

# マルチアルカリ高量子効率・ 長寿命カソード開発

2014年12月24日 産業技術総合研究所

広島大学 加速器物理研究室

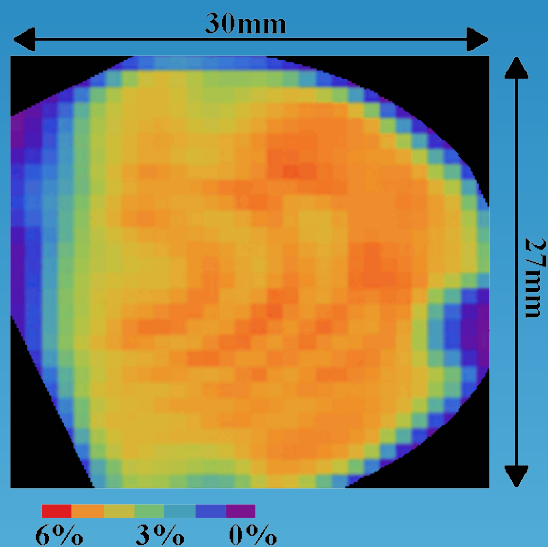
栗木雅夫、清宮裕史、郭磊、内田和秀、横田温貴、浦野正洋

分子研 UVSOR

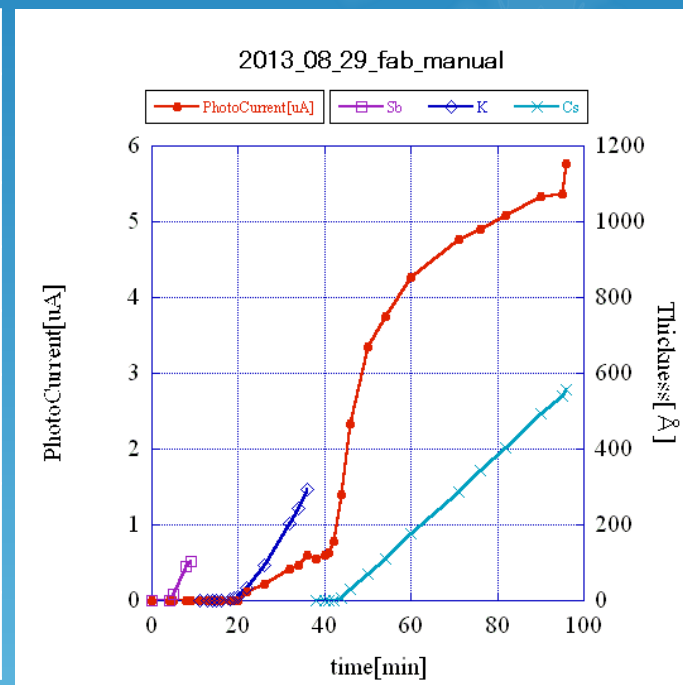
許斐太郎、加藤正博

# マルチアルカリ陰極(CsK<sub>2</sub>Sb)

- 緑色励起 (532nm) 可能な、光電陰極物質。
- PMTのカソードとして実績
- 高耐久加速器用電子源として期待
- 100mAクラスの運転が目標



基板温度	100°C
Sb膜厚	102 Å
K膜厚	292 Å
Cs膜厚	558 Å
QE at 473nm	5.6 ±0.4%
QE at 532nm	3.6 ±0.03%
電荷量寿命	535C



## カソード生成手順

- 1) 基板加熱洗浄 (600°C)
- 2) Sb蒸着 (膜厚制御)
- 3) K蒸着 (膜厚制御)
- 4) Cs蒸着 (QE Max)

# カソード劣化モデル

量子効率の劣化が、二成分あると仮定。

- 時間（ガス吸着等）
- 引出電荷密度（イオン逆流等）

**ダークモード測定**  
(極小電流での実験)

$$\eta(t) = \eta_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

**ビームモード測定**  
(大電流による実験)

$$\eta(t) = \eta_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \exp\left(-\frac{\rho}{\Theta}\right)$$

$\eta(t)$ : 量子効率

$\tau$ : 時間寿命

$\Theta$ : 電荷密度寿命

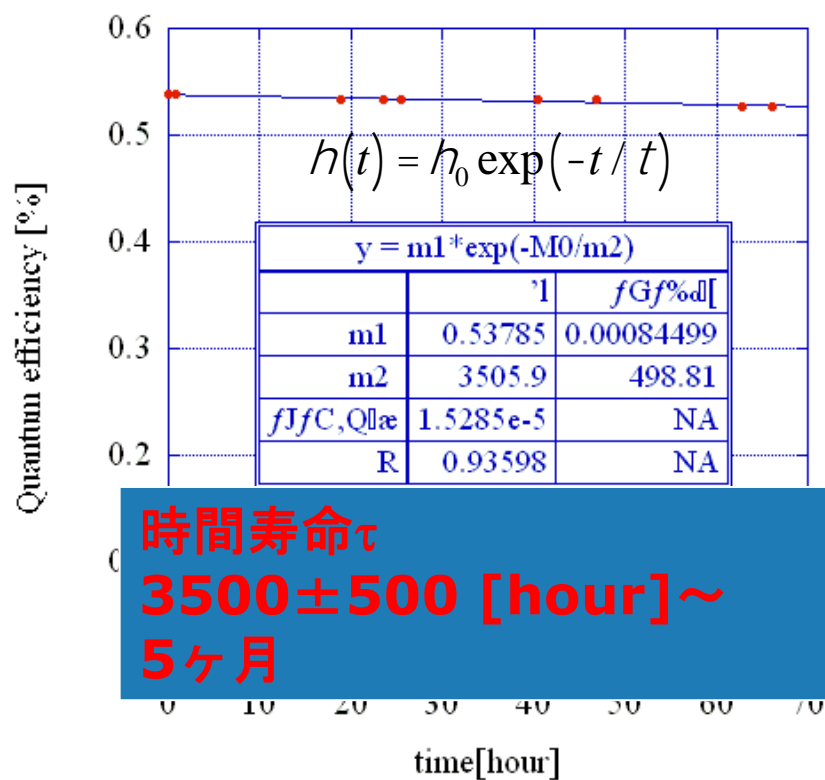
$\rho$ : 積算電荷密度

# カソード寿命測定（以前の結果）



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

## 時間寿命



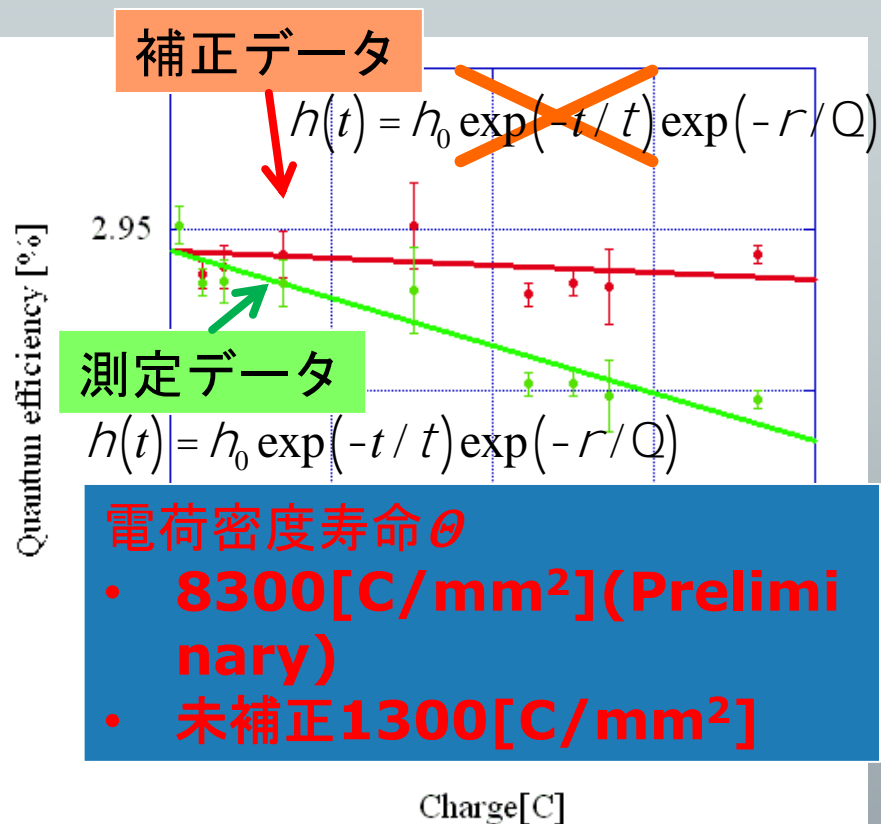
時間寿命  $\tau$

**3500 ± 500 [hour] ~**

**5ヶ月**

緑色レーザー (532nm) ~0.7mW  
真空度 :  $2.0 \times 10^{-8}$  Pa

## 電荷密度寿命

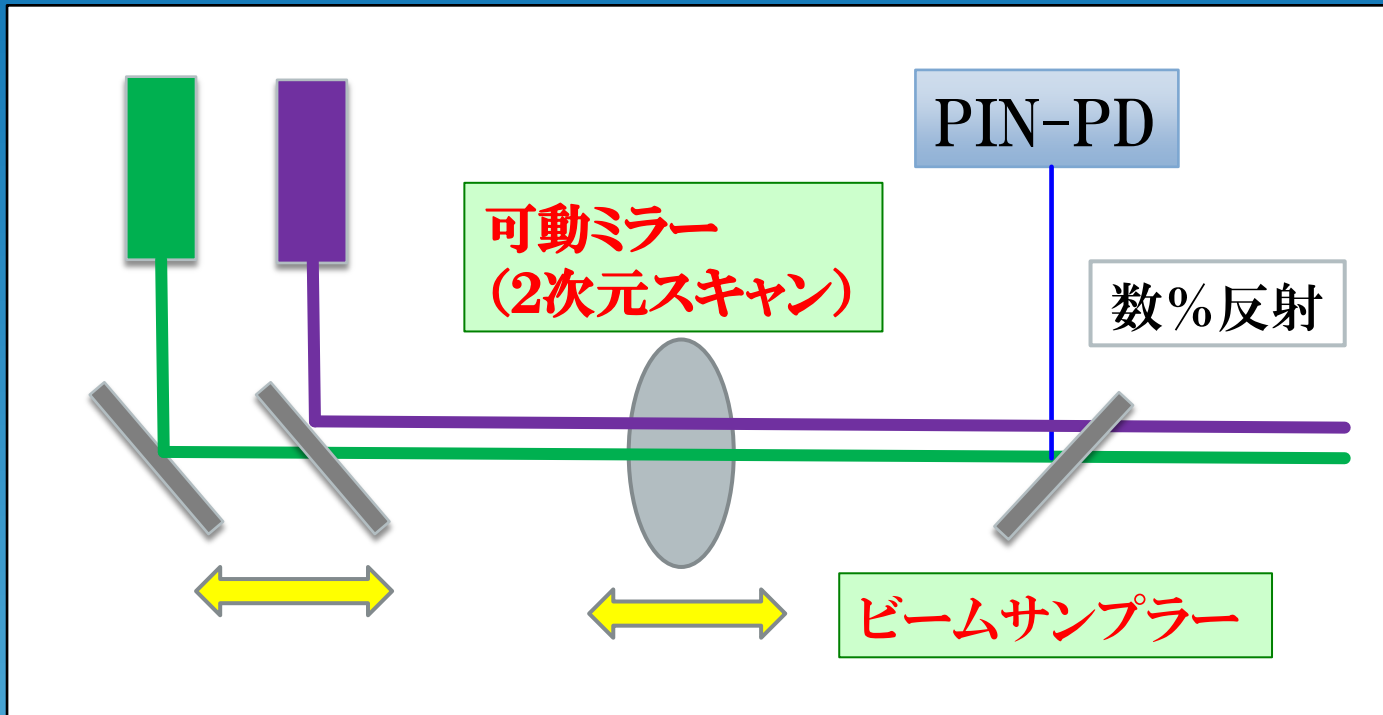


電荷密度寿命  $\theta$

- **8300 [C/mm<sup>2</sup>] (Preliminary)**
- **未補正 1300 [C/mm<sup>2</sup>]**

青色レーザー (473nm) ~5mW  
平均電流 : 90  $\mu$ A  
真空度 :  $2.8 \times 10^{-8}$  Pa

# 光学系アップグレード



- 青色レーザー(405nm)と、緑色レーザー(532nm)の自動切り替え。
- 二次元マッピング。
- ビームパワーのサンプル測定により、レーザーのパワー変動補正

# QE 測定

- 以前の蒸着条件を再現
  - Sb膜厚...202 Å (204)
  - K膜厚...638 Å (600)
  - Cs膜厚...654 Å (662)
  - 基板温度...約103度 (100)
  - QE@472nmで6.8%、@532nmで1.9%
- $P_{\text{laser}}$  (405nm)  $2.17 \pm 0.03 \text{mW}$ , (532nm)  $0.404 \pm 0.003 \text{mW}$
- Spot (405nm)  $0.404 \times 0.492 = \underline{0.627} \text{mm}^2$  ( $4\sigma$ )  
(532nm)  $0.765 \times 0.890 = \underline{2.142} \text{mm}^2$  ( $4\sigma$ )
- 特定スポットの連続照射(405nm),  
二波長によるQE mapping per 2 hours.
- 測定中の圧力 :  $4.8 \times 10^{-7} \text{ Pa}$  (非ビーム発生時  $4.0 \text{e-}9 \text{ Pa}$ )

# QE mapping at 405nm

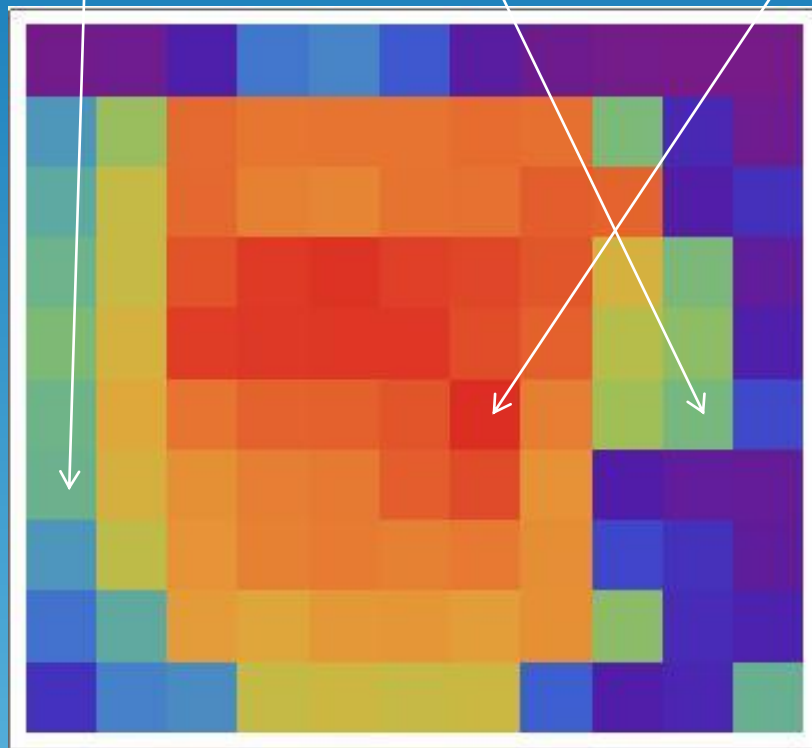


$X=0, z=9$

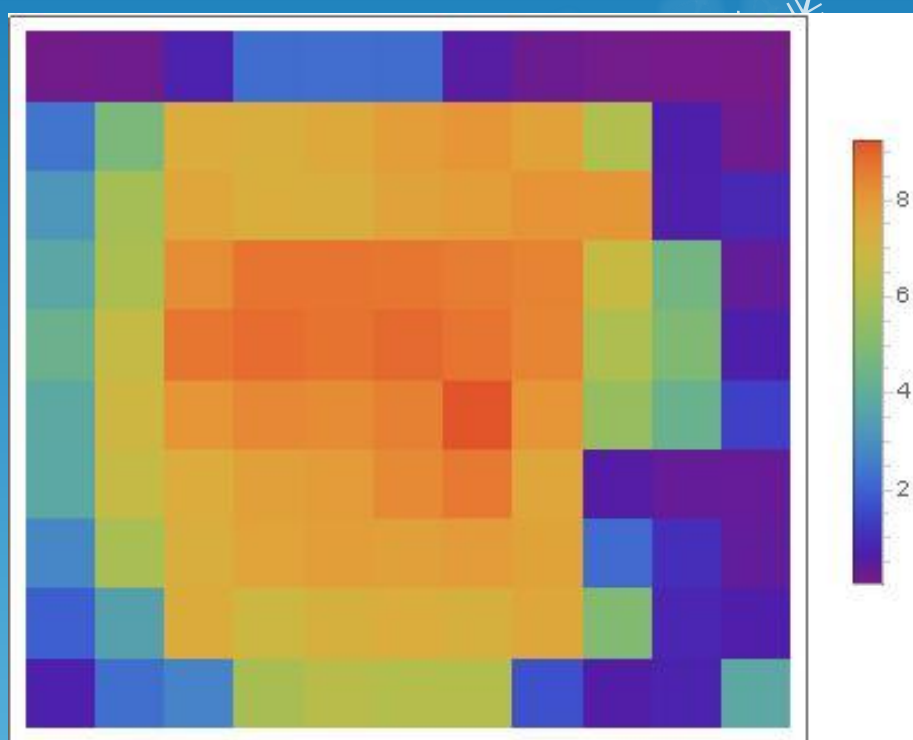
$X=27, z=12$

連続照射点

$X=18, y=12$



測定開始直後



258時間後



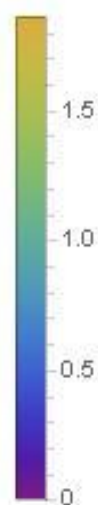
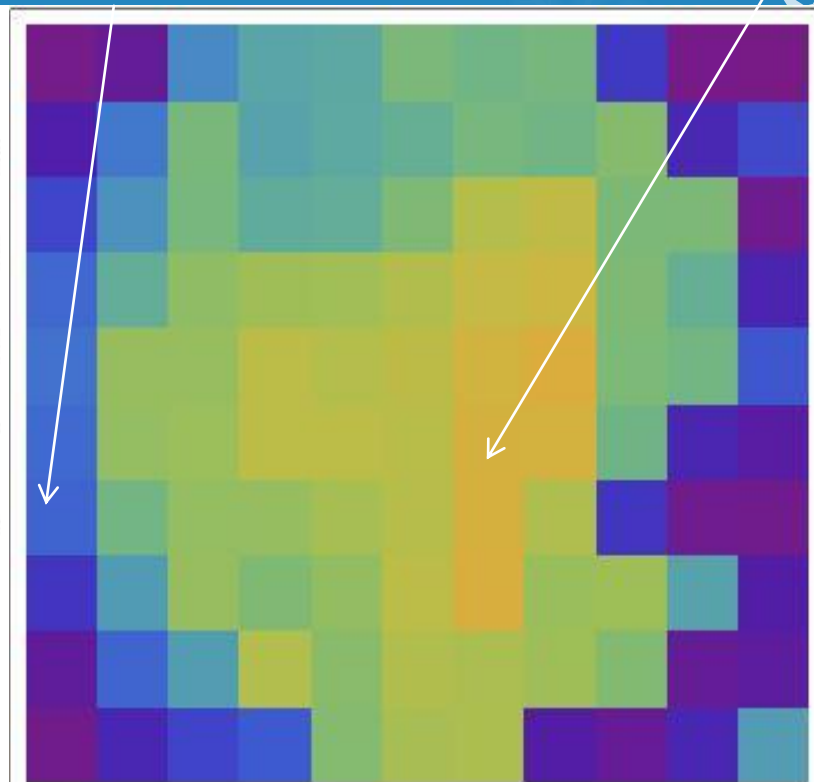
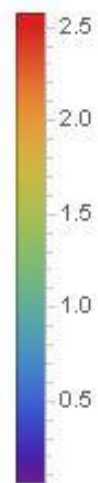
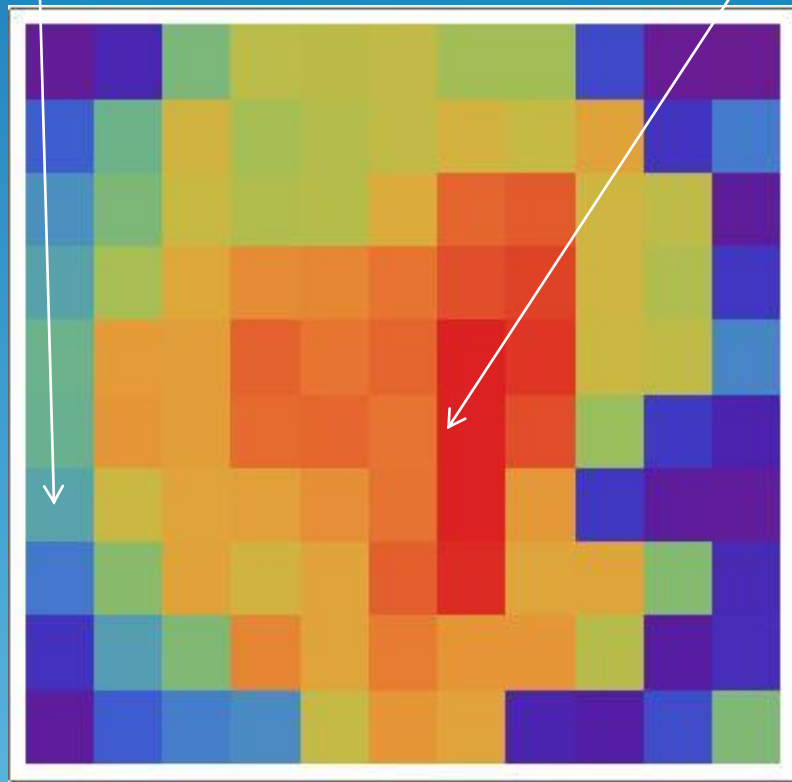
# QE mapping at 532nm

$x=0, z=9$

レーザーを当てた点  
 $X=18, z=12$

$x=0, z=9$

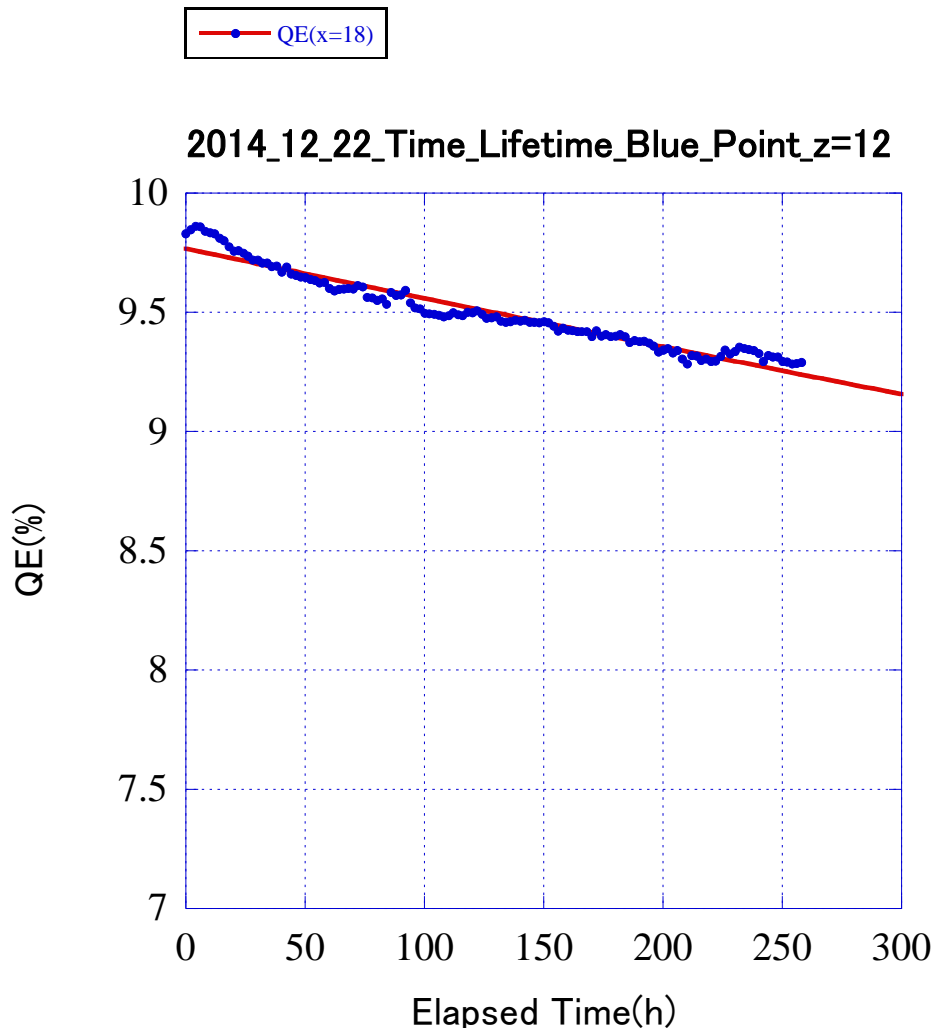
レーザーを当てた点  
 $X=18, z=12$



測定開始直後

258時間後

# QE@405nm (Continuous Illumination)



- $T=4651 \pm 100$  h
- レーザーパワー変動未補正
- 電荷量寿命 :  $\Theta = 1250$ (C)
- 電荷密度寿命 :  $2000$ (C/mm<sup>2</sup>)  
(1300 in the previous exp.)
- Darklife correction is not applied.

$y = m2 * \exp(-x/m3)$		
	値	エラー
m2	9.767	0.0066334
m3	4651	99.788
カイ2乗	0.17979	NA
R	0.97174	NA

# QE @ 405nm (Near CI, discrete)



x=15,z=9

y = m2*exp(-x/m3)		
	値	エラー
m2	9.4354	0.012769
m3	4053.1	151.33
カイ2乗	0.66358	NA
R	0.92089	NA



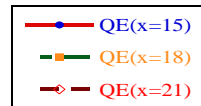
x=18,z=9

y = m2*exp(-x/m3)		
	値	エラー
m2	9.1512	0.012561
m3	4930	226.41
カイ2乗	0.64565	NA
R	0.88692	NA

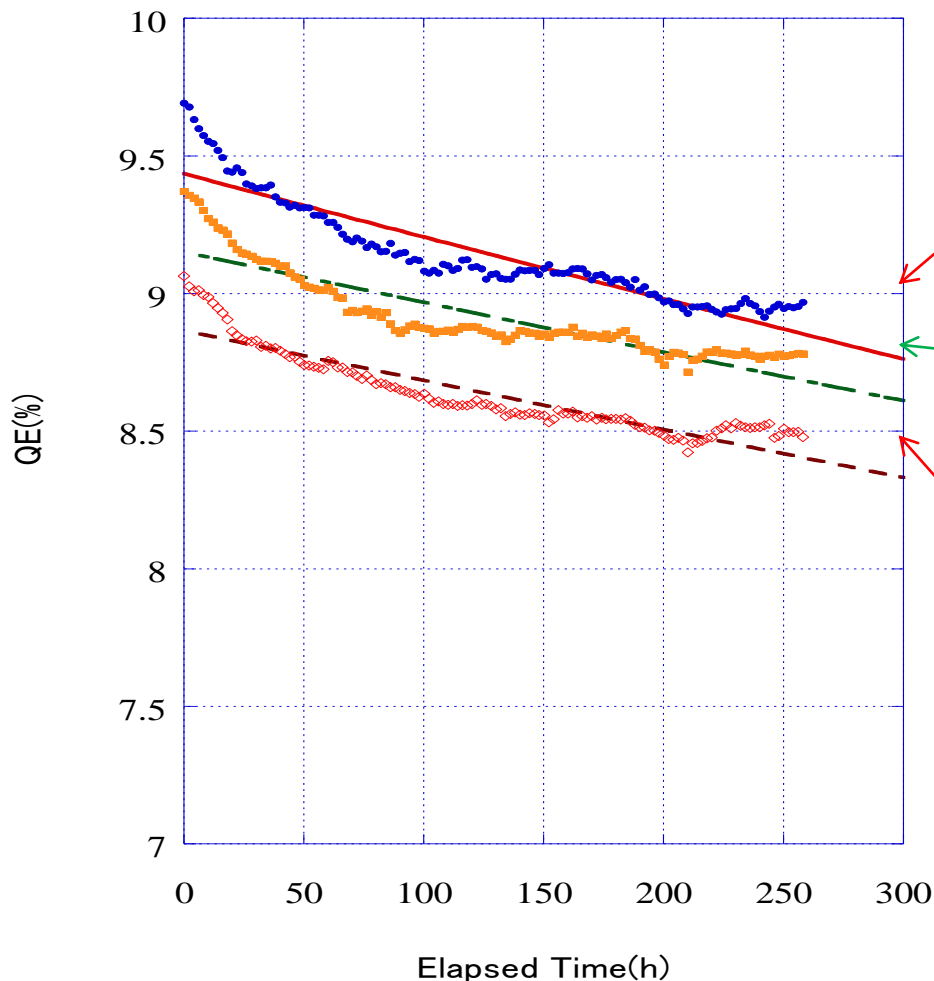


x=21,z=9

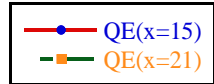
y = m2*exp(-x/m3)		
	値	エラー
m2	8.866	0.01026
m3	4825.7	182.95
カイ2乗	0.43055	NA
R	0.91874	NA



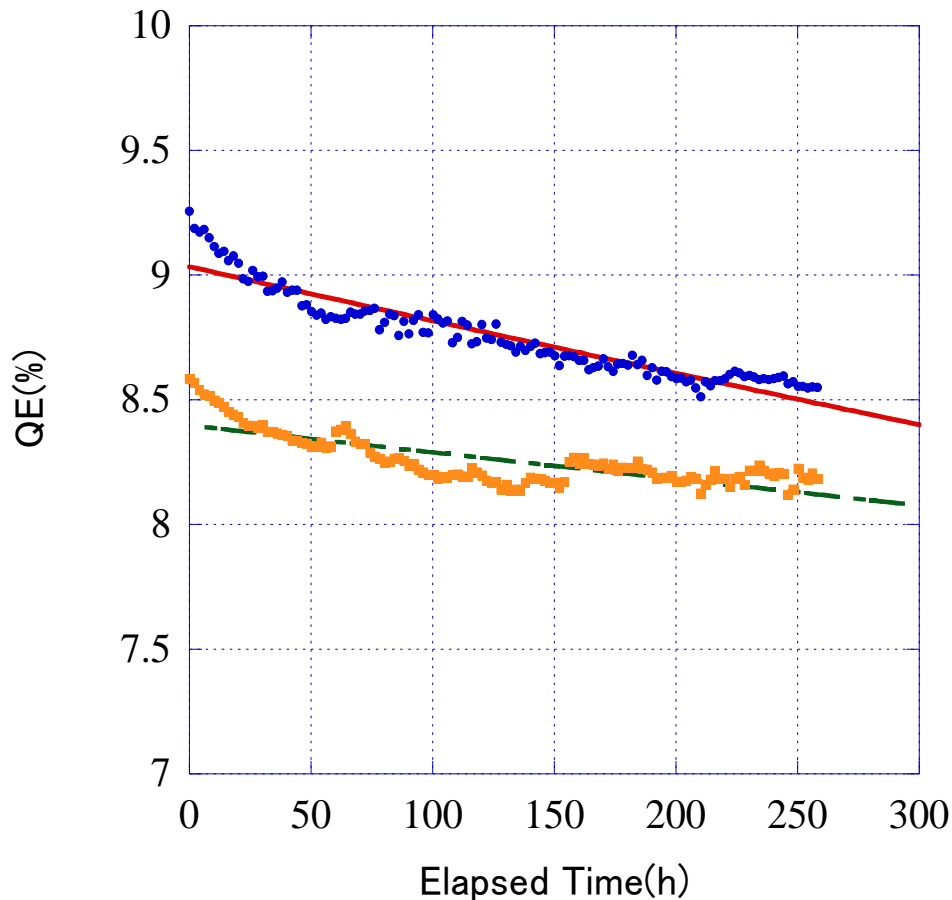
2014\_12\_22\_Time\_Lifetime\_Blue\_Point\_z=15



# QE @ 405nm (Near CI, discrete)



2014\_12\_22\_Time\_Lifetime\_Blue\_Point\_z=12



x=15, z=12

$$y = m2 * \exp(-x/m3)$$

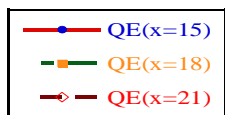
	値	エラー
m2	9.034	0.009888
m3	4124	126.67
カイ2乗	0.39812	NA
R	0.94445	NA

x=21, z=12

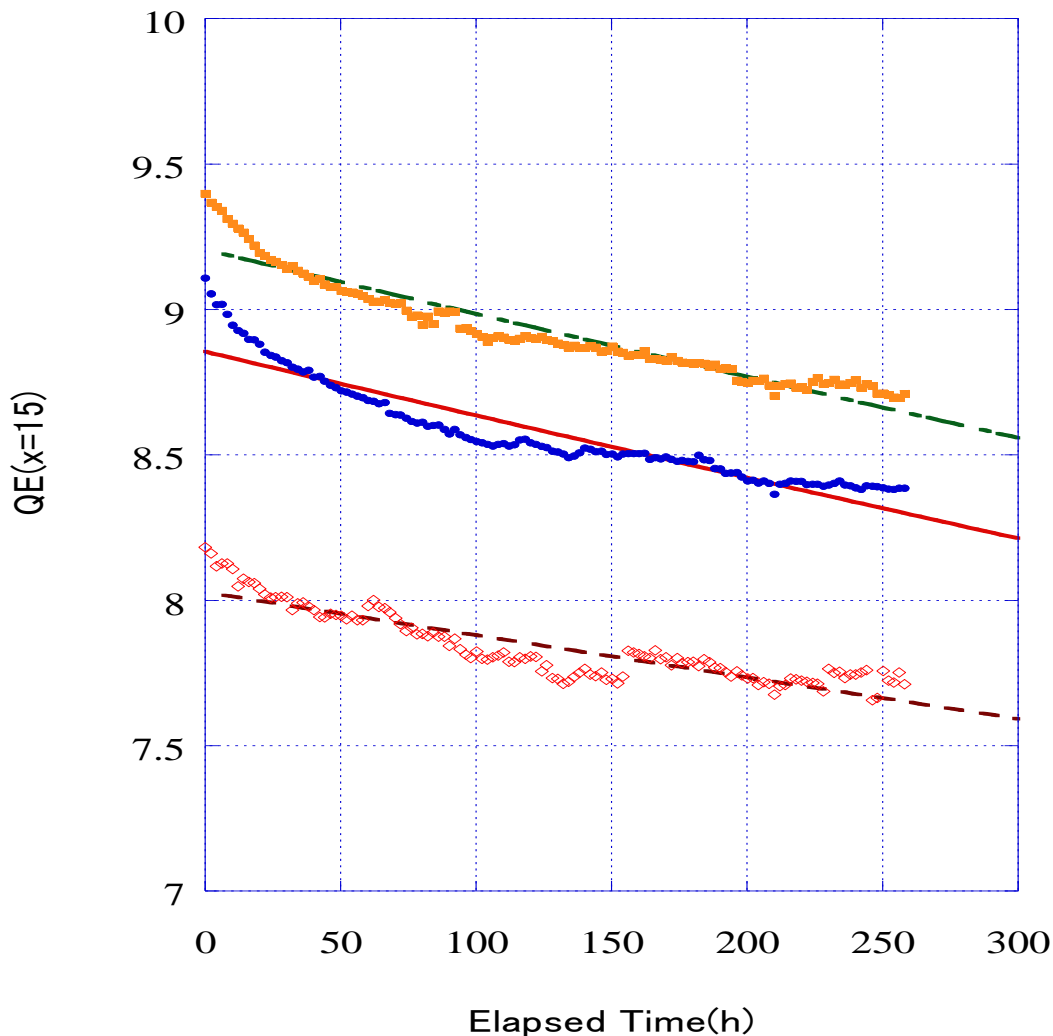
$$y = m2 * \exp(-x/m3)$$

	値	エラー
m2	8.3981	0.011195
m3	7688.1	532.18
カイ2乗	0.51764	NA
R	0.78665	NA

# QE @ 405nm (Near CI, discrete)



2014\_12\_22\_Time\_Lifetime\_Blue\_Point\_z=9



x=18,z=9

$y = m2 * \exp(-x/m3)$		
	値	エラー
m2	9.2058	0.0089843
m3	4117.2	112.58
カイ 2 乗	0.32865	NA
R	0.95521	NA

x=15,z=9

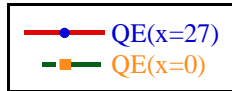
$y = m2 * \exp(-x/m3)$		
	値	エラー
m2	8.8551	0.011163
m3	3985.9	136.35
カイ 2 乗	0.50683	NA
R	0.93233	NA

x=21,z=9

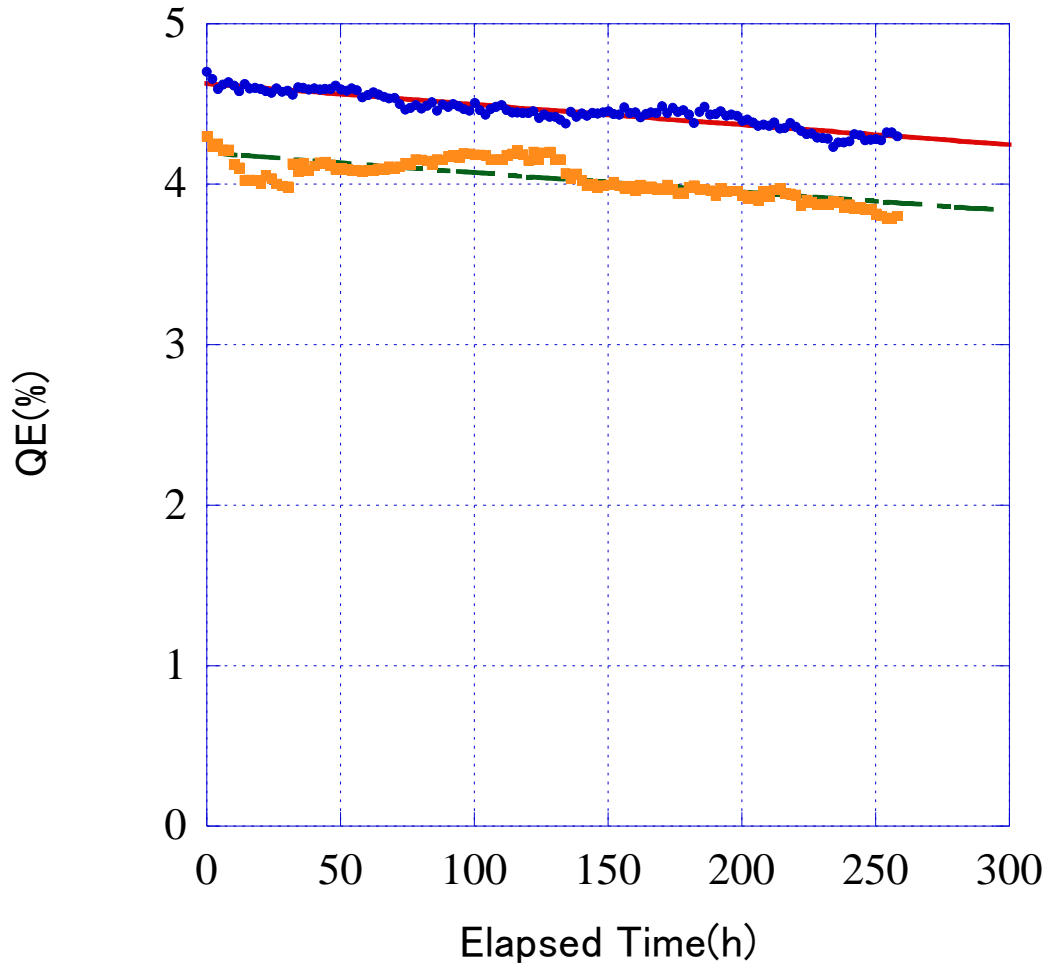
$y = m2 * \exp(-x/m3)$		
	値	エラー
m2	8.0282	0.0097011
m3	5381.5	237.24
カイ 2 乗	0.38596	NA
R	0.89455	NA



# QE @ 405nm (Far from CI, discrete)



2014\_12\_22\_Time\_Lifetime\_Blue\_Point\_z=12



$x=27, z=12$

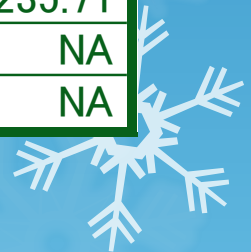
$y = m2 * \exp(-x/m3)$

	値	エラー
m2	4.6277	0.0064123
m3	3501.3	115.92
カイ2乗	0.16652	NA
R	0.93656	NA

$x=0, z=9$

$y = m2 * \exp(-x/m3)$

	値	エラー
m2	4.1964	0.01301
m3	3336.2	235.71
カイ2乗	0.68429	NA
R	0.7828	NA



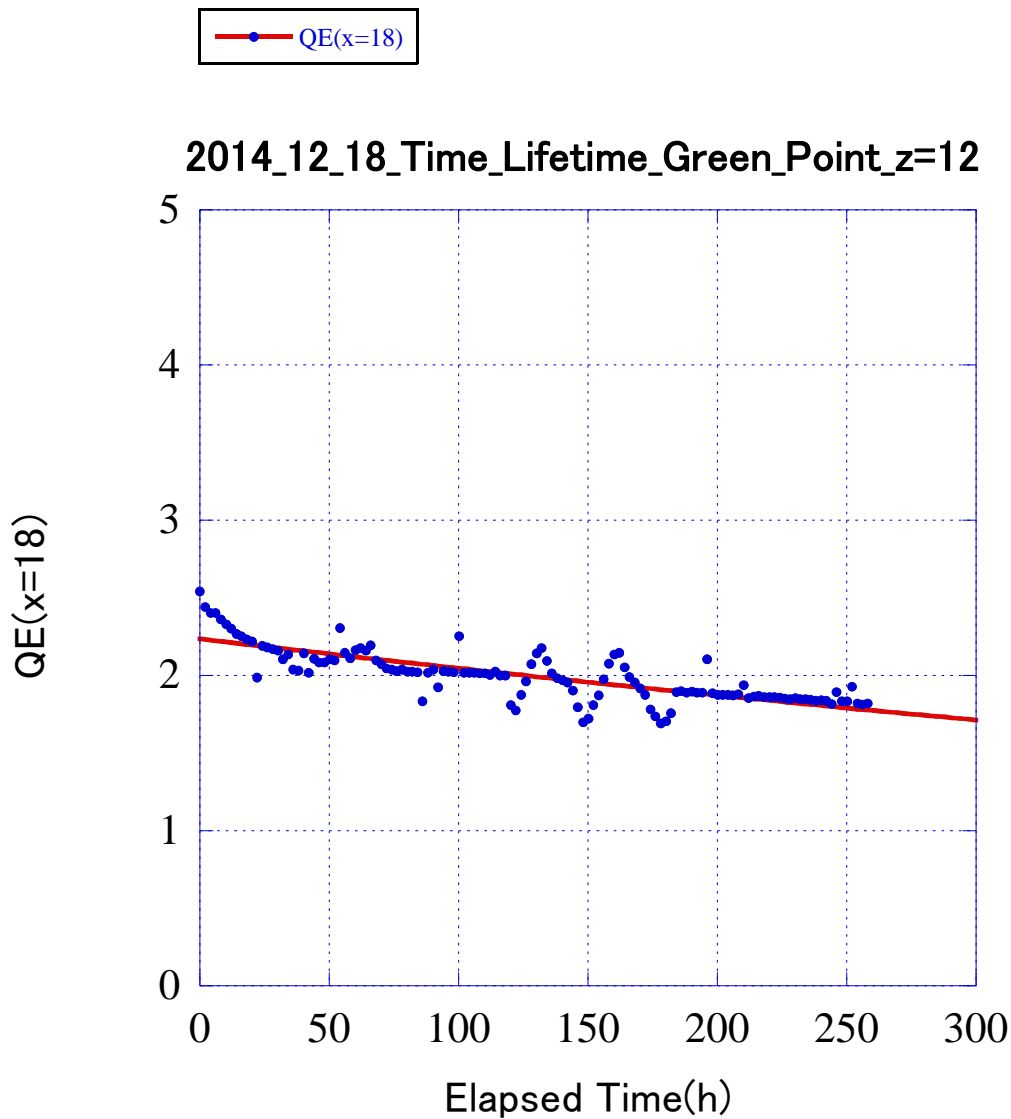
# 電荷量寿命(405nm)

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

## 時間寿命による補正

- 7688(hour)
  - 電荷量寿命 :  $\Theta = 3779(\text{C})$
  - 電荷密度寿命 :  $\Theta/0.627 = 6027\text{C}/\text{mm}^2$
- 3985(hour)
  - とともに負となる (時間とともに上昇)
- 5381(hour)
  - 電荷量寿命 :  $\Theta = 28136.5(\text{C})$
  - 電荷密度寿命 :  $\Theta/0.627 = 44874.9(\text{C}/\text{mm}^2)$

# QE @532nm (CI)



- $T = 1130 \pm 75$  h
- レーザーパワー変動  
未補正
- Darklife  
correction is not  
applied.

$$y = m2 * \exp(-x/m3)$$

	値	エラー
m2	2.2363	0.018659
m3	1126.6	75.322
カイ2乗	1.3092	NA
R	0.79605	NA

# QE@532nm (near CI, but discrete)



$x=18, z=9$

$y = m2 \cdot \exp(-x/m3)$		
	値	エラー
m2	2.2673	0.01813
m3	1160.8	76.493
カイ2乗	1.2399	NA
R	0.80098	NA



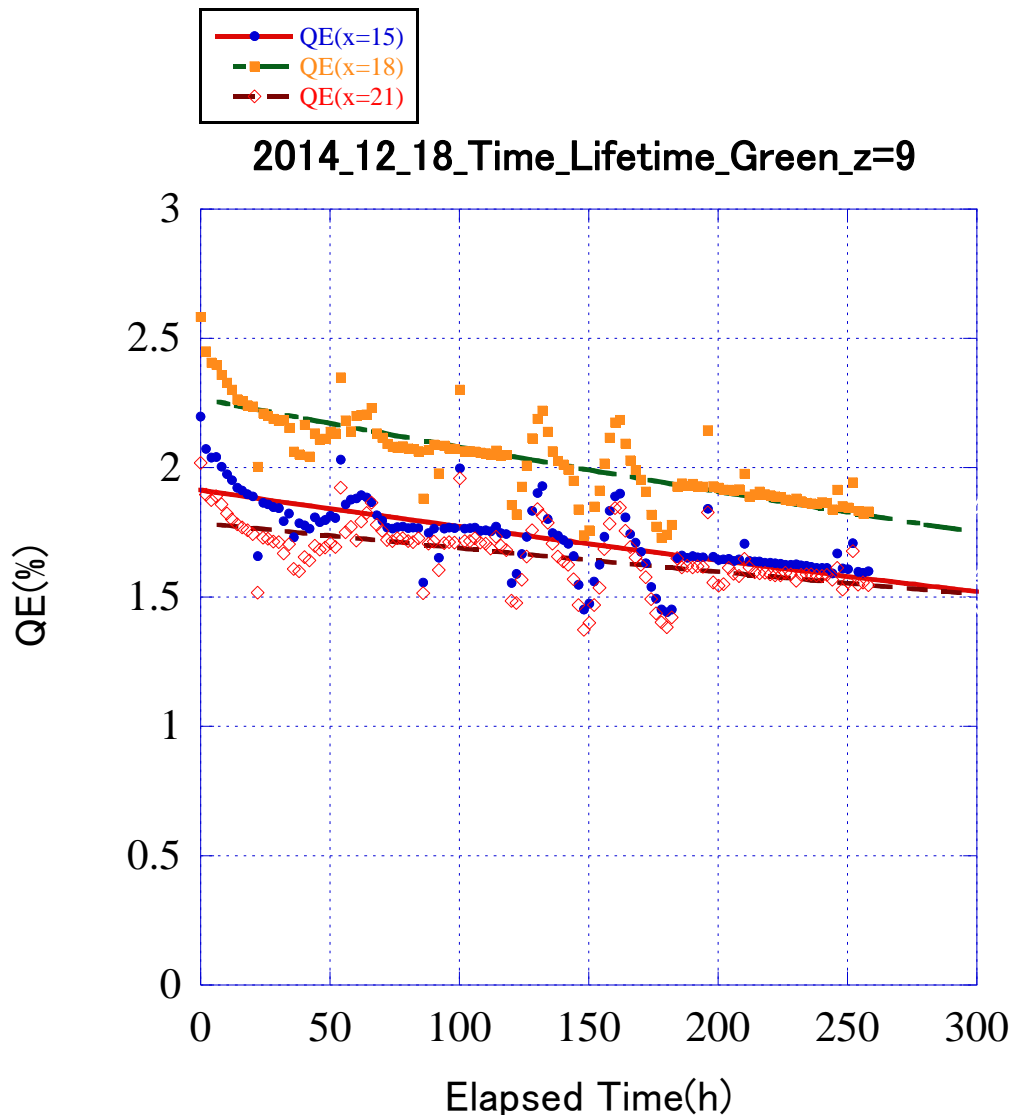
$x=15, z=9$

$y = m2 \cdot \exp(-x/m3)$		
	値	エラー
m2	1.9137	0.017548
m3	1306.7	110.42
カイ2乗	1.1753	NA
R	0.72148	NA

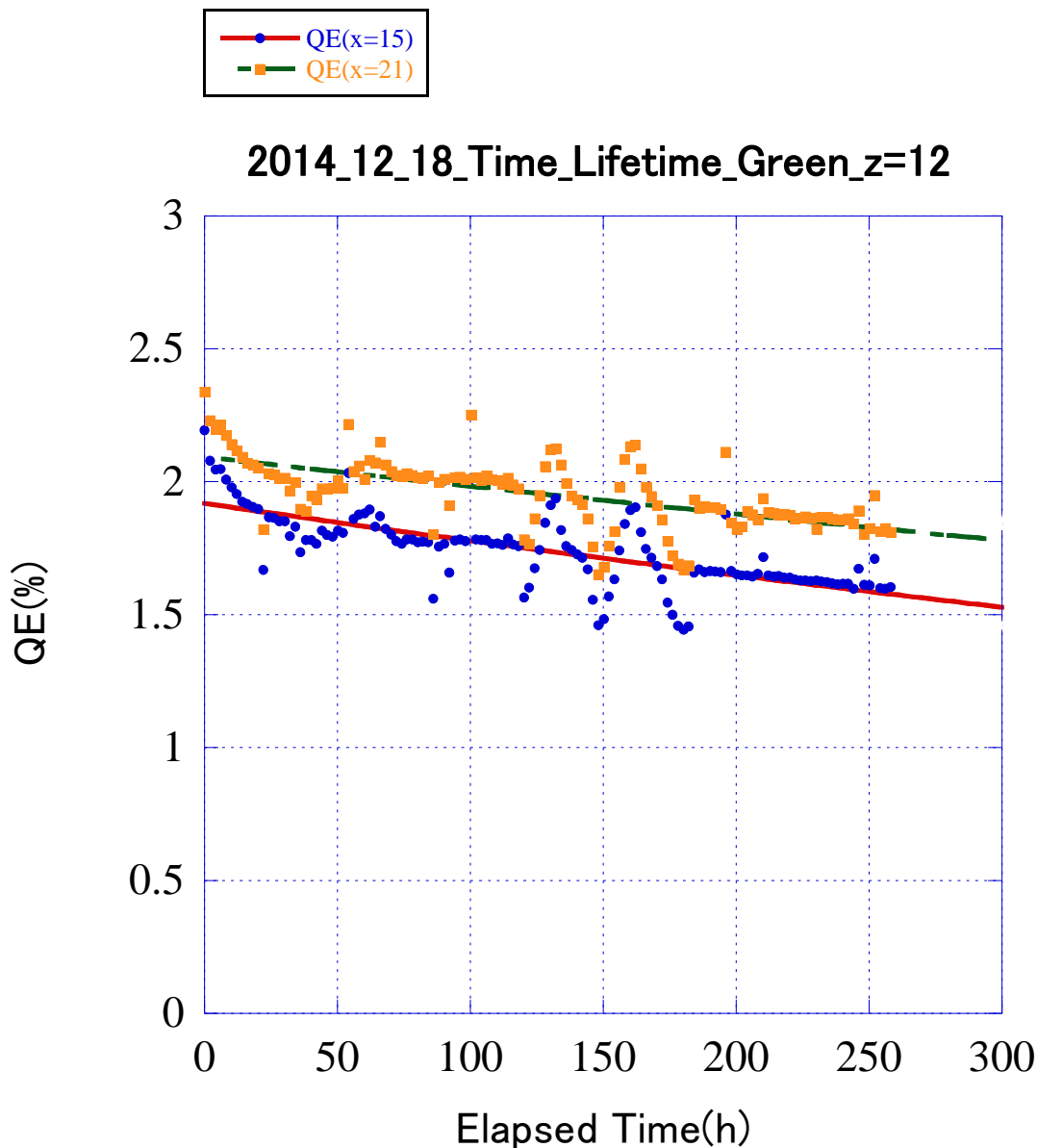


$x=21, z=9$

$y = m2 \cdot \exp(-x/m3)$		
	値	エラー
m2	1.7871	0.017805
m3	1786.6	221.11
カイ2乗	1.2409	NA
R	0.58076	NA



# QE@532nm (near CI, but discrete)



x=21, z=12

$$y = m2 * \exp(-x/m3)$$

	値	エラー
m2	2.0939	0.018225
m3	1846.1	205.97
カイ2乗	1.303	NA
R	0.62065	NA

x=15, z=12

$$y = m2 * \exp(-x/m3)$$

	値	エラー
m2	1.9187	0.017564
m3	1319	112.24
カイ2乗	1.1784	NA
R	0.7192	NA

# QE@532nm (near CI, but discrete)



$x=21, z=9$

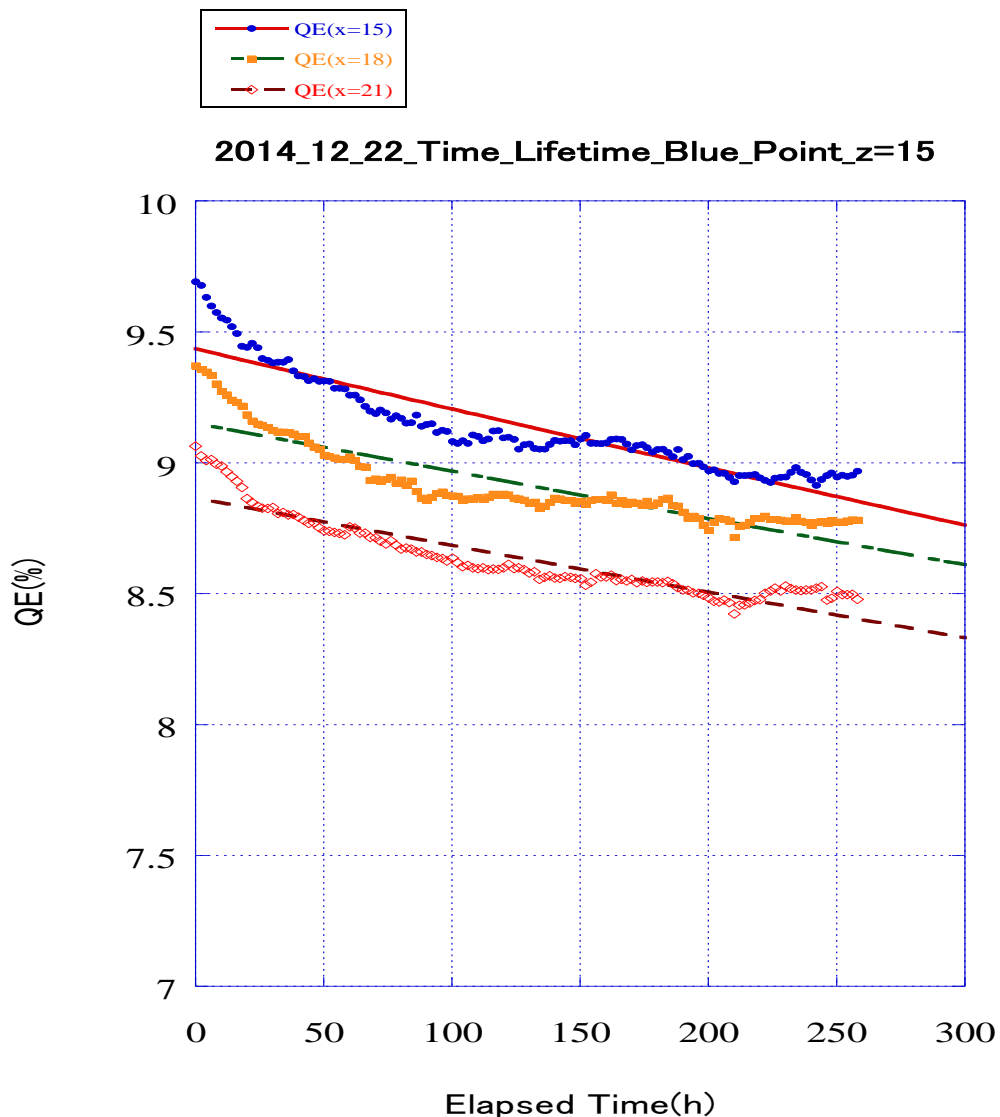
$y = m2 \cdot \exp(-x/m3)$		
	値	エラー
m2	2.1356	0.018513
m3	1894.4	215.82
カイ2乗	1.3469	NA
R	0.61197	NA

$x=18, z=9$

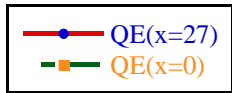
$y = m2 \cdot \exp(-x/m3)$		
	値	エラー
m2	2.2174	0.018359
m3	1136	75.965
カイ2乗	1.2686	NA
R	0.79644	NA

$x=15, z=9$

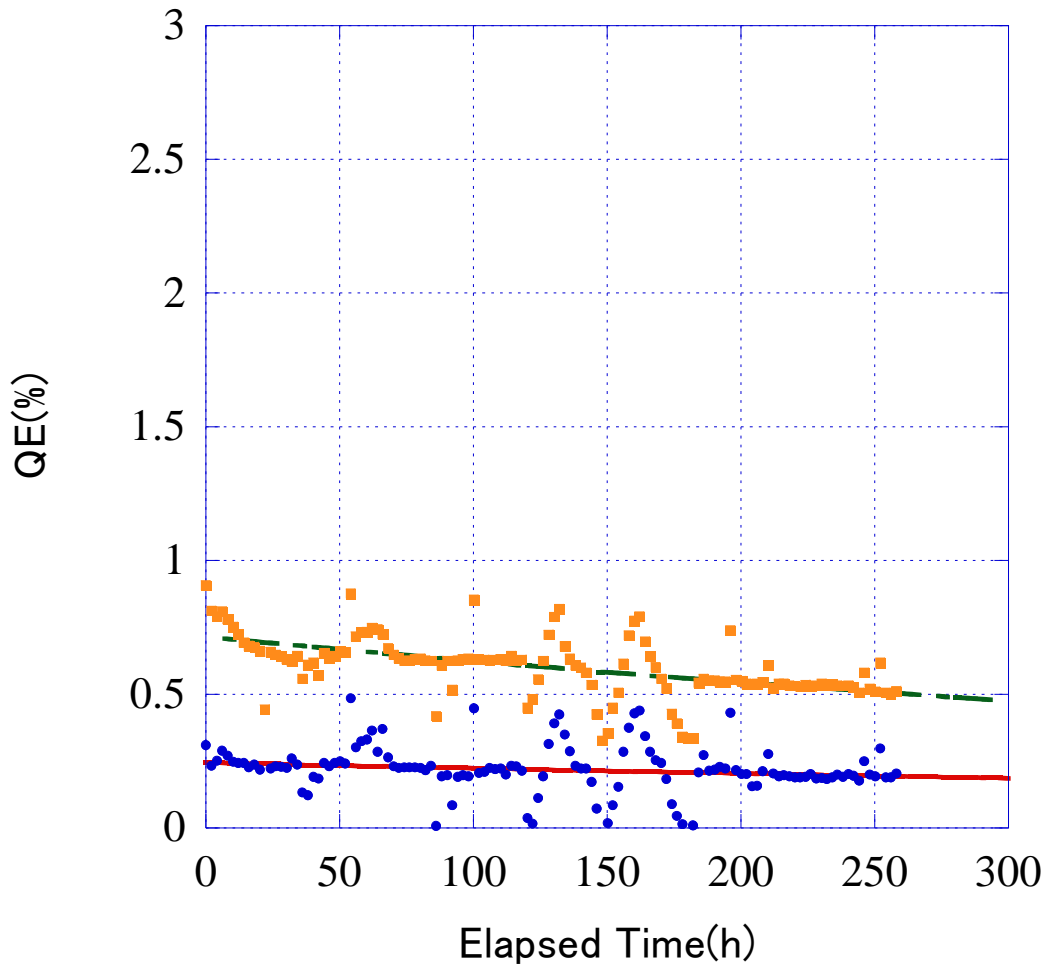
$y = m2 \cdot \exp(-x/m3)$		
	値	エラー
m2	1.9624	0.017786
m3	1313.7	110.28
カイ2乗	1.2081	NA
R	0.72386	NA



# QE@532nm (far from CI, discrete)



2014\_12\_18\_Time\_Lifetime\_Green\_Point\_z=12



$x=0, z=9$

$$y = m2 * \exp(-x/m3)$$

	値	エラー
m2	0.71563	0.017581
m3	734.42	97.514
カイ2乗	1.0983	NA
R	0.55412	NA

$x=27, z=12$

$$y = m2 * \exp(-x/m3)$$

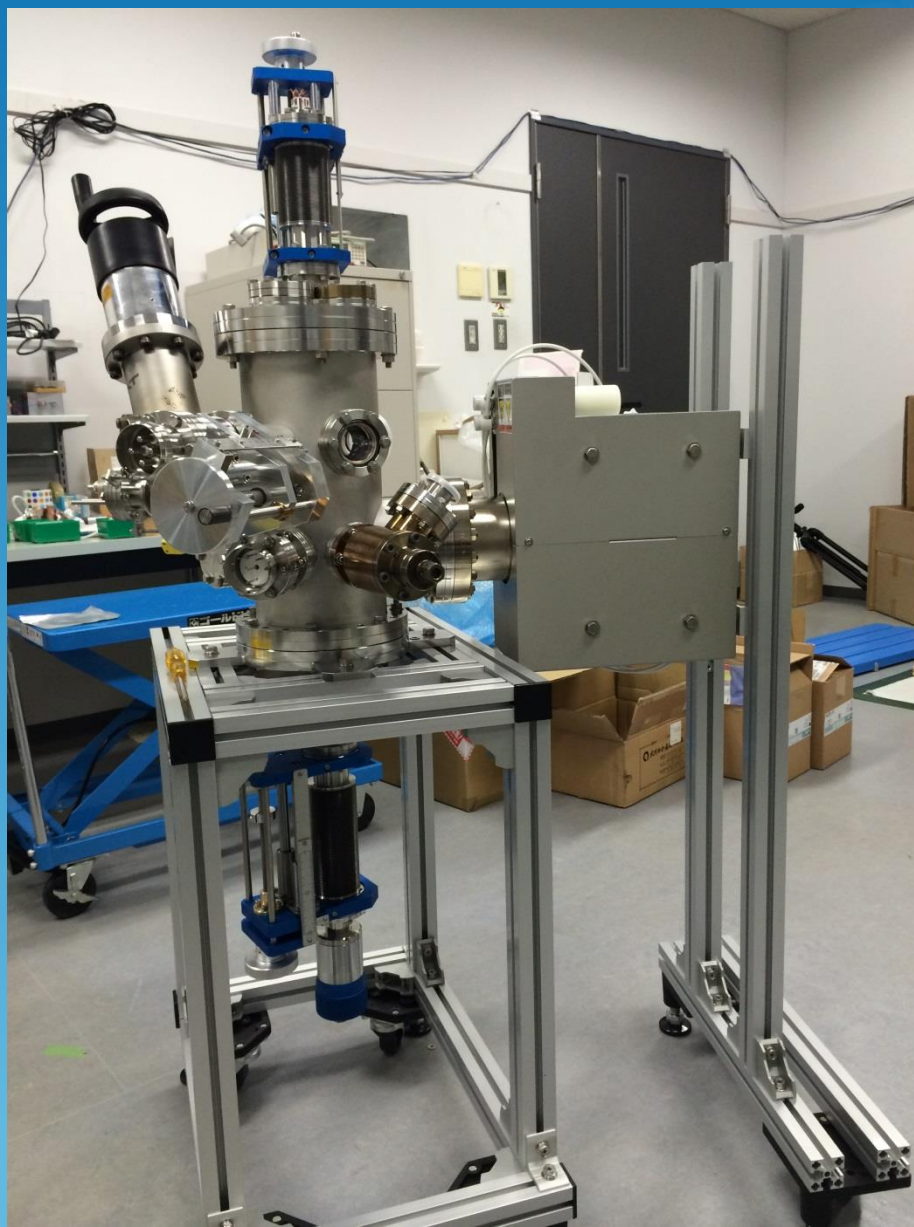
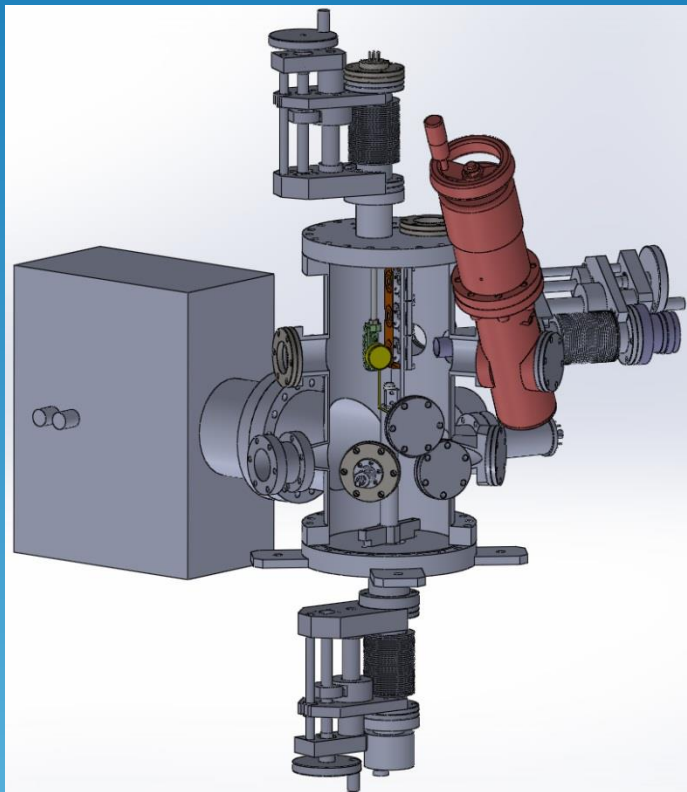
	値	エラー
m2	0.24488	0.017006
m3	1105.5	604.44
カイ2乗	1.0853	NA
R	0.15946	NA

# cERL実装試験

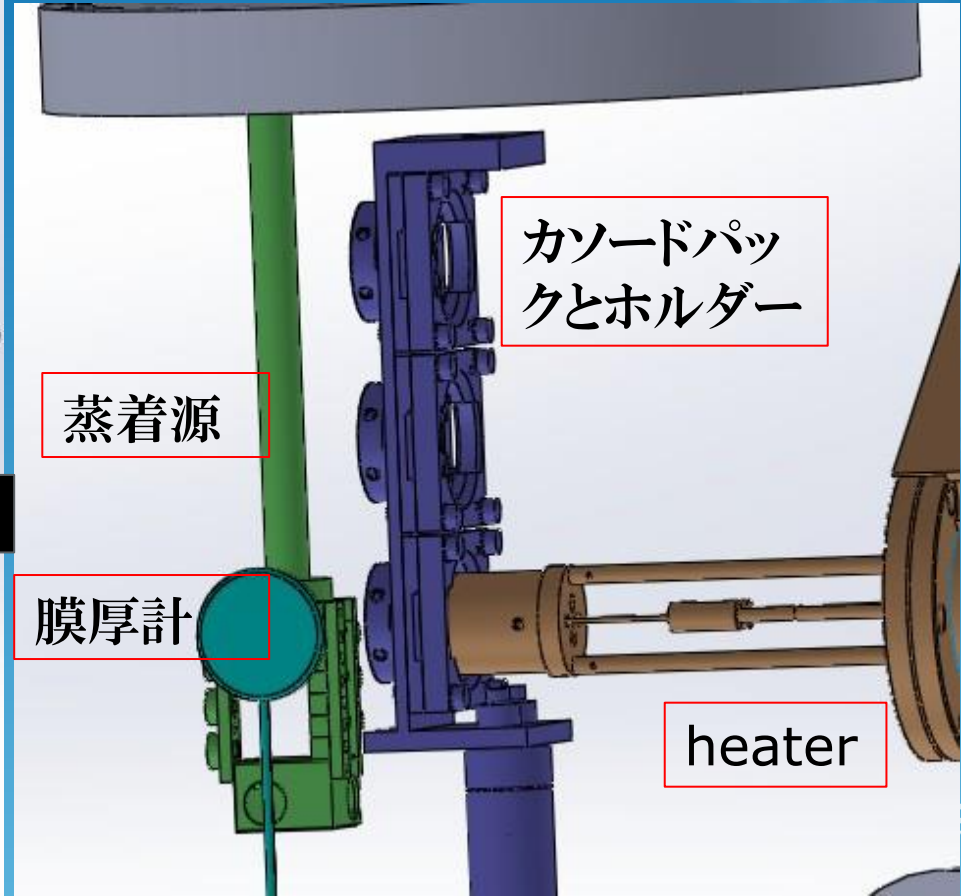
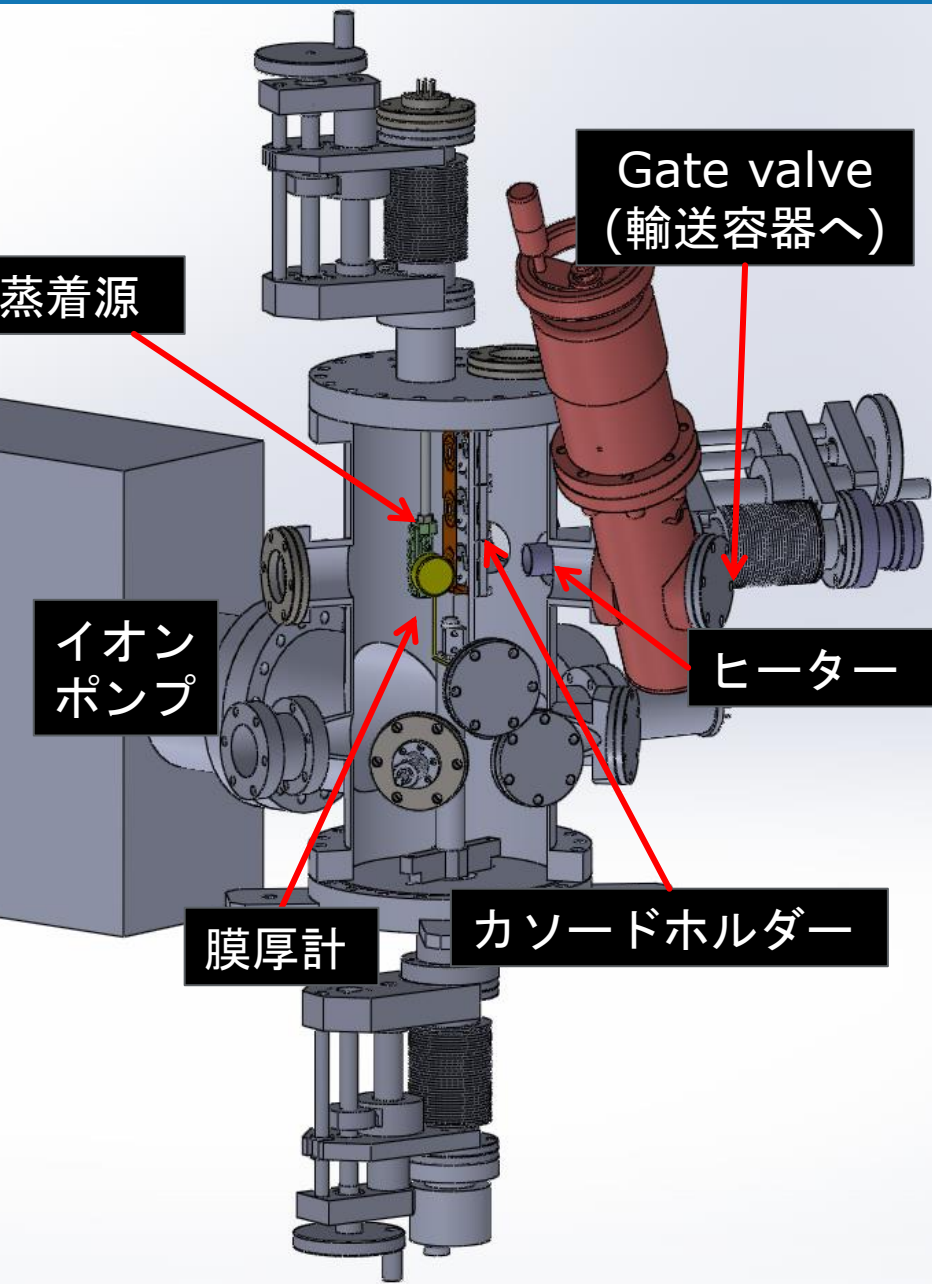
- マルチアルカリカソードをKEK-cERL(ERL実証器)で実証試験。
- 真空輸送容器を利用し、シールド外の蒸着装置で生成したカソードを加速器に実装。
- 真空輸送容器:KEK担当により製作。
- 広島大学は蒸着容器の製作を担当。



# 真空輸送容器対応蒸着装置

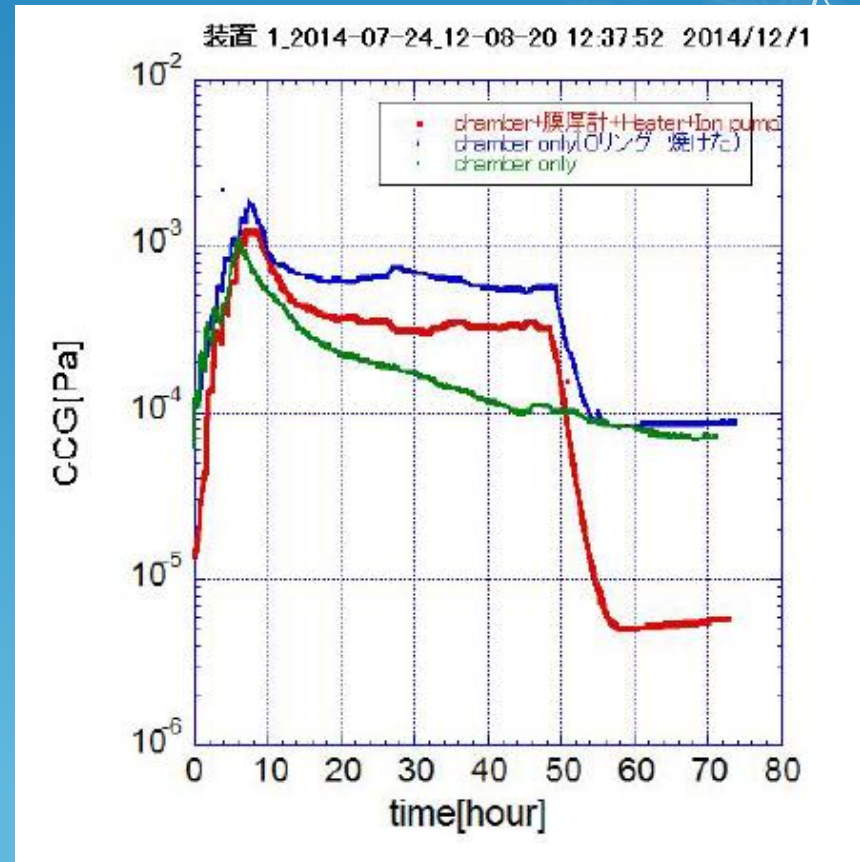
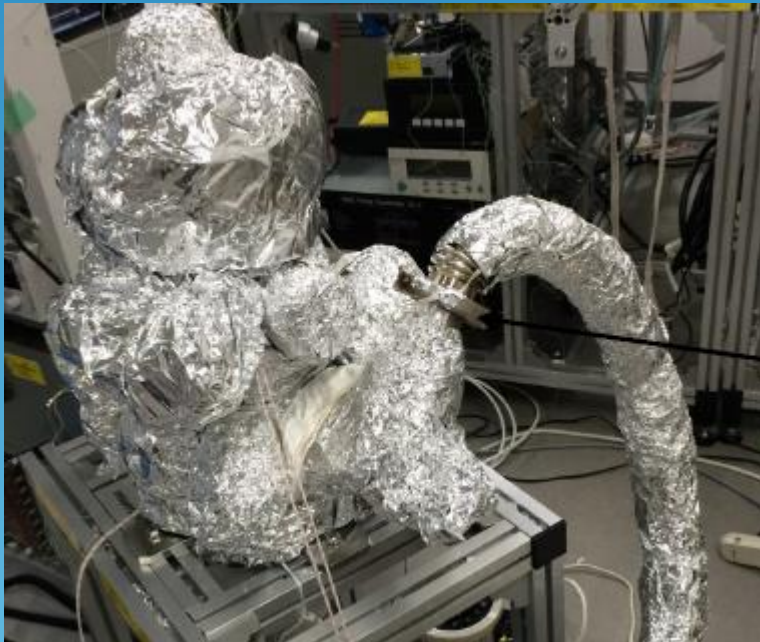


# cERL用蒸着槽



# cERL実装用蒸着装置の現状

- ベーキングを行っても真空の下がりが遅い
- バイトンリングがバルブ直下に装着されていることが判明。
- 取り外したところ、大きく改善。
- 現在立ち上げ作業中。



# 今後の予定 (cERL実装試験)

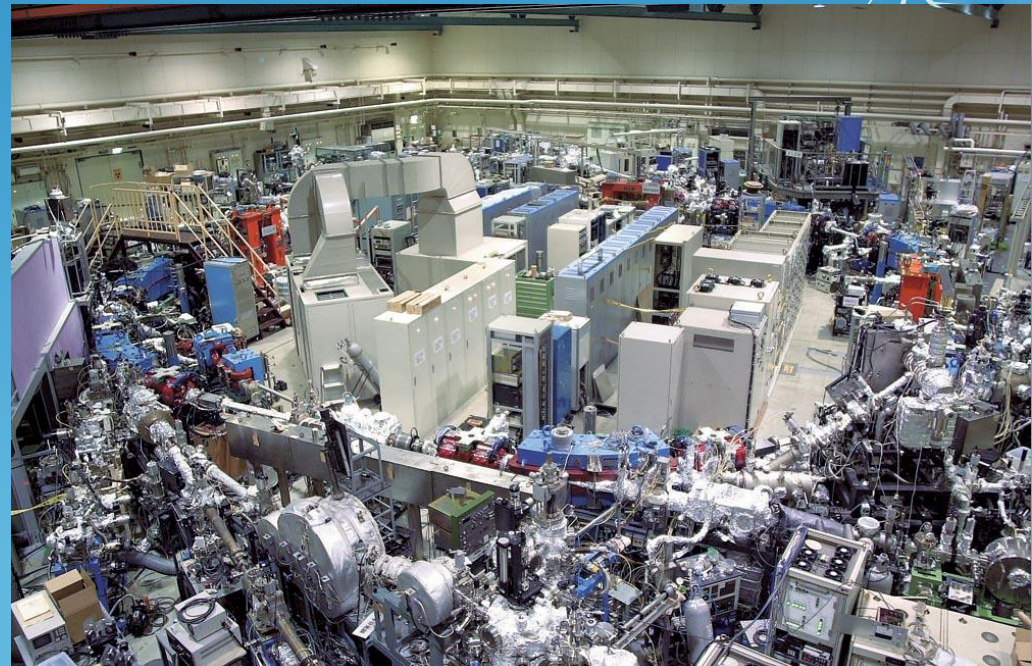
- 2015年一月より蒸着試験開始
  - 真空度 $10^{-9}$ Pa台で蒸着試験
  - 高量子効率、
  - 均一性、
  - 寿命試験、
  - 再現性、
  - 真空度依存性、
- 基板依存性のデータ取得
  - SUS, Si(100), Si(110), Si(111), Mo
- KEKに移送、cERLでの試験運転(2015?)



# 表面分析

清宮、許斐

- マルチアルカリカソードの生成条件の最適化のため、量子効率以外の指標が必要
- XPS/UPS, LEEDによる表面評価
  - XPS/UPS: 元素分析、結合状態分析
  - LEED: 結晶性分析
- UVSOR-BL2Bを利用



# 蒸着装置

イオンポンプ

蒸着源用Zステージ

レーザー光入射

基板の交換

粗排気AV

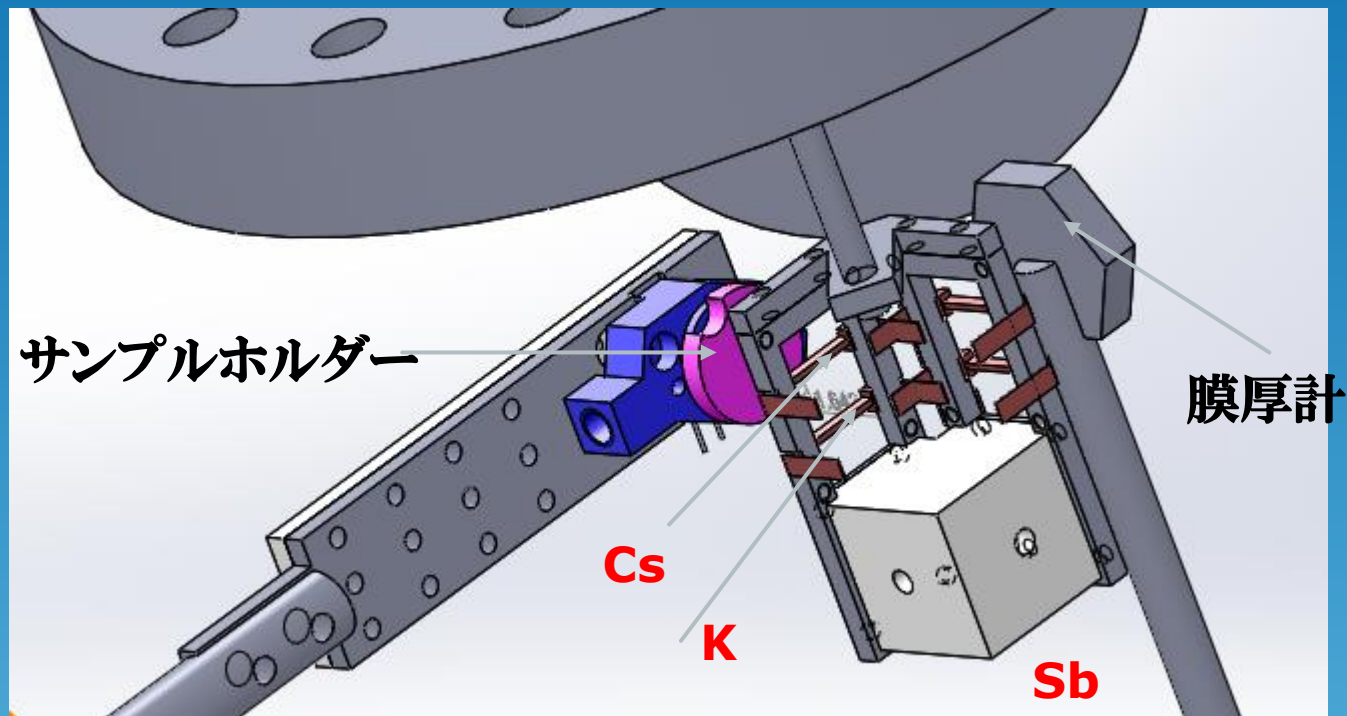
ビューポート

トランスファーロッド

サンプルホルダ



# 蒸着装置内部



蒸着装置(測定室とゲートバルブを介して接続)内で蒸着。  
サンプルホルダーを測定室にトランスファーロードで移動  
in-situに測定

# 表面分析用蒸着装置



蒸着源

Si(100)

カソードパック

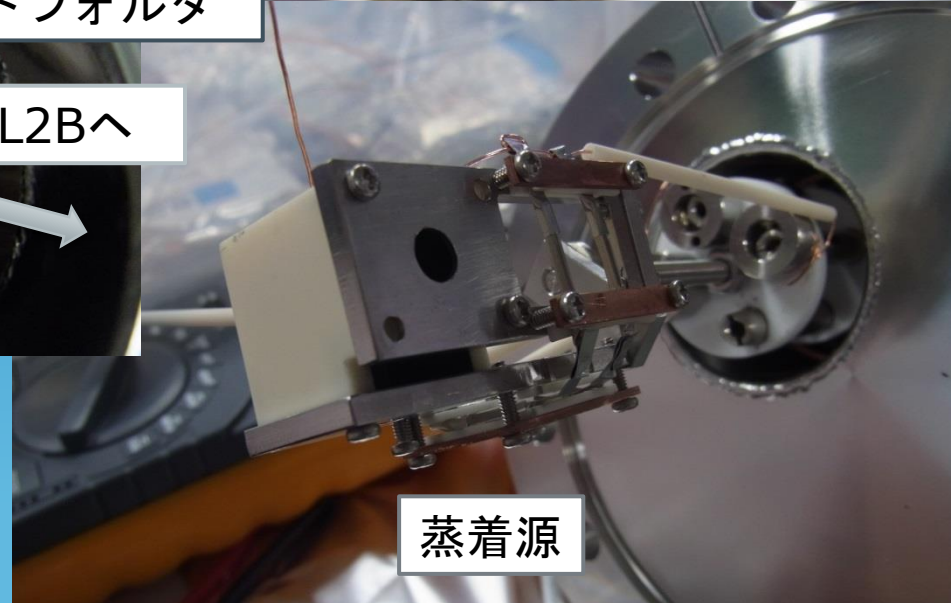
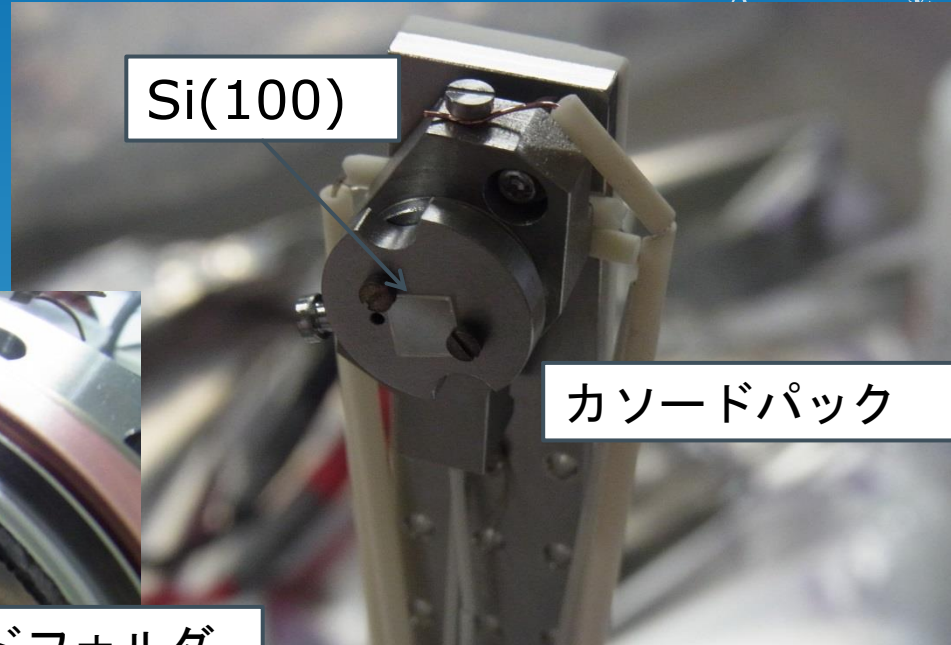
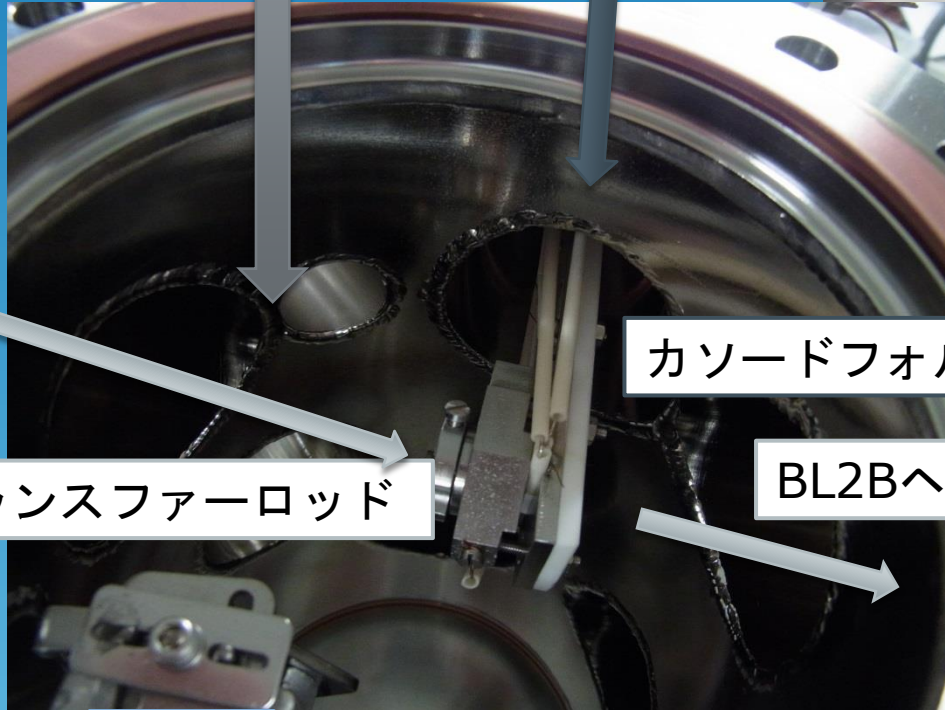
カソードフォルダ

トランスファーロッド

BL2Bへ

膜厚計

蒸着源



# UPS experiment at UVSOR

- UVSOR BL2B (25 – 250 eV UPS, XPS, LEED) にて、UPS測定を実施。
- CsK<sub>2</sub>Sb蒸着チャンバーを構築。
- Sb, Cs, K, 蒸着源、基板温度制御(含む、加熱洗浄)
- 405nm, 530nm laser for QE measurement.
- 排気系:IP(501) + NEG (2001).
- ベース圧力:5.0e-8Pa.(セラミックシート除去、ロッドの焼き不足?)

# UVSOR BL2B-CsKSb蒸着装置現状

- LEEDは準備中。
- XPS、UPS (UVSOR BL2B) は使用可能。
- 7/22 UPSデータ取得をめざし、初のビームタイム。
  - BL2Bの調整不足。SRのフラックスが不足。
  - 蒸着装置の調整不足により、QE確認できず。またサンプル移送に失敗し、データとれず。
- 9/22、二回目のビームタイム。
  - BL2Bの調整が進展。
  - サンプル移送に問題がないことを確認。
  - CsKSbのUPS測定に成功。
- 12/8、三回目のビームタイム。
  - BL2Bの真空トラブルによりビームタイムは3月に先送り。

# Experiment Procedure

- CsK<sub>2</sub>Sb is formed as thin film on Au thin-film on Si baseplate.
- Evaporation process.
  - 10nm Sb.
  - K giving a peak QE.
  - Cs giving a peak QE.
- For each evaporations, UPS spectra were taken.

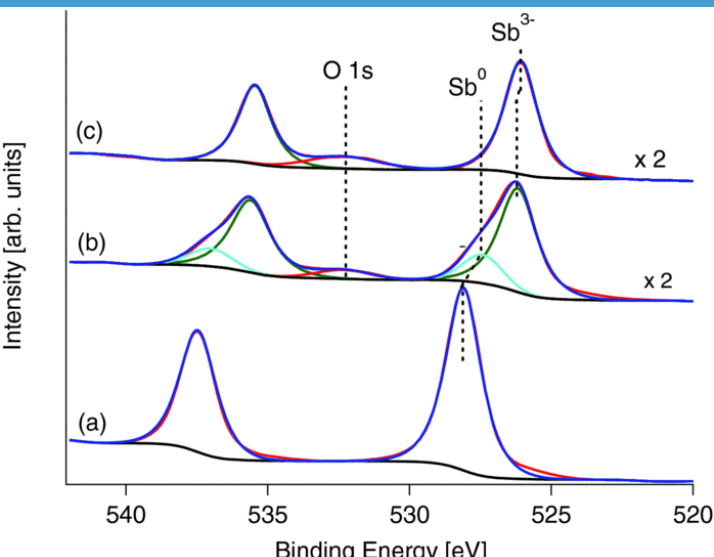
# Binding Energy (eV)



Element	K 1s	L <sub>1</sub> 2s	L <sub>2</sub> 2p <sub>1/2</sub>	L <sub>3</sub> 2p <sub>3/2</sub>	M <sub>1</sub> 3s	M <sub>2</sub> 3p <sub>1/2</sub>	M <sub>3</sub> 3p <sub>3/2</sub>
O (8)	543.1	41.6					
Si (14)	1839	149.7	99.82	99.42			
K (19)	3608.4	378.6	297.3	294.6	34.8	18.3	18.3

Element	M <sub>1</sub> 3s	M <sub>2</sub> 3p <sub>1/2</sub>	M <sub>3</sub> 3p <sub>3/2</sub>	M <sub>4</sub> 3d <sub>3/2</sub>	M <sub>5</sub> 3d <sub>5/2</sub>	N <sub>1</sub> 4s	N <sub>2</sub> 4p <sub>1/2</sub>
Sb (51)	946	812.7	766.4	537.5	528.2	153.2	95.6
Cs (55)	1211	1071	1003	740.5	726.6	232.3	172.4

Element	N <sub>3</sub> 4p <sub>3/2</sub>	N <sub>4</sub> 4d <sub>3/2</sub>	M <sub>5</sub> 4d <sub>5/2</sub>	O <sub>1</sub> 5s	O <sub>2</sub> 5p <sub>1/2</sub>	O <sub>3</sub> 5p <sub>3/2</sub>
Sb (51)	95.6	33.3	32.1			
Cs (55)	161.	79.8	77.5	22.7	14.2	12.



BL2B : 6-55 nm; 24-205 eV

解像度  $\Delta E/E$  : 2000~8000 (回折格子依存)

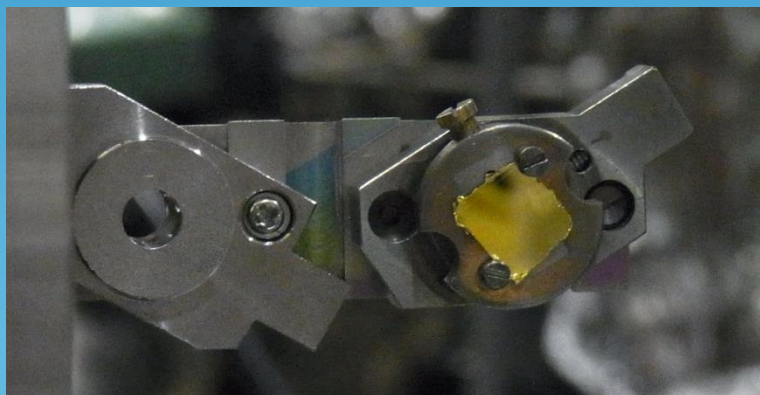
MgK $\alpha$  : 1253.60 eV + AlK $\alpha$  : 1486.70 eV

# ビームタイム風景

Puck is set for  
UPS measurement.



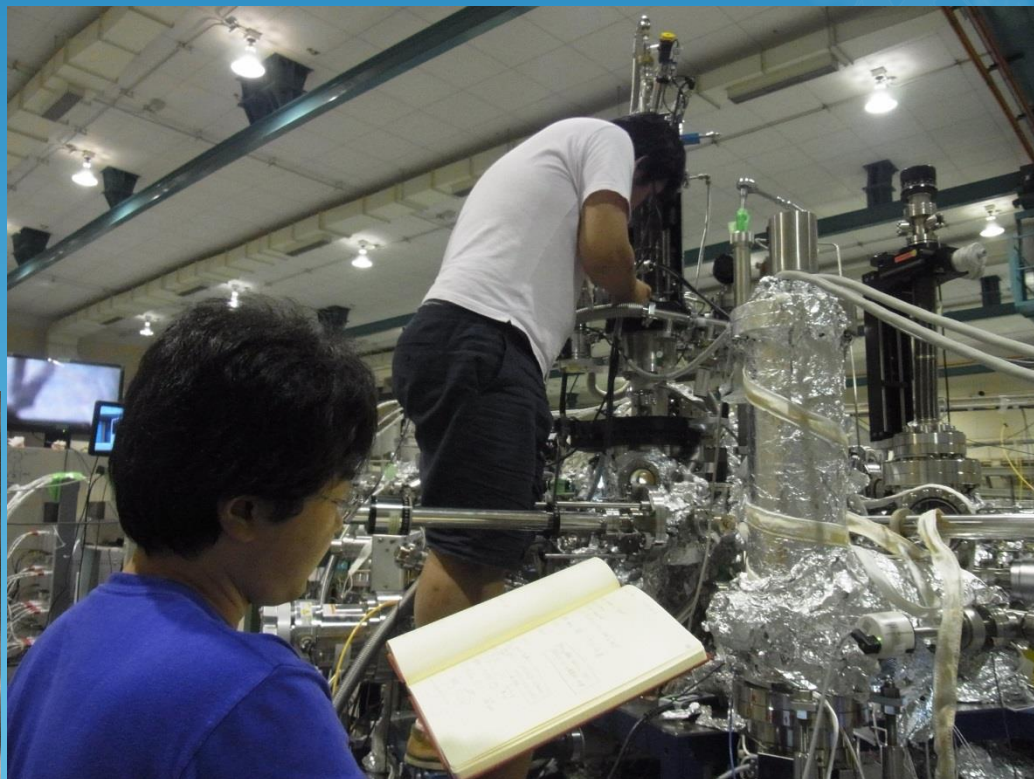
Puck is loaded.



Au evaporation on Si  
Set in sample holder  
(puck)



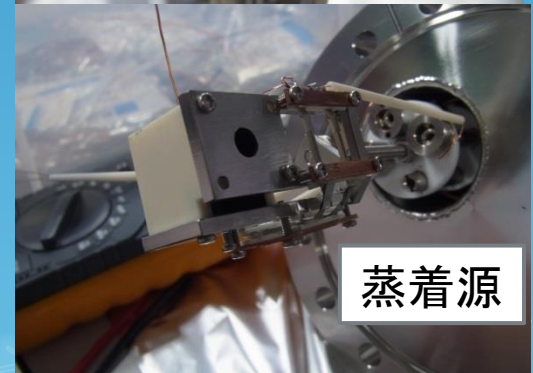
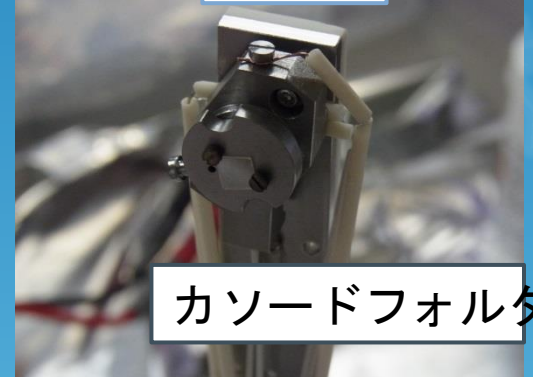
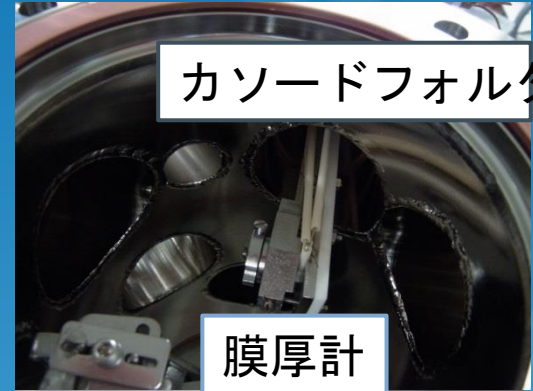
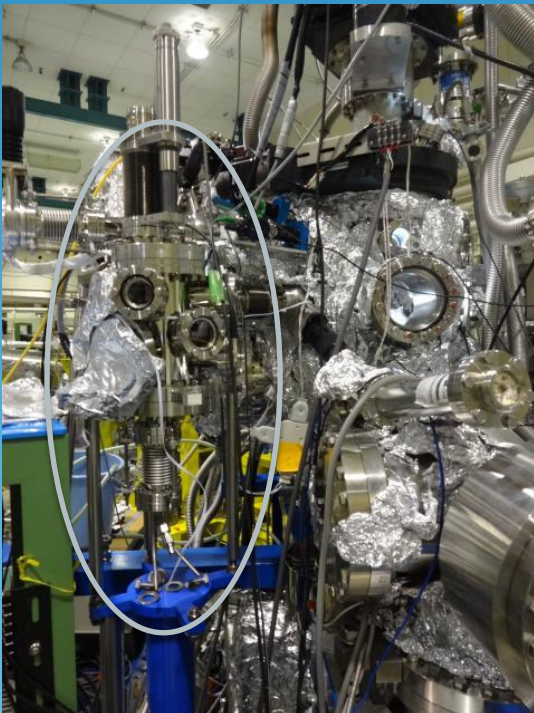
Two prominent young  
researchers.



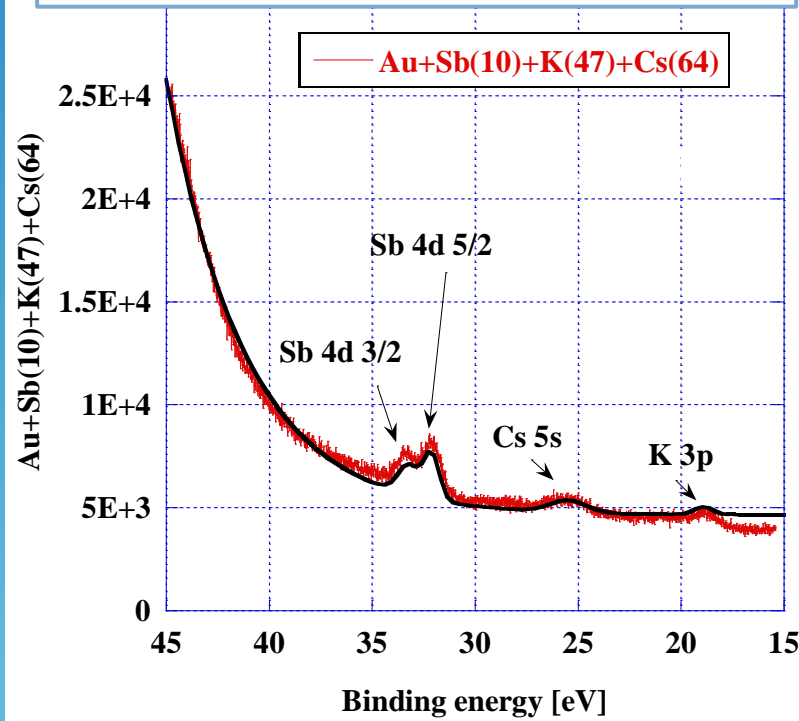
# 光電子分光解析



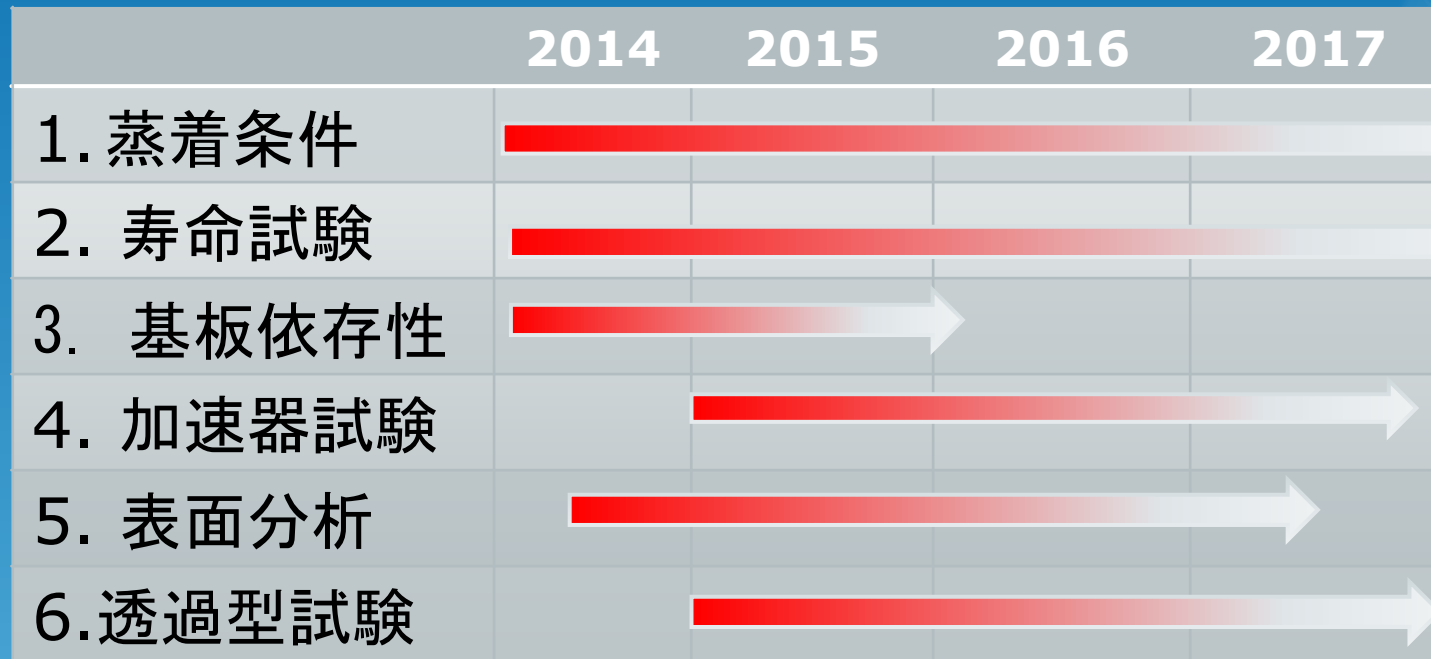
- 電子のMFPのユニバーサルカーブを用いた深さ方向の元素分布解析。
- 劣化プロセスの観察



Sb : K : Cs = 3.8 : 1 : 1.75



# スケジュール



# Summary

- 広島大でCsKSbカソードの蒸着技術確立。より精度の高い寿命の測定。
- 連続照射、QEマッピング、波長切り替えのできるシステムが稼働。
- 概ね以前の結果を再現。
- cERLでの実装準備をすすめている。2015年度試験になんとか間に合わせたい。
- UVSORでのUPSデータを取得。次回ビームタイムは2015年3月。