

フォトカソード RF 電子銃の量子効率の改善

神門正城^{1, A)}、小瀧秀行^{A)}、近藤修司^{A)}、金沢修平^{A)}、益田伸一^{A)}、本間隆之^{A)}、中島一久^{A)B)}

^{A)}日本原子力研究所 関西研究所 光量子科学研究センター

〒619-0215 京都府相楽郡木津町梅美台 8-1

^{B)}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

概要

原研関西研究所のフォトカソード RF 電子銃はカソード材に無酸素銅を用いているが、量子効率は 1×10^{-5} と以前得られた数値に比べて一桁ほど悪かった。コンディショニングによる改善効果を図ったが変化は見られなかったため、カソード部分の再研磨作業を実施した。今回の報告では、カソード再研磨前後の電子銃の電子放出に関して報告をする。

1. はじめに

日本原子力研究所関西研究所光量子科学研究センターでは、レーザー加速研究のための高品質入射装置としてフォトカソード RF 電子銃と race-track 型マイクロトロン（以下、RTM）を組合わせた加速器を整備してきた[1-2]。この加速器はレーザー航跡場加速実験のテスト電子入射器として使用されるため、電荷量は pC レベルで問題ないが、ビーム調整のためには電荷量が多い方が望ましい。RF 電子銃の量子効率に関する興味もあることから、量子効率の改善を図ることにした。カソードの量子効率を改善するには、(1) レーザークリーニング法及び (2) カソード再研磨が考えられる。前者は簡便で有るが、フォトカソード用レーザー自身では効果がなかったこと、大強度のレーザーでは表面の損傷が考えられることから今回は後者の方法を取ることにした。RF 電子銃を製作している住友重機械では後者の方法で RF 電子銃の改善に成功している。

2. フォトカソード RF 電子銃

フォトカソード RF 電子銃の構成を図 1 に示す。ハーフセルとフルセルがカップルした BNL タイプの 1.6 セルの定在波型 RF 電子銃である。チューニング用のアンテナはフルセルの方にしかついていないため、周波数調整はカソード面を切削し測定するトライ&エラーで行う。カソード照射用レーザーは、全固体 Nd:YLF レーザーシステムで、エネルギー安定度 0.2 % rms である。この RF 電子銃は、短パルス、高輝度の電子銃で問題となる線形空間電荷力によるエミッタンス増大を補償するソレノイド電磁石が装着されているのが特長で、エネルギー 3.5 MeV、エミッタンス $1 \sim 10 \pi \text{ mm-mrad}$ 、パルス幅 $5 \sim 10 \text{ ps}$ 、電荷量最大 3 nC の電子シングルバンチを発生させる

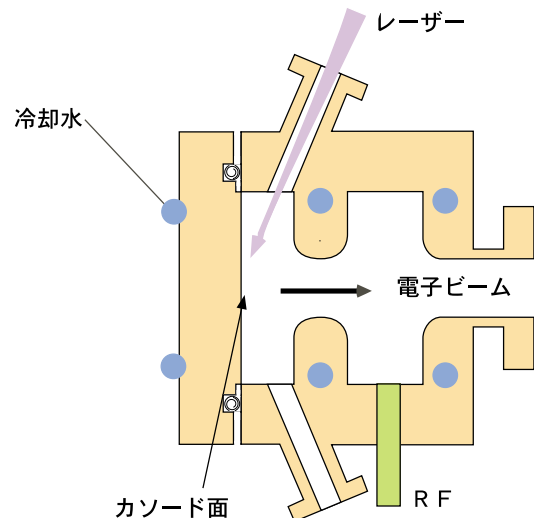


図 1：フォトカソード RF 電子銃の構成

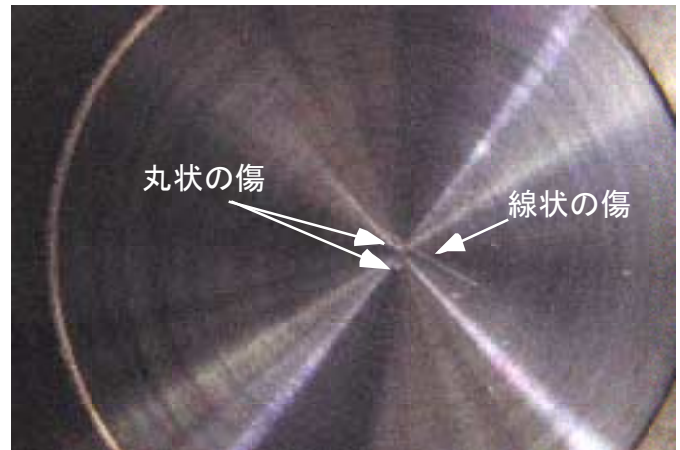


図 2：研磨前のカソード状態

ことができる。研磨前の典型的なパラメータは、入射 RF パワー 5.4 MW パルス幅 $6 \mu\text{s}$ のときに、量子効率 1×10^{-5} 、暗電流は 2 nC/pulse であった。RF 電子銃と RTM をつなぐ真空ラインはターボ分子ポンプとイオンポンプで、RF 電子銃はイオンポンプと NEG ポンプで真空排気されている。電子ビームをマイクロトロンに入射しないときはゲート弁で区切られ、RF 電子銃の真空度は 4×10^{-9} Torr 程度になっている。

¹ E-mail: kando@apr.jaeri.go.jp

3. 研摩作業

3.1 研摩前のカソード状態

研摩前に RF 電子銃内部とカソード面を観察した。図 2 はカソード面の状態であるが、中心とその外側に穴状の傷と線状の傷が観測される。線上の傷は、レーザーをスキャンしたときについたと思われるが、レーザーを単独にスキャンしてもこの傷はつかない。そのため、これらは運転時の RF の放電とレーザーとが関連してできる傷であると考えられる。図 3 は電子銃のカソード面フランジとハーフセル部分の接触部分の放電痕である。ここは若干の間隙が生じており、運転時の放電の原因となっていると思われる。この点は改良の余地がある。

3.2 研摩作業

研摩工程は、(1) 微細ダイヤモンド研磨剤 (BUEHLER METADI) を用いたターニングマシンによる研摩、(2) ヘキサンによる超音波洗浄から成る。研磨剤には粒子の大きさが 9 μm 、6 μm 、1 μm の 3 種類を順番に用いた。この後、電子銃に組み込み、共振周波数測定を行い、望みの周波数からずれていれば旋盤によりカソード表面を数ミクロン切削し、再

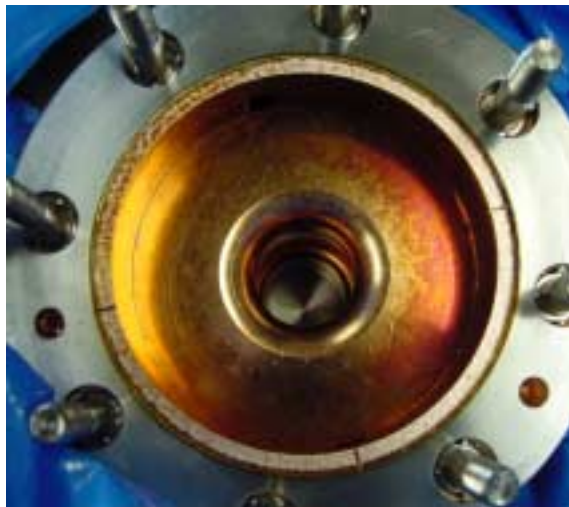


図 3：研摩前の加速空洞

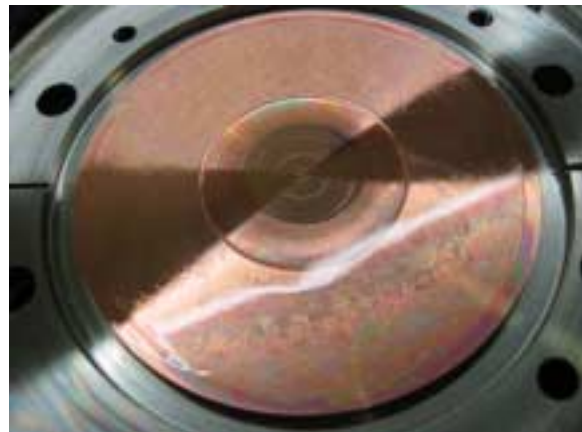


図 4：研摩後のカソード

び(1)からの工程を繰り返す。実際には、周波数調整が難しく、3 回繰り返した。RF 空洞の共振周波数測定は研摩前は冷却水温度 42.0 で 2856 MHz であったが、研摩後は同じ周波数で 34.0 となった。これは冷却水温度の調整範囲である。

図 4 に研摩後のカソード面を示す。以前のカソードはダイヤモンド研磨剤による研摩工程を経なかったため、同心円状の切削痕が残り、鏡面ではなかった。今回は同心円状の研摩傷はあるものの鏡面になっている。このため、レーザー光を入射したときにカソードからの反射光が入射窓の反対側の窓から観察できる。中心の丸状の傷は深かったがほとんどなくなった。また、図 3 で見た接触部分の放電痕は銅ウールで磨いた。さらに真空シールであるヘリコフレックスの入る溝部分を若干削り、空隙部分の減少を狙った。

4. 研摩後のビーム測定

4.1 量子効率と暗電流の測定

研摩後の RF 電子銃を、日本原子力研究所においてビームラインに組み込み、真空引きを開始した。カソード研摩作業を行ったこと、及び電子銃内部を大気解放したことにより、RF コンディショニングが必要である。2002 年 6 月 16 日までにおよそ 200 時間のコンディショニングを行った。定格の 5.4 MW、10 Hz へは積算時間で 80 時間程度 (1 1 日) で到達した。

以前と比較して、明らかによくなっている点は暗電流の減少である。以前は 2nC/pulse 程度であったが、研摩後は 0.84nC/pulse に減少した。またコンディショニングが不十分のため放電回数は多いが、真空度は 4×10^{-9} Torr 程度 (RF 印加時) を保っている。

次に量子効率の測定を行った。量子効率 QE は、 $QE = (\text{加速電子数}) / (\text{入射光子数})$ と定義されるため、我々のフォトカソード用レーザーである Nd:YLF レーザーの 4 倍波 263 nm に対しては、

$$QE = 4.7 \times 10^{-6} Q [\text{pC}] / E_L [\mu\text{J}]$$

と表される。Q は加速電子の電荷量、 E_L は入射レーザーのエネルギーである。電荷量の測定はファラデーカップで行い、レーザーのエネルギーは焦電型のエネルギーメータでレーザー光の一部をサンプリングして測定した。結果は以前と同程度の $1-2 \times 10^{-5}$ であった。

我々の電子銃は住友重機械工業製であるが、同時期に 2 台が製作された。これは両方共に量子効率は $\sim 1 \times 10^{-5}$ と低かったが、一方は今回行った研摩作業により 1 桁程度増大した [3]。この場合は特にコンディショニングを長期間経ることなく、始めから量子効率は高くなった。従って、今回の原研の研摩作業では量子効率の改善は図れていないということになる。また、東京大学原子力工学研究施設の同型のフォトカソード RF 電子銃では、RF コンディショニングに

よる量子効率の変化を観測している[4]．このときはRF コンディショニングによる真空度の悪化が量子効率低下の原因であり、真空度の改善により量子効率は改善した．このときの真空度はイオンポンプ電流から換算して 10^{-10} Torr であった．今回の原研での場合は、ビームラインのイオンゲージでは 4×10^{-9} Torr であるが、イオンポンプ電流換算では、 4×10^{-10} Torr 程度であり、東大原施の場合と同程度である．

4.2 位置依存性

フォトカソードRF電子銃の調整として、電場・磁場中心にレーザーを照射する作業がある．これは加速電子ビームのプロファイルをモニターしながらレーザーとRFの位相を変えてビームが動かないようにレーザー入射位置を微調整するものである．このレーザー位置をスキャンしているときに量子効率の急激な変化を観察した．図5にその様子を示す．カソード面でどれぐらいの変位に相当するかは現在解析中であるが、電場磁場中心からずれた位置での量子効率が高い．これは、以前も観測されていたが、表面の傷が関係していると考えていた．今回の研摩後にも再現していることから、再び傷が生じてしまったのか、またはレーザーの偏光が関係しているのではないかと考えている．今後さらに検討を進めたい．

5．まとめ

量子効率の改善を図るため、フォトカソードRF電子銃の銅カソード面の研摩を行った．量子効率は現在までのところ大きな改善は見られず $1-2 \times 10^{-5}$ であった．一方暗電流に関しては以前の半分以下の 8.4 nA(10 Hz 運転時)と改善された．銅の光電子放出及び電界放出暗電流に関しては不明な点が多く、専用のテストベンチを作成し、系統的な実験・解析が必要と思われる．例えば、入射ビームラインに残留ガスモニタを組み込み、ガス成分と真空度に対する量子効率や暗電流の関係を測定することや、カソード表面を観察できる顕微鏡を導入することが考えられる．

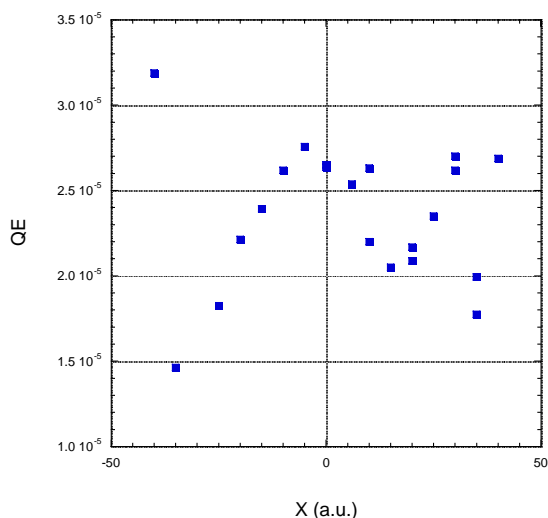


図5：レーザーのポジションとQEの関係

6．謝辞

RF電子銃の研摩作業にあたり、住友重機械工業の酒井氏、揚氏、平賀氏には有益な情報を頂きました．ここに感謝致します．

参考文献

- [1] 神門 正城ほか “原研関西フォトカソード・マイクロトロンのコミッショニング” Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan Himeji Aug. 1-3 2001.
- [2] 神門 正城ほか、“レーザー加速のためのフォトカソードマイクロトロン”、 Proceedings of the Second Symposium on Advanced Photon Reaseearch Nov.9-10, 2000.
- [3] 酒井文雄 私信.
- [4] 上田 徹ほか、“ライナックの改修とフォトカソードマイクロ波電子銃の運転経過”、 Proceedings of the 24th Linear Accelerator Meeting Win Japan, p. 176, Sapporo, July 7-9, 1999.