運転員講習会資料
2003.5.12

線型　小林　利明

SPring8 熱電子銃について

1.電子銃について

SPring8 線型加速器の電子銃は、現在 Y845 という名前でアメリカ、バリアン社から供給されている。このタイプの電子銃が幅広く線型加速器に使用されるようになったのは、KEK 入射器　小林　仁先生の開発努力によるものが大である。それまでの電子銃というと、タングステンカソードを高温に熱し、既製品のグリッドを購入し、ウエネルト電極とアノードの形状を考え、1 つ 1 つの部品を組み立てていた。従って寸法精度がでないのと大電力ヒータによる熱歪み等で、カソードーグリッドの接触などが多く見られた。そこで KEK 小林（敬称略）は、板極管に目をつけて、大気開放したカソードーグリッド　アッセンブリを電子銃として用いる試みを行った。その結果、安定した電子銃カソードーグリッドアッセンブリが供給されるようになり、職人芸であった電子銃が比較的簡単に組み付けられるようになり、電子銃にさほど詳しくないものでも、取り扱えるようになった。その当時から比べると、バリアン社からのカソードは品種が増えて、目的の電流が得られるカソードを選んで、Egun と呼ばれる電子銃軌道解析プログラムで軌道を計算することで、最適設計ができる。

2.電子銃の放出電流

2.1　熱電子放出材料

金属や半導体を加熱すると、その結晶表面から電子を放出する現象を熱電子放出という。これは結晶内の自由電子が表面の電位障壁を越えて、外部へ飛び出すようになるからである。こういう状態で放出された電子を熱電子といい、この現象を積極的にさせて、コントロールできるようにしたのが熱電子銃である。

熱電子放出材料には（１）純金属材料、（２）単原子層陰極、（３）酸化物陰極　がある。

純金属材料には、代表的なタングステン（W）があり、仕事関数Φ=4.5eV で動作温度 2400～2600K、融点は 3000℃である。またタンタル（Ta）はΦ=4.2eV,動作温度 2200～2300K,融点 2850℃で、クライストロンなどのカソード材として用いられていた。最近では含浸型カソード材も使われるようになってきている。

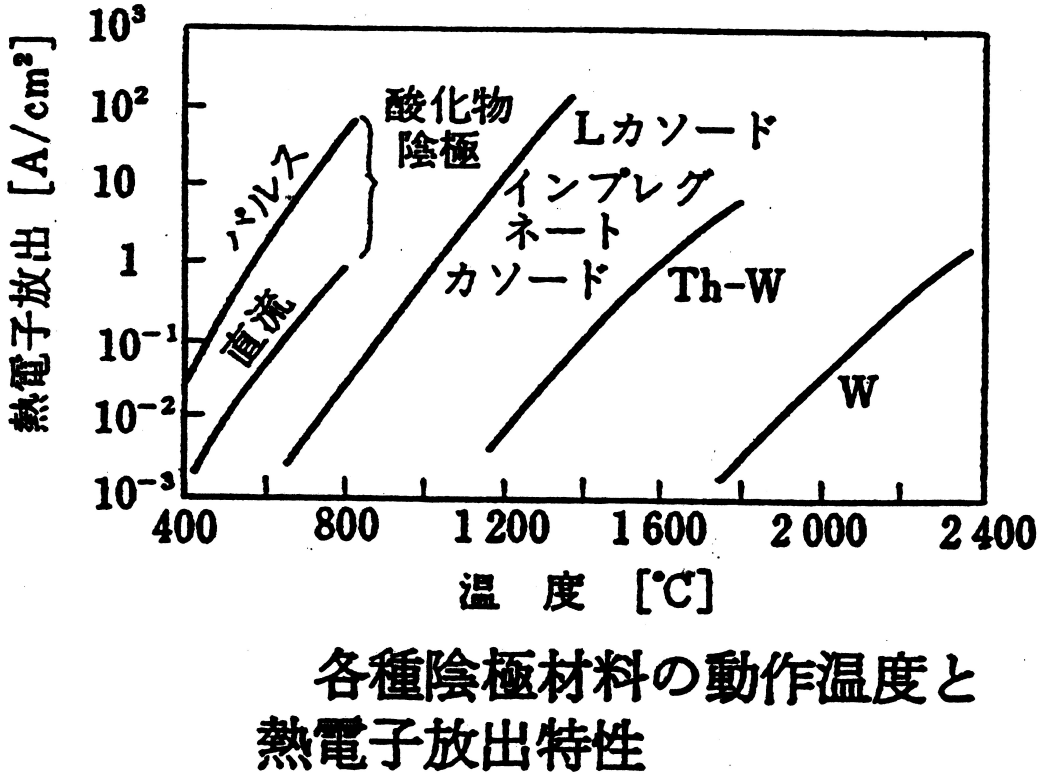
（２）の単原子層陰極には、トリウムタングステン陰極（Th-W)、L カソード、インプレグレネートカソードなどがある。トリア（Th-W）を 1～2%含む W 線を真空加熱し、

トリアを還元して、表面にトリウム（Th）の単原子層を形成させる。トリアはΦ=2.6eVで、2000Kの連続使用に耐える事ができ、同じ温度ではタングステンの1000倍の放出電流になる。図1に各種陰極材料の温度動作と熱電子放出特性を示す。電子銃の構造は図2のように真空中の加熱により還元されたBaが、タングステンの粉末を加圧、焼結して作った多孔質のタングステンの表面に単原子層を形成する。この方式は、Baの補給があるので寿命が長く、電子銃カソード近傍で発生する陽イオンの衝撃に強いなどが特徴である。このカソードの仕事関数はΦ=1.8eV、電子流密度は1300K で100A/cm^2 程度である。

（3）酸化物陰極 $BaCO_3$ と $SrCO_3$ の混合粉末を酢酸ブチルなどを溶かしてNi板面に塗布する。使用時に真空加熱して使用する。真空加熱時の大量のガスがでるので、活性化を注意して行う必要がある。また、陽イオンの衝撃に弱く、ダメージを受けると黒化する事もある。仕事関数はΦ=1.0eVと低く、動作温度も1000Kと低いので、加熱の効果は大きい。電子流密度はDCで100mA/cm^2、パルス電流で80A/cm^{2}にもなる。

インプレグレネートカソードのSPring8加速器で使用している Y845 は、1100℃（1370K）で放出電流密度は8A/cm^{2}となり、4A/0.5 cm^{2}で実際の放出電流密度に近い。

また、カソードからの電子を押さえ込むためのグリッドはカソード表面から約160 μm離れたところにあり、カソードからの電子を面積から計算すると、30〜40 %止めてしまう。



各種陰極材料の動作温度と熱電子放出特性

図1.電子銃陰極材料の動作温度と熱電子放出特性

上記の表で注意して頂きたいのは、横軸が絶対温度ではない。電子放出量の計算時には、絶対温度 K(ケルビン）を使用する。摂氏℃との換算は、絶対温度 K は摂氏℃+273 で表される。

写真１は Y845 電子銃カソード-グリッドアッセンブリで、中心の丸い白い部分がカソードである。そのカソードの手前側に約 160 μ m 離れたところに、電子ビームの制御を行うグリッドメッシュがＣ型に見える金属で支えられている。

カソード表面の写真に小さな穴が見られる。この穴に詰まっている Ba が徐々の表面に析出してくるので Ba が真空中に飛ばされても、仕事関数は Ba が無くなるまで安定している。写真 2 にはグリッドの寸法を上入れた写真を示す。グリッドワイヤーの直径は約 30 μ m,ワイヤー間は約 180 μｍであった。但し、グリッドは全て均一でなく、場所により違っている。しかもカソードとグリッド間も平行でなく、傾いている場合が多い。

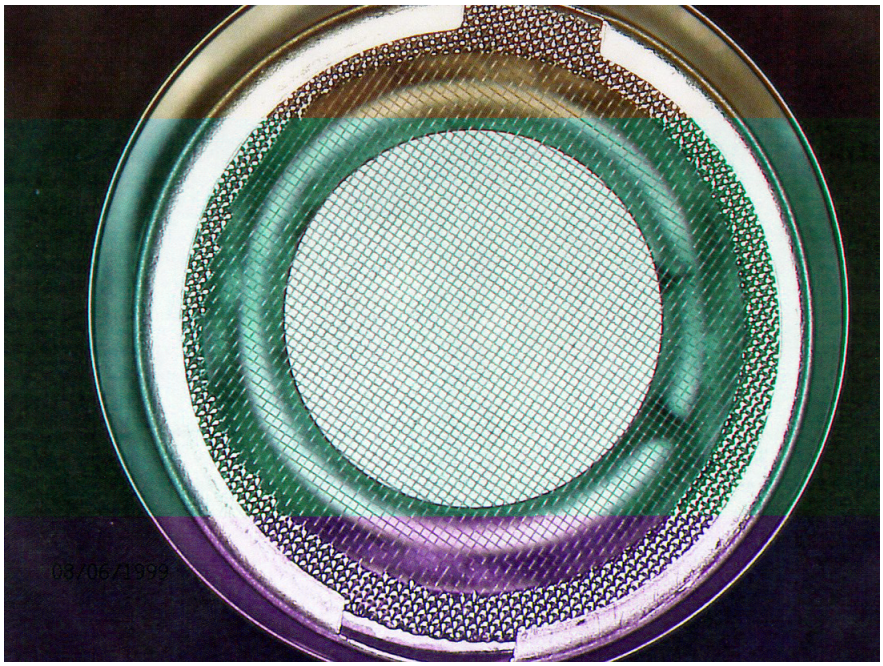


写真.１　中心にある金属メッシュの白い丸の部分がカソードである。
カソード径は直径 8mm である。また、グリッドメッシュ間隔は約 180 μ m,グリッドワイヤーの直径は 30 μ m である。また、カソードとグリッド間の距離は平均 160 μ m である。但し、これらの数値は計測箇所によって異なる。

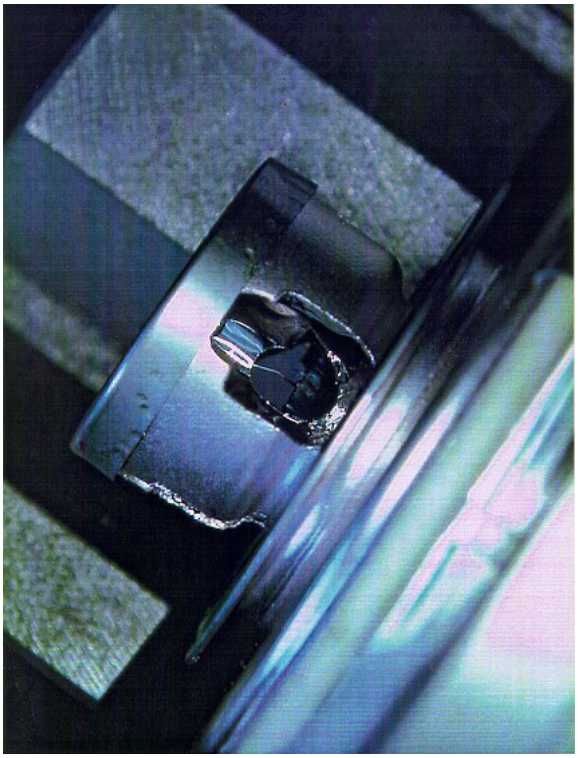


写真.2　カソードを真横から見たところ。真ん中にヒータ線が見える。

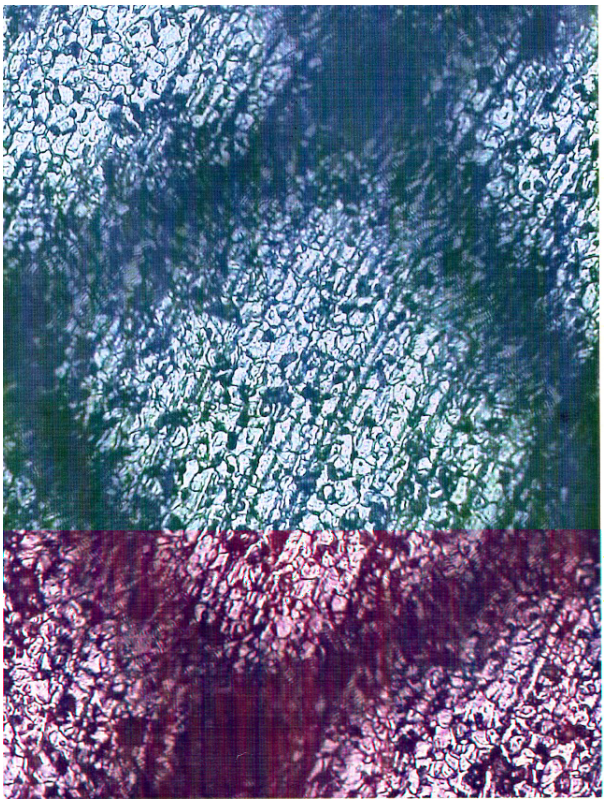


写真.3　顕微鏡でグリッド越しにカソード面を観察したところ。
カソード面は穴だらけであり、ここからヒータ加熱で析出してきた Ba によりカソード面に Ba の単原子層が形成される。含浸されている Ba の供給がなくなると、エミッション電流が減少し始める。従ってむやみにヒータパワー（温度）を上げない事が重要であ

る。

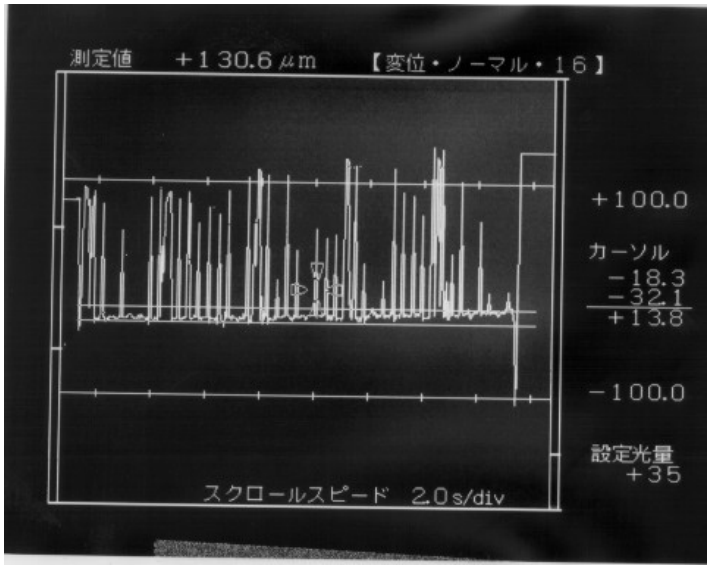


写真.4　Y845 電子銃のカソード面の傾き。レーザー変位計でカソードの傾きを計測した。この時のカソードは約 14 μmの傾斜が観測された。

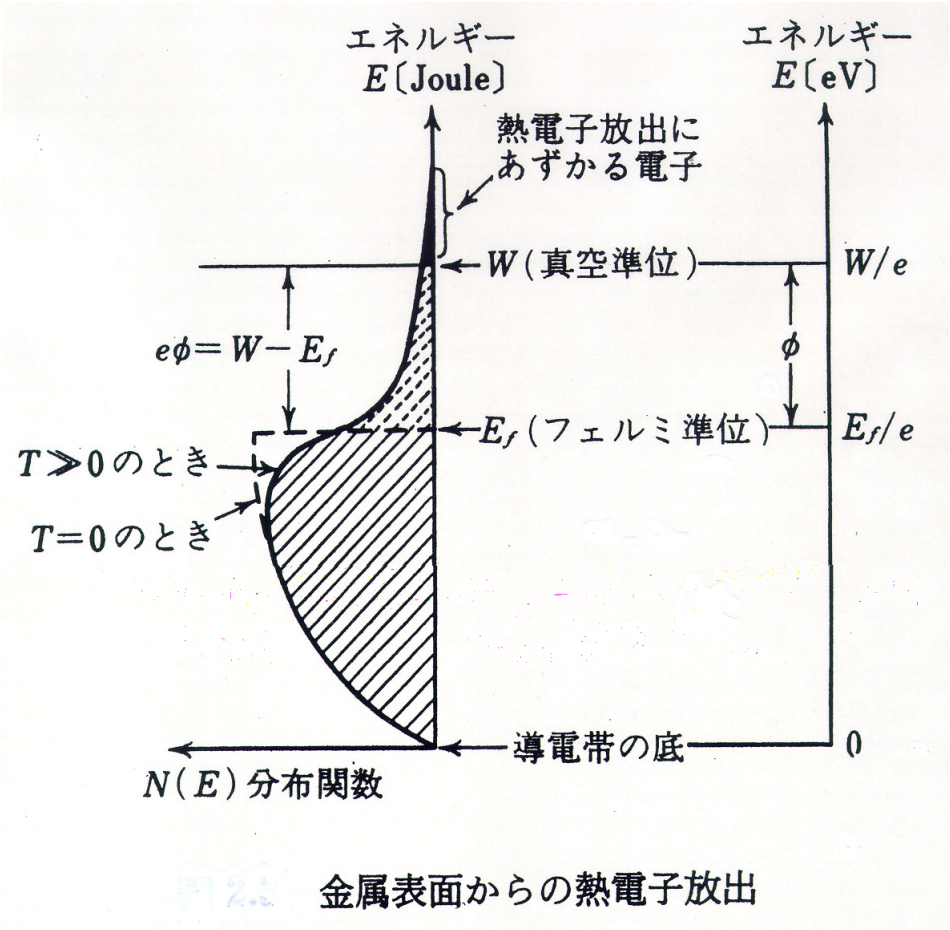


図 2.　金属表面からの熱電子放出。暖められた金属は、フェルミ・ラディックの分布側に従って電子は分布する。その中でフェルミ準位を越えて真空准位に到達するエネルギー

を得た電子のみが真空中に出て、電子ビームとなる事ができる。

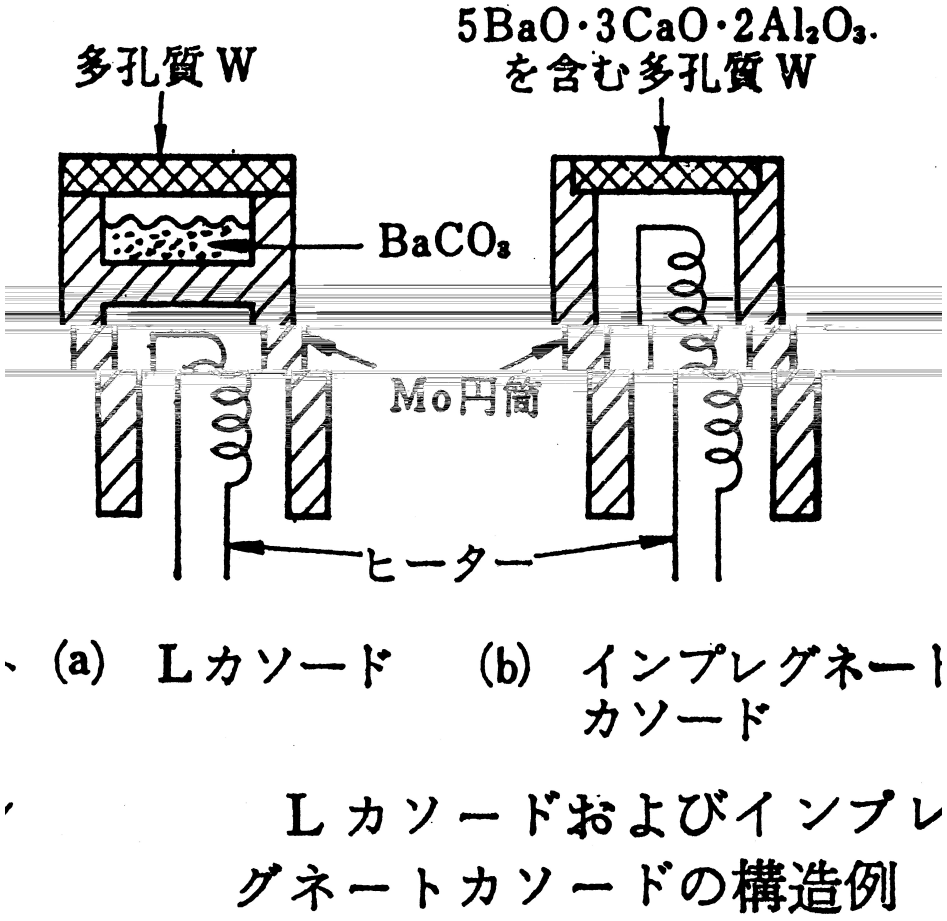


図 3.　カソードの構成。SPring8 線型加速器の電子銃は、右側のインプレグレネートカソードです。

3.カソード放出電流概算

熱電子銃に使用される金属には、熱電子放出定数（thermioniоc emission constant）という定数があり、金属の種類によらず、同じ値をもつ。また、金属から真空に飛び出すには、フェルミ準位と金属の仕事関数（φ）の和が真空準位を越えると熱電子として真空中に放出される。金属の種類により、この仕事関数が違うので、同じ温度でも放出される電流密度が変わる。この電流密度は経験式であるリチャードソン・ダッシュマンの式として、下記のように表される。SPring8 の熱電子銃には BaO が含浸されているので、仕事関数φは 1.6eV である。

$J=AT^2e^{(-\phi/kT)}$

J：電流密度（A/m^2）

A：熱電子放出定数　1.2×10^{6}（A/m^2K^2)
T：絶対温度（K）
k：ボルツマン定数（$1.38\times10^{-23}J/K$)

例えば、SPring8 の電子銃は、絶対温度 1100K(摂氏　～830 度）で、BaO カソードの仕事関数φを 1.6eV、カソード面積を 0.5cm^2 とすると、

$J=6.885\times10^{4}(A/m^2)$
従って、3.44（$A/0.5cm^2$)

カソード温度 1110K では
4.08（$A/0.5cm^2$)

カソード温度　1130K では
従って　5.7($A/0.5cm^2$)

カソード温度　1150K では
従って　7.8($A/0.5cm^2$)

カソード温度　1180K では
従って　12.4($A/0.5cm^2$)

カソード温度　1200K では
従って　16.7($A/0.5cm^2$)

となり、それぞれのカソード温度での電流となる。
この式で SPring8 電子銃で明確になっていないのは、電子銃カソードの温度である。この温度がわかっていないと、カソードで生成される電流密度がわからないので正確ではない。カソード温度は 1100K 以上にあると考えられる。この以上の温度でないと、電子銃カソードから電流が取り出せないからである。今後の課題として放射温度計で正確に、電子銃カソードの温度を計測する事である。

表 2.3　電子放出のための陰極

陰極の種類		陰極の名称	原理
純金属陰極		メタルカソード（純金属陰極） W カソード，Ta カソード等	W や Ta 等の純金属を加熱することにより熱電子を放出する．
単原子層陰極		トリウムタングステン陰極（トリタン陰極）W＋ThO_2	W の中に 1～2% のトリア（ThO_2）を入れて線引き加工したもの．
化合物陰極		ランタンヘキサボライド LaB_6単結晶	ランタンヘキサボライドを抵抗加熱または電子衝撃して，熱電子を放出する．
酸化物陰極	コーディング形	オキサイドカソード（酸化物陰極） (Ba・Sr)O 又は（Ba・Sr・Ca)O	Ni のベースメタルに（Ba・Sr)CO_3 又は(Ba・Sr・Ca)CO_3 を被覆し加熱分解し酸化物にしたもの．
		トリア・カソード(トリア陰極，ThO_2陰極) W メッシュ＋ThO_2	W の上に酸化トリウムをコーティングしたもので，ThO_2 の還元された Th が不純物準位を呈して，BaO の場合と同じ半導体準位になる．
	含浸形・インプレグネート形	マトリックスカソード（含浸形 Ba-Ni 陰極）（多孔質 Ni マトリックス)＋(2 元又は 3 元の炭酸塩)	多孔質の Ni ベースに（Ba・Sr)CO_3 などを含浸させたものを加熱分解したもの．
		インプレグネートカソード（含浸形 Ba-W 陰極） 多孔質 W＋BaO・CaO・Al_2O_3 又は BaO・CaO・BeO 又は BaO・WO_3・CaO	多孔質のタングステン本体に BaO・CaO・Al_2O_3（塩基性アルミン酸塩）などの Ba 源を溶融含浸させたもの．
		トリウム・インプレグネート・カソード（含浸形トリウム W 陰極） 多孔質 W＋ThO_2	多孔質のタングステンに酸化トリウム ThO_2 を溶融含浸したもの．
	焼結形・シンター形	モールド・カソード（焼結形 Ba-Ni 陰極）　(Ni 粉末)＋2 元又は 3 元炭酸塩＋還元剤（Si,Zr etc.）	Ni 粉末と（Ba・Sr)CO_3＋還元剤を混合しこれらの粉末をプレス，焼結したもの．
		プレス・カソード（焼結形 Ba-W 陰極）　(W 粉末)＋(Mo 粉末)＋BaO・CaO・Al_2O_3	W 粉末（＋Mo 粉末）に BaO・CaO・Al_2O_3(塩基性アルミン酸塩)等の Ba 源粉末を混合，プレス，焼結したもの．
		サーメット・カソード（焼結形） W（又は Mo）粉末＋ThO_2	焼結形陰極の一種で酸化トリウム（トリア）ThO_2 を含む W 又は Mo 焼結体をカソードにしたもの．
電界放出		フィールドエミッションカソード 針状，線状の W または Ta	固体表面に約 10^7V/cm 以上の強電界を加えると，トンネル効果によってエミッションが出る．

図 4.　SPring8 では酸化物陰極の分類に属する含浸型カソードを使用している。このカソードは電子銃の周辺で発生するイオン等の衝撃に強いので、最近の熱電子銃に用いられるのはこのタイプである。

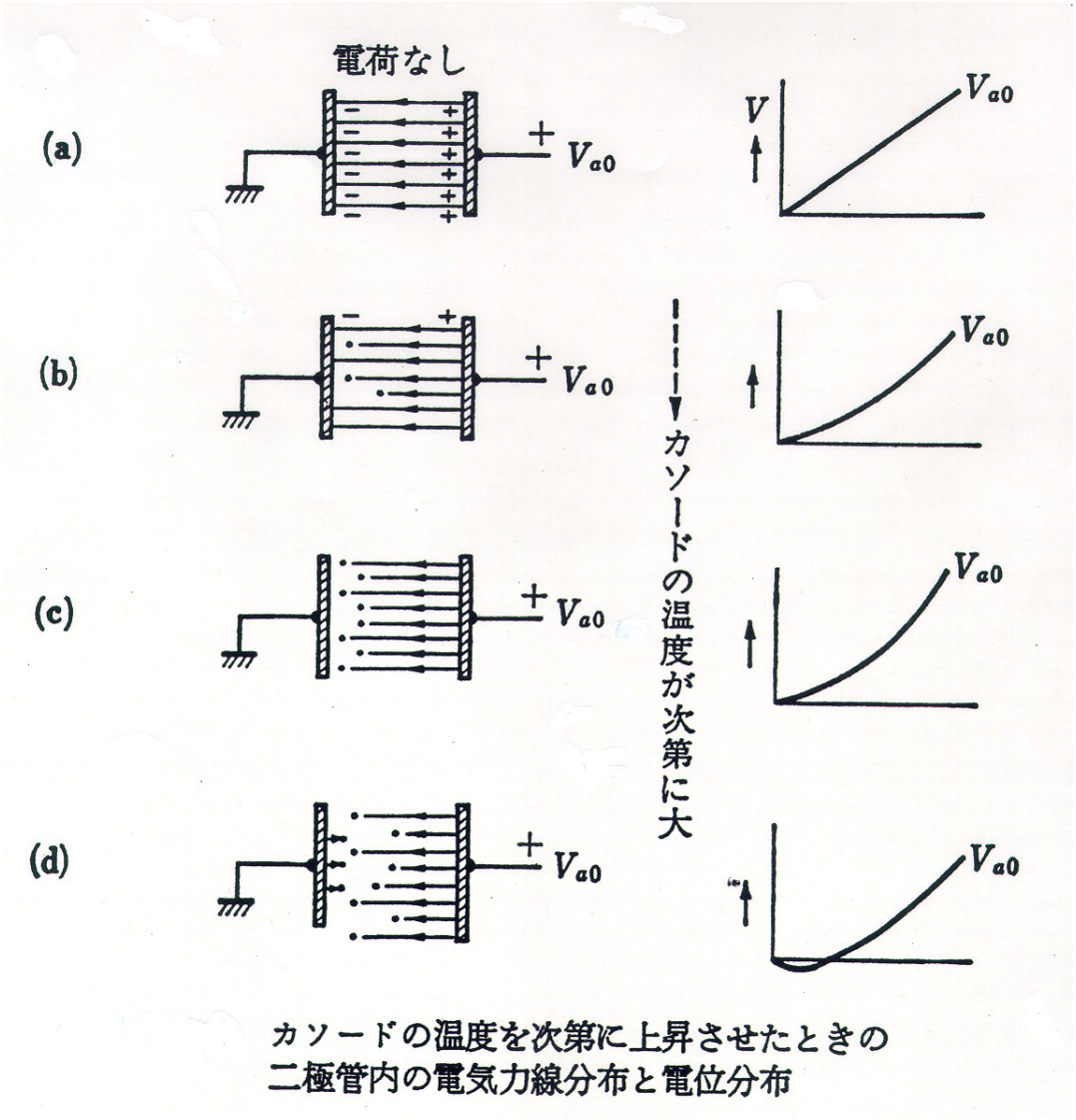
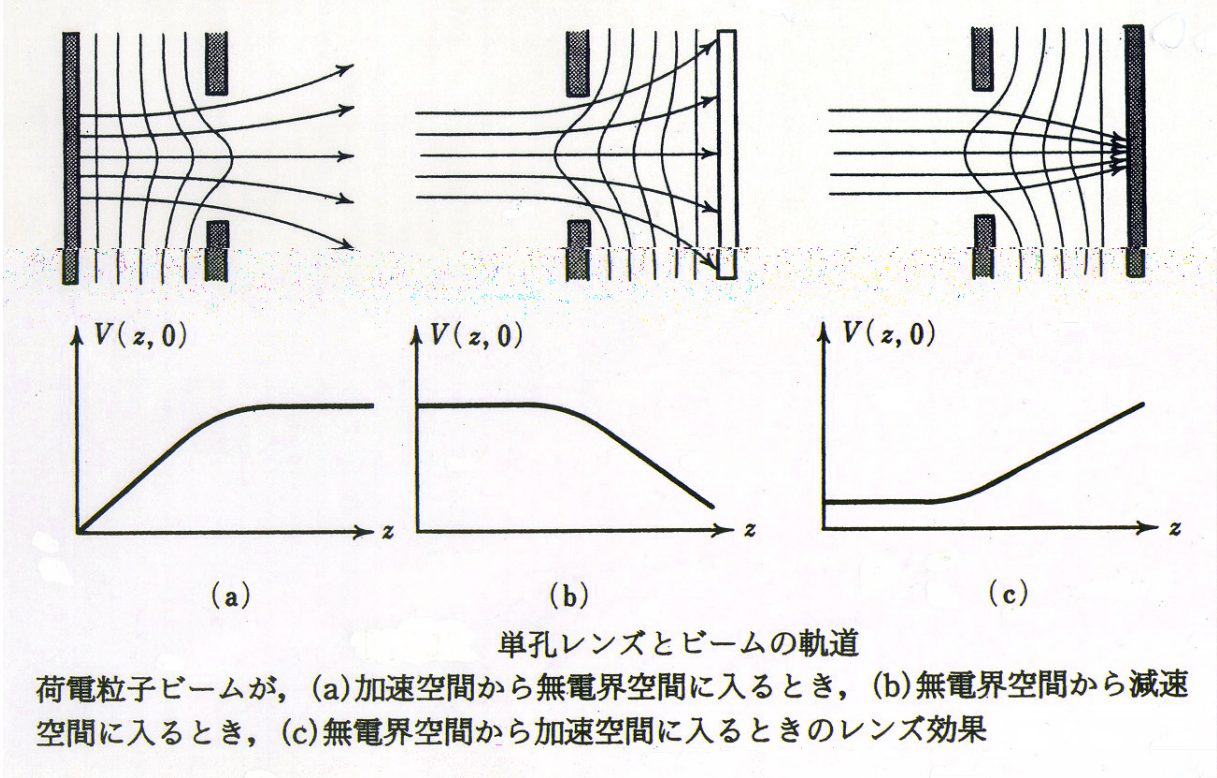


図 5.　空間電荷の説明。

*　空間電荷とは空間に定常的に電荷がある分布で存在している時、このような空間に分布している電荷を空間電荷という。したがって大量の電子がある空間に存在していると、そこの電位は回りのアース電位より低下する。従って電子銃のように電子の供給量によっては、ある瞬間を見ると最も電位の低下している場合がある。このような状態になって電位が電子の存在している場所が低い時には、空間電荷効果により次々と発生する電子の数が低下する効果が見られる。これを空間電荷効果という。この図では電子銃カソードは左側のプレートになります。（a）の状態では電源電圧を上昇させると、直線的に電極の間の電圧は上がります。（b）(c)　（d）の順で電子が空間に飛び出してくると電位分布が曲線になってくる。*



単孔レンズとビームの軌道

荷電粒子ビームが，(a)加速空間から無電界空間に入るとき，(b)無電界空間から減速空間に入るとき，(c)無電界空間から加速空間に入るときのレンズ効果

図 6.　電子銃印加電圧による電界レンズ。左側のプレートが電子銃で、右側がアノードである。アノードホールがあるために電界（等電位面）のシミだしがあり、この等電位面に垂直に電子は加速されるので、上記のような軌道となる。このようなシュミレーションは Egun という軌道解析ソフトがあり、通常、このソフトで計算して電子銃を設計する事が多い。

4.電子銃制御方法の種類

電子銃の制御方法にはグリッドにコントロールパルスを送るグリッドパルサーとカソードにパルス電圧を送るカソードパルサーがある。しかし、最近の傾向として、短いパルス電流の生成が望まれる事が多いので、グリッドをアースに接地して、カソードにパルス電圧を伝送するカソードパルサを使用している加速器施設が多い。グリッドパルサーと名前はしているが、実体はカソードパルサとなっている。SPring8 電子銃システムは図 7 に示す。

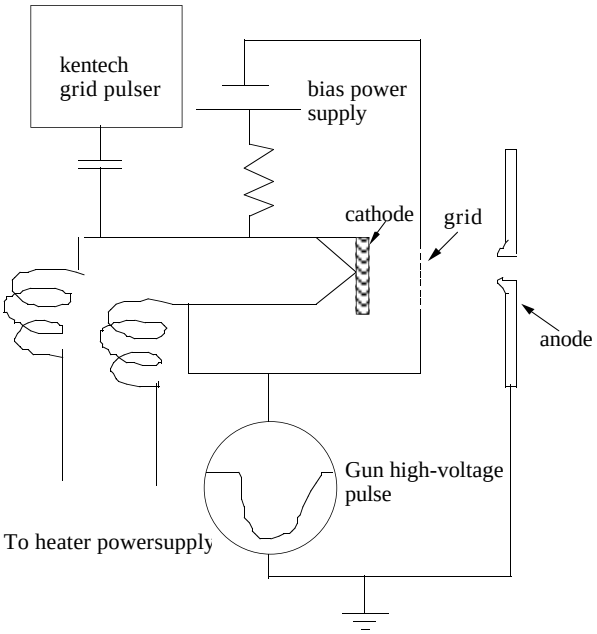


図 7.　SPring8 電子銃グリッドパルサーシステム。

アノードがア-スである。それに対して、グリッドとカソードなどは-180kV の上に絶縁トランスを介して設置されている。負のパルス波形を示しているのが、電子銃パルストランス２次側パルス電圧である。バイアス電圧はカソードに制限抵抗を通してプラス電圧を印加する。ケンテックグリッドパルサー出力は、バイアス電圧のパルサー流れ込みを防止するため、高耐圧の高周波用コンデンサで直流的にブロックしている。但し、パルス電圧に対しては波形の鈍りを少なくするパラメータを選んでいる。

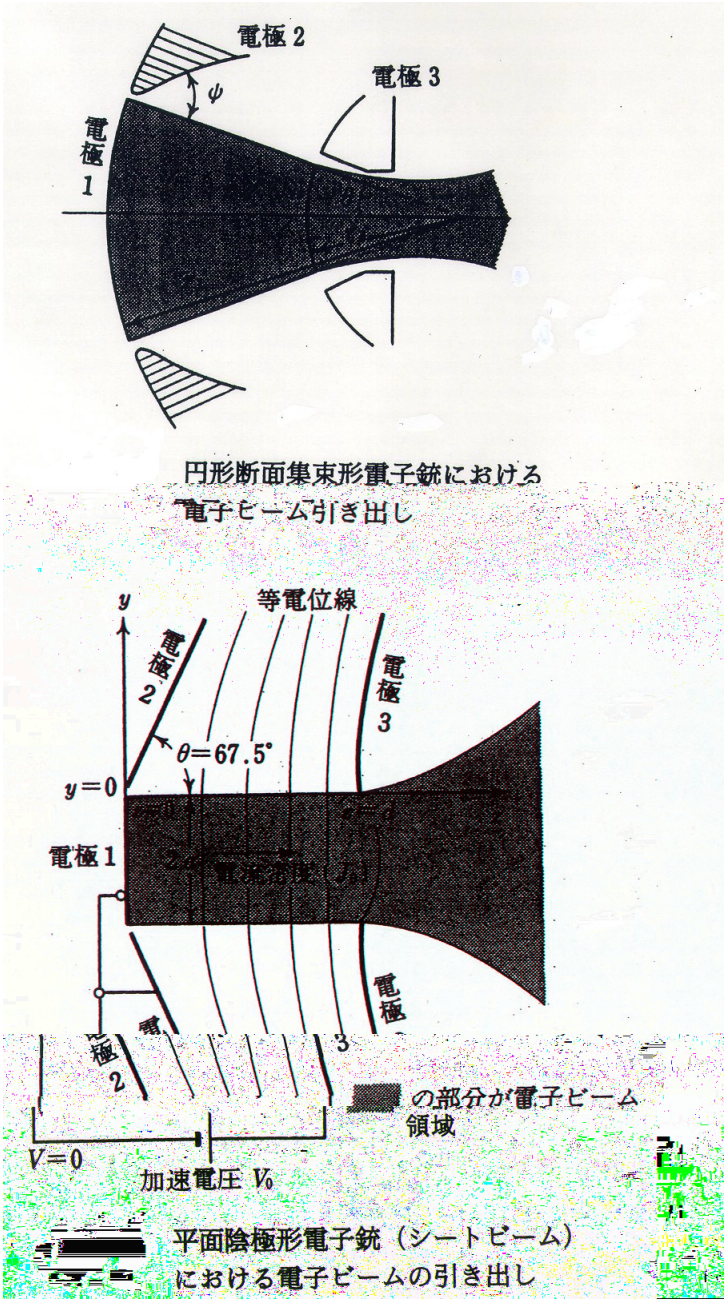


図 8.　電子銃の形状の違い。

*　上がカソードから大電流を発生させるときの形状で電子銃カソード及びアノードが曲がっている。（大電流用）。下は SPring8 で採用している形状に近い。アノード形状を変えてアノードから出てきた電子ビームがある程度集束するようになっている。（中、小電流用）*

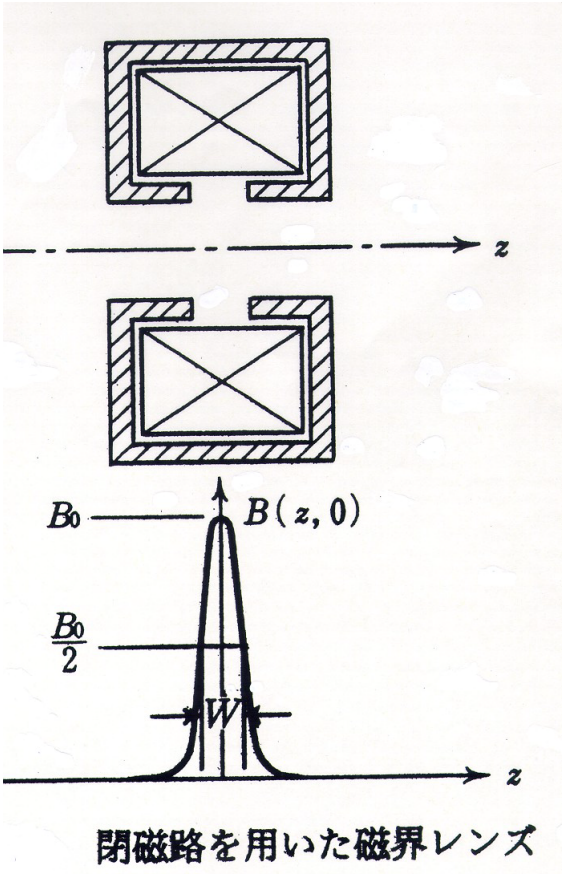


図 9.　電磁収束レンズ。

*　電磁収束レンズは、線型加速器で大電流を出射する必要がある時に多く用いられる。この磁場調整により、電子銃の電子のフォーカスポイントを比較的自由に変える事ができる。*

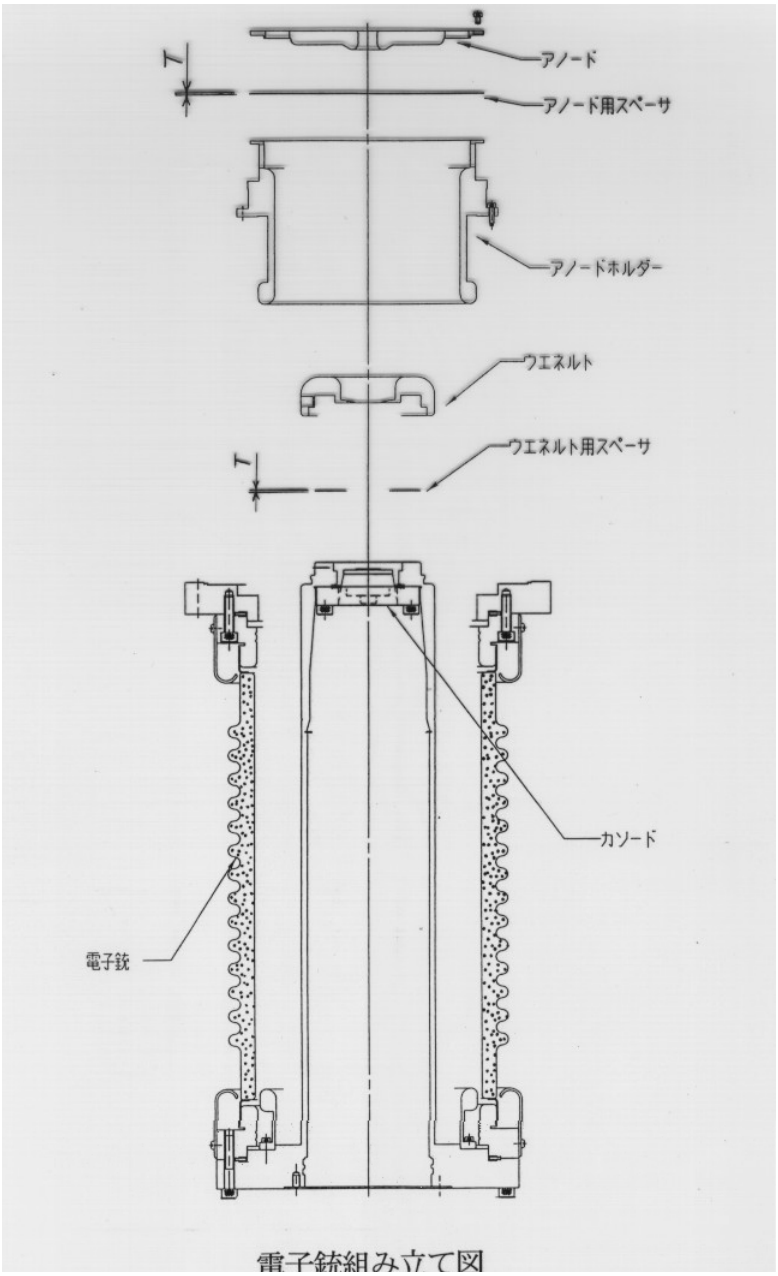


図 10.　SPring8 の電子銃外観。

電子銃の基本構成は電子銃絶縁碍管（セラミック）、電子銃を真空中にサポートしている電子銃ステム、電子ビームの軌道を調整するウエネルト、電子ビームをカソードから引き出す電界を成形しながら、電子ビームを通過させる穴のあるアノードで構成される。

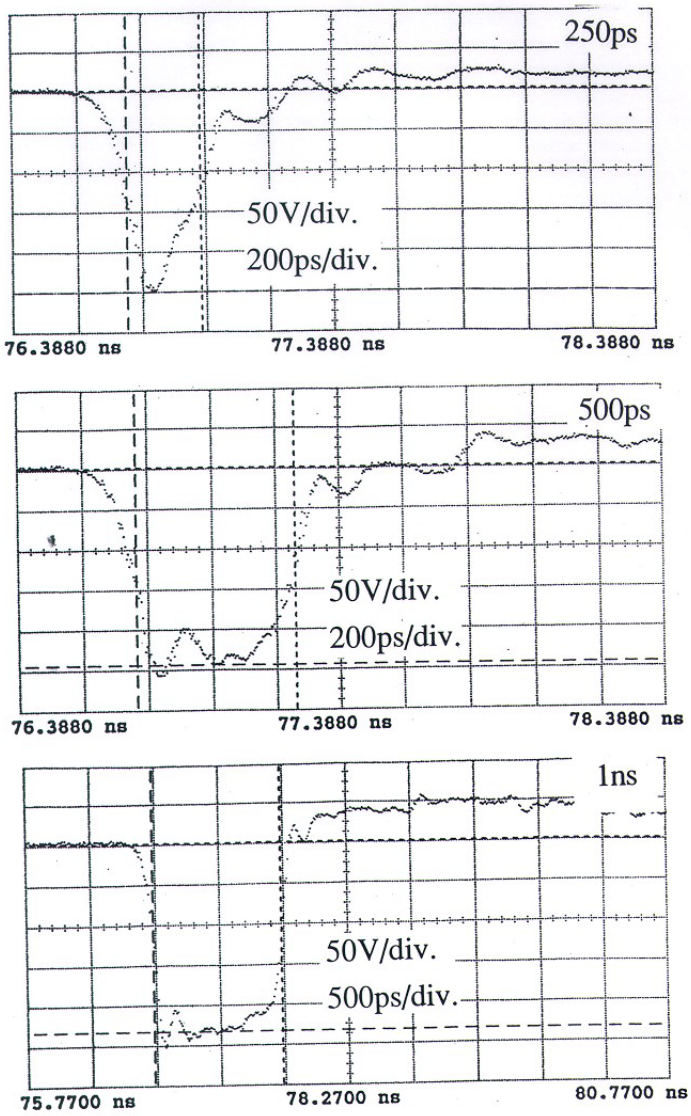


図 11.　電子銃ドライブ用グリッドパルサー波形。

*　電子銃をドライブ　ｷるグリッドパルサーにはパルス幅には40ns,1ns,500ps,200ps,1 μ s の 5 種類がある。例えば、200ps,500ps,1ns 幅のグリッドパルサーの波形を示　ｷ。*

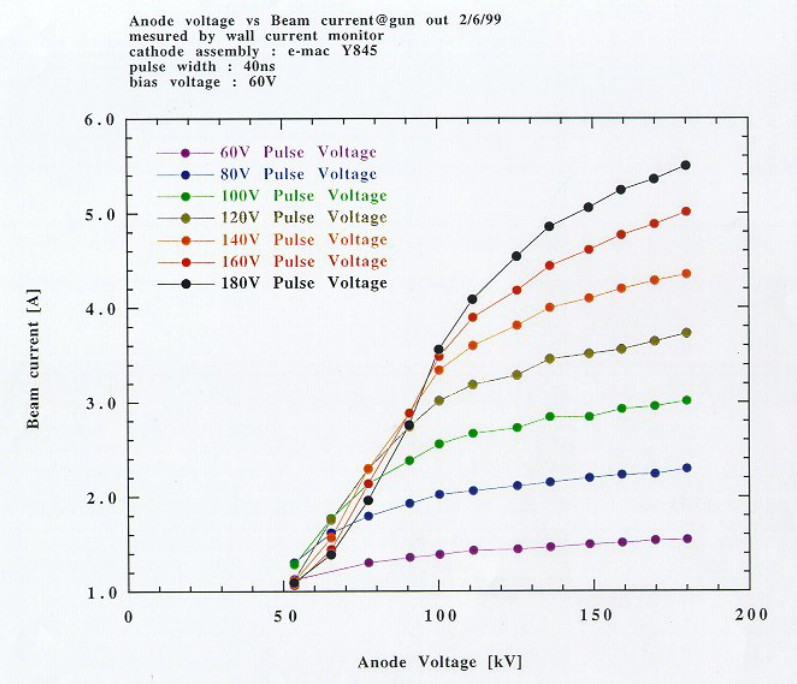


図 12.　アノード電圧　ー　エミッション電流特性（40ns beam）。

グリッドパルサー電圧と電子銃アノード電圧を増加させると、電子銃カソードからのエミッション電流は増加する。アノード電圧とともにエミッション電流が増加する傾向があるのは、カソード面への電界しみ込みなどによるフィールドエミッション電流が疑われる。

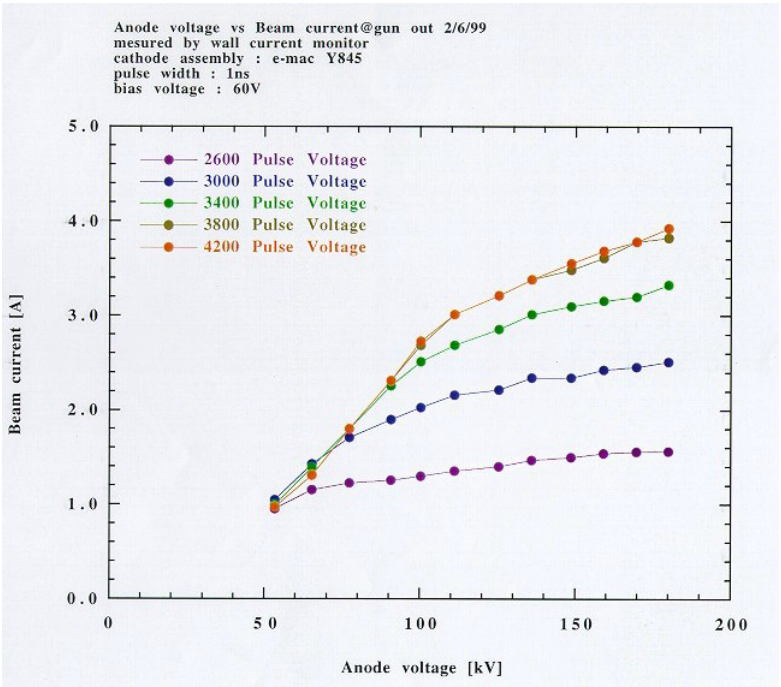


図 13.　アノード電圧　ー　エミッション電流特性（1ns beam）。

図 13 と同様である。但し、1ns beam で測定した。

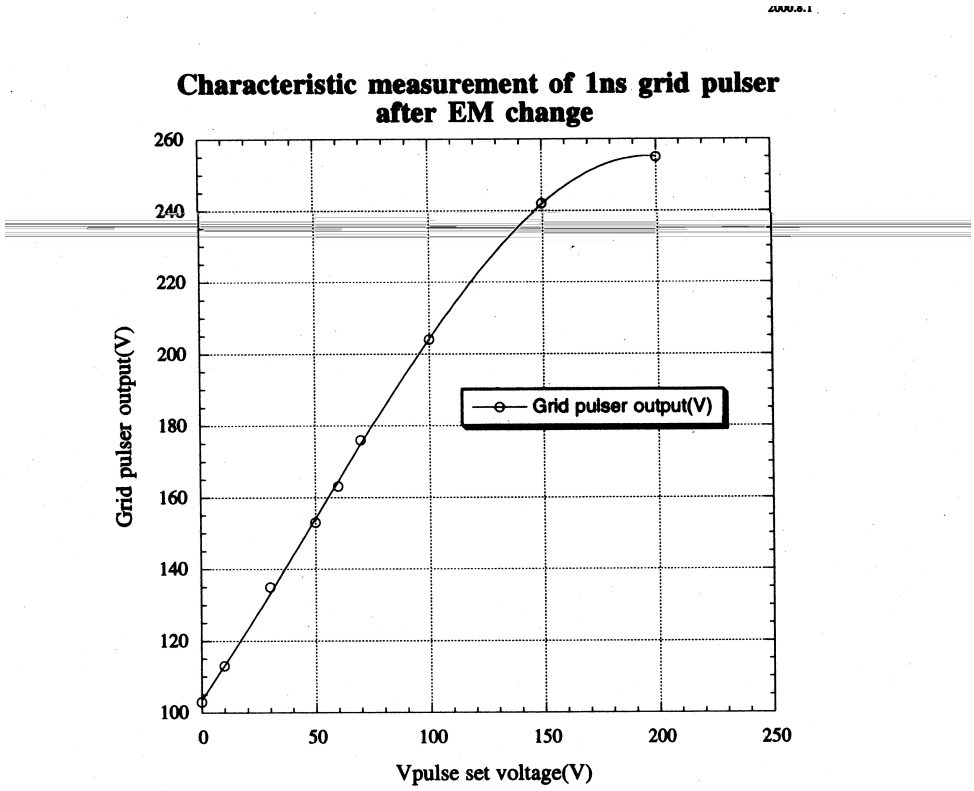


図 14.　1ns grid pulser パルス電圧と WS GUI 設定電圧比較
1ns gridpulser のパルス電圧と GUI 設定電圧との関係はデータのようになり、設定と実際のパルス電圧の違いもある上に、設定値が高くなると比例しなくなる。

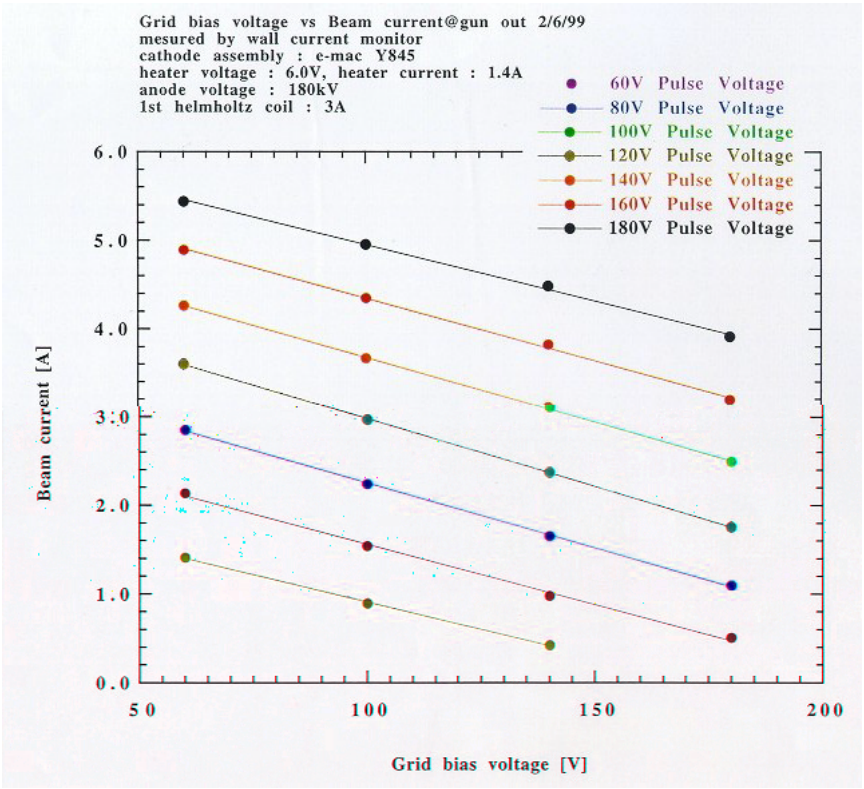


図 15.　グリッドパルス電圧　ー　エミッション電流特性（1ns beam）。

バイアス電圧とビーム電流との関係で、バイアス電圧を減らすほどビーム電流は増加する。但し、カットオフ電圧の 60V 以下になると、グリッドパルサーのパルス電圧に関係なく、電子銃のアノード電圧で引き出された電子ビームが極端に増加する。

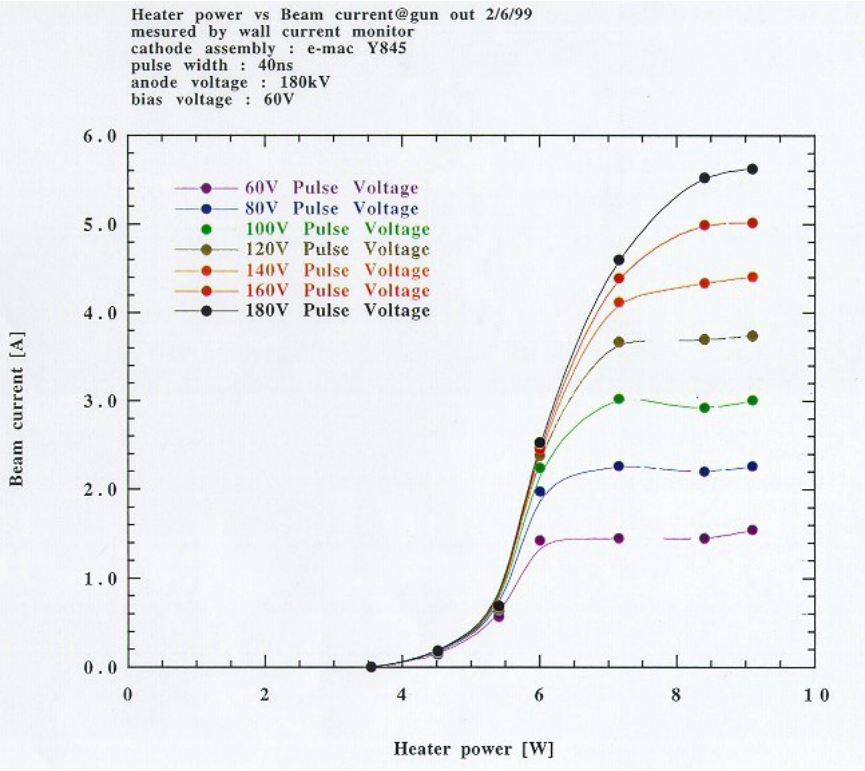


図 16.　ヒータ電流　ー　エミッション電流特性（1ns beam）

設定変更後ヒータ電力によるカソード温度が安定するまでの約 10 分程度待ちながらヒータ電力を上げ、ビーム電流を測定した。これより、ヒータ電力 8 w程度でグラフにさちりがある。このヒータ電力を通常供給している。

5.電子銃ヒータ温度の概算

電子銃のヒータ温度は、ステファン・ボルツマンの法則から絶対温度の 4 乗に比例する。

$W=\sigma T^4$　　W：ヒータ電力（W）、T：絶対温度（K)、

σ：ステファン・ボルツマン定数（$5.67\times10^{-8}W/m^2K^4$）である。

SP8 線型加速器で Y845 電子銃ヒータに供給している電力 8W で、カソード面積は $0.5cm^2$ である。電子銃に供給している電力から計算すると、絶対温度が 1296K となり、1023℃のカソード温度という事になる。

6.電子銃エミッション電流の概算

電子銃は 3 極管である。3 極管のグリッドをアノードに見立てて計算を行う等価 2 極管という考えがある。この考え方ではグリッド部をアノードに見立てると、3 極管の増幅定数 μ とアノード電圧 V_p、グリッド電圧 V_g 及びカソードーアノード間の等価電圧 V_d の関係は下記のようになる。

$V_d=(V_g+V_p/\mu)$ ------(1)

μ：増幅定数
V_g：グリッド電圧
V_p：プレート電圧　である。

そのカソードから放出される電流密度及び電流は、チャイルド・ラングミュアの式から導く事ができ、
$J_p=(4\ \varepsilon\ _0/9)\ (2e/m)^{1/2}(V_d^{3/2}/d_{ca}^2)=2.33\times10^{-6}*V_d^{3/2}/d_{ca}^2$ (A/m^2) から
$I_p=J_p*S_{cathode}=2.33\times10^{-6}*S_{cathode}*V_d^{3/2}/d_{ca}^2$ (A)　---(2)　となる。
但し、d_{ca} は cathode- anode 間距離、$S_{cathode}$ は電子銃カソードの面積（0.5cm^2) である。

(1) 式の電圧 V_d を (2) 式のチャイルド・ラングミュアの式に入れると、
$I_p=J_p*S=2.33\times10^{-6}*S_{cathode}*(V_g+V_p/\mu)^{3/2}/d_{ca}^2$

上の式に空間電荷効果を含めと
$I_p=J_p*S=2.33\times10^{-6}*S_{cathode}*((V_g+V_p/\mu)/1+(1/\mu)(1+(4a/3b)))^{3/2}/d_{ca}^2$　---（3）
のようになり、I_p の電流が電子銃から流れる。

また、$V_d=(V_g+V_p/\mu)$ の関係より、V_p=180kV, グリッドパルス電圧 0V、バイアス電圧が約-60V の時には、チャイルド・ラングミュアの式の V_d が 0V になり、アノードにエミッション電流が流れなくなる。この電圧が cut off 電圧である。

また 3 極管の増幅率 μ は、
$\mu=((2\pi\ d_{ca}/a)-\ln(\cosh(\pi S)))/\ln(\coth(\pi S))$ で表され、r_g は grid wire の半径で 20 μm、cathode-anode 間距離は d_{ca}=32mm, grid wire の間隔が a=160 μ m とする。
従って $S=2r_g/a=0.25$ より、$\pi S=0.785$ となる。ここでの S は面積ではない。

また、三角関数の公式で $\sinh x=e^x-e^{-x}/2$, $\cosh x=e^x+e^{-x}/2$ より
$\coth x=e^x+e^{-x}/e^x-e^{-x}$　である。

従って、増幅定数 μ は、

μ=1256/0.422 で、約 2974 となる。

電子銃グリッドパルサーは、実際のパルス電圧出力と WS による GUI セット値とは違っている。図 14 にセット値と実際のパルス振り込み電圧との対比を示す。バイアス電圧を-60V, グリッドパルサーの実振り込み電圧を 245V とすると (この状態はグリッドパルス電圧がバイアス電圧 60V を差し引いた 185V 振り込んでいる時に等しい）、（3）式から I_p は

VME のグリッドパルサー設定電圧 180 V（実際のグリッドパルサー電圧では 245V）で I_p=4.36A となる。

同様に、グリッドパルサー設定電圧 100V では、バイアス電圧を差し引いたパルス電圧 Vg が 145V となり I_p=3.34A の電流がえられる。

さらににグリッドパルサー設定電圧 60V では パルス電圧 V_g が 105V になり、
I_p=2.3A　の電流がえられる。

図 15 のバイアス電圧-エミッション電流特性からバイアス電圧 60 V のところを見るとわかるが、VME のグリッドパルサー設定電圧が 180 V、100 V、60 Vの時にはそれぞれ 5.5A, 3A, 1.4A である。上記の計算では、それぞれ 4.36A, 3.34A, 2.3A であった。この出力電流の違いは、グリッドにトラップされるエミッション電流で、これはグリッドの面積から全体の約 30%になる。これで理論値を補正すると、3.85A, 2.1A, 0.98A となる。複雑な条件から鑑みても比較的良く一致していると考えられる。

7.電界カソード入り込みによるカソード電流の増加

カソード面にはアノードーカソード間に印加されたパルス高電圧により、大きな電界が発生する。この電界が一部カソードに入り込み、カソード面に作用して仕事関数の低下が生じる。図 12、13 のようにパルス高電圧の増加とともに、カソードからのエミッション電流が増加する。
電界により仕事関数が低下するときの計算は
$\Delta\Phi = \sqrt{eE/(4\pi\varepsilon_0)}$　である。

例えば、SPring8 の電子銃に加えられる電圧が 100kV と 180kV のときには、仕事関数が約 0.02eV 低下し、電子銃からのエミッション電流が増加する。この値をリチャード・ダッシュマンの式に導入すると、100kV と 180kV の高電圧の違いにより 0.8A 程度電流が増加する。この計算結果は図 12、13 の結果と一致している。

次の図 16 では電子銃ヒータ特性を示しており、ヒータパワーが 8 Wではヒータパワー

の電圧変動が少し生じても、エミッション電流には影響がでにくいところで使用している事が確認できる。

また、カソードからは電流量の上限は、リチャードソン・ダッシュマンの式で導き出される電流量以上の電流は取り出す事はできない。ヒータパワー（温度）をむやみに上げると、カソードの穴に含浸されている Ba が真空中に多量に析出され、電子銃のカソードに Ba がなくなってくる。温度を上げないと電子銃からのエミッション電流が取り出せなくなる。しかしカソード温度には上限があり、使用不可能となってしまう。

8.電子銃パービアンス

実機でのパービアンスはアノード電圧ーemission 特性を取得したときの、0.08×10^{-7} perv.である。この値は電子銃電極形状から計算した結果と比較的良く一致している。

パービアンスは、下記のように記述でき、

$I_p=GV_p^{3/2}$

但し、V_p：アノード電圧

I_p：アノード電流

G ：パービアンス　　である。

SPring8 線型加速器の電子銃の形状から、パービアンスは、下記のように記述できる。

$G=2.33\times10^{-6}Scathode/d_{ga}^2$

Scathode：電子銃かソート面積

d_{ga}：電子銃カソードーアノード間距離

$G=2.33\times10^{-6}*0.5\times10^{-4}m^2/(32\times10^{-3})\ m^2$

$=1.14\times10^{-7}$　perv. となる。