SACLA 電子源ビームの高輝度化に向けて TOWARD HIGHER BRIGHTNESS BEAM OF THE SACLA ELECTRON SOURCE

渡川和晃#

Kazuaki Togawa#

RIKEN SPring-8 Center

Abstract

In the SPring-8 campus, the CeB_6 electron gun which can generate a high-brightness beam was developed and has been continuing to deliver it to the X-ray free-electron laser (XFEL) SACLA, the soft X-ray free-electron laser SCSS+, and the SPring-8 storage ring. Although a short gain length of X-ray lasing was achieved and the power saturation level already reached as high as 100 GW owing to a low emittance and extremely-hard compression of the electron beam, higher output power of XFEL is required from experimental users. In order to supply the demand, development of the electron gun which can generate a beam with higher-brightness was stated based on the present CeB_6 gun. In this paper, a scheme to upgrade the SACLA electron source is discussed.

1. はじめに

CeB₆熱電子銃 [1,2] は、SPring-8 キャンパスにお いて X 線自由電子レーザー (XFEL) 施設 SACLA [3] および軟 X 線 FEL ビームライン専用加速器 SCSS+ [4,5] の電子銃として使われ、ユーザー利用 運転のために低エミッタンス電子ビームを供給し続 けている。2021 年には SACLA の線形加速器から SPring-8 蓄積リングへの電子ビームの同時入射が始 まり [6]、CeB₆熱電子銃は SPring-8 蓄積リングのた めの電子銃としても稼働することになった [7]。 SACLA における CeB₆カソードの短寿命問題がまだ 未解決のまま残されてはいるものの、高輝度の放射 光を安定に供給する電子源として十分な役割を果た している。

SACLA では、低エミッタンスビームを縦方向に 極限的な状態にまで圧縮することでパルス幅が約 10 fs、ピークパワーが 100 GW レベルの極短パルス XFEL 光を発生している [8,9]。高密度の XFEL 光 を利用した様々な実験研究が行われているが、更に 高い強度の XFEL 光を望むユーザーは当然ながら少 なくない。その要求に応えるために、電子ビームの 低エミッタンス化に着目してそれを実現するための 方策を考案した [10,11]。

2. XFEL の出力増強

電子ビームの特性と XFEL 強度の関係を調べるために、数値計算をもとに構築された 3 次元 FEL 解析 モデルを使用した [12]。

 $P_{sat} \approx 1.6 \rho \left(\frac{L_{1d}}{L_g}\right)^2 P_{beam} = \eta(\varepsilon_n, I_p, \dots) P_{beam}$ ここで、 P_{sat} は FEL 出力の飽和ピークパワー、 P_{beam} は電子ビームのピークパワー、 ρ は Pierce パラ メータ、 L_g 、 L_{1d} はそれぞれ 3 次元、1 次元の FEL ゲイン長である。パワー変換係数 η は規格化エミッ タンス ε_n やピーク電流 I_p などの電子ビームパラメー タやアンジュレータパラメータの関数となる。この 関係式に SACLA のパラメータ (FEL 波長:1.18× 10⁻¹⁰ m、電子エネルギー:8 GeV、磁石列周期長: 18 mm、K 値:2.1、ベータ関数:22 m、エネルギー 広がり:1×10⁴)を代入し、 $P_{sat} \ge \varepsilon_n$ および I_p との 関係を調べた。Figure 1 にピーク電流を 10 kA に固 定した場合の XFEL 出力の規格化エミッタンス依存 性と規格化エミッタンスを 0.4 μ m に固定した場合 のピーク電流依存性を示す。



Figure 1: Emittance and peak current dependence of FEL output power.

加速高周波やビーム航跡場、コヒーレント放射が 生み出すエネルギー分布の非線形を精密にコント ロールすることでピーク電流を上げる余地は残され ているものの、既に極限的な状態にまで縦方向に ビームを圧縮しており、パワー変換係数の増強への 寄与は小さいと考えられる。

一方、規格化エミッタンスに関してはまだ改善の 余地が残されており、パワー変換係数を2倍程度増 強できる可能性がある。規格化エミッタンスはアン ジュレータにおけるビームサイズを決定するので、

[#] togawa@spring8.or.jp

ビームサイズの縮小化は更なる横方向のビーム圧縮 と捉えることができる。現状 SACLA のビームは、 静止系における縦方向のビームサイズが 3 µm

(FWHM) であるのに対し横方向のサイズが 100 μ m (4 σ)を超えるかなり扁平した空間分布を 形成している。電子集団としては横方向の圧縮を強 めたほうがより自然な状態となるであろう。まずは 規格化エミッタンスの目標値を 0.1 μ m とし電子源 開発を進めることにした。

3. 高輝度熱電子源開発の課題

SACLA では、半径 1.5 mm の CeB₆ カソードを 1700 Kから 1800 Kの高温に加熱してピーク電流1A、 規格化エミッタンス 0.6 µm のビームを引き出して いる。高温領域ではエミッタンスの温度依存性は非 常に小さく、カソード径が支配的である。従って、 エミッタンスを低減するためには、とにかく径が小 さいカソードを開発しなければならないことになる が、温度以外のエミッタンスを悪化させる要素を取 り除くことも必須で、その要素の一つが表面粗度で ある。表面の突起に起因する電子ビームの角度広が りのモデル計算 [13] によると、角度広がりの最大 値は次式で表される。

$$\beta \gamma \theta_m = 0.15 \sqrt{E_0} \frac{n}{(h^2 + w^2)^{1/4}} (rad)$$

ここでβは光速に対する電子速度、γはローレンツ 因子、 θ_m は最大角度、 E_0 は表面電界(MV/m)、h、 wはそれぞれ突起の高さと幅(100 µm 単位)である。 比較のため $\beta\gamma\theta_m$ を標準偏差の3倍と仮定し、ビー ムサイズで規格化した規格化エミッタンス (intrinsic emittance) に相当する量を求めた。表面 粗度に対する intrinsic emittance の変化を Fig. 2 に示 す。簡単のためh=wとした。熱運動による intrinsic emittance $\sqrt{k_BT/(m_ec^2)}$ に対して十分小さな 値となるためには 100 nm 以下の表面粗度が必要で あることが分かる。ここで、k_Bは Boltzmann 定数、 T はカソード温度、meは電子の静止質量、cは光速 である。 SACLA が CeB₆ 単結晶を採用している理 由の一つがこれであり、同系統の LaB₆では原子間 力顕微鏡により 1 nm 以下の表面粗度が達成されて いるとの報告がなされている [14]。他系統のカ ソード結晶を開発する際には、同レベルの表面粗度 が実現できるか否かが鍵となる。

次に重要な要素がエミッション密度の一様性と ショット毎のプロファイル分布の安定性である。カ ソード近傍では電子ビームのエネルギーが極めて低 いので、電流密度にムラがあると空間電荷力のバラ ンスが崩れて層流が乱れ、局所的な角度広がりが増 大すると考えられる。指標となる物理モデルは構築 できていないが、高密度の電子ビームを生成する場 合、可能な限りエミッション密度を一様にすること が求められる。また、ショット毎のエミッション分 布の再現性も重要で、特に極限状態にまでビームを 圧縮するケースでは、空間分布の安定性がピーク電 流の安定性にも関与するであろう。CeB₆単結晶を 採用しているもう一つの理由がここにあり、実際に 1 ns の射影でありながら Fig. 3 に示す一様な電子分 布が安定に得られている。



Figure 2: Effect of surface roughness on emittance.



Figure 3: Projected beam profile of the CeB₆ gun.

さて、0.1 µm の規格化エミッタンスを達成するた めには、カソード径を 1/3 よりも小さくする必要が ある。エミッション密度はカソード径の2 乗に反比 例するため、これまでより1桁高いエミッション密 度を実現しなければならない。熱電子カソードのエ ミッション密度は Richardson 方程式で与えられる。

$$j = AT^2 exp\left(-\frac{\phi_{eff}}{k_B T}\right), \ \phi_{eff} = \phi - \frac{e}{2} \sqrt{\frac{eE_s}{\pi \varepsilon_0}}$$
(1)

AはRichardson 定数、 ϕ_{eff} はShottky 効果による実効 仕事関数、 ϕ はカソード物質の仕事関数、 E_s はカ ソード表面の加速電界、eは素電荷、 ε_0 は真空の誘 電率である。カソードの昇温に限界がある場合、エ ミッション密度を上げるためには実効仕事関数を下 げるしか解がなく、そのためには電子銃の高電界化 を行うか低い仕事関数を有する新しいカソード物質 の探索、開発を行うしか方法がない。SACLA では この両側面から開発を進めることにした。

4. 電子銃の高電界化

 CeB_6 カソードの半径を3分の1の0.5 mm とした 場合、ピーク電流1Aを得るためには127 A/cm²の エミッション密度を実現しなければならない。 CeB_6 電子銃の実験、電界計算で求めた値、 A=19.1 A/cm²、 ϕ =2.39 eV、 E_s =12.6 MV/m を用いる と、式(1)よりエミッション密度 127 A/cm²を得るた めのカソード温度が 1975 K であることが分かる。 CeB₆結晶の融点 2463 K より低いため昇温は不可能 ではないと考えられるが、蒸発速度の増加やエミッ ション寿命の悪化が心配される。ヒーターなど周辺 部品へ多大な熱負荷を課すことにもなる。そこで Shottky 効果を利用して実効仕事関数を小さくし、 動作温度を下げることを考えた。Figure 4 に表面電 界に対する実効仕事関数と 127 A/cm²のエミッショ ン密度を与える温度との関係を示す。表面電界を 40 MV/m まで上げれば温度を 1890 K にまで下げる ことができ現実的となってくる。SACLA では既に Shottky 効果によって 30%程度高いエミッション電 流を得ており、効果は小規模ながら実証済みである。



Figure 4: Effective work function and temperature which give 127 A/cm² emission density as a function of surface electric field.

表面電界を上げるために印加電圧を現状の500 kV より高くすることは、入射部のバンチ圧縮の観点か らも得策ではない。従って、印加電圧は 500 kV に 固定し、加速電極のギャップを狭くすることで表面 電界を上げることにした。SACLA では電極材料に 清浄ステンレスを用いているが、20 MV/m 程度が限 界であると思われる。そこでチタン製ウェネルトと モリブデン製アノードの組み合わせを試みることに した [15, 16]。チタンをウェネルト側に用いたのは、 2 次電子放出係数が小さいため逆流イオンが誘発す る放電を抑制できると考えたからである。モリブデ ンをアノード側に用いたのは、電子衝撃に強くター ゲット材やコリメータ材に使われており、放電時の ガス放出やイオンの発生が抑制できると考えたから である。SACLA 電子銃と同じ形状で電極を作製し、 高電界試験を行ったところ、Fig. 5 に示すように最 初の高電圧コンディショニングで放電回数が極めて 少ない良好な結果が得られた。しかしながら長時間 の高温加熱によりチタンが再結晶化して放電が多発 するようになった。高温の熱電子銃にチタンウェネ ルトを適用するには、カソードからの伝熱を遮断す る断熱性の良い構造にするか単結晶材を用いるか何 らかの対策が必要であることが分かった。

チタンウェネルトの開発はひとまず中断し、モリ ブデン電極の組合せを試みることにした。Figure 6

に新しい加速電極の構造とウェネルトの写真を示す。 この構造では、印加電圧 500 kV で 48 MV/m のカ ソード表面電界を得ることができる。モリブデン材 は純度 99.999 %の多結晶材を用い、表面はダイアモ ンドペーストによる鏡面仕上げとした。CeB₆カ ソードの半径は 0.5 mm である。カソードからア ノードまでの距離が大幅に狭まったことで、カソー ドからの熱輻射が強まりアノード電極が加熱され、 真空度が悪化する問題が生じた。それが主な原因で あると思われるが、200kVから放電が多発して高電 圧コンディショニングがスムーズに進まなくなった。 390 kV まで印加できたものの、放電により CeB₆結 晶が破壊され、エミッションが激減する結果となっ た。最初の試みは失敗に終わったが、高電圧コン ディショニング中のエミッション電流の様子から Shottky 効果による大幅なエミッション密度の増強 が達成できていることが確認できた(Fig. 7)。改 善策としてアノード電極とステンレスフランジをろ う付けで密着し、水冷の冷却効率を上げることにし た。また、目標を 1 段階下げて、加速ギャップを 20 mm とし、半径 1.0 mm の CeB₆結晶で試験を行う ことにした。現在準備中で 2023 年度秋に試験を実 施する予定である。



Figure 5: Discharge in high voltage conditioning. Upper: electrodes made of clean stainless steel. Lower: titanium wehnelt and molybdenum anode.



Figure 6: High-gradient electron gun with a small CeB₆ cathode and short-gap molybdenum electrodes.



Figure 7: Emission from a small CeB_6 cathode during high-voltage conditioning (red circle). For comparison, standard emission data of the CeB_6 gun are plotted (blue square).

電子銃の高電界化にパルス電源も重要である。 SACLA の電子銃は C-band クライストロン用の変調 器電源 [17] を使用することを前提として設計され た。従ってパルス幅が数 µs と非常に長く、電子銃 の高電界化にとってかなり不利な条件となっている。 SACLA 入射器に送る電子ビームの幅は 1 ns なので、 電子銃高電圧のパルス幅は 100 ns もあれば十分であ る。パルス幅が 1 µs を切れば放電の閾値が大幅に上 がることが考えられるので、最終的には電源の単パ ルス化が必要となってくるであろう。パルス幅の限 界を決めている電子銃システムの浮遊容量の改善や インピーダンスの見直しで電源の単パルス化が実現 できるかの検討を行なっている。

5. 低仕事関数カソード開発

SACLA 特有の CeB₆カソードの劣化現象を解明し てこの問題を解決するために、高温カソードの量子 効率スペクトルから精密な仕事関数を測定する装置 を開発した[18, 19]。CeB₆結晶の仕事関数周辺のエ ネルギーをカバーする可変レーザーを使用している ので、低仕事関数カソードの開発にも適している。 以下、着目している低仕事関数カソードの候補を紹 介する。

- 単原子層物質のコーティング:最近、LaB₆結晶 の表面に1原子層のh-BN(hexagonal boron nitride)をコーティングすると仕事関数が低下 することがLos Alamos 国立研究所の山口尚登氏 らのグループにより報告された[14]。h-BN と LaB₆表面の間で電荷の移動が起こり、局所的発 生した電場により仕事関数が低下したと解析さ れている。当グループと協力し CeB₆熱電子カ ソードに対して有効性であるか否かの調査を行 なっている。
- 2) 窒素ドーピング:窒素をLaB₆にドープすると仕 事関数が低下するとの報告がある [20]。仕事関 数低下に窒素がどのように関与しているかは理 解できていないが、CeB₆系低仕事関数カソード の候補の一つと考えている。
- 3) Iridium-Cerium (IrCe)カソード:高エネルギー加速器研究機構の吉田光宏氏らが大電流を必要とする Super KEKB 用 RF 電子銃のために高い量子効率を有するフォトカソードとして導入した[21]。仕事関数が希土類ホウ化物と同程度に小さく(φ=2.57 eV)、熱エミッションの密度も高いことが報告されており、有望なカソードとして着目し、吉田グループと共同研究を行なっている。IrCeとカーボンの相性が悪いため高温結晶の保持方法が課題であることが分かり、高融点金属を使ったアッセンブリーの開発を行なっているところで、試作器では低電圧ながらφ3 mmのカソードから 5.7 kV、0.2 Aの電子ビームを引き出すことに成功している。
- 4) 遷移金属炭化物カソード [22]:遷移金属炭化物 カソードは融点が非常に高いため、超高温の環 境に対して強固であると期待できるが、一般に 仕事関数は低くない(*φ*~3.5 eV)。しかし、酸 化した遷移金属炭化物は CeB₆ レベルの低仕事 関数を有するとの報告もある [23]。効率良く加 熱できるヒーターの開発が鍵となるであろう。
- 5) レーザー励起:赤外線レーザーを結晶に照射し て結晶内電子の Fermi 分布を高エネルギー側に シフトさせ、相対的に仕事関数を下げることが 可能か否かの検討を行なっている。

6. 低エミッタンスビームの XFEL 調整

SACLA では電子銃の直下流に丸穴のコリメータ を置き、数 µs の長パルスから 1 ns の単バンチを切 り出すとともに理想的な一様ビームに近づけるため に外輪部の除去を行なっている。ビーム径が確定す る丸穴のコリメータは仮想的な電子源と見なすこと ができ、この点で電子源ビームの条件を接続すると、 入射部以降のビーム調整が容易となる。原理的には コリメータの上流に 2 台の磁気レンズを設置すれば 良い。カソードの小径化により変化した電子銃ビー ムの初期条件はここで補正する。

10 MeV 以下の低エネルギーでは、ビームエンベ ロープは空間電荷力が支配的となって決まるので、 丸穴のコリメータの出口でピーク電流値、ビーム径、 大局的な発散角度を合わせておけば、これまでと同 じ電磁場により同じエンベロープでビームを輸送出 来ると考えられる。高エネルギー加速部ではダンピ ング効果で自然にビーム径が小さくなるが [24]、 電子密度の変化によりビーム航跡場やコヒーレント 放射の影響の変化が予想されるので、これについて は数値計算等で評価しておく必要があると考えてい る。

7. 最後に

SACLA は R&D 開始から 20 年、供用開始から 10 年が経過し、次世代のアップグレードを計画する時 期に差し掛かっている [25]。将来、飛躍的に増大 したピーク輝度を持ちかつ安定な XFEL 光をユー ザーに提供することが求められる場合には、電子源 の技術的選択肢として熱陰極方式が適しているのか 光陰極方式が適しているのかを再び検討し直し、長 期利用運転も含めた総合的な見地から方式を選択し なければならない。本稿で述べた熱電子銃のアップ グレードはその重要な判断材料の一つになると考え ている。

参考文献

[1] 渡川和晃 他, "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 (2001) p.147.

- [2] K. Togawa *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **10** (2007) 020703.
- [3] T. Ishikawa et al., Nat. Photon. 6 (2012) p.540.
- [4] T. Shintake et al., Nat. Photon. 2 (2008) p.555.
- [5] S. Owada *et al.*, J. Synchrotron Rad. **25** (2018) p.282.
- [6] T. Hara *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **24** (2021) 110702.
- [7] 前平晃太郎 他, "SACLA 電子銃システムの交換作業効率化のための機器整備",第20回日本加速器学会年会(2023).
- [8] K. Togawa *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **12** (2009) 080706.
- [9] H. Maesaka *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **21** (2018) 050703.
- [10] 渡川和晃, "XFEL の出力増強に向けた高輝度熱電子源の開発状況", 第 26 回 FEL と High-power Radiation 研究会, 2019 年 12 月 17 日, 広島大学.
- [11] 渡川和晃,"熱電子銃と短波長 FEL のビーム物理",2020 年度ビーム物理研究会,2020 年 12 月 9 日, リモート開 催.
- [12] M. Xie, Proc. PAC95 (1996) p.183.
- [13] Y. Y. Lau, J. Appl. Phys. 61 (1987) p.36.
- [14] H. Yamaguchi et al., Appl. Phys. Lett. 112 (2023) 141901.
- [15] F. Furuta et al., Nucl. Instr. and Meth. A 462 (2001) p.337.
- [16] M. Yamamoto et al., Appl. Phys. Lett. 109 (2016) 014103.
- [17] T. Inagaki et al., Proc. APAC2004 (2005) p.654.
- [18] T. Magome *et al.*, Journal of Applied Physics **133** (2023) 165107.
- [19] 馬込保 他, "ナノ秒パルスレーザを利用した光電子収 量分光法による SACLA 熱カソード CeB₆ の仕事関数 の測定", 第 20 回日本加速器学会年会 (2023).
- [20] H. Ishii et al., ECS Transactions 66 (2015) p.23.
- [21] D. Satoh et al., Energy Procedia 131 (2017) p.326.
- [22] https://www.a-p-tech.com
- [23] W. Hayami et al., ACS Omega 6 (2021) p.14559.
- [24] T. Hara et al., Nucl. Instr. and Meth. A 624 (2010) p.65.
- [25] H. Tanaka et al., Proc. IPAC23 (2023) p.2557.