

SACLA における熱電子銃カソードの長寿命化に向けて

TOWARD LIFETIME EXTENSION OF THE THERMIONIC GUN CATHODE AT SACLA

渡川和晃^{#, A)}, 稲垣隆宏^{A)}, 前坂比呂和^{A)}, 原徹^{A)}, 田中均^{A)}, 安積隆夫^{A)}, 杉本崇^{A)}, 馬込保^{B)}, 櫻井辰幸^{B)},
池永英司^{B)}, 小嗣真人^{B†)}, 室隆桂之^{B)}, 大河内拓雄^{B)}, 田中信一郎^{C)}

Kazuaki Togawa^{#, A)}, Takahiro Inagaki^{A)}, Hirokazu Maesaka^{A)}, Toru Hara^{A)}, Hitoshi Tanaka^{A)}, Takao Asaka^{A)},
Takashi Sugimoto^{A)}, Tamotsu Magome^{B)}, Tatsuyuki Sakurai^{B)}, Eiji Ikenaga^{B)}, Masato Kotsugi^{B†)}, Takayuki Muro^{B)},
Takuo Ohkochi^{B)}, Shinichiro Tanaka^{C)}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute

^{C)} SPring-8 Service Co., Ltd.

^{†)} Present address: Tokyo University of Science

Abstract

At the x-ray free-electron laser (XFEL) facility SACLA, a single-crystal CeB₆ is used as a thermionic emitter of the high-voltage pulsed electron gun. The cathode needs to emit a high-intensity pulsed beam continuously during beam tuning and user experiments. Recently, it becomes clear that the lifetime of the cathode is shortened to be less than 1-year at a high repetition rate of the accelerator. In order to supply XFEL light to users stably, we need to solve this lifetime problem. In this report, efforts toward lifetime extension of the thermionic cathode at SACLA are described.

1. はじめに

理化学研究所では、SPring-8 サイトにおいて X 線自由電子レーザー施設 SACLA が建設され、2012 年より大強度超短パルス X 線レーザーを用いたユーザー実験が行なわれている [1]。SACLA では単結晶 CeB₆ を熱電子源とした高電圧パルス電子銃が使われており、日々の 24 時間運転のために電子ビームを供給している [2, 3]。

CeB₆ 電子銃はまず SACLA のプロトタイプ機である SCSS 試験加速器に採用され、極端紫外レーザーを利用するユーザー運転に用いられた [4]。SCSS 試験加速器における CeB₆ 電子銃のスペックは、電圧 500 kV、ピーク電流 1 A、パルス幅~2.5 μs、繰り返し 10 Hz (最終的には 30 Hz) で、ビーム運転は平日の昼間のみ行われた。エミッションの安定性を確保するために、カソードは 24 時間加熱して平衡状態を保った。このような条件のもと、CeB₆ カソードは 2 年強の長期間使用することができた。カソードから一定の電流値でビームを引き出し続けるためには少しずつヒーターパワーを上げていくのであるが、カソードが寿命を迎える頃にはヒーターパワーの上昇率が急激に上昇し、ビームを引き出し続けることが困難になることが分かった。

SACLA では SCSS 試験加速器よりも過酷な条件で CeB₆ 電子銃の運転が行なわれている。スペックは、電圧 500 kV、ピーク電流 0.5-1 A、パルス幅~3.5 μs、繰り返し 30 Hz (2016 年 7 月現在) で、長期停止期間を除いて 24 時間の連続運転が行なわれている。CeB₆ は高温環境下において蒸発する特性があり、常に清浄な表面が形成されることから、寿命はカソードの加熱時間が支配的でありビーム条件には大きく依存しないと推定していた。運転開始当初は繰り返しが 10 Hz で、カソード

交換も安全を考慮し 1 年に 1 回の頻度で行っていたため、特に大きな問題は発生しなかった。しかしながら、繰り返しを上げていくと、カソードを 1 年間使用することが難しいことが分かってきた。今後、本格的に 60 Hz 運転を行っていく上で、カソードの劣化の原因を究明して改良を施すことは極めて重要な課題である。本稿では、SACLA における熱電子銃の長寿命化に向けた取り組みについて現状の報告を行う。

2. CeB₆ カソードアッセンブリー

図 1 に SACLA 電子銃の CeB₆ カソードアッセンブリーを示す。

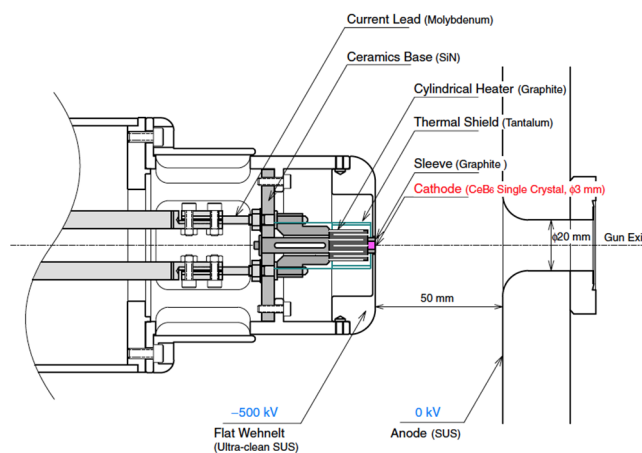


Figure 1: CeB₆ cathode assembly [2].

直径 3 mm の単結晶 CeB₆ はグラファイト製のスリーブに収められ、円筒型のグラファイトヒーターからの輻射熱により約 1500°C まで加熱される。効率良く加熱するために、ヒーターの周りにはタンタル製の熱シールドを取り付

[#] togawa@spring8.or.jp

けている。ヒーターパワーは約 300 W である。これらの部品は耐熱性の良い窒化ケイ素製のセラミックベースにマウントされ、ステンレス製の高压電極の中に設置される。カソードの温度は、黒体である直近のグラファイトスリーブの温度を放射温度計で測定し、その値を用いることにしている。

3. CeB₆カソードの運転状況

SACLA において CeB₆ カソードの状態がどのように推移していくかを 2013 年のデータを例にとりて説明する。図 2 に 1 年間に渡るエミッション電流とカソード温度のトレンドグラフを示す。繰り返しは 10 Hz から 30 Hz へと段階的に上げていった。エミッション電流は電子銃出口に設置した CT モニターで測定し、パルス電流のピーク値を示す。

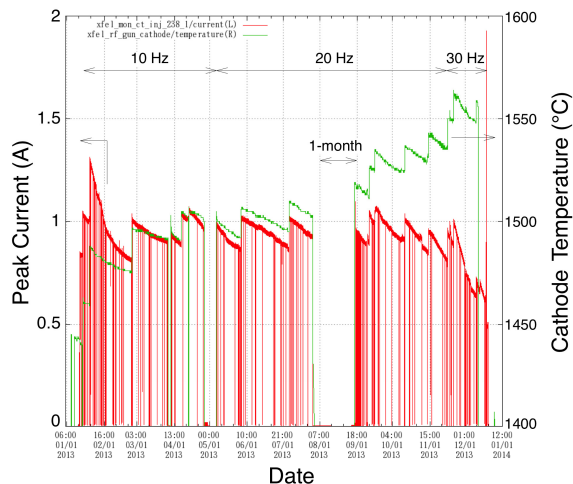


Figure 2: Emission peak current (red line) and cathode temperature (green line) at SACLA.

カソードのヒーターパワーはエミッション電流値がほぼ 1 A を保持するよう、定期的に増加させた。エミッション電流がステップ状に変化しているところはその時間である。まず大局的に推移を見ると、運転期間の後半ではカソード温度が上昇しているにもかかわらずエミッション電流が減少していることが分かる。これは CeB₆ 表面の劣化が進み、エミッションの効率が低下したものと考えられる。次に局所的に推移を見ると、ヒーターパワーが一定であるにもかかわらずカソード温度が減少し、それに伴ってエミッション電流が減少していることが分かる。これはカソードの加熱効率が低下したことを示唆している。現在、この二つの点に着目して調査を行っている。

4. CeB₆の表面分析

長期間使用した CeB₆ カソードの表面分析を、SPring-8 蓄積リングの硬 X 線ビームライン (BL47XU) を用いて行った [5]。測定には、X 線で試料を照射した際に放出される光電子のエネルギー分析によって成分を特定する HAXPES (Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy) 装置が用いられ、今回は CeB₆ 試料が室温という条件で行われた。セリウム (Ce) に対するボロン

(B)、炭素 (C)、酸素 (O) の相対量の位置分布を図 3 に示す。カソードの中心から広い領域で成分分布が一定であるが、両端、すなわち外輪部では B の割合が減り、C、O が増加していることが分かる。CeB₆ 結晶はグラファイト製のスリーブに圧入されており、外輪部は高温の環境下で C と接触している。そのために、B と C の置換が生じたものと思われる。電子顕微鏡による成分分析でも同様の結果が出ており、B と C の置換は確実に起こっているものと思われる。O に関しては、使用後に大気に曝されていることから、その際に進んだ酸化が原因であると推定している。

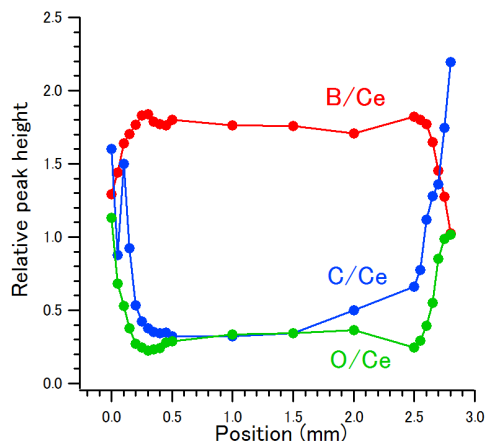


Figure 3: Surface component distribution of used CeB₆ cathode [5].

これまでに、グラファイトが CeB₆ 結晶に悪影響を与えているであろうということは分かってきたが、これがエミッション電流を低下させる主要な原因であるか否かは断定することができない。今後、in-situ の条件で成分分析を行うことなど、より実機に近い状態での実験を検討している。

5. 電子銃テストスタンド

カソードの特性を調査し、改良したカソードの試験を行うために、電子銃テストスタンドを建設した。図 4 に電子銃テストスタンドの側面図を示す。

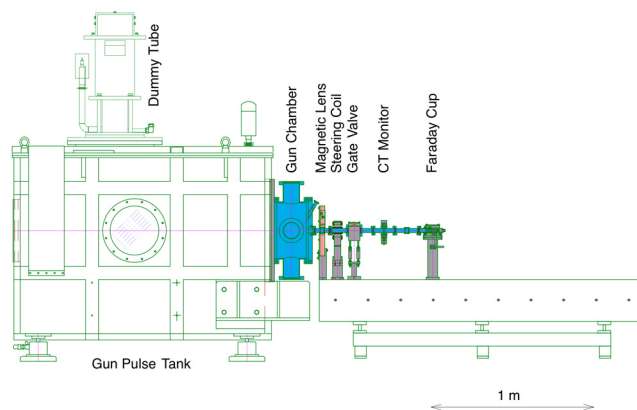


Figure 4: Side view of gun test stand.

実機の環境と同じにするために、電子銃パルスバンクは SACLA 電子銃と同一の構造とした。今のところビームラインの構成は CT モニターとビームダンプ (Faraday Cup) だけであるが、近い将来にエミッタンス測定装置を設ける予定である。

まず、この電子銃テストスタンドにおいて従来型の CeB_6 カソードの劣化状況を調査した。実験は次のような手順で行った。1) エミッション電流の温度特性の初期状態を測定する。2) ピーク電流 1 A、繰り返し 60 Hz で 1 週間の連続運転を行った後、エミッション特性を測定する。3) ピーク電流を 1.5 A に引き上げて同様のことを行う。4) ピーク電流を 2 A に引き上げて同様のことを行う。以上の結果を図 5 に示す。

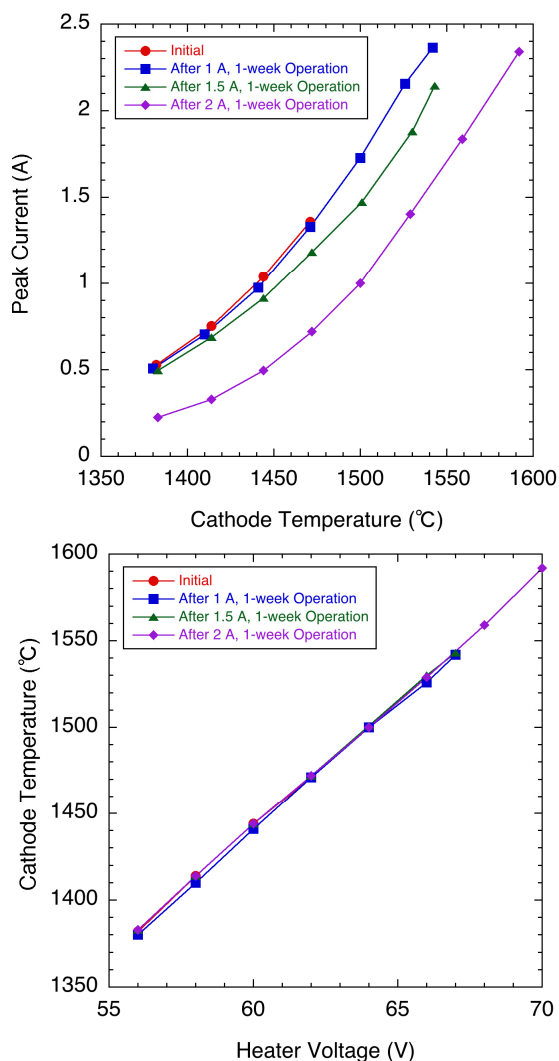


Figure 5: Emission (upper) and heating (lower) properties of CeB_6 cathode.

まずエミッション電流とカソード温度の関係から、ピーク電流値を 2 A に引き上げると急激にエミッション特性が劣化していることが分かる。また、劣化現象が単純にピーク電流値に比例して起こっていないことも伺える。次にヒーター電圧とカソード温度の関係を見ると、この実験条件では、ヒーターの加熱効率の劣化は生じてい

ないことが分かる。しかし、再度同様の実験を行った際には、より高いヒーターパワーが必要となって、加熱効率の劣化が確認された。加熱効率の劣化は、タンタル製の熱シールドが高温により変質したことが原因であると考えている。

上記のような測定を行うと、エミッション効率の劣化と加熱効率の劣化を分離して評価できることが分かった。現在、エミッション効率劣化の原因の一つであると考えられるスリーブの材質をグラファイトからモリブデンに変更し、加熱効率劣化の原因であると考えられる熱シールドを多重にして強化したアッセンブリーの製作を行っている。

6. 高速劣化試験装置

電子銃テストスタンドでは、実機により近い環境で試験ができるものの、様々なカソードの寿命を評価するには多大な時間を要してしまう。そこで、高速でカソードを劣化させる装置を検討している。着目しているのは平均的なエミッション電流値である。実機のビームはピーク電流値が高いものの、幅が高々数マイクロ秒で繰り返しが 60 Hz のパルスである。そこで連続ビームを引き出してエミッションの稼働率を上げることを考えている。引き出し電荷の総量でカソードの寿命が決まるのであれば、これによってカソードの評価が可能であると考えている。但し、印加電圧 500 kV、引き出し電流値 1 A という高負荷の条件を整えるのは容易ではないため、電圧と電流をどこまで下げるかということを検討している。また、実機では実施できないような in-situ での表面評価装置を備えることも検討している。

7. まとめ

X 線自由電子レーザー施設 SACLA においてより安定なユーザー運転を行うために、熱カソードの長寿命化のための研究を開始した。使用済みカソードの表面分析によりカソードの表面状態の変化を調査したり、電子銃テストスタンドにおいてカソード劣化現象の研究や長寿命カソードの開発を行ったりしている。今後、様々な視点から調査を行ってカソード劣化の原因を究明し、この重要な課題を達成したいと考えている。

参考文献

- [1] T. Ishikawa *et al.*, "A Compact X-ray Free-electron Laser Emitting in the Sub-angstrom Region", *Nature Photonics* **6**, (2012) p. 540.
- [2] K. Togawa *et al.*, "CeB₆ Electron Gun for a Low-emittance Injector", *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **10** (2007) 020703.
- [3] K. Togawa, "Development of Low-emittance Electron Gun Using Single-crystal CeB₆ Thermionic Cathode", *Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, Tokai, Japan* (2009) p. 1178.
- [4] T. Shintake *et al.*, "A Compact Free-electron Laser for Generating Coherent Radiation in the Extreme Ultraviolet Region", *Nature Photonics* **2** (2008) p. 555.
- [5] 大河内拓雄, 他, "SACLA の電子銃カソード CeB₆ の熱電子放出分布解析", 第 29 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム (2016) ポスター発表.