

高電力クライストロン

1. はじめに

筆者は、現在、KEK 電子陽電子入射器で RF 源、特にクライストロンとその周辺を担当している。これ以前は、周期永久磁石収束のクライストロンの開発研究全般に携わり、その間、試作機の電気設計あれこれから高電力試験まで一通り経験した。この辺の事情からか今回講師に指名頂いたと思う。いずれにしても、いわば高エネルギー加速器むけの特殊な高電力管（クライストロン）のユーザーである。本講義では、主として、電子陽電子入射器で使用されている 50MWS バンドパルスクライストロンを念頭に置いて、それを使う立場からの解説を試みる。

まずクライストロンを含むシステム全体の概要を見たのち、電子銃、ビーム収束、さらにクライストロン動作原理を解説する。RF 窓はクライストロンの重要なコンポーネントであるが、ここでは詳しくはふれない。最後に KEK 電子陽電子入射器（電子線形加速器）でのクライストロン運転の実際について解説する。

2. 概要

2.1. 加速器とクライストロン

シンクロトロンや線形加速器など、既存の高エネルギー加速器は、高周波電力 (RF) によりビーム加速を行なう。ビーム加速に必要な大電力の高周波の発生には、多くの場合電子管（真空管）の一種であるクライストロンが使用されている。その端的な理由は、クライストロンがあまり電子管の中では、高効率、高利得で特徴付けられ（その代わり周波数帯域は狭いのだが）、高エネルギー加速器で使用される周波数領域（おおむね数百 MHz～数 GHz）では、他の電子管と比べて大きなパワーを取り出せる事情による（図 1）。加速器では、加速されるビームのエネルギーや強度の制御と安定性は、重要な性能項目なので、ビーム加速にかかわる大電力高周波には、加速器の仕様・性能から決められる、振幅および位相の制御と安定性が要求される。増幅管としてのクライストロンは、その RF 入力を適切に制御することで出力の位相制御ができ、また、安定化された直流 (DC) 高電圧を印加すれば、結果的に高い振幅・位相安定性を持った高品質の大電力 RF が得られる。このあたりが加速器の大電力 RF 源としてクライストロンが採用される理由である。

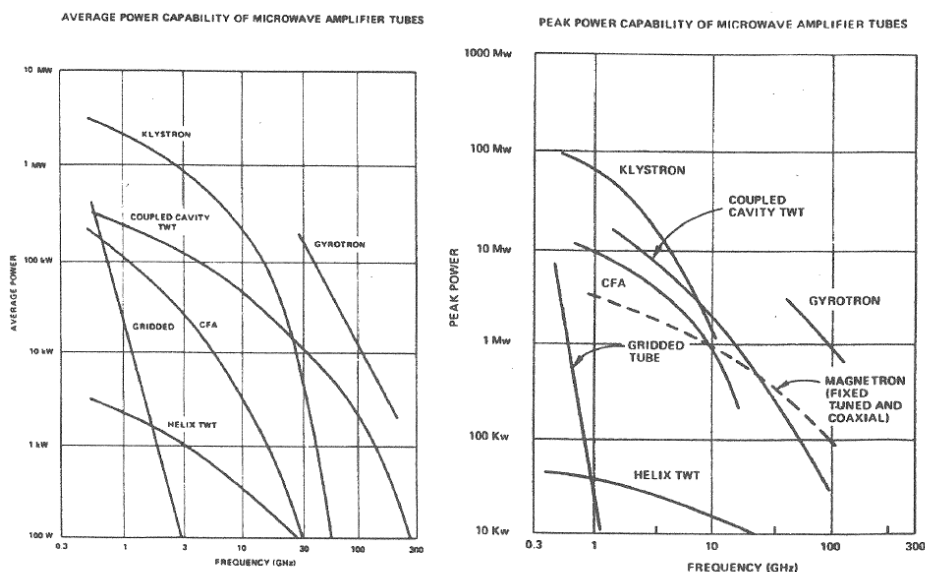


図 1 周波数による電子管ごとの出力の比較。(左) 平均出力、(右) ピーク出力。文献[3]より転載。

2.2. クライストロン システム

2.2.1. KEKB LINAC クライストロン

加速器において稼働しているクライストロンは、たいてい世界にいくつかあるベンダーから商業ベースで供給されているので、適当に WEB 検索すると写真やカタログが出ていたりする (図2はその例)。本稿ではこれ以降、KEK 電子陽電子入射器 (KEKB LINAC) の S バンド (2856MHz) 50MW パルスクライストロンを具体例として、高電力クライストロンの解説を行なってゆく。さっそくそのカタログを見てみると、本体外観の写真とともに主要なパラメーターが出ている。(表1)

Table 1 S バンドクライストロン諸源

周波数	2856MHz
出力	50MW
ゲイン	53dB
効率	44%
カソード電圧	310kV
カソード電流	360A
パルス長さ	4 μ s
繰り返し	50pps
パービアンス	2.1×10^{-6}

クライストロンは、電子管の分類上は、直線デバイス (=電子銃から取り出された電子は一直線に走る) の一種で、外形はこの写真例にあるような細長い軸対称の円筒をつないだ形をしている。最下部にある大きな部分が電子銃で、セラミック碍子により DC 高電圧の印加されるカソードにつながる電極 (最底辺の金属部分) が他の部分から絶縁されている。真ん中のやや径が細まった部分に増幅作用を持つ RF 回路がある (いくつかの共振空洞からなる)。最上部はコレクターと呼ばれ、使用後のビームを捕集する。高電力クライストロンでは、稼働中にコレクターから多量の X 線が発生するため、厚い鉛で遮蔽される。(写真に見える金属筒の中身は鉛。)

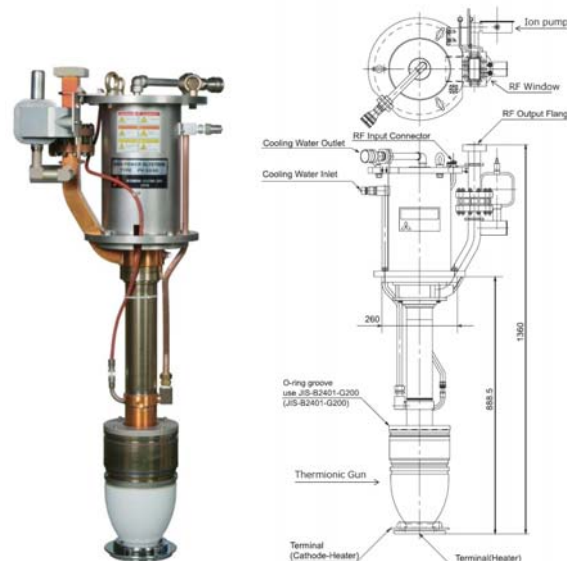


図2 クライストロンのWEBカタログ。

<http://www.mitsubishielectric.com/bu/microwavetube/>より転載。

径の細い RF 回路部の両端には、それぞれ外部からの RF 入力 (ケーブル) と RF 出力の取り出し (導波管) が配置されている。導波管端部のフランジで外部の RF 回路と接続する。出力導波管の途中には RF 窓が挿入されていて、クライストロン内部を高真空に保っている。

大電力のクライストロンの場合、管内部を真空に保つために小型のイオンポンプが装着されているのが普通である。

このような大電力クライストロンは、縦を横にして使うなど、姿勢を変えることは一般的にはできないし、電子銃部のセラミックがむき出しになっているなど、取扱いには一定の注意が必要である。また、電子銃部にはヒーターがあることや、イオンポンプが装着されていることから、機械的な振動や衝撃をきらう。たとえばベンダーからの製品の搬送にはエアサスペンションを持った専用のトラックを使う。

ひとたび管内真空部で不具合が発生すると、修理ができずにそのまま使用不能となる場合も多い。真空は封じ切りになっているので、ユーザーが内部の部品を交換するといったことは簡単にはできない。

2.2.2. クライストロンアセンブリ

KEKB LINAC のクライストロンは、最大 310kV のカソード電圧で運転される（表 1）。この電圧は、電源からの給電線途中にパルス変圧器（PT）を介し昇圧したのちカソードに印加される（昇圧比 13.5 : 1）。

PT の他、カソードのヒーターへの電力を供給する AC ラインと途中に挿入されるヒータートランス等々の、カソードの高圧入力系は、カソード電圧のモニター（Cap Divider）や電流コアモニターもふくめ、内部を絶縁油で満たした円筒状タンク内に一式で収納されている。クライストロンはこのタンクの上部から差し込まれる。クライストロンの電子銃部および電子銃に給電する高圧回路部は、こうしてすべて絶縁油に浸かった状態になる（耐電圧を確保するため）。

図 3 はタンクにクライストロン一式を取り付けたクライストロンアセンブリの様子である。PT の一次側は、左に水平に伸びたフィーダーを通じてタンク外のパルス電源と接続される。クライストロンは RF 回路部にソレノイド磁石を装荷された状態で、タンク上部から嵌めこまれている。加速器へのクライストロン取り付け取り外しは、このアセンブリに組み込まれた状態で行なわれる。

2.2.3. RF 源

クライストロンを駆動するには、まず大電力 RF のエネルギー源になる DC 電力と、RF 増幅の種となる小電力 RF システムを用意しなければならない。前者は、高圧電源（連続あるいはパルス）より供給される（詳しくは、中島氏の講義を参照）。後者は、振幅、位相、タイミング（およびパルス幅）が制御された小電力 RF システムによる（詳しくは三浦氏による講義）。このほかに、集束電磁石への DC 電力（ふつうは数 kW 程度）の供給、また、カソードのヒーターのための小電力（数百ワット）の AC が必要である。このような大電力システムは、随所が水冷（通常純水）されるので、適切に温度が制御された冷却水システムも必要である。

大電力 RF 発生のための一連の装置群からなるシステム（大電力 RF 源）は、搬送路（導波管系）を経由して加速管あるいは加速空洞に接続され

ている。この搬送路を通じて RF が供給され、ビームを加速する。図 4 は、KEKB LINAC の大電力 RF 源（ユニット）である。KEKB LINAC では、このようなユニットが総数 57 台あり、それらは、線形加速器の始点から終端まで（おおよそ 600m にわたり）、直線状にほぼ一定間隔で配置されている。各ユニットの運転状況のモニターや各機器の大半の制御は、中央の制御室より遠隔操作で行われる。

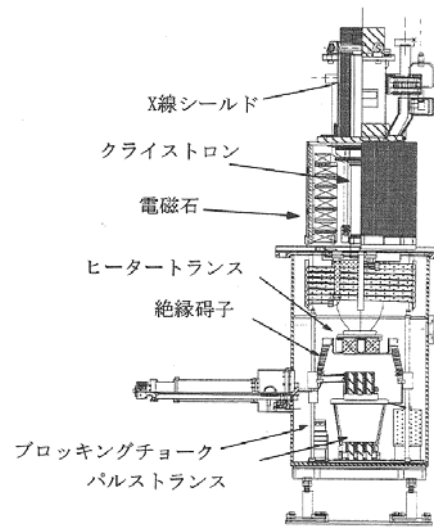


図 3 クライストロンアセンブリ [2]。



図 4 KEKB LINAC 大電力 RF ユニット。

3. 電子銃

多くの電子管では、電子銃はヒーターにより加熱されたカソード（熱陰極）から放出される熱電子をカソードアノード間に高電圧をかけることでアノードの方向へ引き出す（アノード電位は接地、カソードを負電位にする）。この後述べるように、実用的なカソード材料から取り出せる電流密度は、せいぜい数 A/cm^2 である。一方われわれのSバンドクライストロンの場合、表1を見ると電子銃の電流は、 $I = 300 A$ である。カソードからの電流密度（カソードローディング）をたとえば $1 A/cm^2$ とした場合、 $S \sim 300 cm^2$ のカソードが必要となる。形状が円であれば半径は $10cm$ くらいになる。

我々のクライストロンのような高電力クライストロン中を走るビーム電流密度は、カソードのそれより一桁以上大きくなるのがふつうである。というのは、これもまた後述するが、クライストロンでは複数の共振空洞をビームと相互作用させてRFの増幅を行なうが、原理上、それらの空洞は「互いにRF的には独立して動作しないといけない」。空洞同士は電子ビームの通るパイプでつながっているが、そのパイプ内を動作周波数のRFは伝搬できなくしてある。通常は動作周波数の二倍高調波が十分遮断される径になっているようである。われわれの動作周波数は $2856 MHz$ なので、二倍の $5712 MHz$ (TE11モード) が遮断されるとするとパイプの半径は $15.4mm$ 以下であるべしとなる。このサイズは、上で見積もったカソード径と比べると一桁近く小さい。このために、図5にあるような球状集束型のピアス型電子銃が使われる。

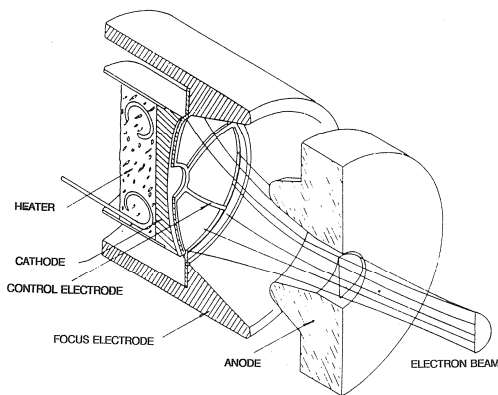


図5 ピアス型電子銃。文献[4]より転載。

球面の一部をなすカソード表面から発生させた電子を、集束電極およびアノードの電極が作る電場によって、ビームパイプ径より細く絞り、パイプ中へ導く。一般的な電子銃の設計では、ビーム径はパイプ径の 70% 程度としておくようである。（クライストロン動作時には、ビームの密度によりビーム径は変化する。）電子銃はビーム軸にたいし回転対称でありビーム断面は図5にあるように円形である。

3.1. 熱電子

カソードからの熱電子放出の電流密度(単位面積当たりの電流) J に対する理論式はRichardson-Dashman式として知られている：

$$J = \left(\frac{4\pi m e k^2}{h^3} \right) T^2 e^{-\frac{e\phi}{kT}} \quad (3.1)$$

ここで m 、 e は電子の質量と電荷、 k ボルツマン定数、 h プランク定数、 T カソードの温度、 ϕ 仕事関数である。 J の温度依存性には指数関数の項が支配的である。このため T を大きくすると急激に J は大きくなるが、ここで問題となるのは、カソード材料となりうる金属の仕事関数は数 eV であることである。つまり純金属をそのままカソードとして使用したとすると、十分な電流を取るためには、動作温度をかなり高くしなければならない。初期の電子管の電子源に多く用いられたタングステンの仕事関数は $4.5 eV$ であるが、たとえば、高電力電子管にとって実用的な電流密度の $1 A/cm^2$ を得るためには、タングステンを $2526 K$ まで加熱しなければならない。タングステンの融点は $3655 K$ と高いので、原理的には可能である。しかし、加温のために大きなヒーター電力が必要になるだろうし、また高温になるカソード周辺への熱による機械的応力の発生が原因となって、カソード周りの他の部品やカソード自身の寿命が短くなるであろう。（ちなみに、かりに今日の多くの電子管のカソード運転温度である $1200 K$ でタングステンを使用した場合、得られる電流密度はわずか $1.5 \times 10^{-11} A/cm^2$ である。）

アルカリ土類金属の酸化物を表面に塗布した場合に仕事関数が小さくなることが発見されて

以降、カソード基体（たとえばニッケル）上にバリウムの酸化物を構成させたいわゆる酸化物カソードが開発され、比較的低温で電子放出がよく、電子管のカソードに使われてきた。カソード温度 1200 K で連続的には 1.0 A/cm^2 まで、短期間あるいはパルス動作であればこれを上回る電流がとれる。酸化物カソードのもついくつかの欠点、たとえば、カソードの雰囲気により非可逆的に性能が劣化する、等々を解消したのが、今日の電子管に多用されている Dispenser Cathode 含浸型陰極である。

含浸型陰極は、多孔質のタングステン基体にバリウム酸化物、アルミニウム酸化物、カルシウム酸化物を含浸させたもので、1340 K の運転温度での仕事関数は 2.05 eV である。多孔質空隙にあるバリウム化合物がカソード温度を上げることで、バリウム単原子層を電子放出面に形成する。電子放出面をオスミウム Os、レニウム Re、ルテニウム Ru、イリジウム Ir 薄膜でコートすることで、さらに仕事関数を下げ、カソードの動作点を下げることができる (M-type カソード)。

大電力クライストロンでの今日的な含浸型カソードは、Scandate カソードと呼ばれるものである。これは、多孔質のタングステン基体にバリウム酸化物、アルミナの他に、スカンジウム酸化物 Sc_2O_3 を加えたもので、商業的に供給・調達ができる。1980 年代に SLAC のクライストロンで採用され、現在われわれの使用している 50 MW クライストロンもこのカソードを搭載している。スカンデートカソードでは、電流密度は最大で 10 A/cm^2 ほどになる。

3.2. 空間電荷効果

電子銃のカソードアノード間に電圧をかけると、カソード面上に電場が作用してそこから電子を引きだす。電子が放出されると、それが作る電場により、カソード面上の熱電子を引きだす電場が弱められる。引きだされる電子が多くなるとやがてカソード上の電場が打ち消されて 0 になる。カソードから引きだせる電流量は電極間電圧で決まっている。この事情を理解するため、無限に

広い二枚の平行平板電極を考える（一方が陰極 C、もう一方はアノード電極 A とする）。電極 C を電位 $-V$ 、A を 0 とする DC 電圧をかける。C 表面より一様に放出された電子は、C と A 間のギャップに生じた電場によって A に引き寄せられて外部の回路に電流が流れる。C-A 間を流れる電流 I は電極間電圧 V の $3/2$ 乗に比例する (Child-Langmuir 則)。この式の導出は、いろいろな教科書に見つかる（たとえば[1]）。

$$I = \left(\frac{4\sqrt{2}}{9} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{S}{d^2} \right) V^{3/2} \quad (3.2)$$

ここで、 ε_0 真空誘電率、 e 電子電荷、 m 電子質量、 S 電極の面積、 d 電極間距離である。丸括弧で括られた比例定数は、物理定数および両電極の形状（間隔と対向面積）により決まる電極対（=電子銃）に固有の定数であり、パービアンズと呼ばれる。電子管の議論にはしばしばあらわれる重要な量である。

図 6 のグラフは陰極からの電子放出に伴う平行平板電極の電位分布の様子を示している。図 6 (A) は、陰極から電子放出がない場合とある場合の極間の電位を比較したものである。カソード近くに放出された電子があるために電位低い方向に歪む。歪んだ電位の二回微分がその場所での電子の電荷密度を与える。

$$\frac{\rho}{\varepsilon_0} = -\frac{d^2\phi}{dx^2} \quad (3.3)$$

図 6 (B) は カソード近くの静電ポテンシャルの状況をあらわす。電子が少ない状態 (1) と過剰な状態 (2) の比較である。いずれの状態も、それぞれ矢印の方向にポテンシャルカーブは移動し平衡状態に至る。つまり平衡状態 (Child-Langmuir 則の状態) は擾乱に対し安定であることが分かる。図(C)にあるように平衡状態では、陰極面上では電位勾配は 0、すなわち

$$\frac{d\phi}{dx} = 0 \quad (3.4)$$

で、カソード面上に電場はない。

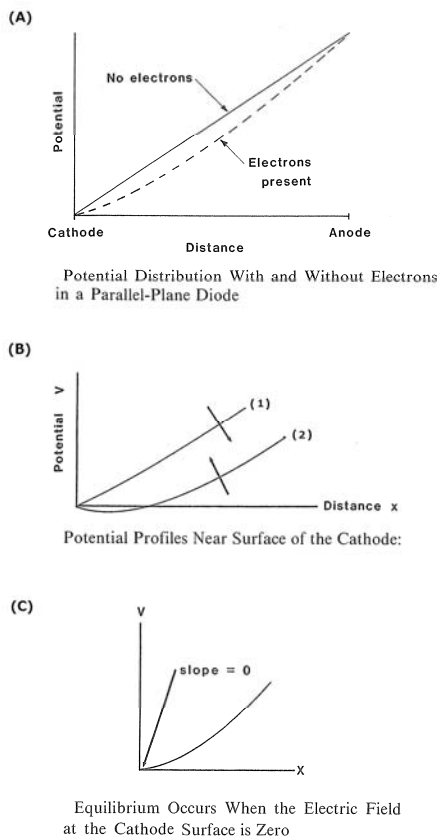


図6 平行平板電極間の電位分布。文献[5]より転載。

式 (3.2) においてひとまず電極面積の縦横が電極間隔と同程度 $S/d^2 \approx 1$ としてやると、式は $I \approx 2.33 \times 10^{-6} V^{3/2}$ となる。実際の電子銃のパービアンスも 10^{-6} のオーダーの量であり、しばしばマイクロパービアンスの単位で呼称される。

(3.2)は、電極間距離 d に対して $S \gg d^2$ の場合、すなわち電極の境界部の影響によるビームの擾乱が相対的に小さいとみなせる場合に適用してよいだろう。次に考える問題は、「陰極が有限の大きさのとき境界の影響は無視できなくなるが、そこでも無限の平行平板のようなきれいにそろった流れのビームを得ることができるか」ということである。

3.3. ピアス型電子銃

いわゆるシートビーム型の電子銃モデルを考える。アノードは相変わらず無限に広い平面とする。一方のカソードは、アノードに平行な、しかし有限の幅の無限に長い帯状の電極であるとする。カソードの周りには、電子を出さないカソードと同電位の電極を配置する。この周囲の電極の

配置によりカソードアノード間の等電位面は変化する。きれいにそろったビームを取り出すためには、等電位面がアノードに平行になればよい。図7の上図では、カソード周囲の電極をアノードに平行に置いてある。カソードから電子を出さない状態ではカソードアノード間の電位は点線のようにきれいな平行線(面)になる。電子がある場合には、実線のように歪む。このため、カソードから出た電子流は平行でなく図の矢印のようになってしまう。

そこでカソード周囲に配置された電極(集束電極)の角度を図7下図のように内向きにすれば、実線のような等電位面になりカソードからの電子がきれいにそろった形にできる。電子の方向と、集束電極のなす角が 67.5 度 ($=90$ 度 $\times 3/4$) のときに等電位面はアノードと平行になることが知られている。(ピアス角の導出はたとえば文献[1]を参照。) カソード周囲にピアス電極を追加することで、シートビーム型の電子銃でも、平行平板電極のような一様平行なビームを取り出せる。

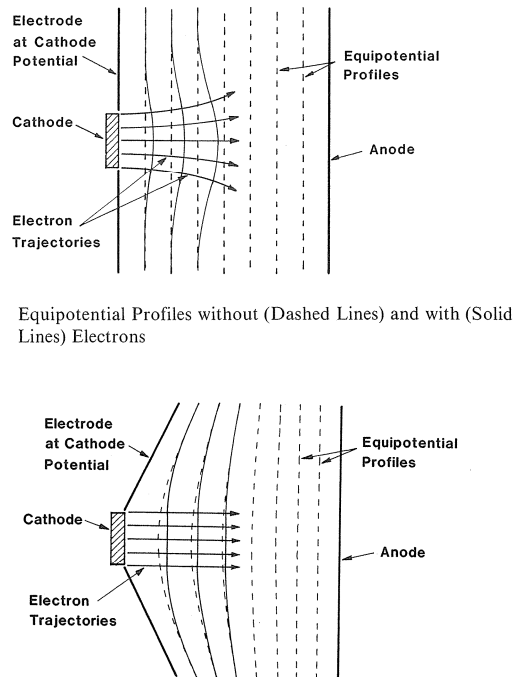


図7 ピアス電極。文献[5]より転載。

図5にあるピアス型電子銃は、球面の一部をなすカソードの周りに、カソードアノード間の等電位面を調整する集束電極をカソード周囲に配置

している。カソード面積は有限である。等電位面は、カソード、アノードと同心の球面である。カソードからは球面中心に集中する一様なビームを取り出すことができる。この場合のピアス角もほぼ 67.5 度でよいことが知られている。詳細は文献[2]にゆずる。

3.4. 温度制限領域

熱陰極からの電流密度は、式 (3.1) で与えられる。アノードカソード両極間に電圧をかけた際、陰極の温度できまる電流量までは引きだすことができるはずである。平衡状態ではカソード上の電位勾配は 0 になる。では陰極の温度がそれほど高くないとどうなるであろうか？容易に想像できるように、この時には温度で決まる電流量に制限され、カソード上の電場は 0 にならない。

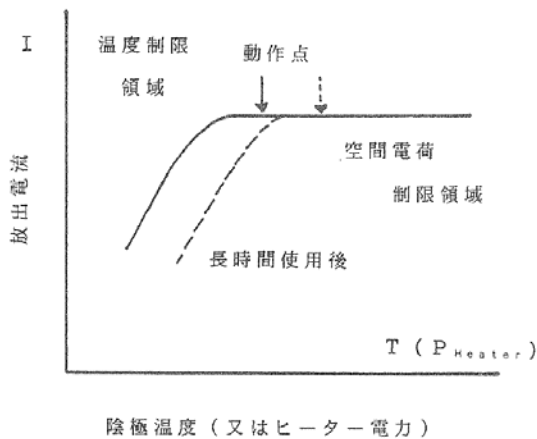


図 8 温度制限領域。文献[1]より転載。

カソード温度を横軸にとり、一定のカソード電圧下でカソードからのとれる電流をプロットしてみると、図 8 にあるような折れ曲がったカーブが得られる。折れ曲がりより左の領域を温度制限領域と呼ぶ。(この性質を肩特性、折れ曲がり点を肩と呼ぶ。) これは熱陰極一般が示す特性である。クライストロン (電子銃) の動作点は図にあるように、電流は飽和しているなるべく温度が低いところ選ばれる。なお、含浸型陰極の場合、積算運転時間に応じて、この曲線の折れ曲がり点は次第に右側に移動してゆく。カソードの温度を少しずつ上げて動作点を右にずらしてゆく。最後

は、温度を上げられなくなり寿命を迎える (エミ減)。

3.5. エミッションカーブ

3.4 節の特性を実際のクライストロンで見たものが図 9 である。KEKB LINAC 50MW クライストロンのカソードからの放出電流 (エミッション) データの一例である。横軸はカソード温度の代わりにヒーター電圧をとってある。エミッション (このグラフではパービアンズ値に換算) は、図 8 で示された傾向を持っているが、曲線の折れ曲がり空間電荷制限領域の平坦部はそれほどはっきりしない。スカンデートカソードでは、カソード本来の性質により、高温側のエミッションカーブにはっきりとした平坦部は現れない。このクライストロンの動作点はヒーター電圧が 110V と定めてある。ちなみに運転時間が多くなるとエミッションが減少するので、ヒーター電圧を段階的に上げてゆく対処を行なう。

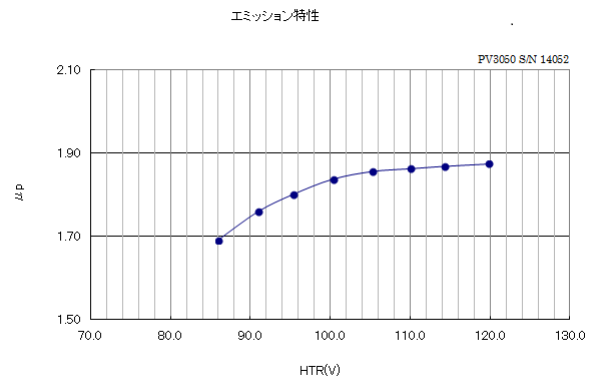


図 9 エミッションカーブの例。

4. 集束系

4.1. ユニバーサルカーブ

ユニバーサルカーブとは、空間電荷効果による円筒ビームの広がり、規格化した走行距離であらわしたものである。図 10 にある一様な十分に長い円筒状の電子ビームについて、電荷密度が一定かつ軸周りに回転なしとする。さらに電子の流れは、径方向に層流 (径方向に流れが交差しない) と仮定する。

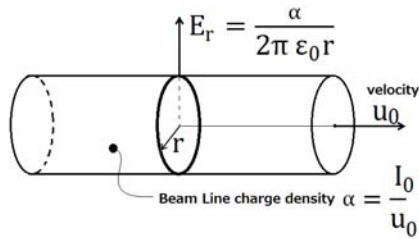


図 1 0 一様な円筒ビーム

このようなビームが一様速度で右方向に動いているとする。最外周部にある電子は外周部の電場

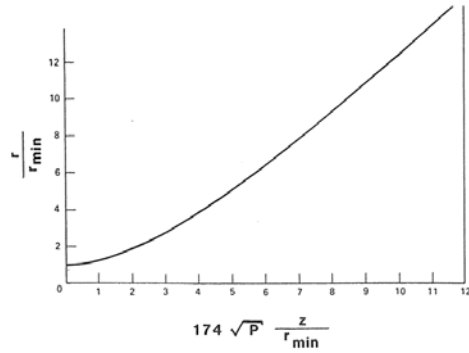
$$E_r = \frac{I_0}{2\pi \epsilon_0 r u_0} \quad (4.1)$$

の作用を受けて径方向へ広がる。この運動は外周ビーム自身の作る磁場を無視し

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{I_0}{2\pi \epsilon_0 r u_0} \quad (4.2)$$

と書ける。(4.2) は、 $V(r) = A \log_e r$ ポテンシャル中の一次元運動の方程式である (定数 $A = I_0/2\pi \epsilon_0 u_0$)。いずれの初期状態 (位置と速度) から出発しても、最終的には r はどんどん大きくなる。初期速度が負であった場合 ($dr/dt < 0$) は、最小の r_{\min} に到達後、再び r は大きくなる。変数 r を r_{\min} で規格化し、方程式を解いた結果を図 1 1 に与える。

図 1 1 を見ると、横座標 z がおよそ 2 の時にビームサイズは r_{\min} の 2 倍になることがわかる。これを我々のクライストロンのビームパラメータを使って評価してみる。まず、横軸を決める係数は $174\sqrt{2} \times 10^{-6} = 0.246$ となる。仮に初期ビームサイズ (r_{\min}) が 10mm であるなら、それが二倍になるのは 80mm くらいだが、この長さはクライストロンの全長 (電子銃部からコレクター入口まで) にくらべてかなり短い。クライストロンの動作のためには、電子銃で発生させたビームをコレクターまでビームパイプの中を通さなければならないので、我々のクライストロンでは、ビーム集束系は必須であることがわかる。実際に、ソレノイド磁場によりビームの収束と効率的な輸送を行なっている。



Universal Beam Spread Curve Showing Normalized Beam Radius as a Function of Normalized Axial Position and Perveance, P

図 1 1 ユニバーサルカーブ。文献[5]より転載。

4.2. ソレノイド磁場によるビーム集束

4.2.1. 円筒ビーム

ふたたび図 1 0 にあるような軸対称ビームを考える。今度は一様なソレノイド磁場 B_z のある領域中を磁場の向きと同じ方向にドリフトしている状態を考える。ビーム中の電子一個の径方向の運動は、ビームからの空間電荷力、電子の軸周りの運動と軸方向の磁場のローレンツ力、および電子自身の軸周りの回転による遠心力が作用する。ビーム軸を極座標で表記した運動方程式は

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = e E_r + m r \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 - B_z e r \frac{d\theta}{dt} \quad (4.3)$$

となる。 m で両辺を割り、 $\omega_c = e B_z/m$ のサイクロトロン振動数を使って右辺第 3 項を書き換える。

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{e}{m} E_r + r \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 - r \omega_c \frac{d\theta}{dt} \quad (4.4)$$

さらに電場に関する右辺第一項は次のプラズマ振動数 ω_p

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e \rho}{m \epsilon_0}} \quad (4.5)$$

を使う。ここで e 、 m はそれぞれ電子の電荷と質量、 ϵ_0 は真空中の誘電率、 ρ は電荷密度である。ビーム電流 I_0 とビーム速度 u_0 により

$$\rho = \frac{I_0}{\pi r^2 u_0} \quad (4.6)$$

と書かれる。

(4.5)、(4.6)を(4.1)に代入、(4.4)の E_r を消去して

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{r \omega_p^2}{2} + r \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 - r \omega_c \frac{d\theta}{dt} \quad (4.7)$$

となる。右辺第二項は Busch の定理より

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{e}{2\pi r^2 m} (\Psi - \Psi_0) \quad (4.8)$$

と書ける。ここで、 Ψ は電子軌道の内側にある磁束で、仮に B_z が一様な磁場であるならば、

$$\Psi = \int_0^r B_z 2\pi r dr = \pi B_z r^2 \quad (4.9)$$

となる。 Ψ_0 は初期値 (クライストロンでは通常カソード上になり、そこでは角速度は 0)。(4.9)を(4.8)に代入し、さらにそれを(4.7)に代入すると、

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{r \omega_p^2}{2} - \frac{r \omega_c^2}{4} \left(1 - \left(\frac{\Psi_0}{\Psi} \right)^2 \right) \quad (4.10)$$

となる。

4.2.2. ブリルアン磁場

方程式(4.10)は回転する層流のビームの径方向の運動を記述する。一般的にはビームはドリフトチューブを走る間に径方向に振動しかつ軸の周りを回転する。(4.10)の右辺が 0 になるとき、すなわち、径方向に振動がない状態

$$\frac{\omega_p^2}{2} = \frac{\omega_c^2}{4} \left(1 - \left(\frac{\Psi_0}{\Psi} \right)^2 \right) \quad (4.11)$$

を特にブリルアン流と呼ぶ。この時、(4.3)の三つの力のバランスが取れた状況で、ビームは回転をしつつ、しかし径方向のサイズを変えないで磁場中をドリフトしてゆく。カソード上で磁場が 0 の場合、すなわち $\Psi_0 = 0$ のとき、

$$2 \omega_p^2 = \omega_c^2 \quad (4.12)$$

が成り立つ。この時の B_z をブリルアン磁場という。

再び我々のクライストロンについて、そのブリルアン磁場を求めてみる。 ω_p はおおよそ $1.4\text{GHz} \times 2\pi$ であったので、これより ω_c は $2\text{GHz} \times 2\pi$ である。これからブリルアン磁場はおおよそ 700 ガウスであることがわかる。ちなみに、通常、クライストロンではブリルアン磁場の 2 ないし 3 倍程度の磁場をビーム集束のために印加する。われわれのクライストロンでの集束磁場 (のピーク値) はブリルアン磁場の 2 倍弱、約 1200 ガウスである。

4.3. ppm 集束

通常ソレノイド磁場は電磁石により発生させる。これを永久磁石にすれば、電力がいらすかつ磁石の水冷が必要なくなる。ところで特に衛星搭載の小型の電子管 (進行波管 TWT) などでは、重量を減らすことや省電力が不可欠なので、periodic permanent magnet (ppm) と呼ばれる永久磁石を用いた集束系が用いられる。極性を交互に交代させた永久磁石をビーム軸に沿って配置することで、ビーム軸上の軸方向磁場の向きを周期的に交代させる (図 1 2)。

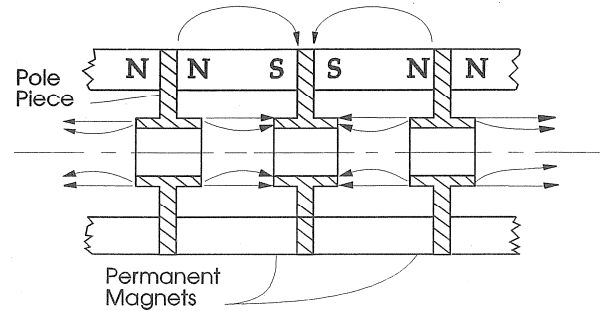


図 1 2 周期交代永久磁石の配置例。文献 [4]より転載。

このような周期的な交代磁場でもビームの集束を得ることができ、軸上交代磁場の rms 値と同じソレノイド磁場が実効的に同じ集束効果を持つことが分かっている。磁場の周期に合わせて電子ビームは軸周りの回転速度が増減および回転方向が交代する。ビームが回転する状態では、軸上磁場による軸方向へのローレンツ力により集束効果が得られる。一方、回転方向が変わる場所では、集束効果はなく、ビームは空間電荷力によ

り広がる。ppm 集束系では、このようにビームが移動するにつれ、集束と発散が交互に起こる。

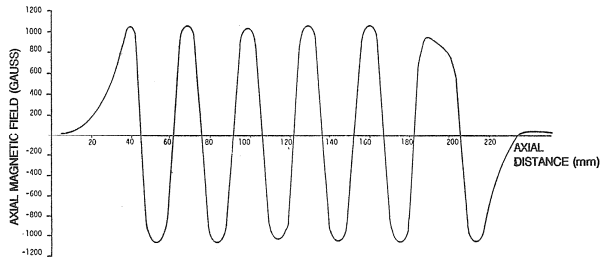


図 1 3 ppm 集束磁場の例。文献[4]より転載。

周期交代磁場による集束では、集束できるビームの電流量やエネルギーに制限が付く（シンクロトロン加速器の強集束系と同じ事情）。特にビーム電圧（速度）が低いと集束できないので、ビームの OFF・ON 時には途中でビームが失われてしまう。もともと ppm 集束は、比較的低出力の TWT に採用されていたが、近年では出力の大きな TWT やクライストロンでも用いられている。

5. クライストロン

5.1. 動作原理

5.1.1. 速度変調・密度変調・弾道理論

クライストロンのビームに関与する部分は、電子銃（A）、入力（B）・出力（C）の各共振空洞と空洞間のドリフト管（F）よりなる RF 回路、およびコレクター（D）である（図 1 4）。

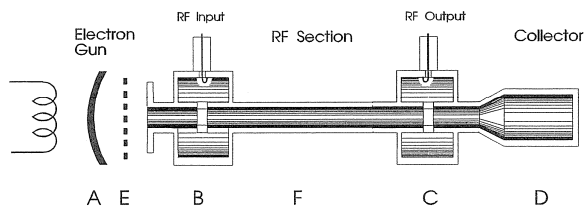


図 1 4 クライストロン増幅器の概要。文献[4]より転載。

電子銃に DC（パルス）電圧を印加すると、カソードとアノード間の電場によりカソードからアノード方向へ電子群が引きだされる。電子はアノード方向へ加速されたのち、円柱状のビーム形状で直線状に運動し、ドリフト管を通過してコレクターに達する。ドリフト管部分には外部よりソレ

ノイド磁場が加えられていて、電子ビームが発散せずコレクターまで到達するようになっている。

さて、このような定常的な電子ビーム状態（ダイオード状態）にあるクライストロンの入力空洞に RF を投入すると、空洞内には、ビーム進行方向に RF 周波数と同じ周波数の交代電場が誘起され、空洞を通過しているビーム中のおおのこの電子は空洞を通過するタイミングに応じて、交代電場により加減速される（この事情を「ビームは速度変調を受けた」と呼ぶ。）入力空洞で周期的に加減速されたビームはその後ドリフト空間を流れていく間に、加速された電子は前を行く減速された電子にやがて追いつく。

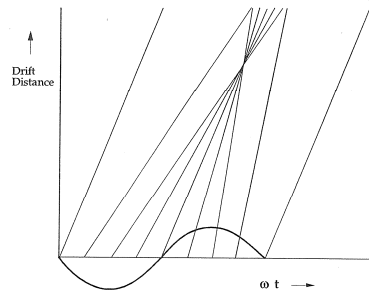


図 1 5 アップゲート図。文献[4]より転載。

図 1 5 は各タイミングで速度変調を受けた電子の軌道の様子を表したものでアップゲート図と呼ばれる。図の横軸の各時間に入力空洞で速度変調を受けた電子はその後おのおの速度に従い各軌道に沿って（速度に応じた傾きで直線的に）走ってゆく。それにつれて速度が変化しなかった電子を中心にして集積するのがわかる。なお、全部の粒子が同時に一点に集まるわけではないことがわかる。

入力空洞より下流の適当な場所でビームの様子を眺めると、電子流は様ではなく“ダマ”になって流れてくる。（この事情を「ビームは密度変調を持つ」と呼ぶ）。密度変調を受けた電子ビームのビーム電流は周期的に変化するので、その振幅が大きくなる場所（図中電子の軌道が集中する位置）におかれた共振空洞を励振できる。励振される空洞より外部に RF を取り出す。この空洞は出力空洞と呼ばれる。出力される RF は、入力のものと同じ周波数になる。ちなみに出力空洞を通過するビームはエネルギーを失う（ビーム全体として減速される）ことに注意せよ。以上がクライストロンの増幅器としての動作原理である。

入力出力空洞間のドリフトチューブ（ビームパイプ）は、単なるパイプではあるが、ここをビームが通過する間に電子流の密度変調が大きくなるので、クライストロンの増幅過程には本質的である。必要な長さは、大きい速度の電子が遅い電子に追いつくのに必要な距離になる。より正確には、次に述べるプラズマ振動の波長に関する。

さてこのパイプ径は、クライストロンの動作周波数、すなわち入力出力空洞の共振周波数の RF が遮断されなければならないために原理的な上限がある。一方で、決められた径のパイプ中を RF 出力に見合った大電流のビームを通さなくてはならない（たとえば、我々の場合 300A）。このために通常はソレノイド磁石よりなる集束系が必要になるが、これには実用上の性能上限がある（いくらでも強い磁場を発生できるわけではない）。高い周波数のクライストロンはサイズがそれに反比例して小さくなるので、仮に電子管内のエネルギー密度が同じであるとする、周波数の二乗に反比例して取り出せる RF 出力は小さくなることになる。

5.1.2. 空間電荷

電子は負電荷を帯びているのでクライストロンのビーム中の各電子は互いに反発する。このため、速度変調を受けた電子の軌道は、図にある単純な弾道理論のような互いの軌道が交差するのではなく、接近した軌道は互いにある距離以上には接近せずにむしろ図にあるような軌道になるであろう。入力空洞で与えられた速度変調に起因して荷電ビーム中に起こる疎密波はプラズマ振動そのものである。密度 ρ の一様な電子のプラズマ振動数 ω_p は、式(4.5)によりビームの電荷密度 ρ を変数として与えられる。具体的には、

$$\omega_p = 1.41 \cdot 10^{11} \sqrt{\rho} \quad (5.1)$$

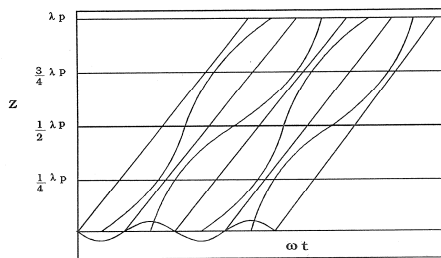


図 16 空間電荷効果を取り込む。文献[4]より転載。

さて、ビームパイプは導体なので（ふつうは銅）、ビームパイプ中の電子ビームの持つプラズマ振動数 (ω_q と書かれる) は導体による遮蔽効果により自由なプラズマのそれよりも小さくなる。これを $\omega_q = R\omega_p$ と書き、係数 $R (<1)$ はプラズマ振動数逓減係数と呼ばれる。具体的な R 値は図 17 参照。

速度変調を受けたビームは、振動を起こしつつ全体としては一定の速度 u_0 で運動してゆく。ここで、

$$\frac{2\pi}{\lambda_q} = \frac{\omega_q}{u_0} \quad (5.2)$$

で定まる波長 λ_q の 1/4 の距離にて電子ビームの集群が最大になる（図 16）。出力空洞はここに置かれる。ドリフトチューブの長さは、このような電子ビームのダイナミクスのより決まっている。

我々のクライストロンのビームのパラメータを入れて（電圧 300kV $\Rightarrow u_0 = 0.78c$ 、ビーム電流 300A、半径 $b=10\text{mm}$ ） λ_q をざっと当たってみる。まず、 ω_p はおおよそ $1.4\text{GHz} \times 2\pi$ となる。逓減因子は $b'=1.0$ 、 $a/b=1.5$ で $R=0.4$ 程度なので、逓減されたプラズマ振動の波長はおおよそ 400mm となる。

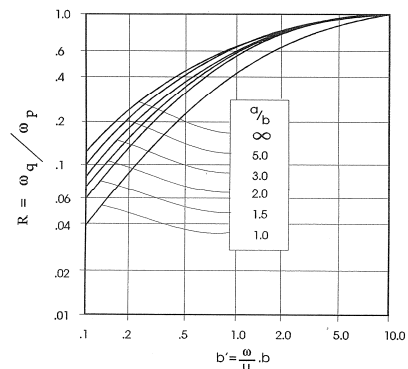


図 17 プラズマ周波数逓減係数。a パイプ半径、b ビーム半径。文献[4]より転載。

5.1.3. 増幅利得と効率

クライストロンに小電力 RF と、大電力 DC を入力すると、大電力の RF が出力される。三者の関係は増幅器の特徴を表す基本的なパラメータで、クライストロンのカタログには、動作周波数とともに必ず書かれているパラメータである。入力 RF のパワー P_0 と出力のそれ P_1 の比

を利得 G と呼ぶ。通常は下記の dB (デシベル) 表示を使う。

$$G = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_0} \quad (5.3)$$

たとえば、入力 200W に対し出力 40MW で利得 53dB といった具合である。

一方、DC 電力と出力 RF 電力との比が効率 η である。

$$\eta = \frac{P_1}{VI} \quad (5.4)$$

ここで V 、 I は (クライストロン電子銃に印加された) カソード電圧および電流である。

たとえば、 $V=280\text{kV}$ 、 $I=310\text{A}$ 、 $P_1=40\text{MW}$ で $\eta=46\%$ といった具合。ここで言う効率は、DC 入力電力の RF 出力電力への変換効率のことである。一般的にクライストロンでは、 $40\sim 60\%$ のものが多いようである。

高圧電源側からみたクライストロンは純抵抗体で、 I/V がその抵抗値になる。なお、クライストロンのカソードはすでに 2 章 (熱電子銃) でみたように、通常、電荷制限領域で使用されるため I/V 値は V を変化させると一定でなく、

$$P_k = I / V^{\frac{3}{2}} \quad (5.5)$$

で定義されるパービアンズ P_k が定数であり電子銃を特徴つける重要なパラメーターである。

5.2. 多空洞クライストロン

今日の実用的な大電力クライストロンは、図 18 の様な構造になっている。实用クライストロンには、入出力空洞の他に中間空洞と呼ばれる外部に入出力ポートを持たない孤立した共振空洞をいくつか配置する。これにより電子ビームのより一層のバンチ化をできるようになり、結果、増幅利得および効率を高めることができる。電子銃、RF 回路、およびコレクター等々は一体で封じ切れ、内部は常に真空中に保たれている。大電力管では、ふつう小型のイオンポンプを搭載している (常時稼働)。

重要な部品に RF 窓がある。セラミックで真空を仕切り、RF は通す。これによりクライストロン内部の真空が保たれている。

空洞やドリフトチューブなどは通常電子管向けの無酸素銅製である。コレクターも銅製である。

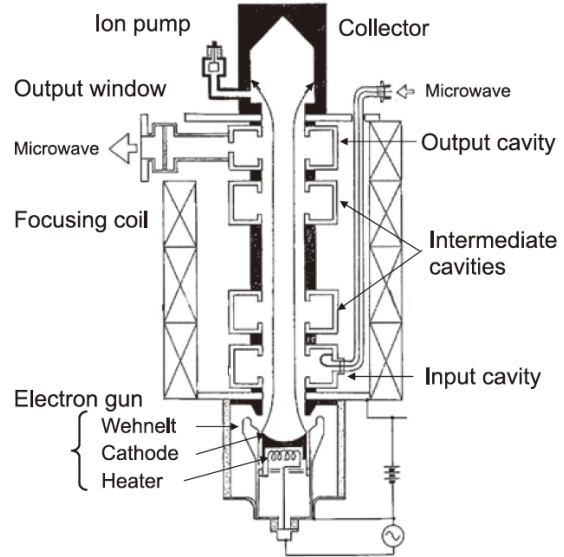


図 18 多空洞クライストロンの構造。
林健一, J. Plasma Fusion Res. Vol.86 (2010) より転載。

外装部品としては、ドリフト管部分の集束磁場用のソレノイド磁石がある。また、大電力管では、特にコレクターや出力空洞からの X 線を遮蔽するための鉛シールドが取り付けられる。

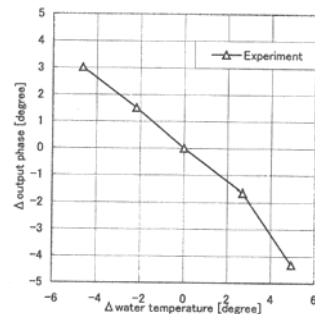


Fig.4-34 50MW クライストロンにおける温度変化による高周波出力位相の変化。

図 19 冷却水温度による出力 RF 位相の変化。
KEKB LINAC 50MW クライストロンのデータ。
[6]

コレクターではビーム由来の大量の熱が発生するので、水冷されている。コレクターの他に、クライストロンはカソード (動作時の温度はほぼ 1000 度) からの輻射熱や、RF 回路の途中にもビームロスによる発熱があるので、管全体が水冷さ

れている。なお、冷却水の温度安定度の仕様は、出力 RF の変動許容範囲による。図 1 9 は冷却水温度と RF 出力位相の測定結果である。入射器の例では、クライストロン系に供給されている冷却水の水温仕様は 30 度±2 度、ちなみにクライストロンへの冷却水の流量は全体で 40L/min（電磁石を除く）である。

5.3. 50MW S バンドパルスクライストロン

5.3.1. 入出力特性

図 2 0 にある 3 本の曲線は、飽和出力がそれぞれ 50、46、41 MW 時の入出力特性である。3 通りのカソード電圧に対し、それぞれ電圧一定にした状態で、RF 入力を 0 より徐々に大きくした時の出力パワーを表す。入力増加に伴い出力も増えてゆくが、やがて入力を増やしても出力が増えず最大になる（飽和）。さらに入力を増やすと逆に出力は減ってゆく（過飽和）。図 1 7 のグラフで、利得は、グラフの原点と曲線上の点を結んだ直線の傾きになる。出力が定格の 50 MW で利得が大きくなっていることが分かる。ふつう利得は大きいほどよいので（準備する入力 RF 電力が少なくすむので）、定格近くで十分な利得が得られるように設計及び調整される。

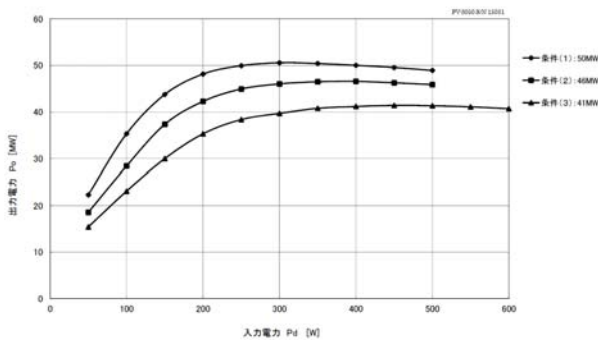


図 2 0 入出力特性。

5.3.2. 電圧特性

図 2 1 はカソード電圧 V に対するカソード電流、飽和出力、および効率をプロットしたものである。出力 RF のパワーはカソード電圧とともに大きくなり、カソード電圧がほぼ 310 kV で最大定格 50 MW が得られる。効率も、カソード電圧とともに単調に大きくなり、50 MW になるあたりで最大になる（こうなるようにうまく設計、調

整されているわけだが）。カソード電流は V 上昇に伴って、 $V^{3/2}$ に比例する。実際、単純な比例よりわずかに大きくなっていく様子が見える。

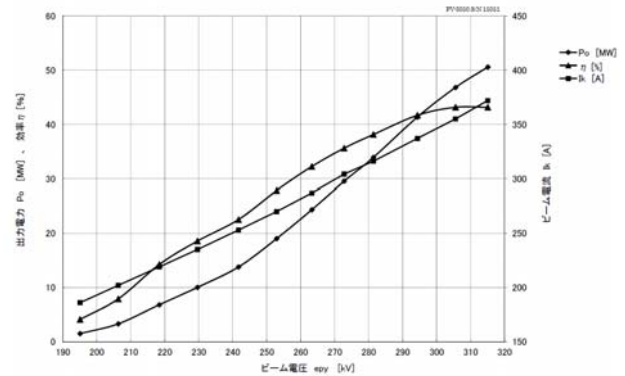


図 2 1 電圧特性。

5.3.3. 出力 RF 位相特性

図 1 9 で冷却水温度と出力 RF 位相との関係を見た。冷却水温度が上下すると各空洞の容積が増減するため、空洞の共振周波数が変化し、結果的にビーム電流により励振されている空洞電場の位相が変化する。一方、カソード電圧の変動によっても出力位相は変化する。これは電圧の変化により、電子ビームの速度が変化するために入出力空洞間の走行時間が変化するためである（図 2 2）。

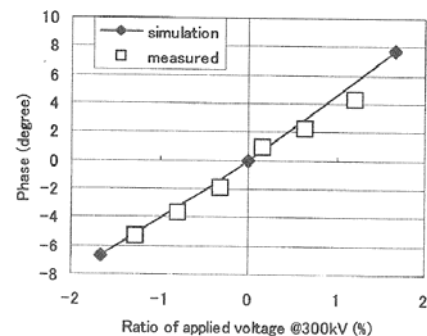


図 2 2 カソード電圧と出力位相。KEKB LINAC 50MW クライストロンのデータ。[6]

5.4. マルチビームクライストロン

もともとはクライストロンの周波数帯域を広げる目的で導入されたアイデアであり、クライストロン中にただ一本のビームを通すのではなく、

複数のビームを通すものである。なお、ビームと相互作用する空洞はビームに共有されている。このアイデアはかなり古く 1960 年代かそれ以前よりあり、文献によると、当時実機も作られていたようである。近年、広帯域化よりはむしろ効率の改善方法の一つとして、マルチビーム化されたクライストロンが開発され、加速器でも使用され始めた。使用するクライストロンの台数が多い大型加速器では、クライストロンの電力効率の改善は、即そのまま施設全体の電力効率に改善につながるため、このような改善努力は重要である。

さて、クライストロンの効率 η (%) は、管のマイクロパービアンズ値 K ($P_k \times 10^6$) と相関がある。数多くのクライストロンのデータから、両者の関係を Symons は以下の経験式にまとめた[7]。

$$\eta = 90 - 20K \quad (5.6)$$

たとえば、我々のクライストロンは $K=2.1$ なので、(5.4)では効率 48%となり、実際よりは少し高めとなる。いずれにしても、パービアンズが低いビームを用いたクライストロンは、効率を高くできるという点が重要である。

クライストロンの出力 P_{out} は、式(5.4)、(5.5)からパービアンズ P_k 、効率 η 、カソード電圧 V により

$$P_{out} = \eta P_k V^{5/2} \quad (5.7)$$

と書ける。単純にパービアンズを減らしたただけだと、効率は上げられるが、カソード電圧を上げないともとの出力は得られない。クライストロンのビームを N 本に小分けにする“マルチビーム化”は、各小ビームのパービアンズを $1/N$ に下げることによって、効率を上げられる。小ビームの電流をかえずにビーム数 N を増やせば、効率は下げずに全電流量を増やせ、その分カソード電圧を下げられる。ただしマルチビーム化は、電子銃を始め、クライストロン各部の構造は複雑になる。

詳しい解説は、たとえば、超電導リニアコライダーおよび EuroFEL の RF 源として開発された

10MW L バンドマルチビームクライストロンの開発研究の講義録を参照してください[8]。

5.5. BAC 高効率化

将来の大型加速器で使用するクライストロンでは、さらなる効率の改善が要望されている。最新の理論的な解析から、クライストロンのバンチングに関してより高効率になる RF 回路の配置が提案されている (BAC : Bunch-Align-Collect 法) [9]。

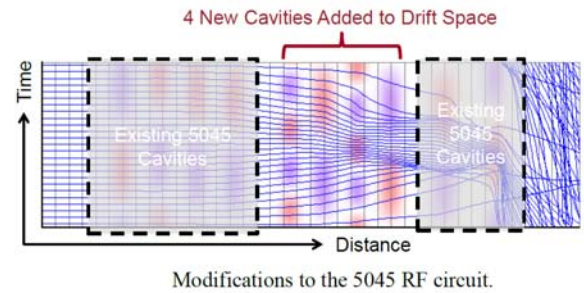


図 2.3 BAC 法によるバンチング改良。文献[10]より転載。

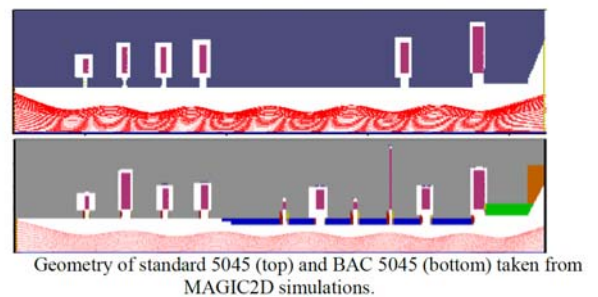


図 2.4 既存回路 (上) に 4 空洞追加 (下)。文献[10]より転載。

単純に言うと、図 1.5 のアップルゲート図において取りこぼされていた電子も集めて、ビームの電流の RF 周波数成分をより大きくできる、ということである (図 2.3)。このためには、適切に離調、配置した空洞群があらたに必要になる。たとえば、SLAC において長年 RF 源として実績のある S バンドクライストロン (65MW 出力、名称 5045) でのこのような RF 回路の改造を施し、出力試験をおこなった結果が最近開催の国際会議で報告されている (図 2.4)。理論通りの効率の増加は認められたが、RF の不安定が起り、仕

様を満たす十分な性能のクライストロンには今のところまだ仕上がっていないようである[10]。

6. クライストロン運転状況

6.1. 運転統計

クライストロンは熱カソードを使用した製品なので、本来的な寿命がある。寿命に達したカソードからは電子ビームが取り出せなくなるので、もはやクライストロンとしては使えなくなる（いわゆる“エミ減”）。一方、カソード寿命に達していないうちでも、別の理由でいくつかのクライストロンは、現場を離脱してゆく。KEKB LINACの最新のRF源に関する運転統計（図25）を見てみると、稼働している全57台のクライストロンユニットに対し、10万時間以上継続して使用しているクライストロンアセンブリ台数も結構多く、8万時間以上のものは全体の3割以上になっている。現役クライストロン平均運転時間は約61,000時間である。一方、不具合などの発生により途中で撤去したクライストロンの平均運転時間は約39,000時間で、実際運転開始後3万～4万時間での交換数が多くなっている。

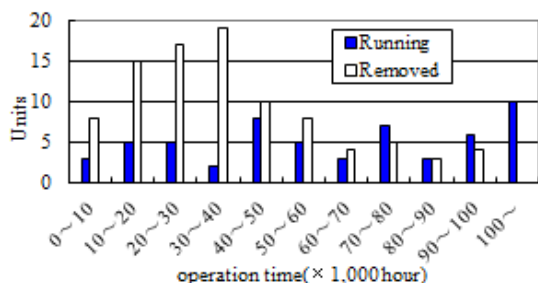


図25 アセンブリ運転時間統計[11]。

図25において、青色バーグラフはKEKB LINACで稼働しているクライストロンアセンブリの運転時間分布。運転に供しているアセンブリ総数は57台である。一方、白のバーグラフは、これまでに故障などの不具合により取り外されたクライストロンの、はずされた時点での運転時間分布である[11]。

これまで見てきたように、クライストロンには、電子銃部の絶縁セラミックや、出力導波管に挿入されるRF窓のセラミックなど、運転中常に高電圧にさらされる部品があり、放電により極端な場合は破壊されてしまうことも起こり得る。ま

た、クライストロン本体部の冷却水の漏れが原因で、運転からははずされることもある（あるいは、集束電磁石からの水漏れによることもある。ただし、この場合は磁石の乗せ換えで復旧できる）。大電力クライストロンには、管内部の真空を保持するために小型のイオンポンプが取り付けられているが、何かしらの原因でポンプの機能が止まってしまった場合には、運転継続が困難になる（ので運転からははずされるだろう）。

クライストロンは、絶縁油タンクと組み合わせ、クライストロンアセンブリの形で、電源に取り付けられている。通常クライストロンは、アセンブリごと交換される。表2はKEKB-LINACでの年度ごとのアセンブリ交換数とその原因をまとめたものである。

Table 2: Exchange Reason of Klystron Assembly

Year	The number of the Klystron assembly exchange	Exchange reason							
		Decrease in emission	Klystron oscillation	Klystron heater disconnection	Vacuum leak of the wave guide(Alter klystron assembly removal)	Malfunction of the pulse Forming Coil	Malfunction of the insulating oil	Malfunction of the pulse transformer	Others
2000	9	2	0	0	1(4)	0	0	4	2
2001	9	1	1	0	2(2)	2	0	3	0
2002	10	0	2	0	1(2)	0	3	3	1
2003	8	2	0	0	1(1)	3	0	2	0
2004	6	3	0	1	0(2)	1	0	0	1
2005	6	2	0	1	0(1)	2	0	1	0
2006	5	3	0	0	0(1)	2	0	0	0
2007	7	1	1	0	0(1)	1	0	0	4
2008	1	0	0	0	0(0)	1	0	0	0
2009	13	0	0	0	0(0)	9	0	0	4
2010	1	0	0	0	0(0)	0	0	0	1
2011	4	0	0	1	1(0)	1	0	0	1
2012	5	1	0	1	0(0)	0	0	0	3
2013	3	0	0	1	0(0)	1	0	0	1
2014	1	0	0	0	0(0)	0	0	0	1
2015	3	0	0	0	0(0)	0	0	0	3
2016	2	0	0	0	0(0)	0	0	0	2
Total	93	15	4	5	6(14)	23	3	13	24

アセンブリ稼働総数57台に対し、この17年間では、毎年度平均5台程度が交換されている。アセンブリ交換数は、年を追うごとに減少している傾向が見えるが、これは、当初に見られたPT不具合やクライストロン窓のリークといった、いわば高電界特有のトラブルに対策が打たれた結果、それらが根絶されたためであろう。それらは年を

追うごと減少し、それがそのまま年度ごとの交換数の減少につながっているのが読み取れる。他の原因はほぼ一様に発生している。このうち、エミッション減少は、先に述べたようにカソードの本来の寿命に達したものである。「KLY 発振」および「KLY ヒーター断線」も、カソード寿命に関した原因と考えられるので、これらを合わせて、カソードの寿命に関した原因でのクライストロン交換台数は、年度平均で2台程度と結論される。

集束電磁石の不具合としては、冷却水漏れやコイルの地絡があり、今日でも一定の割合で発生し、程度によってはアセンブリ交換に至る。この交換作業はメンテナンス期間に実施される。

運転期間終了に近づいた時点で各種のデータ取り（立ち下げデータと呼ぶ）および点検を全アセンブリについて行なう。点検などで問題箇所の見つかったものは、続くメンテナンス期間で交換を実施する。が、運転中に不具合が発生した場合にも実施される（頻度は少ないが）。

アセンブリの交換手順は下記のようなものである。

1. 真空パージ: 仕切り窓以下の真空をパージ(仕切り窓のリーク確認、クライストロン窓のリーク確認)
2. 電源および冷却水系との縁切り。
パルス電源との縁切り。RF 入力系および収束磁石電源との縁切り。冷却水系との縁切り。



図 2 6 クライストロンアセンブリの交換のようす

3. 導波管開放（接続部導波管の取り外し）
4. アセンブリ交換
5. 導波管接続（復元）、接続部導波管内排気（リークチェック）、窓部を含む大気暴露部分のベークキング。
6. 電源接続（復元）、冷却水接続復元。
7. 通電試験後、若干のコンデショニングを行ない、ユニット全体が運転に復帰。

仕切り窓リークなどの追加トラブルが無い状態で順調に作業が遂行されると、計 8 シフト程度でユニットが準備完了になる（1 シフトは 8 時間）。図 2 6 は、交換作業時のスナップショットである。（KL_B7 ユニットで 2017.4.19 に電磁石から水漏れを起こしたアセンブリを交換した。）図中 A は、窒素パージし終わったところ、B = アセンブリ取り外しているところ、C = 取り外されて交換するアセンブリを待っているところ、D = 交換終了、となる。

KEKB LINAC にはクライストロン組立ホールと呼ばれるサービスエリアが設けられている。交換用の数台の予備アセンブリは常時ここで整備保管されている。このエリアでは、

- ①予備アセンブリを含む、各種交換部品の保管、
- ②クライストロンアセンブリの解体・組立作業、
- ③およびクライストロンエージング

など、入射器が稼働するに必要なクライストロンおよび電源に関する作業全般を行なう。新たに購入したクライストロンは、組立ホールにてアセンブリに組み立てられたのち、備え付けの高電力試験ベンチで RF 出力特性のチェックを受け、加速器への投入待ちの状態になる。（クライストロンは、出荷前にベンダーにて RF 窓などの高電界エージングを行ない、出力試験を含む一連の出荷検査をへて納品されるので、原則、アセンブリ組立後はすぐに使用できる。）交換するべきアセンブリが出たら、待機している予備と交換を行なう。高電力試験ベンチでは、交換され運転からはずされたクライストロンの検査なども行なう。

7. あとがき

大電力クライストロンに関しては、これまでの OHO でも当然取り上げられていて、講義録も公開されている。ここでの解説よりも詳しく書かれているので、それらの文献を参照してもらいたい [1][2]。

なお、電子管全般の技術解説は、内外含めいろいろな出版物があるが、今日 WEB 上においても、各種の解説が比較的簡単に見つかる。各種加速器の国際会議や国内の会議（加速器学会での論文も WEB 検索で出てくるので、まずはそれらを参照するのがてっとり早い。

高出力のクライストロン、たとえばわれわれの 50MW クライストロンの動作電圧はおよそ 300kV なので、ビーム中の電子は十分に相対論的であるのだが（電子ビームの速度は、光速の 78%）、いろいろなテキストでのクライストロンの解説は非相対論的なものを前提としていることも多い。概念上は正しくとも、式をそのまま直接適用する際には、よく吟味しないといけない。本来ならば、一つずつをよく検討すべきであったが、筆者にはやりきれなかった。なにとぞご容赦いただきたい。

参考文献

- [1] 福田茂樹、OHO 1988。
- [2] 道園真一郎、OHO 2002。
- [3] *Microwaves made simple: principles and applications/ the staff of the Microwave Training Institute*, ed. By W. S. Cheung and F. H. Levin, Artech House, Boston 1985.
- [4] M.J. Smith, G. Phillips, *Power Klystron Today*, JOHN WILEY & SONS INC., 1995
- [5] A.S. Gilmour, Jr., *MICROWAVE TUBES*, Artech House, Inc. 1986.
- [6] K.Nakao et.al, “Phase Variation of High Power Klystron at KEKB Linac”, 第 22 回リニアック技術研究会（1997 年 9 月、東北大学）。
- [7] R. S. Symons, “Scaling Law and Power Limits for Klystrons”, IEDM, 1986.
- [8] 福田茂樹、OHO 2006。
- [9] Guzilov, I.A. “BAC Method of increasing the efficiency in klystrons.”, in *Tenth International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC), 2014*.
- [10] R. Kowalczyk, et al., “Test of a BAC Klystron”, *IVEC 2017, 18th Int. Vacuum Electronics Conference*, London.
- [11] 馬場昌夫他「KEK 電子陽電子入射器における高周波源の運転統計および維持管理」日本加速器学会 2017 年。