

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、鈴木 伸介、花木 博文

Tamotsu Magome*, Toshiaki Kobayashi, 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, a cathode assembly with electro-polished and titanium-coated grid has been developed. To evaluate dark-current-reduction performance of the newly-developed cathode assembly, dark current emitted from the newly-developed cathode assembly and three other kinds of cathode assemblies was measured under conditions similar to those of the real accelerator. The dark-current measurement was carried out during heating times of 47 - 49 days using our offline electron-gun test equipment which applied DC acceleration voltage to its electron gun. The three cathode assemblies were two of the existing cathode assemblies different in serial number and a cathode assembly with electro-polished grid. Dark current from the newly-developed cathode assembly was over 100nA and the largest among that of the cathode assemblies. Dark current from the cathode assembly with the electro-polished grid was under 1nA and the smallest among that of the cathode assemblies during the measurement period. The two existing cathode assemblies showed individual difference in dark current by two to three orders of magnitude.

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アセンブリ (CPI 社製 Y-845) を電子銃に使用している。電子銃のカソードアセンブリは、暗電流の増加防止の観点から、1 年毎に新品への交換を行っているが、交換したカソードアセンブリによっては、1 年を待たずに暗電流が増大し、加速器運転に支障をきたす場合もある [1,2]。

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、電子銃のウェーネルトからの熱電界放出電流からなるが [2]、これらのうち、グリッドからの熱電界放出電流を低減するために、現行カソードアセンブリ (以降、現行タイプと略記) と互換性があり、グリッドの表面を電解研磨にて滑らかにしたカソードアセンブリ (以降、電解研磨タイプと略記) を開発した [3]。開発した電解研磨タイプは、実機を模倣したオフラインの電子銃試験装置にて 10 日間の試験運転を行い、現行タイプの 0.1 倍に暗電流を低減することができた [4]。

本件では、より長期間の暗電流低減を狙って、電解研磨タイプのグリッドにチタンコーティングを施したカソードアセンブリ (以降、チタンコーティングタイプと略記) を開発した。開発したチタンコーティングタイプについては、現行タイプ・電解研磨タイプとともに、電子銃試験装置にて 47~49 日間の試験運転を実施し、その暗電流低減効果を検証したので、その結果を報告する。

2. 新開発カソードアセンブリ

新開発のチタンコーティングタイプは、グリッドを除いて電解研磨タイプと同一構造である。現行タイプも基本的な構造はこれらと同一である。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 8mm) 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。

現行タイプのグリッドは、タングステンのワイヤーメッシュ (ワイヤー径 20 μ m、ピッチ 180 μ m) であり、その下面がカソード表面から 120 μ m の距離に位置する。一方、電解研磨タイプ、および、チタンコーティングタイプのグリッドは、耐熱性に優れたモリブデンの板 (厚さ 50 μ m) に、一辺 200 μ m の正三角格子位置に直径 170 μ 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それぞれ、168 μ m、および、149 μ m の距離に位置する。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、その表面の凸凹のみならず、円形穴の縁・内面のバリも電解研磨で除去したものである。チタンコーティングタイプのグリッドは、この電界研磨タイプのグリッドに対して、約 0.5 μ m の厚さのチタンをコーティングしたものである。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表面にうねりがみられた。

3. 電子銃試験装置

電子銃試験装置は、電子銃とファラデーカップを有するオフラインの超高真空チェンバーである [2]。スパッタイオンポンプ、NEG ポンプ、および、ターボ分子ポンプによる排気により、電子銃稼働時に内部の圧力を 10⁻⁷Pa 前半にすることができる。

電子銃は、実機と同型であるが、加速電圧が異なる (実機ではピーク強度-200kV・半値全幅 4 μ の高電圧パルス、電子銃試験装置では-85kV の直流電圧) の

*magomago@spring8.or.jp

Table 1: Specification of the Grids of the Existing (CPI, Y-845), the Electro-polished, and the Newly-developed Cathode Assemblies

Cathode Assembly		Existing	Electro-polished	Newly-developed
Material		Tungsten	Molybdenum	Molybdenum
Form		Wire mesh	Perforated plate	Perforated plate
Surface treatment		Titanium-coating	Electro-polishing	Titanium-coating (t0.5 μ m) after electro-polishing
Dimension	Wire diameter	20 μ m	-	-
	Plate thickness	-	48 μ m	49 μ m
	Pitch	180 μ m	200 μ m	200 μ m
	Hole diameter	-	170 μ m	170 μ m
Distance between grid and cathode		120 μ m	168 μ m	149 μ m

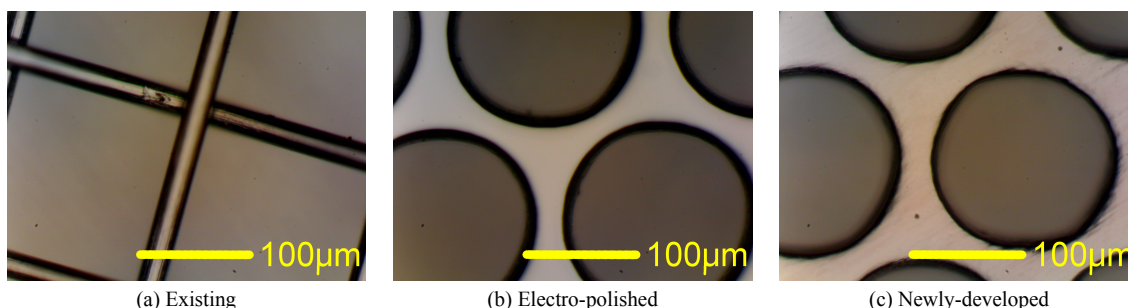


Figure 1: Optical microscope images of the grids of the existing, the electro-polished, and the newly-developed cathode assemblies.

で、グリッド表面にかかる電場の強さが実機と同じ 3MV/m になるようにアノードの形状を変更している。

暗電流電子が飛行中に外乱を受けないように、ファラデーカップは、電子銃出射孔のすぐ下流に設置されている。反跳電子・二次電子による電子の散逸を防止するために、ファラデーカップは炭素製のコップ状の本体と、開口周辺にリング状のサブレッサー電極を有し、それぞれの電位は、0V、-700V に設定されている。

ファラデーカップに流れ込む電流は、ピコアンメーターにより計測する。計測された電流値は、圧力値とともに、3s ごとに PC により記録される。この電流値が暗電流値（慣例上符号は逆にしている）となる。上記のような電子銃試験装置により、実機とほぼ同じ条件で暗電流を測定することができる。

4. 測定方法

4.1 暗電流計測

新品の現行タイプ 2 台（以降現行タイプ A・現行タイプ B で区別する）、電解研磨タイプ、および、チタンコーティングタイプを 1 台ごとに電子銃試験装置に装填し暗電流を測定した。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、グリッドにバイアス電圧 61.0V を印加し、 10^{-6} Pa 台の圧力下で、各カソードアセンブリ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-

ターエージングでは、ヒーター電圧を 0V から 6.0V まで昇圧した。6.0V 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 6.0V に降圧した。

次に電子銃に加速電圧を印加し、暗電流を測定した。装置の安全上の仕様から、加速電圧は常時ではなく、オペレーターが監視している間のみ印加した。暗電流測定は、49 日間実施したが、実機への装填、装填用のカソードの事前検査などのため、現行タイプ A と、電解研磨タイプについては、それぞれ、9 日、および、47 日間で測定を中断した。

また、各カソードアセンブリの暗電流の測定中に、一旦暗電流測定を中断し、所内既定のエミッション試験を一度だけ実施し、再度暗電流測定を継続した。

4.2 暗電流のバイアス電圧・加速電圧依存性の測定

暗電流について知見を得るために、暗電流のバイアス電圧依存性・加速電圧依存性を測定した。測定は、暗電流測定の初期段階・終了段階のそれぞれ 1 回行った。（現行タイプ A は 9 日間の暗電流測定だったので、初期段階のみである。）

4.3 グリッドの表面観察と元素分析

暗電流測定の実施前後に、光学顕微鏡によるグリッドの観察を実施した。また、現行タイプ B と電解研磨タイプは暗電流測定後に、チタンコーティングタイプは暗電流測定前後に、それぞれのグリッドの SEM

観察、EDX による元素分析を実施した。SEM 観察は二次電子モードで行い、SEM の加速電圧は 15kV であった。

5. 測定結果

5.1 暗電流計測

図 2 に暗電流の測定結果を示した。横軸はヒーター通電時間であり、ヒーター電圧 6.0V を印加した時間を示している。縦軸は暗電流である。いずれの場合も、暗電流が一時的に急変しているときがあるが、これは、電子銃試験装置内部の圧力が暴発している瞬間と一致していた。

暗電流が急変する場合を除いて、各カソードアセンブリの暗電流を比較すると、電解研磨タイプの暗電流は、測定期間中を通して最少であった。また、測定開始から 4.6 日間測定限界以下であった。

現行タイプ A は電解研磨タイプと同程度に暗電流が少なかったが、現行タイプ B は、現行タイプ A よりも暗電流が 2~3 桁多かった。暗電流測定前の光学顕微鏡観察では、現行タイプ A と現行タイプ B の違いは判別できなかった。

チタンコーティングタイプの暗電流は、測定開始すぐに $1\mu\text{A}$ 台となり、その後徐々に減少したものの、全測定期間中を通して、どのカソードアセンブリよりも多かった。

5.2 暗電流のバイアス電圧・加速電圧依存性の測定

図 3 に暗電流のバイアス電圧依存性を示す。暗電流が少なかった現行タイプ A と電解研磨タイプは、これまでの測定 [2,4] と同様に、バイアス電圧の増加に対して暗電流は極小値を持つ変化をした。

暗電流が多かった現行タイプ B とチタンコーティングタイプは、バイアス電圧の増加に対して暗電流は、極小値を持たなかったり、増加したりと、これまでの測定と異なる結果を示した。

チタンコーティングタイプについては、グリッドとカソード間の保護抵抗 ($20\text{k}\Omega$) を短絡した場合でも同じバイアス電圧依存性を示した。また、カソードから流れ出る電子の量も計測したが、バイアス電圧の増加に対して、当該電子量は単調に増加した。

これらの暗電流が極小値を取るバイアス電圧にて、現行タイプ A と電解研磨タイプ A の加速電圧依存性を調べた結果を図 4 に示す。図中の曲線は、測定値に modified Richardson-Dushman(以降 MRD と略記) の式を電流標記にしてフィッティングしたものである。電解研磨タイプの場合には、加速電圧が 40kV 以上のデータにフィッティングした。

5.3 グリッドの表面観察と元素分析

図 5 に暗電流測定後の 3 種類のグリッドの SEM 画像の一例を示した。どれもカソード周辺部上のグリッドの SEM 画像である。電解研磨タイプのグリッドの SEM 画像は、設定を誤っていたため、反跳電子像である。

現行タイプ B のグリッドには繊維状の付着物が見られる。これは暗電流の測定中に付着したものであ

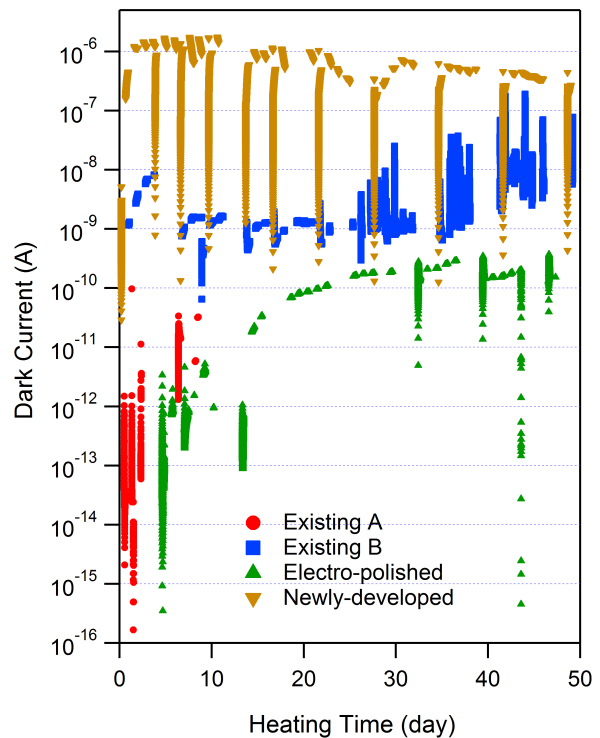


Figure 2: Temporal change in dark currents emitted from four cathode assemblies. The four cathode assemblies were two existing cathode assemblies different in serial number, the electro-polished cathode assembly, and the newly-developed cathode assembly. Heater voltage was 6.0V. Bias voltage was 61.0V. Acceleration voltage was 85kV.

り、主成分はバリウムであった。繊維状の付着物は、グリッド中央部に近くなる程、小さい球状へと形状を変え、グリッド中央部ではほとんど見られなかった。どの形態でも付着物の主成分はバリウムであった。

電解研磨のグリッドには、暗電流測定後に現れた付着物はなかった。画像中央にバリウムが主成分の突起が見られるが、これは暗電流測定開始前にも見られたものであった。

チタンコーティングタイプのグリッドには、エッチング穴のグリッド裏面側の縁に球状の付着物が見られた。グリッド中央部に近くなる程は量が少なくなり、グリッド中央部では、ほとんど見られなかった。これらの付着物は主成分がバリウムであり、暗電流の測定中に発生したものであった。

元素分析を行った全てのカソードアセンブリのグリッド表面には、暗電流測定後は、一様に薄く分布したバリウムが検出された。

光学顕微鏡観察によると、現行タイプ A のグリッドには、暗電流測定中の付着物が見られなかった。

6. 考察

6.1 暗電流について

現行タイプの暗電流は、個体間にばらつきがあり、実機での使用において、いくつかの現行タイプの暗

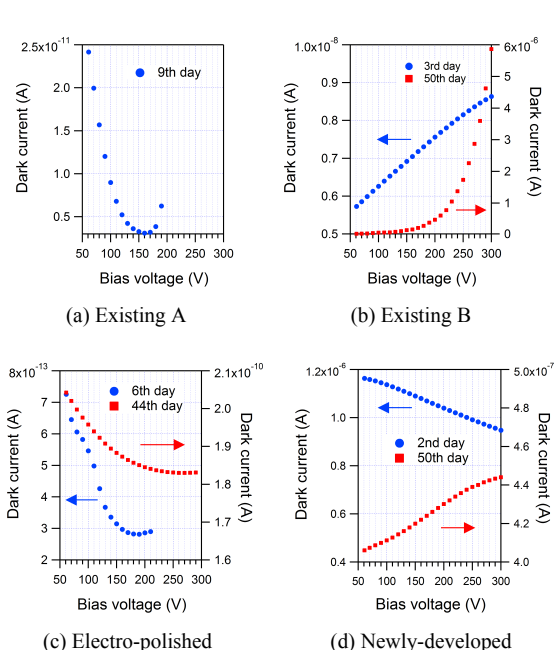


Figure 3: Dependence on bias voltage of dark currents emitted from the existing cathode assemblies (a) A and (b) B and (c) the electro-polished and (d) the newly-developed cathode assembly. Heater voltage was 6.0V. Acceleration voltage was 85kV.

電流が極めて多かった事実と符合する。光学顕微鏡では個体間のばらつきを示す違いを見つけられなかった。今後も現行タイプを使用する場合は、事前の動作試験に暗電流の測定・評価を含める必要がある。

電解研磨タイプの暗電流は、測定開始から4.6日間は測定限界以下であったが、このことは、電解研磨により放電開始ポイントが除去された効果であると考えられる。全測定期間中の暗電流の挙動から考えると、47日目以降も最も暗電流が少ないと推定され、暗電流の観点からは、最も実機での使用に適しているといえる。

チタンコーティングタイプの暗電流は、測定開始すぐに最大となり、その後徐々に減少したが、同じよ

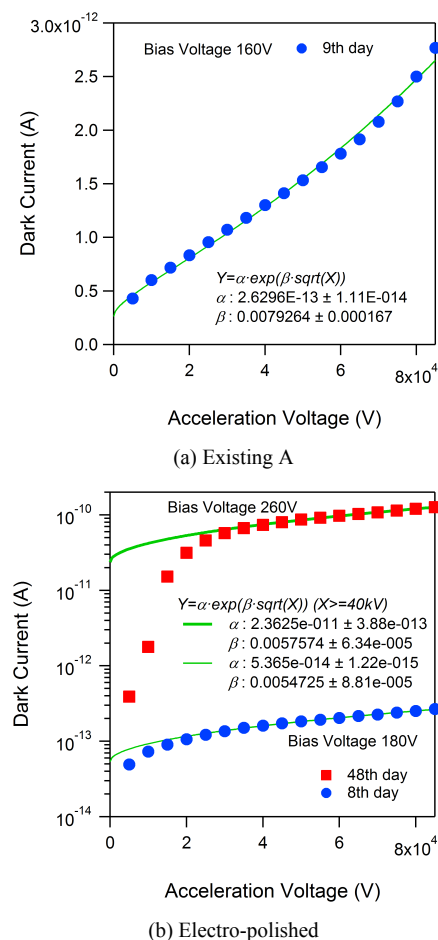


Figure 4: Dependence on acceleration voltage of dark currents emitted from (a) the existing cathode assembly A and (b) the electro-polished cathode assembly. Modified Richardson-Dushman equations were fit to measured data. Heater voltage was 6.0V.

うな傾向は、2016年度に開発した電解研磨なしのチタンコーティングタイプの暗電流測定でも見られており [3]、暗電流測定の際にチタンコーティングに何らかの変化が生じていると推定される。

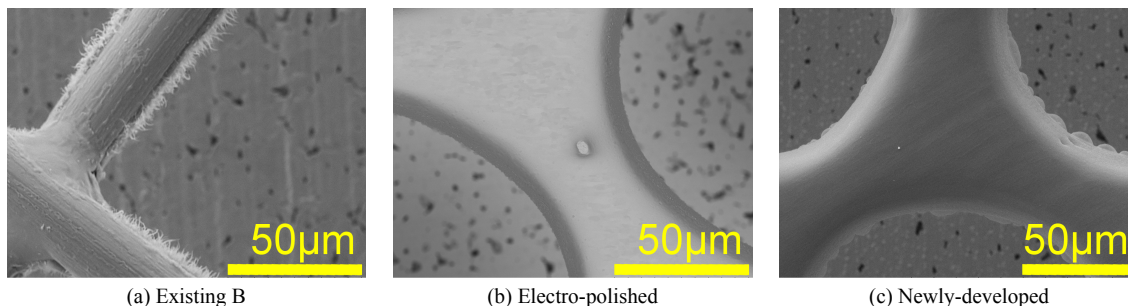


Figure 5: SEM images in secondary-electrons mode of (a) the grids of the existing cathode assembly B and (c) the newly-developed cathode assembly. SEM image in backscattered-electrons mode of (b) the grid of the electro-polished cathode assembly. All three SEM images were detected after dark-current measurements. Acceleration voltage of the SEM was 15kV.

チタンコーティングタイプの暗電流が最も多かった理由は、二つ想定できる。第一の理由は、カソードとグリッドの間の距離が、電解研磨タイプより短いことである。これにより、グリッドの温度が高くなり、同時に、カソードから漏れるエミッションカレントが多くなるのが推定される。第二の理由は、チタンコーティングタイプのグリッドの表面の粗さである。平滑な電解研磨表面に成膜されたにもかかわらず、チタンコーティングタイプのグリッドの表面にうねりが存在することは、当該グリッド表面にさらに細かい凸凹も存在することを示唆している。電解研磨タイプの暗電流に見られた測定限界以下の期間がなかったことも、表面が平滑でないことを意味している。

チタン製グリッドはバリウムが付着しにくく、暗電流が少ないが [5]、適切に成膜を制御しなければ、コーティングという形ではチタンの暗電流低減効果は得られないといえる。

バリウムが徐々に付着していくにもかかわらず、暗電流が減少しているのが、グリッドに付着したバリウムの暗電流への影響は暗電流の測定期間中にはなかったと考えられる。しかし、測定期間がより長い場合は、さらに多く付着するバリウムの効果が顕著になる可能性がある。現段階では、チタンコーティングタイプは実機での使用には向かないと考えられる。

6.2 グリッドの表面観察・元素分析について

グリッド表面に検出されたバリウムは、カソードから蒸発したバリウムであるが、現行タイプ B のグリッドの付着物は、形状・量とも、実機で半年間使用した現行タイプのカソードアセンブリのグリッド付着物 [3] と同じであり、49 日間の測定で実機の様子をよく模擬できていると考えられる。

6.3 暗電流のバイアス電圧・加速電圧依存性の測定

暗電流の一部はカソードから漏れてきたエミッションカレントであるというモデル [2] では、バイアス電圧に対して暗電流が減少する。暗電流が少なかった現行タイプ A と電解研磨タイプについては、このモデルが適用可能であった。電界研磨タイプにおいて、ヒーター通電時間 6 日目と 44 日目の測定結果を比較すると、44 日目の方が暗電流自体は増加しているにもかかわらず、バイアス電圧による減少分は少なくなっていることから、バリウムの付着によりグリッドからの暗電流が増加しており、このモデルが妥当であることを意味している。

これらのタイプについて測定された加速電圧依存性は、グリッドからのみの暗電流の特性を示している。図中の MRD 式においては、係数 α は仕事関数と負の相関が、係数 β は局所電界と正の相関があるが、電解研磨タイプは、現行タイプよりわずかであるが、局所電界が小さく、電解研磨の効果があつたことがわかる。また、暗電流の量は仕事関数の減少分、すなわち、バリウムの付着量が支配的であることもわかる。電解研磨タイプは加速電圧が 40kV 未満の測定値が MRD 式から大きくそれるが、この原因は分かっていない。

暗電流が多かった、現行タイプ B・チタンコーティングタイプは、バイアス電圧依存性からすると、上記モデルが適用できない。この結果が保護抵抗の有無によらないことから、見かけ上バイアス電圧が変化しただけでもない。カソードからの漏れ電流の増加でもない。

上記未解決の点については、現在、グリッドの湾曲等の可能性を含めて検討しているが、今後も詳細な調査が必要である。

7. 結論

SPring-8 線型加速器の電子銃からの暗電流を低減するため、グリッドに電解研磨とチタンコーティングを施したカソードアセンブリを開発した。このカソードアセンブリの暗電流低減性能を評価するため、現行のカソードアセンブリ 2 個と、新開発のカソードアセンブリと全くの同型であるが、グリッドが電解研磨のみのカソードアセンブリとともに、暗電流の測定を行った。暗電流の測定は、実機での使用条件に近くなるよう、47-49 日というこれまでの測定期間に比較して長い期間実施した。暗電流測定の結果、新開発のカソードアセンブリは、暗電流が一番多く、電解研磨だけのグリッドを持つカソードアセンブリが暗電流が一番小さかった。現行のカソードアセンブリは、暗電流の大きさについて、2~3 桁の個体差があることが分かった。現段階では、電解研磨タイプが、暗電流の観点から実機での使用に最適であると判明した。

謝辞

本研究で使用した現行タイプ以外の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。ここに深謝の意を表します。SEM 観察・EDX による元素分析では、JASRI 利用研究促進部門の中村哲也氏と小谷佳範氏に多大なる御協力・御支援を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Shinsuke Suzuki *et al.*, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 9-11, 2014, Aomori, Japan, pp.904 (in Japanese).
- [2] Tamotsu Magome *et al.*, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 5-7, 2015, Tsuruga, Japan, pp.496 (in Japanese).
- [3] Tamotsu Magome *et al.*, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 8-10, 2016, Chiba, Japan, pp.448 (in Japanese).
- [4] Tamotsu Magome *et al.*, Proceedings of LINAC2016, East-Lansing, MI, USA, pp.888.
- [5] 鳳 誠三郎, 金属材料と加工技術講座〈第 6〉電子・電気材料の特性と選択, 東京, 地人書館, 1964 (in Japanese).