

# 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

渡川 和晃<sup>1,A)</sup>、馬場 斉<sup>A)</sup>、尾上 和之<sup>A)</sup>、新竹 積<sup>A)</sup>、石塚 徹<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> 理化学研究所・播磨研究所 (SPring-8/RIKEN)

〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都1-1-1

<sup>B)</sup> 住友重機械工業株式会社・新居浜製造所

〒792-8588 愛媛県新居浜市惣開町5-2

## 概要

SPring-8では、将来のX線FEL利用施設の実現を目指して、軟X線自由電子レーザー計画 (SCSS計画) を進めている。本計画では、FELに不可欠である安定した低エミッタンス電子ビームを供給する為に、単結晶の熱カソードを用いた高電圧パルス電子銃の開発を行っている。カソード材料は、電子顕微鏡に広く使われている単結晶六ホウ化セリウム (CeB<sub>6</sub>) を使用する。電子銃の印加電圧は、空間電荷によるエミッタンス増大を低減する為に、-500 kV (パルス) を目標としている。本稿において、低エミッタンス電子銃の開発の現状を報告する。

## 1. SCSS電子入射器

SCSS計画[1]では、低エミッタンス電子銃として「単結晶の熱カソードを用いた高電圧パルス電子銃」を採用した。これは、各国が勢力的に開発を行っているフォトカソード型RF電子銃とは異なった方式である。自己増幅型自由電子レーザー (SASE-FEL) の理論から、FELゲインを上げて出力を飽和領域まで到達させるためには、電子ビームが極めて小さいエミッタンスを持つことが要求される。一方、ユーザーがFEL光の利用実験を行うには、ジッターの小さいFEL光を長時間安定して供給する必要があり、そのためには最上流部の電子銃が安定してはならない。これらの条件を両立することが電子銃開発の最優先課題である。

単結晶のCeB<sub>6</sub>カソードは、高温動作中にカソード材料自身が蒸発することで、清浄で極めてフラットな表面が維持されると言われており、低エミッタンス電子銃に非常に適していると考えられる[2]。直径3 mmのCeB<sub>6</sub>カソードからピーク電流3 A、半値幅2 μsecのビームを引き出す計画である。

電子銃の印加電圧は、-500 kVと非常に高い値を目標値に設定した。電子のエネルギーが低いと、プレバンチャーにおいてビームを集群するとき、空間電荷によってエミッタンスを悪化させてしまうからである。電子銃出口におけるビームパラメーターを表1にまとめる。

電子銃を出たパルスビームの先頭と後尾の成分を、その直後に置かれたビームチョッパーを用いて切り取ることで、2 nsec幅の短バンチを形成する。次に、

476 MHzプレバンチャーによって速度変調を行いバンチを集群し、続くエネルギーフィルターでエネルギーのテイル成分を取り除く。最後に、476 MHzブースターキャビティーとLバンド前段加速器で20 MeVまで加速し、Cバンド主加速器に入射する。図1にSCSS電子入射器のシステム図を示す。

Beam Energy	500 keV
Peak Current	3 A
Pulse Width	2 μs FWHM
Repetition Rate	60 Hz
Normalized RMS Emittance	0.4 π.mm.mrad

表1：電子銃出口におけるビームパラメーター。

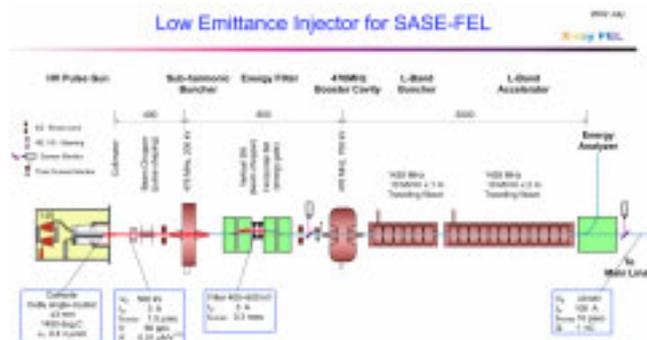


図1：SCSS電子入射器。

## 2. CeB<sub>6</sub>カソード開発

熱カソードから引き出した直後のビームエミッタンス (規格化、RMS) は次式で表される。

$$\varepsilon_{n,RMS} = \frac{r_c}{2} \sqrt{\frac{kT}{m_0 c^2}}$$

ここで、 $r_c$ はカソード半径、 $T$ はカソード温度である。低エミッタンスを得るためには小さいカソードが必要であることは上式から明らかであり、このことからカソードの直径を3 mmとした。その代償として熱電子放出の電流密度が大きくなるが、仕事関数が比較的小さいCeB<sub>6</sub>結晶では、理想的には1450 eVにおいてピーク電流3 Aが得られることになる。この場合、エミッタンスは0.4 π.mm.mradとなり、アンジュレーター領域においてFEL発振を飽和させるのに要求される2 π.mm.mradより十分小さい値である。

<sup>1</sup> E-mail: togawa@spring8.or.jp

図2にCeB<sub>6</sub>カソードアッセンブリ及びヒーター加熱試験の様子を示す。CeB<sub>6</sub>結晶は直径6 mmのグラファイト製スリーブに挿入している。こうすることでカソード表面全域に渡って均一な電界が得られ、ビームハローとなるカソードエッジからの電子放出を防ぐことができると期待される[3]。これは、ビームハローの衝突によるアンジュレーター磁石の減磁を防ぐために重要な対策である。

CeB<sub>6</sub>カソードはグラファイトヒーターからの輻射熱で加熱する。グラファイトは融点が3000 を超える焼結材料であるが、タングステンフィラメントのように再結晶化してヒーター特性が劣化することがない。また、高温において機械的にも安定している。さらに、電気抵抗が温度によって大きく変化しないため、ヒーターパワーがコントロールしやすい利点がある。この手法によりCeB<sub>6</sub>カソードを400 Wにて、1450 まで加熱することに成功した。現在、輻射熱がカソード周辺に与える熱負荷を低減すべく、ヒーターの投入電力が小さいカソードアッセンブリを開発中である。

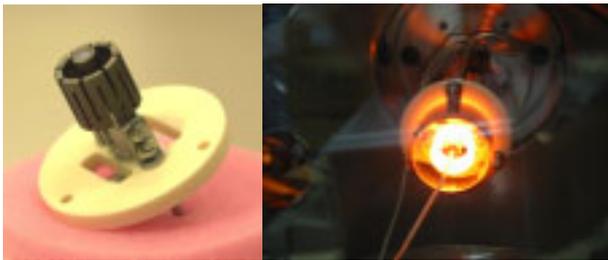


図2：CeB<sub>6</sub>カソードアッセンブリ（左）及びグラファイトヒーターの加熱試験（右）。

### 3．電子銃加速電極のデザイン

SCSS電子銃では、加速電極の形状を一般的なピアス型とせず、単純な平板型とした。理由は以下の通りである。（1）ピアス型電極は横方向の空間電荷力を打ち消すように、ウェネルトに傾斜角を設けてカソード表面近傍に集束電場を作る。しかし、カソードの取付誤差や熱歪による位置の変化によって、カソード中心がビーム軸からずれた場合、集束電場がビームに対して軸対称に作用しなくなり、場合によってはエミッタンス増大に繋がる恐れがある。加速電圧500 kVでは空間電荷効果が小さいので特に集束電場を設ける必要がないと考えた。（2）加速器システムの調整を行うためには、ビーム電流を広い範囲に渡って変化させる必要性が出てくることが予想される。カソードは温度制限領域において動作させる予定であるが、ピアス型電極から小電流のビームを発生する場合、ビームが過集束してしまうため、ビーム軌道の調整が困難になることが予想される。平板型電極では過集束することはない。

平板型電極の妥当性を確認するために、EGUNコードを用いたコンピューターシミュレーションを行った。温度制限領域におけるビーム軌道と位相空

間プロットを図3に示す。ビーム軌道が大きく発散せず、また、位相空間プロットの傾きが直線に乗っていることがわかる。粗いメッシュサイズによる計算では、位相空間プロットが湾曲してエミッタンスが大きく見えるのは物理的要因からではなく、計算エラーであると考えられる。エミッタンスの計算値はメッシュサイズを細かくすることにより小さくなり、メッシュサイズ0.05 mmにて0.1 π.mm.mrad（規格化、RMS）に収束した。この値はカソードにおける熱エミッタンスに比べて十分小さい値であり、電子銃領域における空間電荷によるエミッタンス悪化は無視できるレベルであることが分かった。

図4に、平板型電極を備えたカソードシステムと高電圧セラミックブッシングの写真を示す。

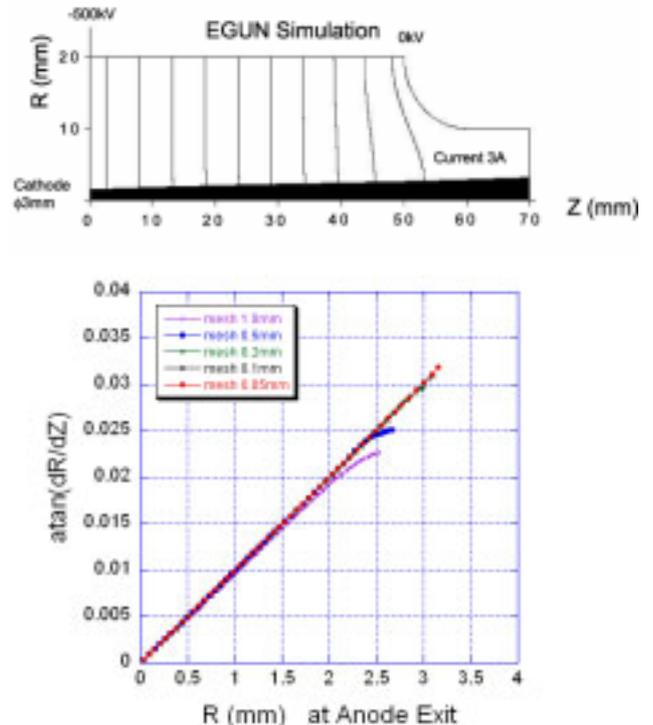


図3：平板型電極のEGUNシミュレーション。ビーム軌道（上）及び位相空間プロット（下）。

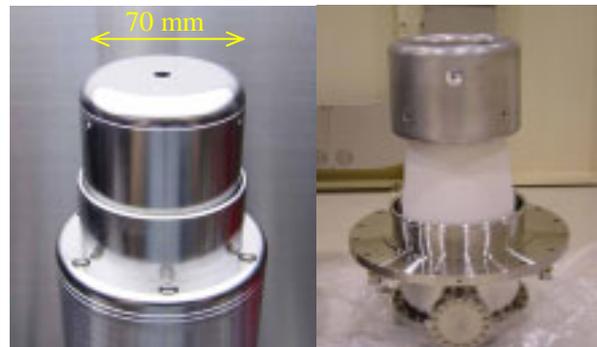


図4：平板型電極を備えたカソードシステム（左）及び高電圧セラミックブッシング（右）。カソードシステム先端の中心穴にCeB<sub>6</sub>カソードが位置する。

