

RESULTS OF ELEMENTARY EXPERIMENT OF THE THERMIONIC RF GUN

Ryuichi MATSUDA*, Masaharu WATABE*, Hitoshi KOBAYASHI*, Isamu SATO*

*Takasago R&D Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

2-1-1, Shinhamma, Arai-cho, Takasago City, Hyogo Pref. 676

*KEK, National Laboratory for High Energy Physics

1-1, Oho, Tsukuba City, Ibaragi Pref. 305

Abstract

For the RF gun using a thermionic cathode, we have to heat only a part of the RF cavity. Generally, a choke structure or thin wires are used both for thermal insulation and for RF contact. In our design, the thermal cathode is attached on the end plate of the cavity without any gap between the cathode and the end plate of the cavity to prevent the distortion of the electric fields at the cathode edge. The cathode is heated over 1100°C with 100 W input electric power.

RF熱電子銃の予備実験結果

1. はじめに

RF電子銃はRF空洞内に陰極を配置するもので、陰極から放出された電子は、RFの高電界によって一気に高エネルギーまで加速されるため、低β領域で問題となる空間電荷効果によるエミッタンス増加が低く抑えられる。またRF電子銃から出た電子のエネルギーは単調に変化しているため、α-マグネットによってエネルギーセレクションを行えば、十分加速されなかった一部の電子は排除され、RFの効果によるエミッタンスの増加も抑えられる。このため特に低エミッタンスでエネルギー拡がりの小さい電子ビームが必要とされる自由電子レーザーやリニアコライダなどの電子ビーム源として最適であり、各地で盛んに研究が行われている。

KEK PF入射器系においても数年前よりRF電子銃の開発が進められ、グリッド付きの熱陰極が開発されているが、ビームを出すまでには至っていない。¹⁾このRF電子銃は空洞の一部である陰極端板が交換可能であるので、陰極端板のみを独立に開発することができる。空洞は円筒形の単空洞で、共振周波数は2856MHz付近に調整され、微調整可能である。

本研究では比較的装置の構成が単純な熱電子放出方式の陰極端板を開発することを目標とした。陰極材料にはBI（バリウム含浸型タングステン）陰極を採用した。熱陰極の場合、全て金属で囲わ

れたRF空洞の一部分を加熱するため、陰極と空洞のRFコンタクトを満足させながら、熱歪みや熱拡散をできるだけ抑える工夫が必要となる。以下、これを踏まえて熱陰極端板の設計、製作、昇温実験を行ったのでその結果について報告する。

2. 熱陰極端板の基本検討

はじめに陰極について述べる。BI陰極の仕事関数は一般に1.8~2.2eVで、他の材料よりも小さい。リチャードソンの式、

$$J_0 = AT^2 \exp(-e\phi / kT) \quad (1)$$

より、温度と電流密度の関係をプロットすると図1の実線のようになる。例えば陰極が1100°Cの時の電流密度 J_0 は5.2A/cm²が得られる。（仕事関数 $\phi=2.0$ eV、係数 $A=60$ A/cm²K²とした。eは電子の電荷[C]、kはボルツマン定数[J/K]）またRF空洞内では陰極端板中央で40MV/mもの高電界が発生するので、電界によるショットキー効果、

$$J = J_0 \exp(440.3\sqrt{E} / T) \quad (2)$$

により、陰極が1100°Cの時の電流密度 J は39A/cm²が得られる(図1破線部)。実際は陰極自体の抵抗や空間電荷制限によって制限されると思われる。例えば赤外域の自由電子レーザー発振には10A/cm²程度必要であり、陰極寿命なども考慮すると動作温度は1100°C程度を目標にするとよいことがわかる。熱陰極材料の仕事関数が低く、高温での使用にも

長時間耐えられ、また空洞内の電界強度を高くできればさらに大きな電流密度が得られることになる。今後の材料開発に期待したい。

次に陰極周りの構造について述べる。熱は熱伝導、輻射によって拡散する。熱伝導を式で表すと、

$$q = -\kappa \text{grad} T \quad (3)$$

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div} q \quad (4)$$

ここで q ;熱流束[W/m²], T ;温度[K], t ;時間[s],

κ ;熱伝導率[W/mK], c ;比熱[J/kgK], ρ ;密度[kg/m³]

熱伝導を抑えるには熱の経路を長くし、断面積を小さくし、熱伝導度の小さい材料を用いるとよい。次に輻射による熱拡散を考える。黒体の熱流束は $q = \sigma T^4$ (σ ;ステファン-ボルツマン定数[W/m²/K⁴])で表されるが実際は表面の放射率や形態を考慮する必要がある。輻射による損失を防ぐには表面での吸収係数の小さい材料、即ち鏡面に近い表面を持つ材料を発熱体の近くに置き、その材料と発熱体との温度差が小さくなるようにするとよい。以上のことや製作性を考慮して陰極端板の構造を図2のように決めてみた。また熱膨張によってRF空洞の共振周波数がシフトすることが考えられるため、温度差が大きい境界は材料同士の接触面を軸方向に対して45°にし、歪みを逃がす構造とした。上の式から温度分布を推定できる(図3)。計算はヒータパワーを100Wとし、陰極温度を1000°C、空洞温度を30°C、材料同士の接触抵抗による温度差は経験値によった。材料はその温度で十分耐えられ、しかも熱伝導度の小さいものを選択した。セラミクスは優れた熱絶縁材料であるが、温度勾配が激しいと内部に発生する熱応力によって破壊してしまうので、温度勾配の比較的少ない位置に配置し、昇温時も温度勾配があまり生じないように注意が必要である。また電気絶縁材料なのでRF入力時は表面をメタルコートする。表1に材料特性を示す。

表1 材料特性

材料	モリブデン	マイカ系セラミクス	
密度 ρ	10060	2590	kg/m ³
熱伝導度 λ	105	1.7	W/mK
比熱 c	0.302	0.80	kJ/kgK
熱膨張率 α	6.7	8.5*10 ⁻⁶	/K
電気抵抗率 ρ_e	41.2	1.8*10 ¹⁵	$\mu\Omega\text{cm}$
	@1200°C	@室温	
メーカー	東邦金属	住金ホトンセラミックス (ホトベール)	

最後にヒータであるが、数W程度と予想される輻射と熱伝導の計算誤差を考慮すると、ヒータパワーは少なくとも100W必要である。接触抵抗が正確ではないがこの値はかなり大きい。これは図2を見てわかるように、加熱部の体積が大きくなってしまったためである。陰極には既製品のヒータ付きBI陰極(スペクトラマツ社製)を用いている。単体では20W以下で1100°Cまで昇温することができるが、RF電子銃の場合、陰極も空洞の一部であるため電氣的に接触していなければならない、この接触部分から熱が逃げる。これを補うために陰極の外側にタンタル線を巻いて作ったヒータを設置した。一般に陰極からの熱逃げを防ぐ方法として、陰極との接触面積を少なくするために、タングステンのワイヤーをトロイダル状に巻いたものを陰極と空洞面の間に設けたり、チョーク構造として空間的には離れているが電氣的には金属面と同じにして熱拡散を防いでいる。しかし陰極周りにタングステンワイヤーのようなフラットではない面があると、電場に乱れが生じ、電子ビームへの悪影響が予想される。またハイパワーのRFを入力した場合、チョーク構造内でマルチパクタが生じやすいなどの欠点がある²⁾。よってここでは陰極周りの電場に乱れがないことを重視し、直接陰極を空洞面に接触させた。

3. 実験

上で述べたコンセプトに従い、実際に陰極端板を製作し、温度、温度分布、熱歪み量、入力パワー等の評価を行った。実験装置の構成を図4に示す。空洞とほぼ同形状の模擬空洞、真空ポンプ(ターボ分子ポンプ)、ヒータ用直流電源、測定器系(熱電対、放射温度計、レーザ変位計、電離真空計、ペンレコーダ)からなる。熱電対は陰極側面に1ヶ所、端板金属面に2ヶ所、もう一方の端板に1ヶ所取付け、温度の絶対値を測定した。温度分布の測定は放射温度計(AVIO製)を用いた。放射温度計は物体から出る赤外線と物体の放射率から温度を換算し表示するものであるため、ある温度での放射率を正確に入力しなければ温度の絶対値は測定できない。ここでは放射率を0.1と仮定した。出力された温度は相対値である。測定は陰極の正面に取付けられた石英ガラスの窓を通して行った。熱歪量の計測は同じ石英ガラスを通して、

レーザ変位計(KEYENCE製)を用いて行った。変位計の分解能は8 μm であった。

結果を図5に示す。セラミクスを用いたので約2時間かけて昇温した。このときのヒータへの入力は166Wであり、電流値を一定とすると温度は一定に保たれた。ただし熱電対が3ヶ所についているため、そこから熱拡散がある。RF入力の際には空洞内に熱電対は付けないので、あと約20W程度はパワーを低くできると思われる。熱歪み量は約158 μm であった。この量は陰極部分が空洞内に押しだされたビーム軸方向の量である。温度が一定に保たれると歪み量も一定になった。一概には言えないが共振周波数のシフト量を3MHz/mmとすると約500kHzのシフトとなり、許容範囲内といえる。

温度分布はほぼ同心円状となった。端子があるためTaヒータはC字型になっており若干温度分布が歪む原因となった。また陰極の温度分布を拡大す

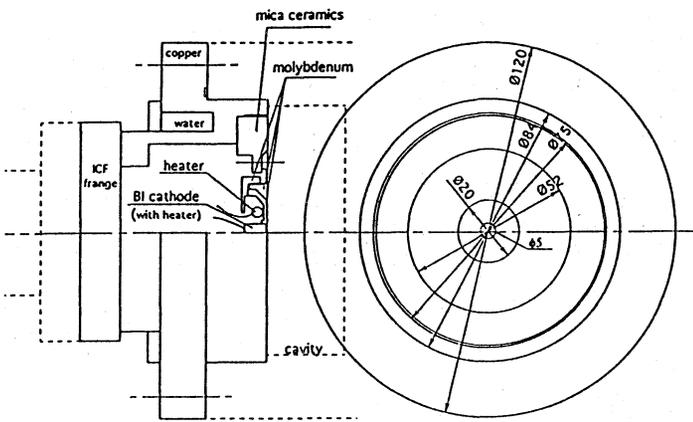


図2 熱陰極端板の構造

ると、中央部の温度が周辺部より約40 $^{\circ}\text{C}$ も低くなっていることが分かった。これはビームの電荷分布がホローになることを示している。2系統あるヒータのパワーバランスを最適化するか1系統に改造するとよいと思われる。

4. まとめ

熱陰極端板を製作し、熱特性について評価した。目標の1100 $^{\circ}\text{C}$ まで加熱し、ほぼ同心円状の温度分布を得、歪量も許容範囲内に抑えることができたが、ヒータパワーが大きく、昇温にかなり時間がかかった。またこの構造では陰極中央の温度が周辺よりも低くなることも分かった。

今後はこの結果を踏まえて最適な端板構造を設計する。またRF特性も計測し、実際に電子ビームを出す予定である。

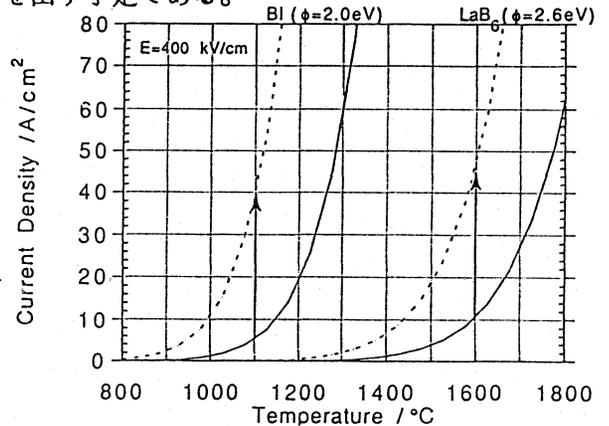


図1 陰極温度と電流密度
(solid line; Thermionic emission, broken line; with Shottky effect)

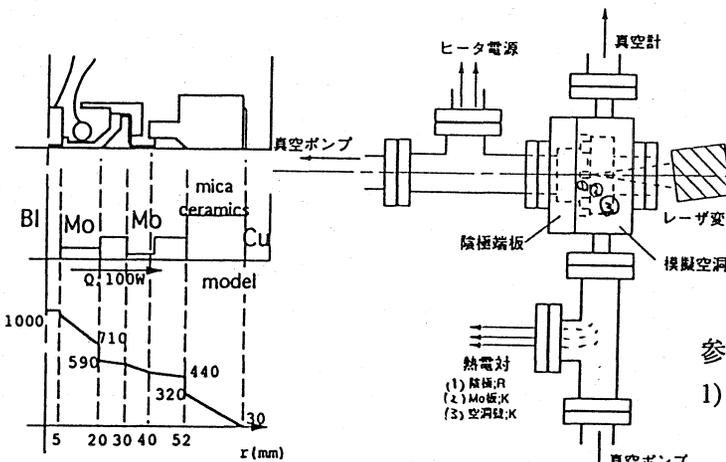


図3 温度分布の推定

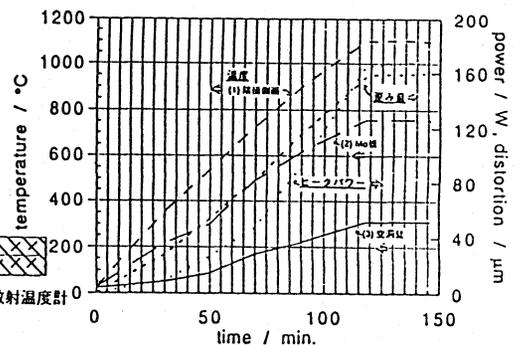


図5 温度、歪み、ヒータパワーの時間変化

参考文献

- 1) T.Urano et al., Proc. 16th linear accelerator meeting in Japan, p.211
- 2) H.Akiyama et al., Proc. 16th linear accelerator meeting in Japan, p.208

図4 実験装置の構成