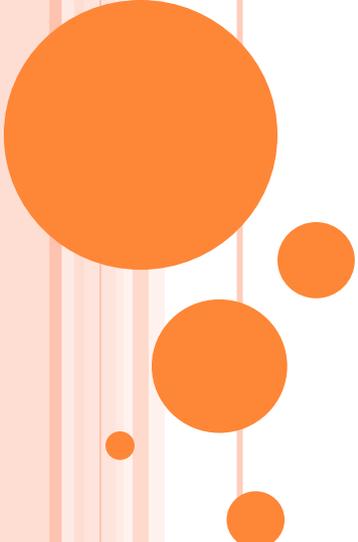


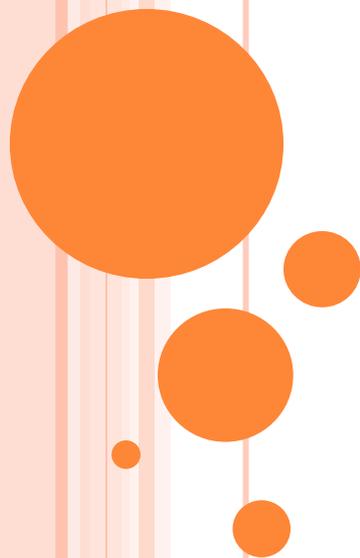
# マルチアルカリフォトカソードの 開発状況と大電流発生への検討



栗木雅夫、横田温貴、郭磊、  
浦野正洋、根岸健太郎(広島大学)  
山本将博、宮島司、許斐太郎、清宮裕史  
(KEK)

# 目次

1. 導入
2. マルチアルカリ蒸着試験
3. 大電流発生 の 検討
4. まとめ



# ERL放射光源としての要求

- ERL放射光源は、フレッシュなビームから発生する高輝度光が利点
- 蓄積リングのような、平衡状態に制限されない高輝度が可能: 短パルス、高輝度
- ライナック(電子銃)でのビーム電流 = 発光ビーム電流
- 蓄積リング型に比べて、三ケタ高い平均電流を、すくなくともリング平衡ビームより良い品質で、実現する必要がある。10mA~100mA

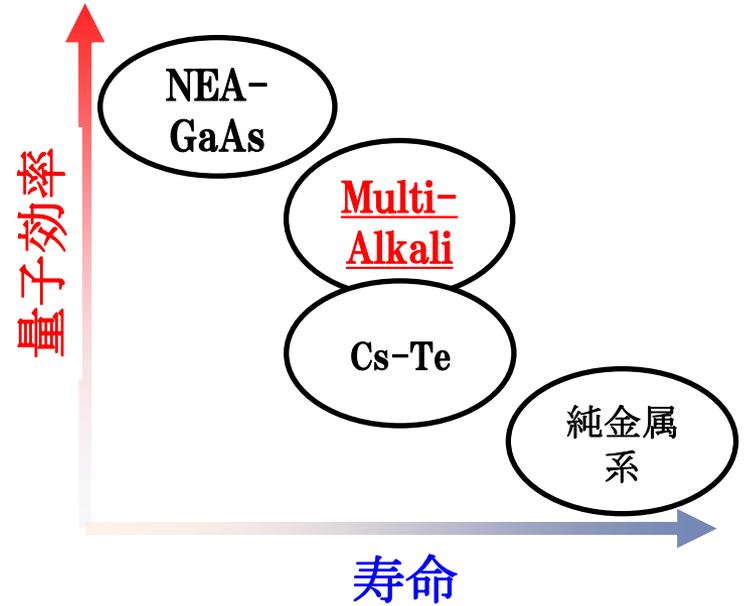
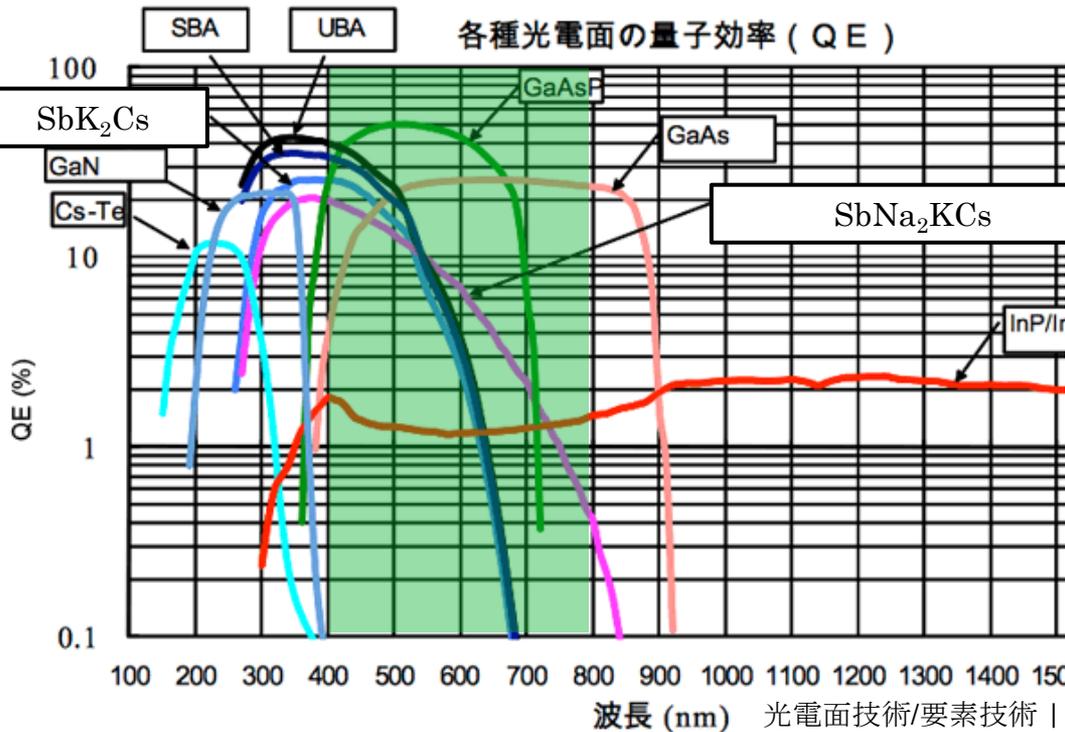


# 電子源への要求

- 大電流生成:熱カソードが有利
- 短パルス、ビーム径(エミッタンス)、ビーム繰り返し(パターン)の自由度:熱カソードはほとんどないが、光カソードは高い:ERLでは光カソードを採用(当面はGaAs,将来的にはマルチアルカリを検討)
- 大電流発生が可能なレーザー、大電流発生に耐えられるカソードが必要。
- マルチアルカリ( $\text{CsK}_2\text{Sb}$ )による大電流発生を検討。



# 様々なフォトカソード



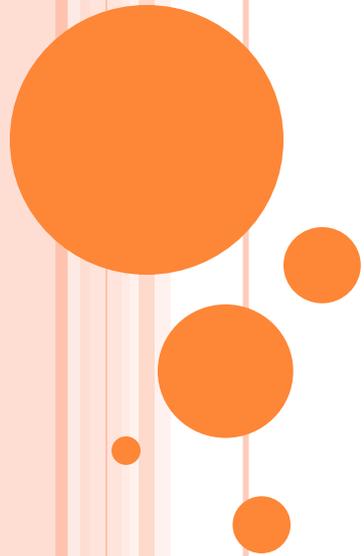
GaAs: 高量子効率、赤色励起、短寿命(耐久性に課題)

純金属: 低量子効率( $\sim 10^{-4}\%$ )、紫外光励起、長寿命

マルチアルカリカソード( $\text{CsK}_2\text{Sb}$ ): 高量子効率、緑色励起、長寿命

大電流用フォトカソードの最有力候補

# マルチアルカリカソード試験



# マルチアルカリ蒸着装置

- SUS基板 (30mm × 30mm) への蒸着
- 量子効率と膜厚の同時測定を可能にする対称蒸着
- NEG, IPポンプ (ベース真空度  $4.0 \times 10^{-9}$  Pa)

水晶振動子膜圧計

光導入用ビューポート

マルチアルカリ蒸着源

蒸着源

• 複数の材料  
金属を蒸着

カソード基板

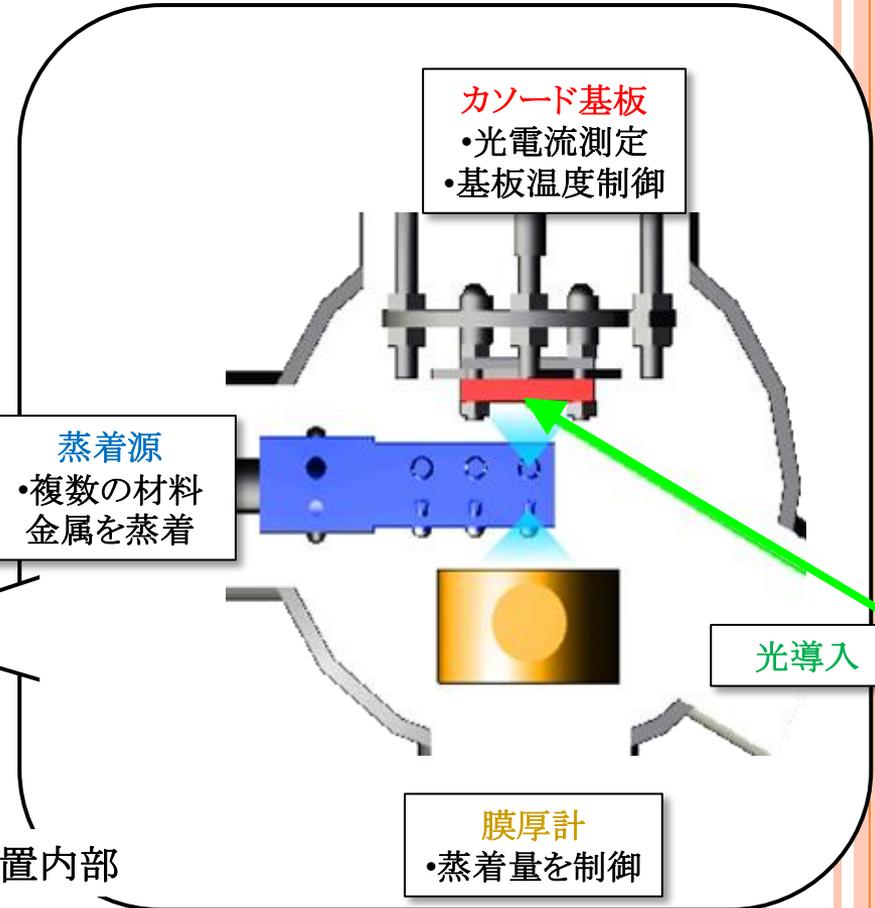
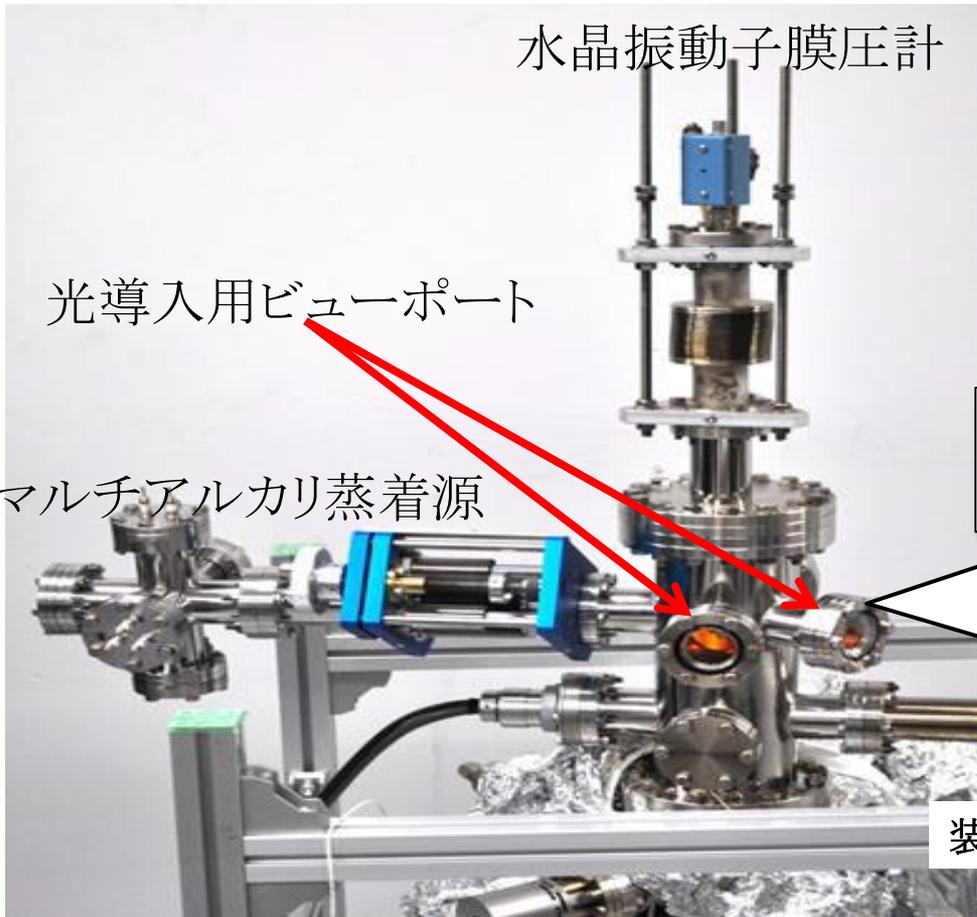
• 光電流測定  
• 基板温度制御

光導入

膜厚計

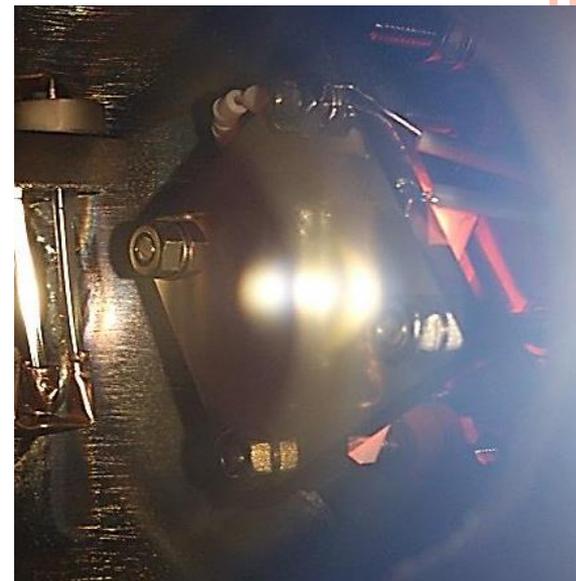
• 蒸着量を制御

装置内部



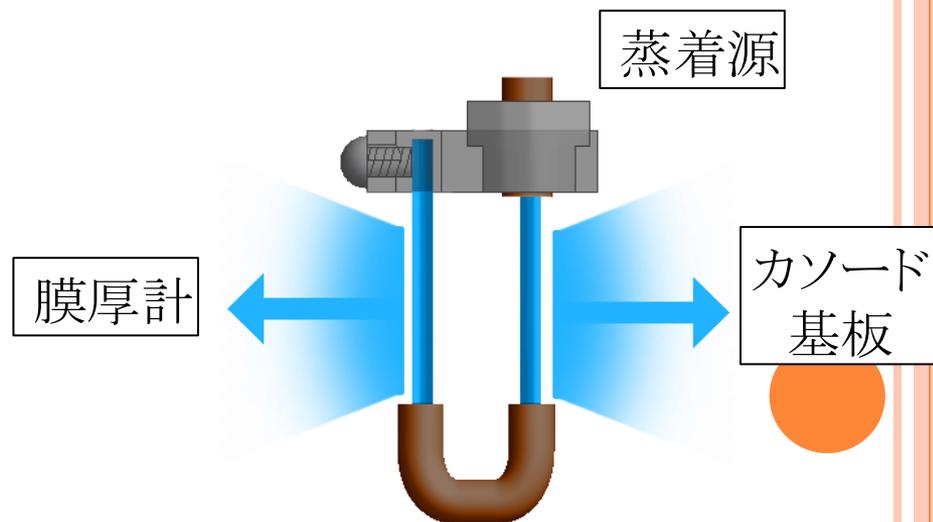
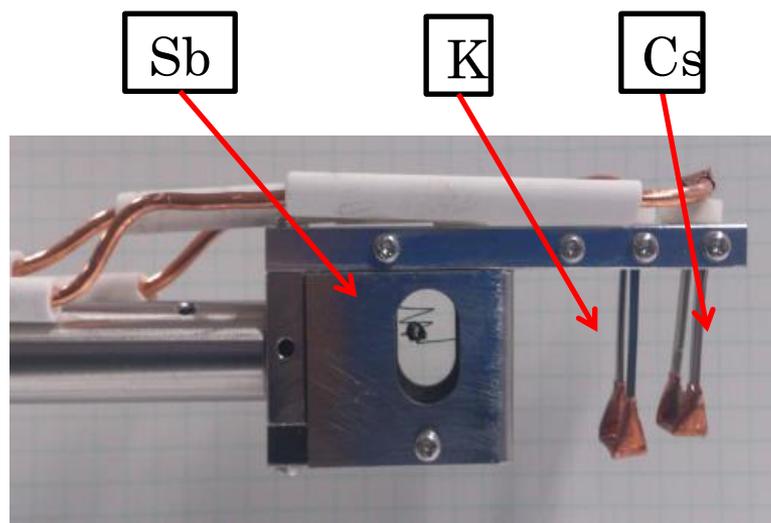
## カソード基板フォルダ

- SUS製31mmx31mmカソード基板
- 温度制御用のヒーター、熱電対を装備
- カソード電圧印加のため周囲と絶縁



## 蒸着源

- ステージにより移動することで、サンプル位置で蒸着を行う
- カソードと膜厚計を対称に配置、膜厚同時測定を可能にした





# CsK<sub>2</sub>Sb蒸着実験

1. 基板を加熱洗浄 (600°C)
2. 基板を冷ます (100°C)
3. Sb蒸着 (目的の膜厚まで)
4. K蒸着 (目的の膜厚まで)
5. Cs蒸着 (QE Max.)
6. 基板温度を室温に戻す

## 今回の蒸着条件

基板温度 103°C

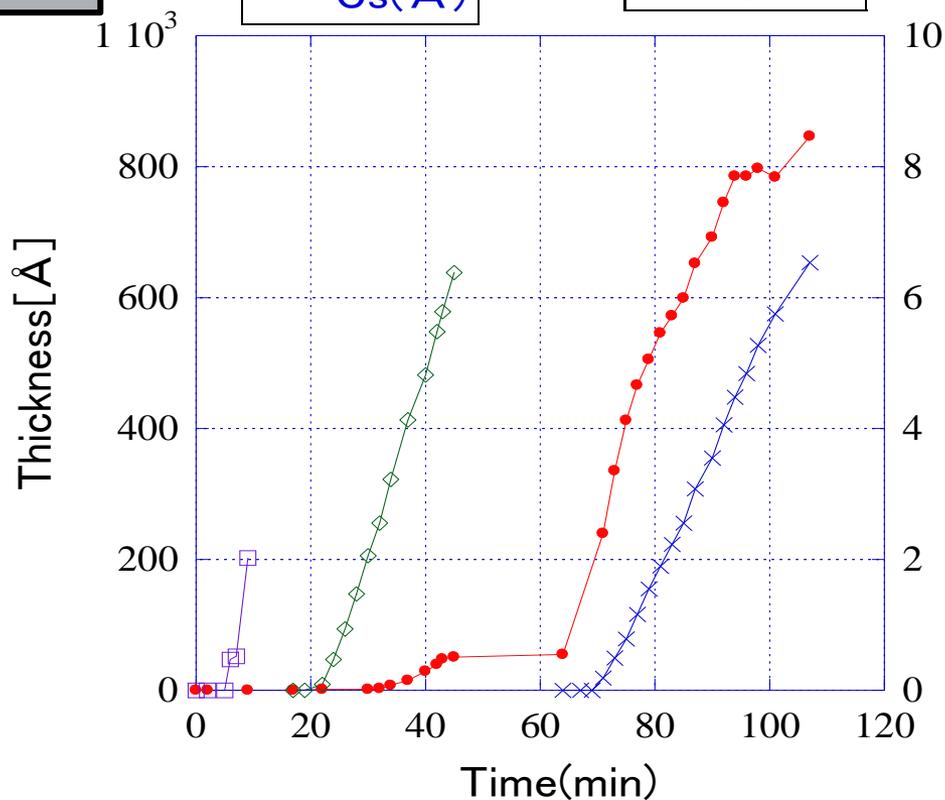
Sb膜厚 202 Å

K膜厚 638 Å

Cs膜厚 654 Å

QE@405nm 約9%

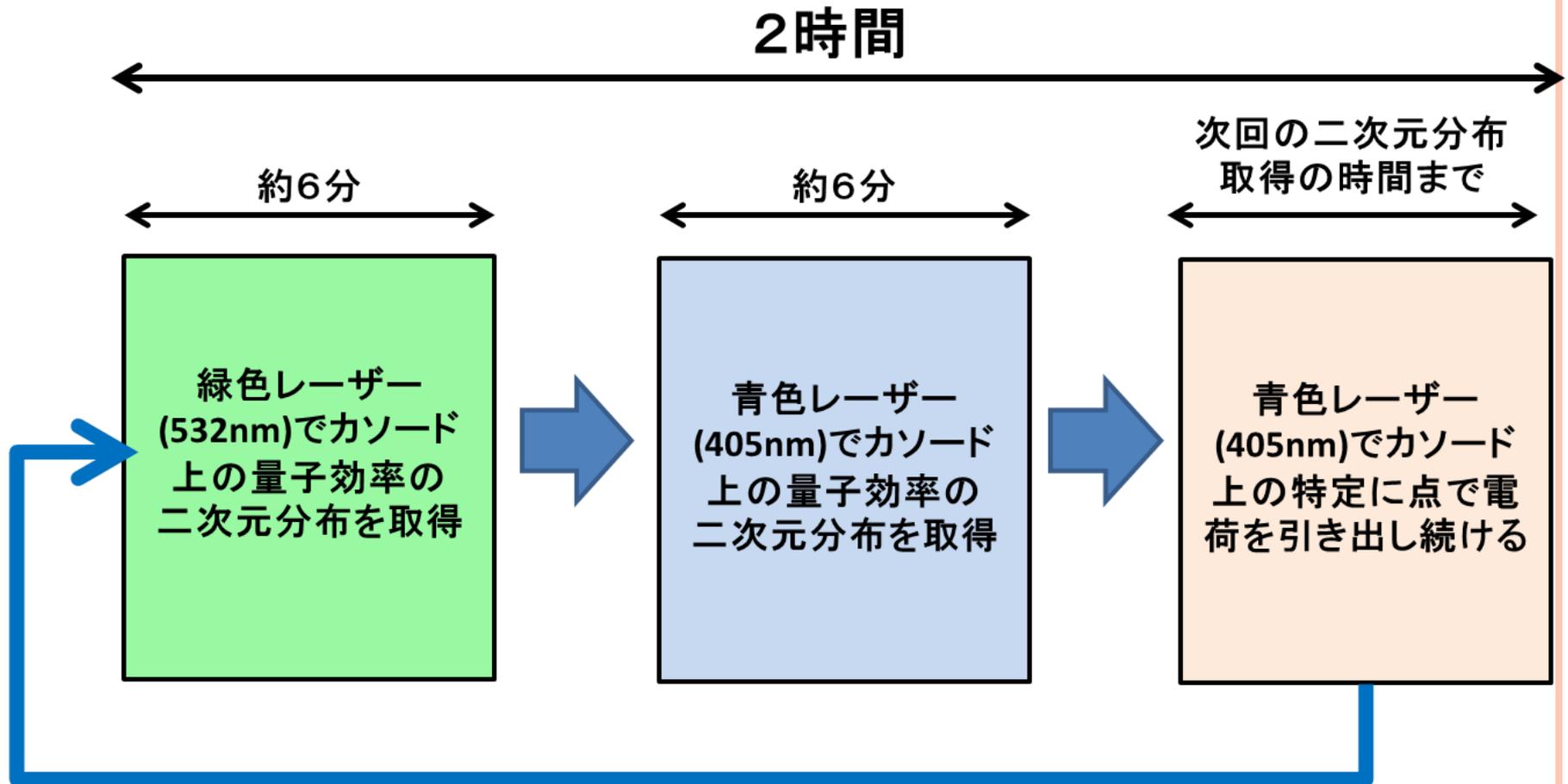
QE@532nm 約2%



成膜時の膜厚と量子効率の変化

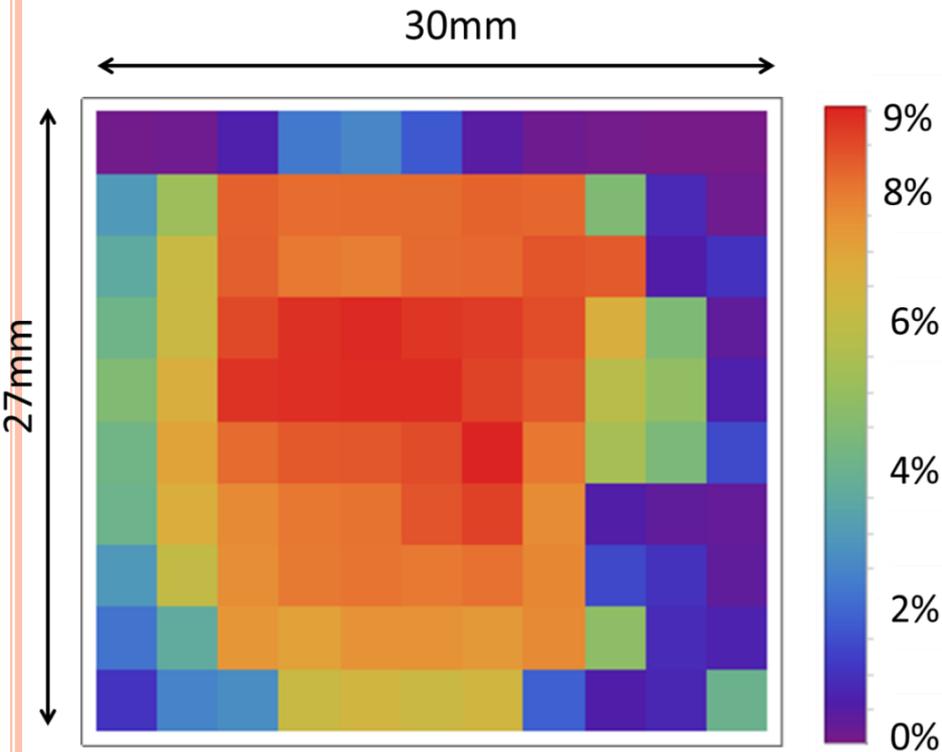
- K蒸着中から量子効率を観測
- Cs蒸着時に大幅に上昇
- Cs蒸着停止後も、徐々に上昇
- QE@532nm...約2%, QE@405nm...約9%

# データ測定手順

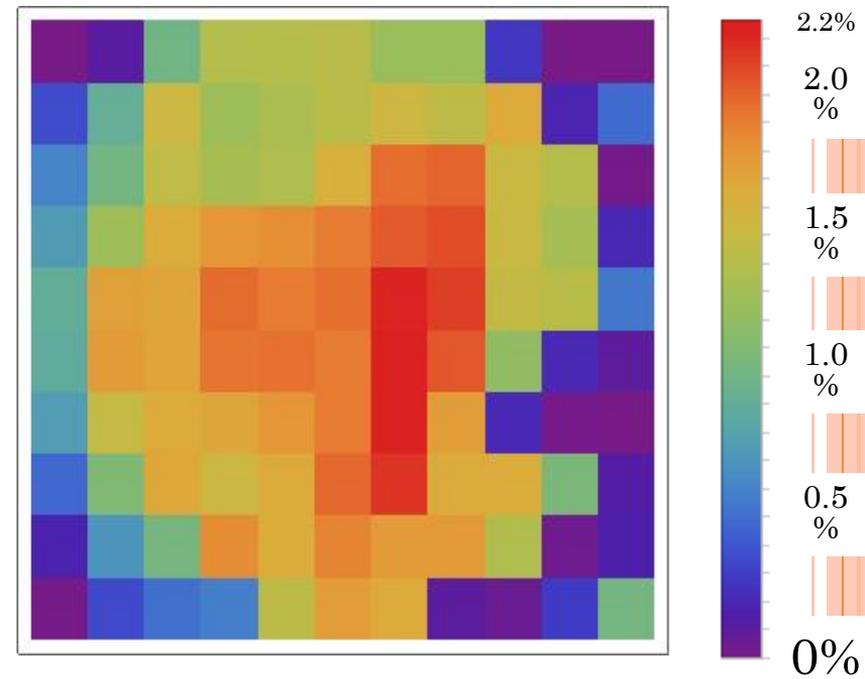


- 各々の波長での量子効率の時間変化を測定。
- 特定の点で電子ビームを引出続けることで、電子ビーム生成による影響を評価。

# 蒸着直後の量子効率分布



青色レーザー(405nm)で測定



緑色レーザー(532nm)で測定

- レーザーの二次元スキャンによりQE分布を評価。
- およそ中心付近でQEは高いが、波長で分布が若干違う



# カソード寿命二成分モデル

$$h(t) = h_0 \exp(-t/\tau) \exp(-r/Q)$$

時間寿命  $\tau$ (sec)

- 時間経過によるカソードの劣化(残留ガスの吸着など)

電荷密度寿命  $\theta$ (C/mm<sup>2</sup>)

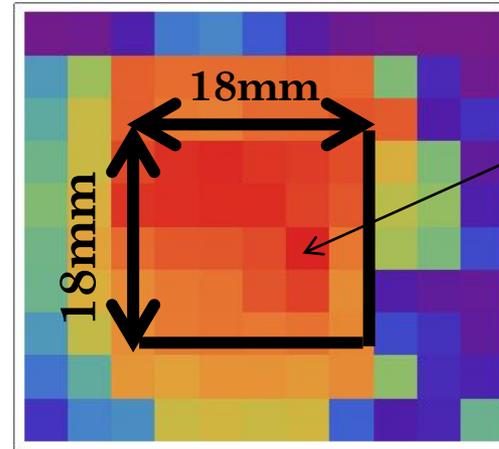
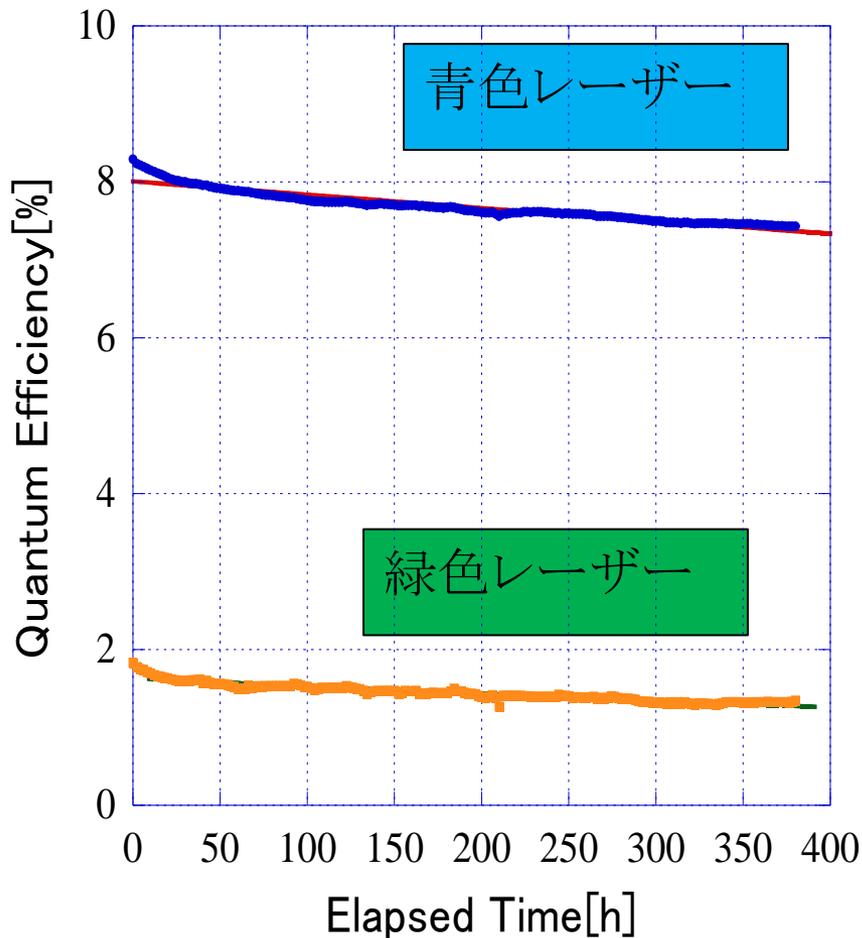
- ビーム引出による劣化(イオン逆流など)

- 電子ビームを連続引出:時間寿命 + 電荷密度寿命
- それ以外の点(電子ビームの引出電荷量が無視できる点):  
時間寿命

# 電子を引き出していない点での時間寿命

(電荷密度寿命は無視)

$$h(t) = h_0 \exp(-t / \tau)$$



青色レーザーを照射し続けた点

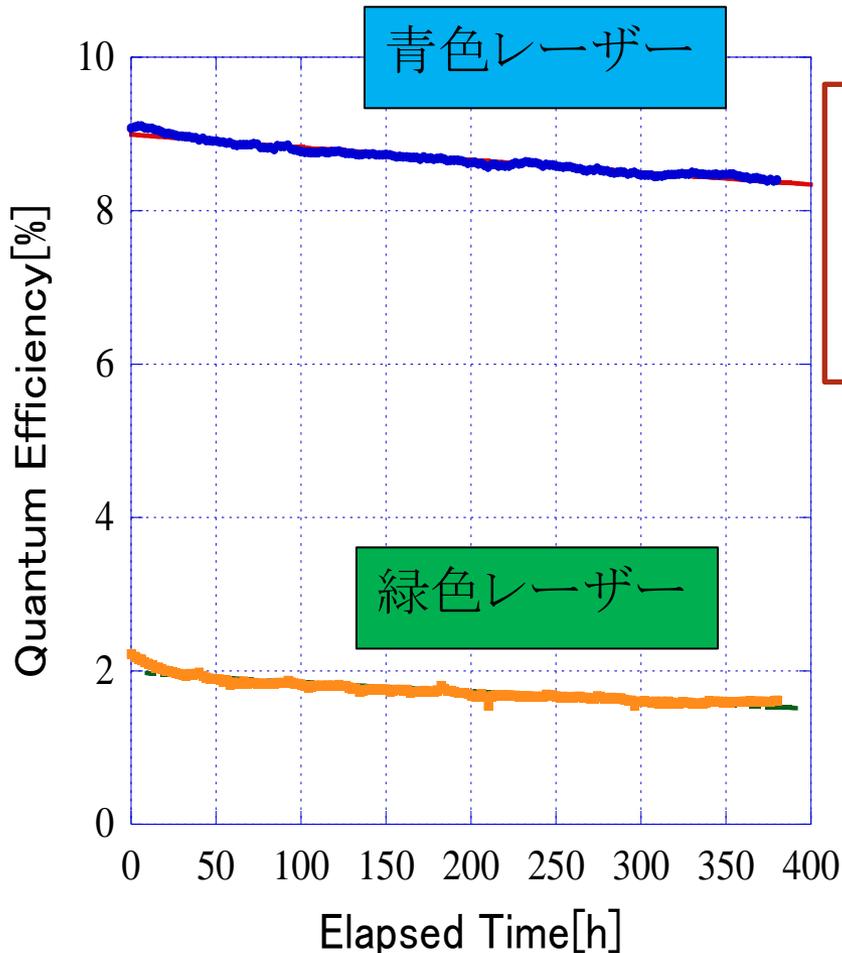
カソード中心付近の18mm×18mmの範囲で量子効率の平均値の時間変化を求めた(電子を引き出し続けた点は除く)

青色レーザー(405nm) 約2.3mW  
時間寿命  $\tau = 4600 \pm 100$ 時間(約6カ月)  
緑色レーザー(532nm) 約0.4mW  
時間寿命  $\tau = 1530 \pm 40$ 時間(約2カ月)  
平均真空度:  $4.0 \times 10^{-8}$  Pa

# 電子を引き出した点での時間寿命

(電荷密度寿命は無視)

$$\eta(t) = \eta_0 \exp(-t/\tau)$$



青色レーザー(405nm)

時間寿命  $\tau = 5300 \pm 80$ 時間(約7カ月)

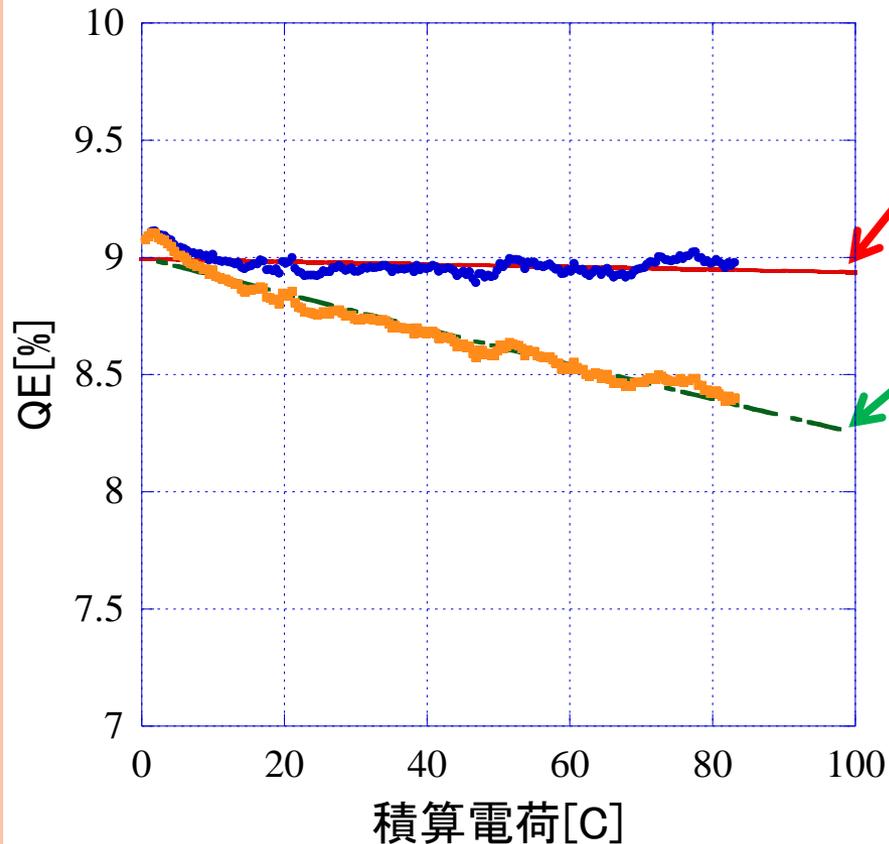
緑色レーザー(532nm)

時間寿命  $\tau = 1450 \pm 40$ 時間(約2カ月)

- 電子ビームを引き出している点と、引き出していない点で、時間寿命には有意差が無い。
- $\text{CsK}_2\text{Sb}$ の高い耐久性を示唆



# 電荷密度寿命測定



補正データ  $\eta'(t) = \eta_0' \exp(-\rho / \Theta)$

$$\eta'(t) = \eta(t) \exp(t / \tau)$$

測定データ  $\eta(t) = \eta_0 \exp(-\rho / \Theta)$

青色レーザー(405nm) : 約2.3mW  
スポット径:  $0.627\text{mm}^2$   
平均電流:  $67\ \mu\text{A}$   
電荷引出時間: 380時間  
真空度:  $4.0 \times 10^{-8}\ \text{Pa}$   
カソード温度:  $23^\circ\text{C}$

## 電荷密度寿命 $\Theta$

- 未補正  $1830 \pm 30 [\text{C}/\text{mm}^2]$
- レーザー照射点の周りの8点の平均時間寿命 ( $5730 \pm 140$ 時間) で補正  
:  $16600 \sim 50000 [\text{C}/\text{mm}^2]$

## 寿命と引出電流の関係

モデルの妥当性評価のため、カソード寿命引出電流依存性を評価した。

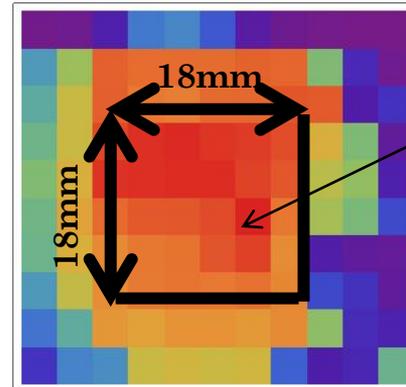
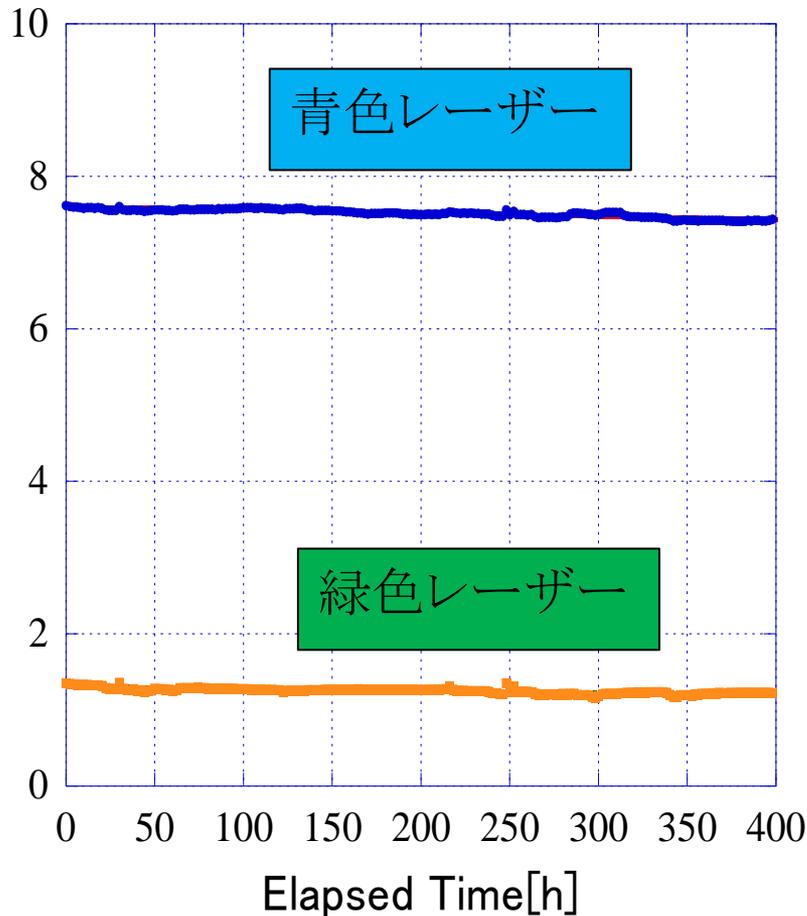
引出電流値：約 $67 \mu A$  → 約 $28 \mu A$  (約42%)

平均真空度： $4.0 \times 10^{-8} Pa$  →  $7.3 \times 10^{-9} Pa$  (約20%)



# 電子を引き出していない点での時間寿命

レーザー照射点以外での平均時間寿命

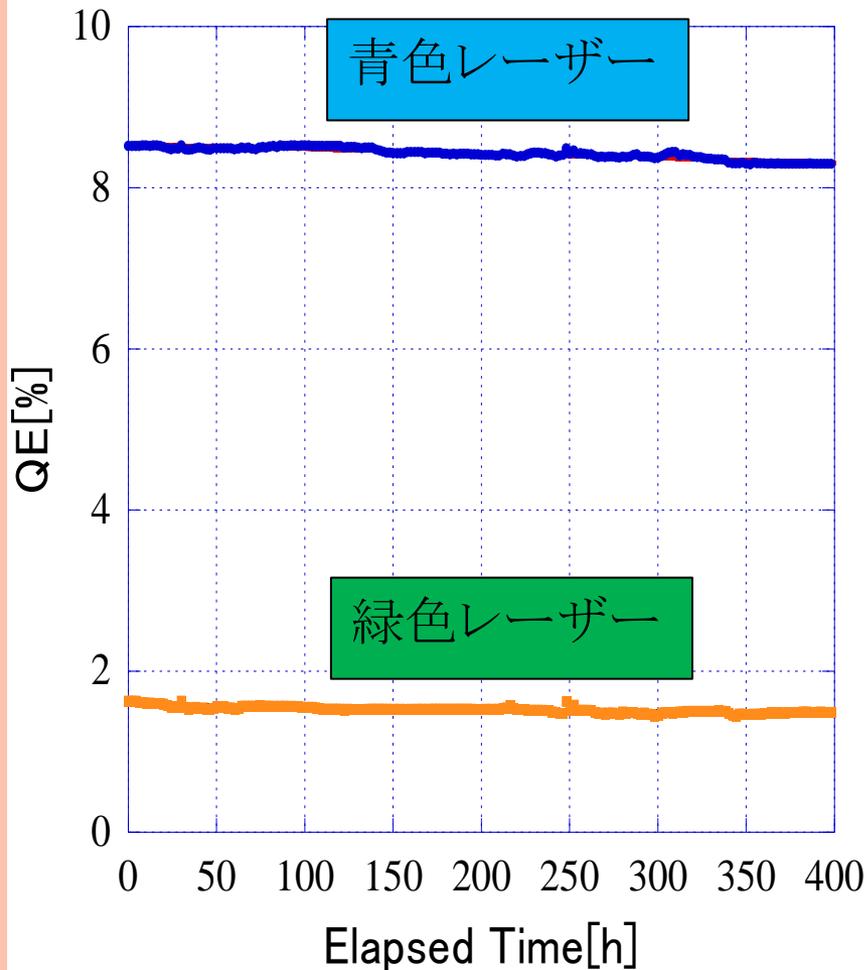


青色レーザーを照射し続けた点

青色レーザー(405nm) 約1.0mW  
時間寿命  $\tau = 17500 \pm 550$ 時間(約3.8倍)  
緑色レーザー(532nm) 約0.4mW  
時間寿命  $\tau = 5000 \pm 270$ 時間(約3.2倍)  
平均真空度:  $7.0 \times 10^{-9}$  Pa (1/5に減少)

- ・真空圧力が減少するとカソードの時間寿命が増加する傾向が見える。
- ・真空度の減少の割合と時間寿命の増加の割合は単純な比例関係からはずれている。

# 電子を引き出した点での時間寿命



青色レーザー(405nm)

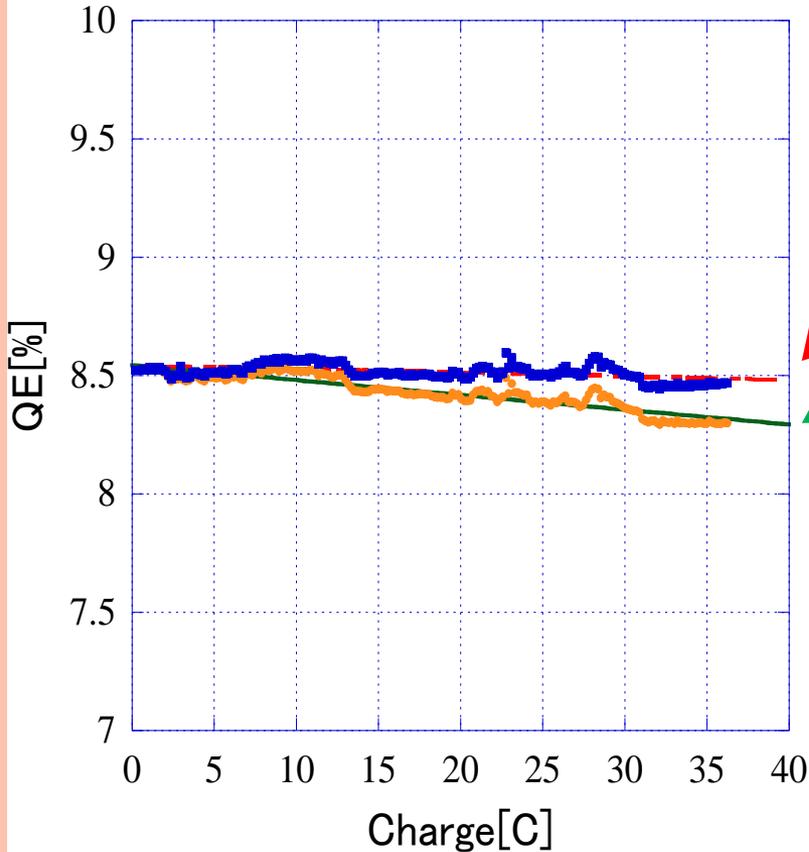
時間寿命  $\tau = 14800 \pm 450$ 時間  
(約2.8倍)

緑色レーザー(532nm)

時間寿命  $\tau = 5500 \pm 260$ 時間  
(約3.8倍)

- 真空圧力が減少するとカソードの時間寿命が増加する傾向が見える。
- 真空度の減少の割合と時間寿命の増加の割合は単純な比例関係からはずれている。

## 量子効率の引出電荷量による劣化



青色レーザー(405nm) : 約1.0mW  
スポット径:  $0.627\text{mm}^2$   
平均電流:  $28\ \mu\text{A}$   
電荷引出時間: 400時間  
真空度:  $7.3 \times 10^{-9}\ \text{Pa}$   
カソード温度:  $24^\circ\text{C}$

## 電荷密度寿命測定

補正データ  $\eta'(t) = \eta_0' \exp(-\rho / \Theta)$

$$\eta'(t) = \eta(t) \exp(t / \tau)$$

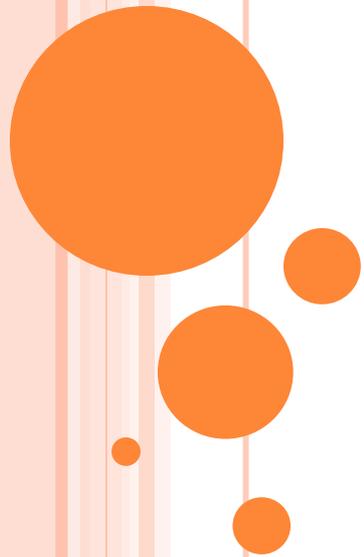
測定データ

$$\eta(t) = \eta_0 \exp(-\rho / \Theta)$$

### 電荷密度寿命 $\Theta$

- 未補正  $2140 \pm 60 [\text{C}/\text{mm}^2]$
- レーザー照射点の周りの8点の平均時間寿命 ( $19600 \pm 700$ 時間) で補正  
:  $7000 \sim 11100 [\text{C}/\text{mm}^2]$
- 引き出し電流量を変化させても電荷密度寿命は変わらない?
- 従来のイオン逆流が電荷密度寿命の原因という仮説と矛盾。(測定精度を向上させて実験的に検証していく必要あり。)

# 大電流発生 の 検討



# CsK<sub>2</sub>Sbマルチアルカリカソード寿命測定まとめ

引出電流	67 $\mu$ A	27 $\mu$ A
真空圧力	4.0x10 <sup>-8</sup> Pa	7.3x10 <sup>-8</sup> Pa
時間寿命(ビーム引出無し)	1530 $\pm$ 40時間	5000 $\pm$ 270時間
時間寿命(ビーム引出あり)	1450 $\pm$ 40時間	5500 $\pm$ 260時間
電荷密度寿命(補正無し)	1830 $\pm$ 30[C/mm <sup>2</sup> ]	2140 $\pm$ 60[C/mm <sup>2</sup> ]
電荷密度寿命(補正あり)	>16600[C/mm <sup>2</sup> ]	>7000[C/mm <sup>2</sup> ]

- 時間寿命は真空圧力を下げると、大きくなる傾向
- ビーム引出のある無しで、時間寿命に有意な差がない
- 時間寿命はいずれの条件でも十分に長い。
- 電荷密度寿命の真空圧力依存性は小さい
- 時間寿命を補正すると、電荷密度寿命は発散傾向

引出電流密度が、  
電荷密度寿命に比  
べて小さい



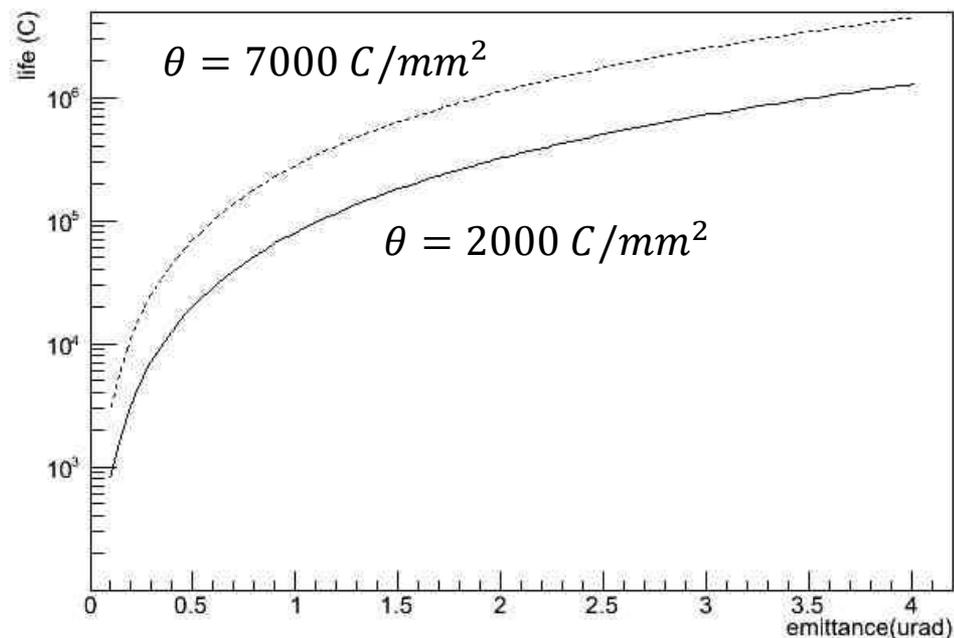
# エミッタンスと寿命

○ エミッタンスとビームサイズ:  $\varepsilon n = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{MTE}{mc^2}} = \frac{R}{2} 0.56 \mu\text{rad}/\text{mm}$

(I. Bazarov. Et al., arxiv 1105.2221)

○ 引出可能電荷量 :  $Q[C] = \theta \left( \frac{C}{\text{mm}^2} \right) \pi R^2 = \theta \pi \left( \frac{2\varepsilon n}{0.56} \right)^2$

Emittance (mm.mrad)	Charge life(C)	Time life (10mA) (hour)	Time life (100mA) (hour)
0.1	800 -2800	22-78	2.2-7.8
1.0	8000-28000	220-780	22-78



- 初期量子効率2.0%、0.5%まで運転可能とすると1/e寿命の1.4倍程度。
- 0.1mm.mrad、100mAでおよそ3.1時間以上の運転が可能。
- 10mA, 0.1mm.mrad、100mA,1.0mm.mradでは31時間。
- 今後、寿命特性(二成分モデルの妥当性)、真空圧力依存性がより明確となれば、0.1mm.mrad、100mAにでの運転が可能がより長く確保できる可能性がある。
- 課題：
  - 二成分モデルの妥当性
  - 真空圧力依存性
  - イオン化断面積
  - レーザー照射による効果



## まとめ

- CsK<sub>2</sub>Sbマルチアルカリ試験装置により、カソードを蒸着生成し、その寿命特性を評価した。
- 時間寿命にして1500－5000時間(真空圧力に依存)、電荷密度寿命にして>2000C/mm<sup>2</sup>(真空圧力依存性見えず)を得た。
- 時間寿命は実用上、充分大きな値。
- 0.1mm.mrad, 100mAでの運転時間は3時間以上。他の条件では、実用運転に耐えうる。
- 電荷密度寿命は、大きい可能性があるが、定量的評価にはモデル依存性の検証、測定精度の向上が必要。

