

# 液体キセノングループ報告

グループ内レビュー、2009年4月9日、KEK

田内利明

KEK：冷凍・純化システム、PMTシステム、TPC、テスト

田内利明、真木晶弘、春山富義、田中秀治、三原智、佐伯学行  
笠見勝裕(冷凍システム構築)、鈴木祥仁 (モニター:Labview)

佐賀大：TPC、TPC/PETシミュレーション、テスト

杉山 晃、東貴俊 (D2)

東大：TPCテスト

森研究室、金子大輔 (M2)

放医研：PETとしての性能仕様とシミュレーション

熊田雅之、富谷武浩、寅松千枝

横浜国大：液体キセノン基本特性

中村正吾

協力支援：KEK素核研回路室、田中真伸氏

レビュワー：宮島光弘氏 (早稲田大)、海野義信 (KEK)

# 1. 投稿論文

なし

# 2. 学会発表等

- (1) 平成21年3月27-30日、日本物理学会第64回年次大会（予定）  
金子大輔（東大素セ） 『次世代型PETに向けたLXeTPCのR&D』  
東貴俊（佐賀大理工） 『液体キセノンTPCで用いるフロントエンドエレクトロニクスのためのASICデザイン』
- (2) 平成21年3月12-17日、TIPP09, ポスターセッション  
金子大輔 "Test of liquid xenon TPC for PET application"(Bio.Medic.Mat.)  
東貴俊 "ASIC design and fabrication for front end electronics of liquid xenon TPC"(FrontEnd)
- (3) 平成20(2008)年1月25日、TXテクノロジー・ショーケース・イン・つくば 2008のポスターセッション
- (4) 平成19(2007)年7月30日、次世代PET研究会  
真木晶弘 (KEK) 『液体キセノンTPC-PET』
- (5) 平成19(2007)年3月2日、新技術説明会 (JST主催)  
田内利明 (KEK) 『次世代PET - 液体キセノンタイムプロジェクトンチェンバー (TPC)を用いたTXePET』 ; 特許出願番号: 2007-035703

### 3. 学位取得

平成21年2月、金子大輔、修士論文、東京大学、『次世代PETに向けた液体キセノンTPCの研究開発』

### 4. 外部資金獲得状況

2009年度 科研費申請中（基盤B, 医療分野） **不採択**

研究課題：PET用液体キセノンTPC・ガンマ線検出器の開発研究

# 2008年度計画（予算承認後）

## 1. TPCの基本性能測定

現在の真空テスト容器とプロトタイプ（5cmドリフト、PMT2本）を使用して、シンチレーション光そして電荷シグナルの基本的測定方法の確立を行う。液体キセノンの純化方法の確立も行う。

## 3. エレクトロニクスの基本設計

エレクトロニクスシステムグループの協力の下に、フロントエンドASICチップを設計・製作を行う。

## 4. TXePET シミュレーション（GATE, 性能評価）

- 放医研メンバー？、新人？

# 測定器開発室レビュー(1/27, 2009)

## 宮島さんからのアドバイス

### 1. 次回の実験提案

- Gap : 1cm
- Pressure : Range of  $\alpha = 1\text{cm}$
- Source :  $\alpha$  と  $\gamma$
- 実験手順
  - ガス状態で、飽和の確認と  $\alpha$  線の波高スペクトル  
矩形分布から Amp 系の簡単 (2点) な較正 -  $0.6E_{\alpha}$  to  $E_{\alpha}$
  - ガスを除いて、真空を約  $1 \times 10^{-5}$  Pa
  - 液化 ; できたら早く、純度の点
  - 電荷信号  
ガスで決めた較正值から電荷量を見る
    - $\alpha$  :  $0.05 E_{\alpha}$
    - $\gamma$  :  $E_{\gamma}$
- 実験 (2月中に出来たら)
- 液化する前に、ガスの状態で循環・純化したほうがよい (キセノンガスでTPCなどの検出器システムを洗浄する)。そのとき、できればベーキングを行う (PMTなどにより低温でも価値があると思われる)。

### 2. 開発項目

以下の2つの項目の開発も行うこと

- 真空・高圧 (ガス圧) 用の100KV耐圧のフィードスルーコネクタ
- 真空・高圧 (ガス圧) 用の多芯フィードスルーコネクタ

# 海野さんからのアドバイス

ASICチップの低温 (-100°C) 特性のシミュレーションも行うこと。

## その他

Q：メンバーのFTEはそれぞれいくらか？

C：もし、スタッフのFTEが少ないとき、当初目的を遂行できないのではないか。一般的に、そのような場合、測定器開発室からの支援は不適となる。

Q：純度モニターをすべきである。ガスクロ等で少なくともppmレベルを調べること。

Q：TPCのない最も簡単なPMTのみの検出器で、シンチレーション光による純度の測定をすべきではないか。

Q：やはり、液化速度を1時間程度にすべきと思う。測定器の入れ替えや純度を保つ上でも。

Q：シンチレーション光と電離電荷とで、不純物の影響は同じであるのか。

A：前者は水による175nmの光の吸収、後者は酸素などの不純物に感度がある。ただし、使用しているゲッターはこれらものを同時に除去し総不純物の量を（仕様で）ppbにする。

Q：Pre-Ampが低温 (-100°C) で正常に動作しているのか。

A：使用しているA250（AMPTEK製）のカタログでは-55°Cまで保証されている。液が溜まっている状態で、テストパルス入力により動作を確認している。このとき、200MHzノイズはローパスフィルターで1/10の±2mVとしている。

Q：次回の実験でFETやfeedback C/Rを分離することとなっているが、ノイズ等問題とならないのか（すでに確かめられている今の状態のほうがよいのではないか）

A：現在、その配線で試験を行っている。正常の動作を確認して使用する。この変更は200MHzのノイズを除去できるものであり、少なくともよい性能が得られる。

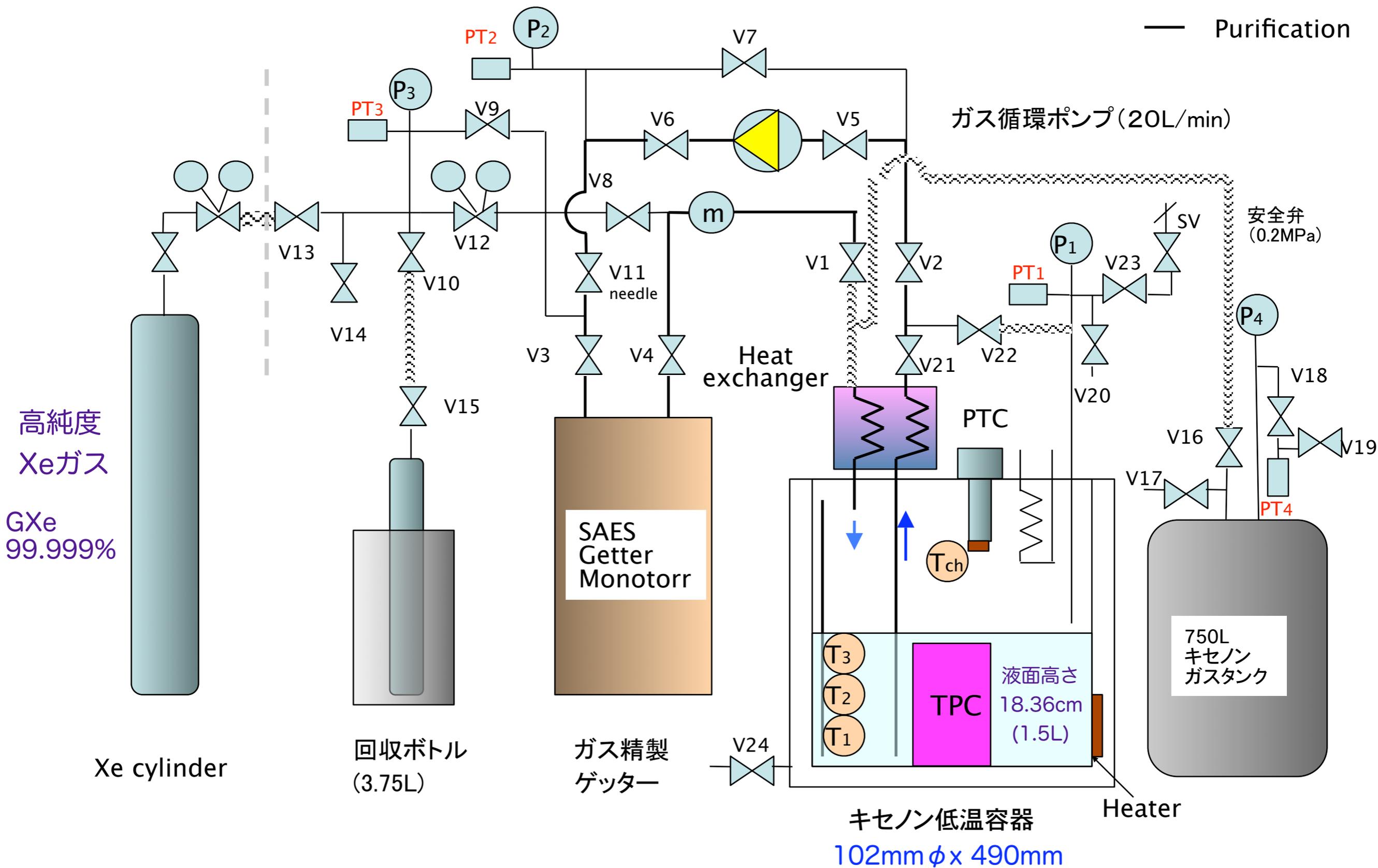
Q：低温でも使用できるASICチップの開発を行っているが、先ず、抵抗、コンデンサー等のコンポーネントの低温特性を測定すべきではないか。

A：エレクトロニクスシステムとしての低温特性を実際のチップで測定したい。もし、十分な性能が得られないなら、ASICチップを常温に置き、シグナルをケーブルで取り出す従来方式を用いることが出来る。

C：各コンポーネントの低温特性を入れてシミュレーション結果を示してほしい。

# 液化・純化システム

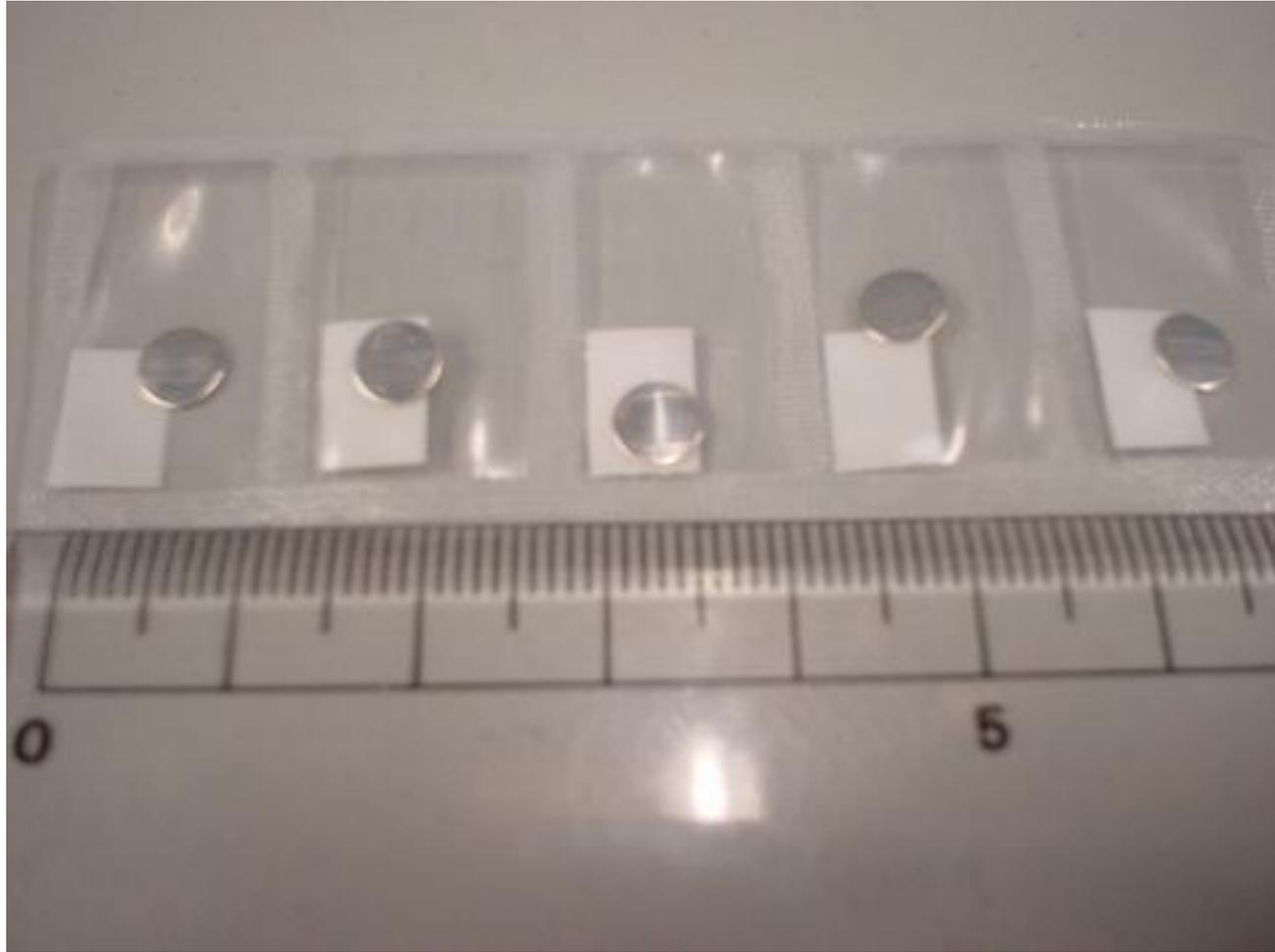
オイルフリー・ダイアフラムポンプ（エノモト）によるガス循環精製



# α線源

Am-241, 5.49MeV, 200 Bq

液体キセノン中使用

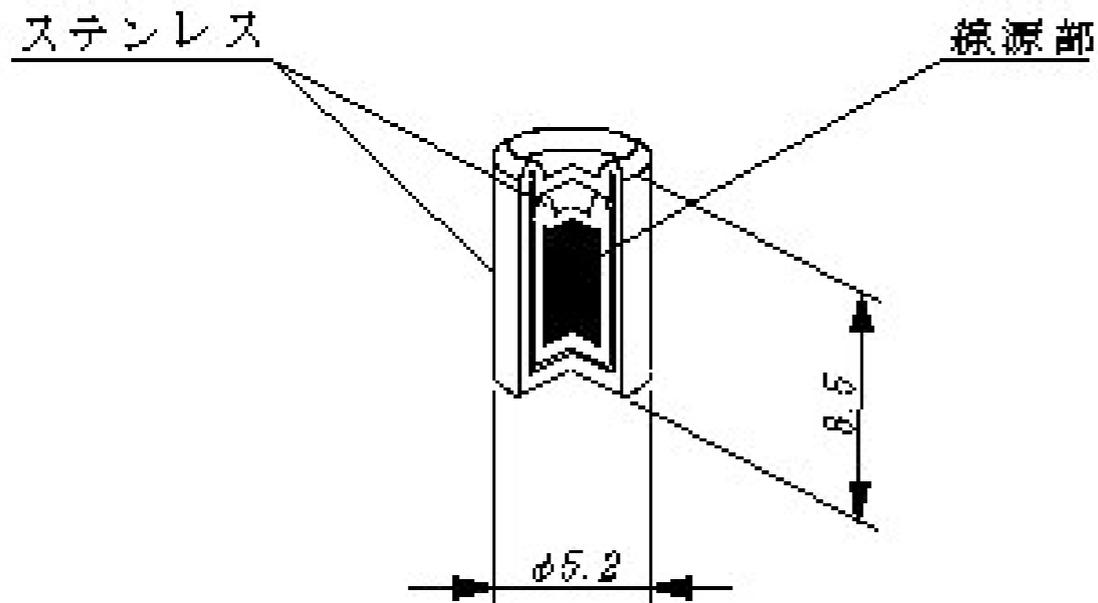


『MEGではこのプレートの裏側にネジをエポキシ接着剤(スタイキャスト)で接着して装置内に固定しています。』

# γ線源

Cs-137, 0.66MeV, 7KBq,

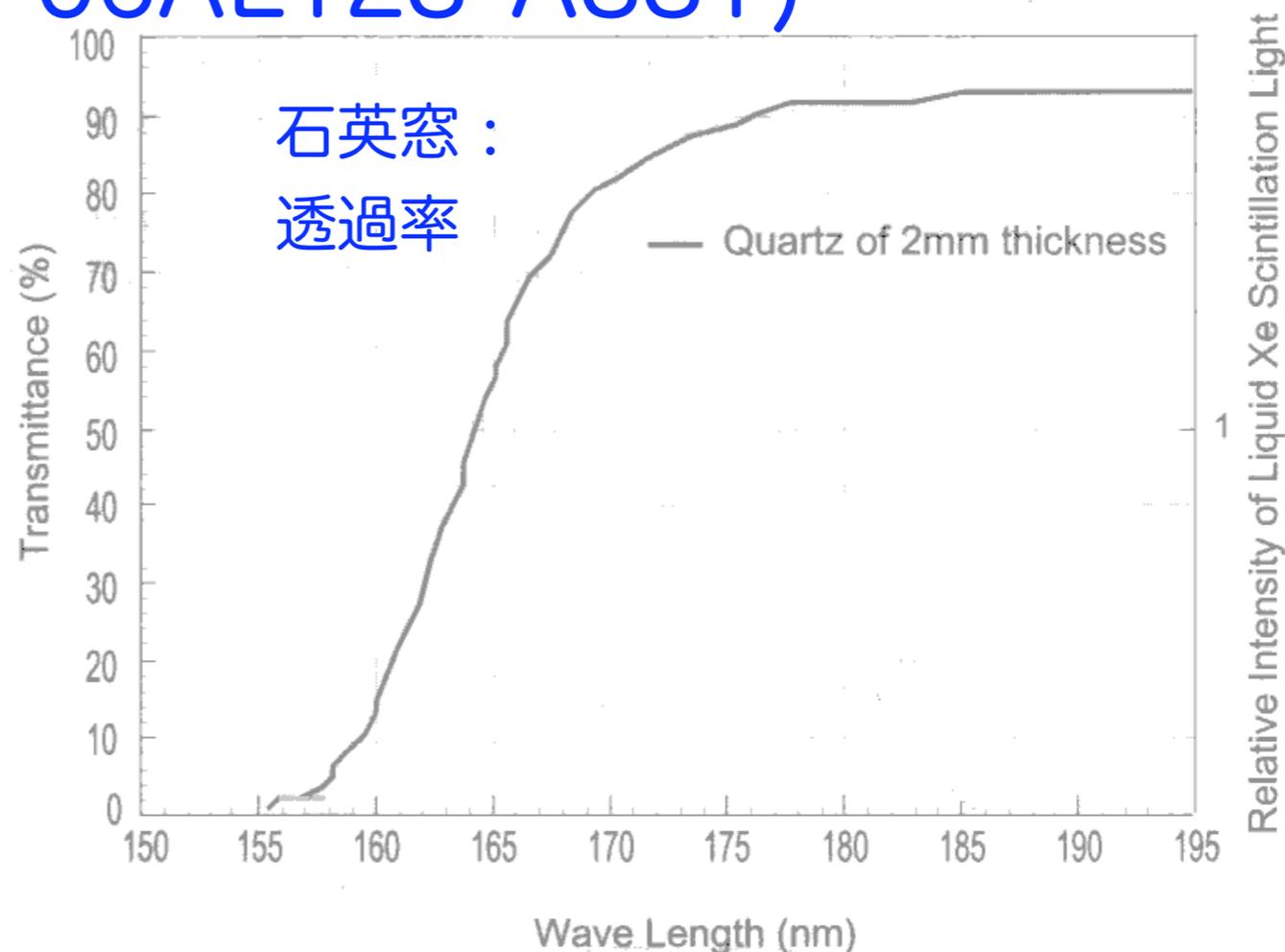
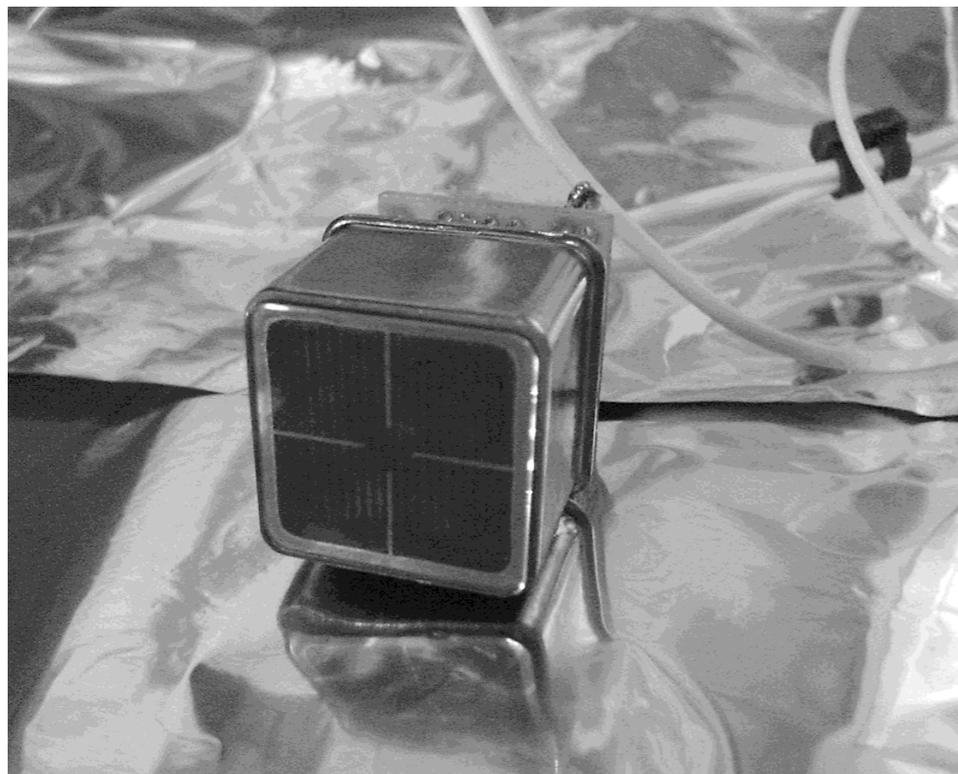
CS516 (日本アイソトープ協会製)



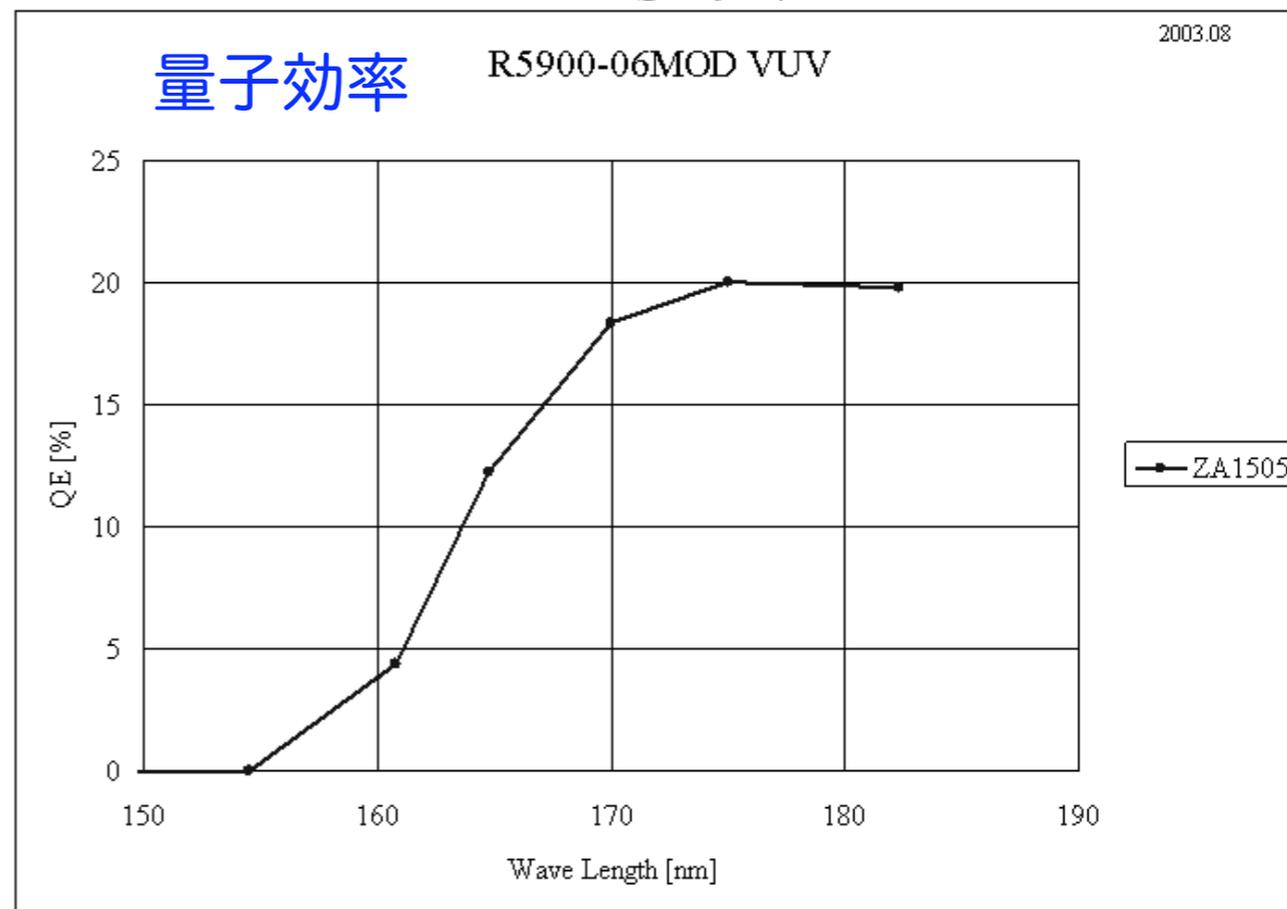
φ5.2×8.5mmのステンレス鋼 (SUS316L) 円柱状カプセルに溶接密封された線源です。

# PMT ( R5900-06AL12S-ASSY)

錦戸氏D論より



<b>PMT size</b>	<b>26 × 26 mm<sup>2</sup></b>
<b>Photo-Cathode material</b>	<b>Rb - Cs - Sb</b>
<b>Size of effective area</b>	<b>18 × 18 mm<sup>2</sup></b>
<b>Typical Q.E.</b>	<b>20 %</b>
<b>Dynode Type</b>	<b>Metal Channel</b>
<b>Number of stages</b>	<b>12</b>
<b>Typical H.V.</b>	<b>800V</b>
<b>Typical gain</b>	<b>1 × 10<sup>7</sup></b>



# 液体キセノン中のPMTのゲイン測定

ゲイン  $G$ と光電子数  $N_{pe}$ を、LEDパルスに対するPMTシグナルの  
平均値 ( $\langle ADC \rangle$ )と広がり ( $\sigma^2$ ) から計算した。

すなわち、

$$\sigma^2 = \sigma_o^2 + (eG/C)^2 N_{pe} = \sigma_o^2 + (eG/C) \langle ADC \rangle$$

$$\langle ADC \rangle = (eG/C) N_{pe}$$

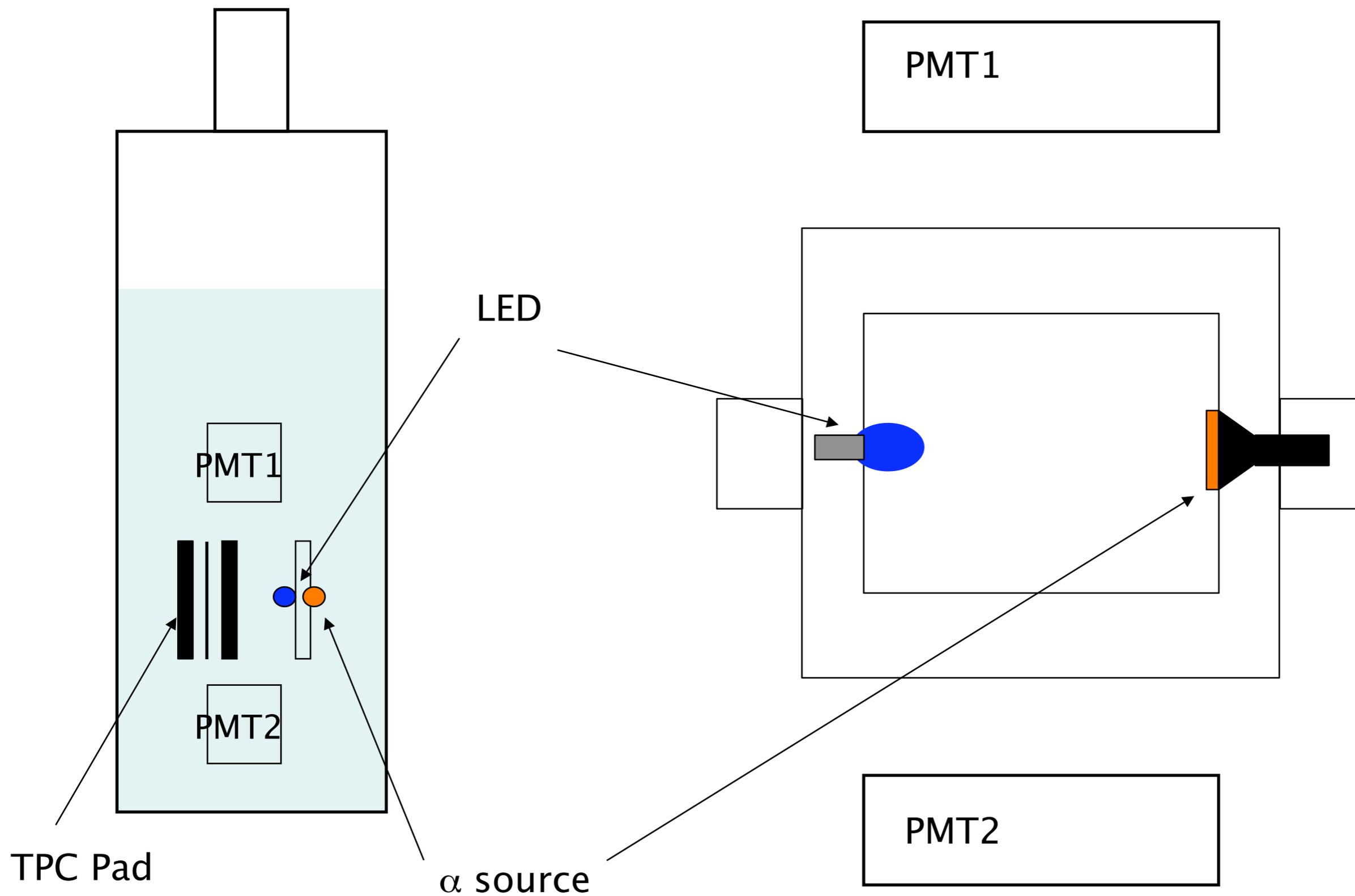
ここで、 $\sigma_o^2$  ( $\sim 1$ ) はペDESTALの広がり、 $C=0.25\text{pC/カウン}$

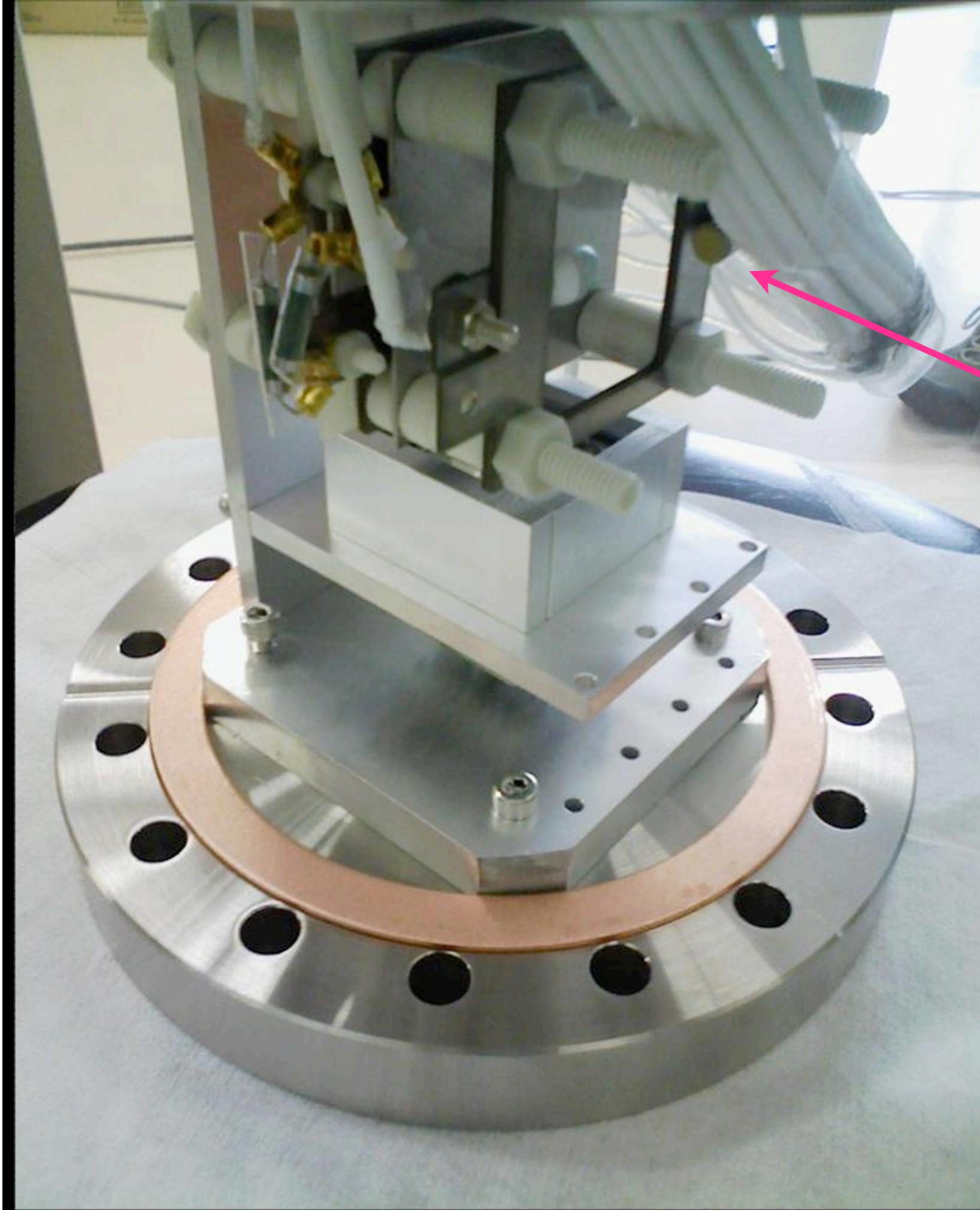
ト、 $e=1.6 \times 10^{-19}\text{C}$  である。したがって、

$$G = 1.6 \times 10^6 ( \sigma^2 - \sigma_o^2 ) / \langle ADC \rangle$$

(注)  $G$ にはPMTシグナルにかかるすべてのスケールリングファクターがかかる。

# キセノンチェンバー内の配置図

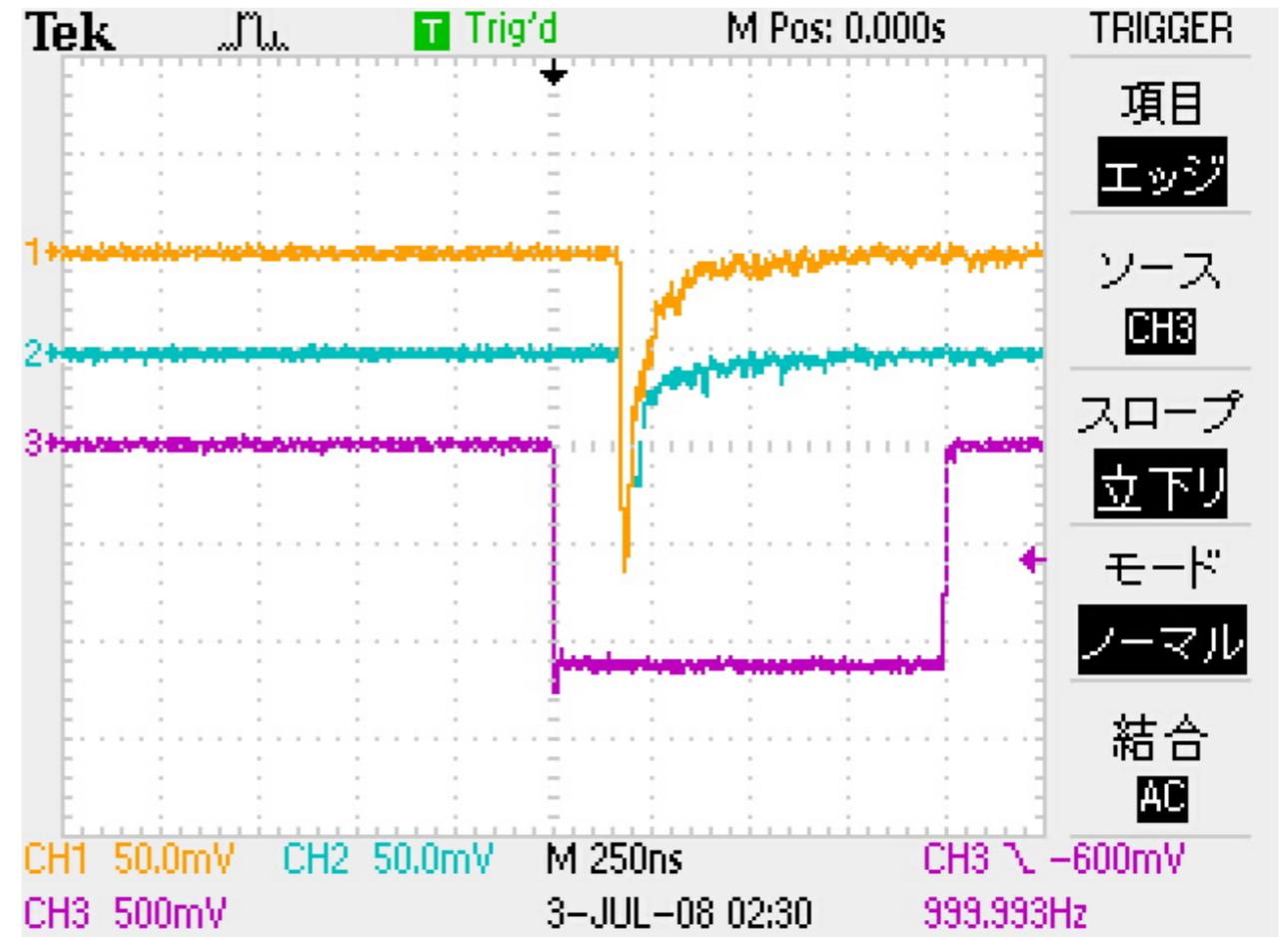
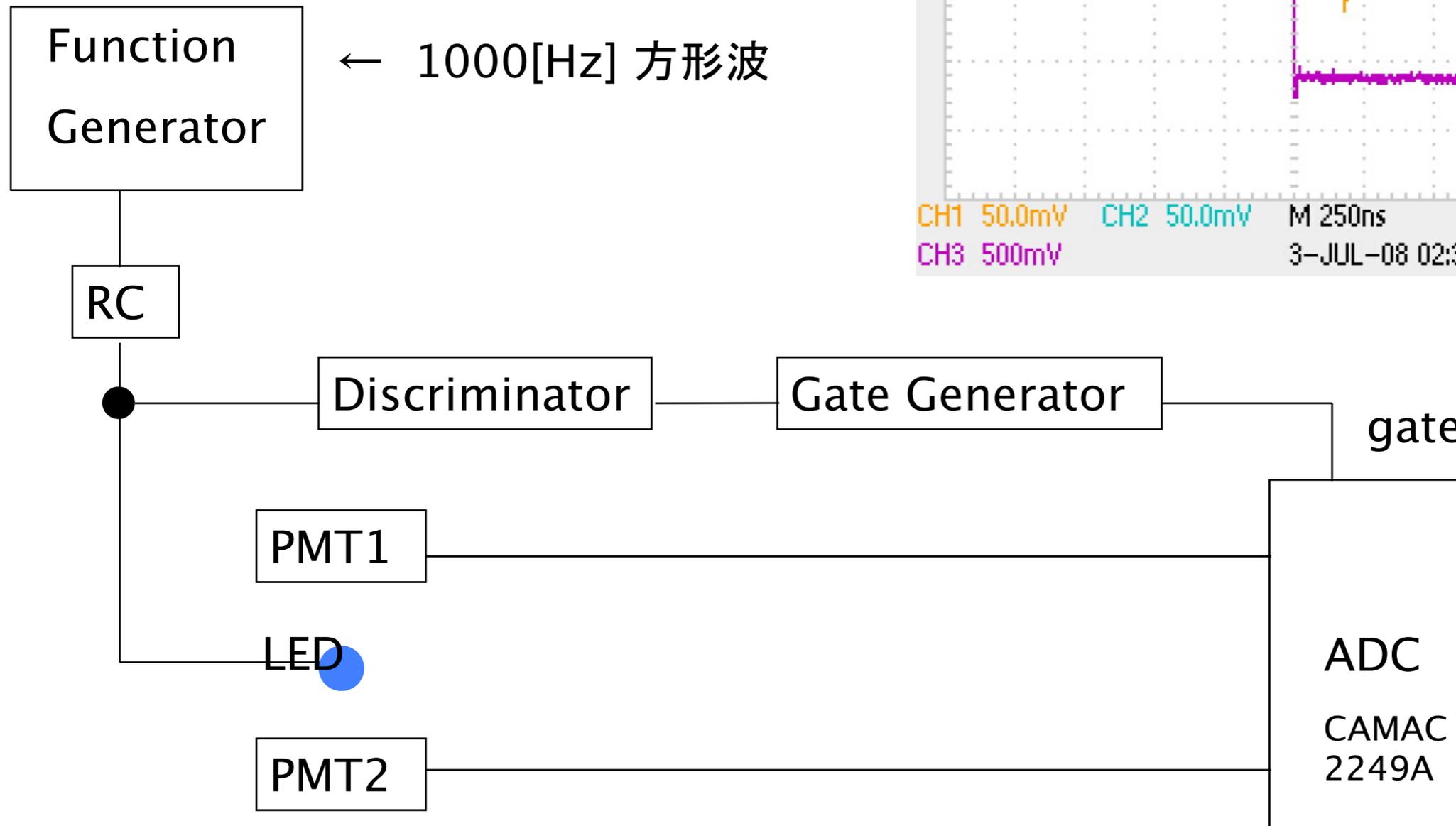




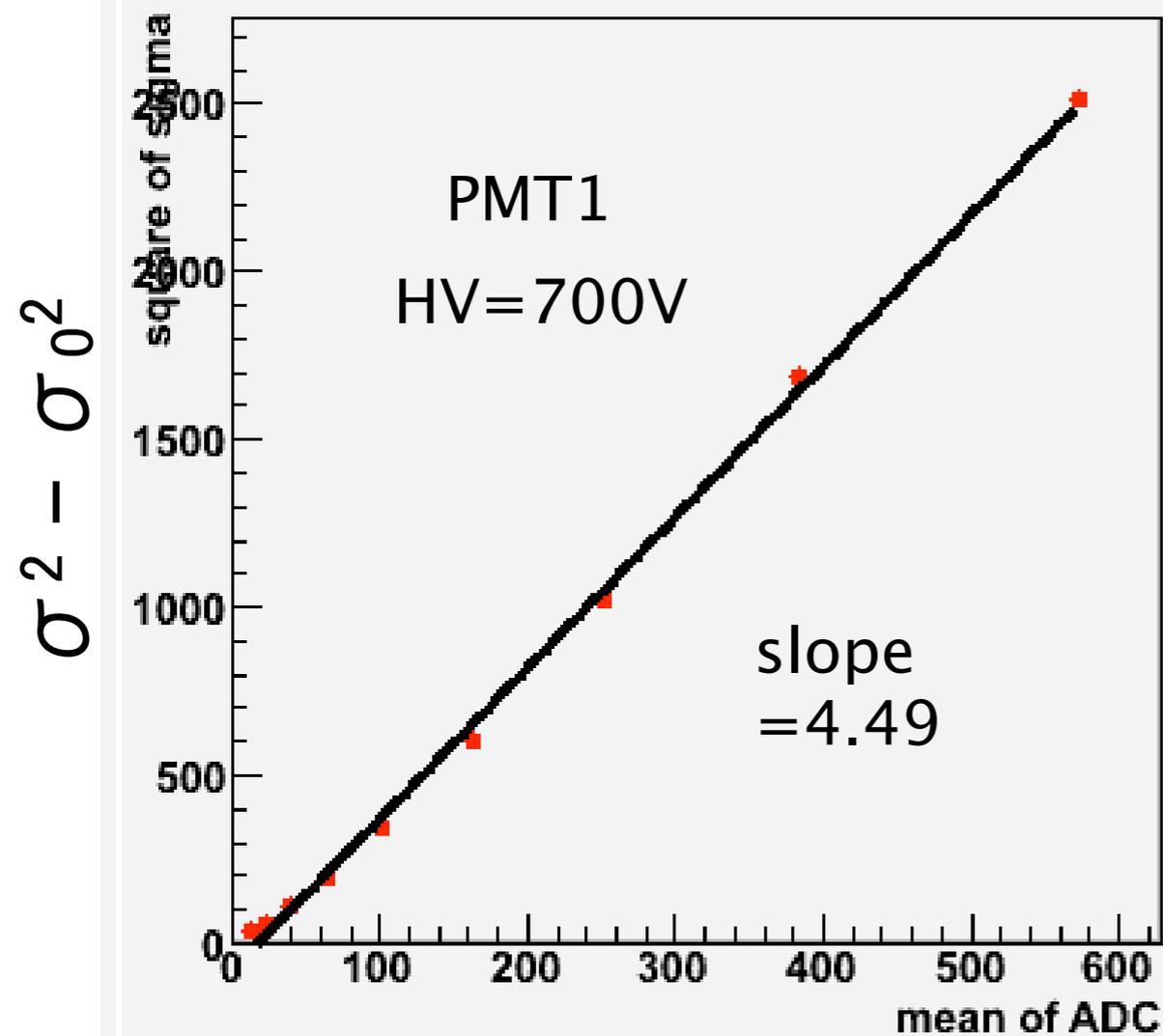
α線ソース  
200Bq

# PMTゲイン測定システム

LEDによる波形 (PMT1、PMT2) →

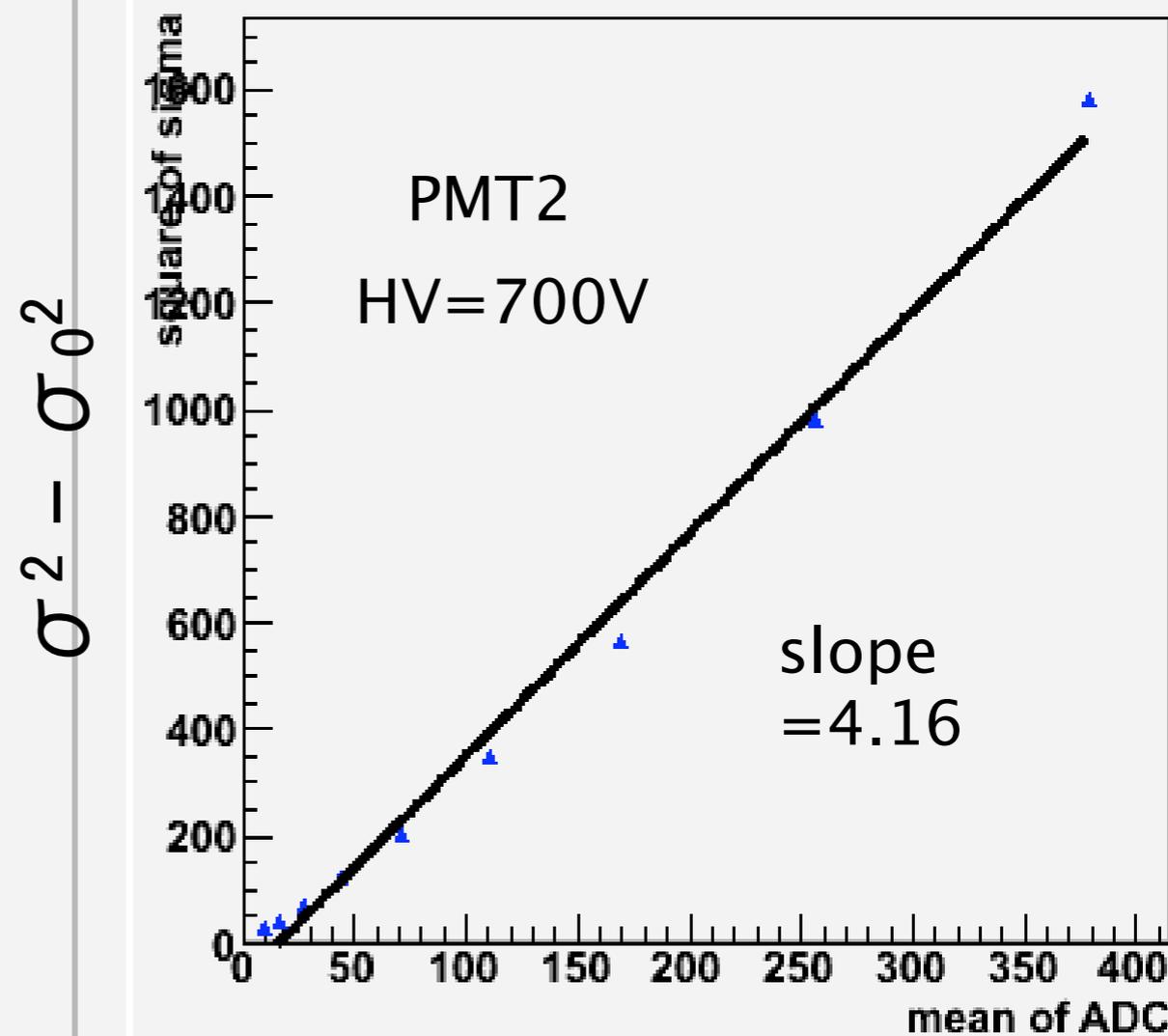


Gain Calibration with LED(PMT1)



$\langle \text{ADC} \rangle$

Gain Calibration with LED(PMT2)



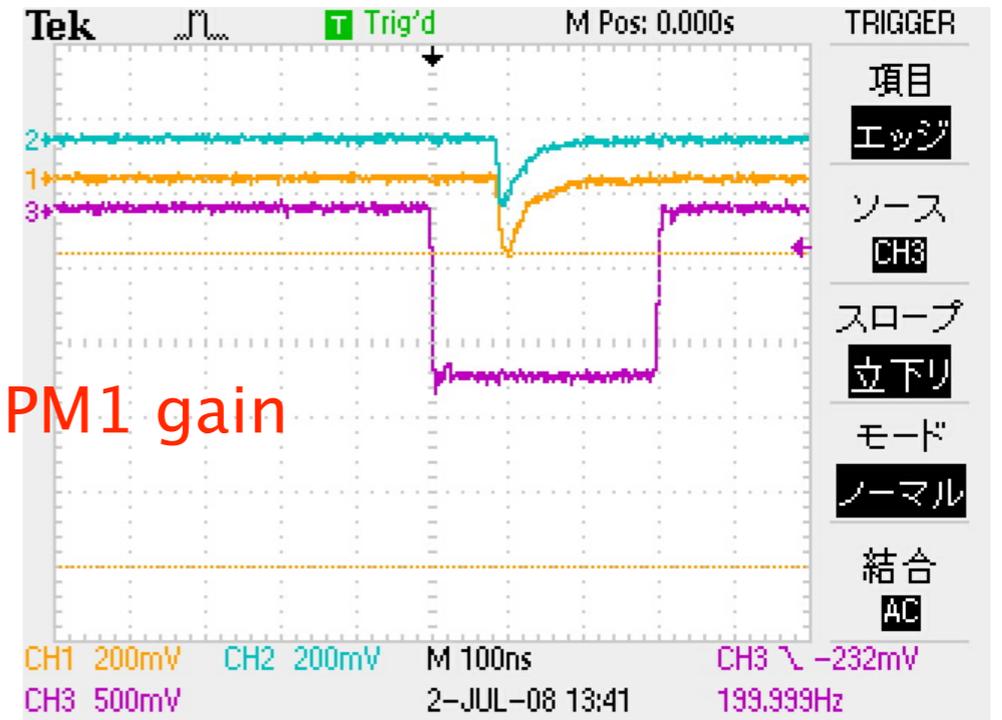
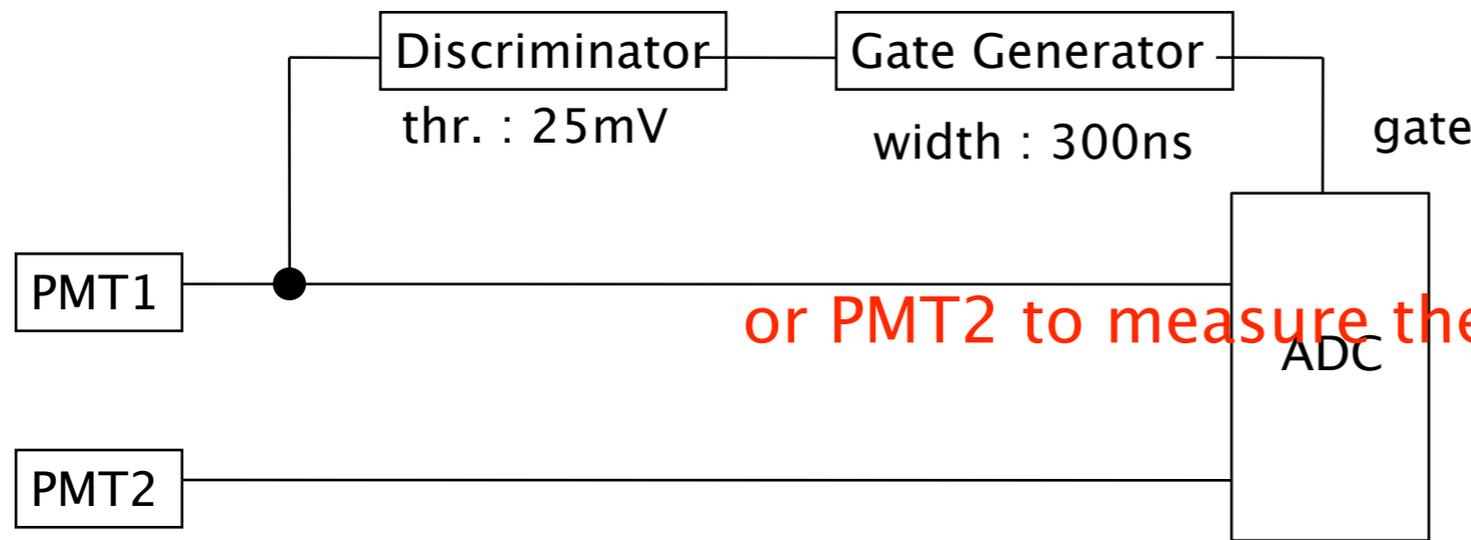
$\langle \text{ADC} \rangle$

PMT1 :  $7.00 \cdot 10^6$

PMT2 :  $6.48 \cdot 10^6$

# α線源からの信号測定

容器内部に取り付けたAm<sup>241</sup>(半減期: 432y)  
のα線(5.4MeV)から発生したシンチレーション光を測定。



液体Xeのシンチ光1個当たり必要なエネルギー: 23eV

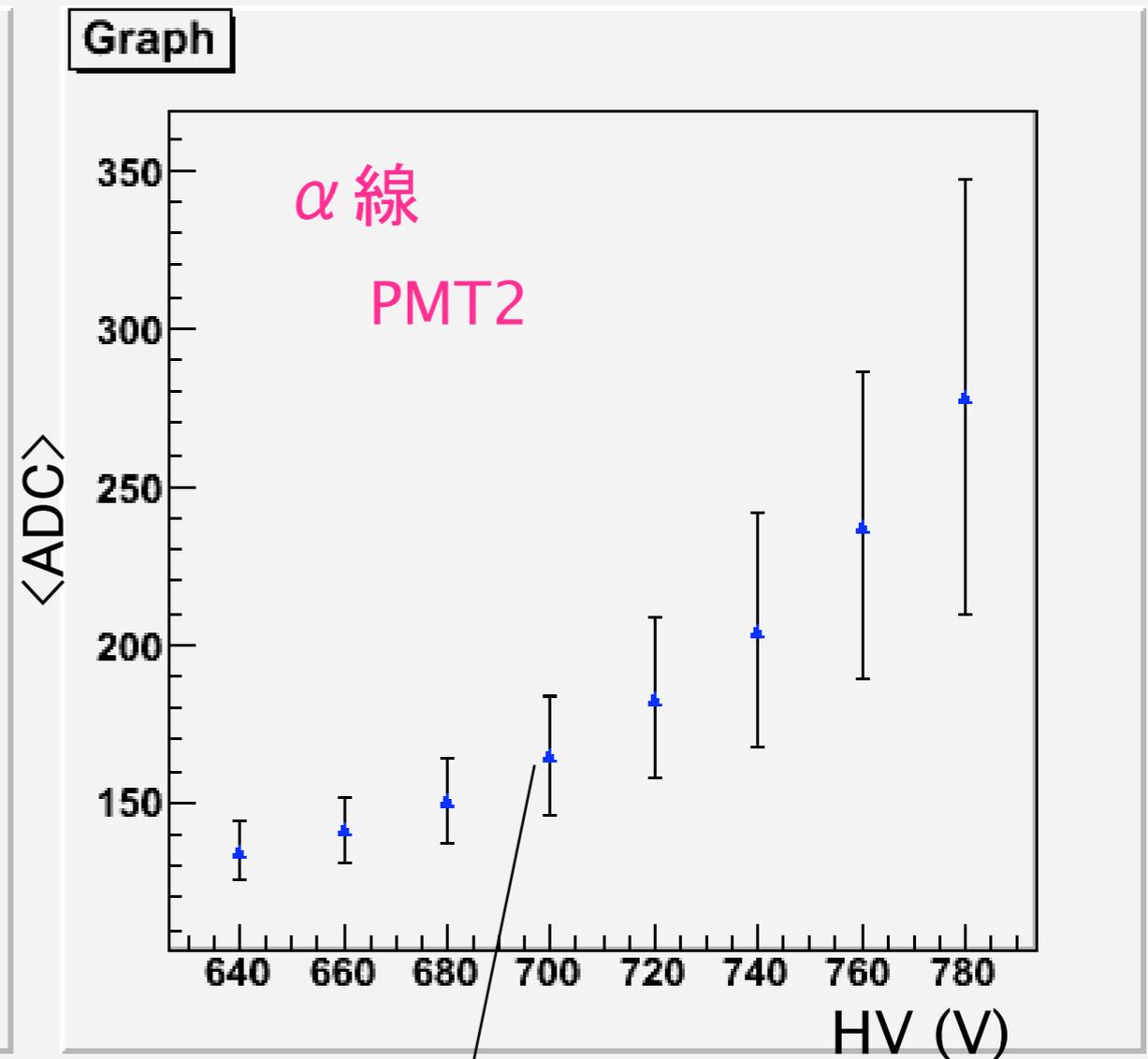
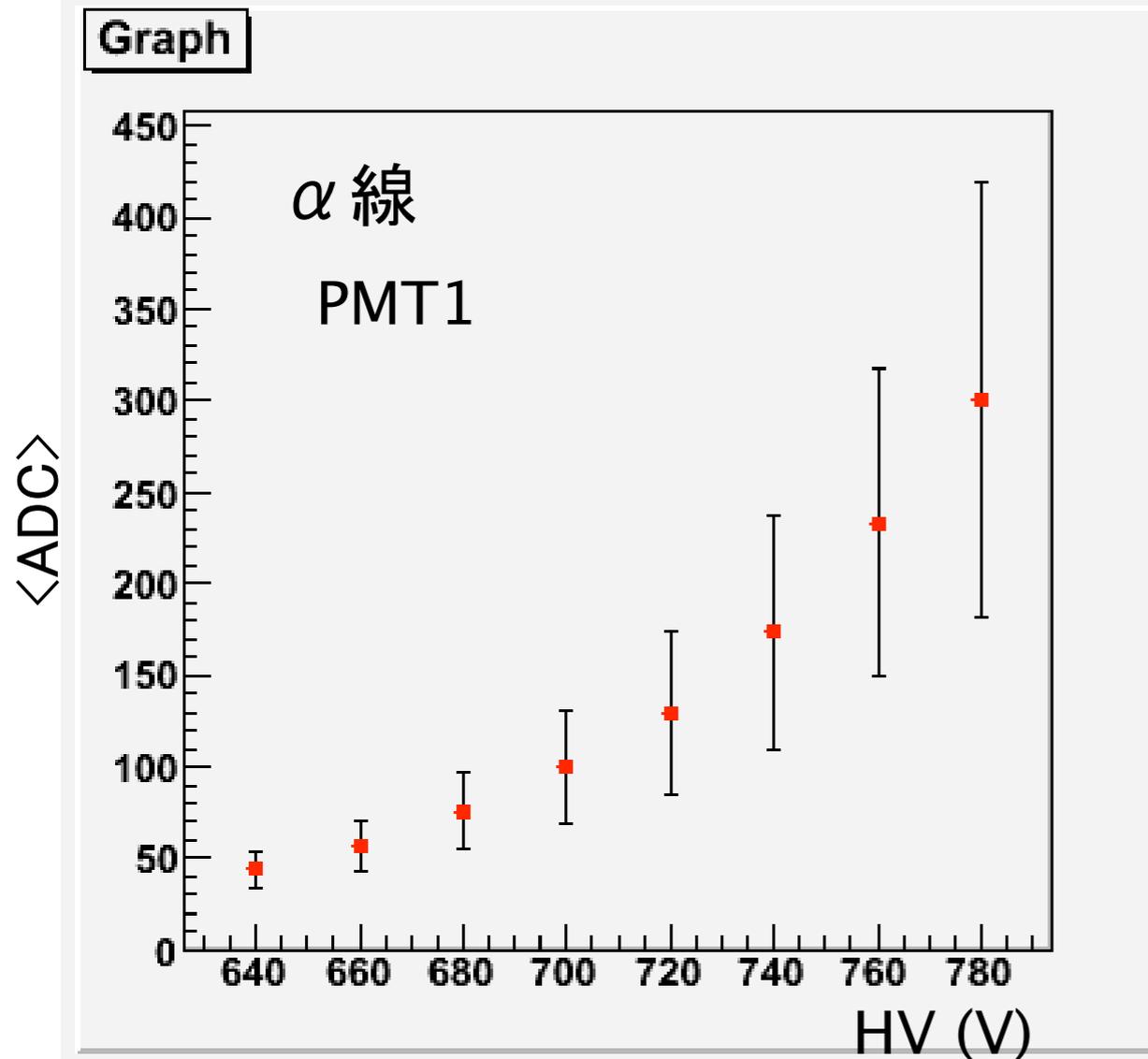
$$N_{\text{photon}} = 5.5 \times 10^6 [\text{MeV}] / 15 \text{eV} = 3.7 \times 10^5$$

$$Q = N_{\text{photon}} \times \frac{\Omega}{4\pi} \times Q.E. \times Gain \times e = 3.7 \times 10^5 \times 1.2 \times 10^{-2} \times 0.2 \times 6.5 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}$$

$$= 924 \text{ pC} = 3694 \text{ counts (期待値, PMT2)}$$

$$995 \text{ pC} = 3980 \text{ counts (期待値, PMT1)} ; \times 0.5$$

線源からPMT=5cm  
光電面=2cm×2cm



164 counts (HV=700V)

$\sigma^2/\text{mean}$  から

Gain =  $3.9 \times 10^6$

期待値 = 3694 counts

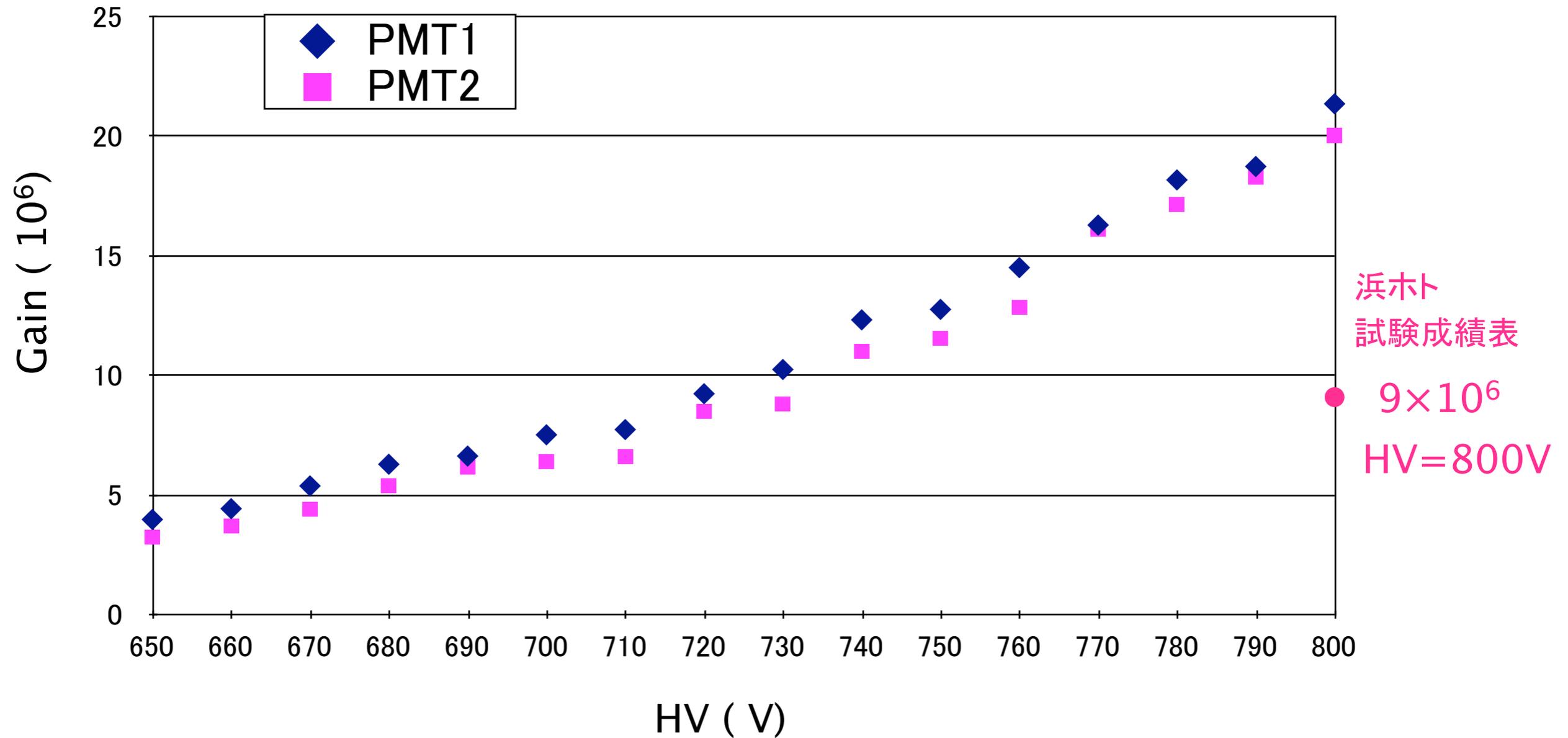
液体Xeが汚れていることによる効果か？

幾何的な配置の影響？

ゲイン見積もりの不定性

有効電荷の謎との関連(再結合)？

# PMT1,2 ゲインのHigh Voltage依存性



# ノイズ状況と対策



Pre-Amp(P250): PMTより約20cm上に設置

低温に冷却中、突然、PreAmpに200MHz  
の発振状のノイズが現れる

- ローパスフィルターで1/10にする (2mV)

今後の追加対策：

FETとfeedback用のCとRだけ低温

Pre-amp (P250)は常温に設置

同軸の外皮膜 (テフロン) ははぎ取る

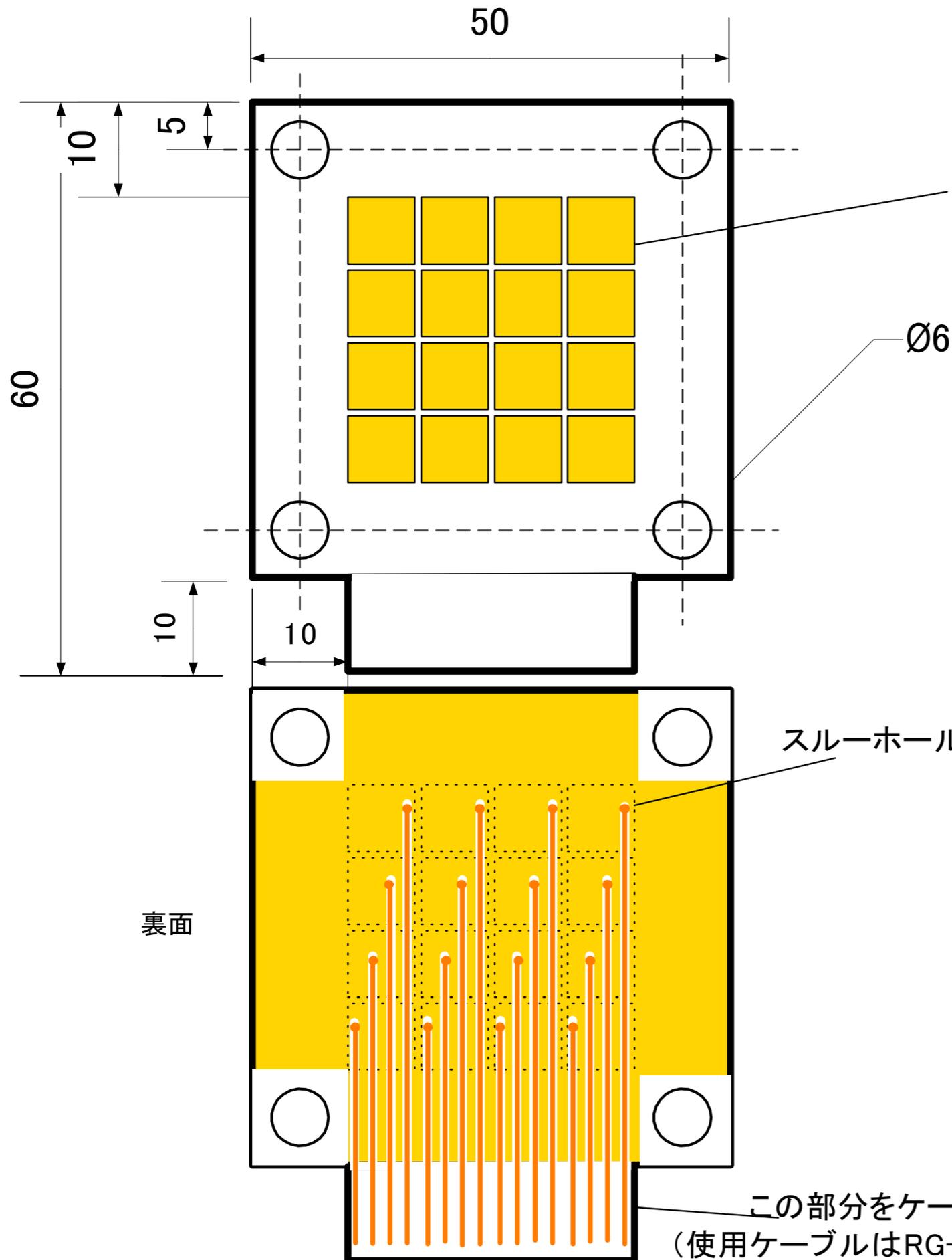
1 PADの読み出し

PADは2x4=8個ずつ接続し、2チャンネル

その内1チャンネルをPre-Ampに入力

カソードとアノードの距離 3mm

$\alpha$ 線ソース:カソード (メッシュ) 面に接着



### PAD読み出し用電極板

基盤材料: アルミナ(1mmt)

パッドのパターン 銅

パッドは板の中心30mmの正方形の部分に4×4を配置  
(パッド間隔は未定)

発注枚数: 4枚

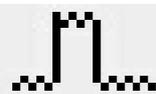
静電部のイメージ



この部分をケーブルと溶接したい  
(使用ケーブルはRG-188または178(同軸))

高エネルギー加速器研究機構  
田中秀治  
shuji.tanaka@kek.jp

Tek



Trig'd

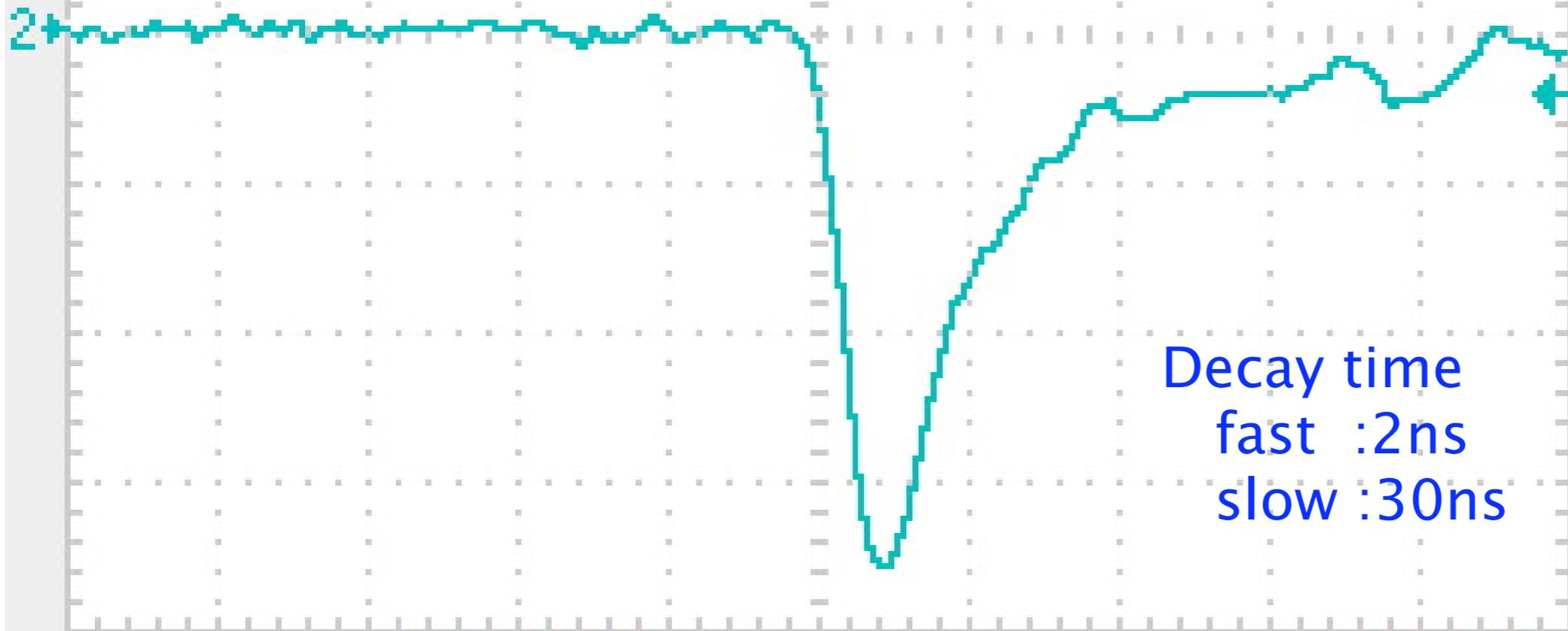
M Pos: 0.000s

TRIGGER

LXeTPC : シンチレーション光

$\alpha$ 線( $^{241}\text{Am}$ , 5.49MeV)

R5900-06AL12S-ASSY in liquid Xe



CH2 20.0mV

M 10.0ns

CH2 ~ -8.80mV

項目

エッジ

ソース

CH2

スロープ

立下

モード

ノーマル

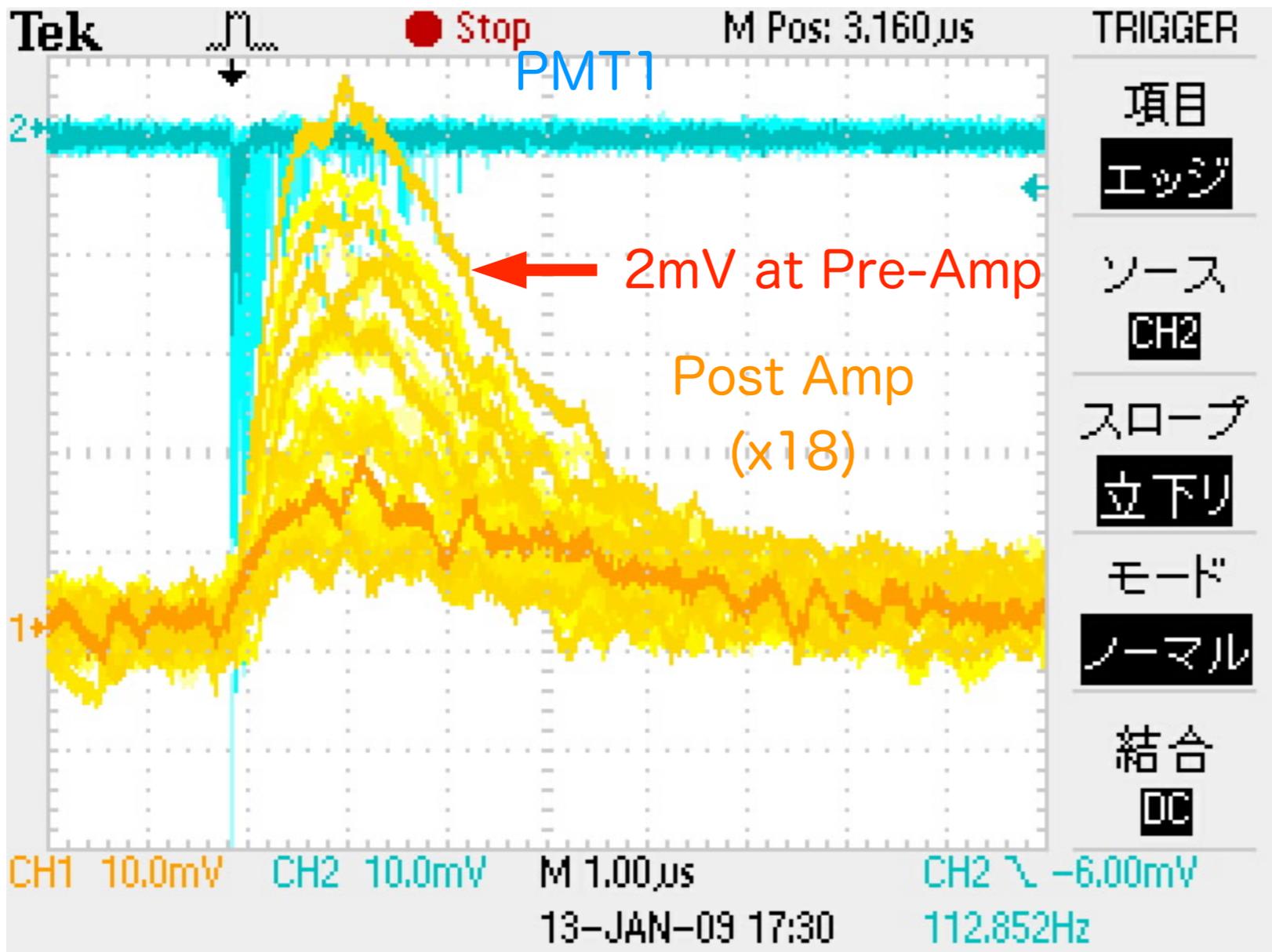
結合

AC

現在の画面表示はA:\TEK0116.JPGに保存されます

# GXeTPC (Xeガス) : 電荷シグナル

2mVのPre-Amp出力は13,000個の電子数に相当する ( $0.002 \times 1 \times 10^{-12} / 1.6 \times 10^{-19} = 1.3 \times 10^4$ )。3mm厚のキセノンガス中で5.4MeV  $\alpha$ 線は総数150,000個の電子を電離するので ( $5.4\text{MeV} / 15.6\text{eV} \times 3\text{mm} / 9\text{mm} = 1.2 \times 10^5$ )、その内11%が測定されたと評価される。液体キセノン・TPCでは $\alpha$ 線エネルギーの5%程度が再結合を免れアノードに到達する。したがって、 $5.4\text{MeV} / 15\text{eV} \times 0.05 = 18,000$ 個の電子による2.8mV程度のPre-Amp出力が期待される。



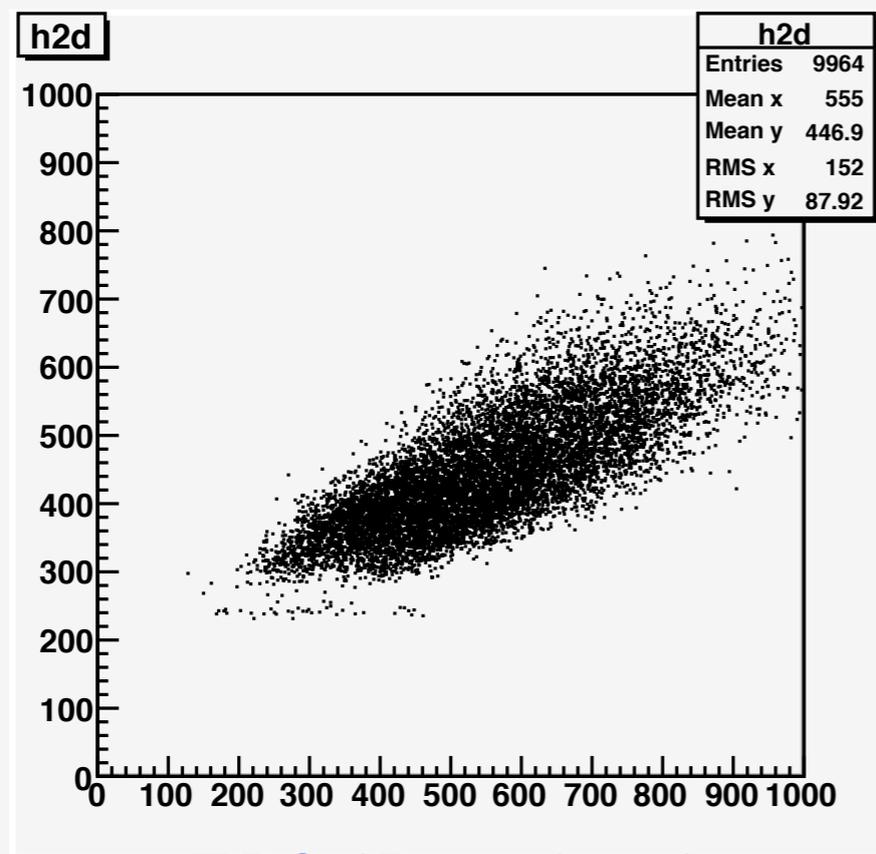
Typical output of Pre-amp was + 2mV

Post Amp : the first differentiation and integration time = 1 usec

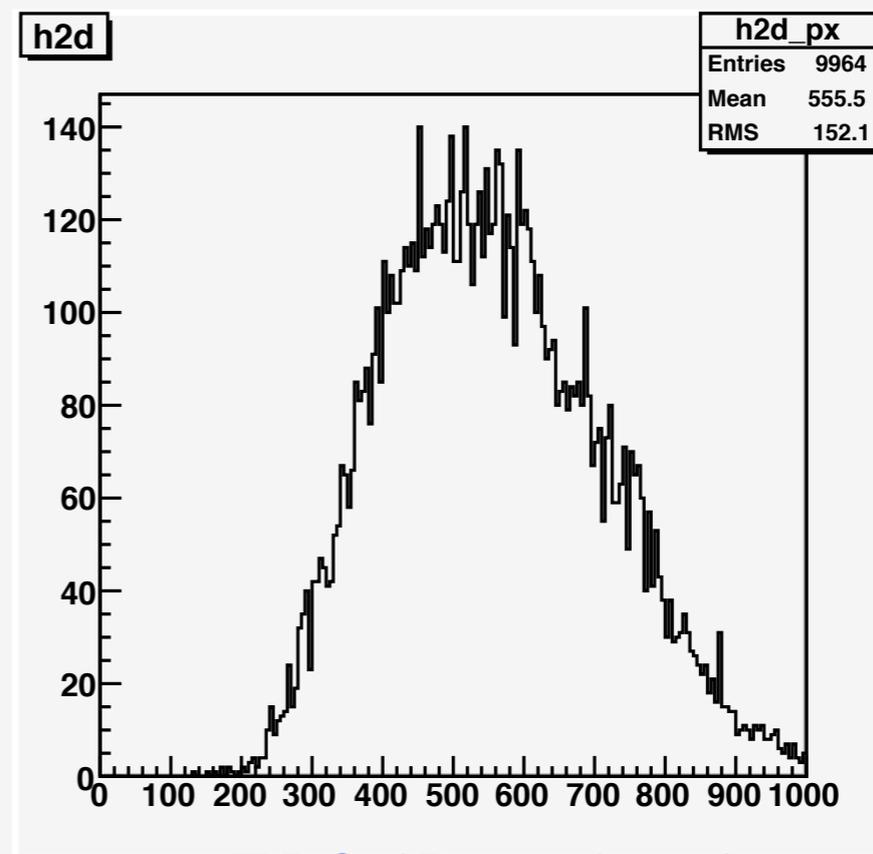
TPC HV : -600V/3mm , PMT1 HV=800V

# GXeTPC : 電荷シグナルとシンチレーション光

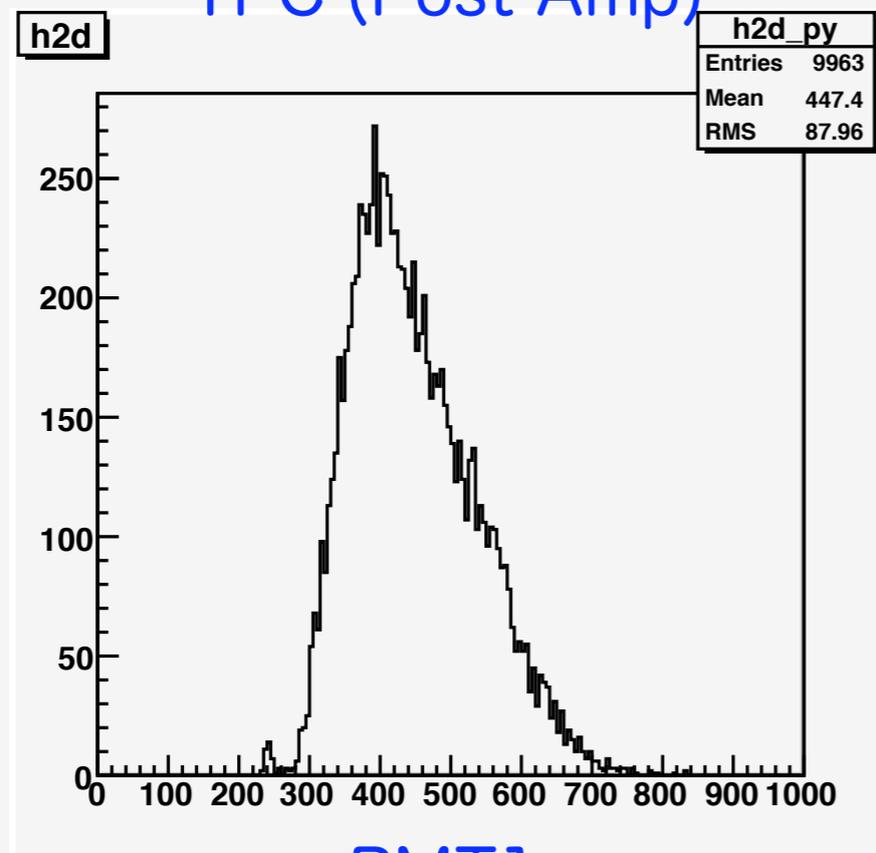
PMT1



TPC (Post Amp)



TPC (Post Amp)



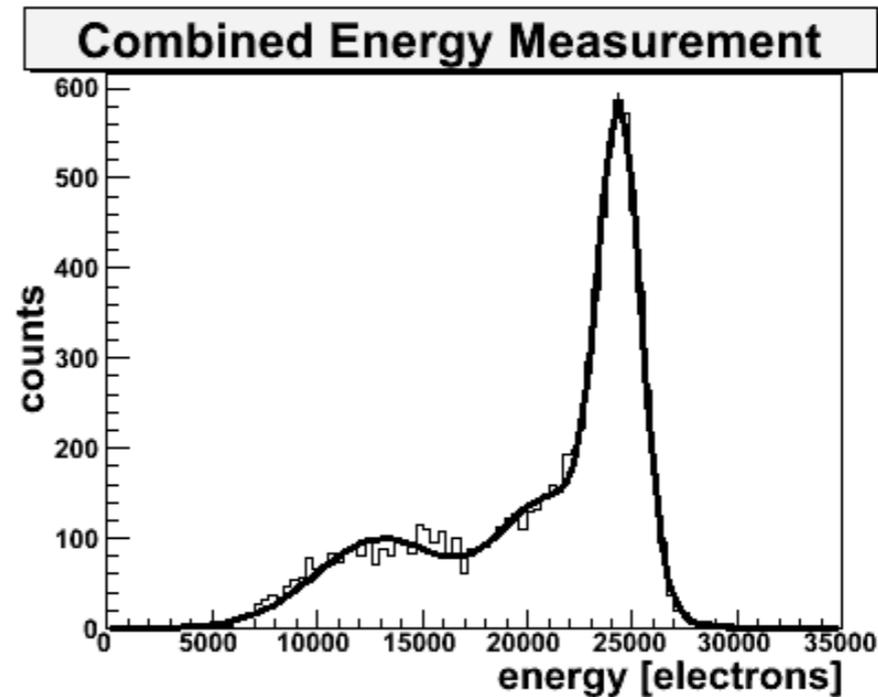
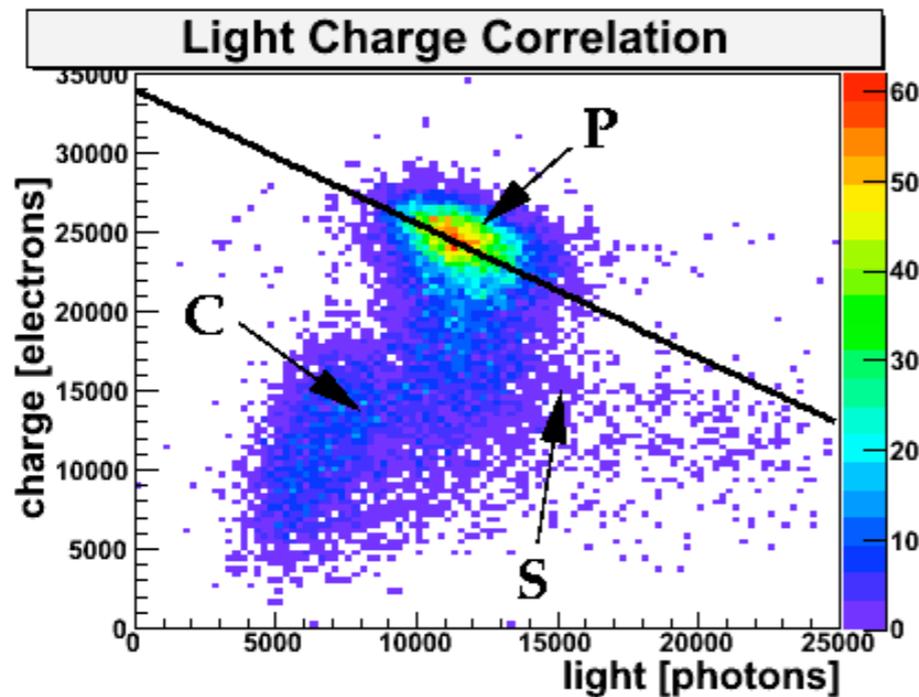
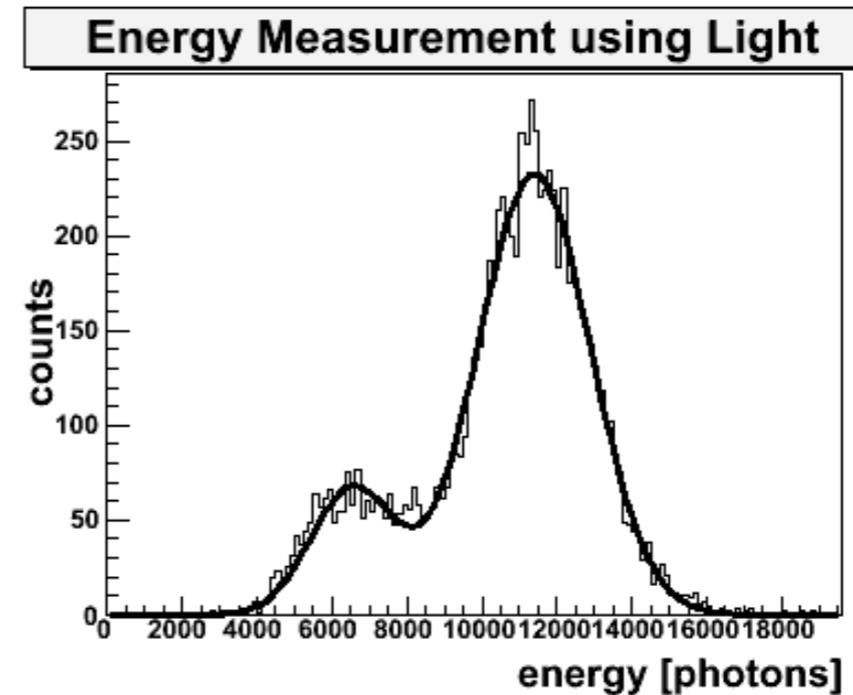
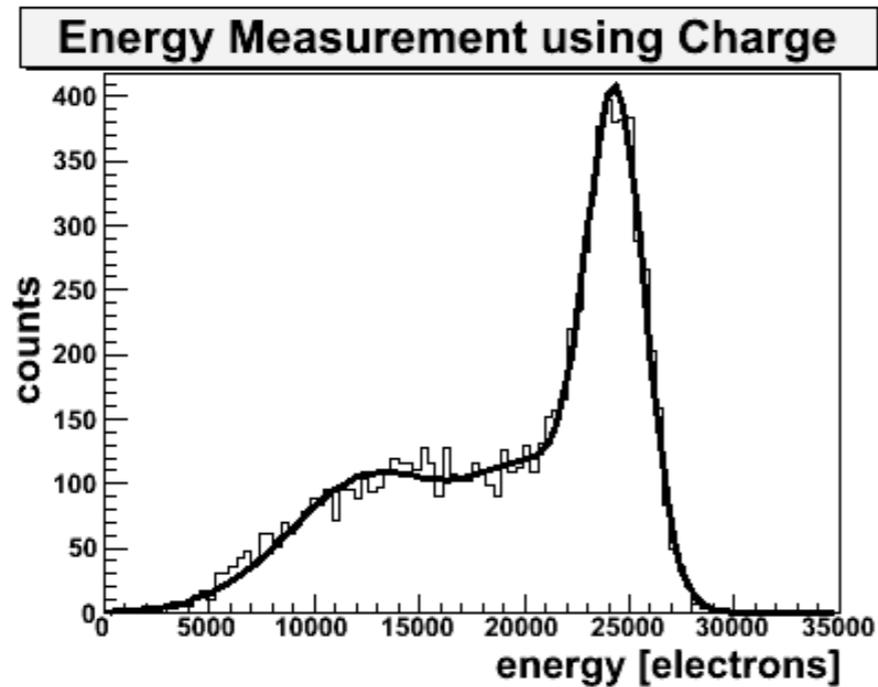
PMT1

Post Amp : the first differentiation of 0.2us , integration time of 0.5 usec and x 10  
TPC HV : -1000V/3mm ,  
PMT1 HV=800V

# Expected energy measurement, LXePET ( D.Bryman's group)

Proof of principle

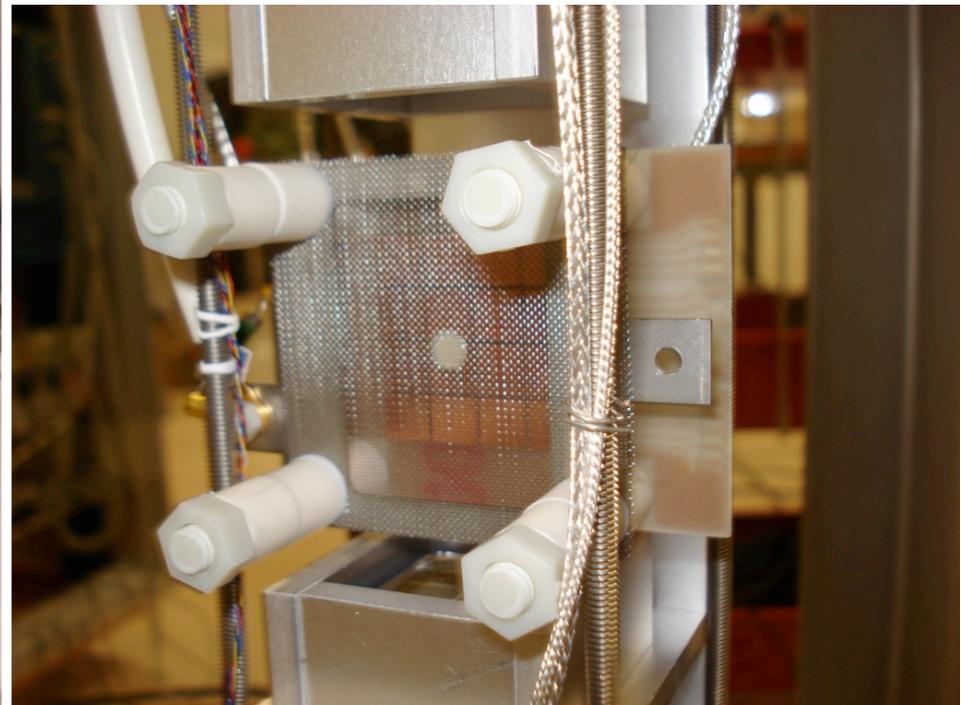
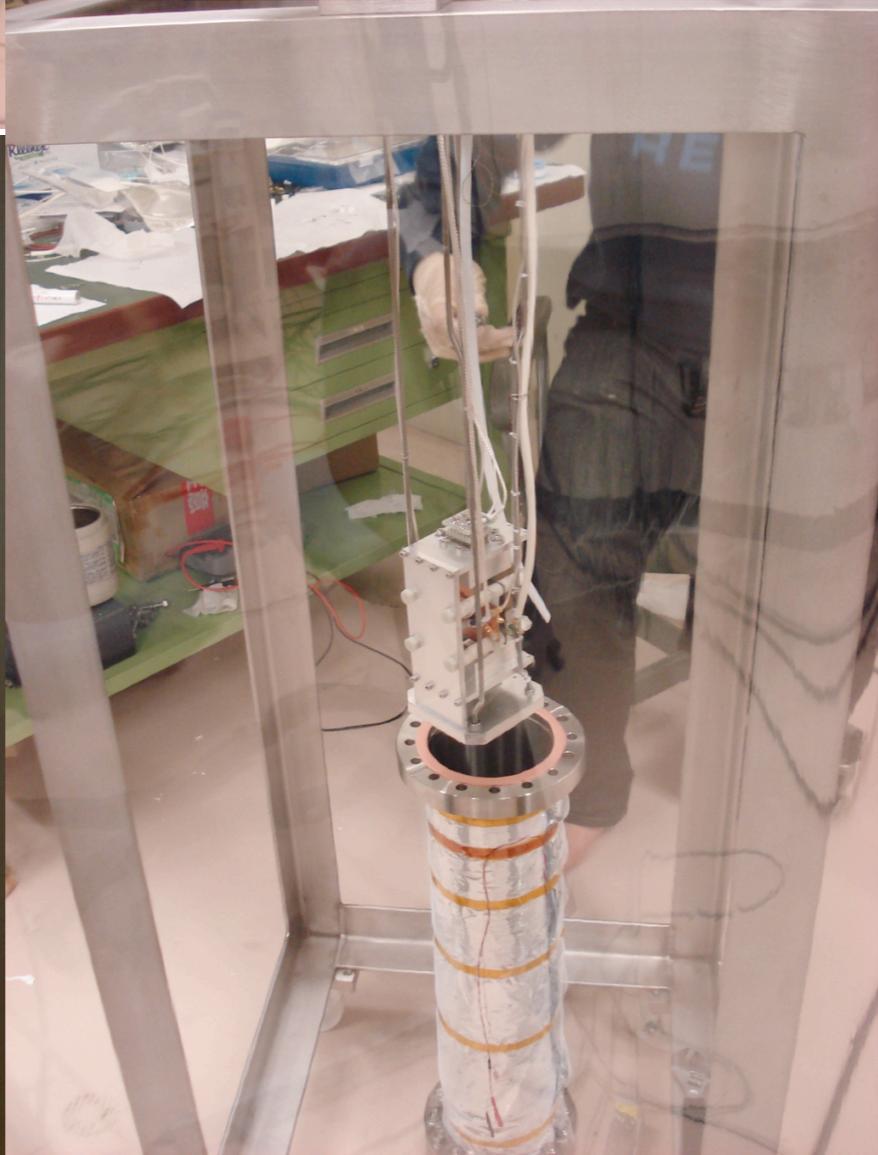
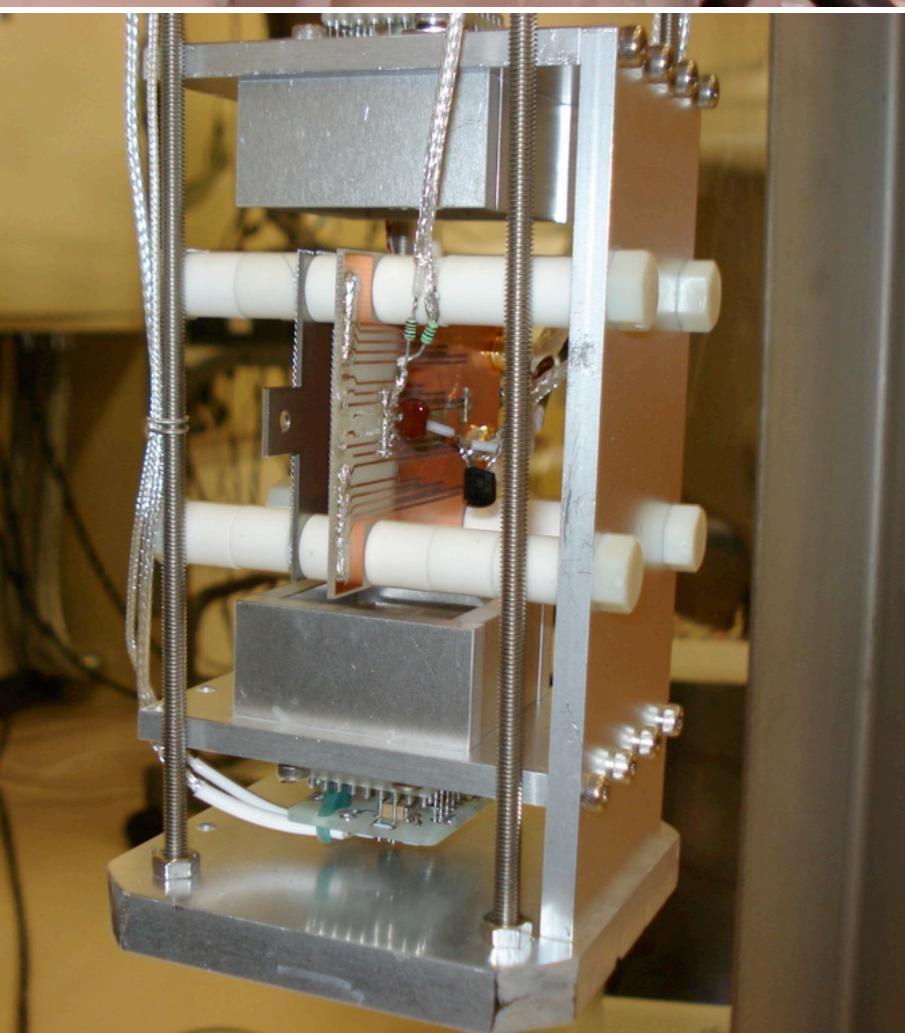
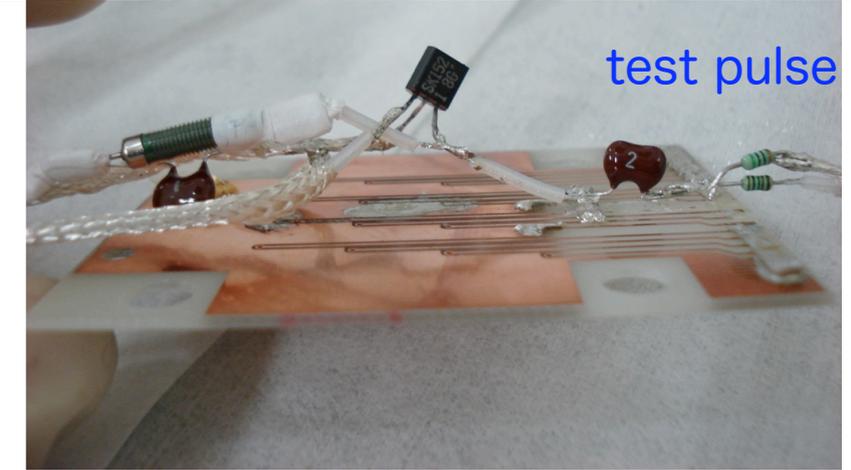
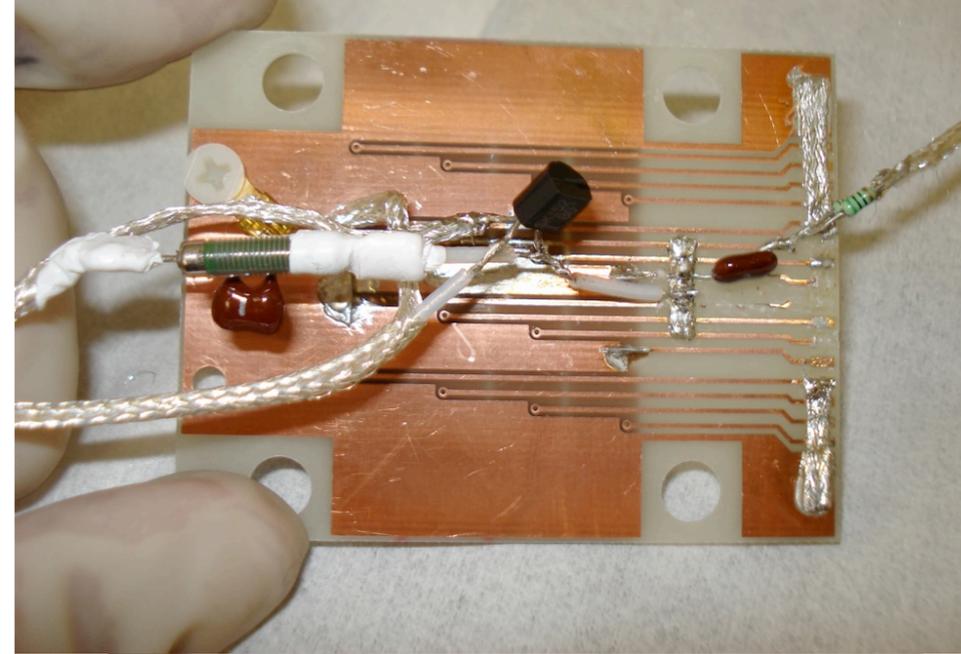
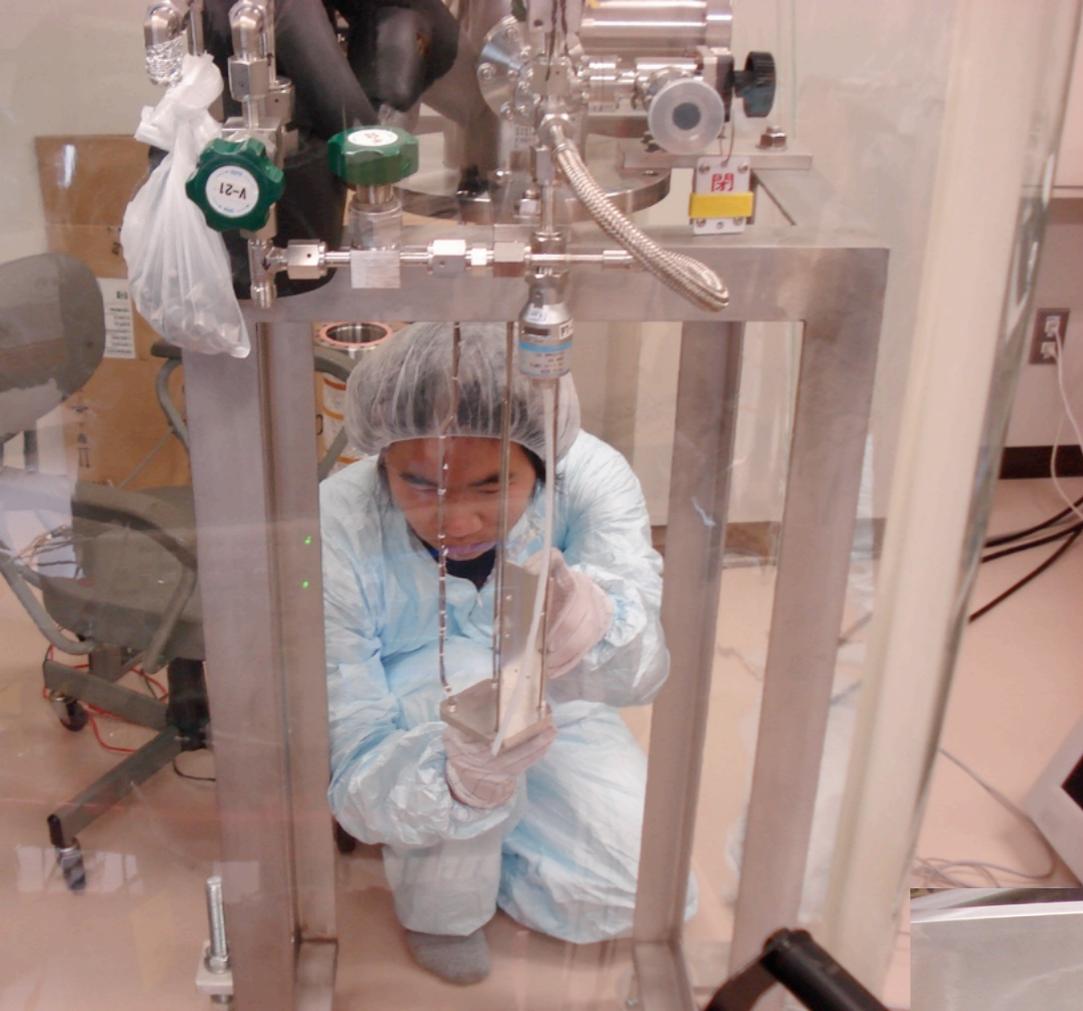
## Combining Light and Charge Measurement with 511 keV Photons



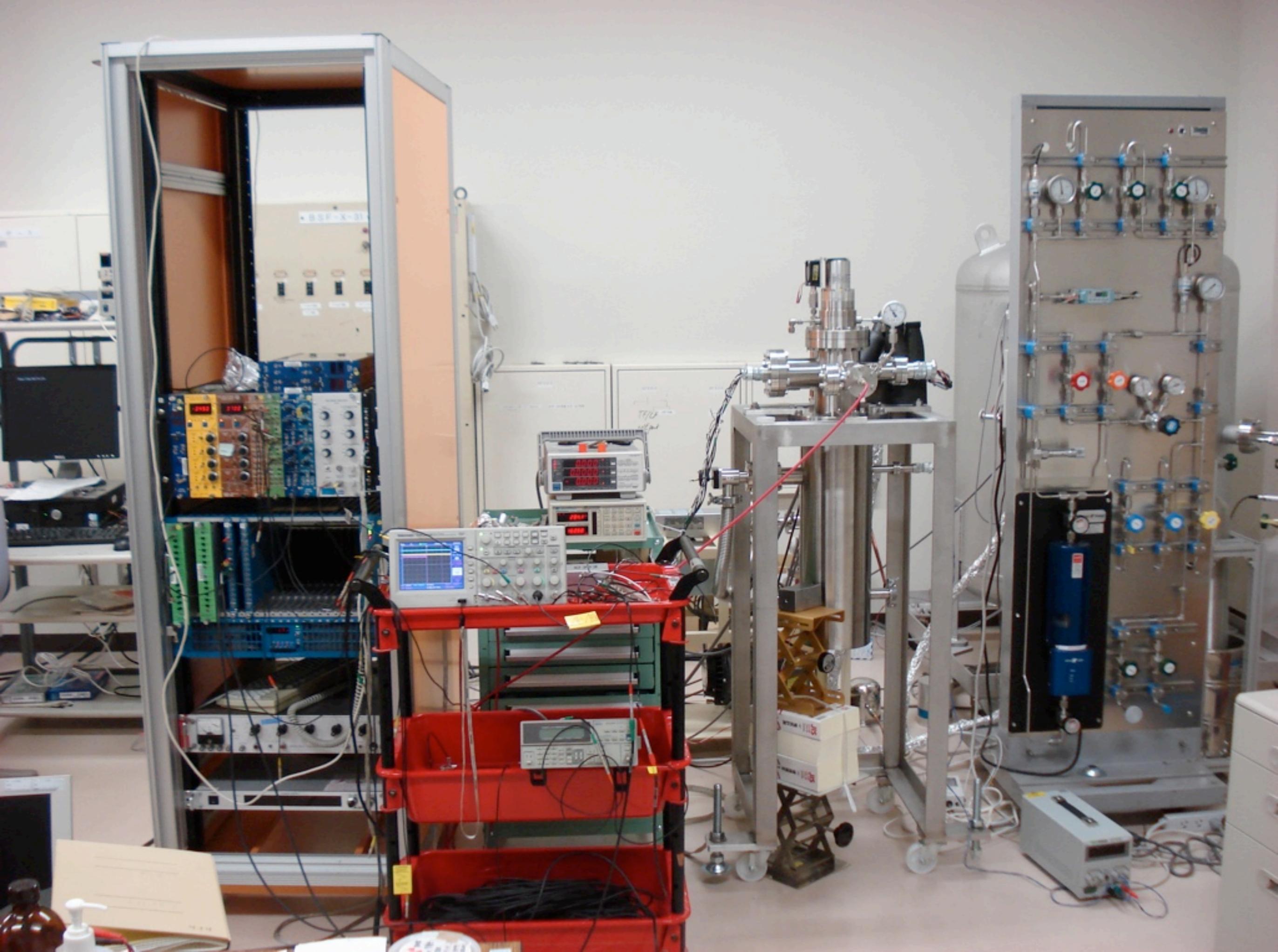
P: Photoelectric, C: Compton, S: Scattered outside

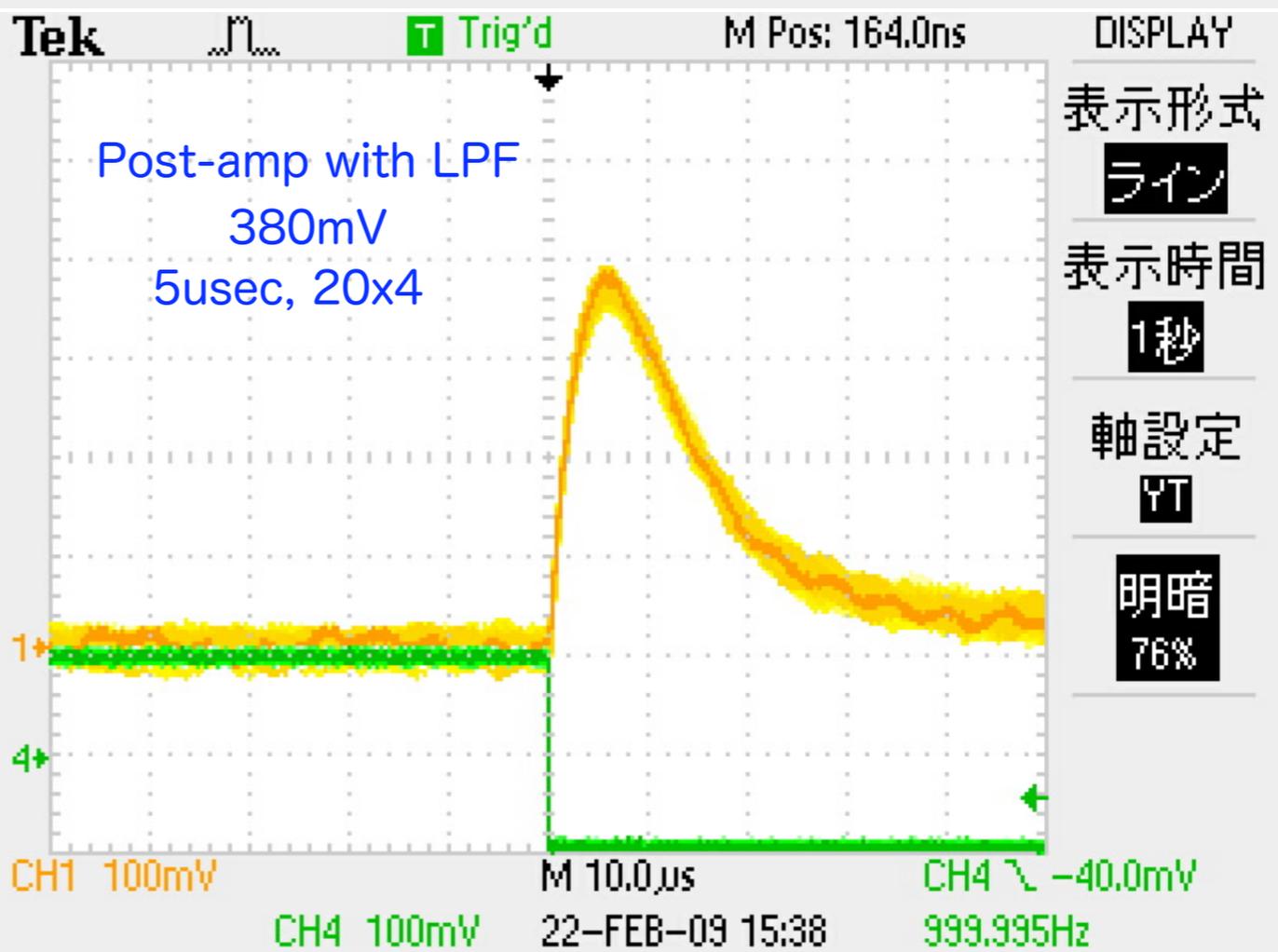
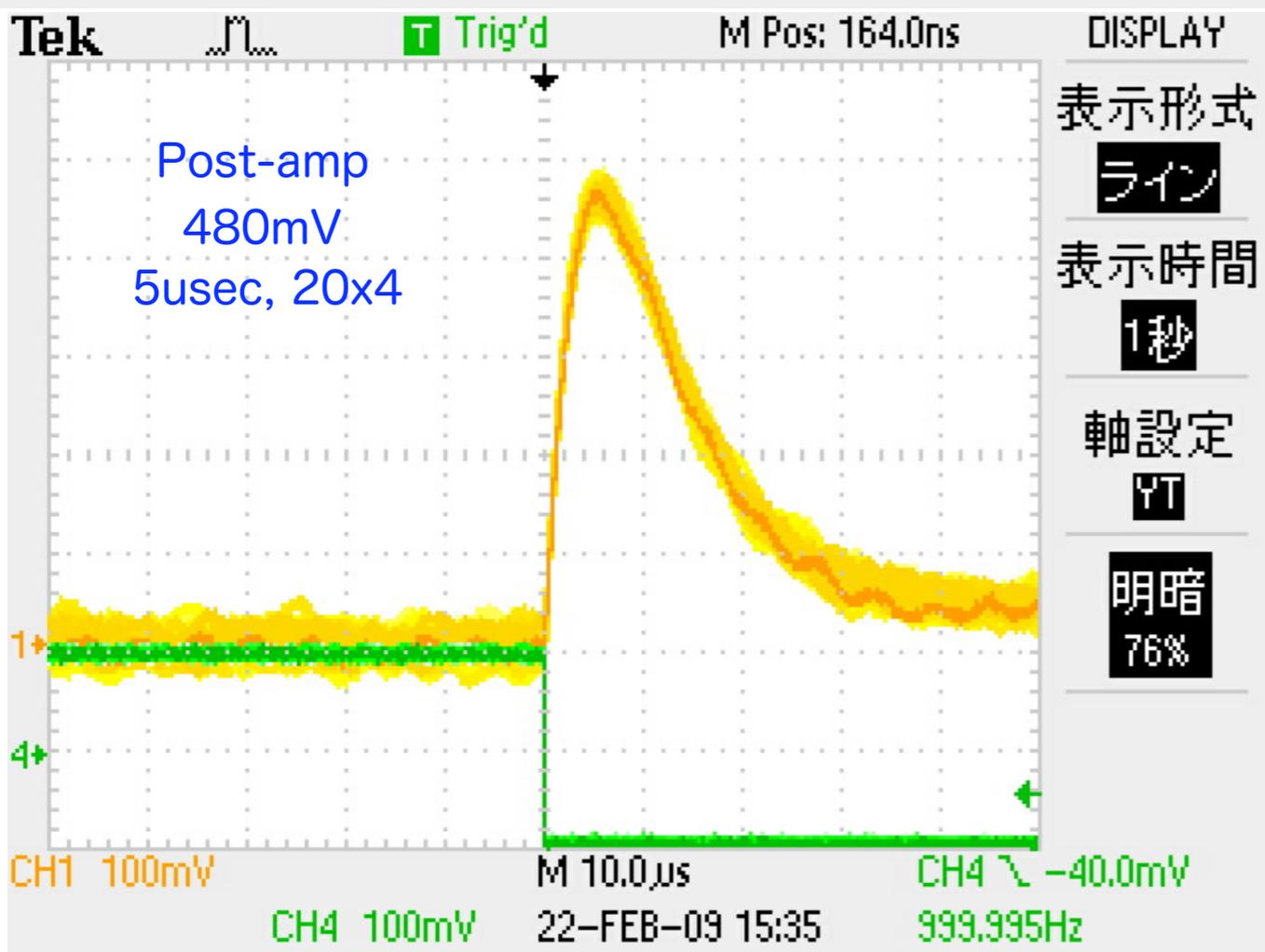
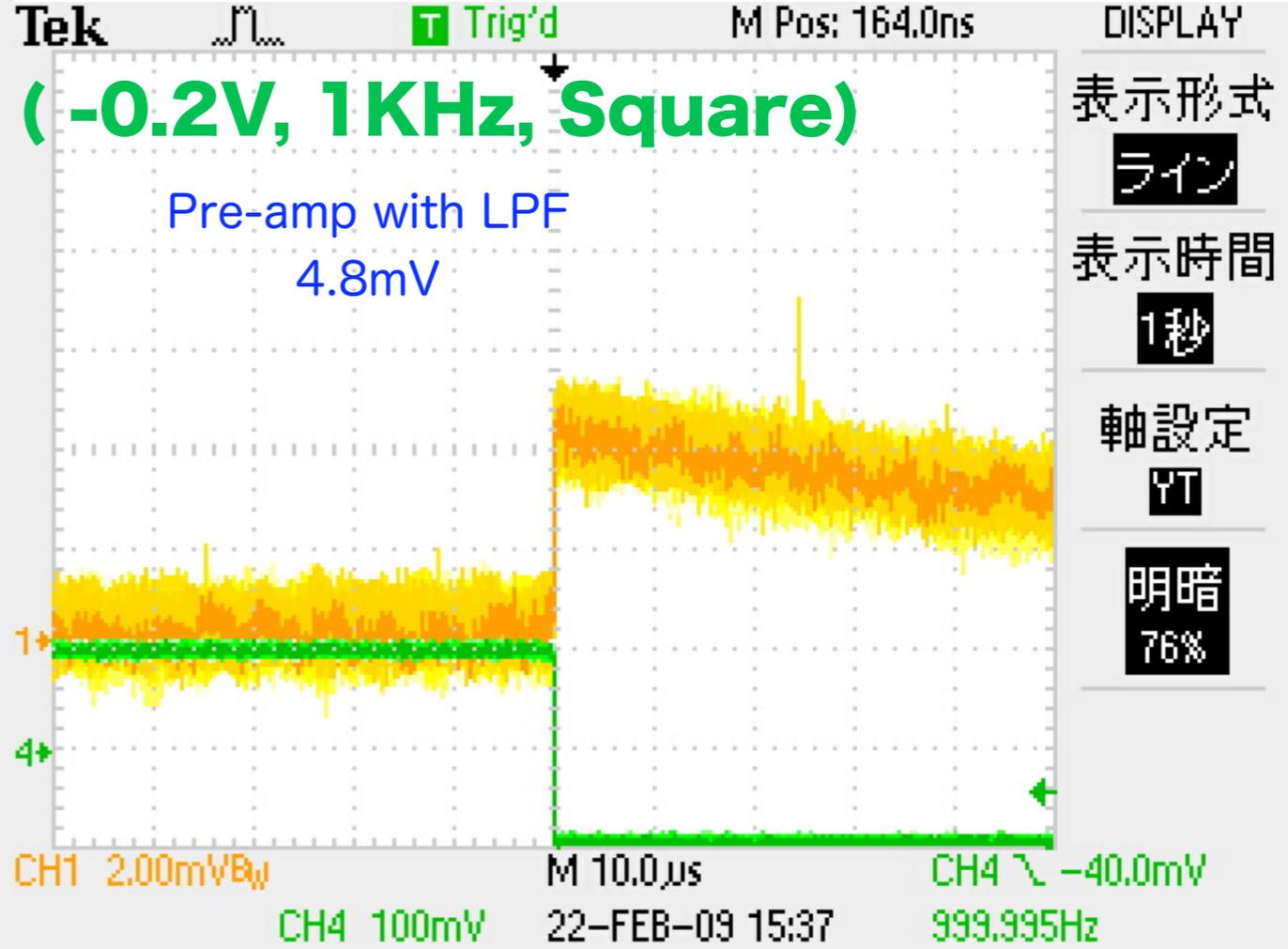
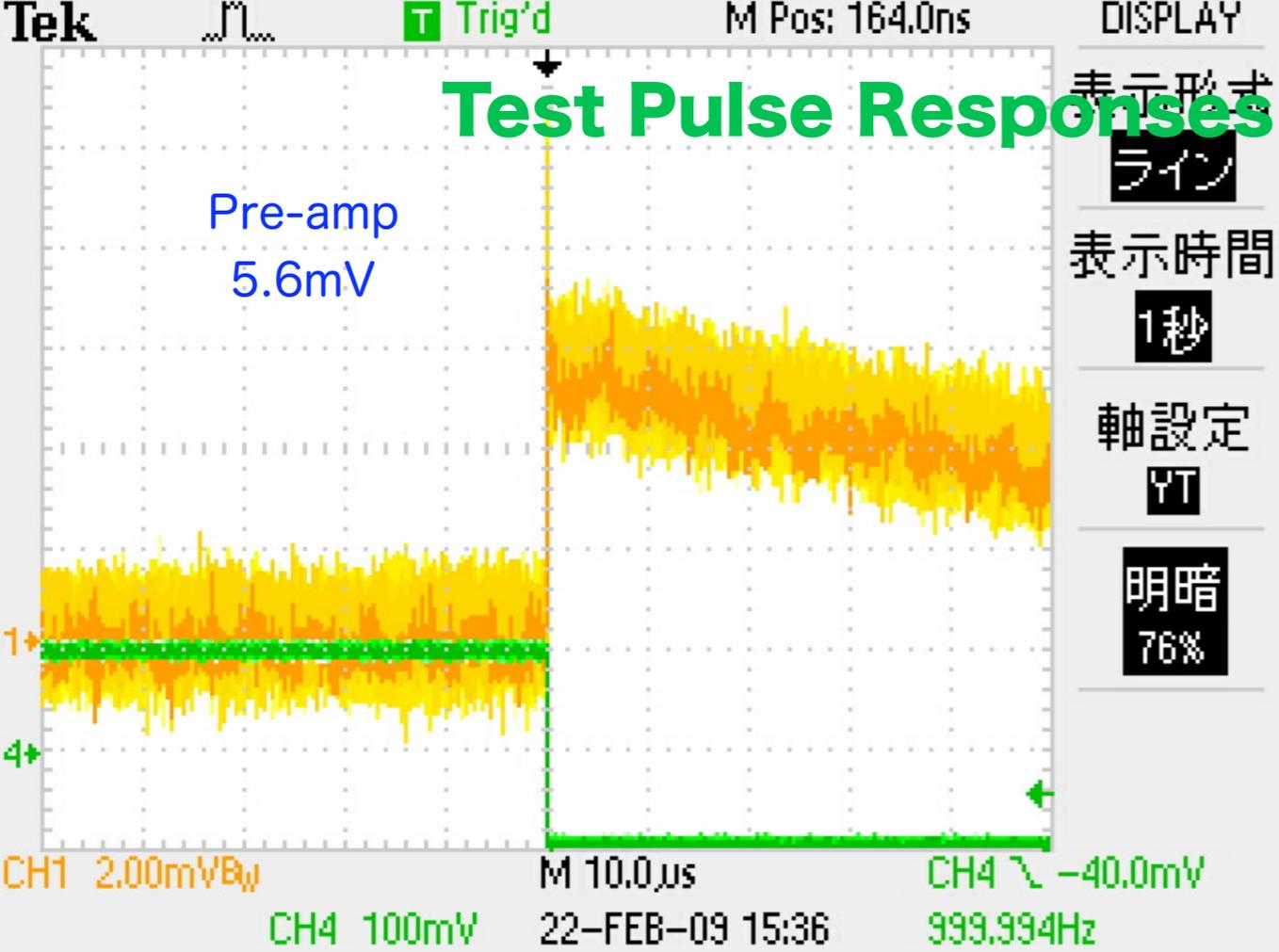
# Preparation for Feb.-Mar.2009

- 1. FETとfeedback用のC (1pF) とR(100MΩ)だけ低温
- 2. Pre-amp (A250)は常温
- 3. 同軸外皮膜(テフロン) 無
- 4. 1 ch (PAD) 読み出し

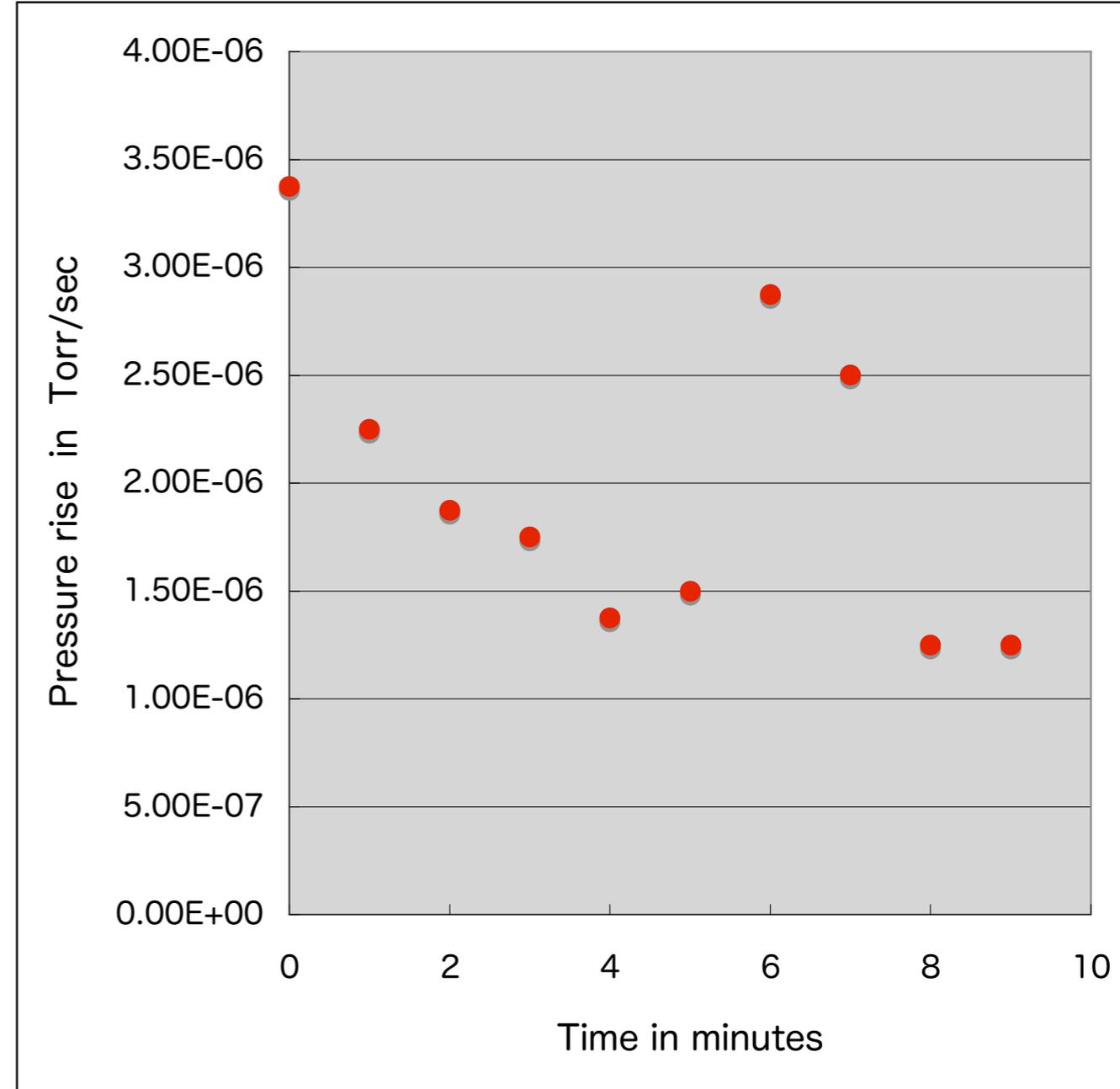
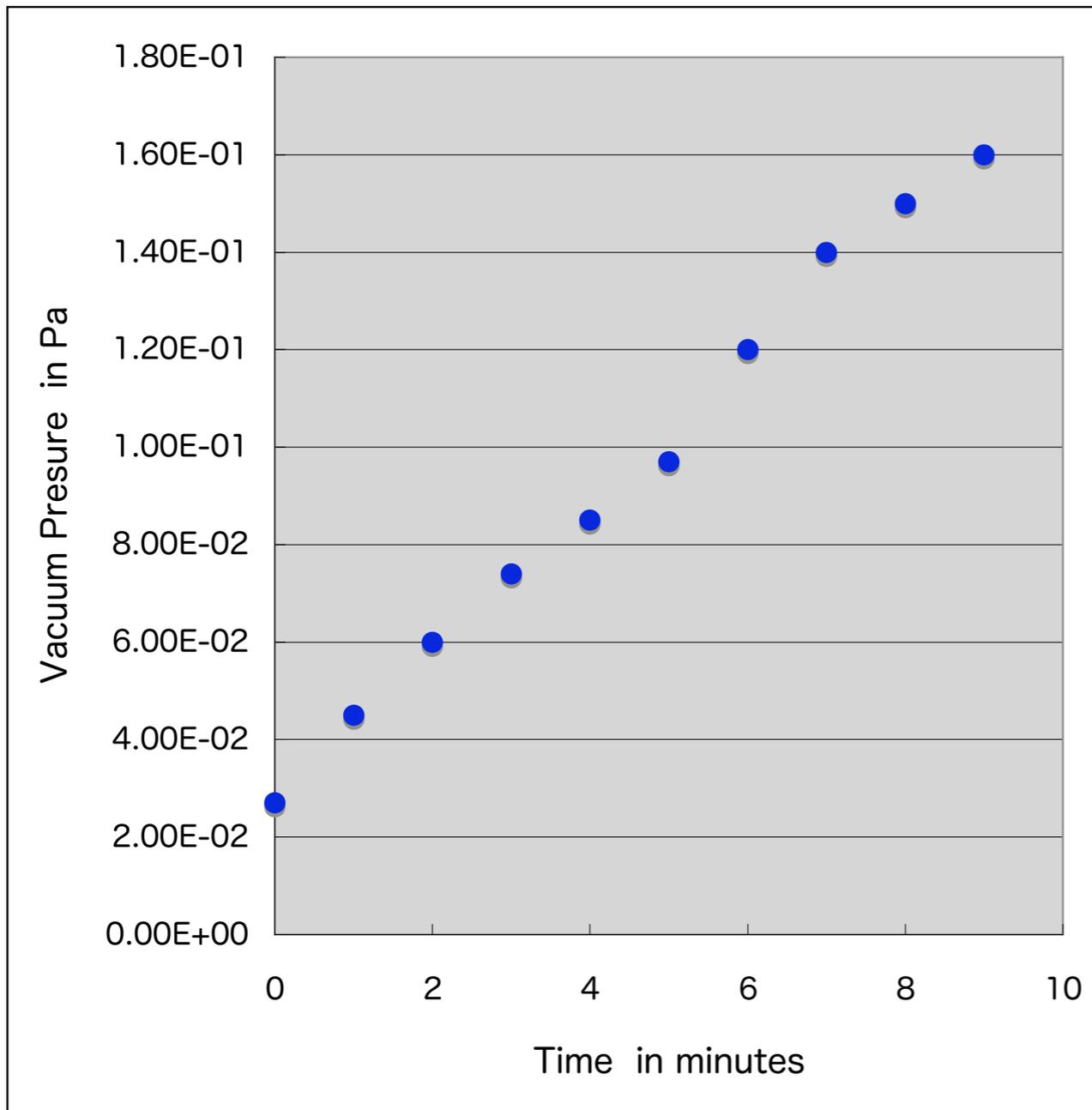


$\alpha$ 線ソース( $^{241}\text{Am}$ , 20Bq)

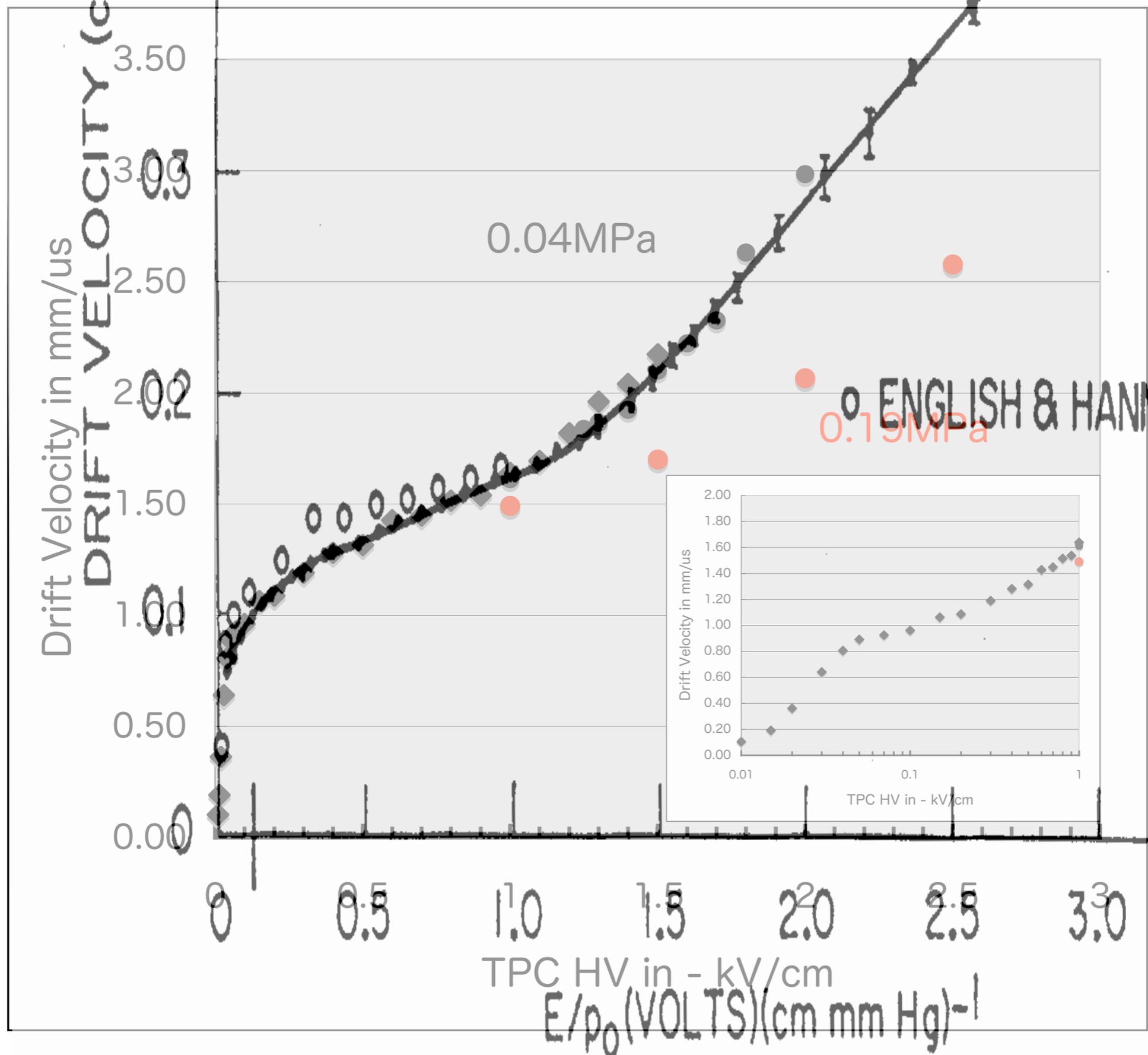




# Vacuum pressure rise in the test chamber for LXe



# Drift velocity in Xe gas for drift in 10mm



# Drift velocity in liquid Xe

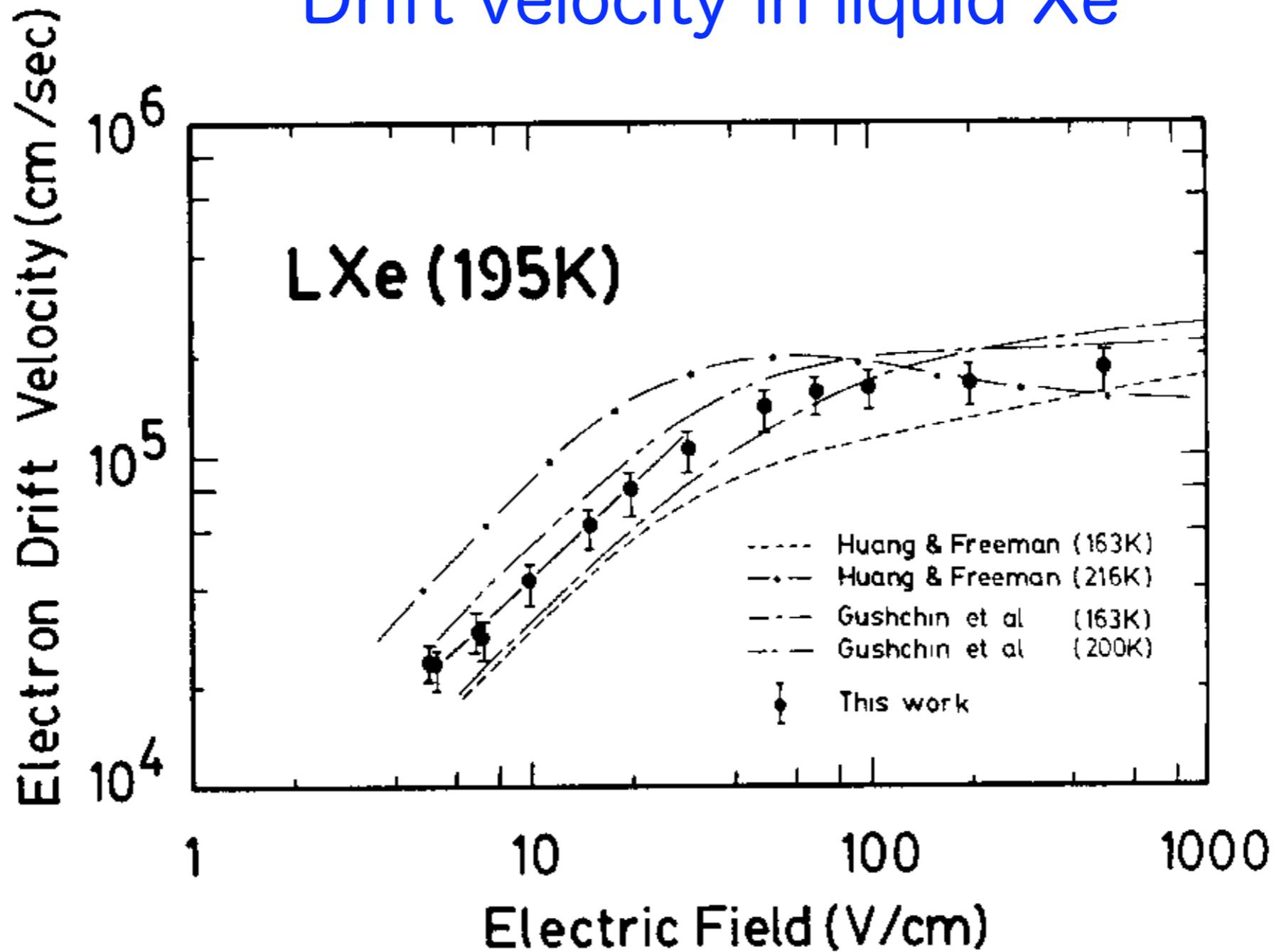
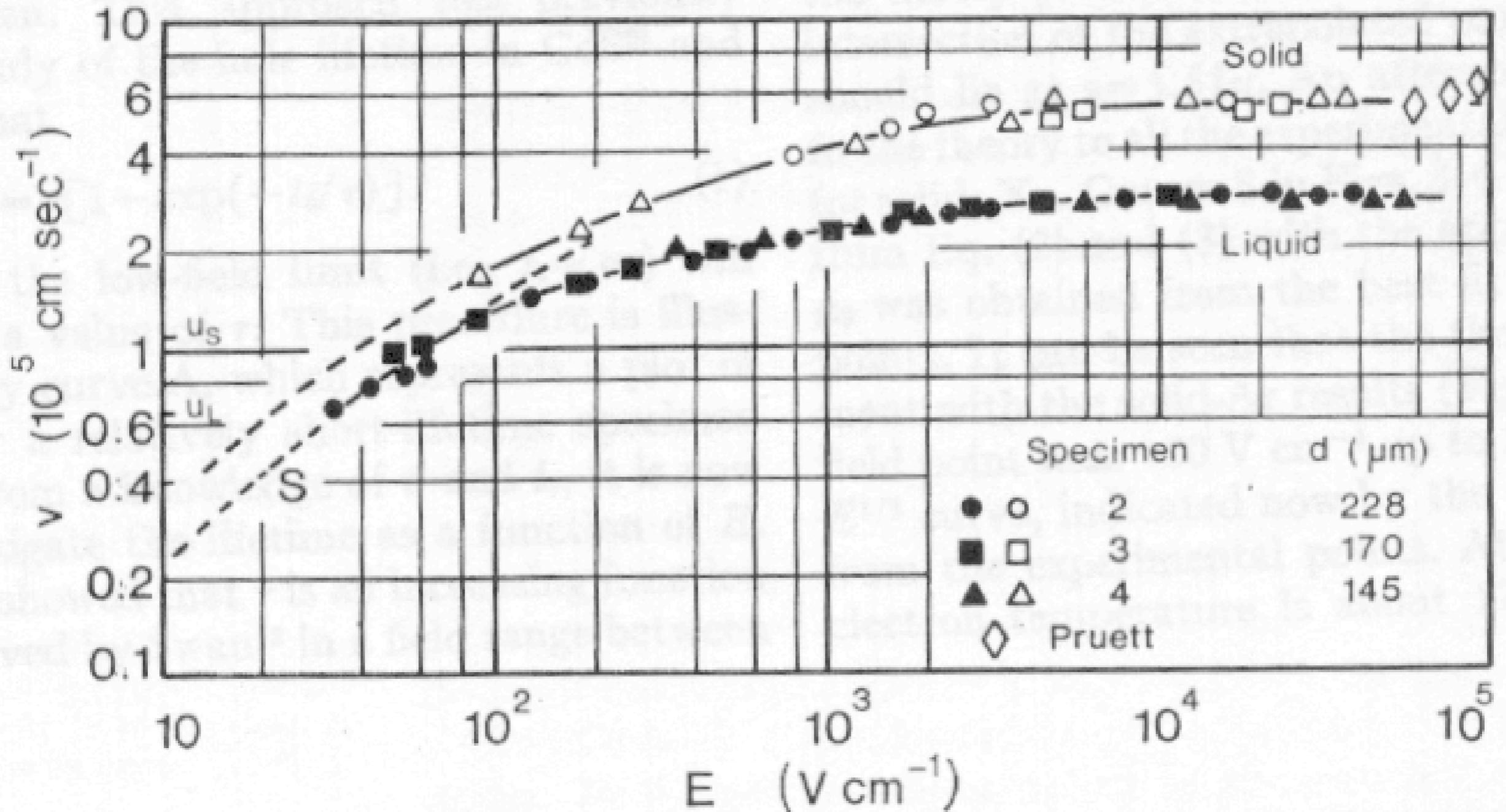
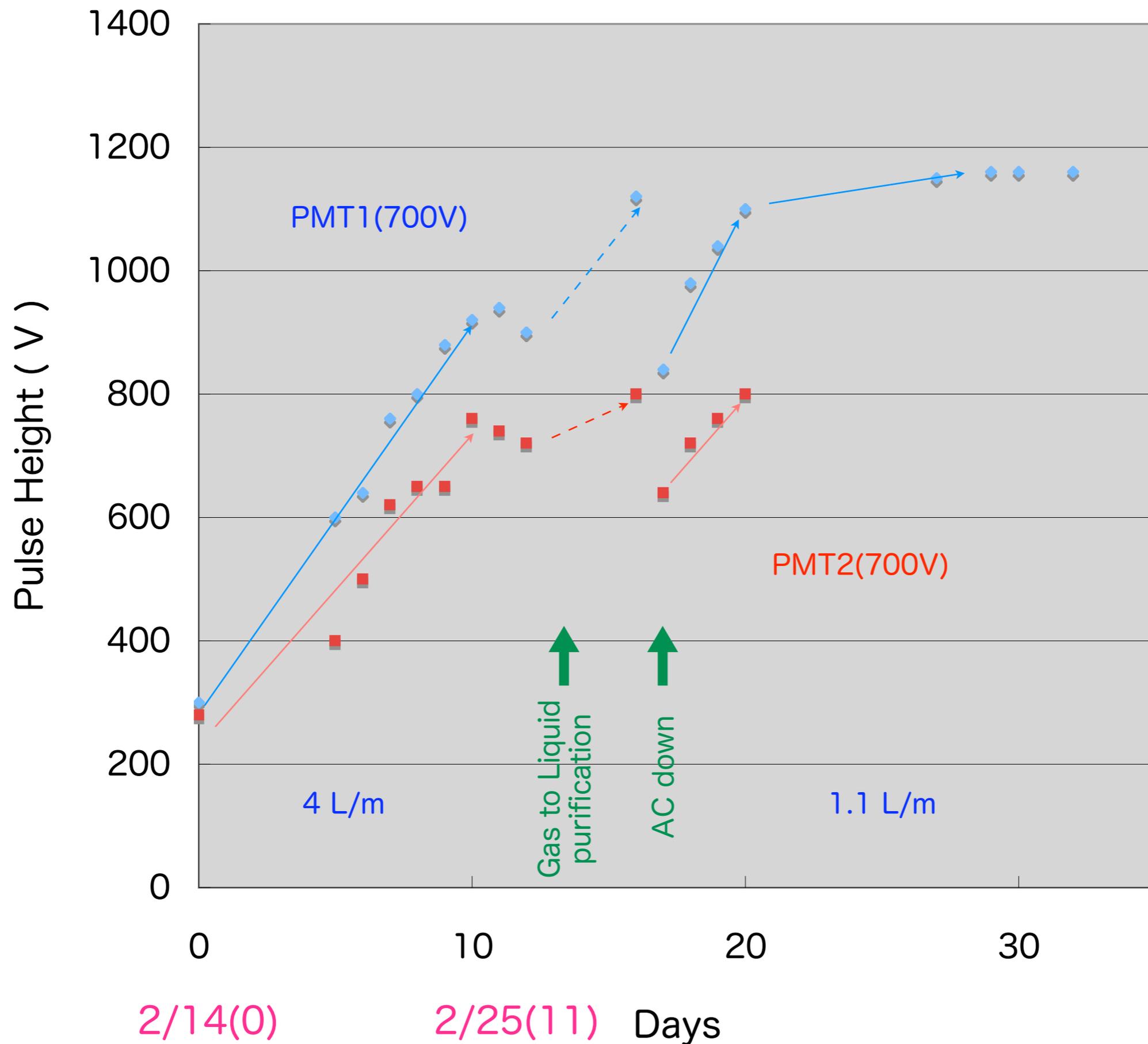


Fig. 5. Electric field dependence of the electron drift velocity in liquid xenon at  $T = 195$  K. The solid line is the fit of  $v_d = \mu_0 E$ , giving  $\mu_0 = (4230 \pm 400) \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . Other lines are from refs. [23,24].

# Drift velocity in liquid and solid Xe



from L.S.Miller, S.Howe, W.E.Spear, Phys. Rev. 166 (1968), 871



2/14(0)

2/25(11)

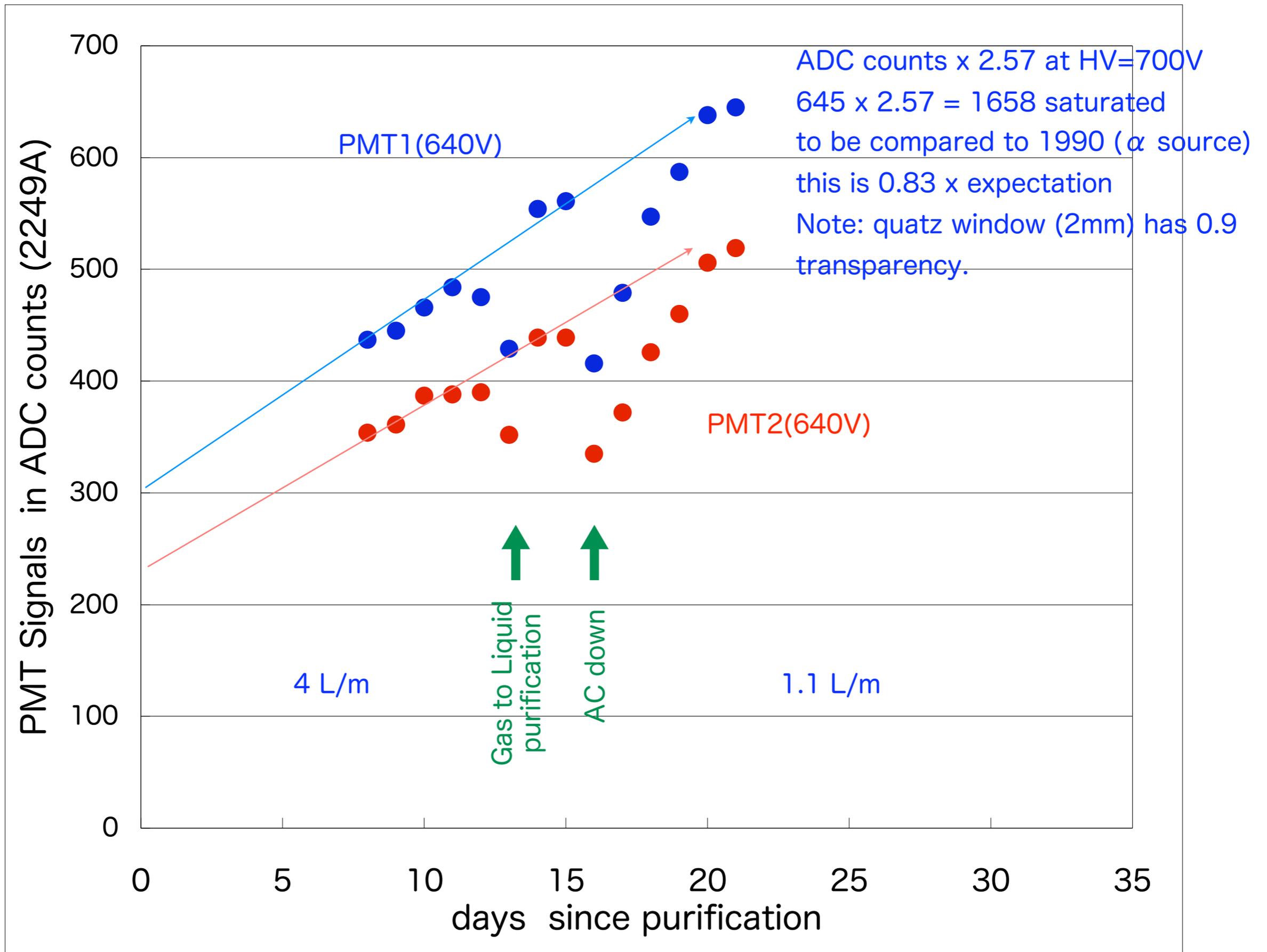
Days

3/31(45)

Charge signals

cosmic rays

$\alpha$  source



4 L/m

Gas to Liquid  
purification

AC down

1.1 L/m

2/14(0)

2/25(11)

3/31(45)

Charge signals

cosmic rays

$\alpha$  source

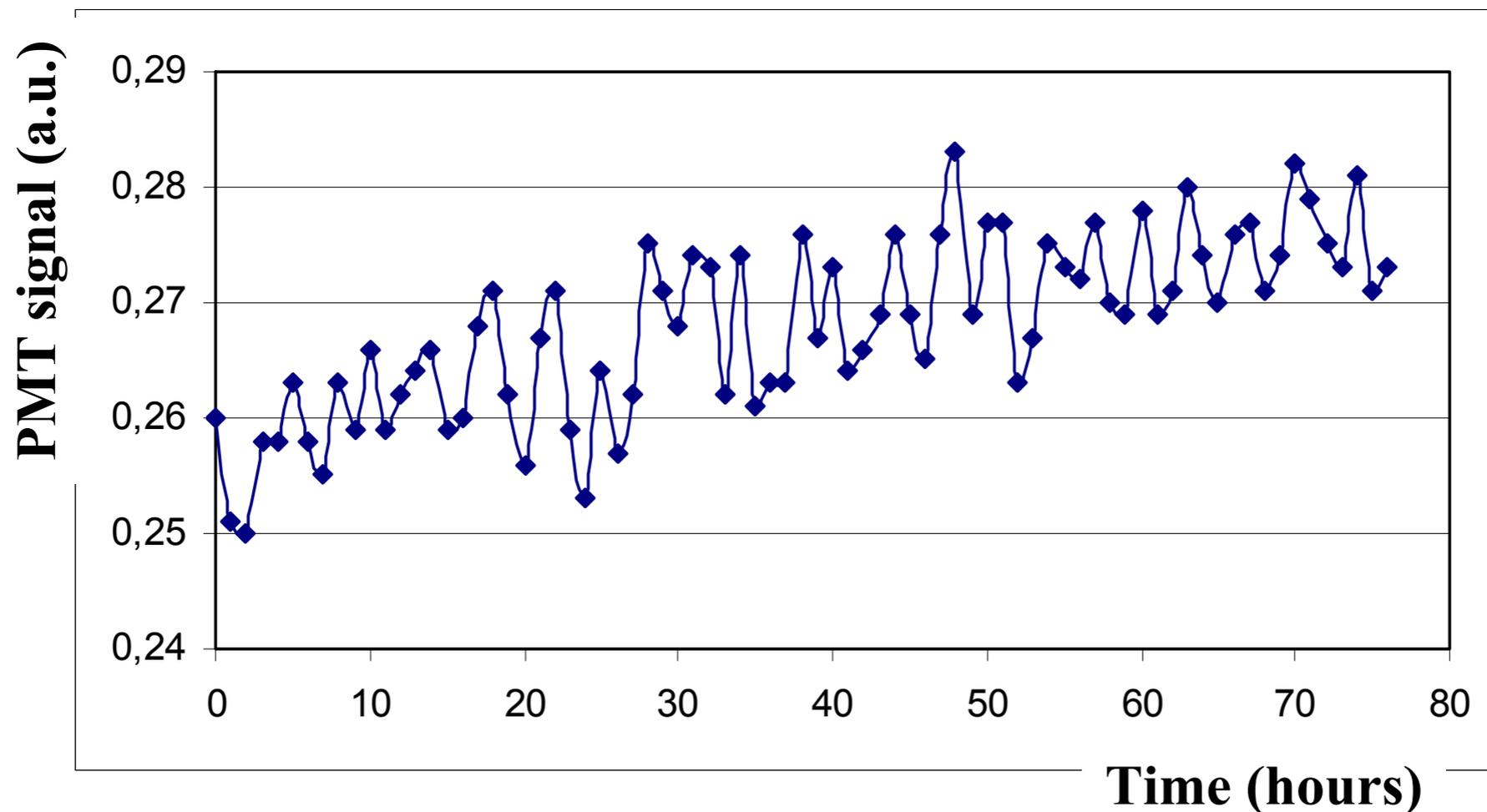
# Xenon purification

Nantes

10L in total

3L/min of purification

Purification effect on scintillation signal :



Continuous signal improvement on PMT : ~ 6% in 3 days ( preliminary )

! Similar tests with charge collection...

# Purification : XENON

Main impurities, but there are others:  
Purity for light is determined by **water**.  
Purity for charge is also determined by **oxygen**.

Purification of Gas with continuous re-circulation  
and passage of gas through hot getter (SAES)

We monitor:  
Initially: light yield ( S1 )  
Then: Charge yield vs. drift time ( S2 )

Xenon10  
Recirculation speed 5 SLPM  
Maximum drift time: >2msec  
Duration of cleaning: 2 months  
8.2L in total, 1.6L in fiducial  
20cm diameter, 15cm long  
0.73kV/cm

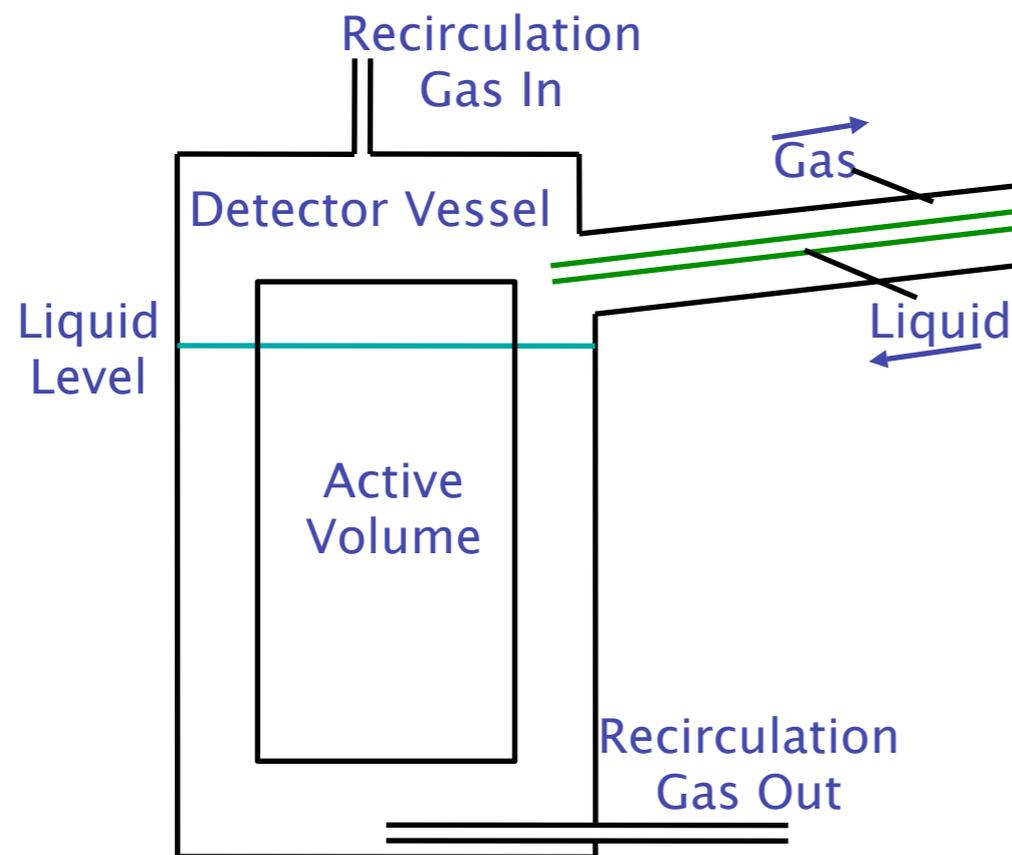
Xenon100  
Recirculation speed 10 SLPM  
Light yield still increasing  
55.6L in total, 16.3L in fiducial

# Liquid Detector Medium

LXe behaves like most other liquids.  
We can use this for detector design.

1. Odd shaped detectors
2. Transporting heat (cold)
3. Efficient conversion gas - liquid

But, it also might freeze.

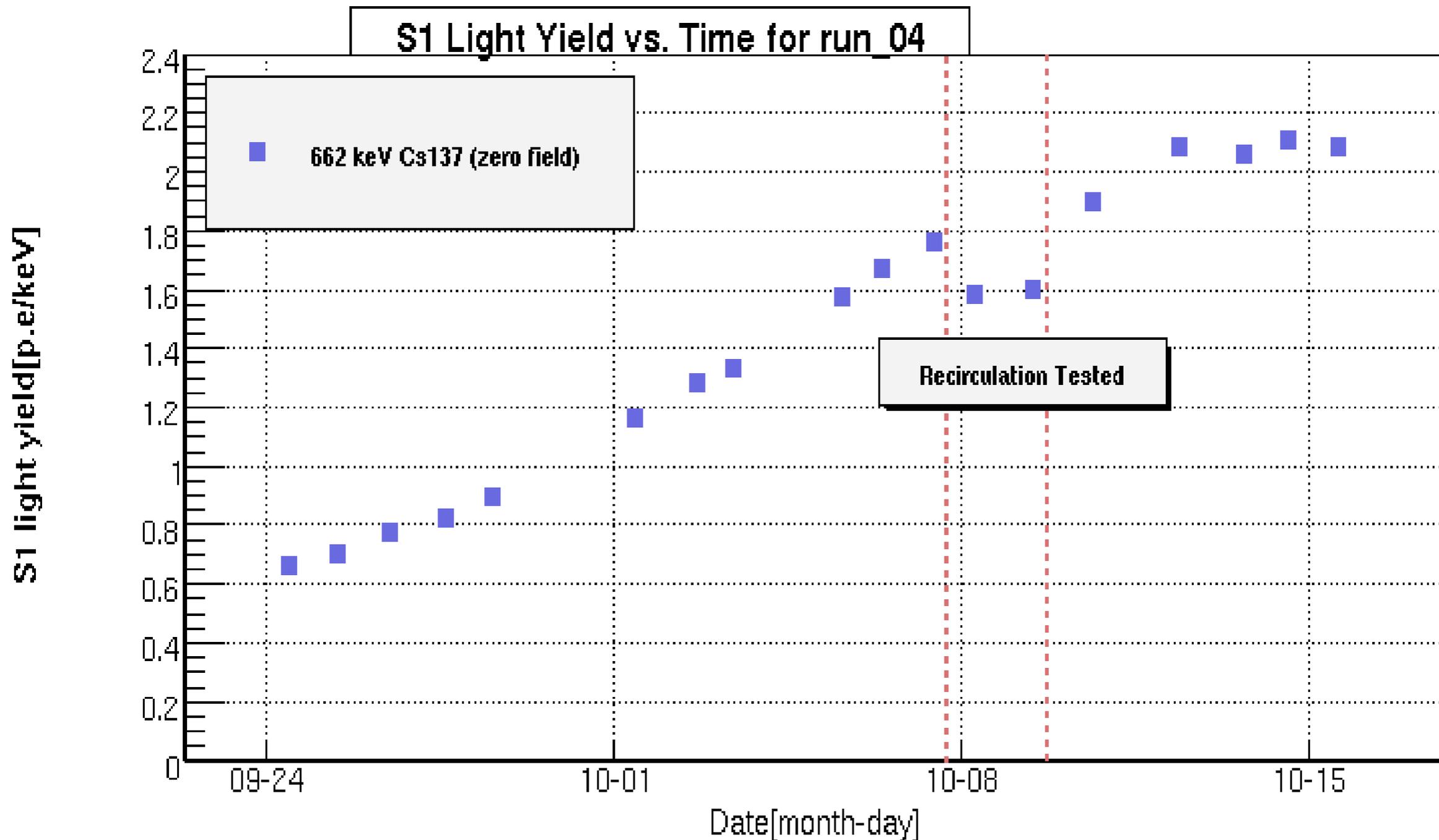


In equilibrium state direct relation between pressure and temperature. Therefore, two ways to control the liquid.

Temperature regulated: PTR cooling  
Pressure regulated: Emergency LN2 cooling

Cleaning of Detector takes time.

Time - "Driver" is out gassing rate, not recirculation speed.

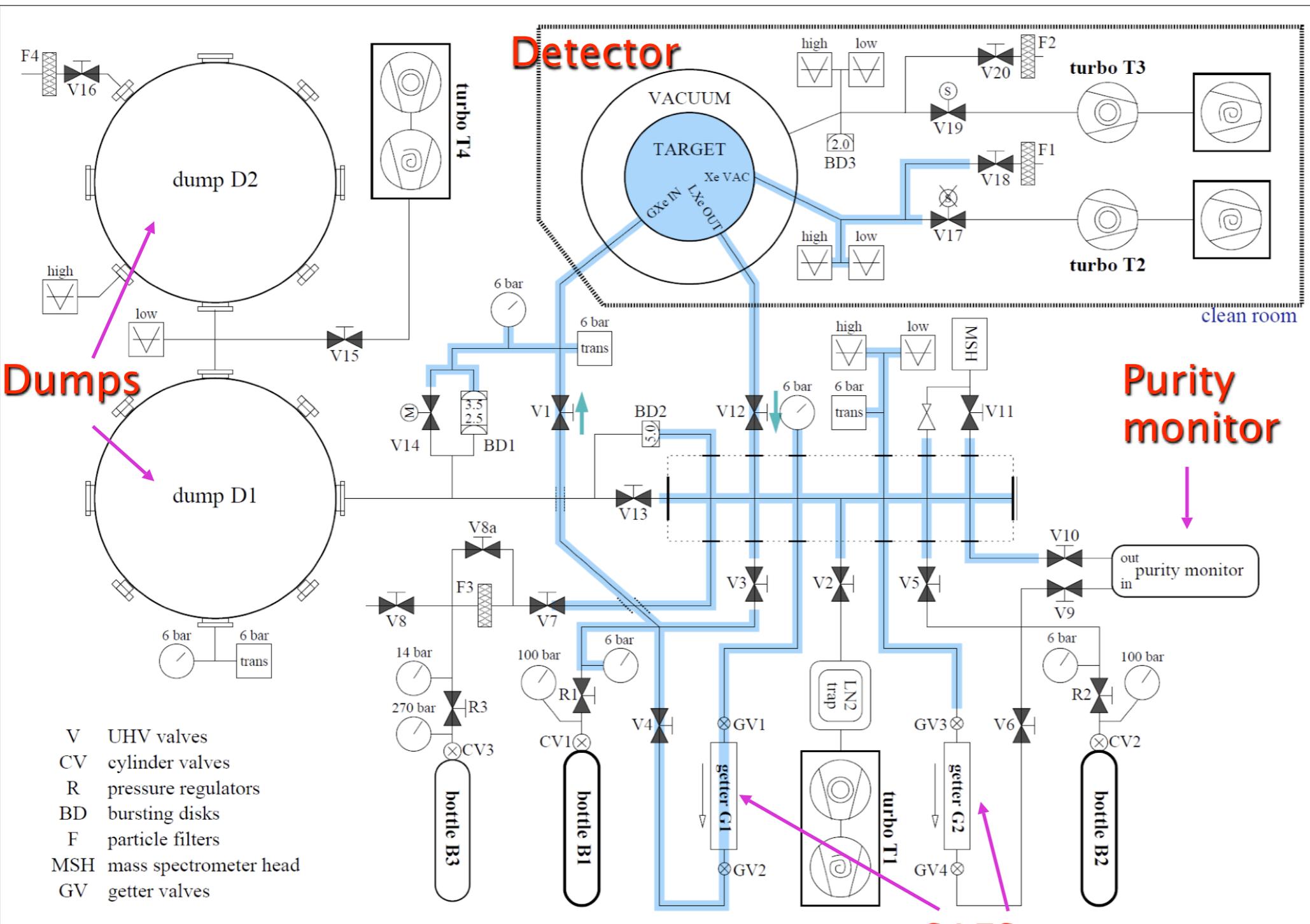


# Purification/gas-filling system ( ZEPLIN III)

The main aim: to remove electronegative contaminants which suppress S2 signal down to the ppb level

The base vacuum attainable in the system is  $\sim 10^{-8}$  torr, dominated by  $H_2$ ; a partial  $H_2O$  pressure of  $\sim 10^{-10}$  torr was achieved prior to the xenon filling

40cm diameter  
3.5cm drift  
all copper(OFC)  
3.9kV/cm  
16.3L in total  
3.9L in fiducial



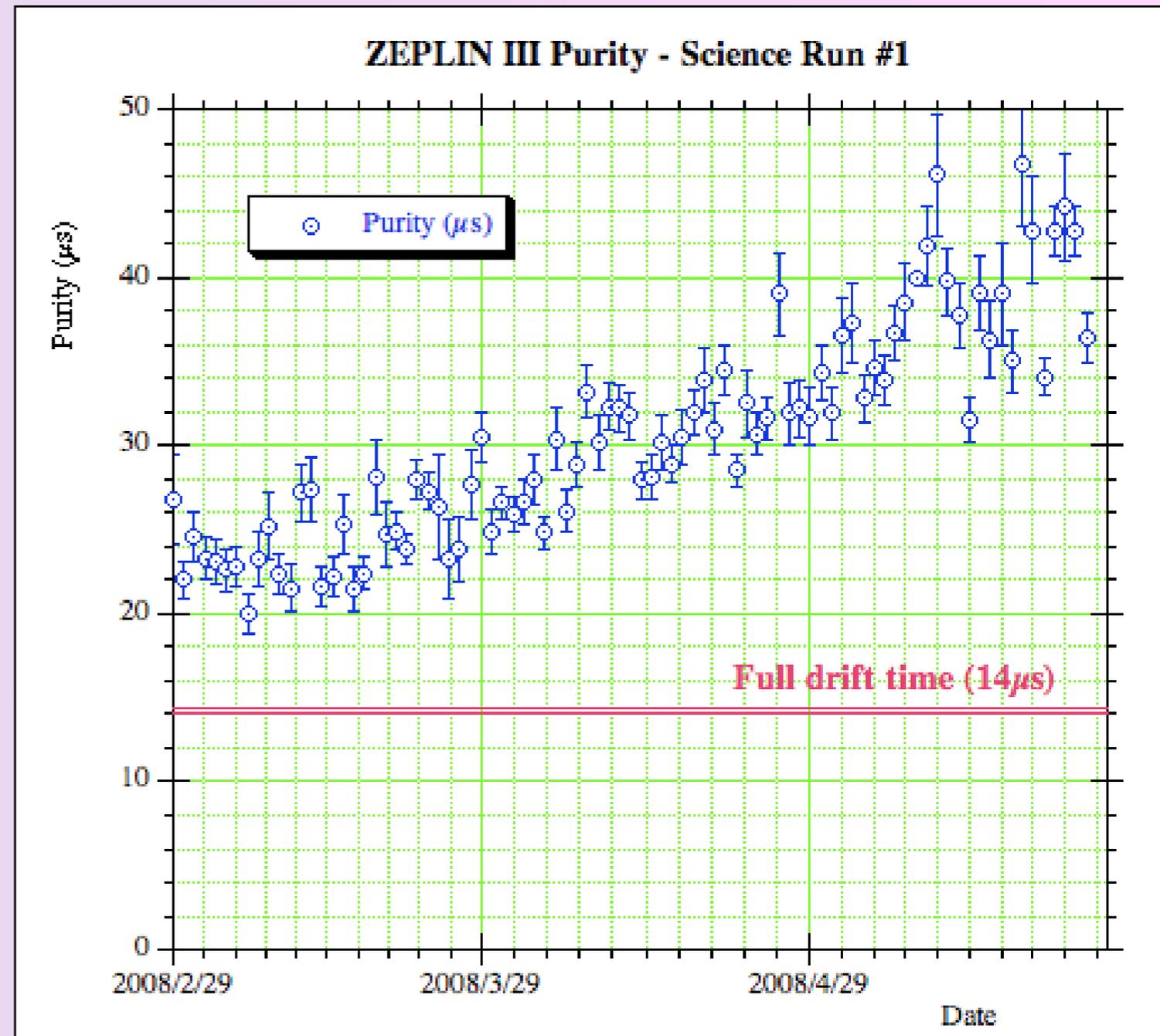
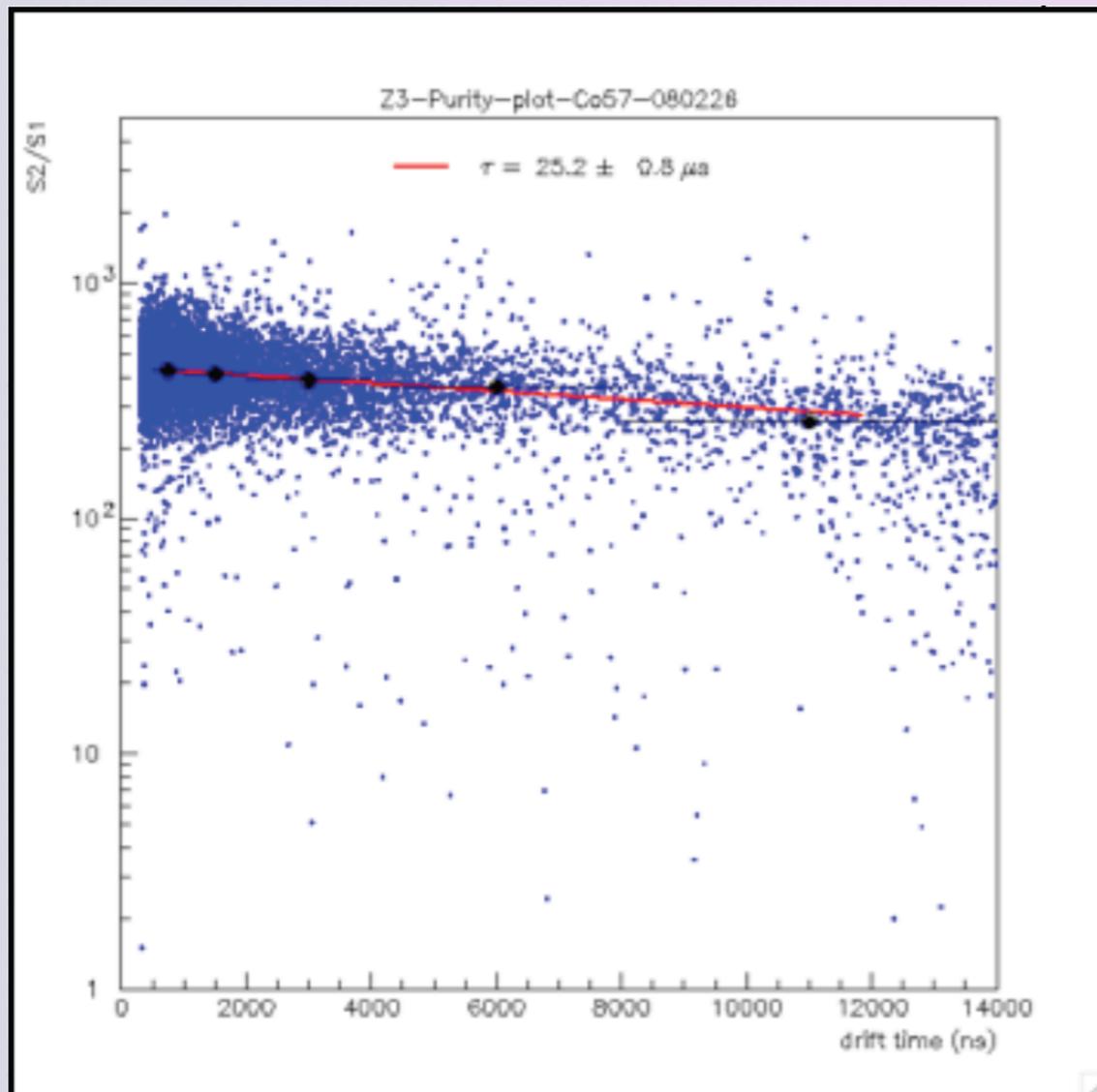
SAES getters

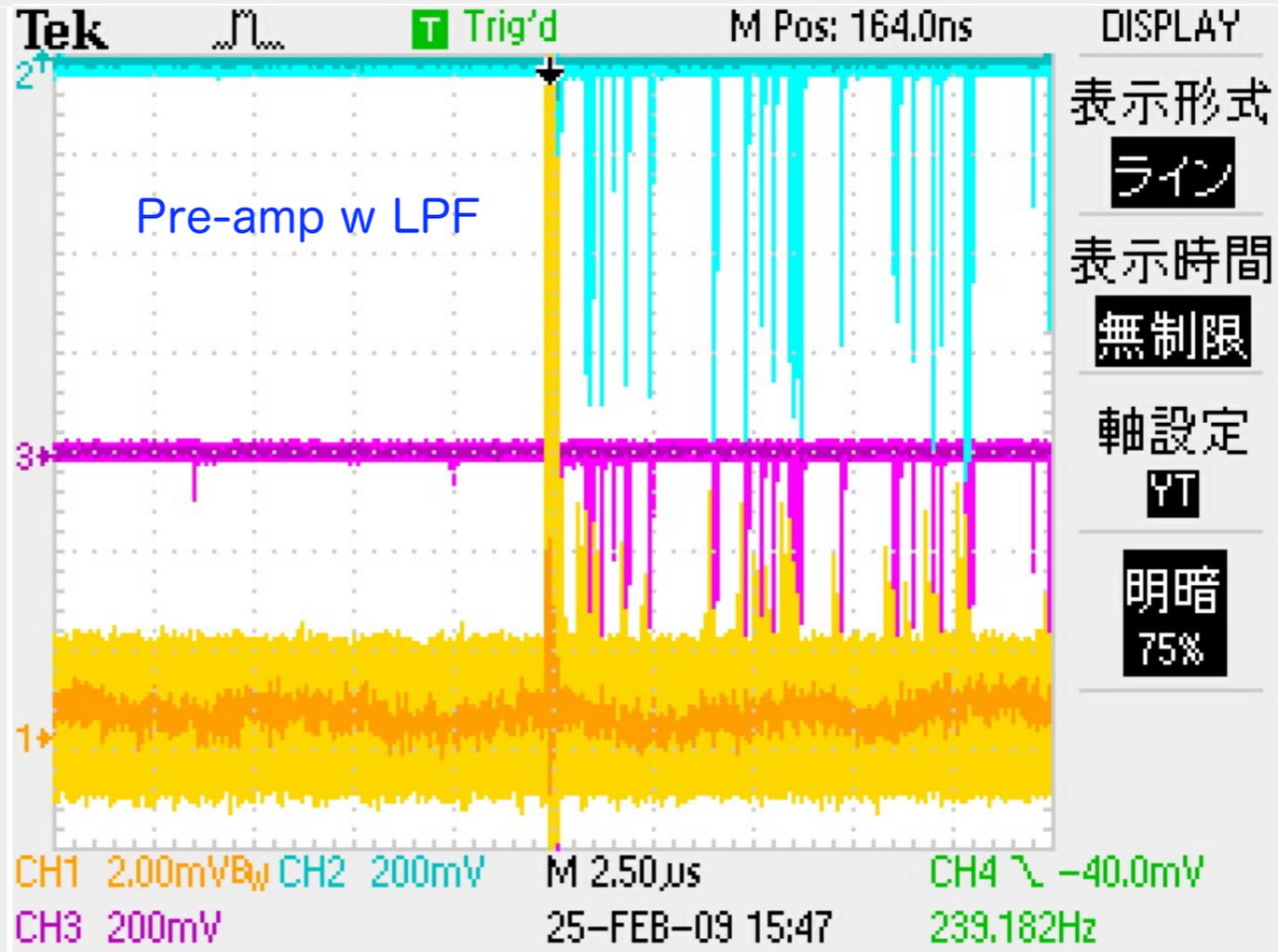
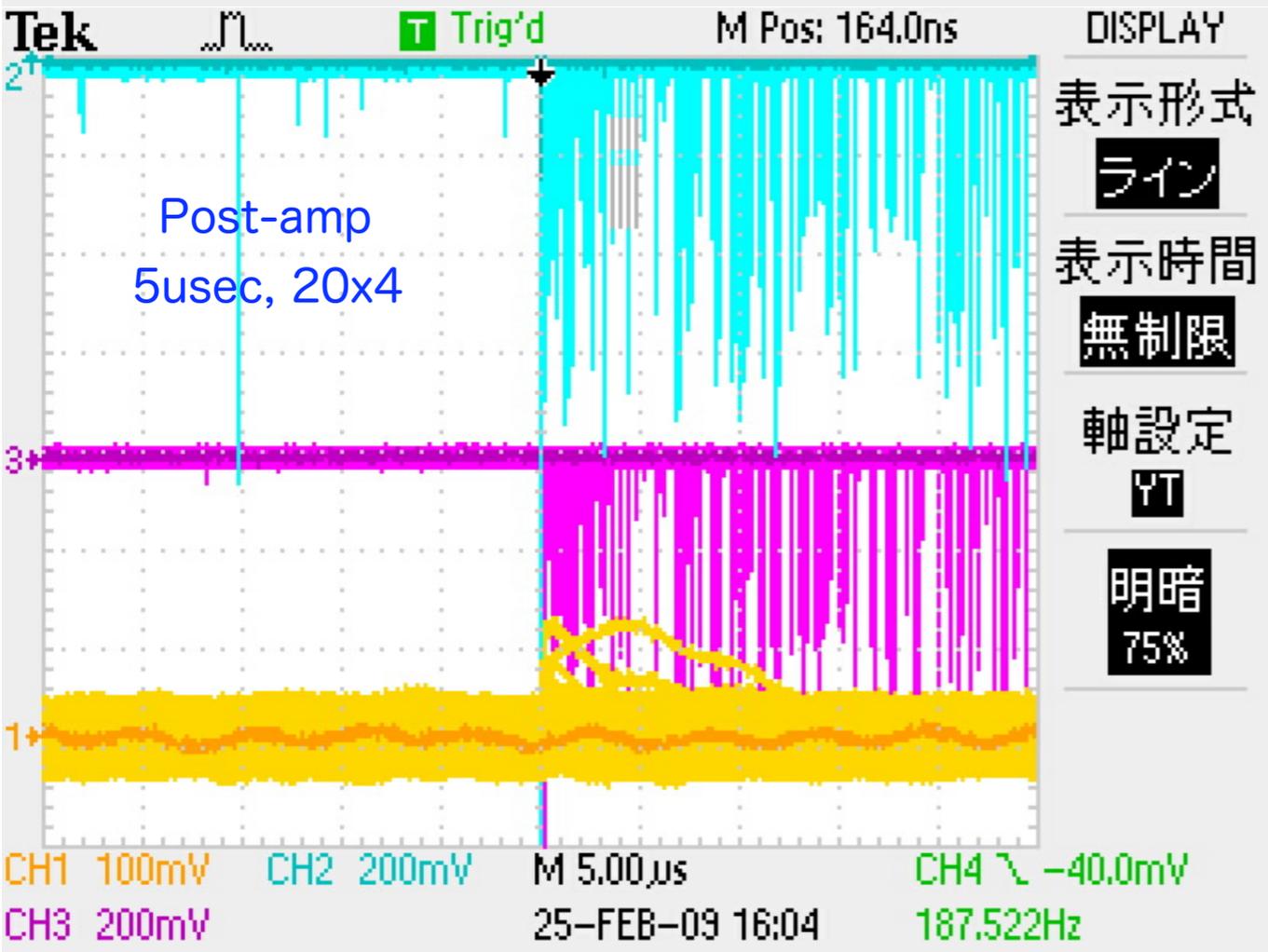
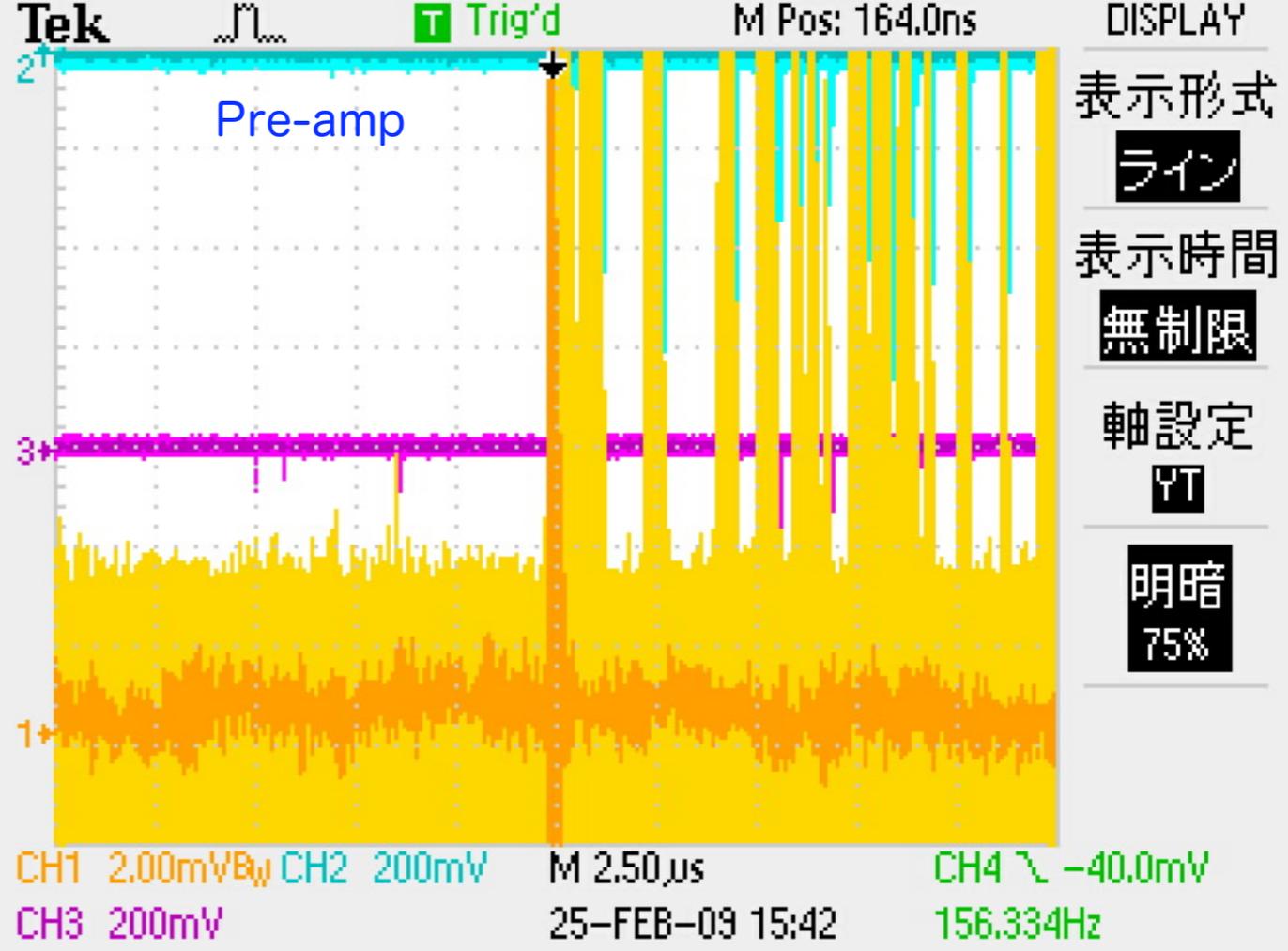
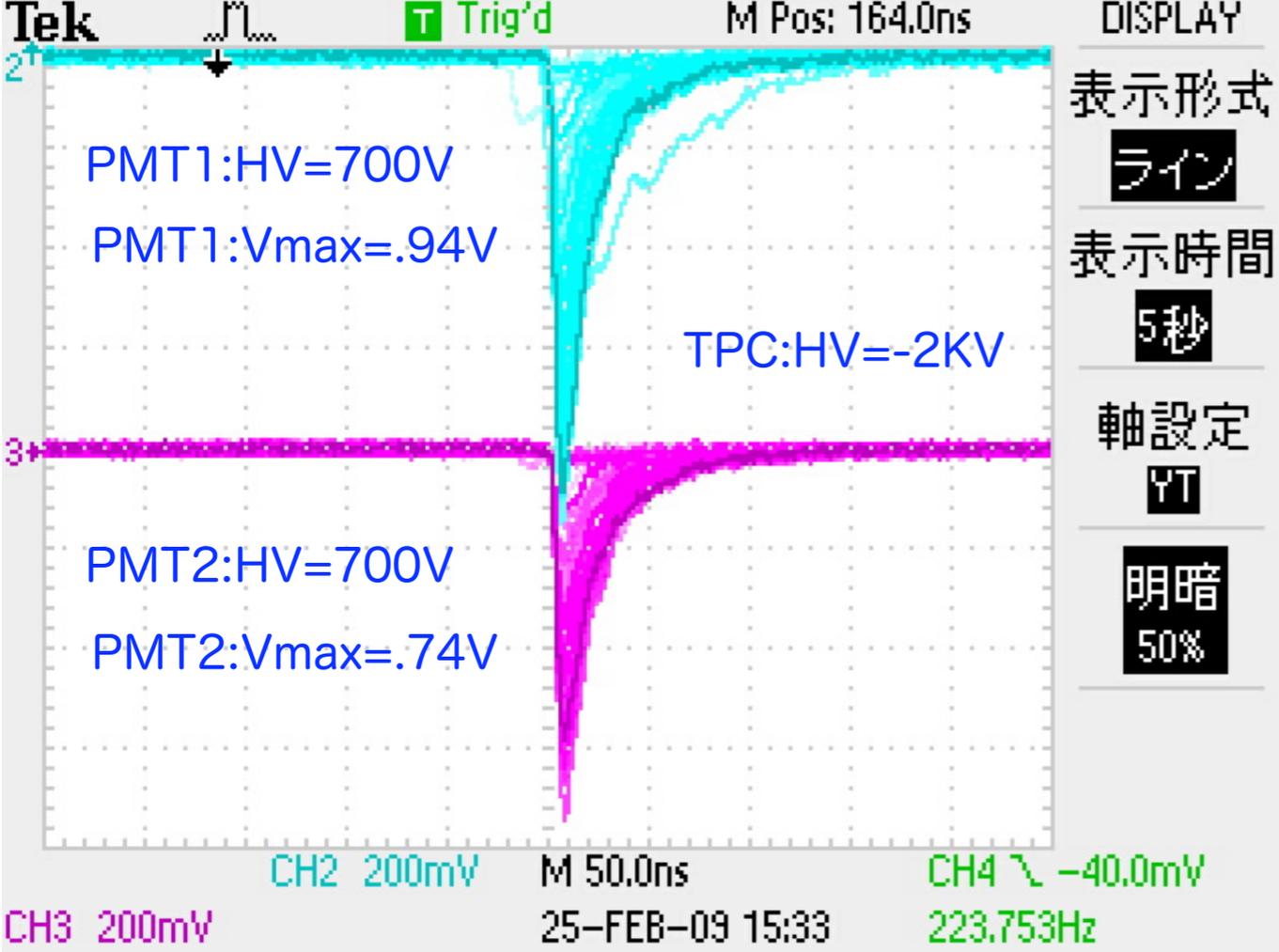
# Purity Evolution

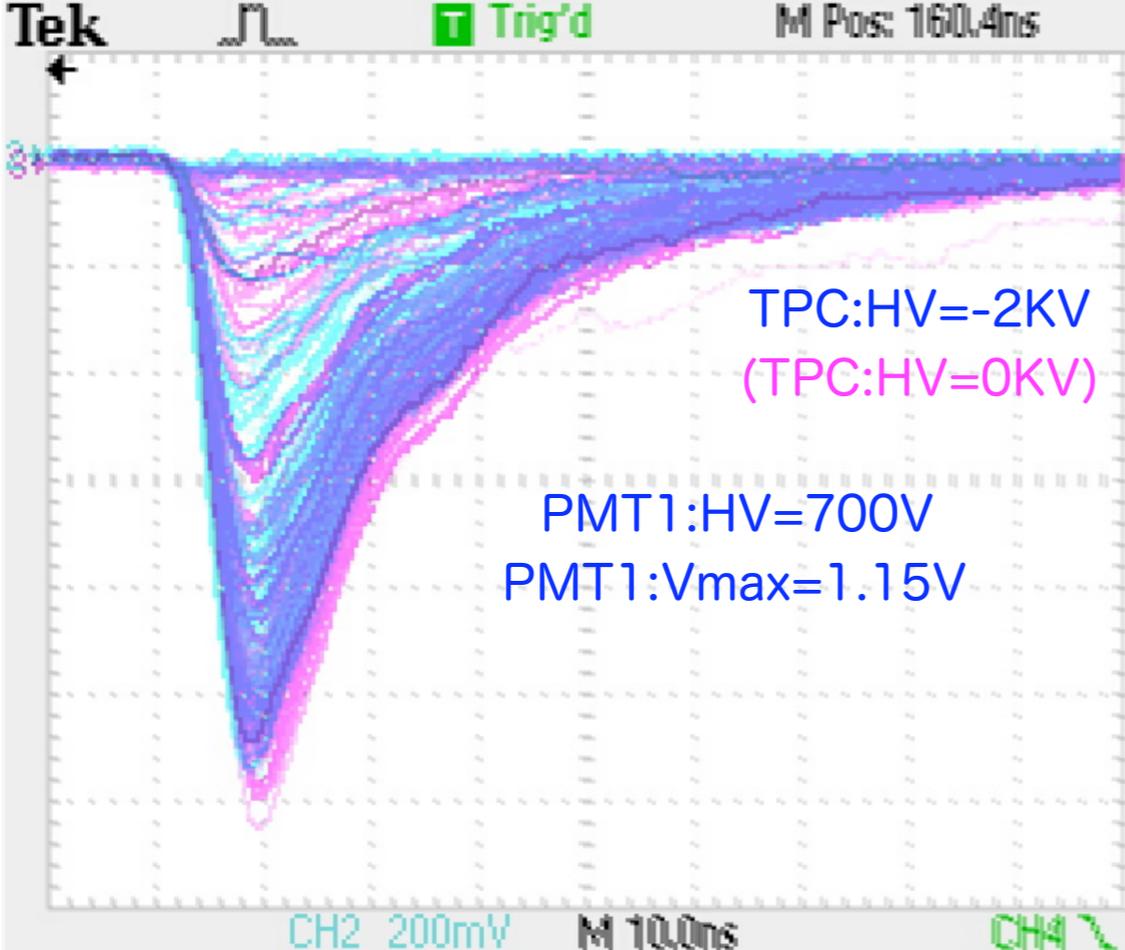
Knowledge of purity is necessary for S2 correction

Note that in the 1<sup>st</sup> run there was no recirculation through the getters. “Self cleaning”

- Daily monitor with  $^{57}\text{Co}$  source for stability measurement
- S2/S1 as a function of depth
- Cross check against FSR &  $^{137}\text{Cs}$







DISPLAY

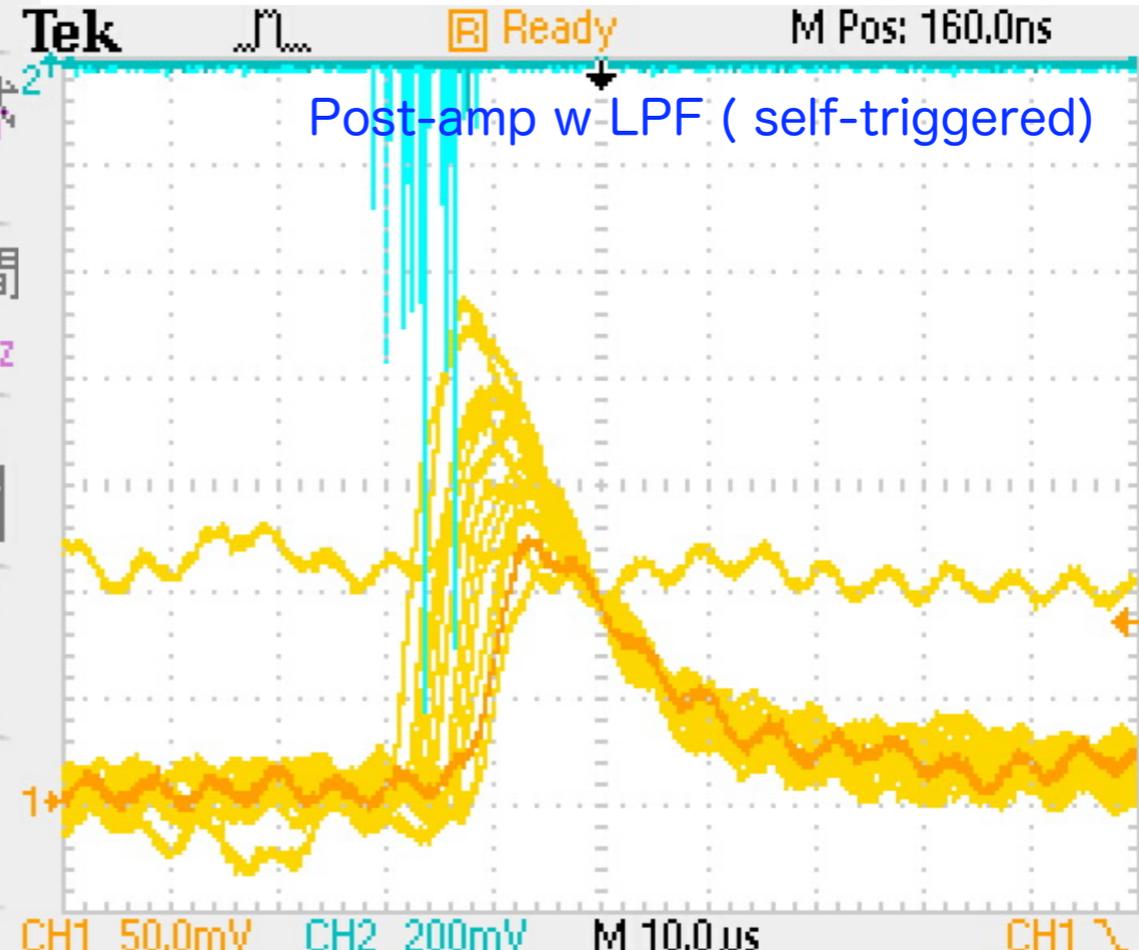
表示形式  
ライン

表示時間  
Full

軸設定  
ステップ

明暗  
71%

反転  
オフ



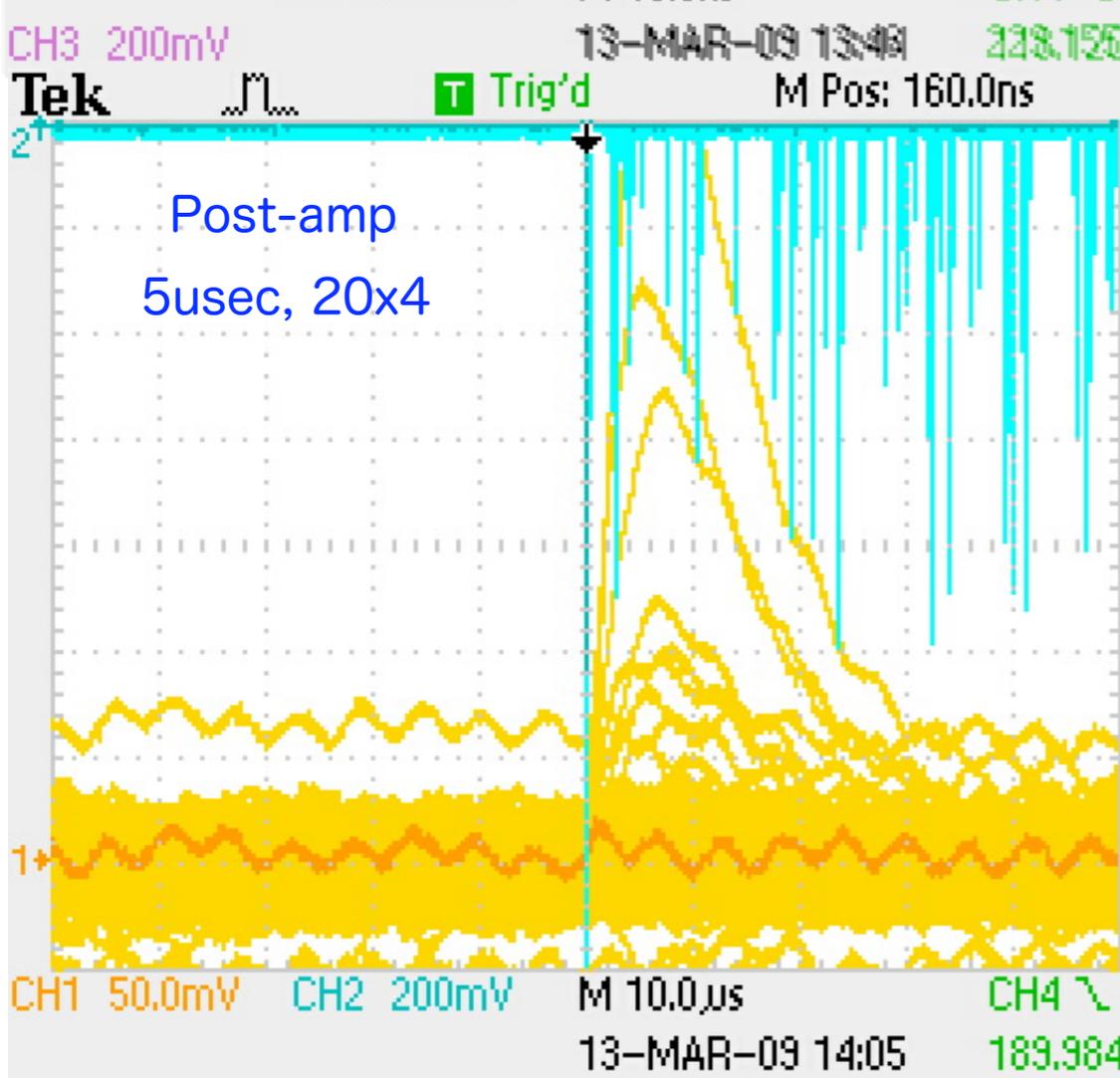
DISPLAY

表示形式  
ライン

表示時間  
無制限

軸設定  
YT

明暗  
71%



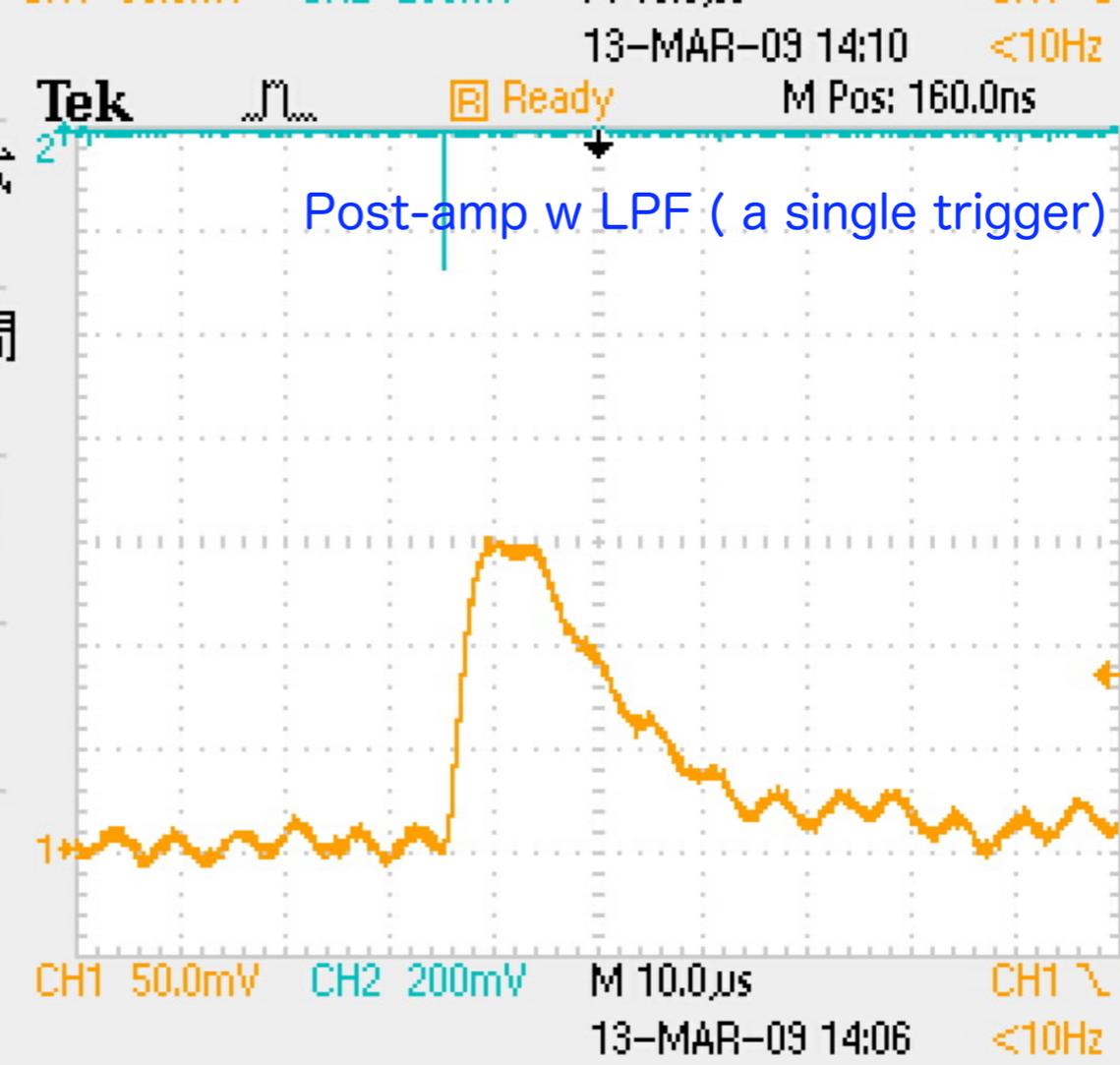
DISPLAY

表示形式  
ライン

表示時間  
無制限

軸設定  
YT

明暗  
71%



TRIGGER

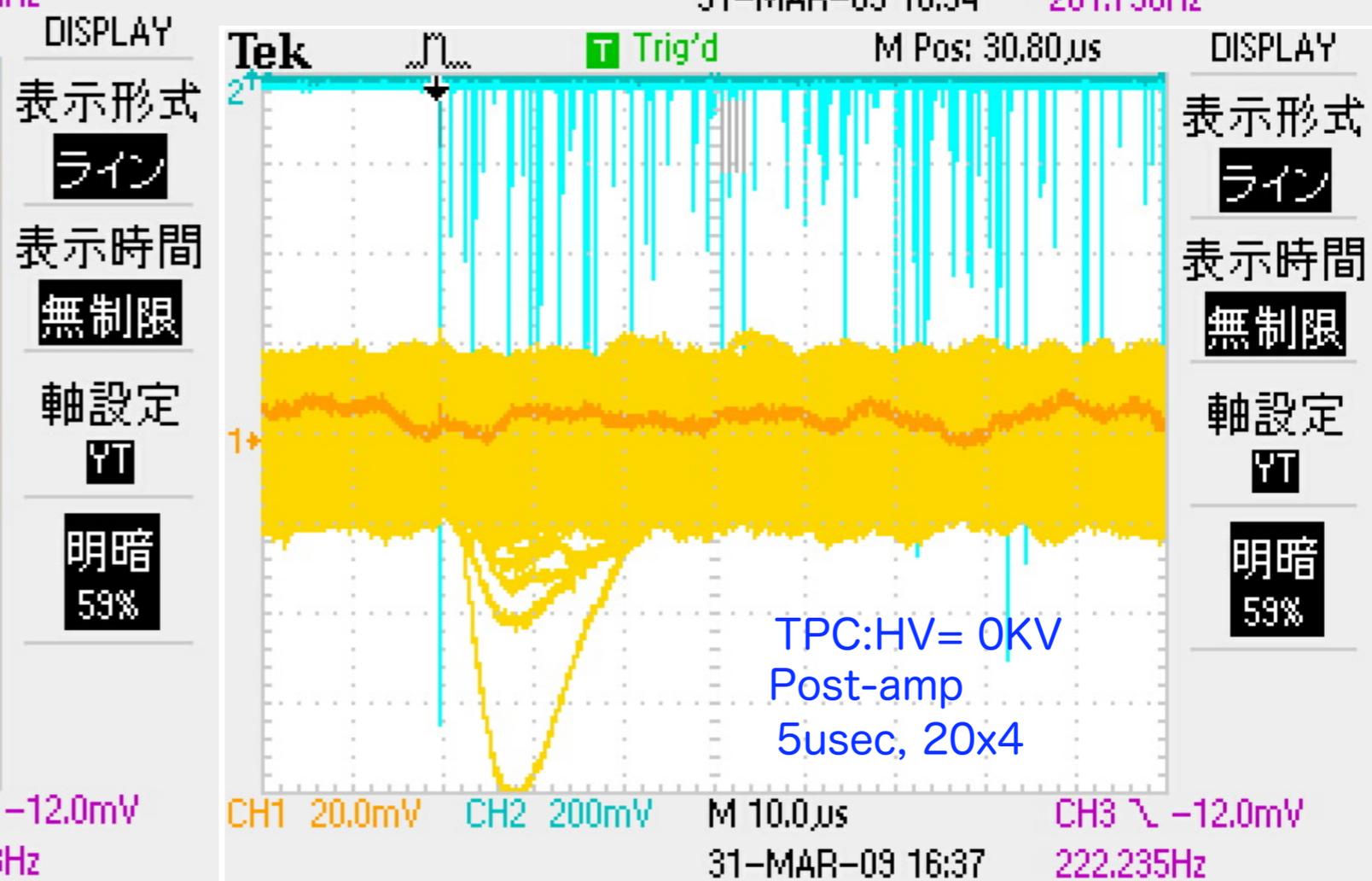
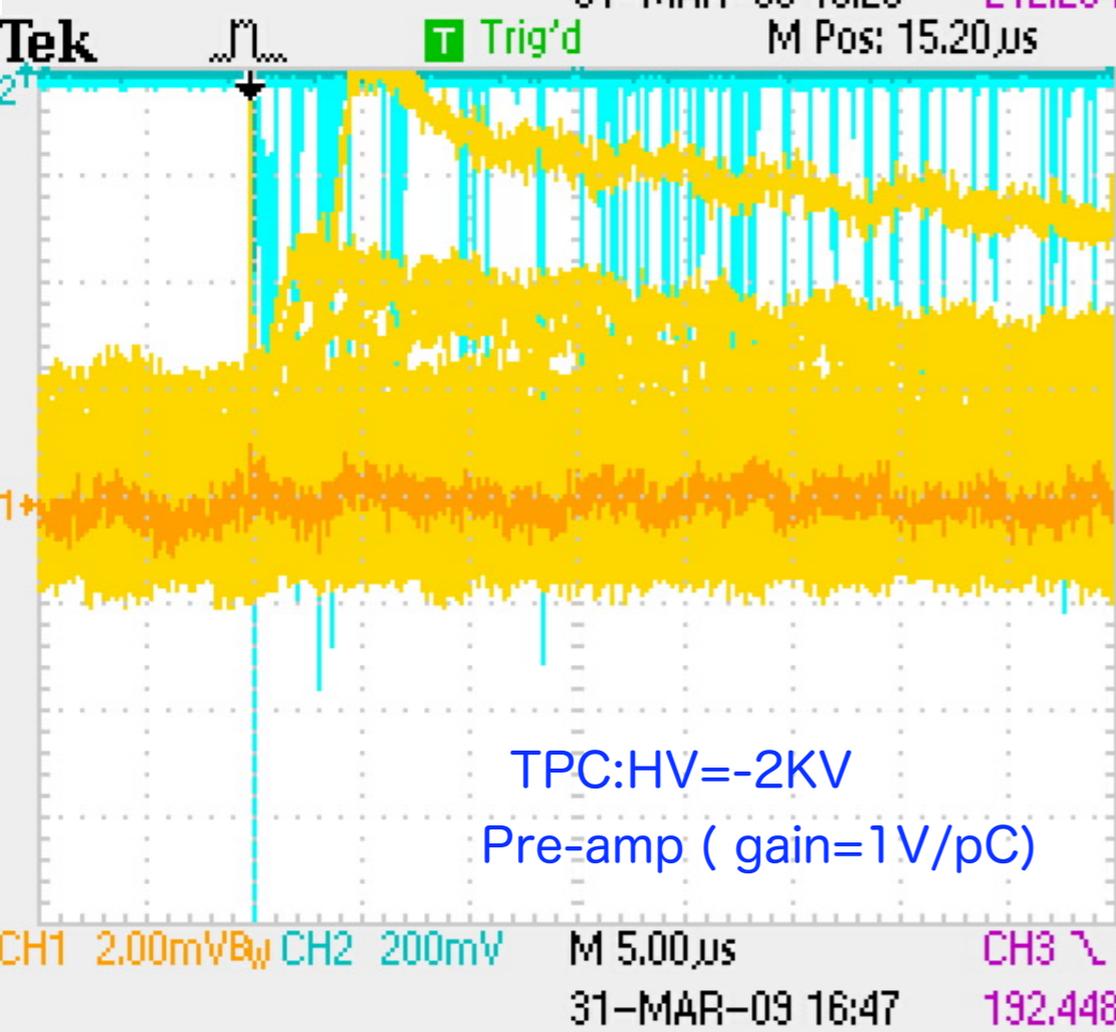
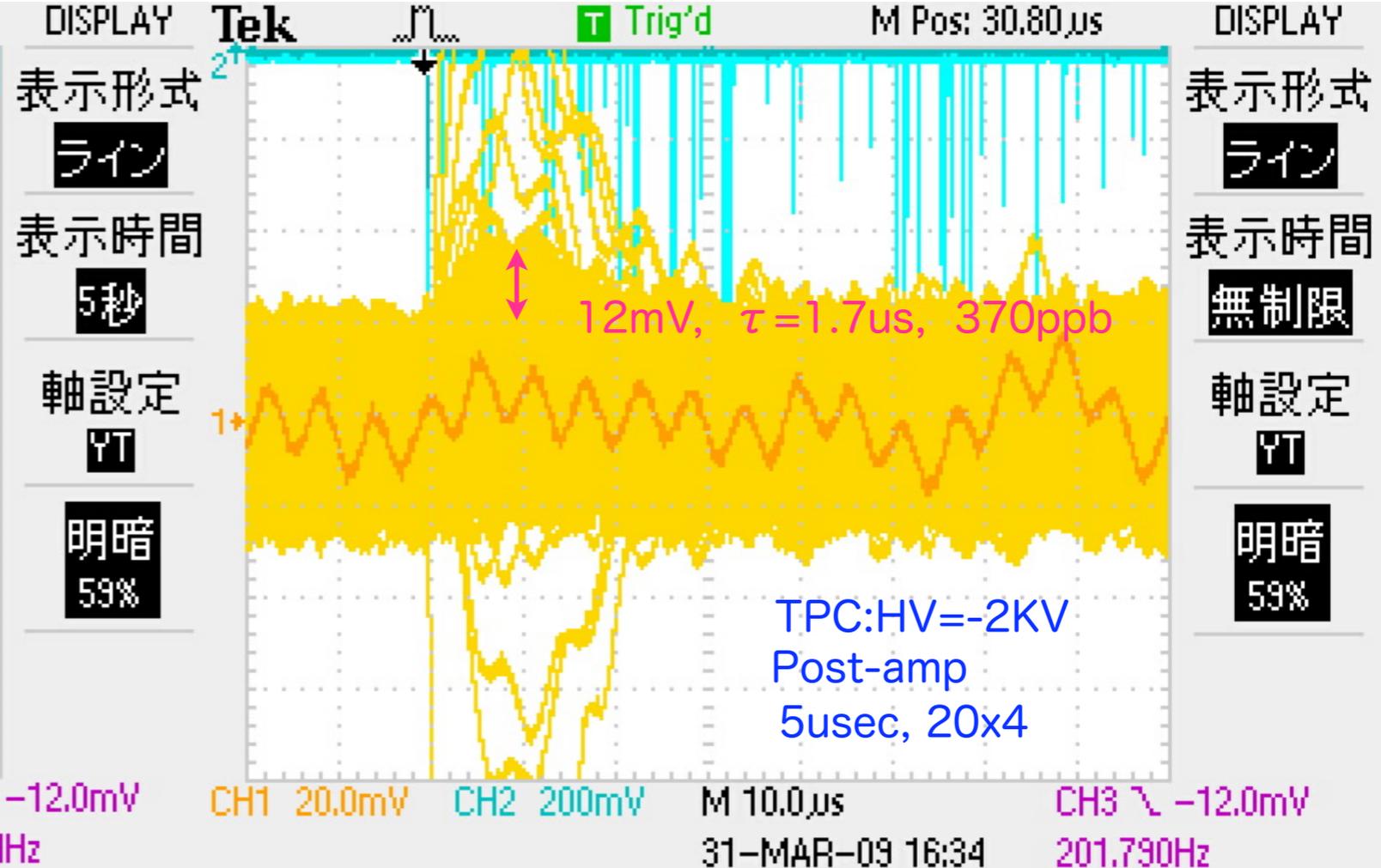
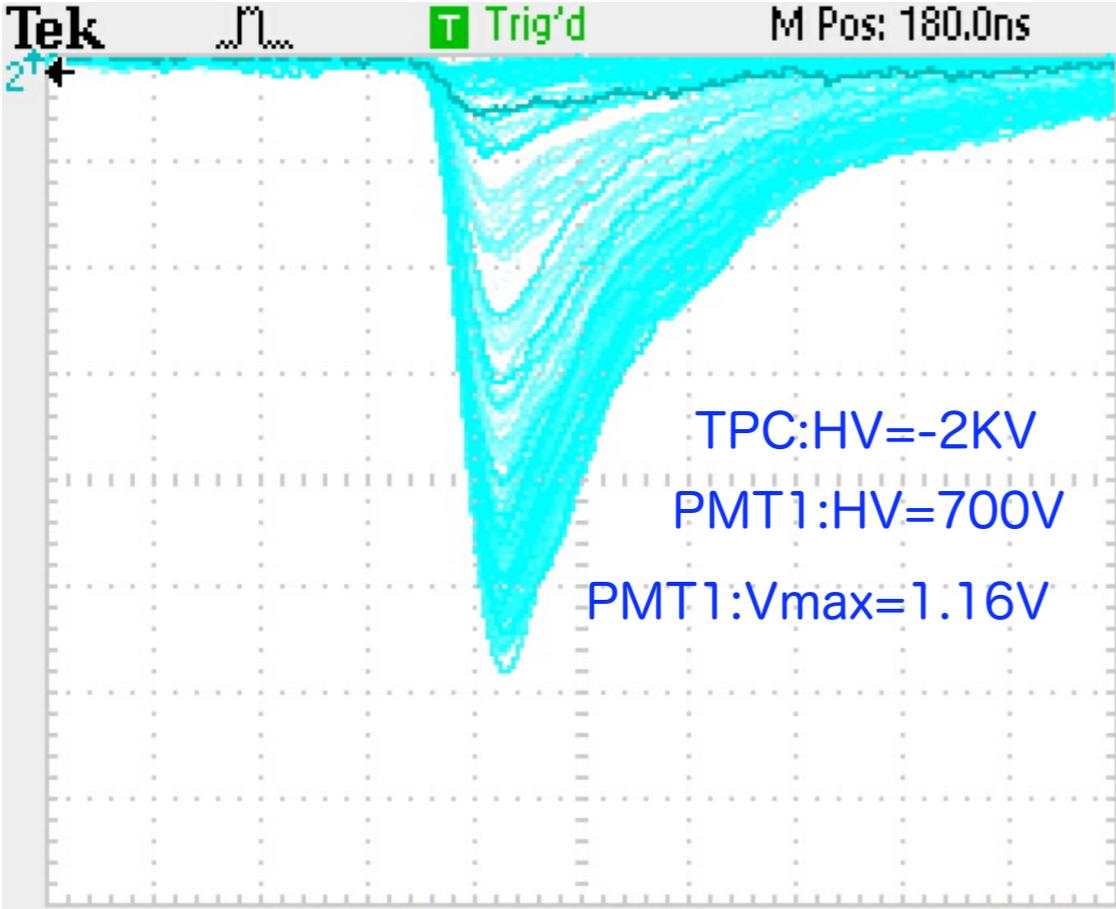
項目  
エッジ

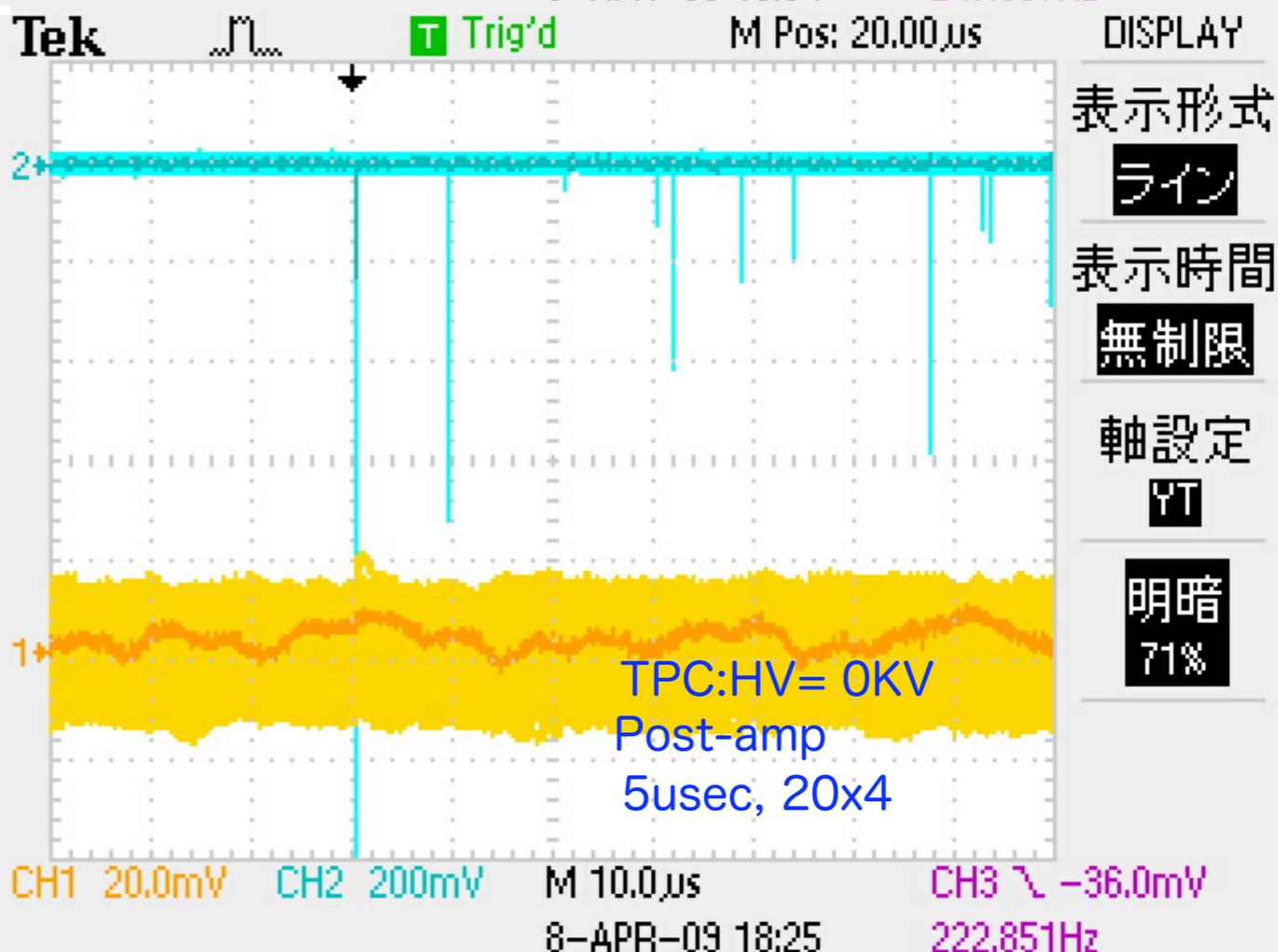
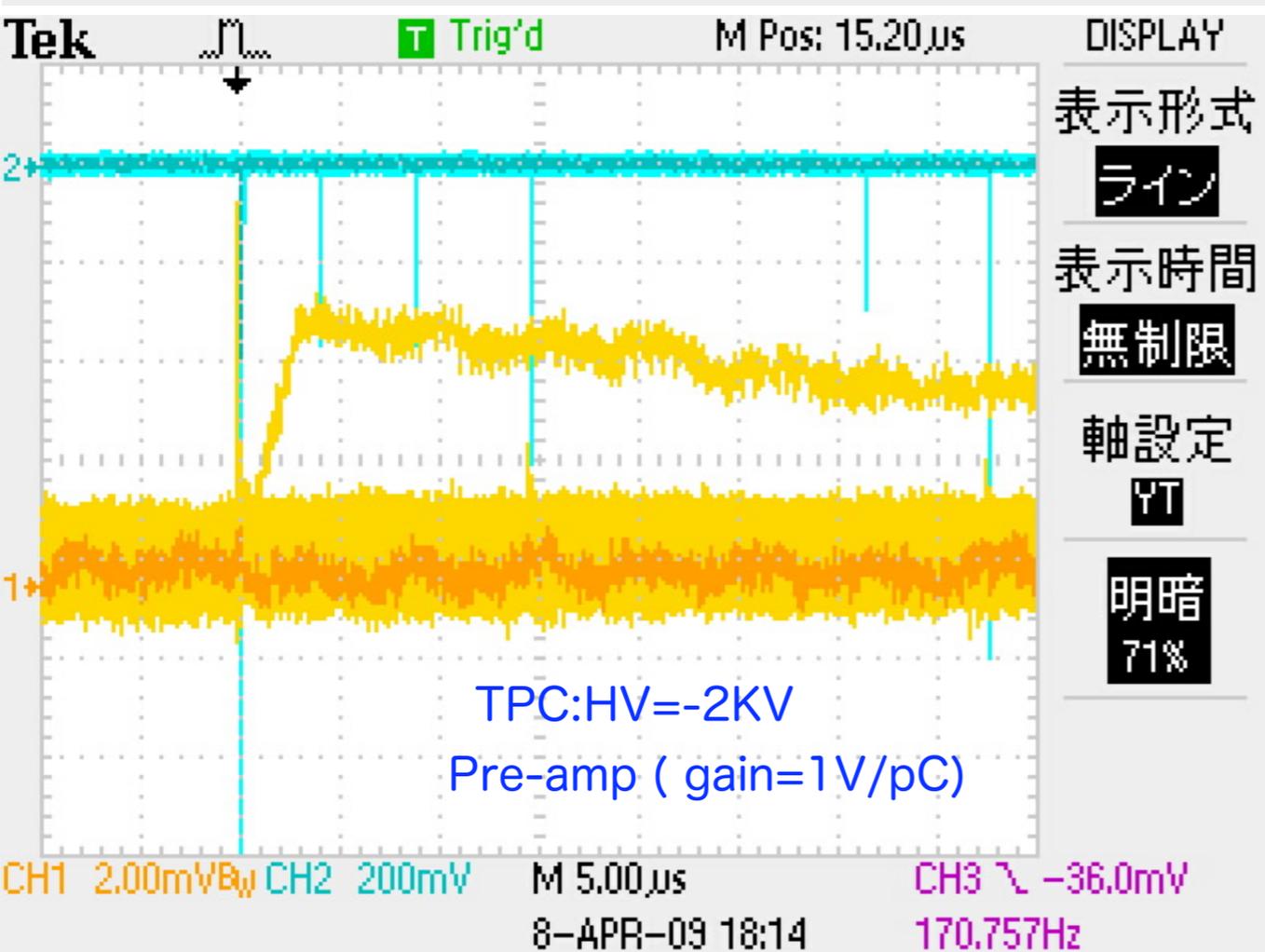
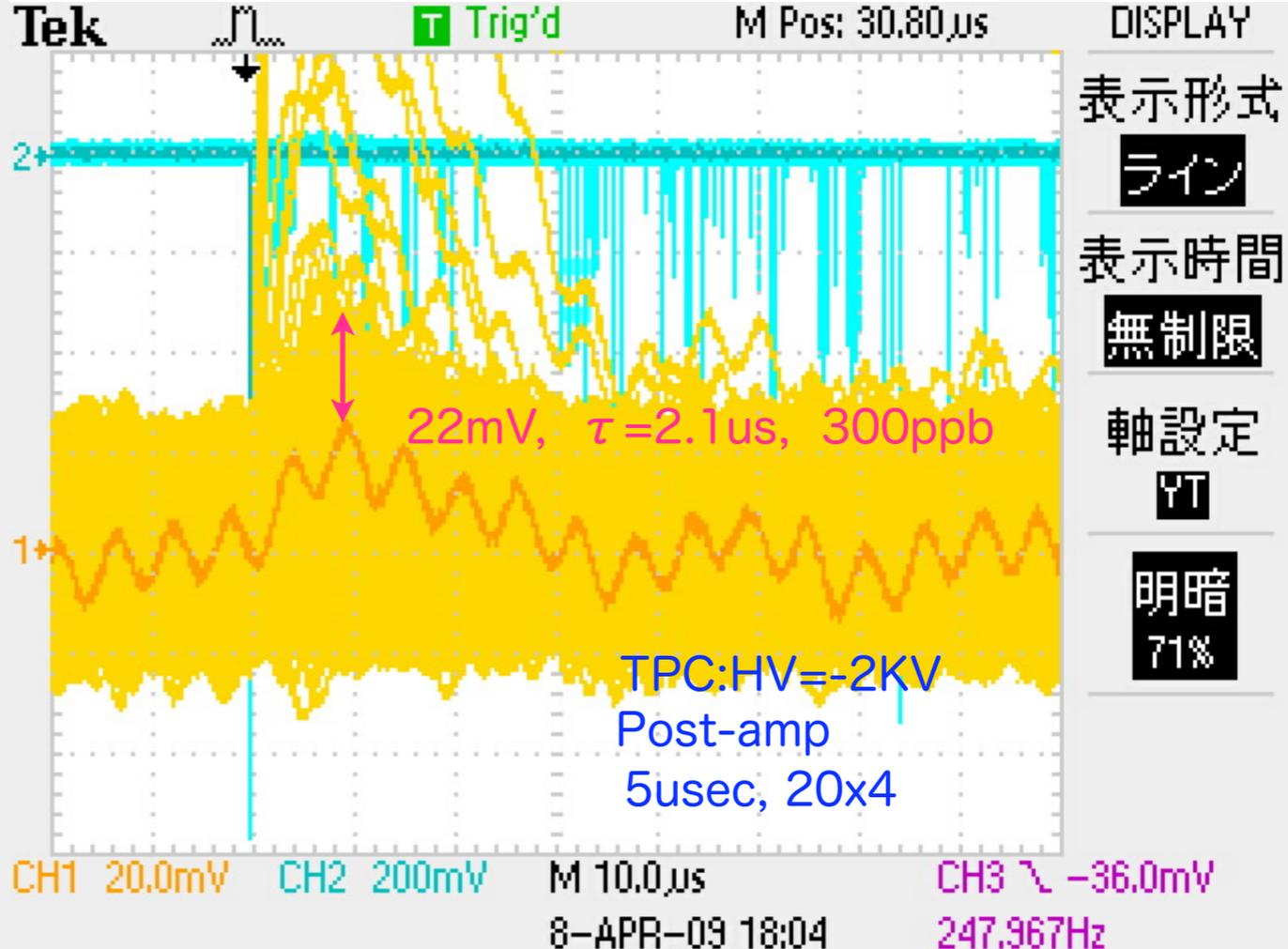
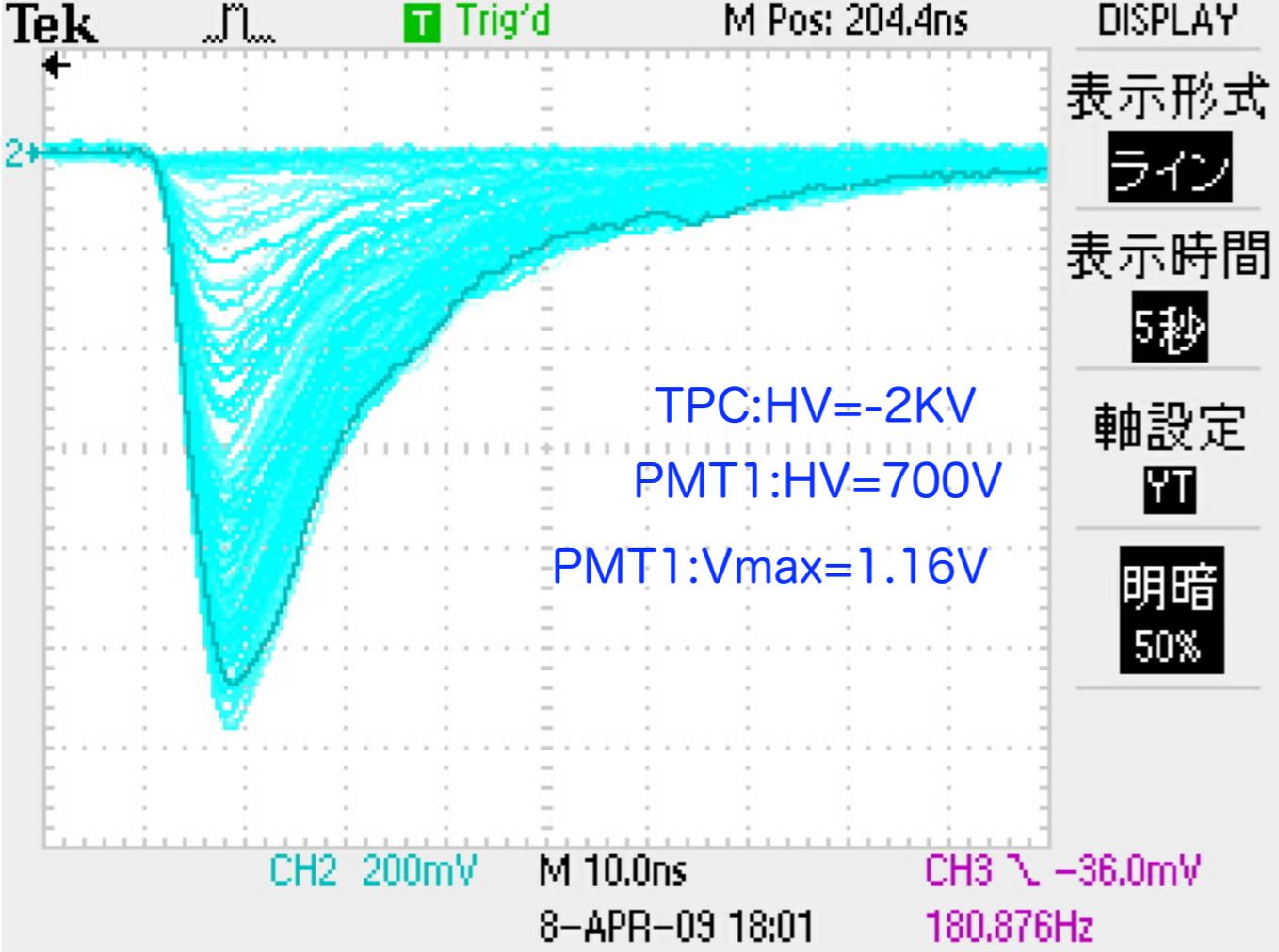
ソース  
CH1

スロープ  
立下リ

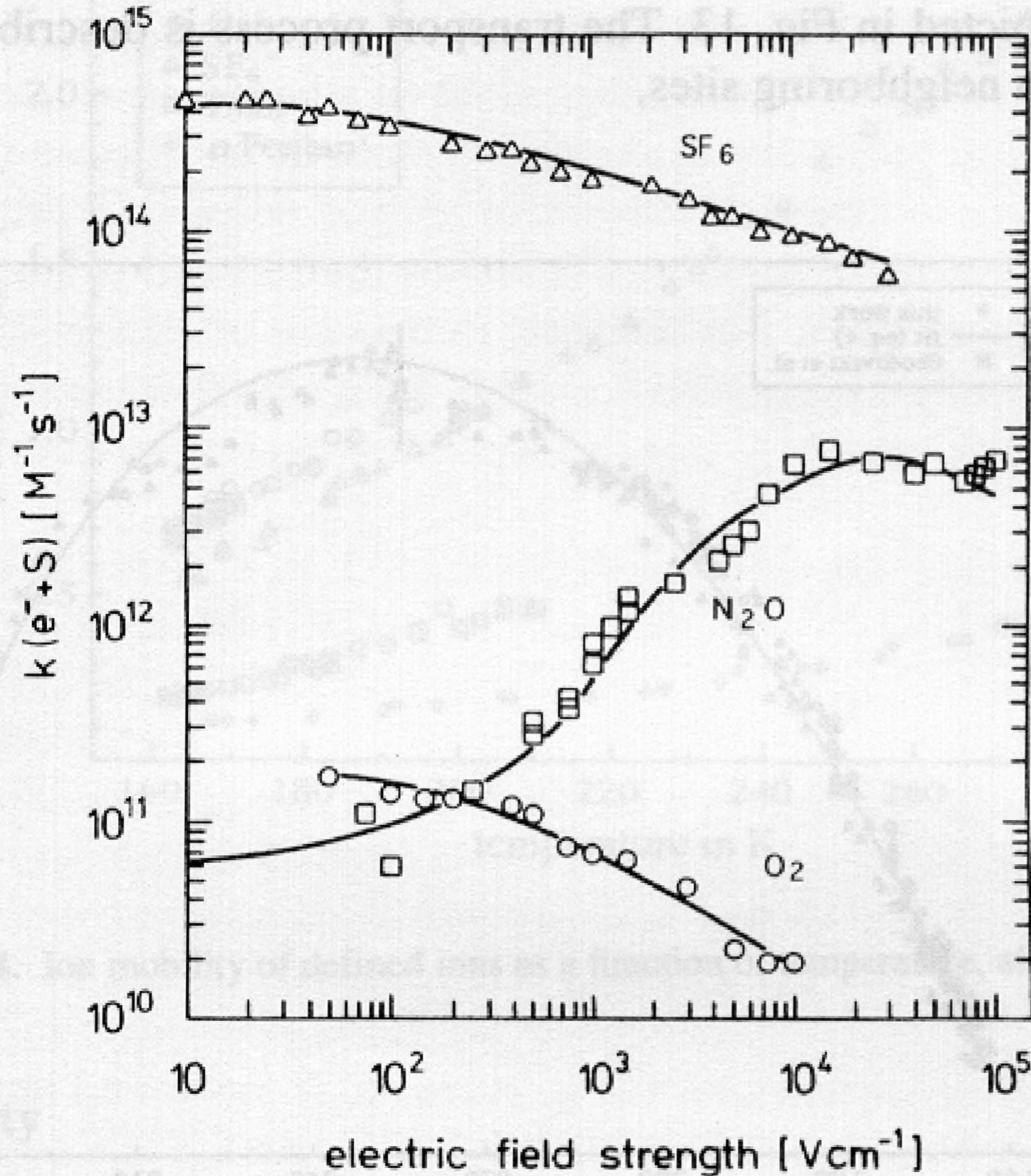
モード  
ノーマル

結合  
AC





# Attachment rate constant $k$ and Purity



$O_2$  equivalent

$$k(O_2) = 4.5 \times 10^{10} / M/s$$

at  $E = 2 kV/cm$

1.5 L Xe :

$$1500 \times 3.06 / 131.3 = 35 \text{ mol}$$

$$k(O_2) = 1,573 \text{ ppb/s}$$

attenuation time  $\tau$  :

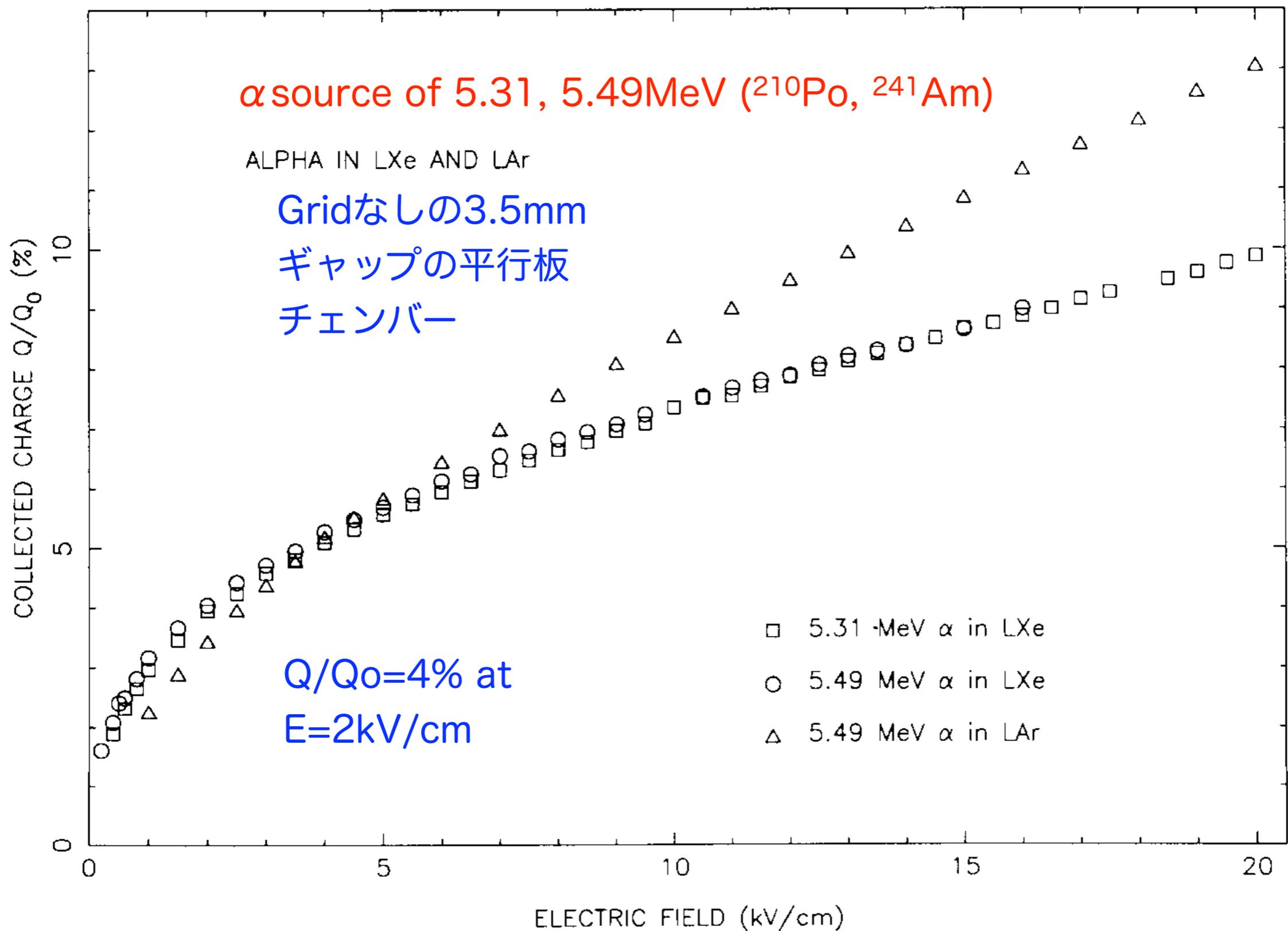
$$\tau = 1/k$$

$$\tau = 636 \mu s/ppb$$

attenuation length  $\lambda$  :

$$\lambda = v_d \times \tau$$

$$\lambda = 1.4 m/ppb$$



Collected charge ( $Q/Q_0\%$ ) vs. electric field for  $^{210}\text{Po}$  in liquid xenon ( $\square$ ) and  $^{241}\text{Am}$  in liquid xenon ( $\circ$ ) and liquid argon ( $\triangle$ )

# まとめ

## 1. 純度モニターの提案

- コンパクトなものと高純度用のもの

## 2. 液体キセノン中の電荷シグナルへのノイズ対策

- ノイズ源: グランド, PMT, TPC-HV PS, Pre-Amp (A/P250)

## 3. キセノンガス中の電荷シグナル測定 ( $\alpha$ 線ソース)

- シンチレーション光との線形相関

## 4. PETシミュレーション

- GEANT4とGarfieldを準備中

## 5. フロントエンドASICチップの設計と製作

## 6. 不純物とノイズ対策で、LXeTPCシグナルを観測予定

# 純度改善案

## 1. チェンバ等ハードウェアの変更

- ターボポンプの直付け
- 高真空計直付け（ビルトアップ）
- 循環ポンプチェック
- キセノンガス充填？
- ラプチャーディスク（安全弁）
- 冷凍機ヘッド空冷増量（DC12Vファン）
- ポンプ空冷（DC12Vファン）

## 2. 制御システム

- 新データロガー（よりノイズは少ないことが期待される）  
動作チェック中 - 交換
- 新温度コントローラ - 購入済
- UPS変更（未発注）

温度コントローラ、PCに使用中にアラームが鳴ったことがあり、その都度、それらの電源を立ち上げなければならない。

必要なら、液体窒素で強制冷却し循環速度を大きくし、純化速度を上げることもできる。  
ただし、大きなパワーのPTに交換しなければならない。