

## カーボンファラデーカップによる電子銃試験装置の改良とカソード暗電流測定装置の開発

### ELECTRON-GUN TEST EQUIPMENT IMPROVED WITH CARBON FARADAY CUP AND NEWLY-DEVELOPED MEASURING INSTRUMENT FOR EVALUATING DARK CURRENTS FROM GRID OF ELECTRON-GUN CATHODE ASSEMBLY.

馬込 保<sup>\*A)</sup>、小林 利明<sup>A)</sup>、谷内 努<sup>A)</sup>、鈴木 伸介<sup>A)</sup>、花木 博文<sup>A)</sup>、  
鍛冶本 和幸<sup>B)</sup>、住友 博史<sup>B)</sup>、平山 英之<sup>B)</sup>、皆川 康幸<sup>B)</sup>、森里 邦彦<sup>B)</sup>

Tamotsu Magome<sup>\*A)</sup>, Toshiaki Kobayashi<sup>A)</sup>, Tsutomu Taniuchi<sup>A)</sup>, Shinsuke Suzuki<sup>A)</sup>, Hirofumi Hanaki<sup>A)</sup>,  
Kazuyuki Kajimoto<sup>B)</sup>, Hiroshi Sumitomo<sup>B)</sup>, Hideyuki Hirayama<sup>B)</sup>, Yasuyuki Minagawa<sup>B)</sup>, Kunihiko Morisato<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>Japan Synchrotron Radiation Research Institute

<sup>B)</sup>SPring-8 Service Co., Ltd.

#### Abstract

To evaluate dark currents from the electron gun of the SPring-8 linac, our electron-gun test equipment was improved using a faraday cup made from carbon whose low electron backscattering coefficient reduced electron loss from the faraday cup. With the improved electron-gun test equipment, the dark currents from the electron gun were found to be emitted from the cathode and the grid of the electron-gun cathode assembly and the wehnelt electrode. To measure these dark currents separately, a measuring instrument with a circle anode facing a cathode assembly was developed.

## 1. はじめに

2012年以降、短寿命のフィリングパターン運転への対応・蓄積リングへの入射時間の短縮等の一環として、SPring-8線型加速器には、電子銃カソードアセンブリの最大出射電荷量の増加が求められてきた。また、現行の電子銃カソードアセンブリ（米国CPI社製電子源（グリッド付き・ディスペンサー型）Y-845）の将来の安定供給を確保するために、低暗電流のY-845互換機を国内企業に生産を依頼する必要性も出てきた。これは、現行のY-845は、暗電流の増加防止の観点から、1年に一度の高頻度で交換しているが、供給はCPI社だけに依存しており、同タイプのディスペンサー型電子源の一般社会における今後の需要をも考慮すると、将来のY-845の安定供給に強い懸念があるためである。

このような背景から、SPring-8線型加速器では、国内複数の企業の協力のもと、大出力電流・低暗電流・Y-845形状互換の電子銃カソードアセンブリの開発を行ってきた。2013年度の前半には、実機にて新規電子銃カソードアセンブリの試作第2号機の試験運用を実施したが、0.9mAもの多量の暗電流を放出したため、電子銃を発射していないにもかかわらず、蓄積リングの蓄積電流が $0.6\mu\text{A/s}$ で増加したり、New SUBARU入射点での放射線量が通常の10倍になる現象を引き起こし、実用には至らなかった<sup>[1]</sup>。また、2015年3月には現行のY-845を使用した場合でも、条件によっては、使用開始から1年を待たずに暗電流が増大して同様の現象を引き起こし、加速器運転に支障をきたすことが発覚した。これらの事象を契機として、実機での使用前に、電子銃カソードの暗電流を正しく評価することが急務となった。本件では、このために改良した電子銃試験装置とこの装置による測定結果、及び、新たに開発したカソード暗電流測定装置の概要について述べる。

## 2. 電子銃試験装置の改良

### 2.1 改良前の電子銃試験装置

線型加速器には、オフラインの電子銃試験装置がある。図1は、この電子銃試験装置の改良前の様子を示す。実機と同型の電子銃を有する真空チェンバーで、電子銃から出射された電子ビームはソレノイドコイルにてコーン形状の銅製ファラデーカップ内に収束され、出射電荷量が測定できる。ソレノイドコイルの中心には壁電流モニターがあり、こちらでも出射電荷量が測定できる。ファラデーカップが電子ビーム軸上から退避すると、さらに下流の放射温度計（チノー製IR-CA13CS）が電子銃カソードの表面を見込むことができ、電子銃カソード表面の温度が測定できる仕組みになっている。

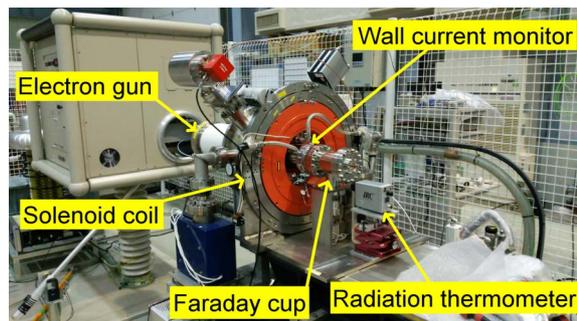


Figure 1: Photograph of the electron-gun test equipment (before improved).

実機とは電子銃に印加する加速電圧が異なる（実機はピーク強度-200kV・半値全幅 $4\mu\text{s}$ の高電圧パルス、電子銃試験装置は-75kV~-85kVの直流電圧）が、アノードの形状を工夫して、グリッド表面にかかる電場の強さは実機と同じにしている。これにより、実機

\* magomago@spring8.or.jp

とほぼ同じ環境での電子銃の振る舞いを観測することができる。これまでは、購入した電子銃カソードアセンブリからの出射電荷量を測定し、実機への装填の是非を判断するために利用されてきた。本電子銃試験装置で暗電流を測定したところ、暗電流測定値には激しい変動と頻繁なステップ状の増加・減少が見られ、一定値に定まらなかった

## 2.2 電子銃試験装置の改良点

電子銃試験装置での暗電流測定値には著しいノイズがのるため、装置に起因するノイズを除去すると推定される以下のような改良を施した。

- ファラデーカップを銅製のシールドで覆う一方、真空中の配線にも同軸線を採用した。
- 壁電流モニタのセラミックスの帯電など、電子銃からファラデーカップまでの間に発生するノイズ源を除去するために、電子銃直下流にファラデーカップを移設した。
- ファラデーカップでの電子の後方散乱による電子損失を低減するために、ファラデーカップの材質をカーボンに変更した。詳細については次節に示す。
- ファラデーカップからの二次電子の逸脱を防止するために、ファラデーカップ直前に、リング状のサブレッサー電極を配置した。これにより、ファラデーカップ自身に正のバイアス電圧を印加せずその電流を測定でき、測定系が簡素化された。
- 真空チェンバー・測定機器のアースを一点アースとした。

改良後の電子銃試験装置の様子を図2に示す。内部が見えるよう、下流のCF306フランジは取り外している。

暗電流は放出場所の温度にも敏感であるので、ノイズ対策に加えて、温度測定についても改良を施した。改良前の電子銃試験装置の放射温度計は測定径が数mm程度あり、グリッドとカソード両方を見込むため、両電極の正確な温度は測定できなかった。そこで、改良後の電子銃試験装置では、測定径を0.1mmまで小さくすることができるマイクロピロメーター（KELLER HCM製PV11 AF1）を採用した。

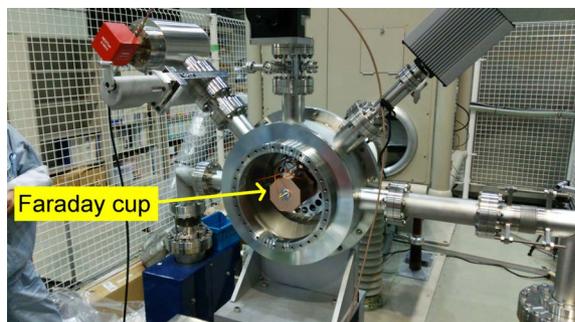


Figure 2: Photograph of the electron-gun test equipment (improved). Downstream flange is removed to show the inside.

## 2.3 カーボンファラデーカップの設計

カソードから出射した電子ビームは、直後からビーム内部で働くクーロン力で広がっていく。CTS Particle Studioによる計算では、我々の使用する条件のうち最も電子ビームが広がりやすい場合（カソード外径8mm・加速電圧-75kV・出射電流20A）での電子ビームの直径は、電子銃出口で2cm（99%エンベロープ）であり、以後、1cm進むごとに0.43cm広がる。この電子ビームを取りこぼさないために、ファラデーカップには、十分に広い開口径が必要であるが、内径40cmの円筒状真空チェンバーの内部における、ファラデーカップの位置決め精度、サブレッサー電極の存在、および、電子ビーム軸上への挿入・退避構造を考慮して、開口部は電子銃下流2.27cmに位置し、その内径は4cmとした。

電子ビームの一部は、ファラデーカップに衝突すると後方に散乱し、ファラデーカップから飛び出してしまう。後方散乱電子は数keV以上のエネルギーを持つため、サブレッサー電極で押し戻せない。電子の後方散乱係数<sup>[2]</sup>は、加速電圧が-70kV～-85kVの場合、銅では約30%（平板への垂直入射の場合）にもなる。ファラデーカップの深さを開口径に比較して十分に大きくすれば、後方散乱電子の散逸を防ぐことは可能であるが、今の場合真空チェンバーの電子ビーム軸方向の長さは10cmしかない。

加速電圧が-70kV～-85kVの場合、電子の後方散乱係数は、原子番号が小さい物質ほど小さい傾向にあり、ベリリウムで約3%、カーボンで約5%（いずれも平板に電子が垂直入射の場合）である。そこで、後方散乱電子数を低減するために、ファラデーカップの材質にカーボンを採用した。後方散乱係数の観点からはベリリウムがより望ましいが、材料費と加工費が高額なので採用しなかった。

真空チェンバー内の狭い空間で、後方散乱による電子損失をさらに低減するためには、最適なファラデーカップの形状を選択しなければならない。そこで、代表的な形状のファラデーカップについて、電子の後方散乱係数をEGS5で計算し、後方散乱係数が最も小さくなる形状条件を求めた。代表的な形状とは、コップ形状・コーン形状・コップとコーンの組み合わせ形状であり、計算は、後方散乱係数がより大きい加速電圧が70kVの電子ビームを入射する場合について行った。図3にその結果を示す。

いずれの形状においても、深さが増加するにつれて後方散乱係数は小さくなっている。3形状のうちでは、コップ形状の後方散乱係数が一番小さい。コーン形状の後方散乱係数が、深さ2cmのあたりで最大値を示しているが、これは入射角の増加による後方散乱電子数の増加と、ファラデーカップの深さ増加による後方散乱電子数の減少の兼ね合いであると考えられる。この計算の結果を踏まえ、深さ6cmのコップ形状のファラデーカップを採用した。

この形状にて後方散乱電子の分布を計算し、97%以上の後方散乱電子がサブレッサー電極に衝突しないよう、サブレッサー電極は、内径がテーパ状のリングとした。この形状のサブレッサー電極でエネルギー150eV以下の二次電子を押し戻すには、サブレッサー電極に-700Vの電圧を印加する必要があることをSIMION 3Dにて算

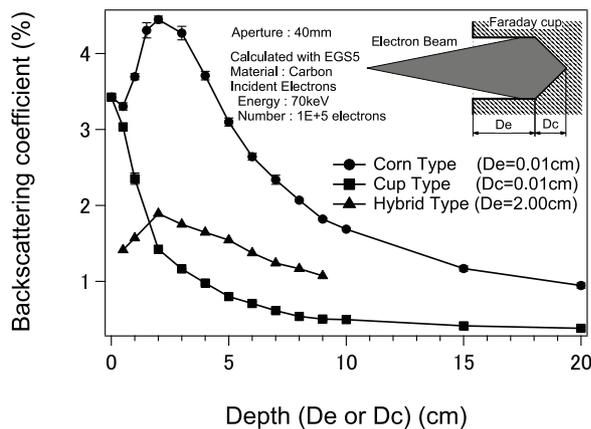


Figure 3: Backscattering coefficient as a function of depth of three different types of faraday cups. Inserted drawing is the cross section of the calculation model.

出した。図4に製作したカーボンファラデーカップの様子を示した。

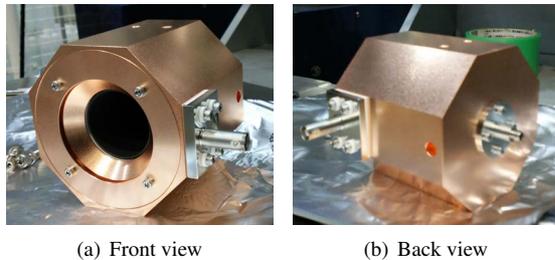


Figure 4: Photograph of the carbon faraday cup.

### 3. 改良電子銃試験装置での測定

#### 3.1 暗電流の測定

改良した電子銃試験装置にて試作2号機の暗電流の測定を行った。実機での使用条件に最も近い(グリッド電位-85kV、ヒーター電圧 6.81V、バイアス電圧 61V)で、ファラデーカップとサプレッサーに流れ込む暗電流を測定した。両暗電流のヒーター電圧・バイアス電圧依存性も測定した。

図5は、ファラデーカップとサプレッサーに流れ込む暗電流のヒーター電圧・バイアス電圧依存性を測定した結果である。グリッドに-85kVが印加されると、サプレッサーにも電流が  $1.2 \times 10^{-10}$  A 流れ込んでいる。流れ込んだ電流は、不規則な変化を示すものの、ヒーター電圧、バイアス電圧の変化には全く同期していない。このことは、サプレッサーに流れ込む大きく広がる暗電流は、カソードアセンブリに由来するものでなく、同じく-85kVが印加されているウェーネルト電極に由来するものであると考えられる。不規則で突発的な変化は、ウェーネルト電極表面についた汚れからの断続的な電界放出ではないかと推測される。実際に観察したウェーネルト電極表面は、図6に示すように著しく汚染されていた。

ファラデーカップには、グリッドに-85kV印加した後、

$3.6 \times 10^{-8}$  A の暗電流が流れ込み、徐々にその量が増加している。バイアス電圧を上げるにつれ減少し、バイアス電圧が 300V になるとほとんど減少しなくなった。一方、ヒーター電圧を 4.00V に減少すると、 $1.6 \times 10^{-10}$  A にまで減少した。このことから、ファラデーカップに流れ込む暗電流は、68%がカソード由来のものであり、残りのほとんどはグリッドに由来するものであるといえる。グリッドに電圧印加後、暗電流が微増しているのは、カソードから蒸発しグリッドに付着するバリウムによるものではないかと推定される。ここでは 50min しか測定していないが、実機程度に長期間の測定を行うと、支配的になる要因だと思われる。

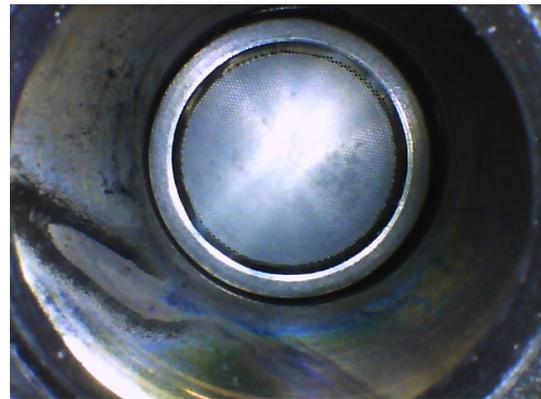


Figure 6: Photograph of the wehnelt electrode and the cathode and grid of the second prototype of cathode assembly in the improved electron-gun test equipment.

#### 3.2 カソードとグリッドの温度測定

新規電子銃カソードアセンブリの試作第4号機について、カソードとグリッドの温度のヒーター電圧依存性を測定した。結果を図7に示す。このカソードアセンブリは、ヒーター電圧 8V の時に 4.7A の電子ビームを出射したので、ヒーター電圧 8V の時にカソードの温度が 1033°C であるのは妥当である。しかしながら、グリッドの温度は熱解析で 300°C であり、また、パイロメーターの照準器の視野内ではグリッドはほとんど黒くしか見えないことから、911°C であるのは若干疑問が残る。グリッドの 0.4mm 奥に位置する明るいカソードからの光が重なっている影響が大きい可能性がある。放射率の見積もり、光学系の調整、および、観測者による誤差などの点からさらに調整する必要がある。

### 4. カソード暗電流測定装置の開発

改良電子銃試験装置で測定した暗電流には、カソードアセンブリのグリッドからだけでなく、カソードやウェーネルトからの暗電流も含まれていることが判明した。そこで、これらを別々に評価できる測定器を開発した。図8は、開発した測定器の断面の概略図である。超高真空の測定器内部には、カソードアセンブリと無酸素銅製の円盤状アノードがお互いが向かい合うように設置されている。円盤状アノードには+7kVの電圧が印加され、その時に高圧ケーブルに流れる電流が、カソード

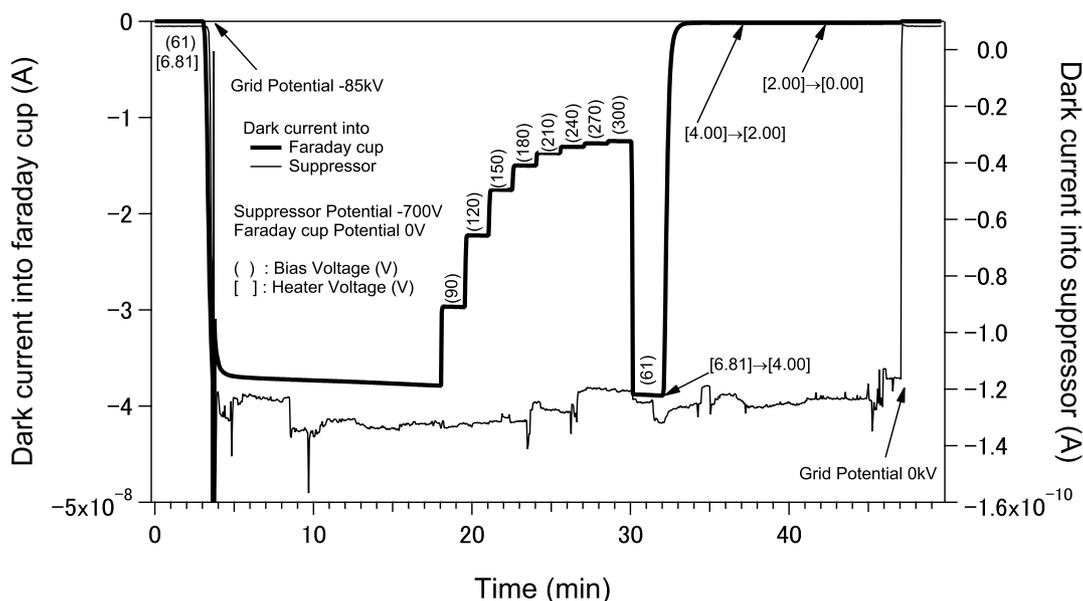


Figure 5: Dark currents into Faraday cup and suppressor as a function of bias voltage and heater voltage.

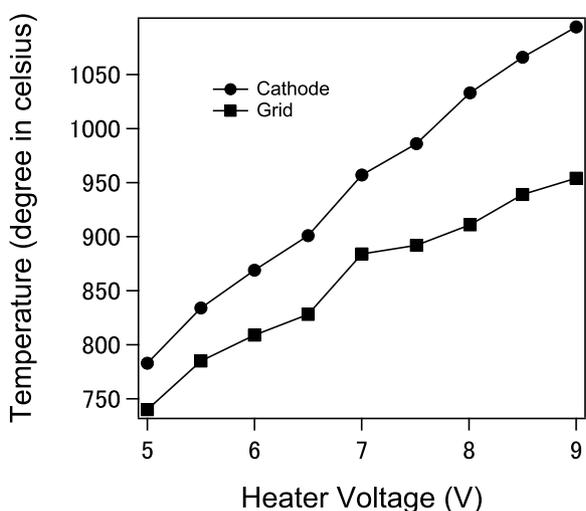


Figure 7: Cathode and grid temperature of the fourth prototype of cathode assembly as a function of heater voltage.

アセンブリのみからの暗電流となる。暗電流は、+7kVを印加しつつ 1nA 以下の電流を計測できるイオンポンプコントローラー (Gamma Vacuum 製 SPCe) にて測定した。

十分に大きいバイアス電圧が印加されるかどうかによる測定結果の違い、さらに、改良した電子銃試験装置での測定結果との違いから、3種類の暗電流を弁別して評価することが可能となる

大気側にあるマイクロメーターで円盤状アノードの位置をその軸方向に変化させると、グリッドにかかる電場強度が変化するため、暗電流の電場強度依存性を測定することができる。また、測定器内部の圧力を変えると、暗電流の圧力依存性も調べることができる。

実機でのグリッド表面の電場強度は、数 MV/m であ

る。7kV で同等の電場強度を発生させるためには、円盤状アノードとグリッドの間隙を数 mm にしなければならない。本測定器では、円盤状アノード表面の平行度を、カソードアセンブリ取り付けフランジに対して 0.05mm 以下に抑える一方、カソードアセンブリをシムを挟んで取り付けフランジに面タッチで締結することで、測定器による間隙の精度を 0.06mm に抑えた。その結果、測定器による電場強度の誤差を 10%未満にすることができた。

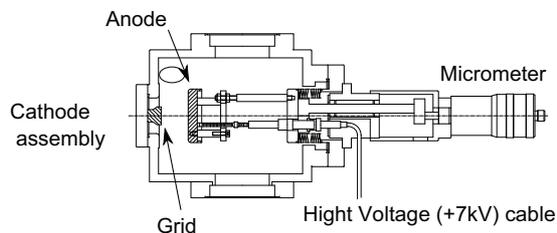


Figure 8: Schematic drawing of cross section of the newly-developed measuring instrument to detect dark currents from the cathode and the grid of electron-gun cathode assembly.

## 5. まとめと今後の展望

電子銃からの暗電流を評価するために、所有する電子銃試験装置を改良した。改良した電子銃試験装置で、電子銃からの暗電流が、カソードアセンブリのカソード、グリッド、そして、ウェーネルトの3箇所から発生していることを明らかにした。問題を切り分けるために、カソードアセンブリからの暗電流のみを測定できる

**PASJ2015 WEP033**

カソード暗電流測定装置を開発した。

今後は、改良・開発したこれらの装置の性能を向上する一方、これらを利用して、所有する多数の電子銃カソードアセンブリ試作機からの暗電流について、包括的な調査を行う予定である。

**参考文献**

- [1] Shinsuke Suzuki et.al, “The component improvement of the SPring-8 Linac”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 9-11, 2014, Aomori, Japan, pp.904.
- [2] Yoichi Kirihara, “電子・光子輸送計算コード EGS5 の高エネルギーと低エネルギーへの拡張に関する研究”, Hayama, SOKENDAI, 2009, Ph. D.thesis.