

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 CeB₆ 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 CeB₆ 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 × 10⁻⁴) を代入し、 P_{sat} と ε_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 μm に固定した場合のピーク電流依存性を示す。

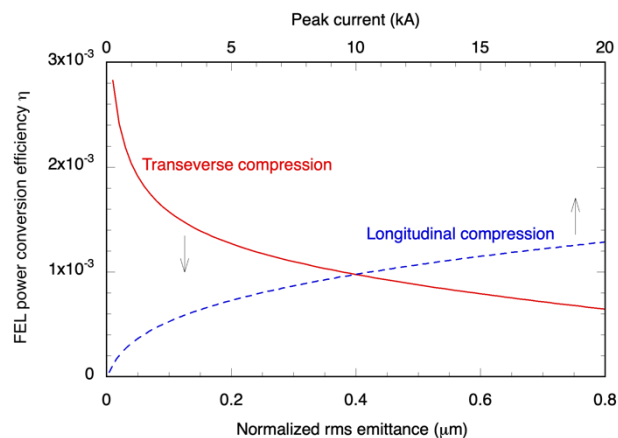


Figure 1: Emittance and peak current dependence of FEL output power.

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 $3\ \mu\text{m}$ (FWHM) であるのに対し横方向のサイズが $100\ \mu\text{m}$ (4σ) 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 $0.1\ \mu\text{m}$ 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 $1.5\ \text{mm}$ の CeB_6 カソードを $1700\ \text{K}$ から $1800\ \text{K}$ の高温に加熱してピーク電流 $1\ \text{A}$ 、規格化エミッタンス $0.6\ \mu\text{m}$ 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。

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

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 ($100\ \mu\text{m}$ 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 $\sqrt{k_B T / (m_e c^2)}$ に対して十分小さな値となるためには $100\ \text{nm}$ 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、 m_e は電子の静止質量、 c は光速である。SACLA が CeB_6 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 LaB_6 では原子間力顕微鏡により $1\ \text{nm}$ 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のが求められる。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。 CeB_6 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

$1\ \text{ns}$ 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。

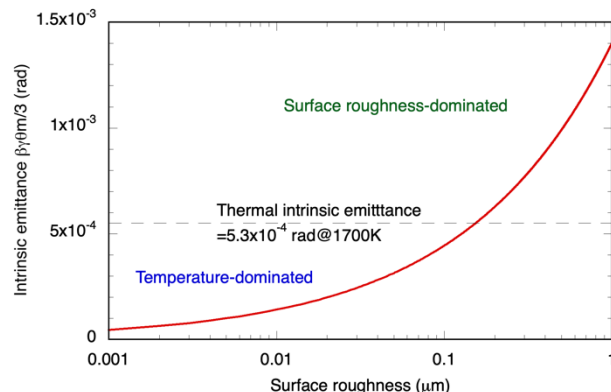


Figure 2: Effect of surface roughness on emittance.

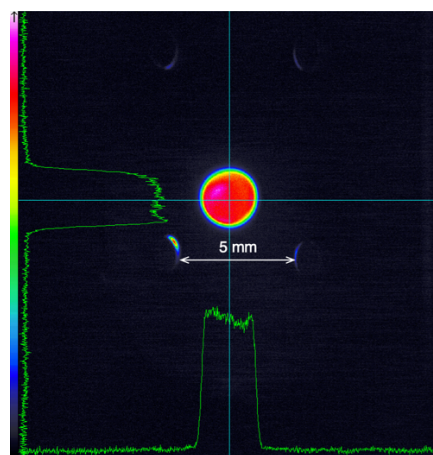


Figure 3: Projected beam profile of the CeB_6 gun.

さて、 $0.1\ \mu\text{m}$ 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。

$$j = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi_{eff}}{k_B T}\right), \quad \phi_{eff} = \phi - \frac{e}{2} \sqrt{\frac{eE_s}{\pi\epsilon_0}} \quad (1)$$

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 $0.5\ \text{mm}$ とした場合、ピーク電流 $1\ \text{A}$ を得るためには $127\ \text{A/cm}^2$ 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、

$A=19.1 \text{ A/cm}^2$, $\phi=2.39 \text{ eV}$, $E_s=12.6 \text{ MV/m}$ を用いると、式(1)よりエミッション密度 127 A/cm^2 を得るためのカソード温度が 1975 K であることが分かる。 CeB_6 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/cm^2 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。

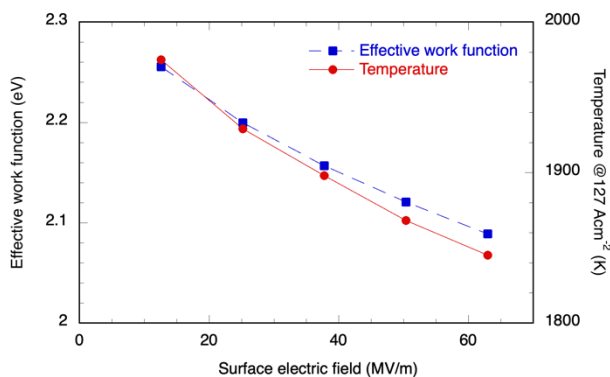


Figure 4: Effective work function and temperature which give 127 A/cm^2 emission density as a function of surface electric field.

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み合わ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。モリブデン材は純度 99.999% の多結晶材を用い、表面はダイヤモンドペーストによる鏡面仕上げとした。 CeB_6 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、カソードからの熱放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、 200 kV 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 CeB_6 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 CeB_6 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。

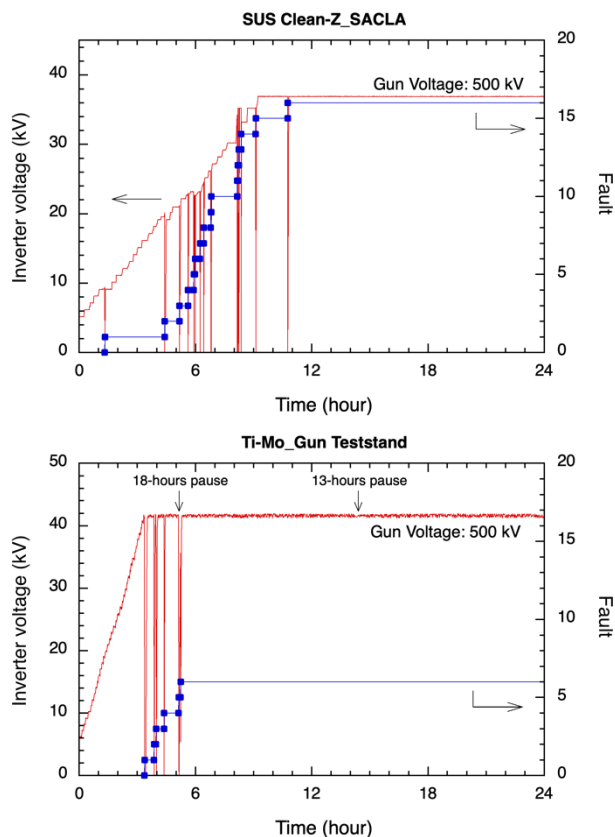


Figure 5: Discharge in high voltage conditioning. Upper: electrodes made of clean stainless steel. Lower: titanium wehnelt and molybdenum anode.

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ー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.