

CONSTRUCTION OF CATHODE THERMOMETRY AND EMISSION TEST SYSTEM

Hiroshi Sumitomo^{*A)}, Shoji Matono^{A)}, Toshiaki Kobayashi^{B)}, Hirohumi Hanaki^{B)}

^{A)}SPring-8 Service Co.,Ltd.(SES)

1-20-5 Koto, Shingu-cho, Tatsuno-shi, Hyogo, 679-5165

^{B)}Japan Synchrotron Radiation Research Institute(JASRI/SPring-8)

1-1-1 Koto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

Abstract

A thermal cathode (Eimac Y-845) is used for an electron gun at the SPring-8 1-GeV linac. The gun can eject a 180 keV beam of 3 A from the cathode operated at a nominal heater voltage. As the discharge rate between the cathode and the grid becomes high along with the cathode driving time, we replace a cathode with a new one once a year. Before the cathode installation, we have definitely inspected new cathodes by means of a microscope to find defects in their cathodes and grids. However, the emission currents have been sometimes insufficient, or the cathode planes have contacted with the grids due to the heat distortion of the grids. We have suspected that the inadequate cathode temperature may have caused these cathode failures. To monitor the accurate cathode temperature and to reduce the cathode failures, we have constructed a measuring system of the cathode temperatures and the cathode emission currents at the test stand. We redesigned the whenelt and the anode to achieve a space-charge-limited current of 3 A at an acceleration voltage less than -70 kV. The cathode temperature at the nominal heater voltage is expected to be 854°C according to the Richardson-Dushman equation, whereas the actual temperature measured by an infrared thermometer was 813±5°C. This large disagreement is under investigation.

電子銃カソード温度測定・エミッション試験システムの構築

1. はじめに

SPring-8では8GeV電子蓄積リングの入射器として1GeVライナック及び1GeVから8GeVへランプアップさせるブースターシンクロトロンがあり、通常の積み上げ入射やトップアップ入射に対応している。

ライナック最上流部にある電子銃では、モジュレータより生成した高圧パルスがパルストランスを介する事で-180kVまで昇圧され、カソード・アノード間へ印加されている。カソードより出た電子はこの電場により加速され、下流のバンチングセクションへと向かう。電子銃カソードには熱カソード (Eimac Y-845) [1] が用いられ、グリッドパルサーによりトップアップ運転時には1nsのパルス幅の電子ビームで運転されている。

しかしながら運転時間経過に伴い、カソードから昇華したバリウムがグリッドに付着する事などにより、カソード・グリッド間放電等の不具合が起り易くなる為、1年毎にカソードの交換を行なっている。この交換作業の際には、デジタル顕微鏡を用いたカソード表面及びグリッドの点検やヒーターの抵抗値の測定を行い、その時点では問題がないと考えられるカソードを実機に装着するようにしている。しかし、上記の不具合が原因と考えられるヒーター・グリッド間の接触などの問題が幾度か発生している。これら不具合の一因として、カソードが高温すぎてバリウムの昇華が過剰に起こっているといった事も考えられるが、これまで実際にカソード温度がどの程度になっているかはモニターされてこなかった。

そこで、電子銃テストスタンドを整備し、放射温度計を用いたカソード温度の測定及びエミッション試験を行えるシステムを構築した。以下にその概要を示す。

2. システム概要

放射温度計を用いたカソード温度の測定及びエミッション試験を行う為、図1に示すシステムを製作した。

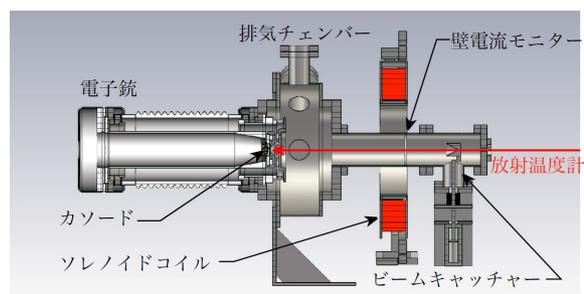


図1: カソード温度測定・エミッション試験システム外観

電子銃直後に排気チャンバーを置き、100l/sec. のイオンポンプ2機を使用し、超高真空領域まで排気する。その下流へ壁電流モニター、駆動式ビームキャッチャーが続く。トランスポート最下流にはビューポートを配置した。

このシステムはビームキャッチャーの退避・挿入によって、カソード温度の測定とエミッション試験をそれぞれ行う機構である。具体的にはカソード温度測定の場合、放射温度計を使用し、ビームキャッチャーを退避させた状態でビューポート越しに温度測定を行う。エミッション試験の場合はビームキャッチャーを挿入した状態で高圧を印可する。カソードより出た電子ビームはソレノイドコイルの磁場を受け、収束した状態でビームキャッチャーへ到達する。この際のエミッション電流を壁電流

* sumitomo@spring8.or.jp

モニター及びファラデーカップで測定する。

ライナック電子銃は通常ヒーター電力 8W において 3A(3nC/1ns) の出力で運転されており、システム構築に際し、その近辺でのカソード温度・エミッション電流を測定する事を目的とした。

3. 機器の設計・選定

この電子銃カソード温度・エミッション試験システムは電子銃テストスタンドを改造し、配置した。電子銃、排気チャンバー及び電源類はこれまでテストスタンドで使用されていたものがそのまま使用できたがウェネルト、アノードなどの電子銃部品や壁電流モニター、ビームキャッチャーなどのトランスポート部は新たに設計、製作を行う必要があった。

3.1 テストスタンド専用電子銃の設計

電子銃テストスタンドを整備するにあたり、まず問題になったのがライナック電子銃とテストスタンドでは電源仕様が異なる事であった。テストスタンドで得られたカソード温度、エミッション特性等をライナック実機へ反映させる為に、二つの電子銃はなるべく同じ状況下となる事が望まれるが、ライナックでは-180kV の高圧パルス電圧を電子銃に印加しているのに対し、テストスタンドは DC 電源で、さらに絶縁の関係もあり-70kV 程度までしか印加する事ができない。このような状況下のテストスタンドにおいてライナックと同形状の電子銃を使用した場合、空間電荷効果により十分なエミッション電流が得られず、ビームの発散も問題となってくる。テストスタンドで確実に 3A のビーム電流を得る為には、最大加速電圧である-70kV よりも低い電圧で空間電荷制限状態に達し、かつ 3A の電流が確保出来ていなければならない。(1) 式はチャイルド・ラングミュアの法則と呼ばれ、カソード・アノード間電圧を $V[V]$ 、そのプレート間距離を $d[m]$ とした時の空間電荷制限状態でのエミッション電流密度 $J[A/m^2]$ を表す式である。

$$J = 2.33 \times 10^{-6} \frac{V^{\frac{3}{2}}}{d^2} \quad (1)$$

3A をこの電子銃カソードの面積 0.5cm^2 で除した、電流密度 $6A/\text{cm}^2$ と、加速電圧 70kV を (1) 式へ代入し、 d を求める。実際の d はこの値より小さめに設計すれば、 70kV よりも低い電圧で空間電荷制限状態にて $3A$ 以上のエミッションが得られるはずである。

この d を電子銃軌道計算ソフト「E-GUN」によるシミュレーションの際の初期値として用いた。カソード・アノード間距離 d を短くする事で大きなエミッションが得られる事はシミュレーションからも見てとれた。しかしその反面、ウェネルトによる収束力が減少し、アノード孔での電場の漏れによるビームの発散が大きくなった。さらにはアノードを通過できず、衝突する傾向も見られた。この問題を解決する為にウェネルト、アノードの傾斜角を調整し、最適な形状を模索した結果、得られた電子銃形状はカソード・アノード間距離 16mm 、ウェネルト傾斜角 45° であった。この形状での軌道計算結果を図 2 に示す。またテストスタンド用電子銃及びライナック電子銃のパラメータを表 1 に示す。

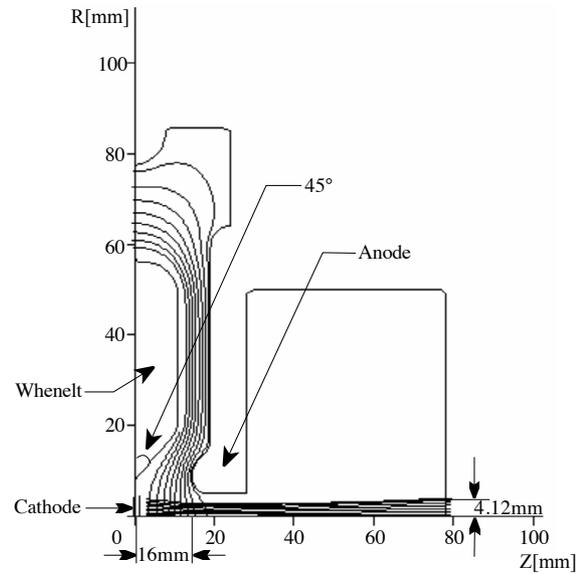


図 2: E-GUN でのシミュレーション結果

表 1: Test Stand 電子銃及び linac 電子銃パラメータ

	Test Stand	Linac
Cathode	Eimac Y-845	
Heater Power[W]	~8	
V[kV]	-70(DC)	-180(Pulse)
カソード・アノード間 距離 $d[\text{mm}]$	16	32
ウェネルト傾斜角 $\theta[\text{deg}]$	45	60
I[A]	3 (3nC/1ns)	

3.2 トランスポート部の設計

電子銃以降のトランスポート形状及び収束用ソレノイドコイルへの設定電流値最適化の為に、CST Micro Wave Studio(Particle Tracking) を用いてシミュレーションを行った。

その結果、低電圧電子銃で大電流を達成させている事が原因となり、トランスポート部においても空間電荷によるビームの発散が顕著に見られた。図 3 は当初考えられていたトランスポートのシミュレーション結果である。この形状では、ソレノイドコイルによる収束力が発生する前の自由空間での発散が強く、コイル付近でのビームサイズが大きくなり、チャンバー径に対し余裕が無い事が分かった (チャンバー内径 61ϕ に対し最大ビームサイズ 45ϕ 程度)。ソレノイドコイルでの収束力を強めると、コイル付近でのビームサイズはチャンバーに対して余裕が生まれるが、その反面、ビームの焦点はビームキャッチャーよりも上流になってしまい、トランスポート下流でのビームサイズが大きくなってしまった。また、ソレノイドコイルの設置場所をカソードに近付ける事も考えたが、空間的制限からあまり移動する事ができず、問題解決には至らなかった。

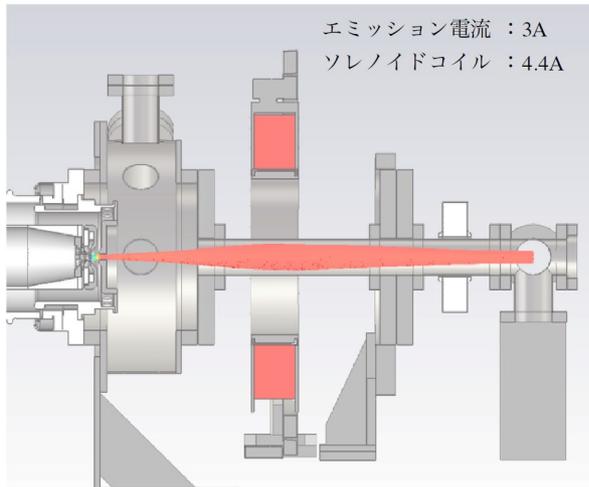


図 3: 初期のトランスポートでの軌道計算結果

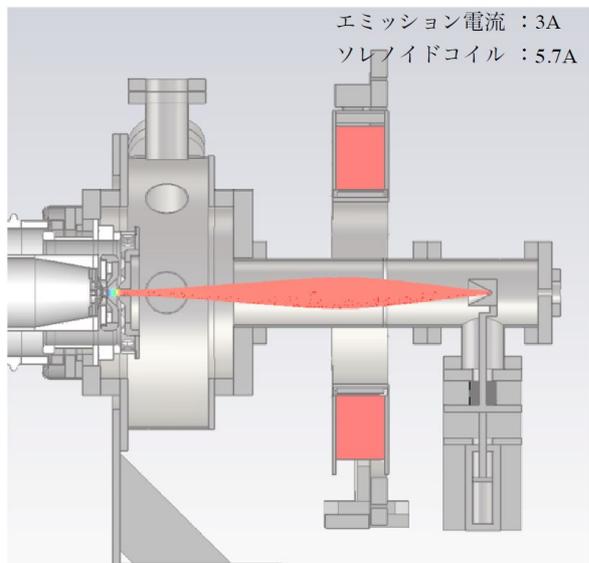


図 4: 設計変更後のトランスポートでの軌道計算結果

そこで当初チェンバー径を ICF114 サイズ (内径 61φ) で設計していたが、これを ICF152 サイズ (内径 95.6φ) へ変更した。さらにトランスポート全体を短いものに変更し、ビームキャッチャーを上流に配置した。図 4 の設計変更後のトランスポートでの軌道計算結果を見ると、ソレノイドコイルでの収束力を上げて十分にビームが絞れた状態でビームキャッチャーへ輸送できている事がわかる。これらのシミュレーション結果を踏まえて各機器の形状を決定し、図面を作成した。

3.3 放射温度計の選定

放射温度計の選定にあたり、ライナック電子銃通常運転時のおおよそのカソード表面温度を金属の熱電子放出による電流密度と温度の関係を示すリチャードソン・ダッシュマンの式より算出した。

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

ここで T はカソード温度 [K]、 ϕ は仕事関数 [J]、 k はボルツマン定数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)、 A はリチャードソン定数 ($1.2 \times 10^6 \text{ A/m}^2 \text{ K}^2$) である。(2) 式と通常運転時のヒーター電力で温度制限となるエミッション電流 (4A) 及び Y-845 のカソード面積 (0.5 cm^2)、カソード材から決まる仕事関数 ϕ (バリウム・タンゲステン = 1.63 eV [2]) を用いておおよそのカソード温度を算出すると 854°C となった。この結果により、この温度領域を測定できる放射温度計としてチノー製中温用 ($300 \sim 1600^\circ \text{C}$) 放射温度計 IR-CAI を選定した。この放射温度計の測定係数 (=測定距離/測定径) が 200 である事から、カソードからビューポート迄の距離を 700mm 程度に抑えた事でカソード径 8φ に対し最小測定径 3.5φ を得た。

3.4 ビューポート

ビューポートの材質に関しては、放射温度計の測定波長 $1.55 \mu\text{m}$ からこの帯域において透過率の優れた合成石英 (透過率 90%) を採用した。また、ソレノイドコイルへの不適切な電流設定等でビームが十分収束されず、ビームキャッチャーでビームを捕らえきれない場合のビューポート保護を考慮し、ビューポート直前に無酸素銅製の 10φ アイリスを設けた。

4. 機器の製作

上記のシミュレーション結果を経て、以下の機器の作成を行った。



(a) ウェネルト (b) アノード
図 5: ウェネルト及びアノード表面は放電対策の為、鏡面仕上げとなっている。

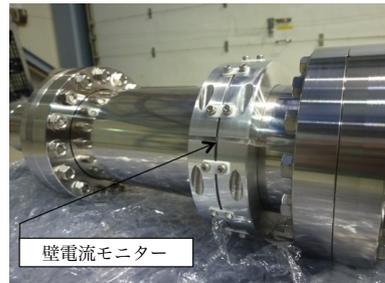


図 6: 壁電流モニター

壁電流モニターはセラミックでチャンバー間を絶縁し、その間を銀ろう付けにて接合。セラミック内面には帯電防止用に 100 \AA の TiN コーティングを施した。

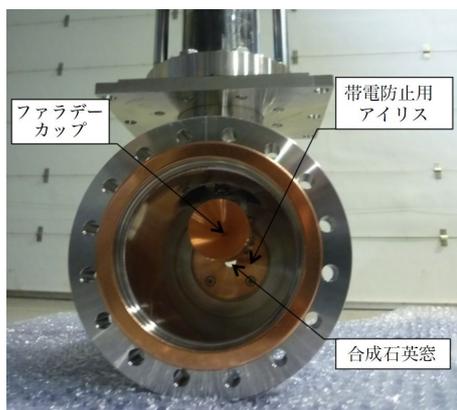


図 7: ビームキャッチャー

ビームキャッチャーはエアシリンダーを用いてファラデーカップ部の駆動を行い、シリンダーの退避時にビューポートからカソードが確認できるストローク (30mm) を確保した。また、ファラデーカップ部はビームの取りこぼしがないよう、十分大きな物 (外径 42φ) とした。ファラデーカップの奥に帯電防止用アイリス、合成石英窓が見える。

以上をもってシステムに必要な機器が全て揃い、これら機器の組み立て、真空排気、ベーキングを実施した。また、ソレノイドコイルに関しては磁場測定を行い、アライメントを行った。なお、このソレノイドコイルは設定電流 1A の時、磁石中心磁場で 2.7mT であった。

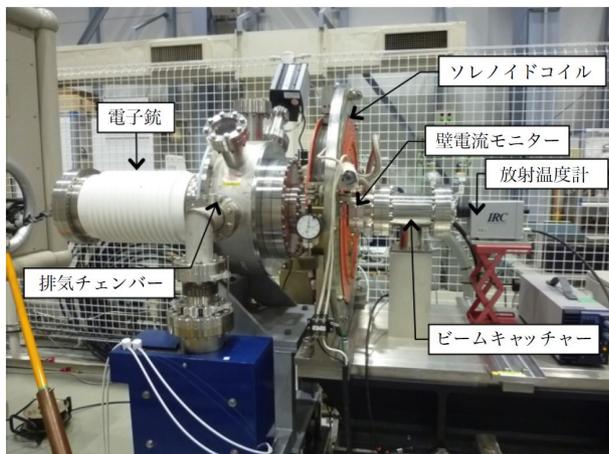


図 8: 完成したカソード温度測定・エミッション試験システム

5. カソード温度測定

完成したカソード温度測定・エミッション試験システムを使用してカソードヒーターの設定電圧値を 0.1V 刻みで 6.0V まで上昇させカソードのエージングを行った。ヒーター電力 1W (ヒーター電圧 1.5V) に達したところから放射温度計の測定範囲内に入り、モニターが可能となった。ヒーター電力 4.3W (ヒーター電圧 4V)、カソード温度 620°C に差し掛かったところからカソード表面が赤く光って見え出し、ヒーター電力が定格の 8W

(ヒーター電圧 6.0V) で放射温度計は 800°C を示した。ビューポートの透過率が 90 % であることからプランクの法則をもとに補正を行うと、実際のカソードは 813°C 程度であると考えられ、さらにはこの放射温度計には $\pm 5^\circ\text{C}$ の測定誤差がある。当初見積もっていた値 854°C に比べ低い値となった。

このエージング時のヒーター電力とカソード温度の変化を図 9 に示す。

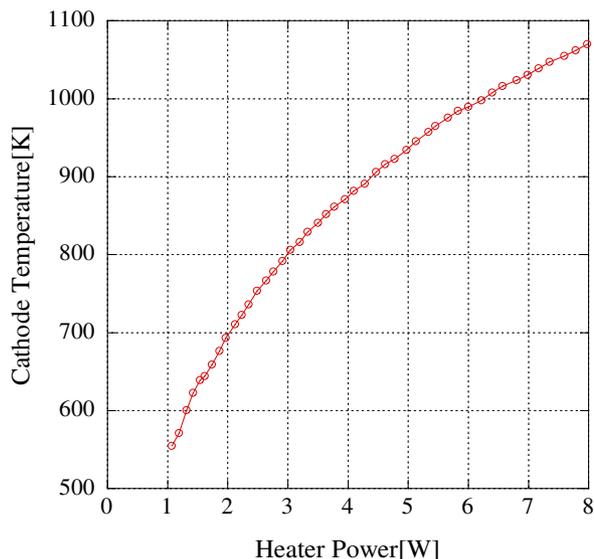


図 9: カソードエージング中の温度変化

6. まとめ

電子銃カソード温度・エミッション試験システムを電子銃テストスタンドに作成した。これに必要な機器の設計、シミュレーション、図面の作成を行った。機器納入後に組み立て、真空排気、ベーキングを行い、ソレノイドコイルの磁場測定、アライメントを実施した。この電子銃カソード温度・エミッション試験システムを使用して、カソードのエージングを行い、ライナック通常運転時のヒーター電力 8W でカソード表面温度は 800°C を示した。ビューポートの透過率を考慮し、補正を行うと実際のカソード温度は 813°C 程度であると考えられる。

引き続きエミッション試験を行おうとしたが、電源系統にてトラブルが発生し、現在調査中である。トラブルが解消次第エミッション試験を行う予定である。

参考文献

- [1] Toshiaki Kobayashi, "The Improvement of the Electron Gun for the SPring-8 Linac", SPring-8 Annual Report PP116-117, 1998.
- [2] "電子イオンビームハンドブック", 1973, P25, 日刊工業新聞社.