

## CeB<sub>6</sub> 電子銃の運転経験と今後の開発課題

### OPERATIONAL EXPERIENCES AND ISSUES OF THE CEB6 ELECTRON GUN

渡川和晃<sup>#, A)</sup>, 馬込保<sup>B)</sup>, 稲垣隆宏<sup>A)</sup>, 原徹<sup>A)</sup>, 田中均<sup>A)</sup>

Kazuaki Togawa<sup>#, A)</sup>, Tamotsu Magome<sup>B)</sup>, Takahiro Inagaki<sup>A)</sup>, Toru Hara<sup>A)</sup>, Hitoshi Tanaka<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>RIKEN SPring-8 Center

<sup>B)</sup>Japan Synchrotron Radiation Research Institute

#### Abstract

The CeB<sub>6</sub> thermionic electron gun has been operated at the SCSS test accelerator and SACLA since 2005. The gun delivers low-emittance and high-intensity electron beams stably all through the year, however, the cathode assembly needs to be replaced every year due to the emission degradation. Since the SACLA linac will be also used as an injector of the SPring-8 storage ring in the near future, reliability of the gun, especially that of the emission property must be increased as high as possible. In this paper, the operational experiences of the CeB<sub>6</sub> gun are summarized and the issues that should be solved are discussed.

#### 1. はじめに

理化学研究所の X 線自由電子レーザー (XFEL) 施設 SACLA[1]では、低エミッタンス電子ビームを発生するための電子源として CeB<sub>6</sub> 単結晶を熱カソードに用いた高電圧パルス電子銃を使用している[2-6]。本電子銃は、まず SCSS 試験加速器[7]においてシングルパス SASE-FEL 用の電子源としての有用性が実証され、極端紫外 FEL のユーザー実験のために約 5 年間使用された。SACLA では 2012 年より XFEL ユーザーの利用実験のために 24 時間体制で電子ビームを供給し続けている。

CeB<sub>6</sub> 電子銃は高電圧や真空のトラブルは殆ど無く安定な運転を続けられているのであるが、電子ビームのエミッション特性が徐々に劣化していく問題を抱えており、SACLA では約 1 年に 1 回の頻度でカソードアッセンブリーを交換しなければならない状況が続いている。SACLA は既に 2 本の硬 X 線ビームラインの振り分け同時運転をスタートしており、近い将来には SPring-8 蓄積リングのための入射器としても使用される予定で、より高い信頼性が CeB<sub>6</sub> 電子銃にも課せられている。そのためには、エミッション特性が劣化する原因を特定し、その対策を講じてより長いカソード寿命を達成する必要がある。

本稿では、SCSS 試験加速器と SACLA で得られた CeB<sub>6</sub> 電子銃の運転経験をまとめ、今後の開発課題について議論する。

#### 2. CeB<sub>6</sub> カソードのエミッション劣化

CeB<sub>6</sub> カソードは使用中のものも含めてこれまでに SCSS 試験加速器で 4 個、SACLA で 10 個、SCSS+ (SCSS 試験加速器を SACLA 光源棟に移設してアップグレードした軟 X 線 FEL ビームライン BL1 の専用加速器) で 1 個の合計 15 個の使用実績がある。いずれも電子銃のパルス印加電圧は 500 kV で引き出し電子ビームのパルス幅は約 3 μs である。電子ビームのピーク電流やパルス繰り返しについては運

転の経緯とともに変更してきたが、ピーク電流は 0.4-1.0 A で最大繰り返しは 60 Hz である。電子銃チャンバーの真空度は 10<sup>-7</sup> Pa 程度である。カソードの温度は放射温度計により間接的に測定しているため正確な値は得られていないが、運転開始の時は 1400°C 程度であり、カソードの劣化とともに一定のエミッション電流を確保するための温度が 1600°C 近くまで上昇していくことが分かっている。カソードはグラファイトヒーターからの数百 W の輻射熱で加熱しており、ヒーター電源の出力も温度と同様にカソードの劣化とともに上昇する。

2017 年度に SACLA で使用されたカソードのヒーター電圧と温度の履歴を Figure 1 に示す。

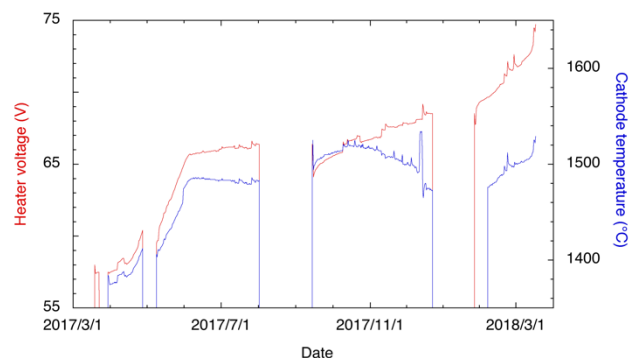


Figure 1: Trends of the heater voltage and the cathode temperature of the CeB<sub>6</sub> gun of SACLA.

電子ビームのピーク電流は年間を通して 0.43A に固定した。また、パルス繰り返しは 7 月までは 30 Hz、それ以降は 60 Hz であった。物理的な要因はまだ解明されていないが、典型的な特性として運転開始から 3 ヶ月間はヒーター電圧の急激な上昇が見られ、その後一定の状態が続き、1 年後に再び上昇が始まる。現在のところ、ヒーター電圧の履歴がより正確にカソードの劣化状態を表していると考えられるので、この再上昇がカソードの寿命のサインであると

して、75 V に達する前にカソードの交換を実施するようにしている。

なお、カソードエミッションの劣化によって XFEL パルスの強度が低下することは経験しておらず、ビームの規格化エミッタンスは 0.4 mm mrad レベルの低い値を保ち続けていると考えられる。

### 3. エミッション劣化の原因と調査

CeB<sub>6</sub> カソードのエミッション劣化の原因は幾つかの推定がされているが、まだ特定には至っていない。ここでこれまでに得られている知見と対策案について議論する。

#### 3.1 カソードアセンブリ

直径 3 mm の CeB<sub>6</sub> 結晶はグラファイト製のスリーブに納められて保持されている。このスリーブと CeB<sub>6</sub> が反応して CeB<sub>6</sub> の外輪部のホウ素の一部が炭素と置換されていることが電子顕微鏡や放射光による成分分析で明らかとなっている[8]。この改質された部分のエミッション特性は悪化していると思われるが、結晶表面全体と比較すると僅かな面積であるため、これがエミッション劣化の主とした要因であるとは考えにくい。CeB<sub>6</sub> は高温において高融点金属と反応しやすい物質で[9]、グラファイトよりも安定な材質は見つかっておらず、今のところグラファイトを継続して使用する予定である。

#### 3.2 ビーム出射量

電子ビームのハローやウェネルト電極からの電界放出電子がアノード電極に衝突すると、その衝撃で金属表面に付着したガスや内部に吸蔵されたガスが放出し、一部がイオン化されてカソードに向かって逆流してカソード表面を劣化する可能性がある。SACLA の運転を開始した当初はカソードの寿命がパルス電流や繰り返しに大きく依存していると思われたが、SCSS 試験加速器など他の加速器とのデータと比較すると、そのような明確な依存性がないことが分かってきた（詳細は次節で述べる）。しかしながら、放電が起こりにくく電子衝撃に強い加速電極を導入することは高電圧特性の観点から CeB<sub>6</sub> 電子銃の信頼性を高める上で非常に有効である。そこで、ウェネルト電極に 2 次電子放出係数の小さいチタン材料を、アノード電極に電子衝撃に強いモリブデン材料を使った新しい加速電極を製作して試験する予定である[10]。

#### 3.3 加速管暗電流

これまでに CeB<sub>6</sub> 電子銃は SACLA、SCSS 試験加速器、SCSS+ の 3 種類の入射器で使われてきたが、CeB<sub>6</sub> カソードの寿命が入射器に依存している可能性が見えてきた。Figure 2 に SACLA、SCSS 試験加速器、SCSS+ におけるヒーター電圧の上昇傾向を比較したグラフを示す。また、電子銃の運転条件を Table 1 にまとめる。Figure 2 より、SACLA でのカソード寿命が 1 年であるのに対し SCSS 試験加速器では 2 年以上の大幅に長い寿命が達成されていることが分かる。SCSS+ では 3 年を超えて運転中である

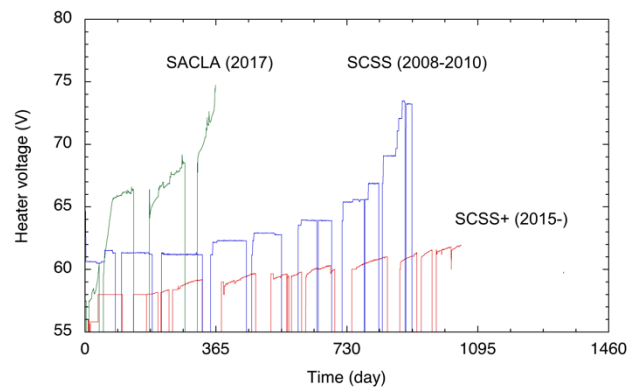


Figure 2: Comparison of the heater voltage transition of the CeB<sub>6</sub> gun.

Table 1: Parameters of CeB<sub>6</sub> Gun

	SACLA	SCSS	SCSS+
Beam voltage	500 keV	500 keV	500 keV
Peak current	0.43 A	1.0 A	1.0 A
Pulse width*	4.0 μs	2.8 μs	3.5 μs
Repetition rate	30-60 Hz	10-20 Hz	60 Hz
Operation	24 hours/day	9 hours/day	24 hours/day
First injector linac	L-band APS, 40 MeV	S-band APS, 10 MeV	S-band APS, 10 MeV

\* 電子ビームの電流波形の半値全幅

が、基本的に SCSS 試験加速器と同程度の寿命になると予想している。SCSS+ の出射電荷が SACLA より下回ってなくて逆に 2 倍以上の値であることから、カソード寿命はビーム出射量以外の要因で決まっていると考えるのが自然であろう。電子銃以外で SCSS+ と SACLA の異なる点は入射器の初段加速管の構造である。SCSS+ では S-band の APS 加速管と進行波管を使用しているのに対し、SACLA では L-band の APS 加速管を 2 台使用している[11, 12]。APS 加速管は定在波管であるため、加速管内で発生した暗電流が上流と下流の両方向に流れることになるのであるが、SCSS+ では APS 加速管での最大加速電圧が 10 MV であるのに対し SACLA では 40 MV にも達する。この高エネルギーの暗電流がカソードに何らかの影響を与えていると仮定すれば、SACLA のカソード寿命が短いことに対して説明が見つかる[13]。まずは、両加速器で暗電流を精密に測定して比較を行い、明確な差が見られるならば劣化のメカニズムを調査してこの影響を回避する方策を考えていく。

#### 3.4 仕事関数測定による表面状態の評価

これまではエミッション電流値の測定以外に in-situ でカソード表面を評価する手段を持っていなかった。そこで本グループは、光電流によって直接的に仕事関数を測定する手法の開発を始めた。これが可能になると、運転中のどの時期にカソードのど

の部分劣化するかを評価することができるため、カソード劣化の解明と長寿命化を大きく進展することができるかと期待される。詳細は本学会における報告があるのでそれを参照されたい[14]。

### 3.5 カソードの精密な温度測定

現在、カソードの温度は黒体である直近のグラフィイトスリーブの温度を市販の放射温度計により測定することで求めている。この方法では空間分解能が1 mmを超えており正確な温度分布の測定が出来ない。また、カソード等の輻射率についての情報が少ないことや真空窓など外部の影響を受けやすいことがあって、温度測定によってカソードの状態を精密に評価するには至っていない。今後、精密な温度測定に関しても取り組んでいく。

## 4. まとめ

これまでの運転経験をもとに、カソード寿命を伸ばしてCeB<sub>6</sub>電子銃の信頼性を高めるための課題を本稿でまとめた。すでに構築している新しい電子銃テストスタンドも併用してこの課題を進めていく予定である。

## 参考文献

- [1] T. Ishikawa *et al.*, Nat. Photon. **6** (2012) 540.
- [2] K. Togawa *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **10** (2007) 020703.
- [3] K. Togawa *et al.*, “軟X線自由電子レーザーに用いる熱カソード型高電圧パルス電子銃の開発”, Proceedings of

the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Japan, Aug. 1-3, 2001, pp. 147-149.

- [4] K. Togawa *et al.*, “SPring-8 軟X線自由電子レーザー計画に用いるCeB<sub>6</sub>電子銃の開発”, Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, Japan, Jul. 30-Aug. 1, 2003, pp. 117-119.
- [5] K. Togawa *et al.*, “Result of emittance measurement on the CeB<sub>6</sub> gun and application to Xray-FEL”, Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Funabashi, Japan, Aug. 4-6, 2014, pp. 93-95.
- [6] K. Togawa *et al.*, “Development of low-emittance electron gun using single-crystal CeB<sub>6</sub> thermionic cathode”, Proceedings of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tokai, Aug. 5-7, Japan, 2009, pp. 1178-1180.
- [7] T. Shintake *et al.*, Nat. Photon. **2** (2008) 555.
- [8] K. Togawa *et al.*, “Toward lifetime extension of the thermionic gun cathode at SACLA”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, pp. 473-475.
- [9] K. Togawa *et al.*, “Reaction between cerium hexaboride cathode and high melting-point metals in high-temperature environment”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 1182-1183.
- [10] M. Yamamoto, private communication.
- [11] T. Shintake *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **12** (2009) 070701.
- [12] T. Asaka *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **20** (2017) 080702.
- [13] Y. Otake, private communication.
- [14] T. Magome *et al.*, “Development status of the offline work function measurement system for CeB<sub>6</sub> cathodes used in the electron gun of SACLA”, in these proceedings.