

## SPring-8 線型加速器における低暗電流型電子銃カソードアセンブリの開発 DEVELOPMENT OF LOW-DARK-CURRENT CATHODE ASSEMBLY FOR GRIDDED THERMIONIC ELECTRON GUN OF SPRING-8 LINEAR ACCELERATOR

馬込 保、小林 利明、谷内 努、鈴木 伸介、花木 博文

Tamotsu Magome\*, Toshiaki Kobayashi, Tsutomu Taniuchi, Shinsuke Suzuki, Hirofumi Hanaki

Japan Synchrotron Radiation Research Institute

### Abstract

To reduce dark currents from the gridded thermionic electron gun of SPring-8 Linear Accelerator, cathode assemblies with two kinds of newly-designed grids have been developed. The two were a molybdenum perforated grid with a titanium coating of  $0.5\mu\text{m}$  in thickness, and an electro-polished molybdenum perforated grid, respectively. Dark current from the two newly-developed cathode assemblies and the commercial cathode assembly (Y-845, Communications & Power Industries LLC) which has been employed as the electron emitter of the gun, was measured using a dedicated measuring chamber. The chamber had a movable copper anode disk facing a mounted cathode assembly and consequently realized the same electric field on the grid surface under ultra high vacuum as that of the real electron gun. Dark current from the cathode assembly with the electro-polished grid was not detected during initial five hours after electric field of  $3\text{MV/m}$  in magnitude was applied on the grid. However, once the dark current generated, the dark current increased monotonously up to  $8.5 \times 10^{-8}\text{A}$  in 21 hours. Dark current from the cathode assembly with the titanium-coated grid was smaller after the elapse of seven hours than that from the cathode assembly with the electro-polished grid and that from the Y-845 cathode assembly. The experimental results show the effectiveness of electro-polishing of a grid surface for dark current suppression and the possibility of titanium-coating of a grid surface for the reduction of the growth of the dark current. Measurement of dependence of dark current on bias voltage revealed that dark current from the newly-developed cathode assemblies was emitted from their grids and that dark current from the Y-845 cathode assembly was leak current from the cathode.

### 1. はじめに

SPring-8 線型加速器では、グリッド付きディスペンサーカソード(米国 CPI 社製電子源 Y-845) を電子銃カソードアセンブリに採用している。この現行カソードアセンブリは、暗電流の増加防止の観点から、1年一度の高頻度で交換しているが、供給は CPI 社のみ依存しており、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考慮すると、将来の安定供給に不安がある。そこで、2012 年度から現行カソードアセンブリの代替機の開発を行ってきたが、2013 年度の前半にプロトタイプを実機にて試験運転したところ、推定  $0.9\text{mA}$  もの多量の暗電流を放出したため、実用には至らなかった [1]。また、2015 年 3 月には現行カソードアセンブリを使用した場合でも、条件によっては多量の暗電流を放出することが発覚し、暗電流の低減が急務となった [2]。

暗電流は、カソードアセンブリのグリッド・カソード、およびウェネルトから発生するが [2]、これらのうち、グリッドからの暗電流を低減するために、2 種類の改良グリッドを採用したカソードアセンブリを開発した。ひとつはカソードから蒸発したバリウムが付着しにくいチタンコーティングを施したグリッドであり、もうひとつは局所的な電場集中を防ぐため、電解研磨にて表面を十分に滑らかにしたグリッドである。本件では、これらのグリッド改良カソードアセンブリからの暗電流を測定した結果を報告する。

### 2. 新開発カソードアセンブリ

基本的な構造は、現行のカソードアセンブリと同一である。すなわち、カソードはバリウム含浸型の多孔質タングステン円盤(直径  $8\text{mm}$ ) であり、カソード背面にアルミナポッティングタイプのヒーターを、前面にグリッドを有する。現行のカソードアセンブリのグリッドは、タングステンのワイヤーメッシュ(ワイヤー径  $20\mu\text{m}$ 、ピッチ  $180\mu\text{m}$ ) であり、その下面がカソード表面から  $120\mu\text{m}$  の距離に位置する。一方、新開発カソードアセンブリのグリッドは、耐熱性に優れたモリブデンの板(厚さ  $50\mu\text{m}$ ) に、一辺  $200\mu\text{m}$  の正三角格子位置に直径  $170\mu\text{m}$  の円形穴をフォトエッチングで開けたもので、グリッド下面がカソード表面から約  $160\mu\text{m}$  の距離に位置する。チタンコーティングタイプのグリッドは、上記モリブデングリッドに約  $0.5\mu\text{m}$  の厚さのチタンをコーティングしたものである。電解研磨タイプのグリッドは、上記モリブデングリッドを十分に電解研磨し、表面の凸凹のみならず、円形穴の縁・内面のバリも除去したものである。電界研磨により厚さが  $2\mu\text{m}$  程度薄くなってしまったが、エッチングで開けた円形穴は、電界研磨での削りしろをあらかじめ考慮していたので、最終的な円形穴の直径  $170\mu\text{m}$  を実現できた。これらのグリッドの仕様を表 1 に示した。

これら 3 種類のグリッドの光学顕微鏡像を図 1 に示した。チタンコーティングタイプのグリッドには図右上から左下への傷が多数みられるが、これはモリブデンを圧延にて板材にした時についた傷だと推

\* magomago@spring8.or.jp

Table 1: Specification of the Grids of the Existing Y-845 and the Newly-Developed Cathode Assemblies

Cathode Assembly		Existing (Y-845)	Newly-developed	
Material		Tungsten	Molybdenum	
Form		Wire mesh	Perforated plate	
Surface treatment		Titanium-coated	Titanium-coated	Electro-polished
Dimension	Wire diameter	20 $\mu$ m	-	
	Plate thickness	-	50 $\mu$ m	48 $\mu$ m
	Pitch	180 $\mu$ m	200 $\mu$ m	
	Hole diameter	-	170 $\mu$ m	
Distance between grid and cathode		120 $\mu$ m	157 $\mu$ m	163 $\mu$ m

定される。

### 3. 測定装置と測定方法

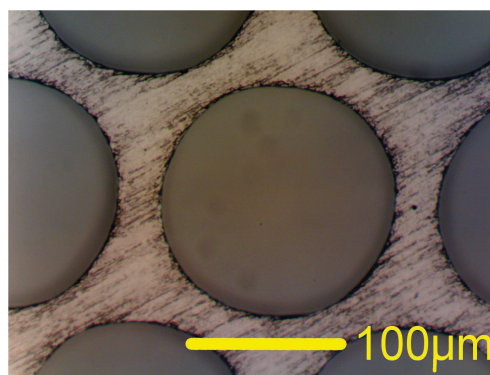
#### 3.1 測定装置

実機と可能な限り同じ条件で、カソードアセンブリからのみの暗電流を測定するために昨年度開発した測定装置を使用した [2]。測定装置の概要を図2に示す。超高真空チェンバー内部にて、測定対象のカソードアセンブリと無酸素銅製の平円盤アノードを向かい合わせに設置している。実機と異なるのは、電極の電位配置である。実機では、アノードが接地され、カソードアセンブリのグリッドには-180kV(半値幅 4 $\mu$ s)の高電圧パルスが印加されている。一方、本測定装置では、カソードアセンブリのグリッドが接地、アノードにDC+7kVが印加されている。これにより、カソードアセンブリ側に絶縁管が不要となるため、グリッドとアノード間に実機と同じ電場状態を再現しつつ、カソードアセンブリの頻繁な交換が容易になっている。グリッドへの電場をDCで印加するので、電場の印加時間のみで考えると実機の25万倍速の加速試験を行うことも可能になった。

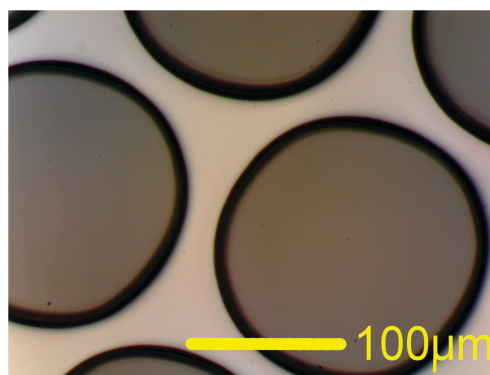
アノードはその回転軸方向に位置を変えることが可能であり、アノードとグリッド押さえリングの間隙を0mmから40mmまでを0.005mmの精度で調整できる。カソード取り付けフランジに対して、アノードは平行度0.05mm以下で設置されており、一方、カソードアセンブリは、取り付けフランジに厚さ0.9mmのシムを挟み込むことで、取り付けフランジに対して平行度0.01mmで設置することができる。この結果、各カソードアセンブリのグリッド上面に対して、均等に任意の強度の電場を印加することが可能となった。

アノードの位置の原点だけは、カソードアセンブリを加熱する前に実施した。アノードとグリッドの非導通を確認しながら、アノードをカソードアセンブリに接近させると、アノードがグリッド押さえリングに接触した時に、アノードとグリッドが導通する。この場所をアノードの位置の原点とした。あらかじめグリッド押さえリングとグリッドの高低差を測定した上で、アノードの位置を調節することで、グリッドの上面に指定する強度の電場を印加することが可能となった。

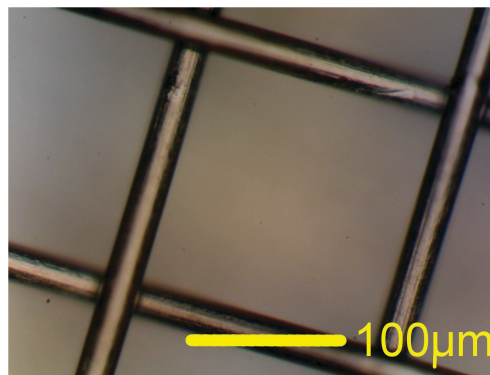
カソードアセンブリからの暗電流は、アノード電流



(a) Titanium-coated



(b) Electro-polished



(c) Existing (Y-845)

Figure 1: Optical microscope images of the grids of the newly-developed and the existing Y-845 cathode assemblies.

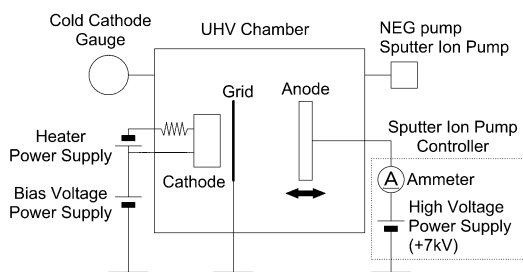


Figure 2: Schematic drawing of the measuring setup.

として、DC+7kV を印加しつつ 1pA 以上の電流を計測できるイオンポンプコントローラ (Gamma Vacuum 製 SPCe) にて測定する。イオンポンプコントローラの計測した電流信号は、パーソナルコンピュータにて 1 秒毎に記録した。

### 3.2 測定方法

この測定装置を使用し、新規開発した 2 種類のカソードアセンブリと、実機で未使用の現行カソードアセンブリの暗電流を測定した。測定は、可能な限り実機での使用環境を再現するような条件で実施した。まず、バイアス電圧 61.0V を印加し、 $6 \times 10^{-6}$  Pa 以下の圧力で、各カソードに対してヒーターエージング・フラッシングを実施した。ヒーターエージングでは、ヒーター電圧を 0V から 6V まで昇圧した。6V に達成後、フラッシングとして、8V まで昇圧し、8V で 8 分間保持したのち 6V に降圧した。

その後、 $2 \times 10^{-6}$  Pa 以下に圧力が下がったところで、アノード位置を 10mm にして暗電流の測定を開始した。バックグラウンドを確認後、アノードに +7kV を印可し、グリッド上面の電場の強さが 3MV/m になるように、グリッドとアノードの間隙が 2.333mm になる位置までアノードをグリッドに接近させた。

10 時間~20 時間程度暗電流を測定後、暗電流のバイアス電圧依存性を測定した。また、電解研磨タイプのカソードアセンブリについては、さらに、アノードを 10mm 以上の位置に遠ざけて再フラッシングを実施した前後の暗電流の変化、大気開放・真空排気を行った前後の暗電流の変化も測定した。

## 4. 測定結果

図 3 に 3 種類のカソードアセンブリの暗電流のアノードへの高電圧印加時間依存性を示した。現行のカソードアセンブリの暗電流は、変化はしているものの、アノードに高電圧を印加後 20 時間の間、 $10^{-8}$  A 台で単調増加している。増加率は徐々に減少して飽和しかかっている。電解研磨タイプのカソードアセンブリの暗電流は、アノードに高電圧を印加後 5 時間は測定限界以下であったが、その後は 21 時間後までに  $8.5 \times 10^{-8}$  A まで単調に増加している。チタンコーティングタイプのカソードアセンブリの暗電流は、アノードに高電圧を印加後、1.5 分後に暗電流が発生した。暗電流はその後、 $10^{-7}$  A 台まで増加しているが、

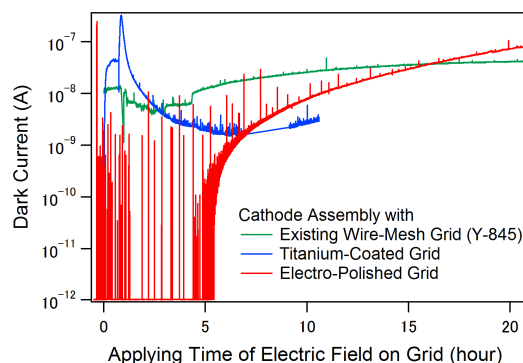


Figure 3: Dark current of cathode assemblies as a function of applying time of electric field on grids. Heater voltage is 6.00V. Bias Voltage is 61.0V. The potentials of the grids and the anodes are 0V and +7kV, respectively. The magnitude of the electric field on the grids is 3MV/m.

7 時間以降では、他の二つのカソードアセンブリの暗電流よりも少なくなっている。いずれのカソードアセンブリについても、暗電流と圧力の明確な相関関係は見られなかった。

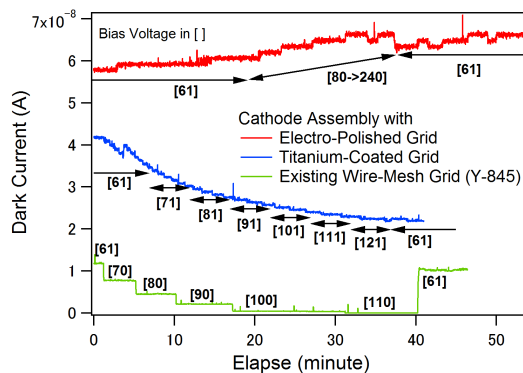


Figure 4: Temporal change in dark current of three types of cathode assemblies at various bias voltages. Heater voltage is 6.00V. The potentials of the grids and the anodes are 0V and +7kV, respectively. The magnitude of the electric field on the grids is 3MV/m.

図 4 に 3 種類のカソードアセンブリについて、バイアス電圧を変化させたときの暗電流の時間変化を示した。新開発カソードアセンブリは、2 種類とも、バイアス電圧の変化に同期した暗電流の変化は見られなかった。一方、現行カソードアセンブリについては、バイアス電圧を大きくするほど、暗電流は減少し、バイアス電圧が 110V の時、暗電流は測定限界以下となった。

電解研磨タイプのカソードアセンブリについての諸測定の結果を示す。再度フラッシングを実施したところ、暗電流は測定限界以下になったものの、12 分後に急速に増加し、フラッシング前と同程度の値に戻った。また、大気開放・真空排気を行った後の暗電流は、アノードへの高電圧印加後 6 時間は測定限界



以下であったが、以降は図3と同様の振る舞いを見せた。

測定の前後で、光学顕微鏡による各カソードアセンブリのグリッド上面・カソード表面の観察を行ったが、グリッド上面・カソード表面のどちらにも、測定の前後で変化はなかった。

## 5. 考察

### 5.1 グリッドの表面処理の効果

図3の結果から、グリッドへの電解研磨は初期に暗電流を抑える効果が高いことがわかる。しかし、一旦暗電流が測定されると、電界研磨の暗電流抑制効果は見ることができない。チタンコーティングは、下地が粗かったために顕著にならなかったが、コーティング自体にも表面を平滑化し、暗電流の発生を抑制する効果あると考えられる。また、アノードへの高圧印加時間が10時間までしか測定していないが、長時間稼働した場合、ほかの2種類のカソードアセンブリよりも暗電流が低いことが期待される。

### 5.2 暗電流の発生源

図4のバイアス電圧依存性から、現行カソードアセンブリの暗電流は、グリッドが抑えきれないカソードからの漏れ電流であり、一方、新開発カソードアセンブリの暗電流はカソードからの漏れ電流ではなく、グリッドからの放出電流であることがわかる。

図5に、静電場計算コード(CST STUDIO SUITE 2015)にて計算したグリッドとカソード表面付近の電場分布を示した。図に示した電場分布は、グリッドの穴の中心を通り、グリッドに垂直な断面上での分布である。カソードから出てグリッドの穴を通過する電子は、この断面上で最も低い電位障壁を感じる。計算は測定時の条件に合わせて実施した。すなわち、アノード、グリッド、カソードの電位は、それぞれ7kV、0V、そして、61.0Vであった。グリッドの穴の中心に、新開発カソードアセンブリでは、28Vの電位がかかっているが、現行のカソードアセンブリではカソード表面とほぼ同じ電位しかかかっておらず、グリッドがカソードからの漏れ電流を抑えきれないことがわかる。

測定時の圧力が、 $2 \times 10^{-6}$ Pa以下であり、グリッド付近の圧力が1桁程度高い $10^{-5}$ Pa台であったとしても、7kVエネルギーを持つ電子の平均自由行程は、アノード・グリッド間の2.333mmよりずっと大きく、アノード・グリッド間の残留気体と暗電流の電子が相互作用するとは考えにくい。暗電流の衝突によりアノードから脱離した銅イオンの衝撃・吸着の影響を受けた可能性はある。しかしながら、電解研磨タイプのカソードアセンブリの測定で、フラッシングにより一時的に暗電流が測定限界以下になったこと、大気暴露後の再測定でも暗電流が6時間測定限界以下であったこと、暗電流測定前後でカソード表面とグリッド上面に光学顕微鏡で変化が見られなかったことを考慮すると、サブミクロンの大きさのバリウムの突起がグリッド上に多数発生したことが、グリッドからの放出電流の原因ではないかと思われる。

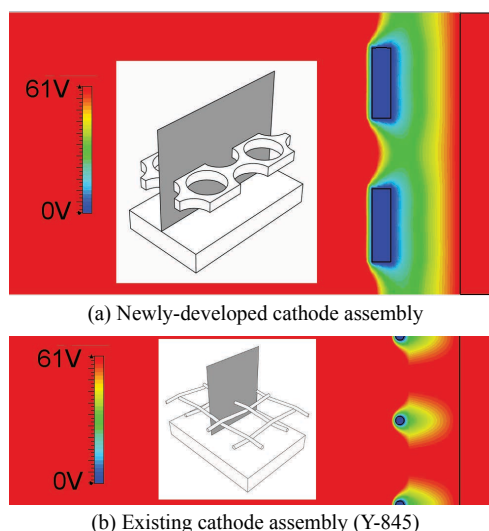
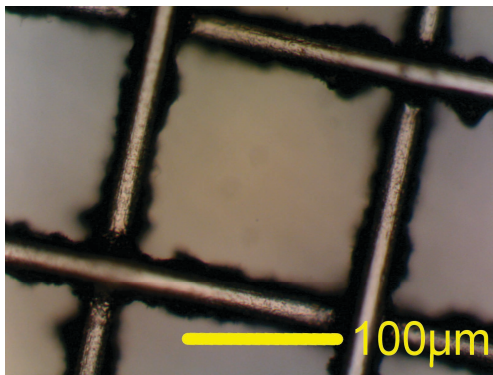


Figure 5: Calculated cross-sectional potential distributions around the grids and the cathode surfaces of the newly-developed and the existing Y-845 cathode assemblies. The vertical solid lines indicate the cathode surfaces. The blue rectangles and circles represent the grid cross sections of the newly-developed and existing cathode assemblies, respectively. The insets show the cross sections for the potential distributions as gray planes with the grids and cathodes. The potentials of the cathodes, the grids, and the anodes are 61.0V, 0V, and +7kV, respectively.

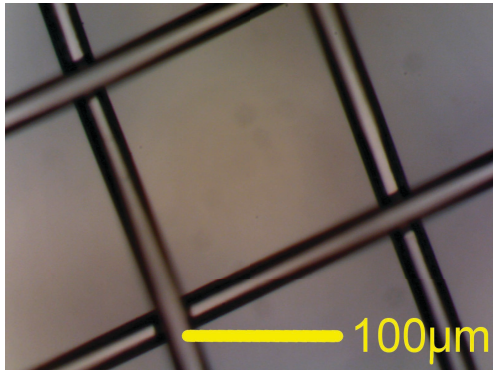
### 5.3 実機との違い

図6に、実機で半年間使用した後、および、本測定を終えた後の現行カソードアセンブリのグリッドの光学顕微鏡像を示す。実機で半年間駆動させた後では、グリッドにはバリウムと思われる白い固形物が多量に付着しているが、本測定を終えた後ではグリッドへの付着物はほとんどなく、測定前についていたもの以外なかった。バリウムの付着量が実機での暗電流の原因だとすると、アノードへの電場印加時間ではなく、ヒーター通電時間が本質的であることになる。本測定での計測時間は短すぎ、数か月以上の期間で暗電流を測定するべきである。

アノードがグリッド上面に距離2.333mmまで接近した状態では、アノードも局所的に相応の高温になり、カソードから蒸発したバリウムがアノードに吸着する一方、再蒸発してグリッドにも吸着する可能性もある。その場合、平板状で、開口率が低くアノードから見込む面積が広い新開発カソードアセンブリのグリッドには、現行カソードアセンブリのグリッドに比較して多量のバリウムが付着し、グリッドからの放出電流が著しく多くなると推定される。しかしながら、詳細は全く不明であり、アノード・グリッドの温度、グリッド上面の表面分析等を含めた今後の包括的な調査が不可欠である。



(a) After six-month operation in the real accelerator



(b) After 21-hour operation in the dedicated measuring chamber

Figure 6: Optical microscope images of the grids of two existing Y-845 cathode assemblies different in operation time.

## 6. まとめと今後の展望

チタンコーティンググリッド、および、電解研磨グリッドをそれぞれ持つ2種類の低暗電流型カソードアセンブリを開発した。新開発カソードアセンブリと現行アセンブリの暗電流は、実機の電場環境を模擬できる測定装置で計測した。この測定装置は、内部の超高真空下にカソードアセンブリと向かいあい、それとの間隙を調整できるアノードを有し、DC+7kVを印加したアノードへの流入電流を暗電流として測定するものである。新開発カソードアセンブリからの暗電流は、電場印加直後は測定限界以下であるが、その後、突如測定にかかる量となる挙動を見せた。電解研磨グリッドタイプのカソードアセンブリは、暗電流が測定限界である時間が5時間と長く、チタンコーティングタイプのカソードアセンブリは、発生後7時間後の暗電流が、電解研磨タイプおよび現行のカソードアセンブリと比較しても小さかった。今後は、電解研磨とチタンコーティングを施したグリッドの効果を検討するべきである。また、測定装置と実機との違いを明確にする必要がある。その一環として、数か月以上のより長い期間での暗電流の変化を測定する必要もある。

## 謝辞

本研究で新規開発したカソードアセンブリは、新日本無線株式会社の製作によるものです。多数の技術的コメントもいただきました。心より感謝しております。

## 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] Tamotsu Magome *et al.*, “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.”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 5-7, 2015, Tsuruga, Japan, pp.496.