

## ERL 電子銃のための光陰極準備系の開発

### DEVELOPMENT OF PHOTOCATHODE PREPARATION SYSTEM FOR ERL ELECTRON GUN

金 秀光, 山本 将博, 内山 隆司, 宮島 司, 本田 洋介

Xiuguang Jin<sup>#</sup>, Masahiro Yamamoto, Takashi Uchiyama, Tsukasa Miyajima, Yosuke Honda

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

2nd 500 kV DC photocathode electron gun for ERL injector has been constructing at KEK. For this gun, a photocathode preparation system also started to build at the same time. The preparation system consists of cathode cleaning chamber, cathode activation chamber and storage chamber. In order to activate cathodes effectively, this system was designed to treat three cathodes at same time. After construction of this system, we have found an appropriate activation condition and achieved high quantum efficiencies from each GaAs cathodes. In addition, we also have successfully activated two GaAs cathodes at the same time.

#### 1. はじめに

KEK で建設、試験が進められているエネルギー回収型ライナック (ERL) の実証機であるコンパクト ERL (cERL) は、昨年、周回部の建設が行われ、今年 3 月には数  $\mu\text{A}$  の低電流でエネルギー回収運転が確認された。

ERL 電子銃は、短パルス・高繰り返しで高輝度な電子ビーム (規格化エミッタンス 1 mm mrad 以下、平均電流 10 mA 以上) を供給し続けることが要求され、今後段階的に cERL の目標である 10 mA CW 運転に向けて電流値を上げていく計画となっている。

短パルスかつ低エミッタンスビーム生成のために光陰極として GaAs 型およびアルカリ金属系薄膜を使用するが、一方で従来の熱電子源とくらべ寿命が短い問題があり、長期的な運用を行う上でカソード寿命の問題を克服する必要がある。そのための一手段として現在、KEK では効率的に光陰極を作製・貯蔵できる装置の開発を進めている<sup>[1]</sup>。

#### 2. カソード準備系の作製

##### 2.1 カソードコンテナ

GaAs カソードを効率よくクリーニングし、活性化するために、3 つのカソードを同時にインストールできるコンテナを設計・作製した。GaAs カソードはそれぞれモリブデンのパック上に固定され、それらパックをカソードコンテナ上に図 1 のように固定し、導入 chamber へインストールする。

カソードコンテナは軽量化のため、チタンで製作し、擦れ合う部分については真空中でのカジリを防ぐため TiN コーティングを施した。

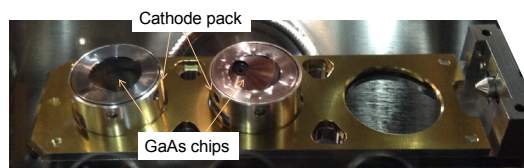


Figure 1: Cathode container. Three cathodes can be installed in this container. In the beginning, we installed two cathodes and tried to activate at the same time.

##### 2.2 カソードクリーニング装置

半導体カソード表面に負の電子親和力 (NEA) 表面を作るためには、最初に半導体表面に付いてある酸化物、不純物などを除去し、清浄な状態にする必要がある。クリーニング方法として近年半導体フォトカソード分野でよく利用される原子状水素法を用いる。原子状水素源には MBE-Komponenten 製 HABS40 を用いた。

このクリーニング装置の特徴としては、一度に複数のカソードをクリーニングすることであり、図 2 に示すように 3 つのカソードを同時に扱えるように作製されている。3 つの独立なカソードヒーターによりコンテナ上のそれぞれのパックを加熱する。ヒータはタングステンフィラメントで構成され、通電による輻射熱でパック裏側を加熱し、パックの伝熱によってカソード本体を加熱する。各ヒーターの側面に熱電対が設置されており、代表的な温度をモニターできる機能がある。カソードを加熱している状態で、パック表面側から原子状水素を照射し、GaAs 表面のクリーニングを行う。クリーニング終了後、カソードコンテナはカソード活性化装置へ移送される。

<sup>#</sup>jinxg@post.kek.jp

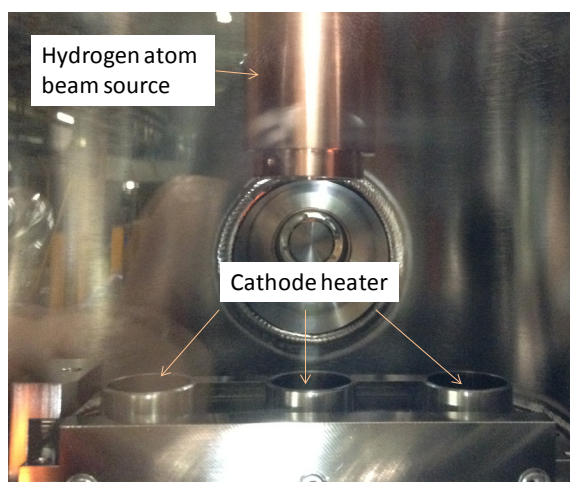


Figure 2: Cathode cleaning chamber. It has three cathode heater and one hydrogen atom beam source. Three cathodes can be cleaned at once.

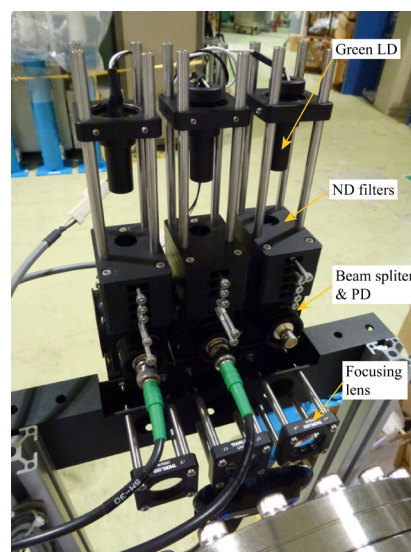


Figure 4: Laser system for cathode activation.

### 2.3 カソード活性化装置

NEA 表面は GaAs カソードに Cs と酸素を交互に蒸着して作る。Cs と酸素の提供量をに制御するために、蒸着中はカソードより発生する電子ビームを常にモニターする必要がある。作製した活性化装置を図 3 に示す。3 つのカソードを同時に活性化するために、独立した 3 つの Cs 源と光電子を収集するための 3 つの正電位のコレクタ電極が設置されている。コレクタ電極を使った光電流検知の方法については、cERL 電子銃のカソード準備装置を参考にした<sup>[2]</sup>。酸素は装置上側にあるリークバルブにより提供される。それぞれのカソードに対して独立にレーザを照射して、各カソードから発生する電子を各コレクタ電極で収集する。レーザー系について図 4 に示す。真空内部の複雑な配線には一度真空中で焼きだした真空仕様のカプトン被覆線を使用している。本装置は、200 L/s のイオンポンプと 800 L/s の非蒸発型ゲッター (NEG) ポンプにより排気され、 $8 \times 10^{-9}$  Pa の超高真空に到達しており、NEA 作製可能な環境に達している。

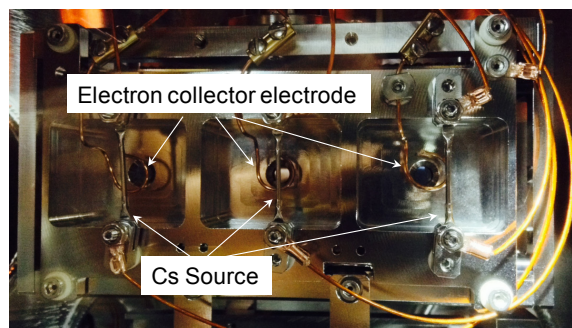


Figure 3: Cathode activation chamber. There are three Cs sources and three electron collector electrode.

### 2.4 カソード貯蔵装置

活性化されたカソードを長い寿命で保管するために、貯蔵装置を作製した。現在の貯蔵装置には最大 6 個のカソードを保管できるが、ホルダーを付け加えることで最大 17 個までのカソードを保管することができる。貯蔵装置は、1600 L/s の NEG ポンプと 100 L/s のイオンポンプで排気され、真空は  $8 \times 10^{-10}$  Pa の極高真空が得られている。

## 3. カソードの活性化

### 3.1 カソード活性化実験

クリーニング装置において、カソードヒーターを用いて、GaAs カソードを徐々に加熱する。同時に原子状水素源にも電流を流して加熱を開始し、後の水素導入に備えターボ分子ポンプによる追加的な排気も開始する。ヒーター出力がおおよそ 50W でしばらく加熱して熱電対で  $550^\circ\text{C}$  付近に達した時、原子状水素源口のリークバルブより  $\sim 10^{-4}$  Pa まで水素を導入する。その時の原子状水素源の温度は  $1670^\circ\text{C}$  であり、装置の排気速度、原子状水素と GaAs カソードとの距離約 100 mm の条件からカソード上の原子状水素の flux density はおおよそ  $2 \times 10^{15}$  atoms/( $\text{cm}^2\text{s}$ ) であると見積られる<sup>[3]</sup>。今回のクリーニングでは、この状態を 15 分間維持した。

クリーニング終了後、GaAs カソードを活性化装置に導入する。おおよそ 2 時間程度の自然冷却後に電子コレクタ電極に約 100 V の正電位をかけて、レーザー光を照射しながら、Cs の蒸着を開始する。Cs 源に流す電流は 4A である。約 10 分後、Cs 蒸着で真空準位が下がり、エミッションカレントが発生する。その後カレントが下がるまで Cs を蒸着し続ける。カレントが下がり切った時点で、酸素を  $10^{-7}$  Pa 真空中で導入し、カレントを上昇させる。カレントが上がりきる時点で、酸素を止め、Cs に切り替える。Cs と酸



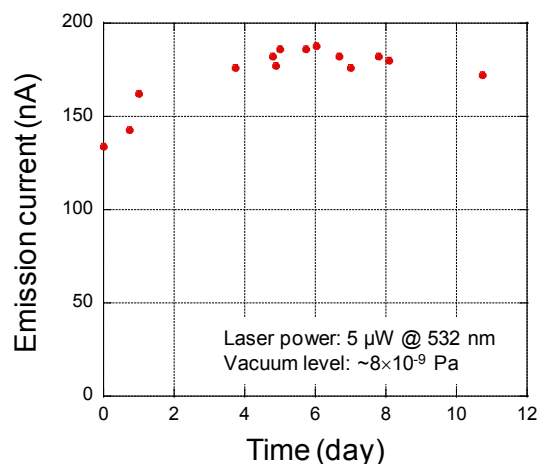


Figure 5: Time dependence of emission current after NEA preparation. The emission current was almost fixed for 11 days.

素の交互提供を、エミッションカレントが飽和するところまで繰り返す。

今回インストールした 2 つのカソードに対して、まず 1 つ毎に活性化を実施した結果、コンテナ中心に置いた GaAs カソードにおいて、532 nm レーザーパワー 5  $\mu\text{W}$  で、150 nA のカレントが得られており、量子効率も 7% まで達している。また、コンテナ端に置いた GaAs カソードにおいても、同程度の量子効率が確認されている。二つのカソードでそれぞれ高い量子効率を得られており、今回実施した活性化条件が適切であることが分かった。

2 つ GaAs カソードに対して活性化を確認できたため、次に同時のクリーニングおよび活性化を試みた。その結果、コンテナ中心の GaAs カソードにおいてレーザーパワー 3.8  $\mu\text{W}$  で 112 nA のカレント；端の GaAs カソードにおいてレーザーパワー 5  $\mu\text{W}$  で 214 nA のカレントが得られた。量子効率はそれぞれ 7% と 10% であり、2 つの GaAs カソードを同時に最大の量子効率にはできないものの、実用上十分な量子効率が得られるクリーニング・活性化を行うことができた。2 つの GaAs カソードの量子効率の差は、それぞれの Cs の蒸着速度と酸素の提供速度の違いによるものであり、作られる NEA 表面状態に多少の差があるためである。

本装置ではカソードのクリーニングおよび活性化の一連の操作にかかる時間は現状でおよそ 6 時間程度（うち冷却時間が 3 時間）であるが、本装置には複数のカソードコンテナ（最大 3 つ）をインストールすることが可能であり、クリーニング後の冷却待ちの時間中に別のカソードをクリーニングできることから、8 時間程度あれば 6 個のカソードを活性化できる。

### 3.2 寿命測定

蒸着した Cs-O の安定性と、活性化チャンバー内の

残留ガスの NEA 表面に対する影響を調べるために、活性化した GaAs カソードを活性化チャンバーに保管し、活性化した GaAs カソードの寿命を調べた。放置中は、電子コレクタ電極の電源はオフにしている。

測定結果を図 5 に示す。カレントは初日の活性化直後から徐々に上昇し、その後一定な値を保っている。11 日間経過しても、カレントの値には大きい低下が見られない。これは NEA 表面を作る時、チャンバー内の残留ガスの影響を考慮し、活性化の最後に Cs をやや多めに蒸着している影響によるものと考えられる。エミッションカレントの値が一定値を保ったことから、 $8 \times 10^{-9}$  Pa の真空度で、カソードの NEA 表面は十分に長い時間保存でき、NEA 表面に悪影響を与える残留ガス成分は十分に少ないことがわかった。

## 4. カソード準備系の制御

本装置では、多数のカソード操作（インストール、クリーニング、活性化、貯蔵）を行うため、それらを現場で効率よく操作・管理できるシステムが必要になる。また、今後の加速器での運用を考慮し、カソード準備系の各種制御について EPICS による制御を採用した。これにより現場制御のみならず、制御室等から現状のカソード準備系全体のステータスや各カソードの状況、量子効率などの状態や履歴がわかり有益である。

### 4.1 制御機器

各装置の真空モニタ（5 系統）、カソードヒーター電源 3 台および温度モニター（3 系統）、原子状水素源電源 1 台、Cs 源用電源 3 台、光電流コレクタバイアス用電源 1 台について、cEPL で標準制御系として採用されている Linux+EPICS 環境が実装された Yokogawa 製 PLC (F3RP61 および I/O モジュール群) を使用して制御している（図 6 参照）。光電流およびレーザーパワーの測定（各 3 系統）には、フ

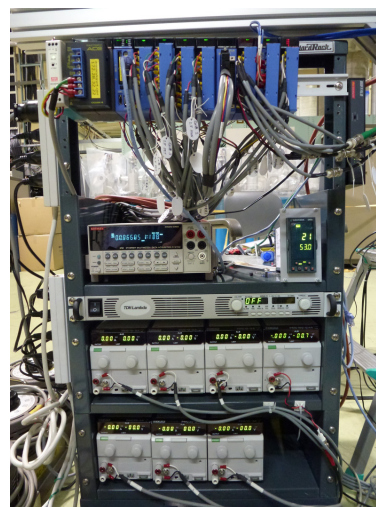


Figure 6: PLC modules and power supplies for cathode preparation system.

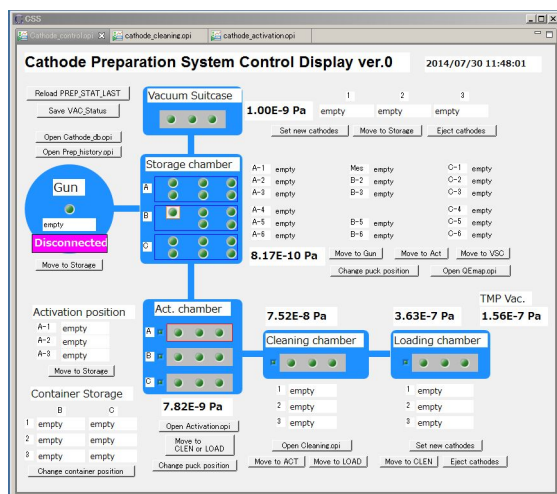


Figure 7: Main control panel for cathode preparation system.

ローテイングかつ高入力インピーダンス環境が必要になるため、これらを 20 ch スイッチカードを実装した Keithley 2700 に接続し、LAN 通信経由で各 ch を 1Hz 間隔で読み込む EPICS 制御を採用した。これら機器の制御、モニター値の表示に必要な GUI 環境には CSS<sup>[4]</sup>を採用した。

#### 4.2 操作

トランスファーロードによるカソードの移動操作は手動であるため、カソードの移動情報は GUI 上で手動で入力する必要があるが、最初のカソードインストール操作時のカソード名の入力以外は、基本的に GUI パネル上のボタン操作だけでカソード移動操作および移動履歴の記録が自動的に行われる操作パネルを作成した (図 7 参照)。カソードインストール、クリーニング、活性化操作のサブ操作パネルはこのパネルから起動できる。現時点では、クリーニングおよび活性化時の各電源のパラメータ設定は操作パネル上の欄にその度に数値を手動入力することで行っているが、これらの操作の最適条件がわかれば、操作中の各モニターの温度や真空、光電流値などの情報から、クリーニングや活性化の操作の一部は自動化が可能であり、カソード活性化一連の操作の簡易化・効率化が行えると思われる。半自動化プログラムの開発は今後の課題である。

### 5. まとめと今後

500 kV 電子銃用のカソード準備系を作製した。本装置はカソード導入部、カソードクリーニング装置、カソード活性化装置とカソード貯蔵装置より構成されている。本装置の特徴は、カソードを効率よく処理するために、3つの GaAs カソードを同時にインストールおよび活性化できる点であり、実際に 2つの GaAs カソードを同時に効率よく活性化できることを確認した。今後の大電流運転により高頻度でカソード交換が必要となる場合でも、短い期間で多数のカソードを準備できるこの装置が立ち上がれば、

ERL 実現にとって大きな助けになると考えている。

今後は、3つの GaAs カソードの同時活性化を試みるとともに、 $8 \times 10^{-10}$  Pa の極高真空に達しているカソード貯蔵装置で GaAs カソードの寿命を測定し、年内に 500kV 電子銃 2 号機へ接続、電子銃へカソードを送りこむ予定である。

### 5. 謝辞

本研究を進める上で、KEK 河田洋 教授、小林幸則 教授、坂中章悟 教授をはじめとする ERL,PF 関係者の皆様より多くのサポート・激励を頂きました。特に真空作業ならびに電源配線、測定系の構築について三菱電機システムサービスの飯島寛昭氏のご協力、EPICS 制御については、KEK 帯名崇 准教授、長橋進也 技師ならびに東日本技術研究所の路川徹也氏にご助言、ご協力頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- [1] M. Yamamoto *et al.*, "ERL 第二電子銃の開発状況", 第 10 回加速器学会年会, 名古屋大学, 2013, SUP34.
- [2] N. Nishimori *et al.*, "ERL 放射光源 500kV DC 電子銃の光陰極準備システムと高電圧真空容器開発", 第 6 回加速器学会年会, 東海村, 2009, FPPSA10.
- [3] K. G. Tschersich *et al.*, "Design and characterization of a thermal hydrogen atom source", *J. Appl. Phys.* **104**, 034908 (2008).
- [4] Control System Studio at KEK.  
<http://www-linac.kek.jp/cont/epics/css/>