 関壮夫らが
	p111 表中「6番」行	1915X線管	X線管 1915