

Toward ultimate electron source

究極の電子源を目指して

渡川和晃／理化学研究所

2023年10月16日

大阪大学セミナー

e-mail: togawa@spring8.or.jp

Content

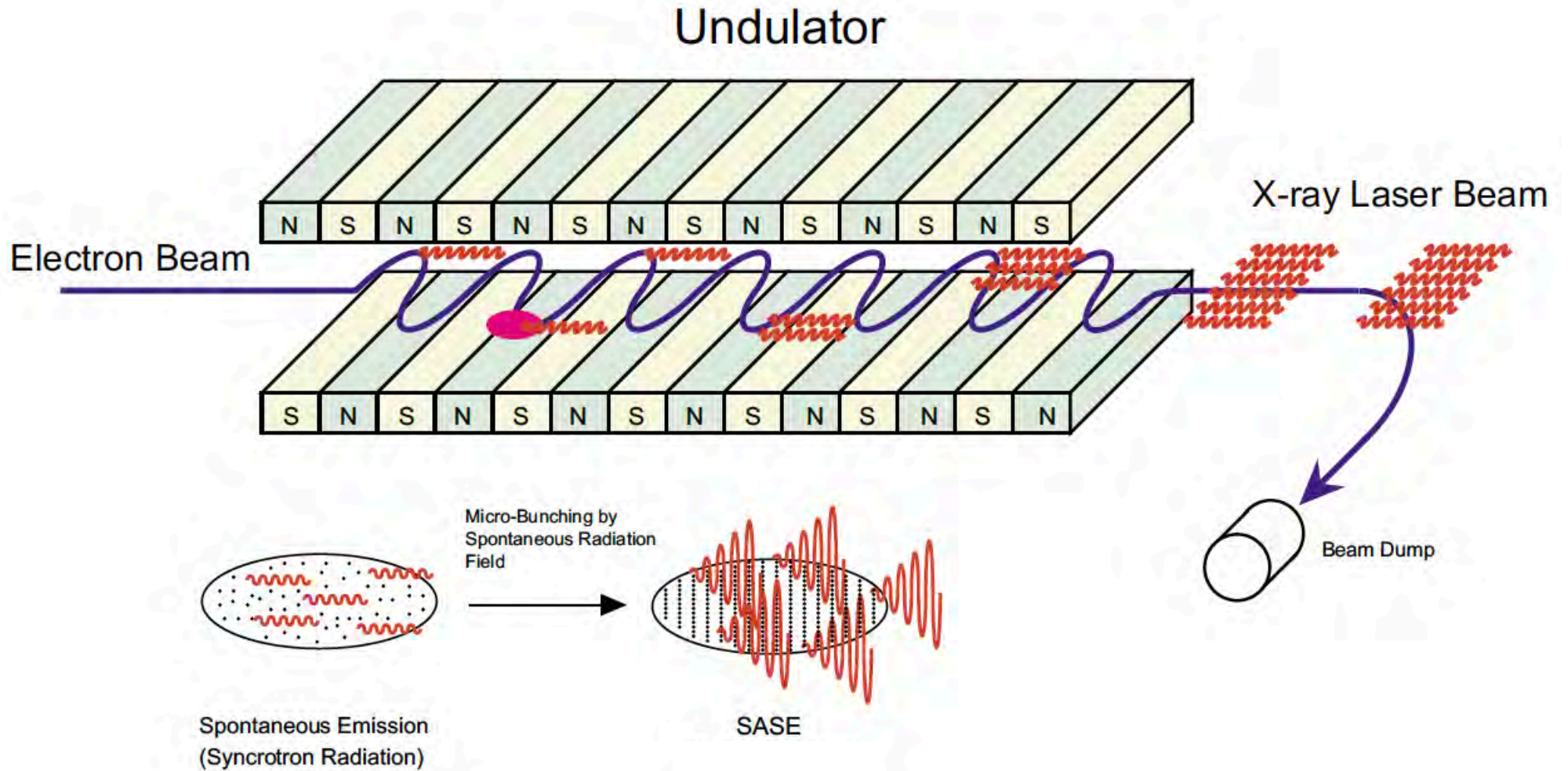
- X線自由電子レーザー SACLA
- SACLA電子銃とこれからの方向性
- 究極の電子ビームを生成する
- 究極の電子ビームを加工する
- 究極の電子ビームを供給する
- まとめ

X線自由電子レーザーSACLA

X線自由電子レーザー施設 SACLA



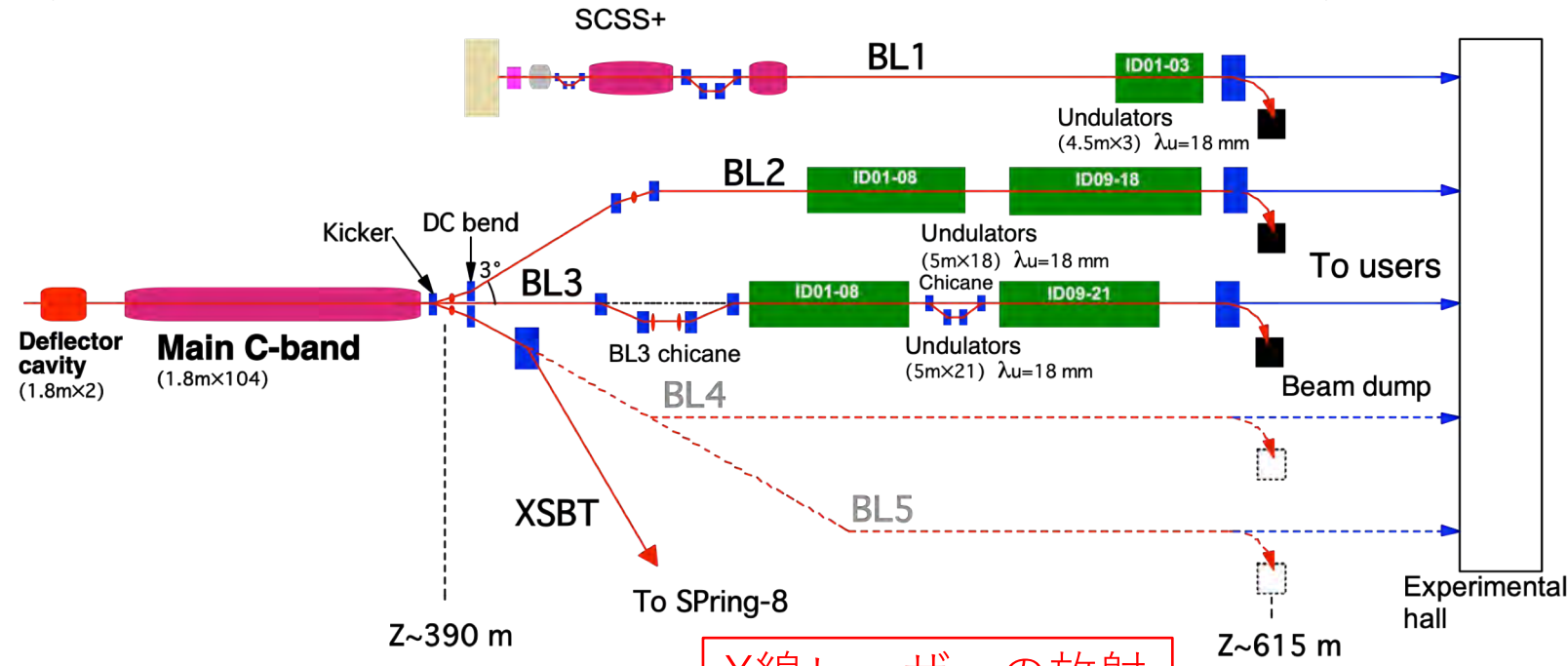
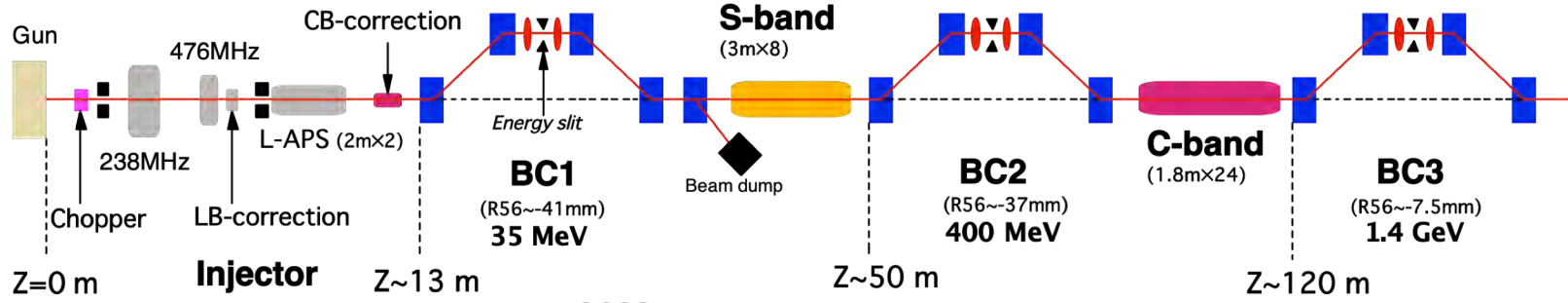
Self-Amplified Spontaneous Emission



X線自由電子レーザー施設 SACLA

電子ビーム源

電子ビームの加速と圧縮



X線レーザーの放射

X線自由電子レーザー施設 SACLA

Electron injector



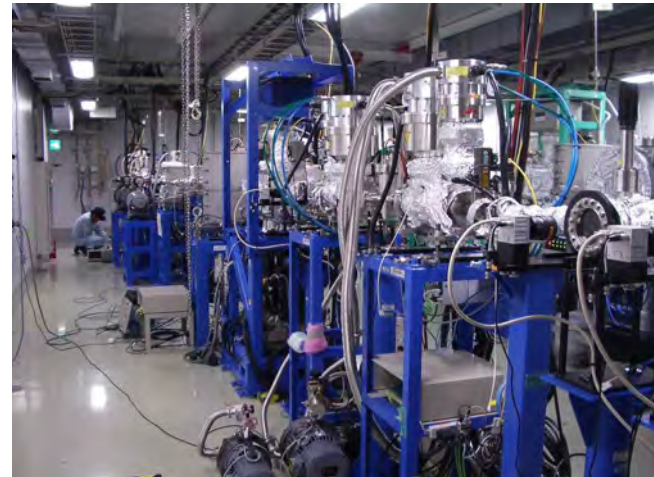
C-band accelerator



In-vacuum undulator



Photon beamline

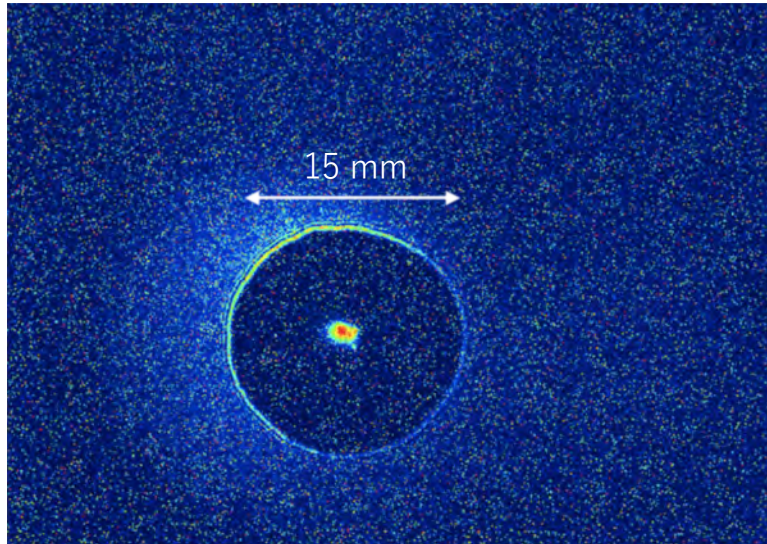


SACLA specifications

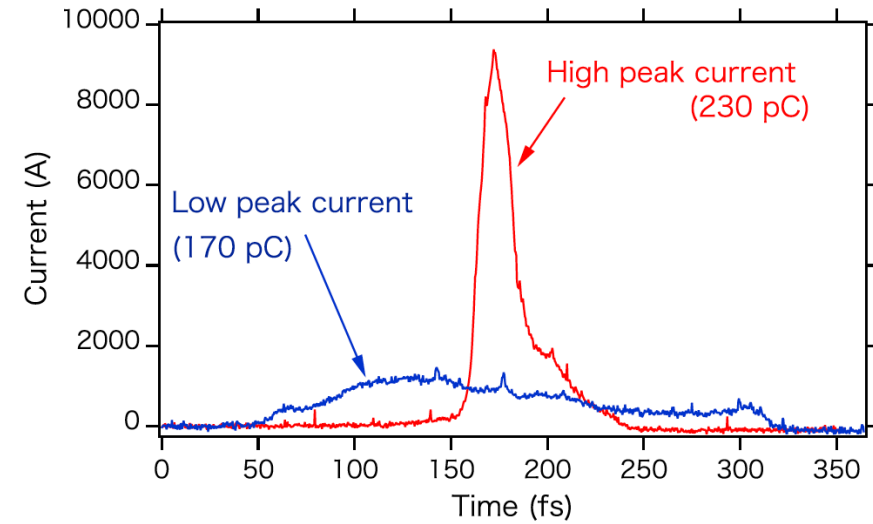
	BL3 / BL2	BL1
Electron beam energy	8.5 GeV (max.)	800 MeV (max.)
Bunch charge	0.2 – 0.3 nC	0.2 – 0.3 nC
Peak current	>10 kA	>300 A
Pulse repetition rate	60 Hz (max.)	60 Hz (max.)
Photon energy	4 – 15 keV (0.08 – 0.3 nm)	20 – 150 eV (8 – 60 nm)
FEL pulse energy	~0.5 mJ @10 keV	~100 μ J @100 eV
Pulse width	<10 fs	<1 ps
Spectrum band width	0.5 %	3 %

SACLA's electron beam

Spatial profile

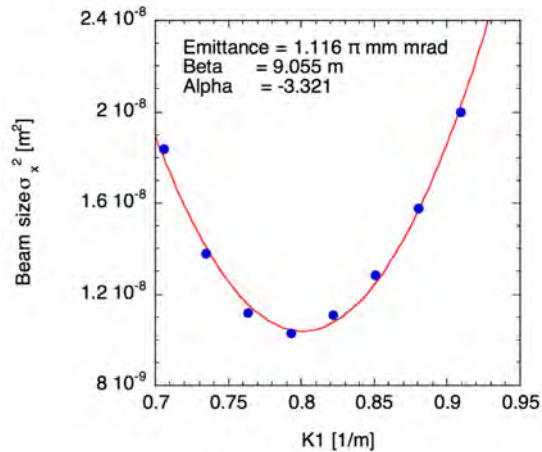


Longitudinal profile

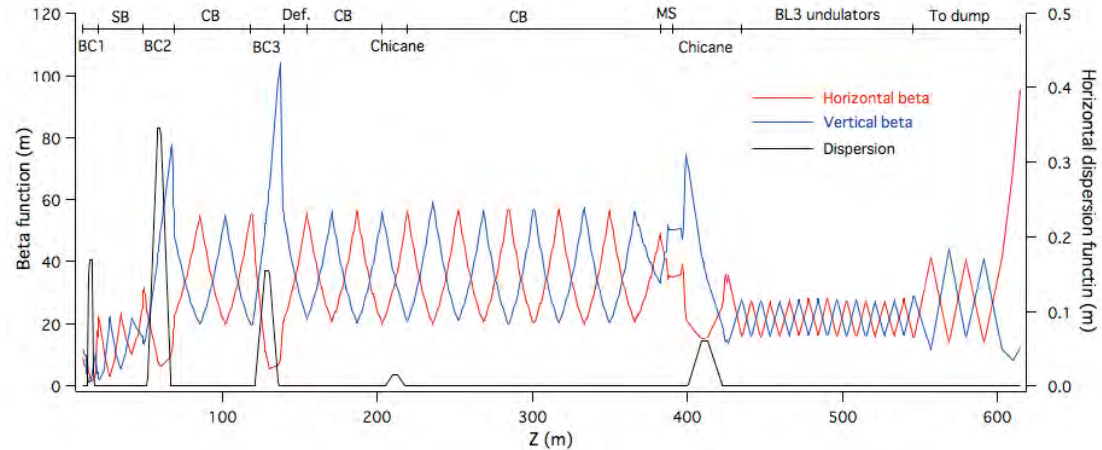


T. Hara et al., Phys. Rev. Accel. Beams 19 (2016) 020703
 K. Togawa et al., Phys. Rev. Accel. Beams 12 (2009) 080706

Emittance

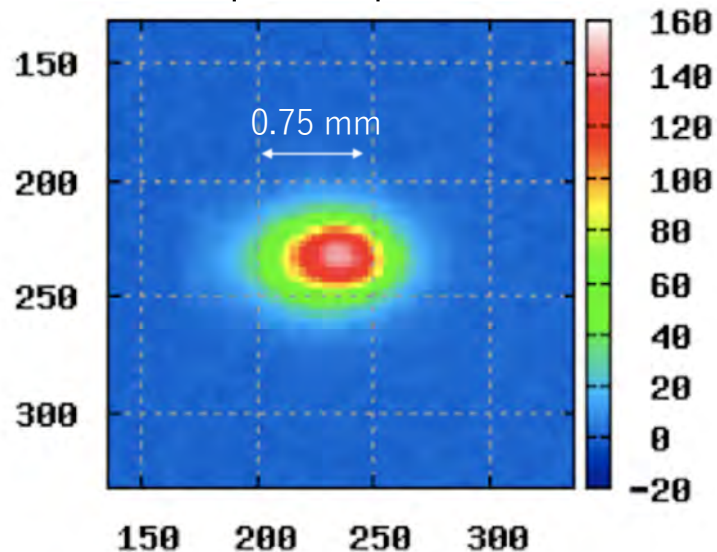


Beam envelope

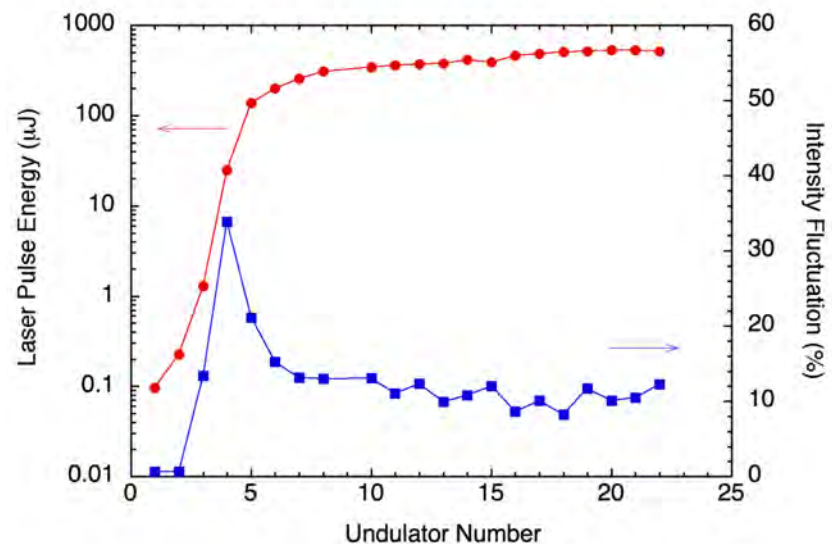


SACLA's photon beam (XFEL)

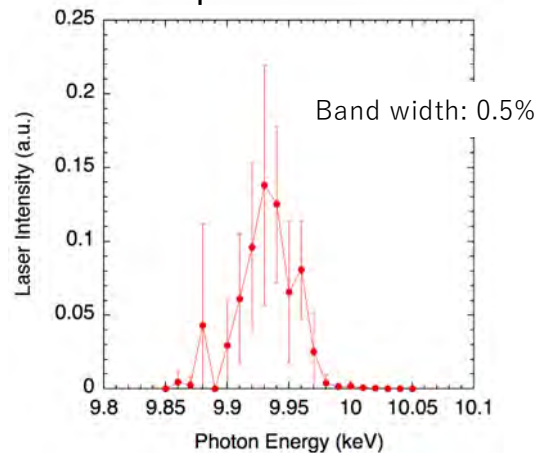
Spatial profile



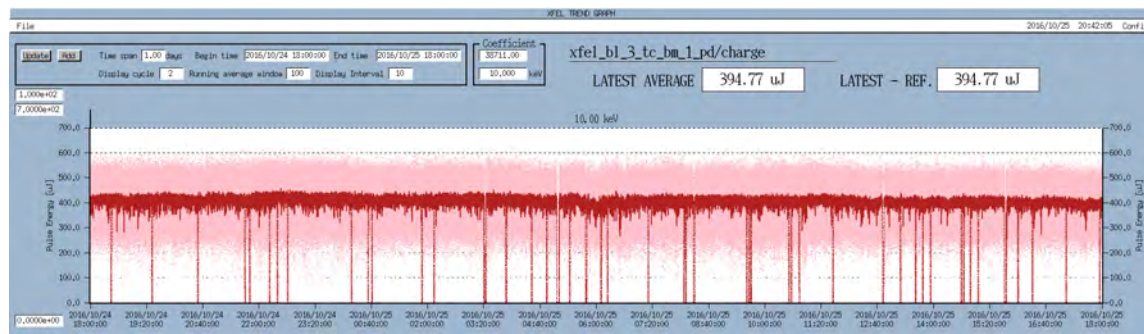
FEL Gain curve



Spectrum



Output trend



SACLA電子源とこれからの方向性

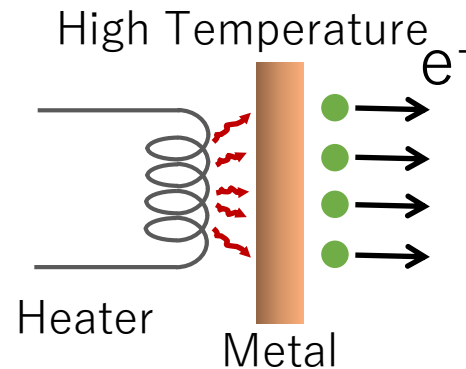
電子源

固体からビーム状の電子を真空中に引き出す。
この装置が電子銃で、電子の源となる固体がカソード。

1) 熱電子

ヒーターでカソードを加熱し、熱運動で電子を放出する。

O. W. Richardson, 1928 Nobel Prize



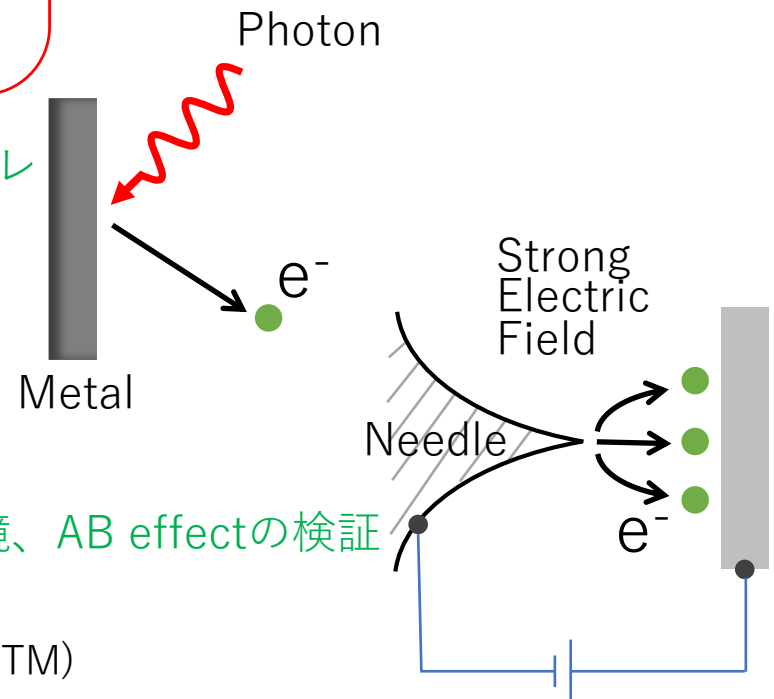
最もtraditionalな方式
安定な電子ビームを生成
SACLAが採用

2) 光電子

カソードに光を照射し、光電効果で電子を叩き出す。

A. Einstein, 1921 Nobel Prize

SACLA以外のXFEL施設は全てコレ
フォトマル、スピン偏極電子源



3) 電界放出電子

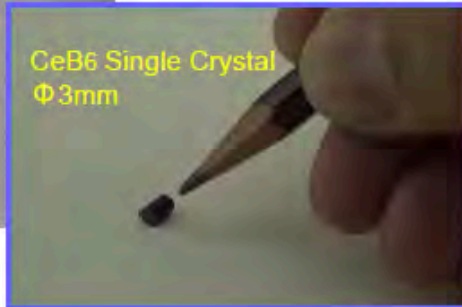
カソードに非常に高い電場を印加し、電子を引っ張り出す。

G. Binning, H. Rohrer, 1986 Nobel Prize (STM)

超高性能電子顕微鏡、AB effectの検証
STM、CNT

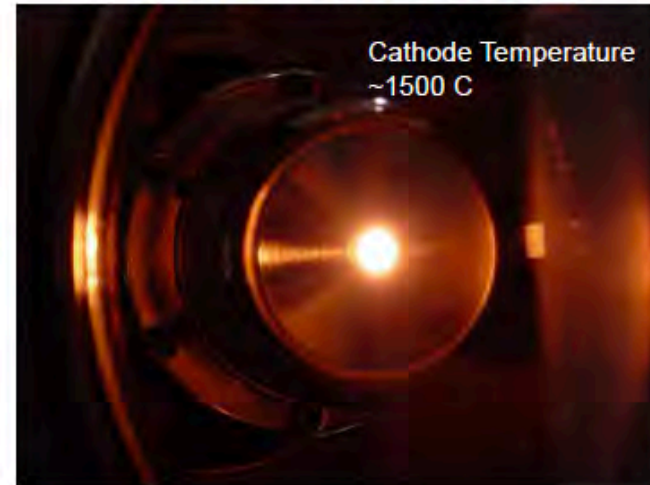
CeB₆ (六ホウ化セリウム) 熱カソード

Cathode Assembly

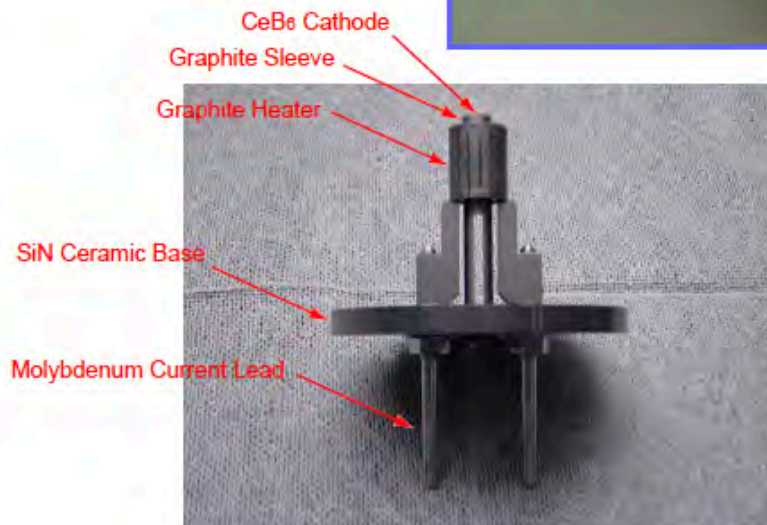


CeB₆ Single Crystal
Φ3mm

Heated Cathode in Stem



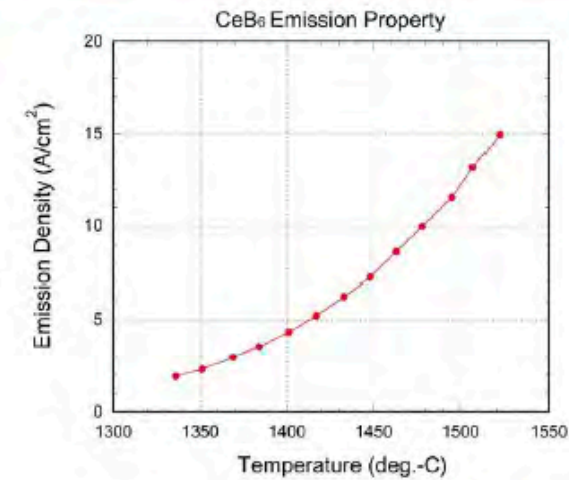
Cathode Temperature
~1500 C



CeB₆ Cathode
Graphite Sleeve
Graphite Heater

SiN Ceramic Base

Molybdenum Current Lead



CeB₆ Emission Property

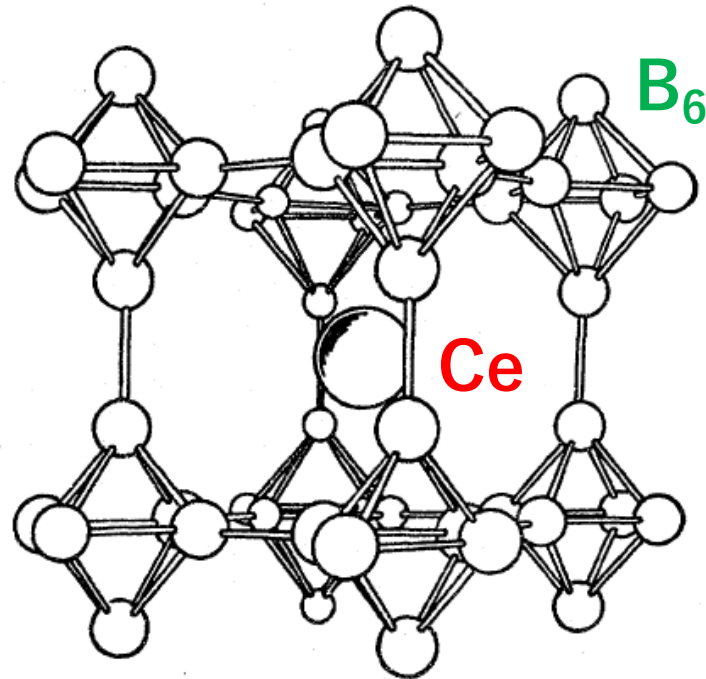
Emission Density (A/cm²)

Temperature (deg.-C)

2003年度完成

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

CeB₆ (六ホウ化セリウム) 熱カソード



Bが正八面体構造の共有結合
CeがBの格子内部に収納
Ceの外殻電子がBに移動し伝導電子に
“covalent metal”

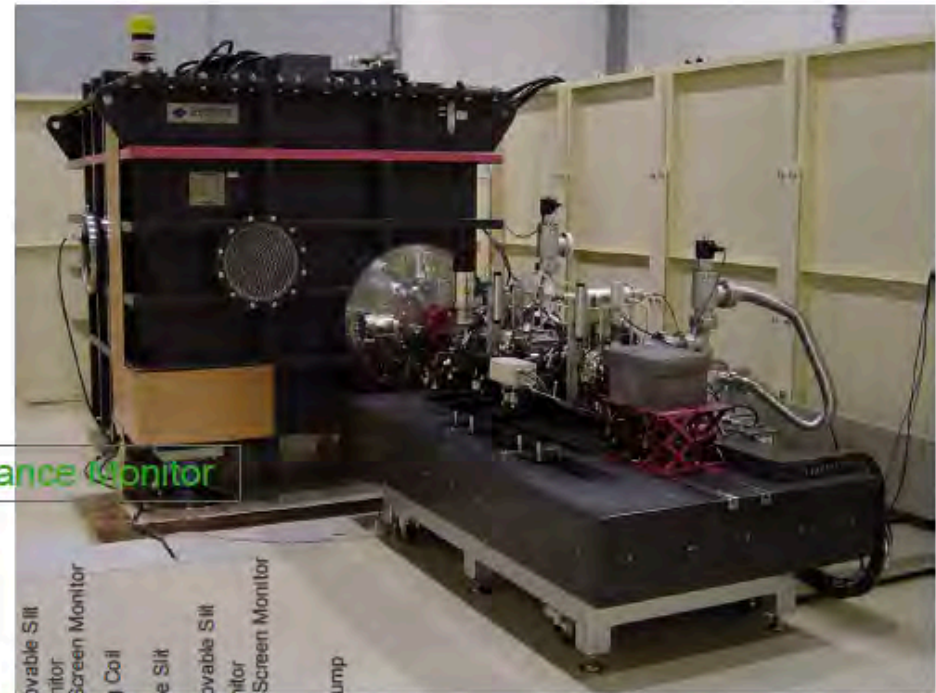
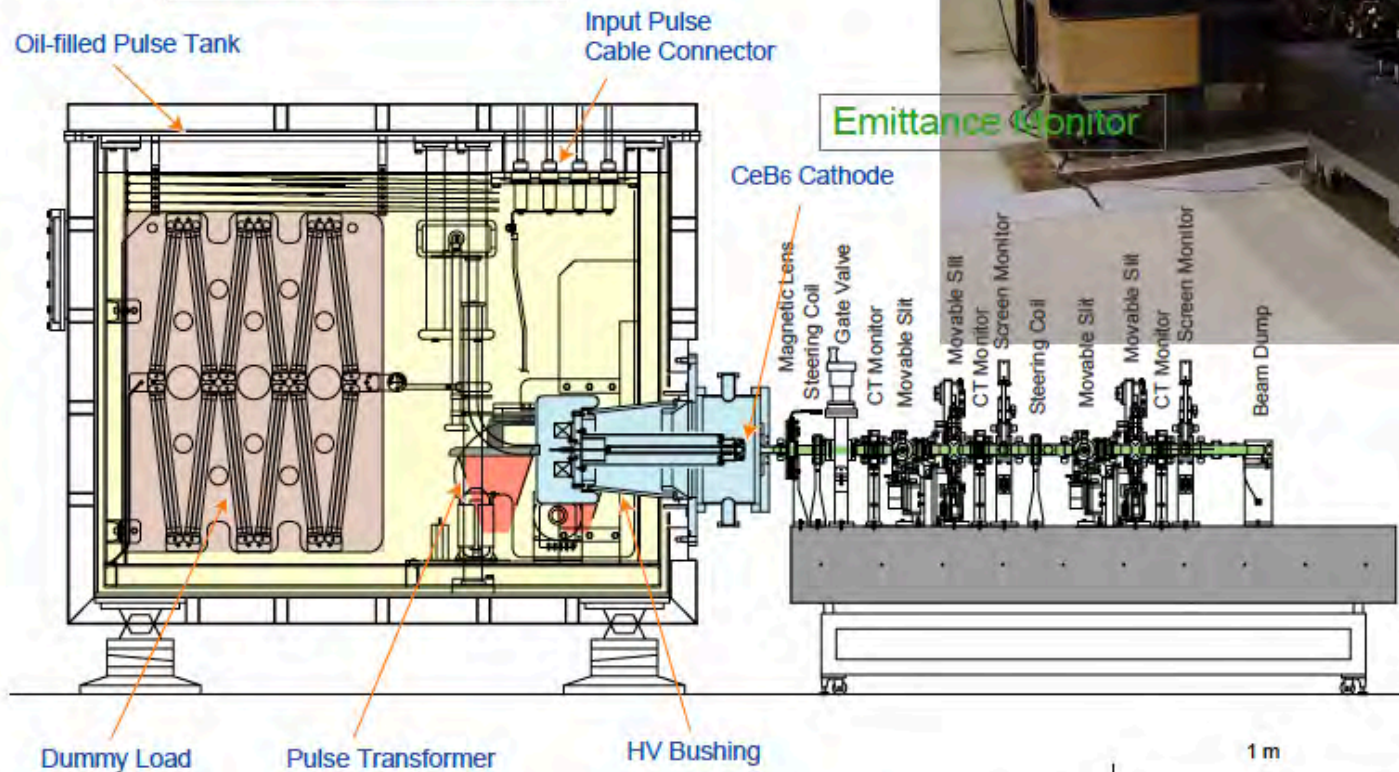
FIG. 2. Crystal structure of MB_6 (M is a metal ion) with the three-dimensional framework of interlocked B_6 octahedra shown in perspective surrounding the metal ion. Crystal structure is the CsCl type (O_h^1) with seven atoms per unit cell. The lattice constant is 7.853 a.u. for LaB_6 and 7.752 a.u. for YB_6 . (Reprinted from Ref. 1 with permission.)

¹*The Chemistry of Boron and Its Compounds*, edited by E. L. Muetterties (Wiley, New York, 1967).

500kV電子銃システム (初号機)

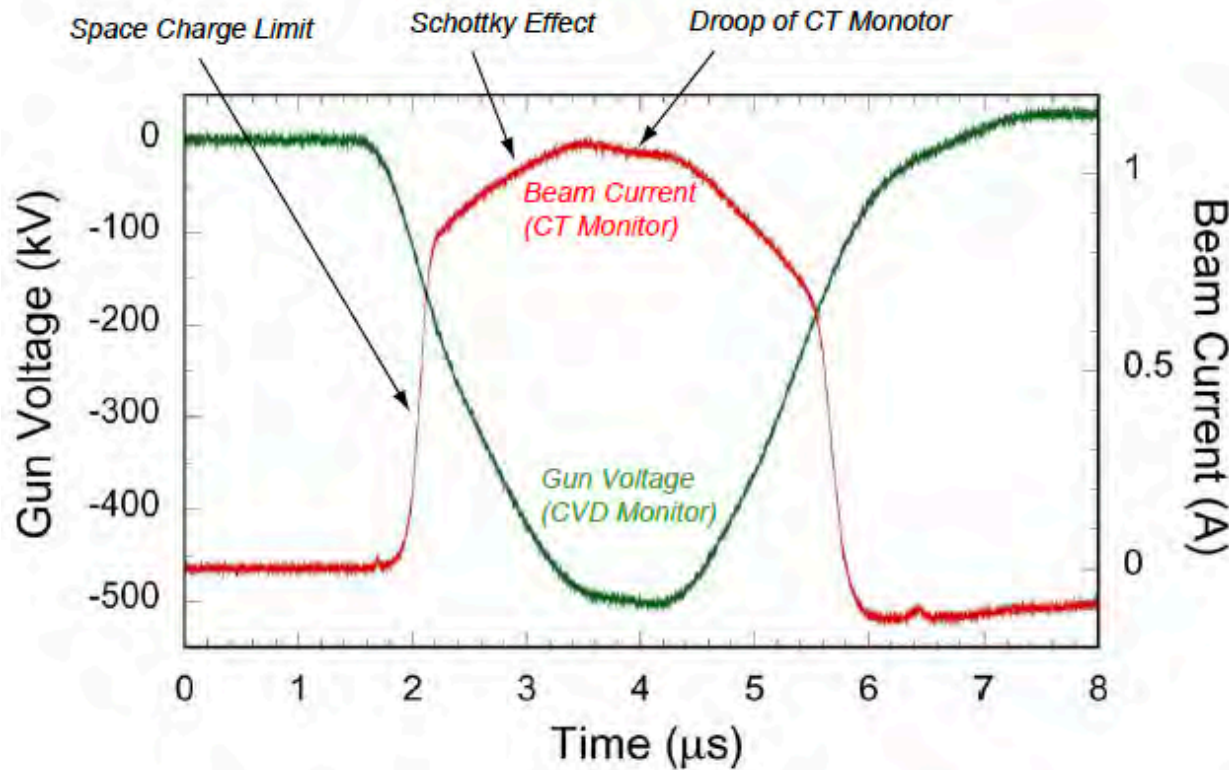
C-band klystron modulator is used as a HV pulsed power supply.

500 kV Electron Gun



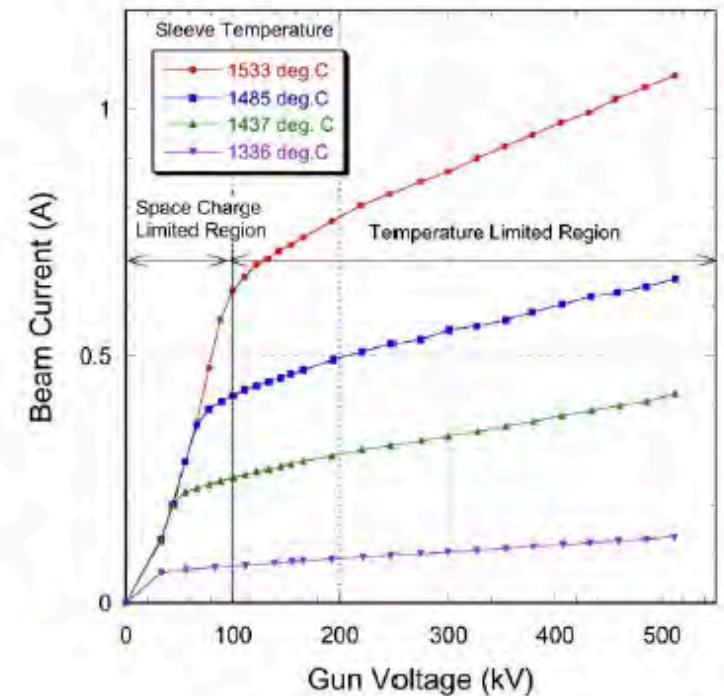
500keV beam production

Beam Waveform



~1 ns part will cut out from the flat top by a beam deflector, and be used for the SCSS accelerator.

I-V Curve

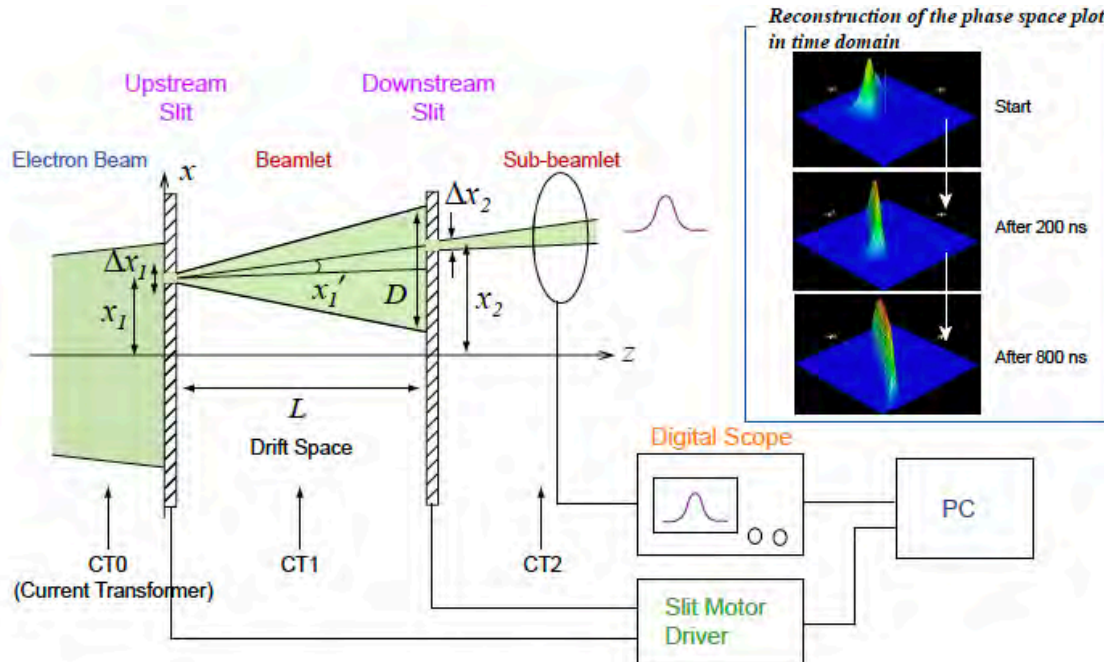


We operate the gun in temperature limited region to reduce emittance growth due to space charge.

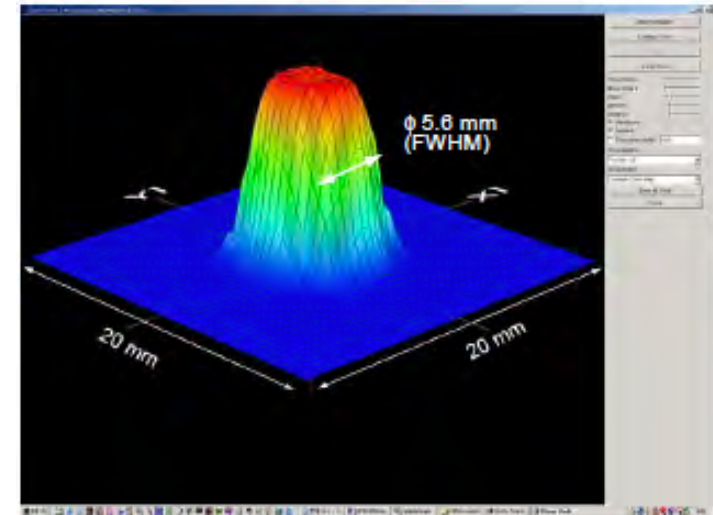
Beam emittance measurement

エミッタンス=サイズ×角度広がり (保存量)

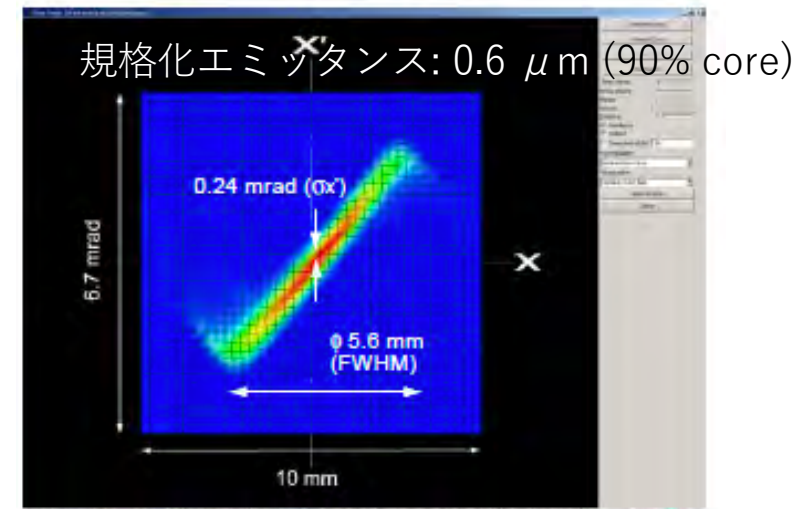
$$\begin{aligned} \epsilon_{n,rms} &= \frac{1}{m_0 c} \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle p_x^2 \rangle - \langle x \cdot p_x \rangle^2} \\ &= \beta \gamma \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle x \cdot x' \rangle^2} \end{aligned}$$



Beam Profile



Phase Space Profile



CeB₆電子銃の実用化



SCSS試験加速器(2005)
SCSS+へupgrade (2014)



SACLA (2010)



SACLA電子銃交換システム (2022) →

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。

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

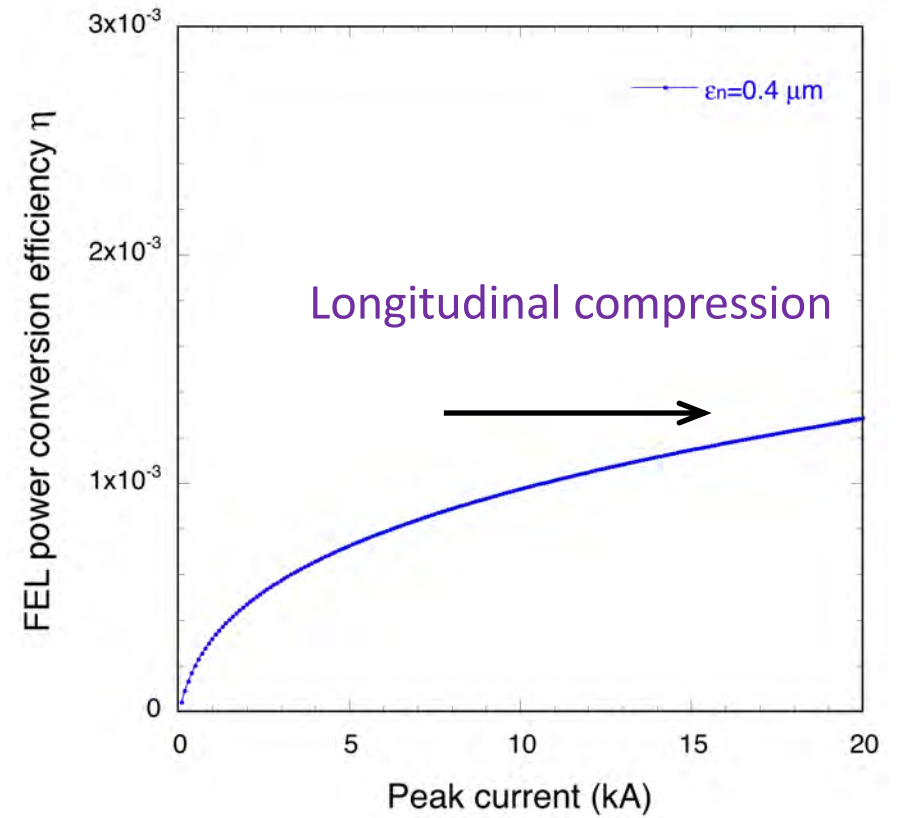
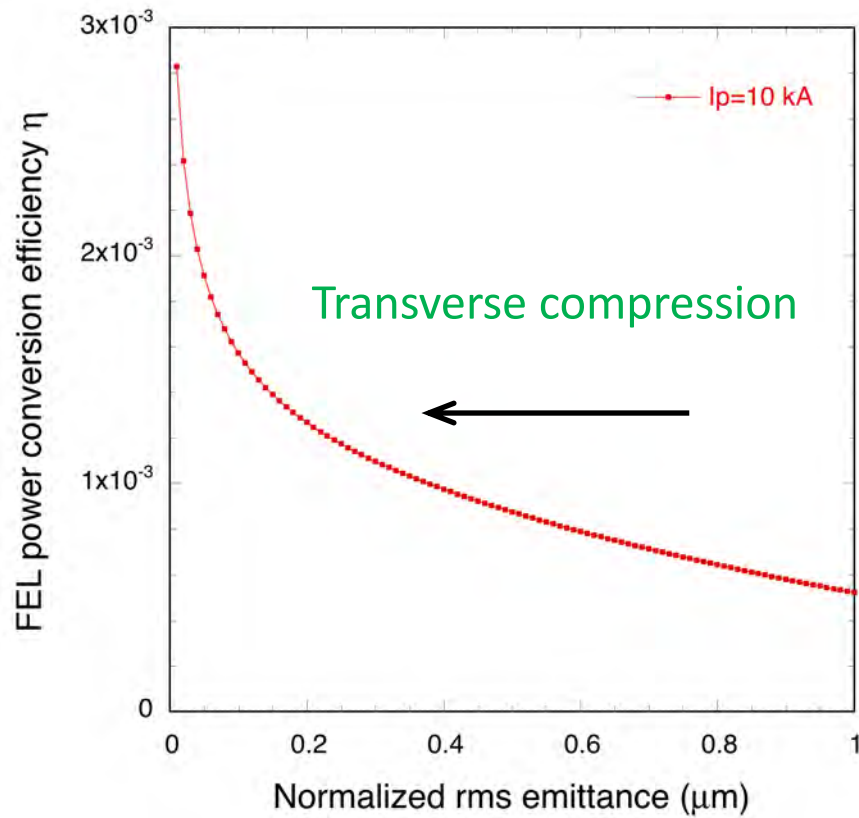
$$\gamma_0 = 15657 \text{ (8 GeV, 電子エネルギー)}$$

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

$$\beta = 22 \text{ m (ベータ関数)}$$

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

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 $\epsilon_n \sim 0.1 \mu\text{m}$ 。
ビーム電流を保ちつつ、エミッタンスを小さくする。

究極の電子ビームを生成する

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。

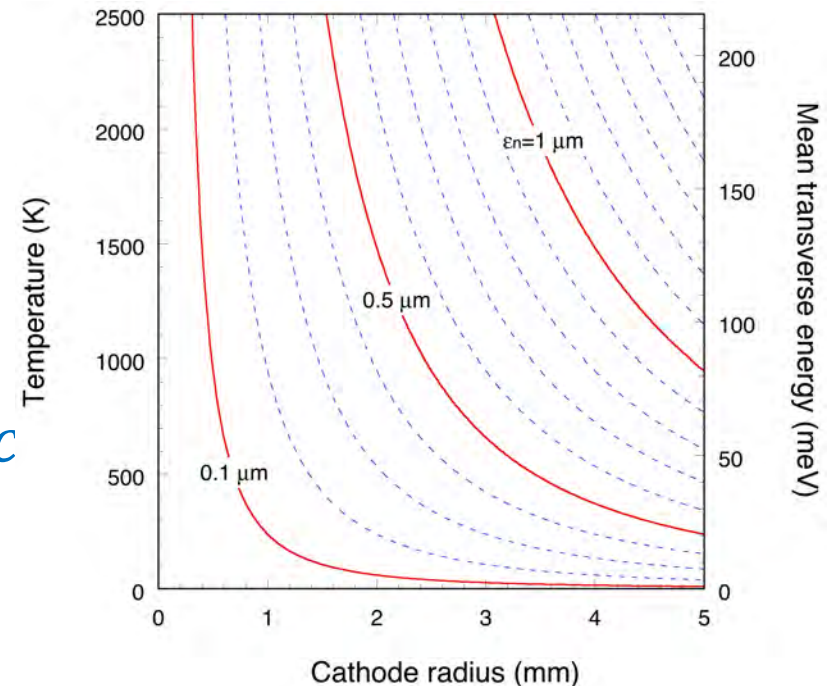
熱電子源のエミッタンス

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

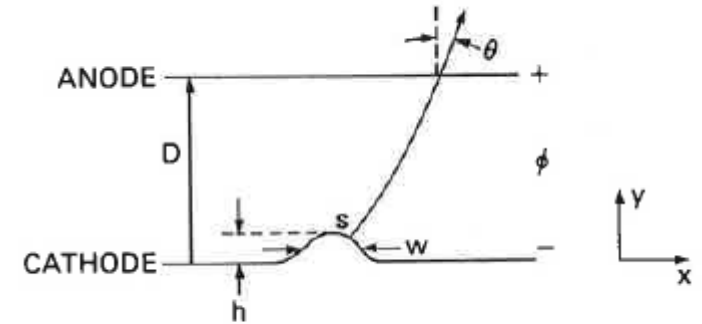
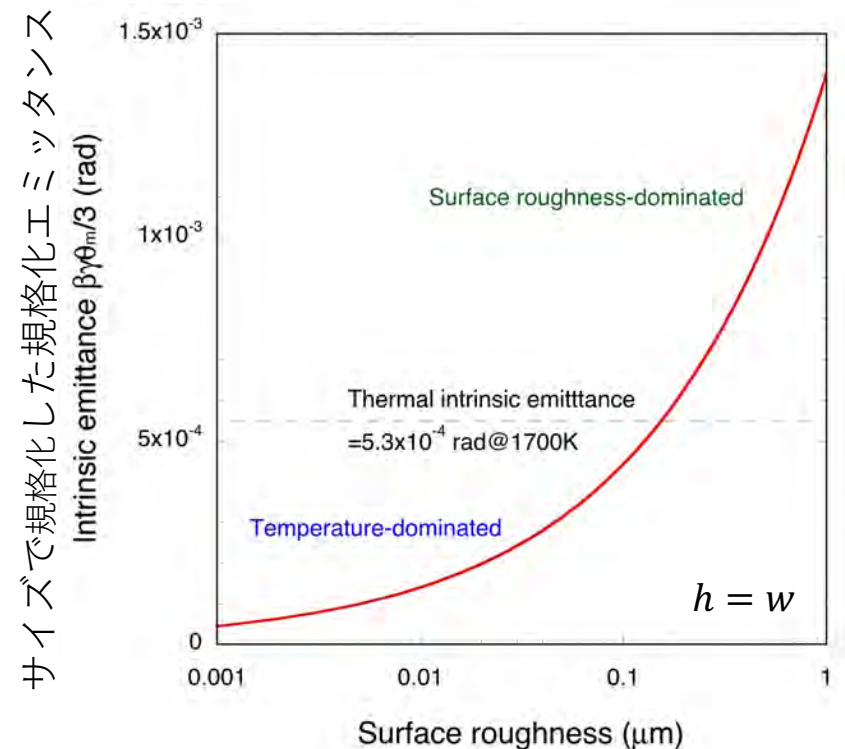


FIG. 1. Schematic drawing of a rough cathode surface.



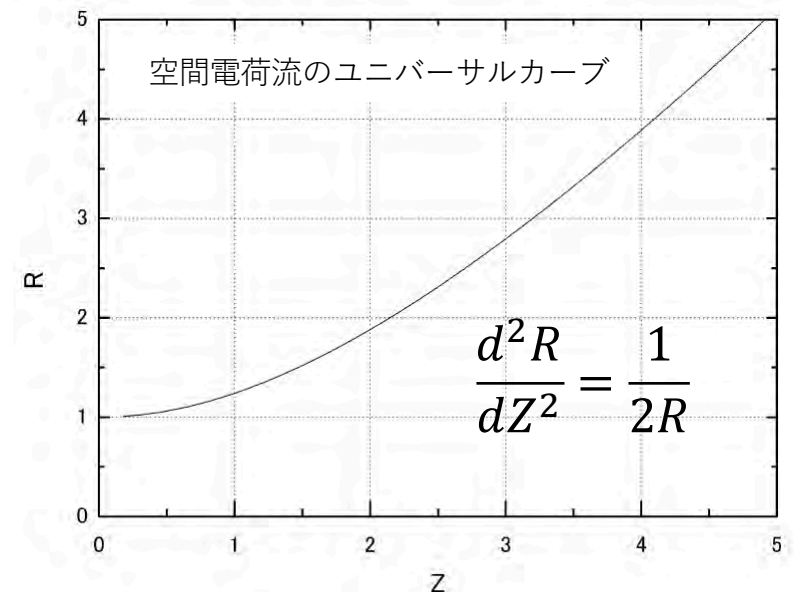
温度以外の要素 (space charge)

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。

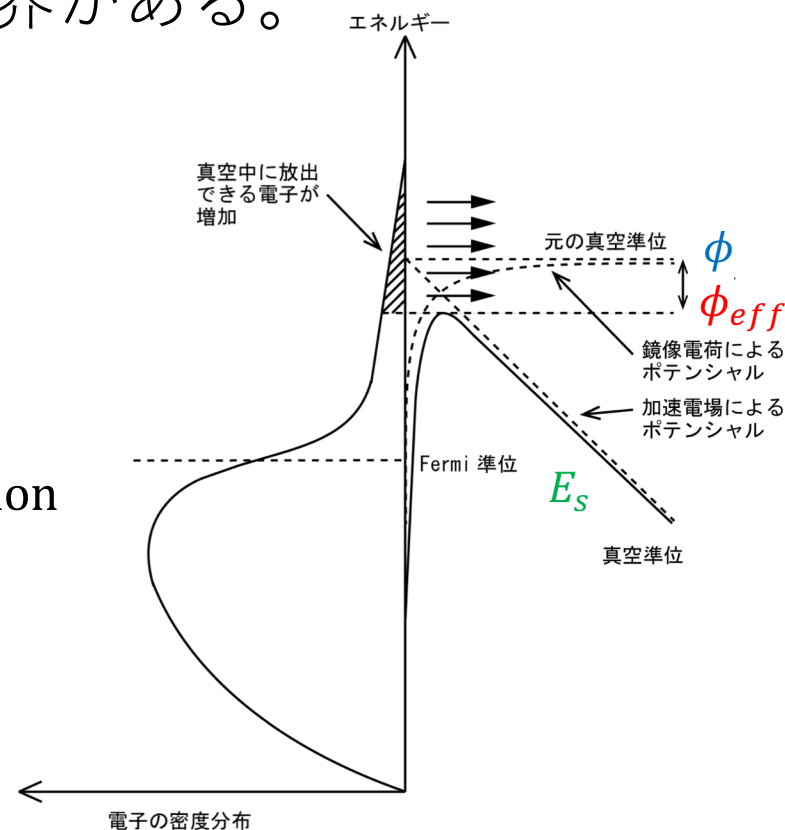
Richardson方程式 (+Shottky効果)

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

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

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。

究極の電子ビームを生成する
(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

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

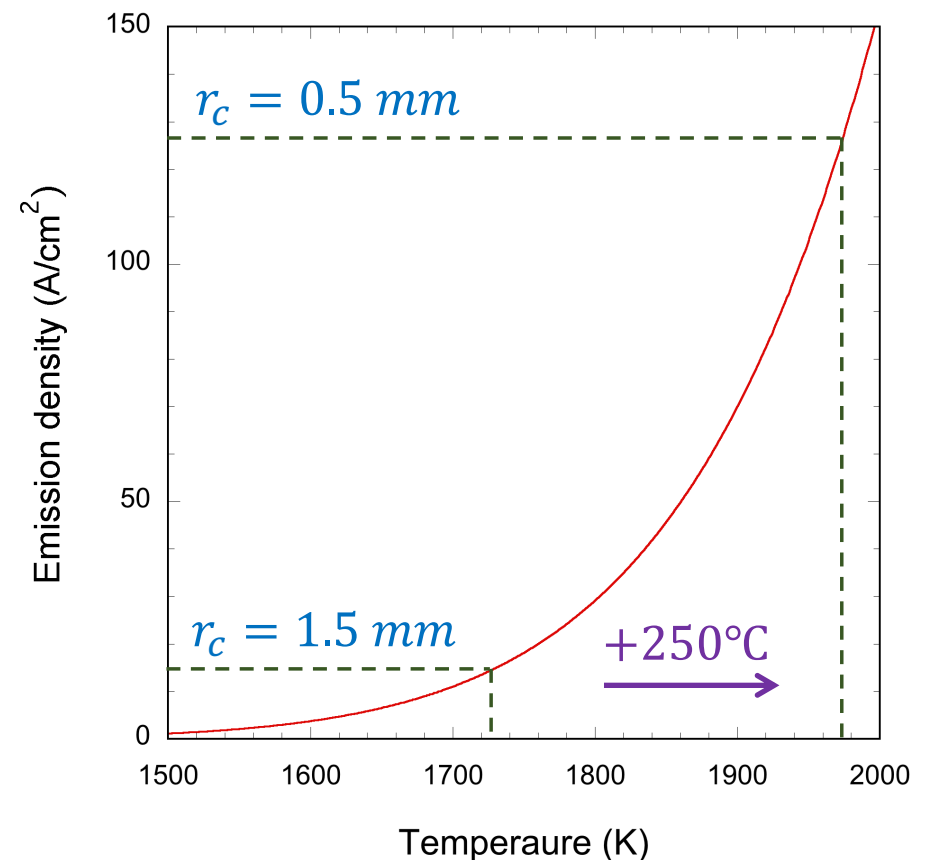
$$\phi = 2.39 \text{ eV}$$

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

目標のカソード温度は

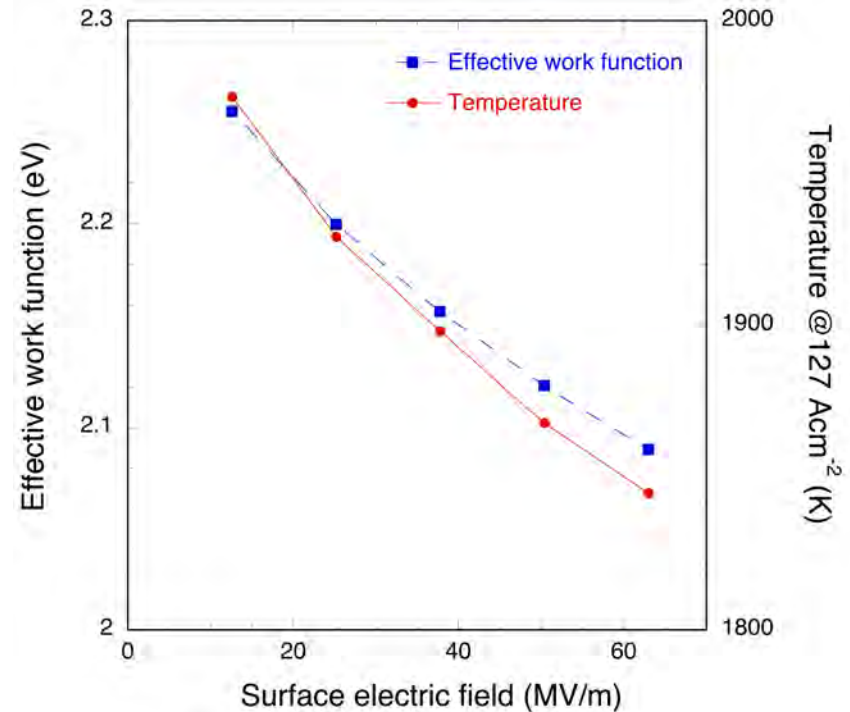
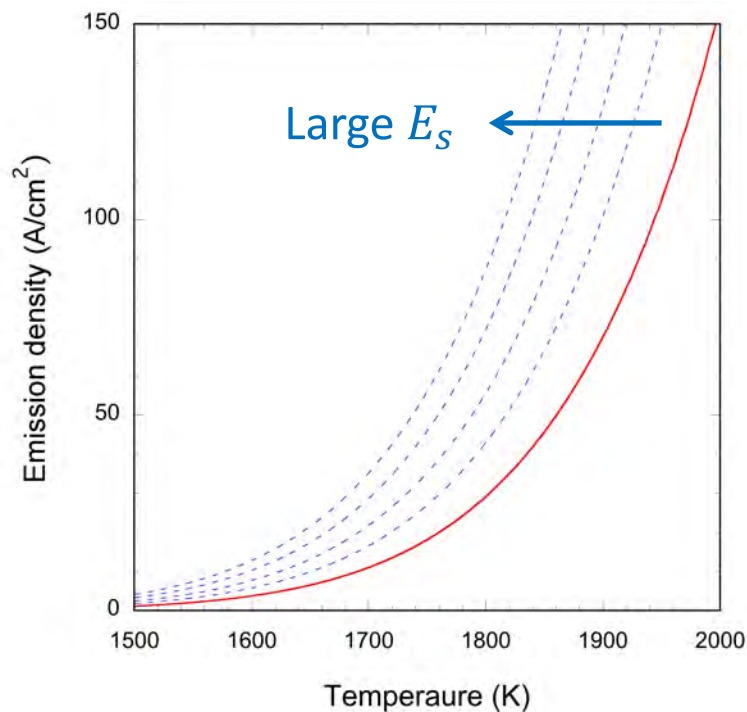
$$T = 1975 \text{ K}$$

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

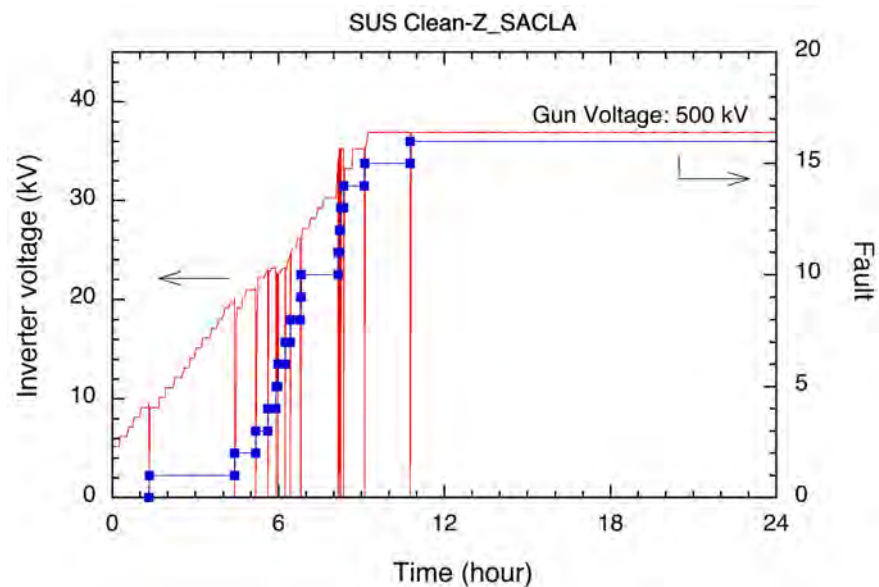
M. Yamamoto et al., Appl. Phys. Lett. 109 (2016) 014103

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

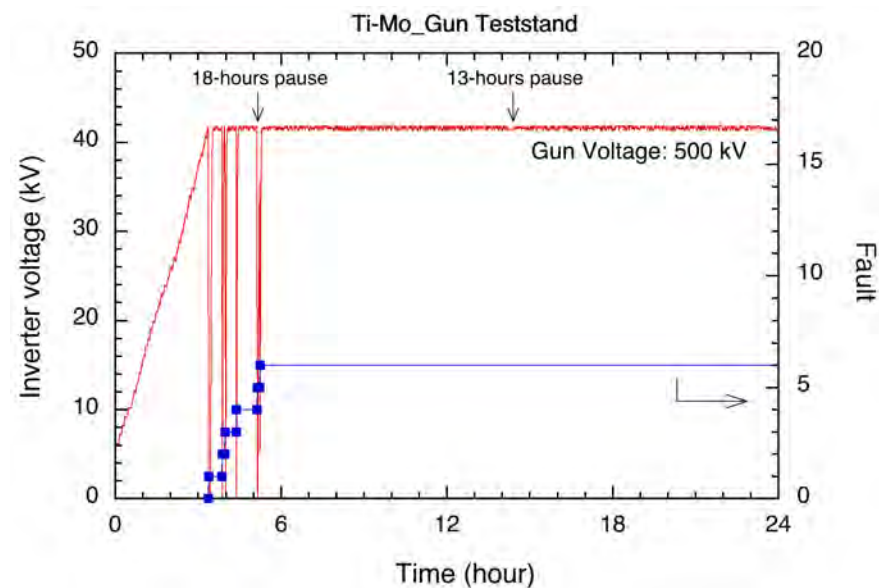
高電界加速電極



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。

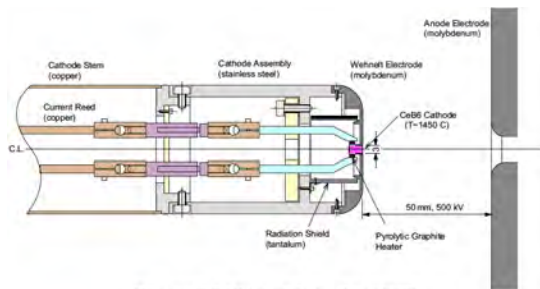
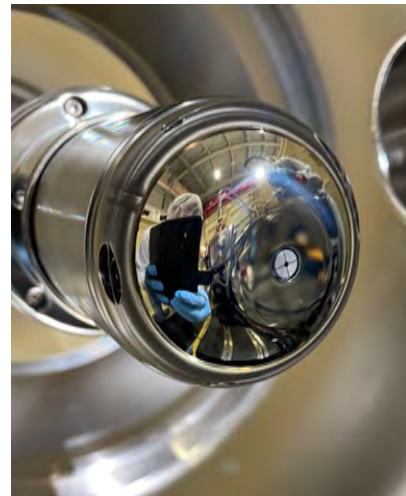
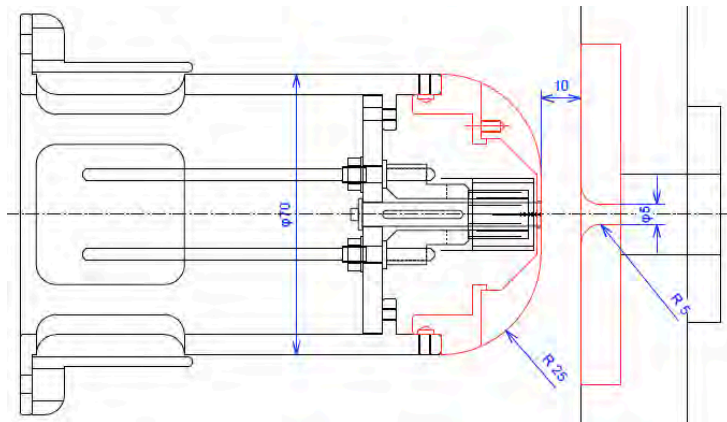
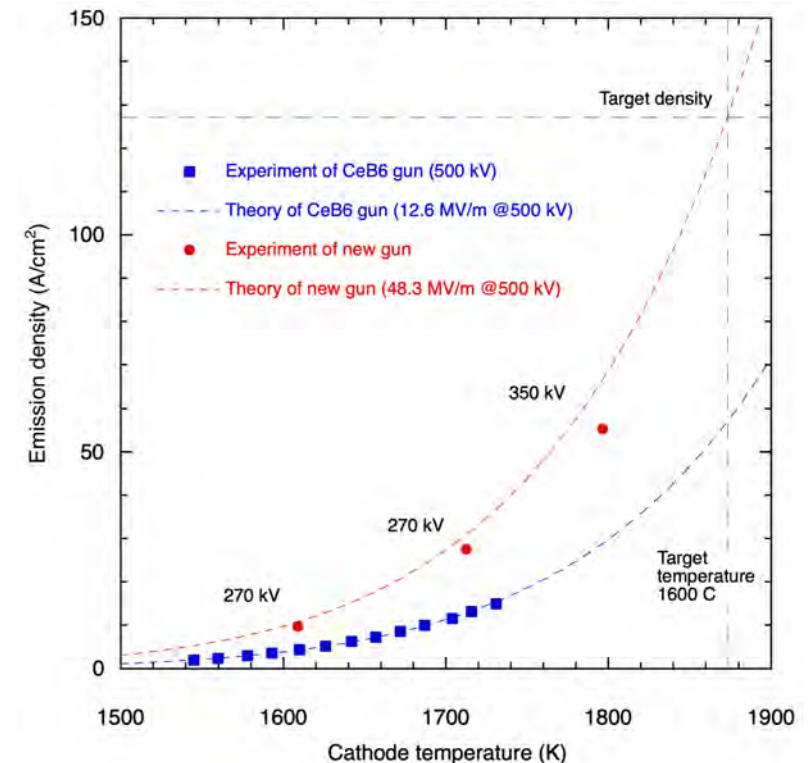


図3 : SCSS用電子銃カソードアセンブリの断面図

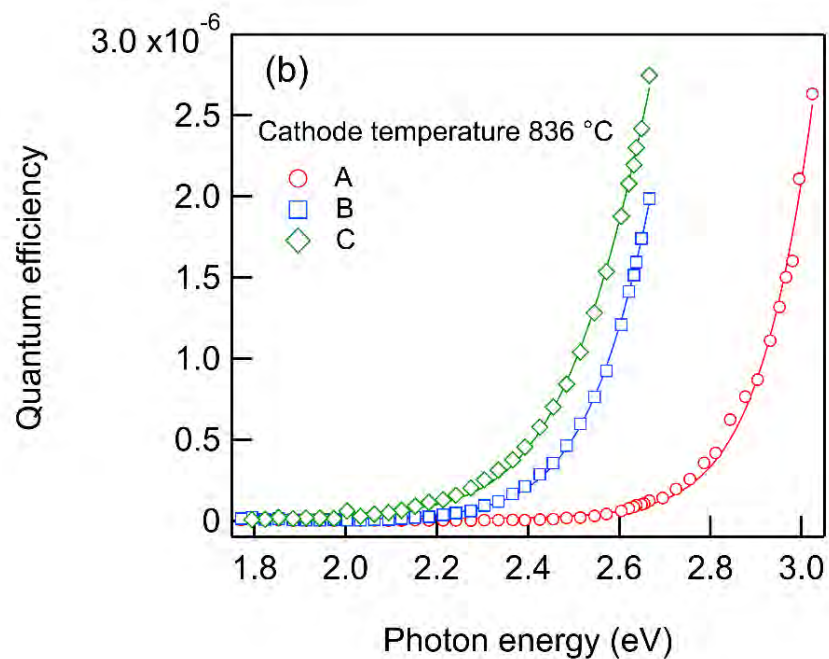
CeB₆電子銃の原案
 K. Togawa et al., 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001)



究極の電子ビームを生成する
(低仕事関数カソード開発)

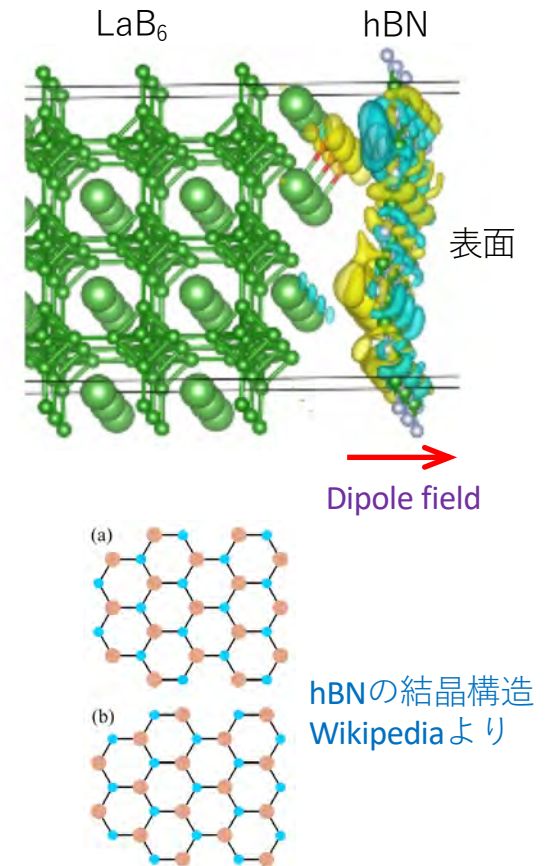
仕事関数測定装置

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。



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。

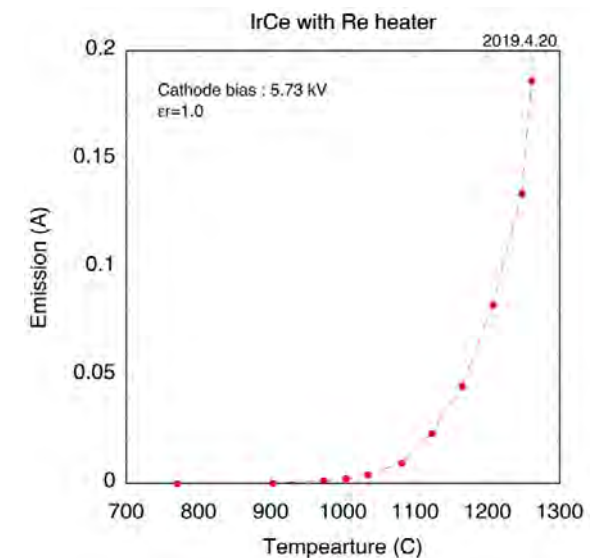
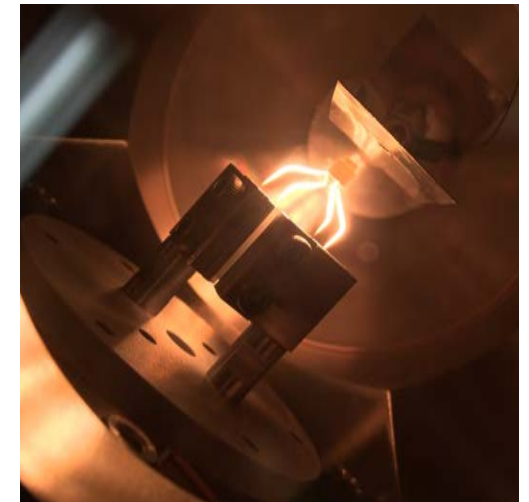


Iridium-cerium (IrCe) カソード

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。

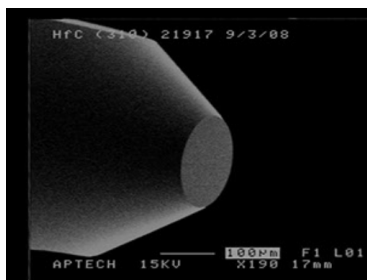
仕事関数が希土類ホウ化物と同程度に小さく ($\phi = 2.57 \text{ eV}$)、熱エミッションの密度も高いとのこと。

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。

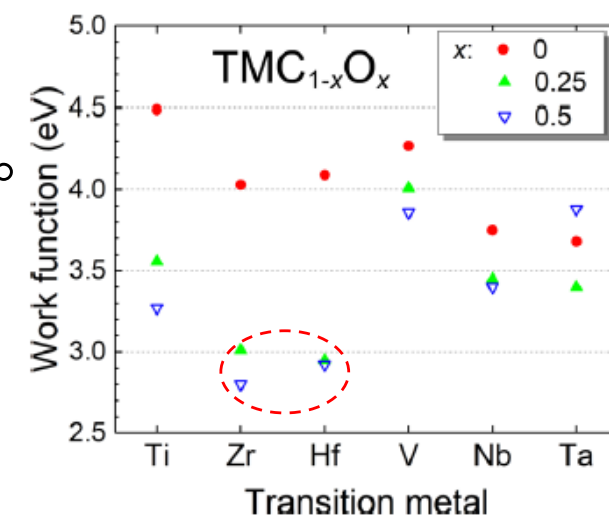


遷移金属炭化物カソード

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

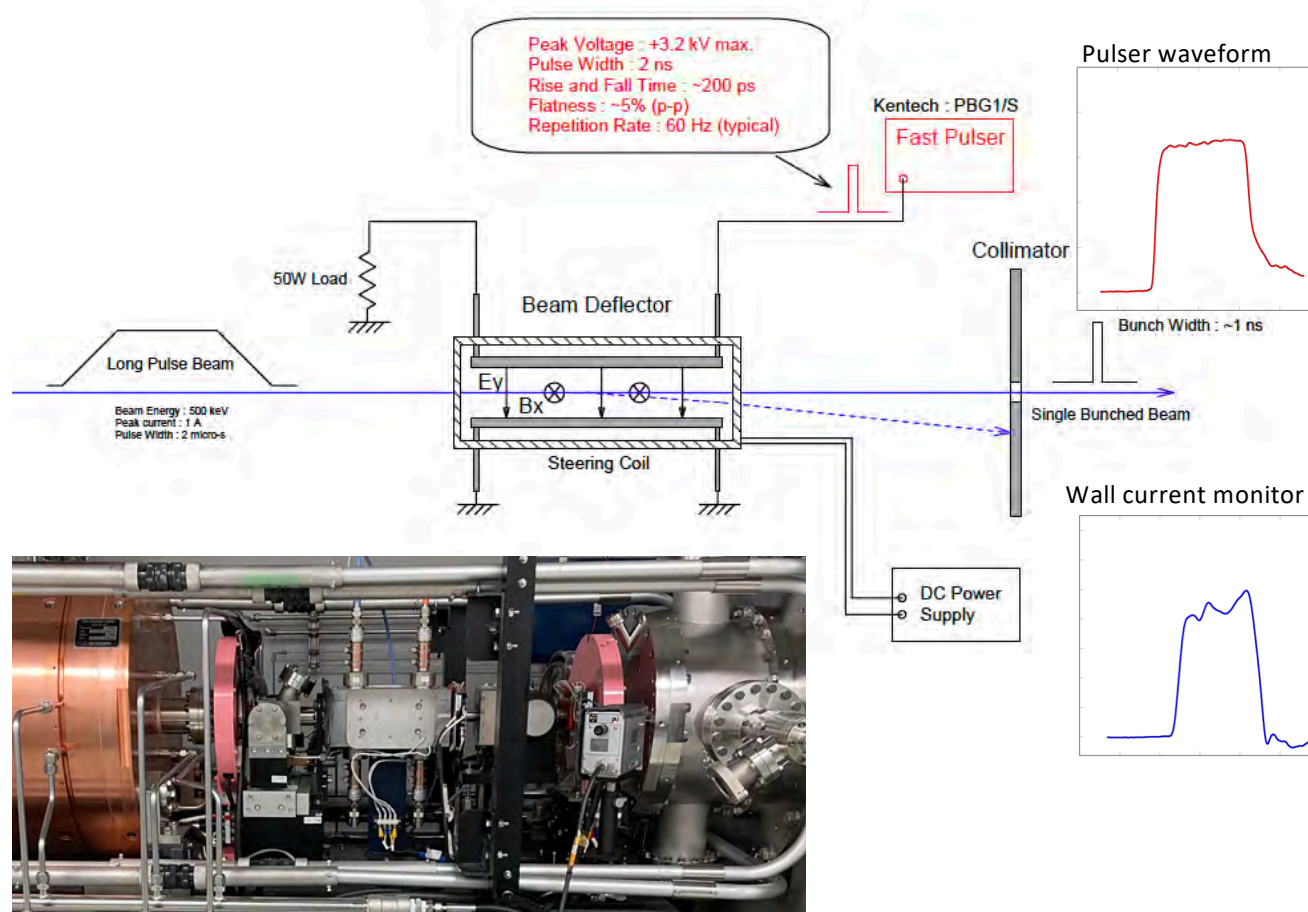


W. Hayami et al., ACS Omega 6 (2021) p.14559

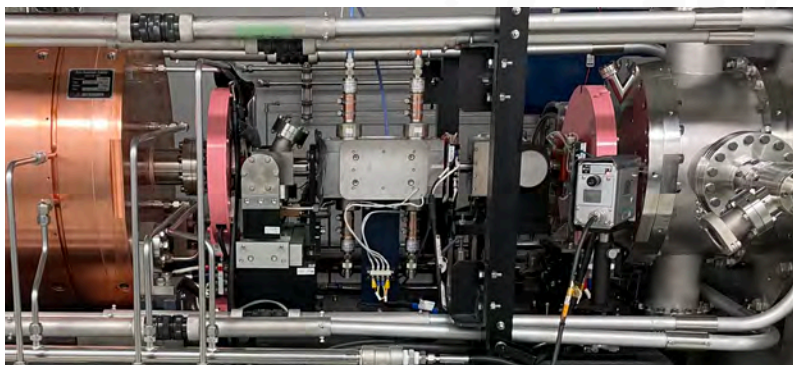
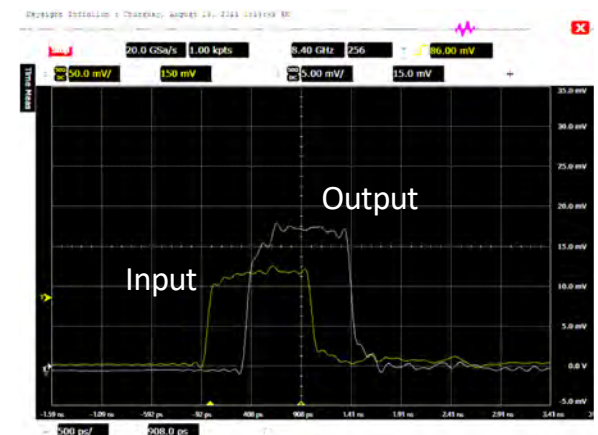
究極の電子ビームを加工する

ナノ秒ビーム加工とサブナノ秒計測

マイクロ秒電子銃ビームから1 nsの矩形ビームを切り出す。



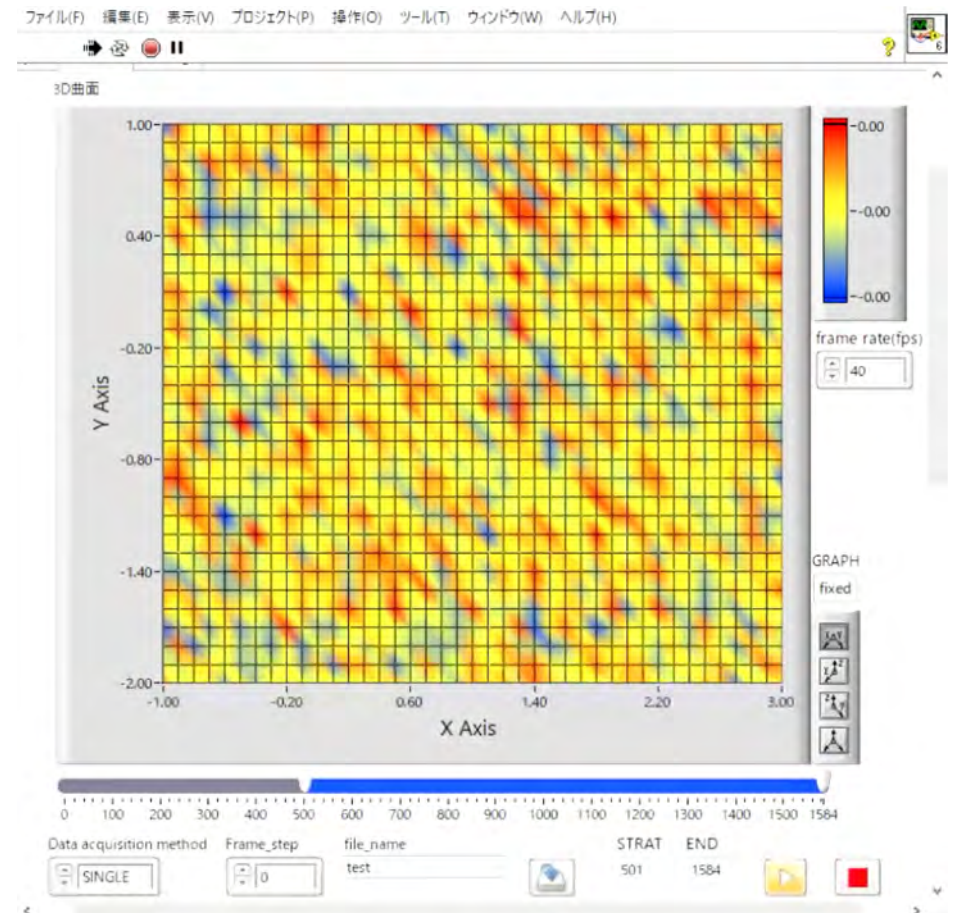
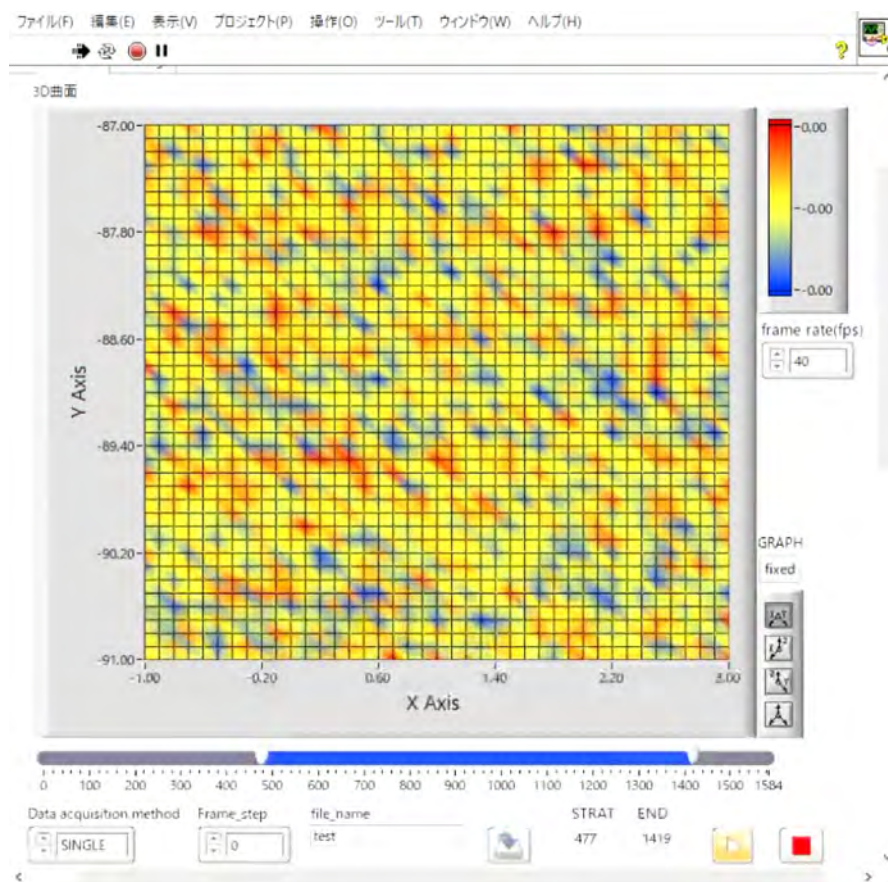
応答時間100 ps以下の壁電流モニター



ナノ秒ビーム加工とサブナノ秒計測

実空間プロファイル (XY scan)

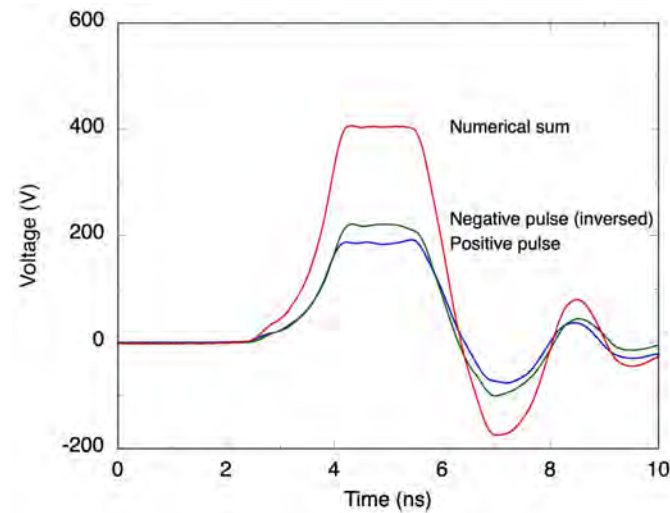
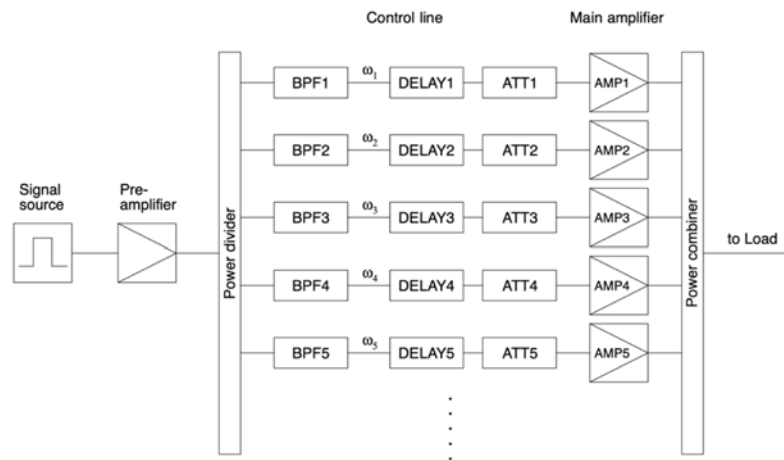
位相空間プロファイル (XX scan)



新型電子銃ビームチョッパーの開発

広帯域高周波アンプを利用した新しい高速パルサーを、株式会社R&Kと共同開発。

投影エミッタンスの向上によるXFEL出力の増加、リニアックの高繰り返し化、マルチバンチ加速への応用にも期待。



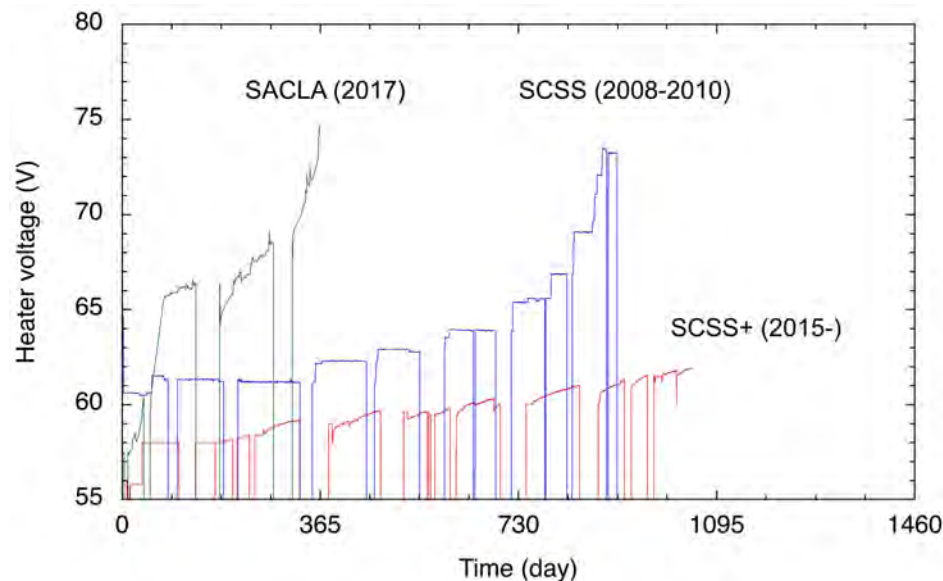
究極の電子ビームを供給する

CeB₆カソードの長寿命化

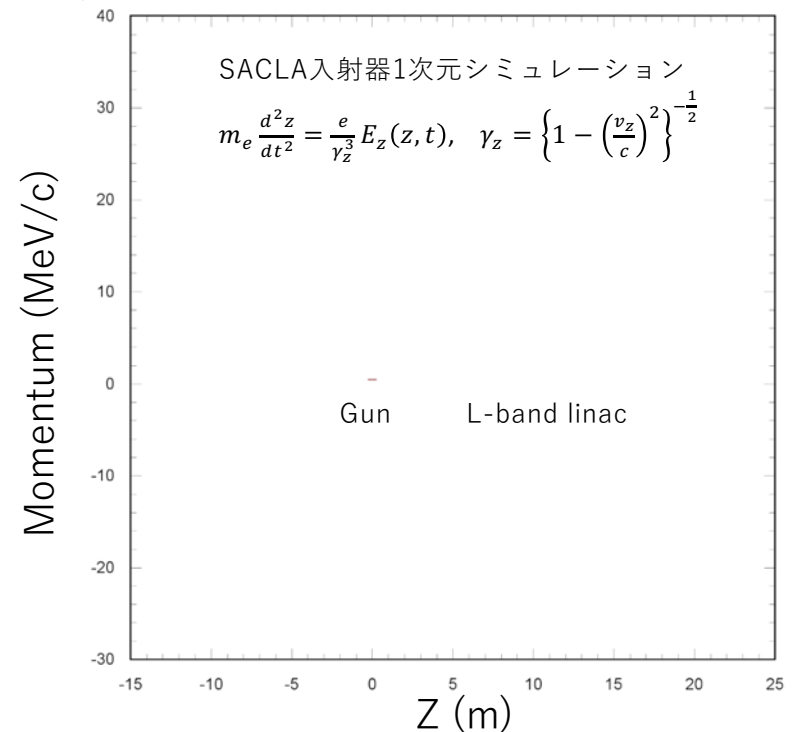
SACLAのCeB₆カソードの**寿命**が極端に短い問題。

この解決は最重要課題の一つ。

原因として、入射部から逆流してくる10 MeV以上の高エネルギー電子である可能性が極めて高いことが分かってきた。



カソードが劣化するとヒーターパワーが増加

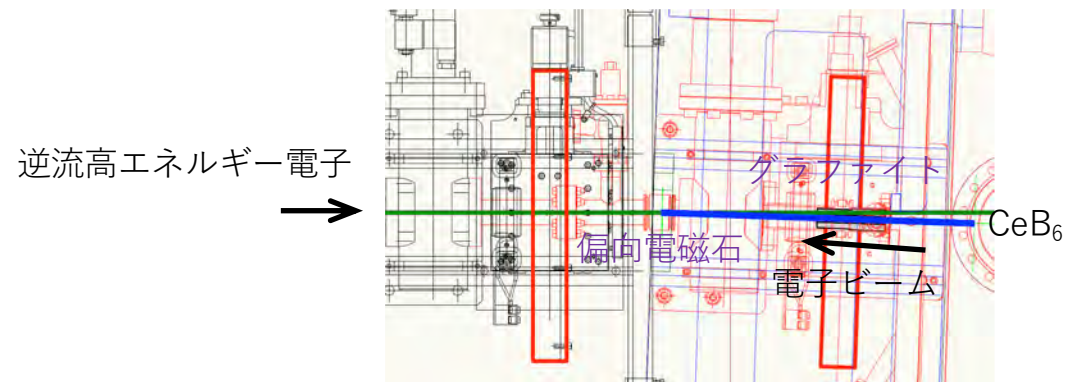
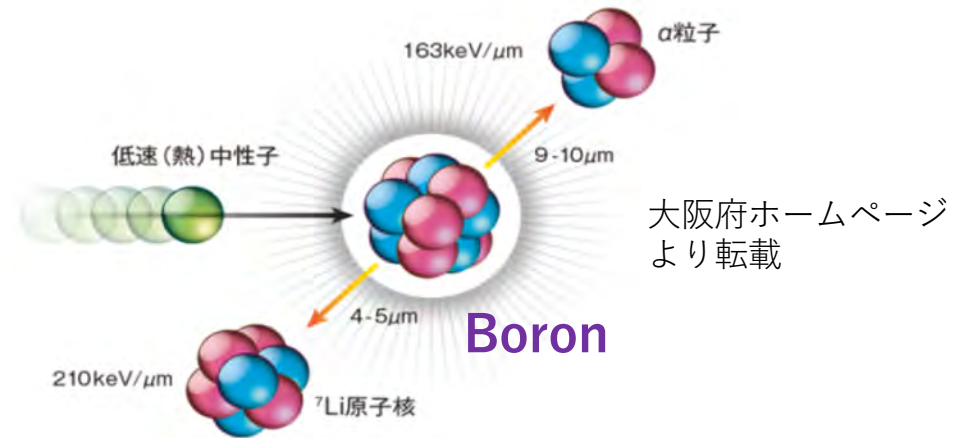


CeB₆カソードの長寿命化

[短寿命メカニズムの推定]

高エネルギー電子がカソード周辺に衝突

- ガンマ線シャワー
- 原子核の巨大共鳴
- 中性子の蒸発
- CeB₆のBがnを吸収、崩壊
- CeB₆の物性が変化、CeB₆(?)
- 仕事関数が上昇（絶縁体化?)
- ヒーターパワーが上昇



電子銃下流で本ビームと逆流電子の軌道を分離。グラフアイトトコリメータにダンプし中性子発生を抑制（2023年夏装着）。

まとめ

- 電子銃は、固体物性、表面物性、ビーム物理、高温技術、高電圧技術、超高真空技術、マイクロ波技術の集大成である。
- 従って可能性は無限にあり、XFELの輝度は電子源のupgradeによって必ず増強することが出来る。
- 高輝度電子源が要求される分野は幅広く、電子源ビームの低エミッタンス化が実現できれば応用範囲も広がる。
- 究極の電子源、熱電子源を追求したい。
- 電子銃交換システム、電子銃テストスタンド、カソード試験装置のインフラは整った。
- ご視聴の若手の皆様、ぜひ一緒にやりませんか？