

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／理化学研究所

e-mail: togawa@spring8.or.jp

2023年8月31日

第20回日本加速器学会年会 日本大学船橋キャンパス

Content

- はじめに
- 高輝度熱電子源の課題
- 電子銃の高電界化
- 低仕事関数カソード開発
- 低エミッタンスビームのXFEL調整
- 最後に

元ネタ： 第26回FELとHigh-power Radiation研究会, 2019年12月17日, 広島大学
ビーム物理研究会, 2020年12月9日, リモート開催 における報告など

はじめに

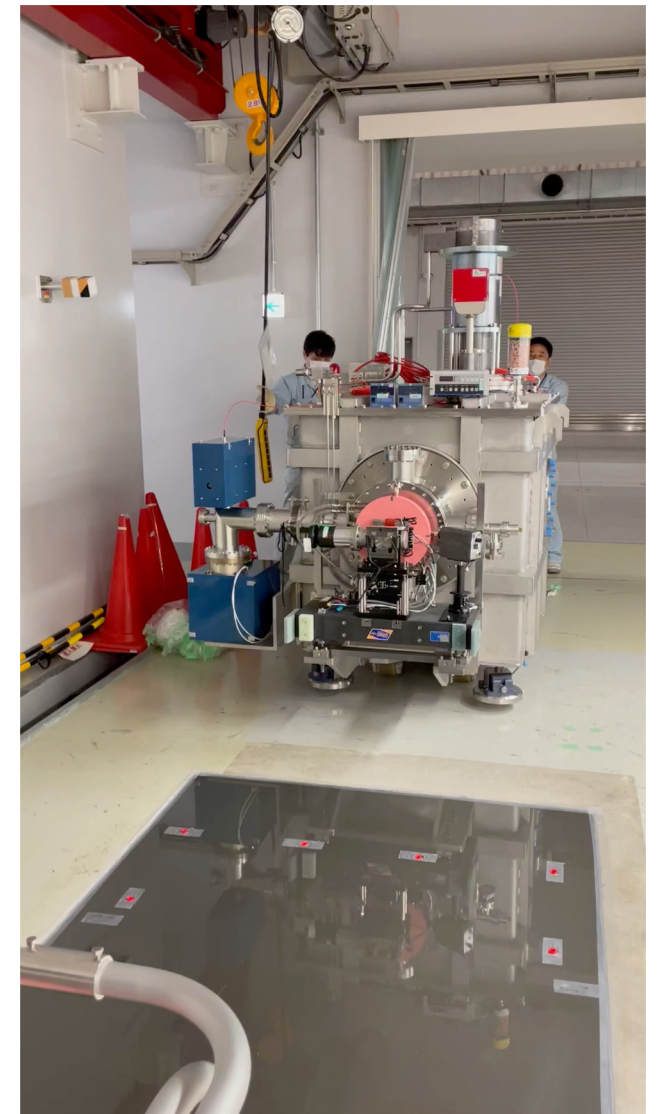
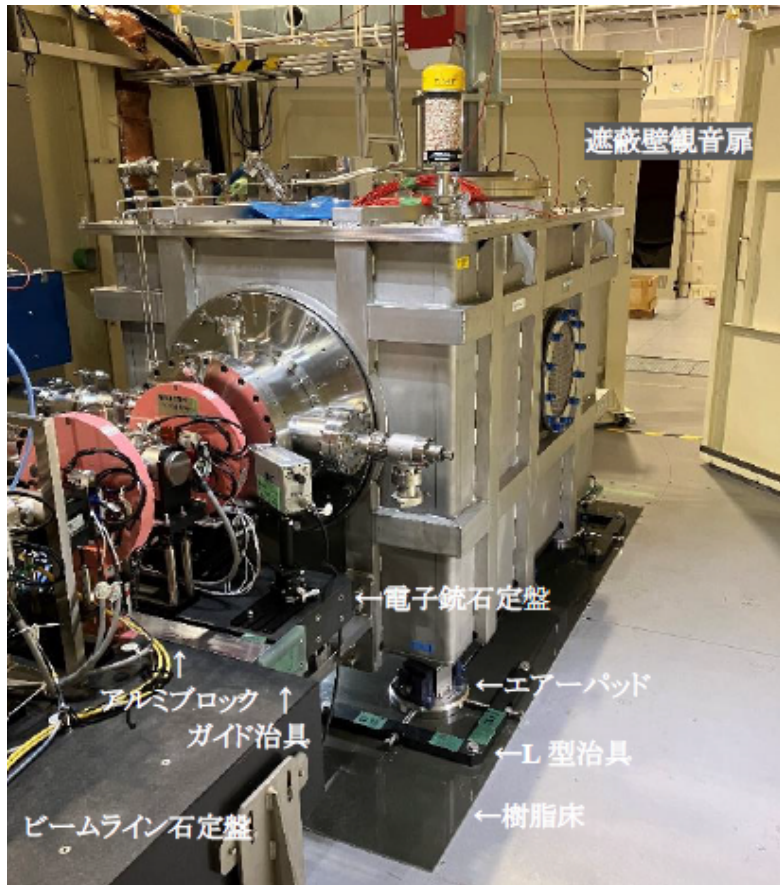
はじめに

- CeB_6 熱電子銃はXFEL施設SACLA および軟X線FELビームライン専用加速器SCSS+の電子銃として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、2021年にはSPring-8蓄積リングへのSACLA入射が始まった。
- SACLAではパルス幅約10 fs、ピークパワー100 GWレベルの極短パルスXFEL光を発生し高密度XFEL光の利用実験に使われているが、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。

SACLA電子銃の整備

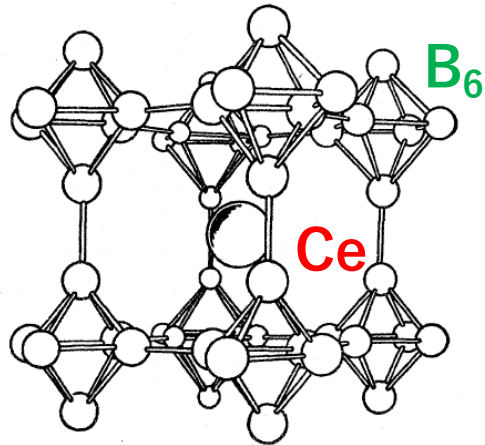
電子銃テストスタンド

SACLA電子銃タンク交換システム

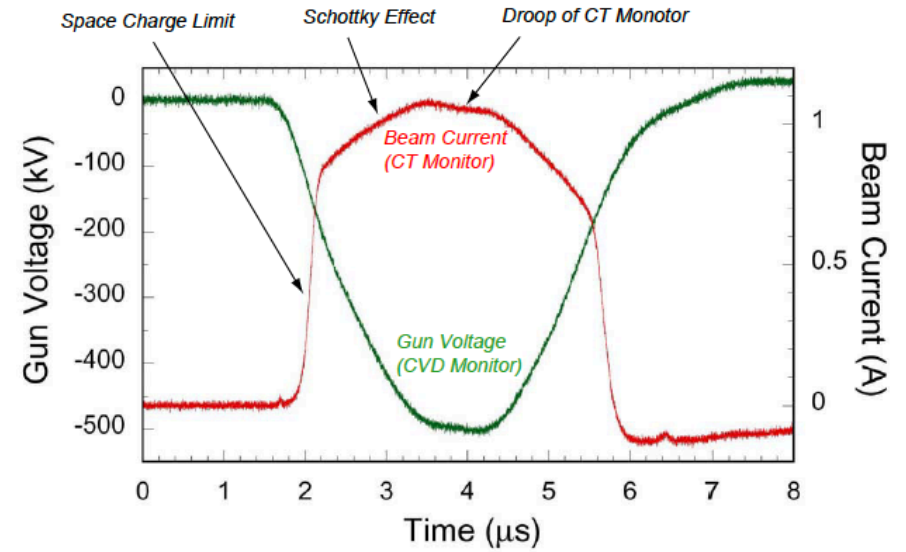


前平晃太郎 他, “SACLA電子銃システムの交換作業効率化のための機器整備”, 第20回日本加速器学会年会 (2023) WEP36

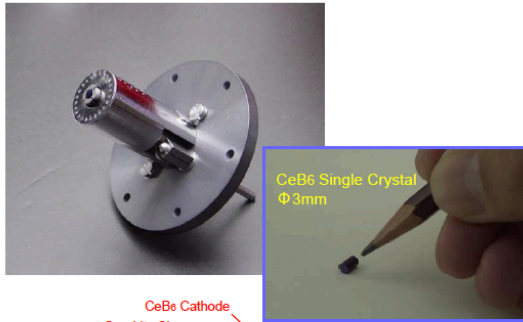
CeB₆ 熱電子銃



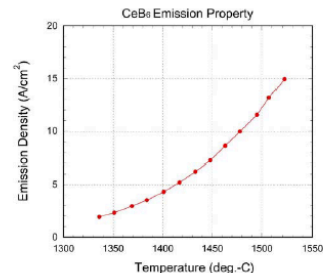
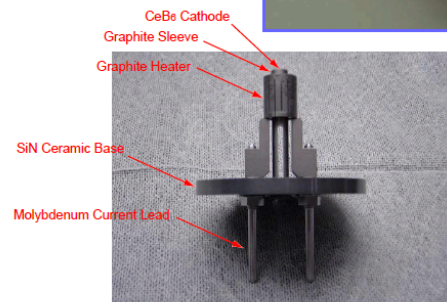
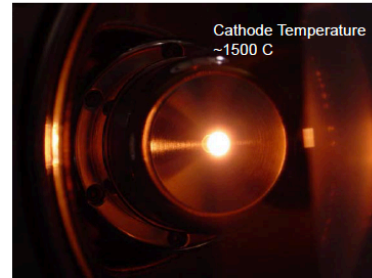
P. F. Walch et al., Phys. Rev. B 15 (1977) p.1859



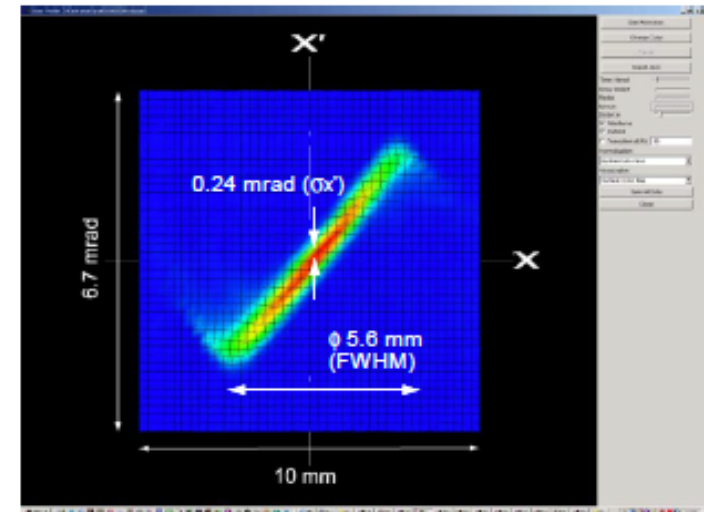
Cathode Assembly



Heated Cathode in Stem



The gun voltage=500 kV
Temperature was measured at the graphite sleeve by a radiation monitor.



規格化エミッタンス: 0.6 μm (90% core)

K. Togawa et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 10 (2007) 020703

高輝度熱電子源の課題

XFELの強度を増強するために

- 現在、SACLAのFELパルスエネルギーは $700 \mu\text{J}@10\text{keV}$ 。
- Machine learningを駆使するなど、高出力を追い求めてビーム調整を続けてきた結果、XFEL光のパルス幅は 10 fs 以下にまで短くなった。
- バンチ圧縮の非線形補正に可能性は残されているが、縦方向の電子密度としてはおそらく極限状態に達しているであろう。 **Longitudinal compression**
- もう一つの可能性として、熱電子源のエミッタンスを極小化して横方向の電子密度を高め、XFELパルスエネルギーの増強を目指す。 **Transverse compression**

XFEL出力のエミッタンス依存性

3次元のFEL解析モデル (M. Xie, PAC95) を使ってエミッタンスの効果調べる。

$$P_{sat} \approx 1.6\rho \left(\frac{L_{1d}}{L_g}\right)^2 P_{beam} = \eta(\epsilon_n, I_p, \dots) P_{beam}$$

エミッタンスとピーク電流以外はSACLAのパラメータを使用。

$$\lambda = 1.18 \times 10^{-10} \text{ m (FEL波長)}$$

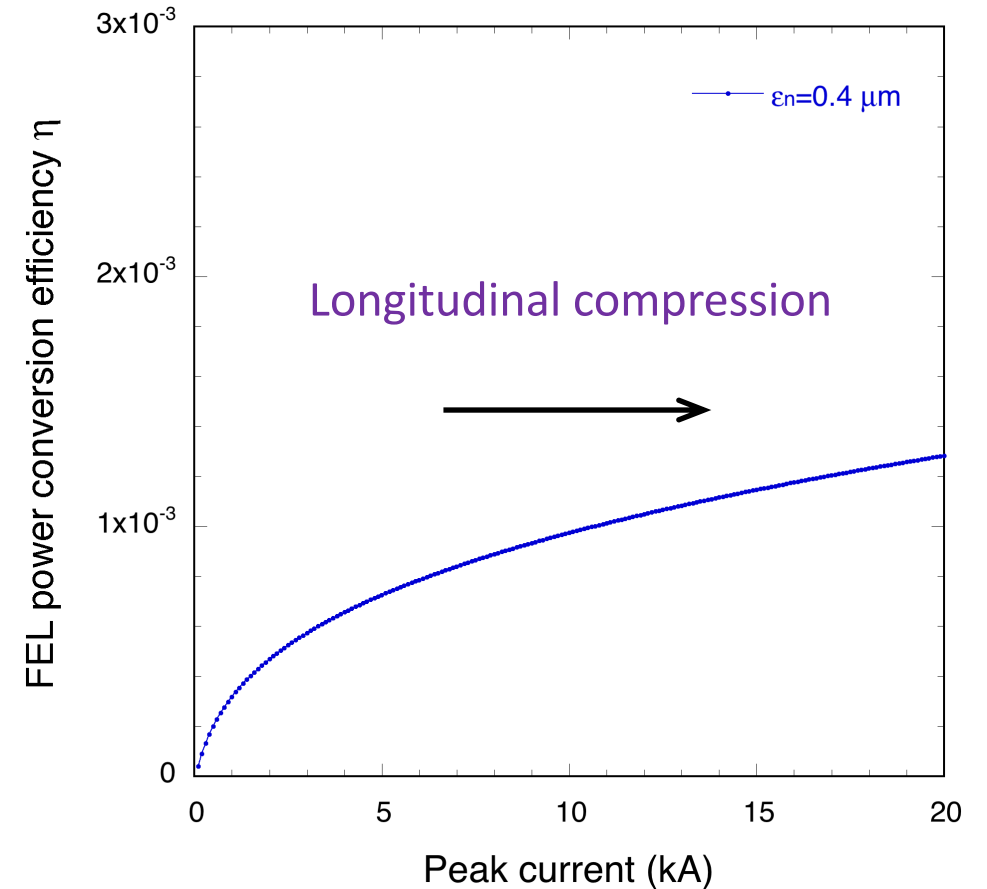
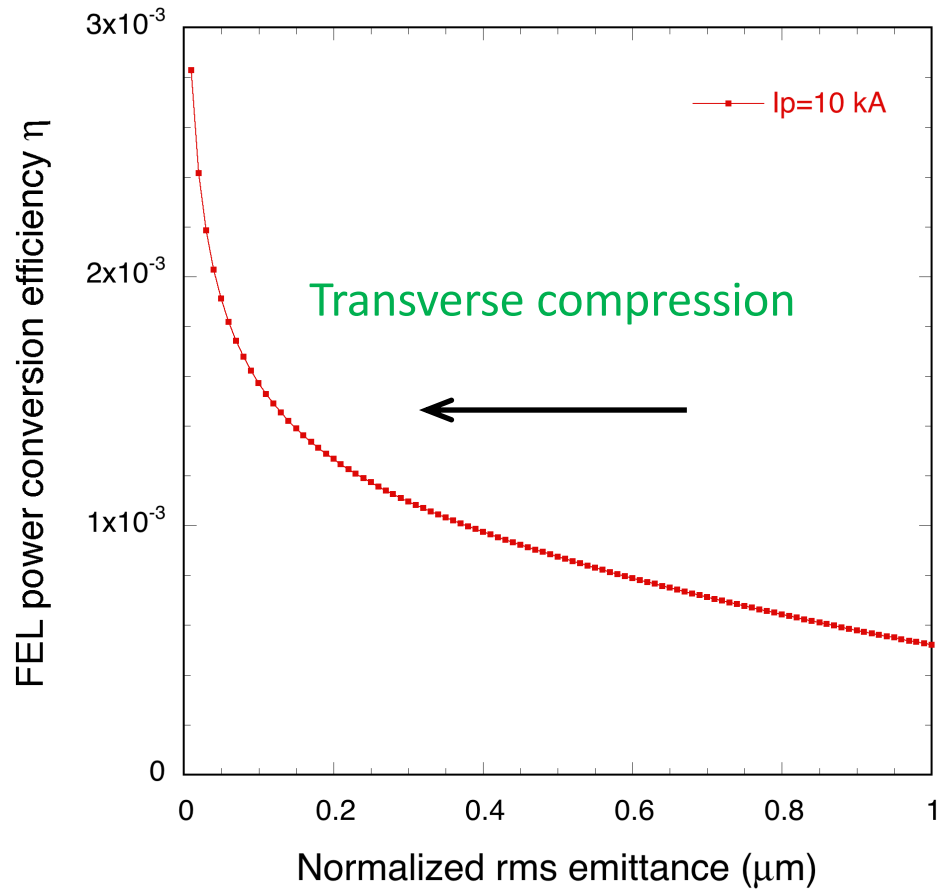
$$\gamma_0 = 15657 \text{ (8 GeV, 電子エネルギー)}$$

$$\lambda_w = 18 \text{ mm}, K = 2.1 \text{ (アンジュレータパラメータ)}$$

$$\beta = 22 \text{ m (ベータ関数)}$$

$$\frac{\sigma_E}{E_0} = 1 \times 10^{-4} \text{ (エネルギー広がり)}$$

FEL出力のエミッタンス依存性



エミッタンス低減の効果が顕著に見えてくるのは $\epsilon_n \sim 0.1 \mu\text{m}$ 。

熱電子源のエミッタンス

エミッタンスの基本式

$$\varepsilon_n = \beta\gamma\sqrt{\langle x^2 \rangle}\sqrt{\langle x'^2 \rangle} = \sqrt{\langle x^2 \rangle}\frac{\sqrt{\langle p_x^2 \rangle}}{m_e c} = \sqrt{\langle x^2 \rangle}\sqrt{\frac{\langle E_{\perp} \rangle}{m_e c^2}}$$

$$\text{intrinsic emittance} = \frac{\sqrt{\langle p_x^2 \rangle}}{m_e c}$$

$$\text{mean transverse energy (MTE)} = \langle E_{\perp} \rangle$$

熱電子源カソードでは

$$\varepsilon_n = \frac{r_c}{2} \sqrt{\frac{k_B T}{m_e c^2}} \quad r_c: \text{cathode radius}, \quad T: \text{temperature}$$

目的とするエミッタンス、カソードが動作する温度の領域でエミッタンスがどのように振る舞うのかを知ることが重要。

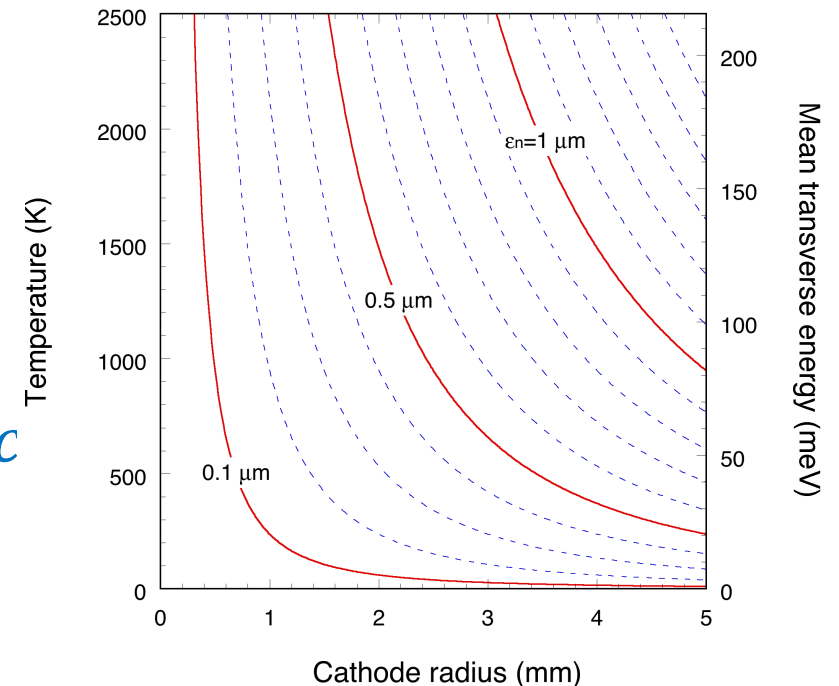
熱電子源のエミッタンス

SACLAのCeB₆電子銃のエミッタンスは0.6 μm 程度、カソード半径は1.5 mm、動作温度は1700 K (1427°C)あたり。

この領域では温度依存性が非常に小さいため、エミッタンスはカソード径が支配的。

とにかく**径の小さいカソード**を開発しなければならない。

忘れてならないことは、**温度 T 以外のエミッタンスを悪化させる $\sqrt{\langle p_x^2 \rangle}/m_e c$ の要素を取り除くこと。**



温度以外の要素 (surface roughness)

カソード表面の突起が運動量分布に及ぼす影響のモデル計算。

Y. Y. Lau, J. Appl. Phys. 61 (1987) p.36

角度分布のrmsが最大値の1/3であると仮定すると、要求される表面粗度は100 nm以下。

SACLAの電子銃がCeB₆の単結晶を使用している理由の一つはこれ。

AFMの測定でLaB₆(100)の表面粗度が1 nm以下との報告あり。

H. Yamaguchi et al., Appl. Phys. Lett. 112 (2023) 141901

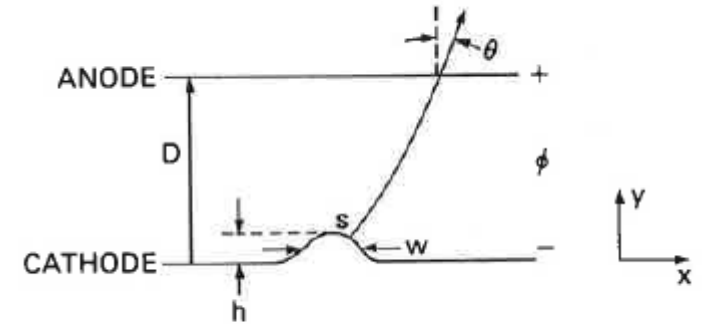
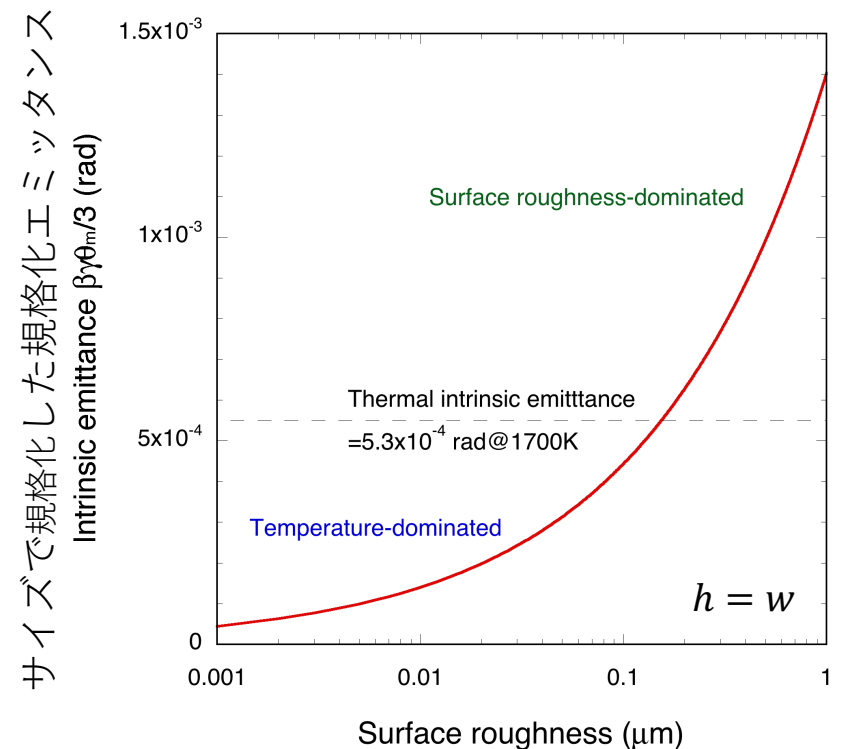


FIG. 1. Schematic drawing of a rough cathode surface.



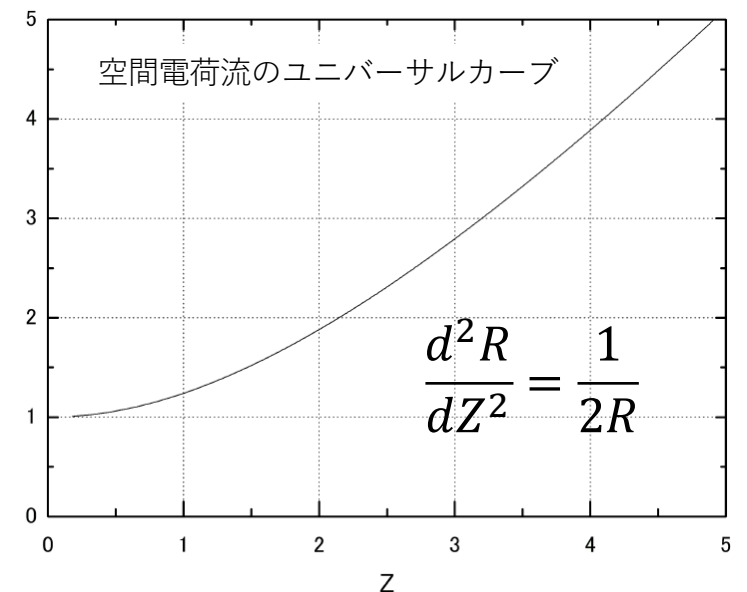
温度以外の要素 (space charge)

カソード近傍ではビームエネルギーが低いため空間電荷による相互作用が大きいが、密度が一様なビームの内部では空間電荷力が線型であるためビームは一様に広がりエミッタンスは原理的に悪化しない。

密度分布にムラがあると、空間電荷力のバランスが崩れて電子軌道が交差し層流が崩れる。

エミッタンスへの寄与を見積もる計算モデルが欲しいところ。

SACLAでCeB₆の単結晶を使っているのは一様なエミッション密度を得るため。



エミッション密度と課題

カソードを小さくすれば当然エミッション密度を上げなければならない ($j \propto r_c^{-2}$) が、昇温には限界がある。

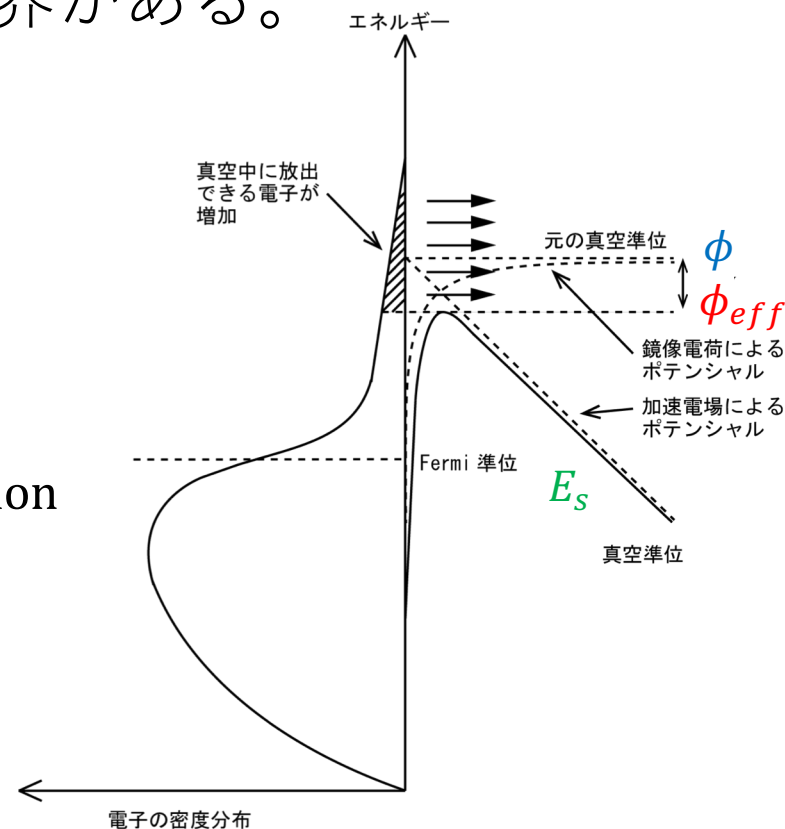
Richardson方程式 (+Shottky効果)

$$j = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi_{eff}}{k_B T}\right) \quad : \text{emission density}$$

$$\phi_{eff} = \phi - \frac{e}{2} \sqrt{\frac{e E_s}{\pi \epsilon_0}} \quad : \text{effective work function}$$

ϕ : work function of cathode material

E_s : surface electric field



低仕事関数カソードの開発、高電界電子銃の開発が重要。

電子銃の高電界化

CeB₆カソードの高電界化

SACLAのCeB₆カソードの半径は $r_c = 1.5 \text{ mm}$

$r_c = 0.5 \text{ mm}$ からSACLAの標準ピーク電流1 Aを得るには

$$j = 127 \text{ A/cm}^2$$

CeB₆電子銃の実験値は

$$A = 19.1 \text{ A/cm}^2$$

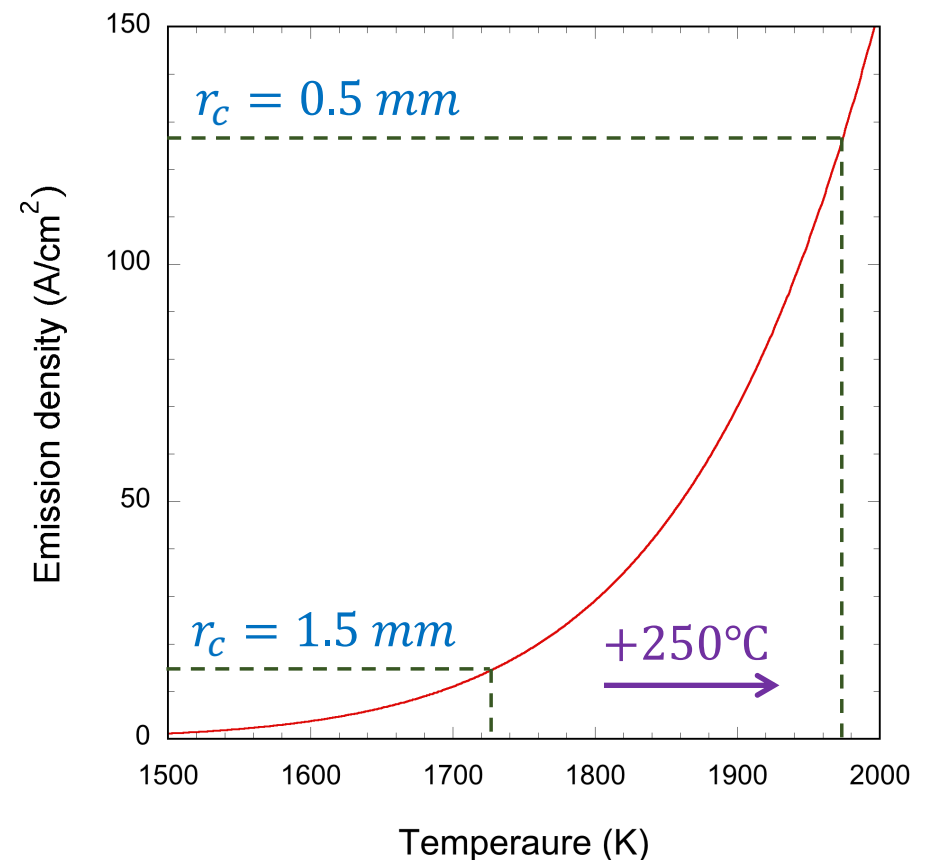
$$\phi = 2.39 \text{ eV}$$

$$E_s = 12.6 \text{ MV/m} \quad (\text{計算})$$

目標のカソード温度は

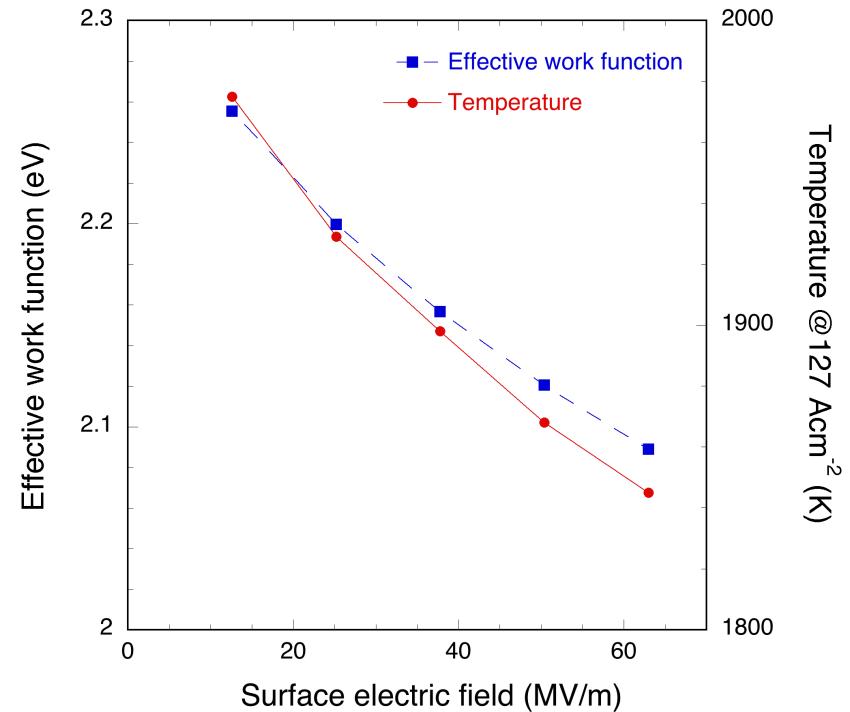
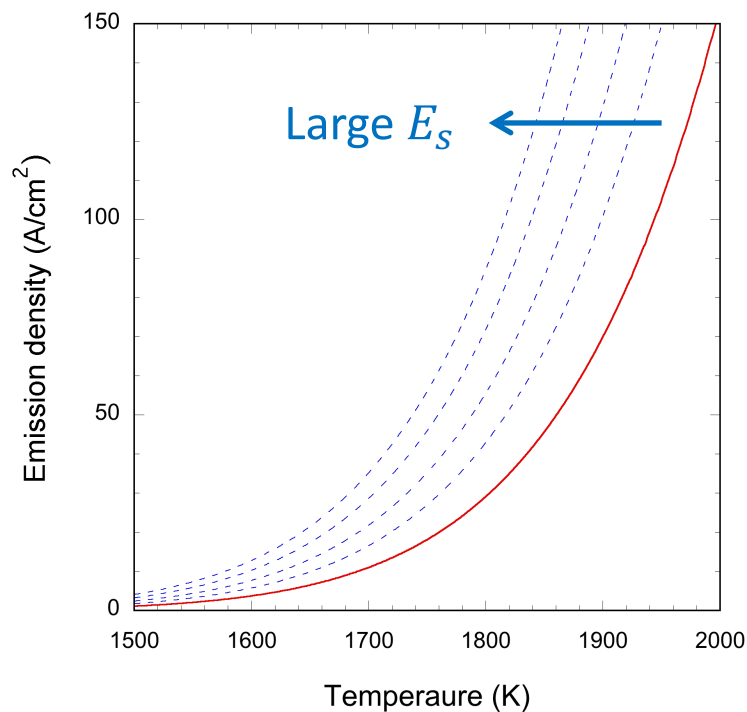
$$T = 1975 \text{ K}$$

融点以下で不可能ではないが、蒸発速度や寿命に不安要素。



CeB₆カソードの高電界化

Shottky効果を利用して仕事関数を小さくし動作温度を下げる。
現CeB₆電子銃はShottky効果によりエミッションが30%増大。
 E_s を40 MV/mまで上げることができれば現実的になってくる。



高電界加速電極

パルス電圧は現状の500 kVより上を狙うのは得策ではない。
Gapを狭めてカソードの表面電界を上げる。

現在、電極材料に清浄ステンレスを用いているが、 20 MV/m 程度が限界であろう。

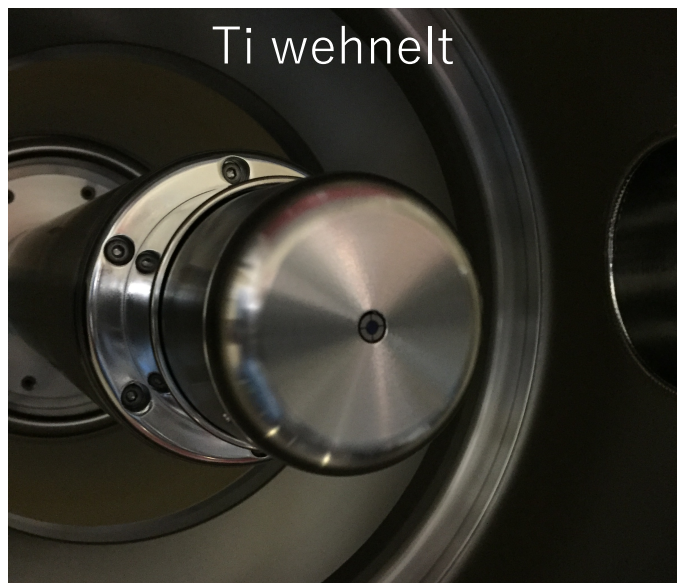
新しい試みとしてtitanium製ウェネルトとmolybdenum製アノードの組み合わせを試験中。

参考文献 F. Furuta et al., Nucl. Instr. and Meth. A 538 (2005) p.33

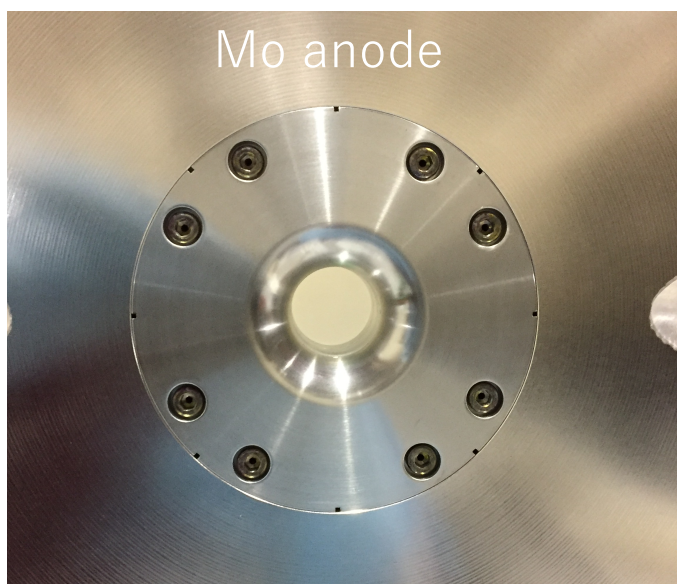
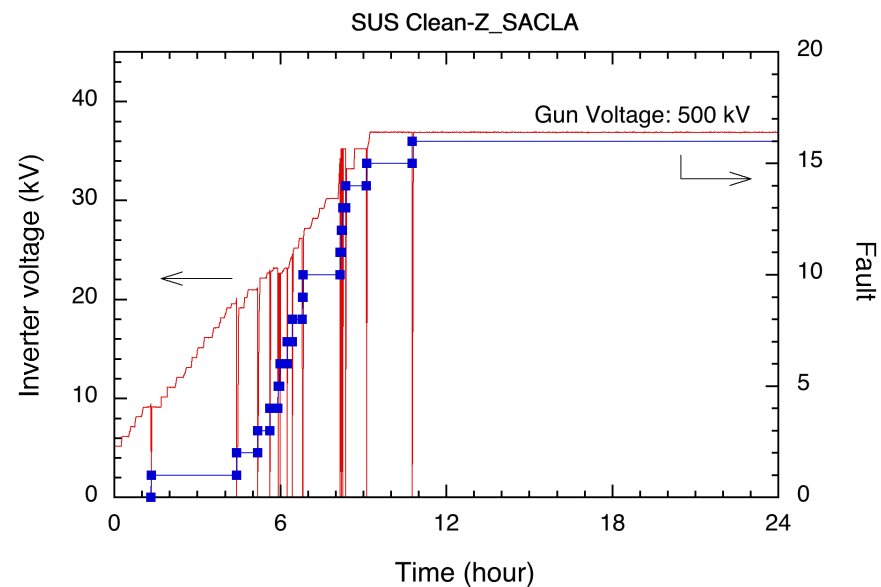
M. Yamamoto et al., Appl. Phys. Lett. 109 (2016) 014103

高電界を狙うには、パルス幅を現状の $3 \mu\text{s}$ から 100 ns レベルに狭めたパルス電源の開発も重要。

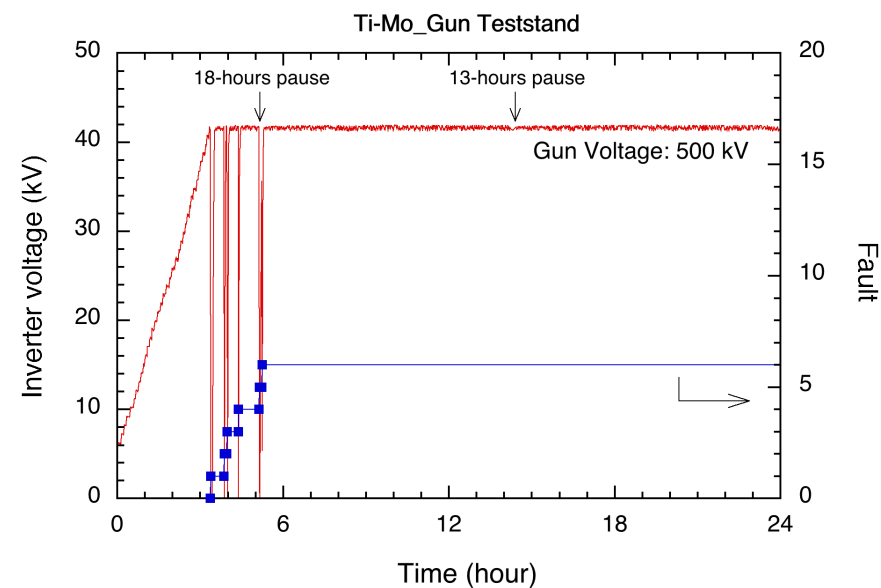
高電界加速電極



Clean-SUS
gap = 50 mm



Ti-Mo
gap = 50 mm



※長時間の高温加熱によりTiが再結晶化し放電が多発。ひとまず中断。

高電界加速電極

高電界molybdenum加速電極（赤線部）を開発中。
 高純度molybdenum材+ダイヤモンドペースト鏡面研磨。
 カソード電界40 MV/mを目標。

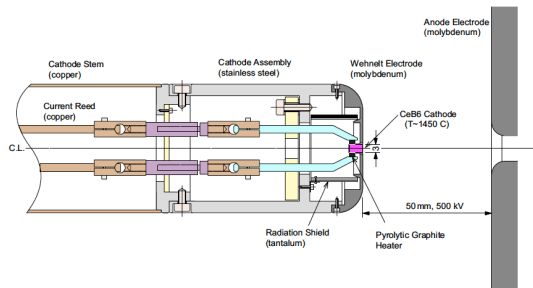
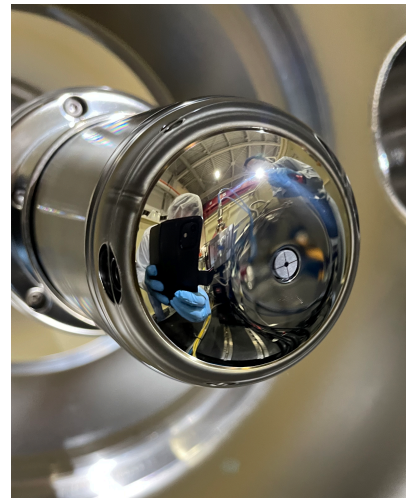
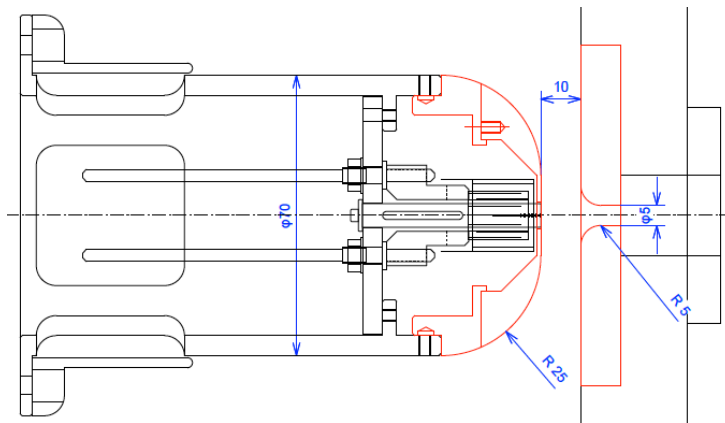
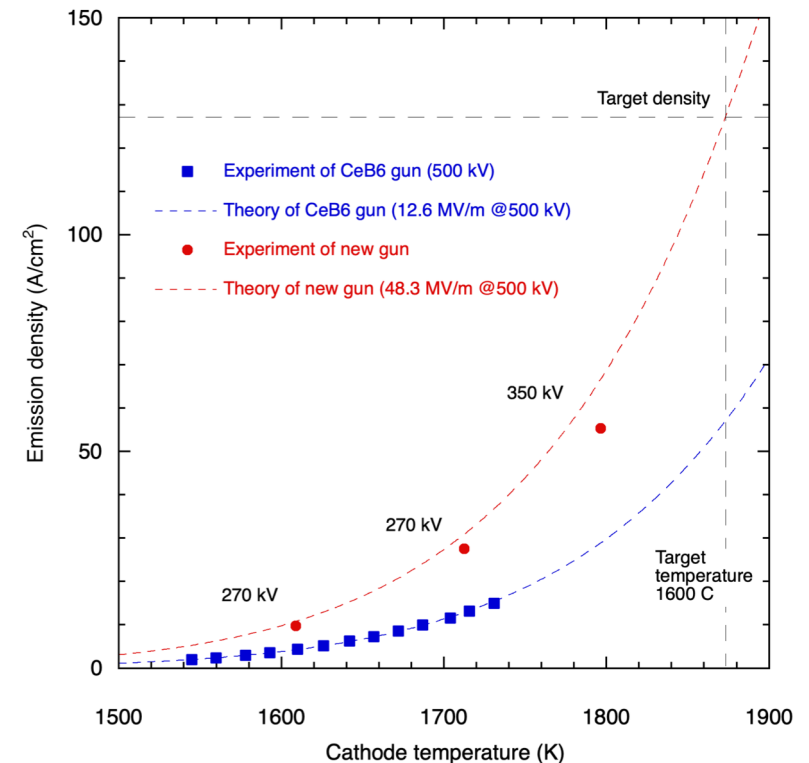


図3：SCSS用電子銃カソードアッセンブリーの断面図

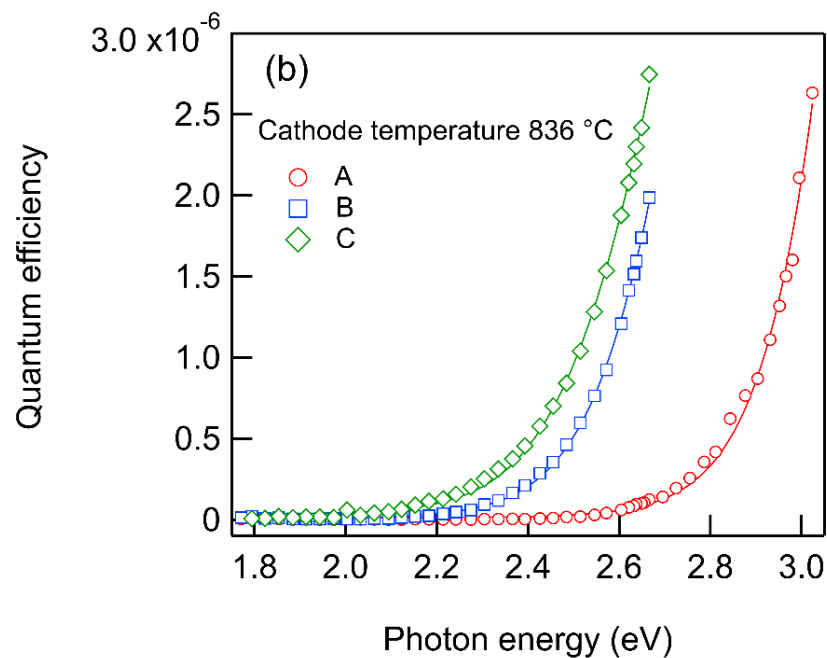
CeB₆電子銃の原案
 K. Togawa et al., 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001)



低仕事関数カソード開発

仕事関数測定装置

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JASRI馬込保氏を中心として開発。
新規カソード開発、カソード劣化の原因調査に活用する。

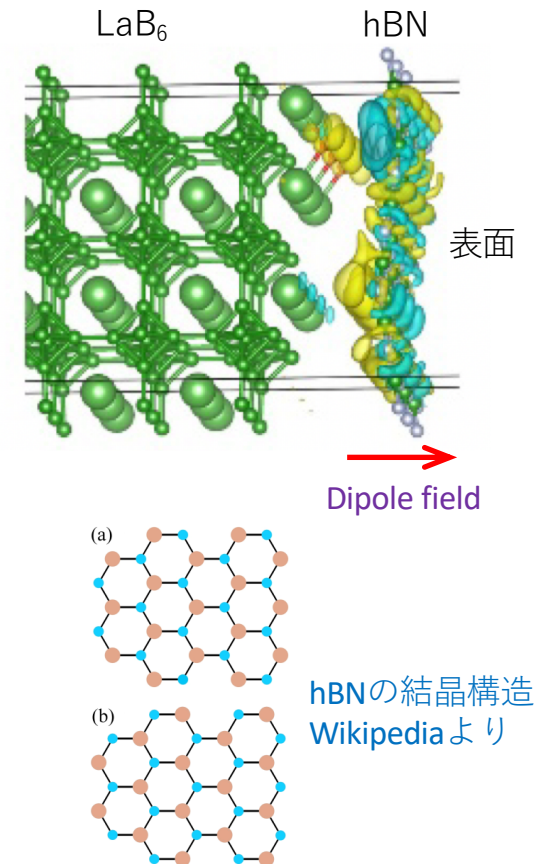


T. Magome *et al.*, *Journal of Applied Physics* **133** (2023) 165107

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) **THP38**

CeB₆系カソードの低仕事関数化

- 1) 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国立研究所のグループにより報告された (H. Yamaguchi et. al. Appl. Phys. Lett. 112 (2023) 141901)。当グループと協力しCeB₆熱電子カソードでも効果があるかを研究中。
- 2) 窒素原子をLaB₆にドーピングすると仕事関数が低下するとの報告が他グループからなされている。CeB₆をベースとした低仕事関数カソードを探索する。
- 3) 励起レーザーで結晶内電子のエネルギーを上げ、相対的に仕事関数を下げる可能性も検討。

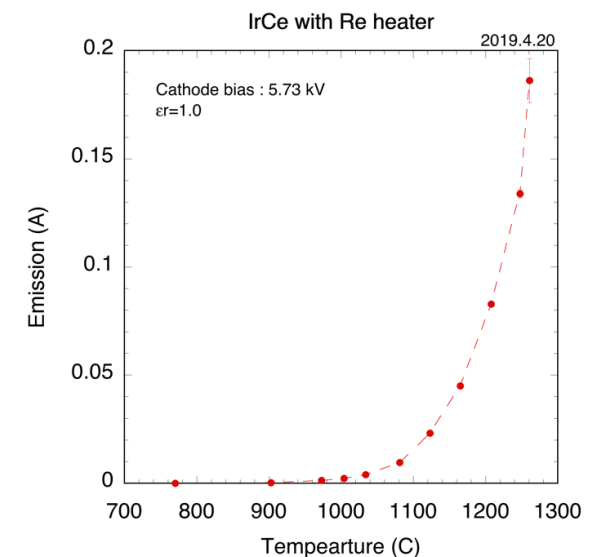
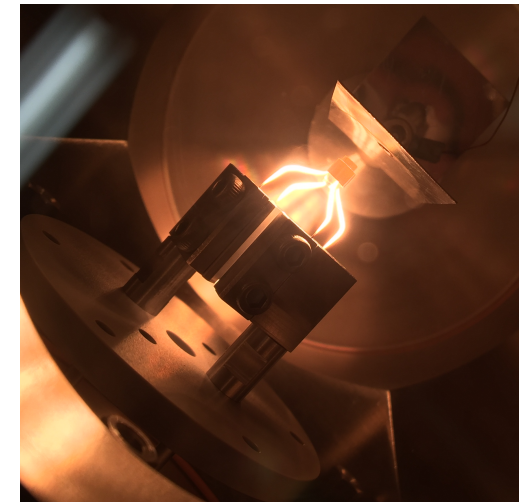


Iridium-cerium (IrCe) カソード

KEKの吉田光宏氏が大電流を必要とする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。

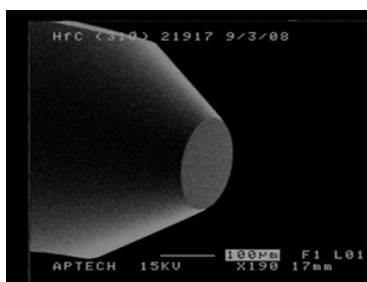
仕事関数が希土類ホウ化物と同程度に小さく ($\phi = 2.57 \text{ eV}$)、熱エミッションの密度も高いとのこと。

カーボンとの相性が悪いのが悩みどころ。高融点金属を使いKEK吉田Lab.にて製作、実験。5.7 kV、0.2 Aの電子ビーム引き出しに成功。より安定なヒーター、カソード保持方法を開発中。

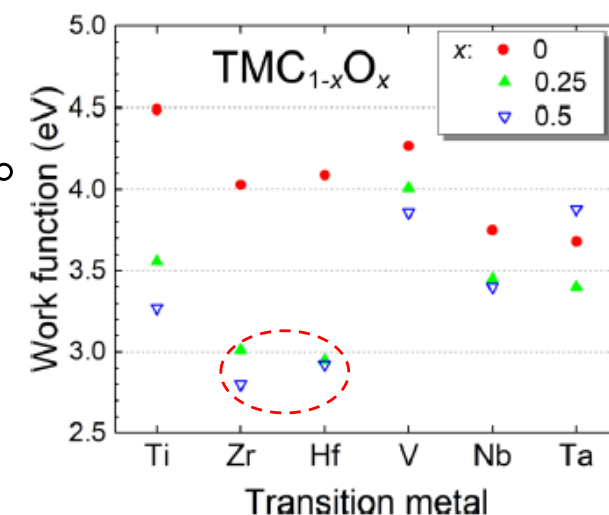


遷移金属炭化物カソード

遷移金属炭化物カソードに注目 (HfC, etc.)。
 融点が非常に高くて超高温の環境には強そうだが、
 仕事関数はそれほど低くない ($\phi \sim 3.5 \text{ eV}$)。
 CeB₆レベルの低仕事関数材もある (酸化物)。
 効率良く加熱できるヒーター開発が鍵となる。



Parameter	Units	HfC	ZrC	NbC	TaC	TiC	VC
Molecular Weight	g/mol	190.51	103.23	104.92	192.96	59.91	
Stoichiometry	N/A	~1	~1	~1	~1	~1	~1
Metal Impurities	ppm by wt.	<30	<30	<30	<30	<30	<30
Lattice Parameter	Angstroms	4.640	4.700	4.468	4.454	4.328	4.160
Melting Temperature	K	~4160	~3300	~3770	~4150	~3430	
Density	g/cm ³	12.20	6.59	7.79	14.50		
Hardness	Kg/mm ²	--	2600	2470	1800	3200	--
Coefficient of Thermal Expansion @ 300-3000 K	$\alpha \times 10^6$	7.3 ± 0.2	7.6 ± 0.2			9.5 ± 0.3	
Thermal Conductivity	cal-cm/(s-cm ² -C)	--	0.049	0.034	0.053	0.049	
Electrical Resistivity	$\mu\Omega$	109	~70	74	170-200	180-250	
Effective Work Function (100) at 1800 K	cm eV	3.58	3.53	4.0	4.2	3.8	
Absolute Work Function (100) at 300 K	eV		3.50			4.12	
Spectral Emissivity (@ 0.65 microns & 2000 K)	N/A	0.645	0.480	0.359	0.365	0.487	0.433
Evaporation rate at 1800 K (UHV)	g/cm ² s	<10 ⁻⁹	<10 ⁻⁹				
Orientation limit for specific orientation	degrees	<2	<2	<2	<2	<2	<2



W. Hayami et al., ACS Omega 6 (2021) p.14559

低エミッタンスビームの XFEL調整

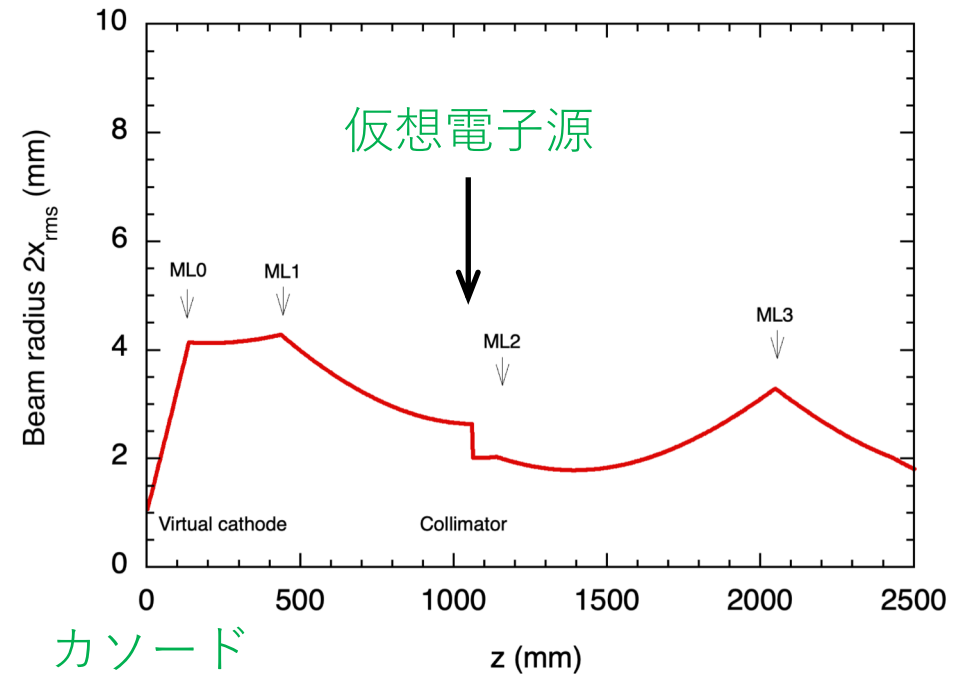
低エミッタンスビームのXFEL調整

エンベロープは低エネルギー部では空間電荷力が支配的で、エミッタンスは殆ど影響なし。電子銃コリメータで条件接続。

高エネルギー加速部ではダンピング効果で低エミッタンス化により自然にビーム径が縮小。

電子密度の変化によるビーム航跡場やコヒーレント放射の影響の変化に注意すべし。

SACLA入射部のビームエンベロープ



最後に

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。
- 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。
- 今回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。