

# Mg カソードを用いた高品質電子ビーム生成

黒田 隆之助<sup>1A)</sup>、鷺尾 方一<sup>A)</sup>、柏木 茂<sup>A)</sup>、大島 崇<sup>A)</sup>

浦川 順治<sup>B)</sup>、早野 仁司<sup>B)</sup>、X. J. Wang<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> 早稲田大学理工学総合研究センター

〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

<sup>B)</sup> 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

<sup>C)</sup> Brookhaven National Laboratory

Upton NY 11973, USA

## 概要

早稲田大学理工学総合研究センターでは、高品質電子ビームの発生とその反応・物性への応用を目的として、レーザーフォトカソード RF 電子銃 (RF-gun) システムの構築を行っている。その際、カソードに Mg カソードを用いることにより高強度の電子ビームを発生することができる。今回、マグネシウムカソードの研磨及び周波数調整を行い、銅カソードとの交換を実現した。

## 1. はじめに

近年、レーザー技術の目覚ましい進歩に伴い、超短パルスの高品質電子ビームが生成可能である、レーザーフォトカソード RF 電子銃 (RF-gun) の研究・実用化が世界各国で行われている<sup>1)</sup>。これまで、早稲田大学理工学総合研究センターでは、昨年 5 月～7 月、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 工作センターにおいて RF-gun 空洞の製作を行った。その際、暗電流削減のため空洞内部にダイヤモンドバイトを用いた超精密加工を施し<sup>2)</sup>、同時に周波数調整を行った。そして昨年 10 月、準備期間を経て高エネルギー加速器研究機構試験加速器施設 (KEK-ATF) インjekター部において、銅カソードを用いた試験加速実験を行い早稲田大学での RF-gun 実用化への第一歩を踏み出した。そして、本年度、早稲田大学理工学総合研究センター喜久井町キャンパスにおいて 2nC/bunch 以上の大強度電子ビームの生成実験を行う予定である。

## 2. 試験加速実験

昨年 10 月、高エネルギー加速器研究機構試験加速器施設 (KEK-ATF) インjekター部において、銅カソードを用いた RF-gun の試験加速実験を行った<sup>3)</sup>。RF-gun のデザイン値では、空洞にピークパワーで約 7MW の高周波を供給することにより、100MV/m の加速電場を誘起し 5MeV の電子ビームを得ることができる。しかし、試験加速実験では、調整不十分からピークパワー 3MW 程度の高周波を供給するに

とどまった。これにより、加速電場はデザイン値の約 60% の 60MV/m 程度で実験を行った。

実験の結果、電子のエネルギーは最大約 2.7MeV、電荷量最大約 300pC/bunch、バンチ長約 10ps (FWHM) (ビームスペクトラム解析法により測定)、最小エミッタンス約 16mm mrad (スリットスキャン法により測定) の電子ビームを得ることができた。

## 3. マグネシウムカソード

マグネシウムカソードの研究は、これまでブルックヘブン国立研究所 (BNL) において盛んに行われてきた<sup>4)</sup>。その研究の結果、ベーキングなどによって高い熱を加えた場合や高強度の高周波中でも安定に動作するマグネシウムカソードの開発に成功した。

マグネシウムカソードは、銅の仕事関数 (4.65eV) よりも低い仕事関数 (3.64eV) を持つため、高強度の電子ビームが生成可能である。カソードの形状は、カソードの中心部分にサイズがコイン程度のマグネシウムを埋め込んだ形状をしている (図 1)。



図 1 : マグネシウムカソード

## 4. カソード交換

KEK-ATF における RF-gun 試験加速実験を終え、早稲田大学理工学総合研究センター喜久井町キャンパスに RF-gun システムの設置を行った。その際、BNL の協力により製作したマグネシウムカソードを銅カソードと交換するため、表面研磨及び周波数調整等を行った。

<sup>1)</sup> E-mail: 601L5054@mn.waseda.ac.jp

## 4.1 カソード研磨

マグネシウムカソードは、銅カソードの中心にマグネシウムを埋め込んだあと普通旋盤による加工のみが施されているため、表面粗度が非常に粗く研磨をする必要がある。研磨は定盤の上にカソードをのせ、面だしを行った後に 12 $\mu\text{m}$ 、6 $\mu\text{m}$ 、3 $\mu\text{m}$ 、1 $\mu\text{m}$  の砥粒（ダイヤモンド）の順番に研磨を行った。このとき使用した研磨剤はダイヤモンドに添加物を僅かに加えたものである。

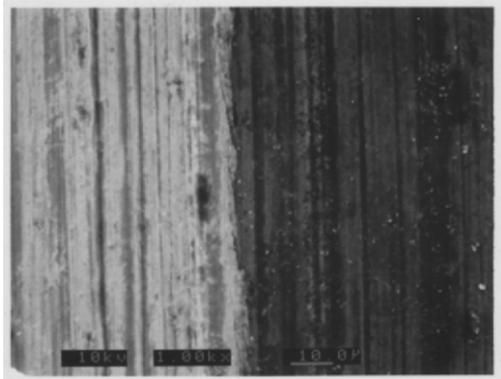


図 2：研磨前の接合部分  
(左側：銅、右側：マグネシウム)

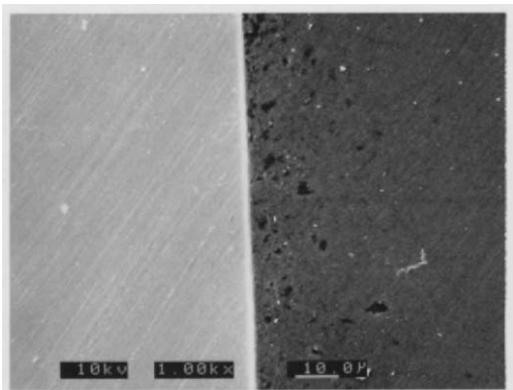


図 3：研磨後の接合部分  
(左側：銅、右側：マグネシウム)

図 2、図 3 に研磨前と最終研磨の直前に電子顕微鏡 (SEM:1000 倍) で観測した銅とマグネシウムの接合部の写真を示す。研磨前の写真 (図 2) では旋盤で削った跡をはっきりと見ることができる。また、左側の銅がマグネシウムの上に旋盤で加工した際に表面の部分が乗りあげているようにも見える。この写真からも、微小突起による暗電流の削減を考えた場合に普通旋盤で加工では、表面粗度の面で不十分と思われる。そして、研磨後の写真 (図 3) からは、表面がきれいに研磨されていることが分かる。銅とマグネシウムの接合面も余計な隙間などはない。しかし、マグネシウムの接合面から 50 $\mu\text{m}$  程度までの間にクレータのような微小な穴の存在が確認できる。このクレータのような跡がどのように生じたかは不明であるが、マグネシウムを銅に埋め込む際に熱により生じた可能性もある。

## 4.2 周波数調整

カソードを交換する際、もっとも重要なのが共振周波数の調整である。今回、周波数調整は、カソードプレートを締め付けていくトルクの大きさと各トルクでの共振周波数、ネットワークアナライザでの周波数スペクトラムの振幅 (ゲイン) 比を測定する事によって行った。なお、測定は常温 (空洞の冷却水温 20 度) で行った。真空に関しては、ヘリコプレックスにより多少の違いはあるが、カソードプレート締め付けの強さが 10Nm 程度で真空はとまる事を確認した。

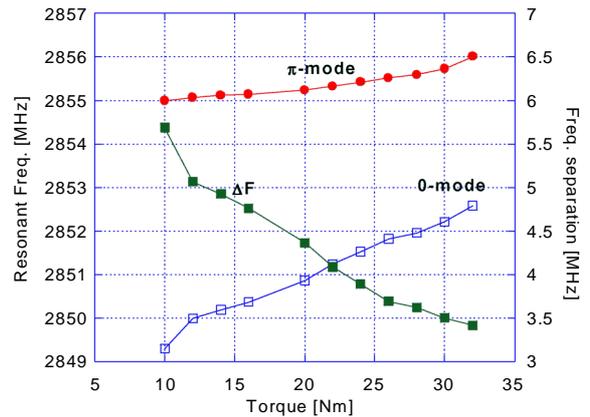


図 4：カソード締め付けトルク vs 共振周波数及び  $\pi$  モードと 0 モードの周波数差

図 4 にトルクの締め付けの大きさと  $\pi$  モード、0 モードの共振周波数および共振周波数の差 (frequency separation) をプロットした。32Nm まで締めたところで、 $\pi$  モードの共振周波数がおおよそ 2856MHz になり、そのときの周波数差は約 3.4MHz であった。

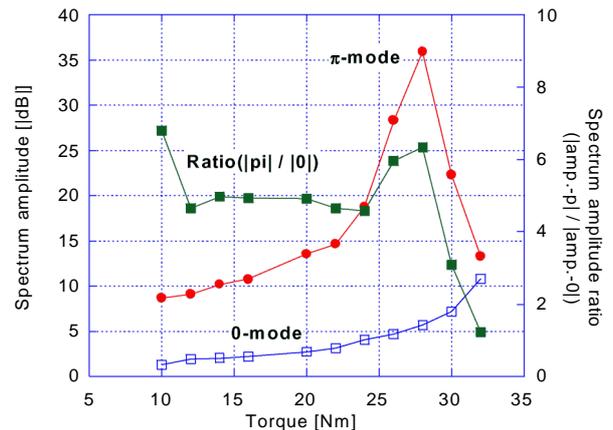


図 5：カソード締め付けトルク vs 周波数スペクトラム振幅及びその比

昨年夏の KEK でのビーム摂動法による空洞内の電場分布の測定から、ハーフセルとフルセルの電場分布の比 (フルセルの電場 / ハーフセルの電場) を 0.9 から 1.1 の範囲に調整するには、周波数スペクトラム振幅の比 ( $\pi$  モード / 0 モードの振幅) が約 1.5~2.0 の範囲に入っている必要がある。図 5 から分かるよ

うに、トルク 32Nm まで締めた時、上のフィールドバランスの条件を満足する範囲に入っている。

次に、カソードをトルク 32Nm で締めた後の、チューナーによる最終調整について述べる。チューナーはフルセル内にあり、フィールドバランスを調整するために非常に有効な調整手法である。以下、図中のチューナーの回転数は、チューナーを完全に抜いた状態から何回転分空洞側に挿入したかを表している。チューナーが約 8.5 回転したところで、チューナー先端が空洞内に届いてしまうため、8.5 回転以下で共振周波数およびフィールドバランスがとれなくてはならない。また、チューナーで調整可能な共振周波数( $\pi$ モード)の調整範囲は 400kHz 程度である。

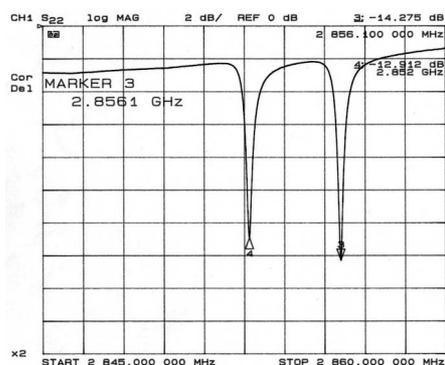


図 6 : 周波数スペクトラム(チューナー0 回転)  
 $\pi$ モード 2856.10MHz, 0 モード 2852.69MHz

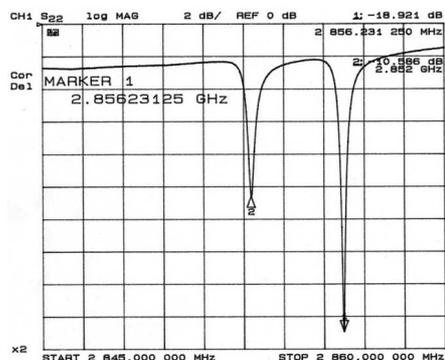


図 7 : 周波数スペクトラム(チューナー7 回転)  
 $\pi$ モード 2856.23MHz, 0 モード 2852.78MHz

図 6、7 は、それぞれ、チューナー0 回転と 7 回転時の $\pi$ モードと 0 モードの周波数スペクトラムである。このときの空洞冷却水温は 20 度である。これにより、チューナー7 回転時の $\pi$ モードと 0 モードの振幅比が約 1.7 程度、つまりフィールドバランスを、1:1 にすることができた。しかし、 $\pi$ モードの共振周波数が

S-band (2856MHz) より若干高いため、共振周波数の最終調整は、空洞の冷却水温で調節し、冷却水温約 27 度において 2856MHz の共振周波数を実現することができた。

## 5. まとめ及び今後の展開

以上のことにより、早稲田大学理工学総合研究センターにおける RF-gun システムにおいて、銅カソードを、順調にマグネシウムカソードに交換することができた。

しかし、今後、マグネシウムカソードに関する系統だった基礎研究が必要だと考える。1 つは、レーザークリーニングによるカソード量子効率向上のメカニズム解明である。クリーニング中に真空中の残留ガス分析を行うことにより、クリーニングの前後でどのような変化がカソード表面で起きているか、また実機では困難であるが表面の酸化物などカソード表面に付着している物の分析など注意深く行う必要があると思われる。

我々は本年度、マグネシウムカソードを実際に使用し、その取り扱い方法(加速電界強度、レーザークリーニングなど)によってどのような違いが生じるか系統だった測定を行う。また、低仕事関数のマグネシウムカソードを使用し、かつショットキー効果を利用した 2nC/bunch 以上の大電流の電子ビームをフォトカソードにより取り出すことに挑戦する。基本的には高電界を空洞に生成できれば、ショットキー効果により大電流を引き出すことができるため、大電流を得るには低仕事関数のカソードを使用し、かつ高電界による運転が望ましい。しかし高電界運転を行う場合、暗電流の増加および絶縁破壊などの困難が付きまとう。頻繁なブレイクダウンによりカソード表面の状態を悪化させる可能性もある。そこで、真空システムのアップグレードを行うことによって、これらの困難を克服し大電流の高品質電子ビームの生成を目指していく予定である。

また、本研究における空洞製作においては KEK 工作センター、人見センター長、舟橋義聖、渡辺勇一、高富俊和、各氏に、カソード研磨に関しては春川鉄工(株)の方々に多大な協力をいただき、ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] X. J. Wang et al., Proc. PAC1995 (1995) p.890
- [2] C. Suzuki et al., Proc. 24<sup>th</sup> Linear Accel. Meeting in Japan, (1999) p.122
- [3] R. Kuroda et al., PAC2001 (2001), WPAH079
- [4] T. Srinivasan-Rao et al., Proc. PAC1997 (1997) p.2790