

液体キセノングループ報告

前回 (2014年8月19日)以降

KEKDTP重点レビュー、2015年4月21日、KEK
田内利明 (2014/3/31時点)

KEK：冷凍・純化システム、PMT、エンドプレート

田内利明、真木晶弘、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

杉山 晃

東大：DAQ、TPCテスト

森俊則

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、APD、ASICチップ

中村正吾、濱西 亮 (M2)

協力支援：田中真伸氏(KEK素核研回路室)、池田博一氏(JAXA)

レビュワー：海野義信 (KEK)、柴村英道 (埼玉県立大)

2014年度

2014年度 後半

8/22 : 予冷機システムの第一回目試験

- 熱侵入大、予冷機の熱抵抗大のため改造が必要

10/14 : TRIUMFから冷凍機関連の機材が入荷

~ 12月 : Windowless-APDの液体キセノン中での γ 線スペクトラムの測定

比較のためにPMT(R7600)のcharge amp. readout試験を行う

Charge amp出力のパルスのdecay timeがdesignの1/10になる

PMTのベース回路をSpiceに入れ再現した (R8700のR15,R17)

10/27 : PMT用ドーターカードの $C_f=470\text{pF}$, $R_f=20\text{M}\Omega$ を作成・試験

11/21 : PMT用ドーターカード+A250によるPMTシグナル, 液体Xe中、

$^{22}\text{Na}(100\text{kBq})+^{241}\text{Am}(200\text{Bq})$ でのスペクトラム測定で、511keVに対して

$\sigma=6.8\%$ のエネルギー分解能を得た

12/11~: Windowless-APDの液体キセノン中で測定を再開

511keVの光電ピークが検出できず

~ 2015/3/31 : XEMIS2 のGATE/GEANT4によるシミュレーション研究

11/26~12/20 : 濱西亮氏 (横浜国大,M2) Subatech滞在-XEMIS2研究

11/25~12/1 : 田内、Subatech訪問-XEMIS2研究

2014年度 後半 つづき

2015

3/7: 予冷機システムの第2回目試験

熱侵入と予冷機の熱抵抗を少なくした改造を行い試験

循環ガス流量の5リットル/分までOK、それ以上で「リーク」?

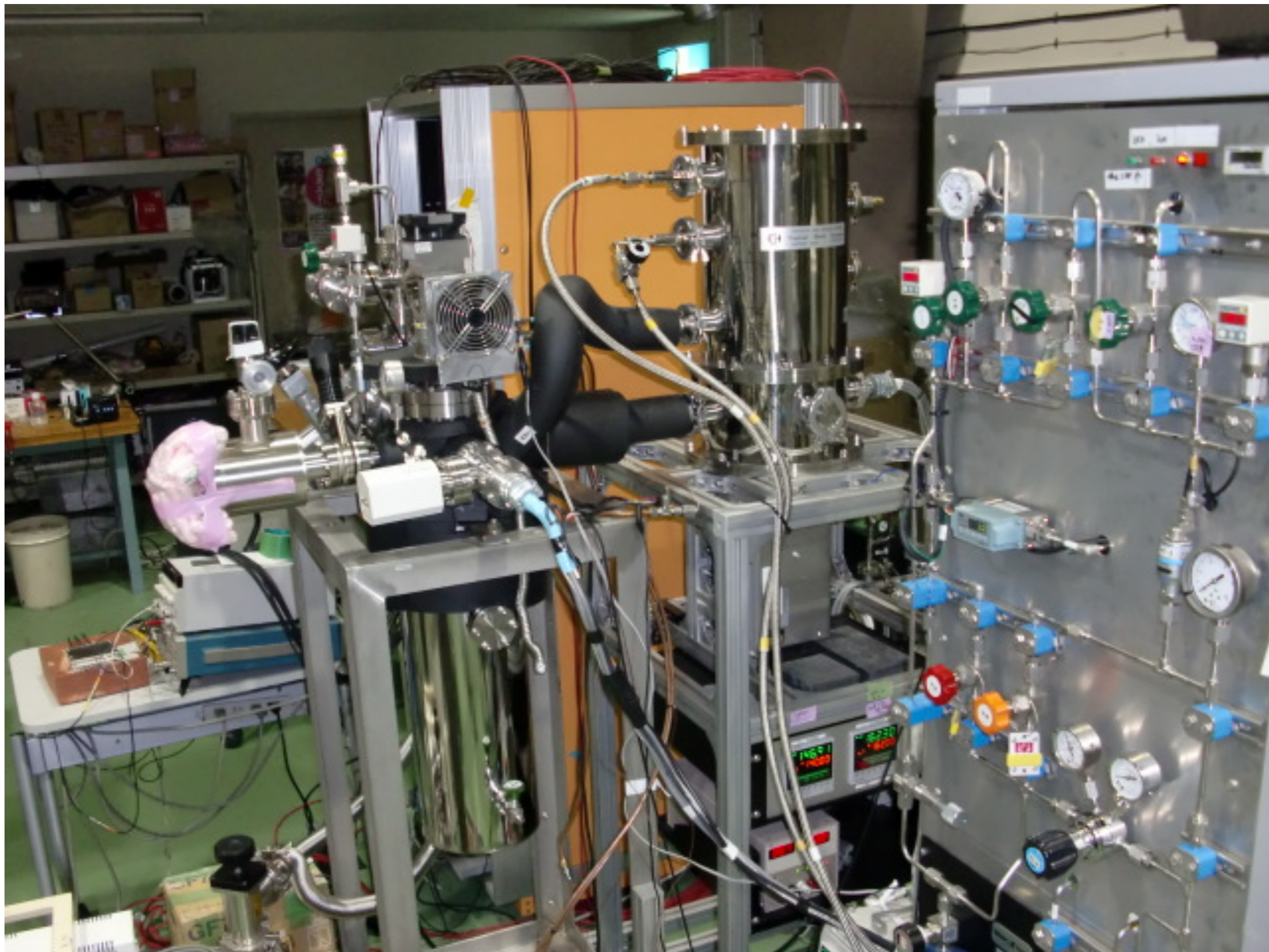
3/27: 予冷機システムの第3回目試験

リークの疑われた内側のオーリングをヘリコ(金属オーリング)に交換

循環ガス流量の約10リットル/分まで順調に運転

4.5リットル/分で約1週間の連続安定運転を達成

予冷装置

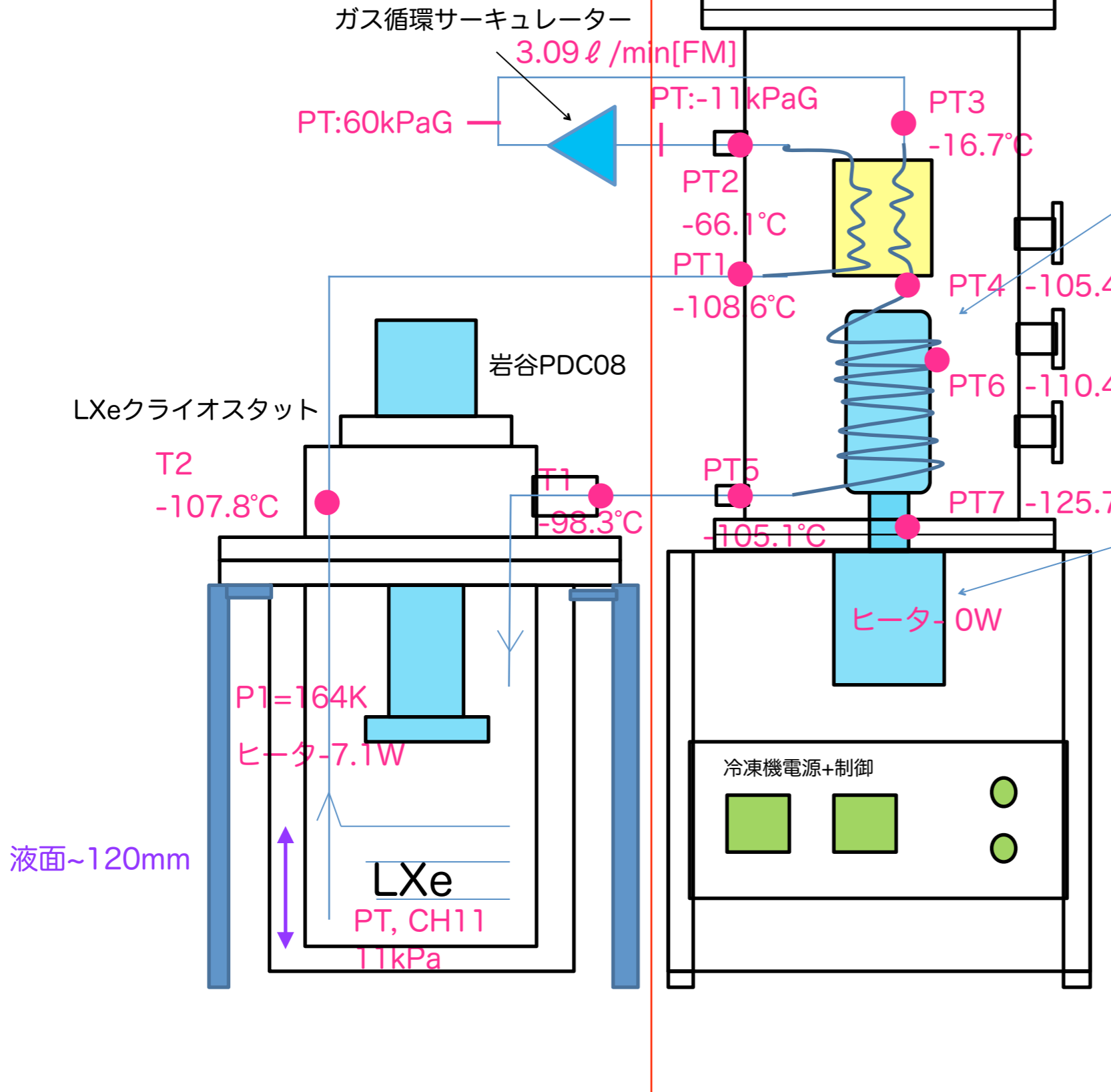


2015 3/5 11:23

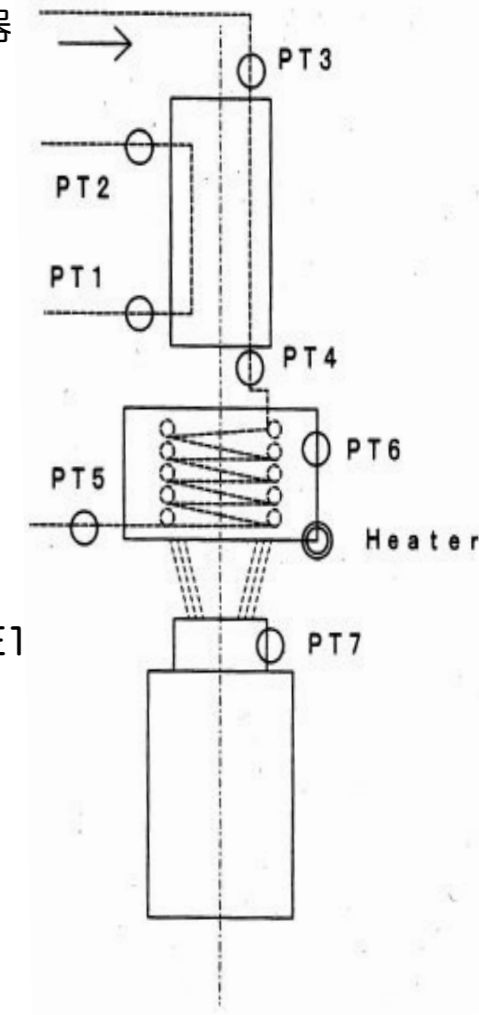
3.09 ℓ / min

試験結果-1

安定中



真空断熱・熱交換器

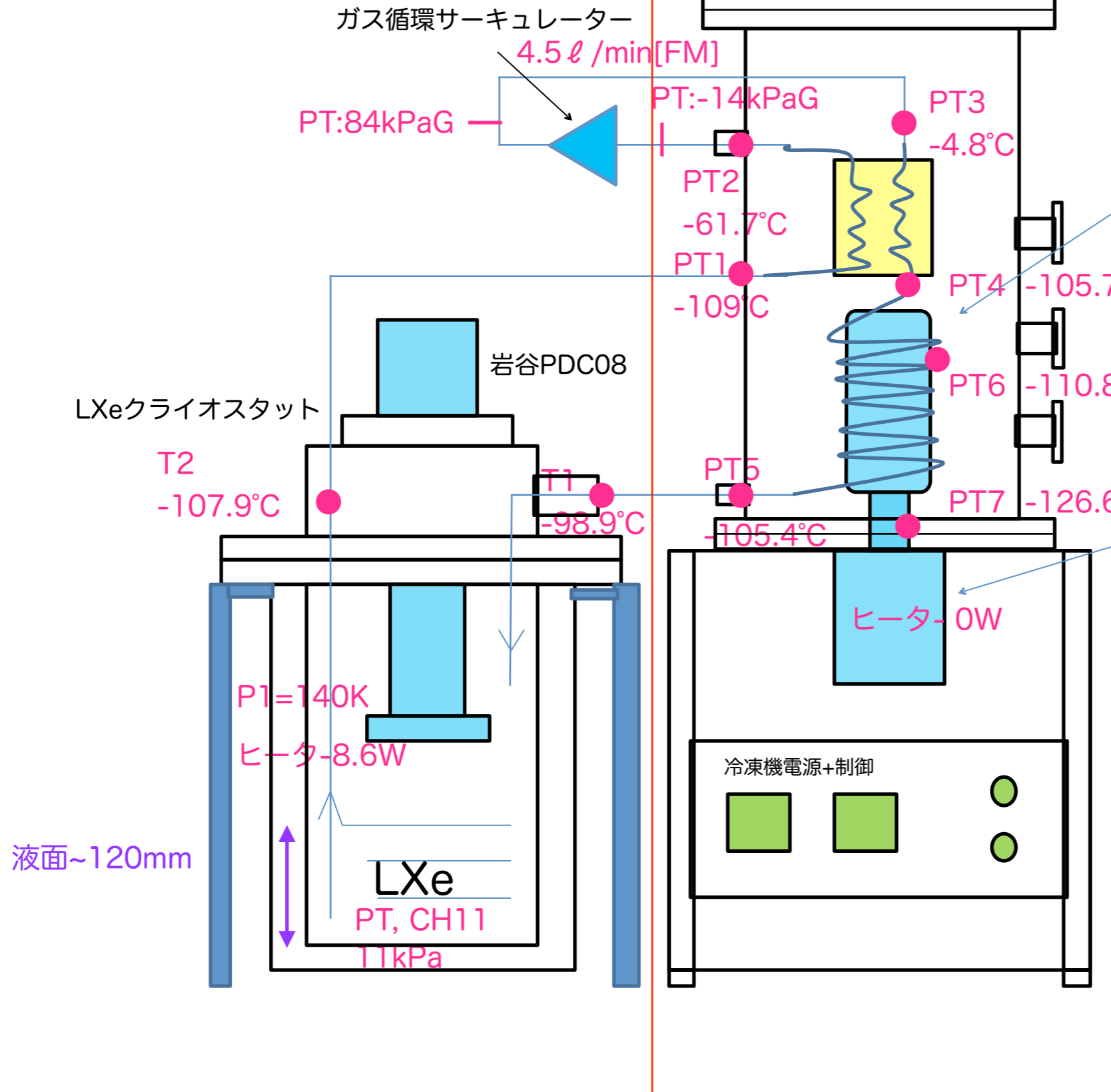


2015 3/5 18:00

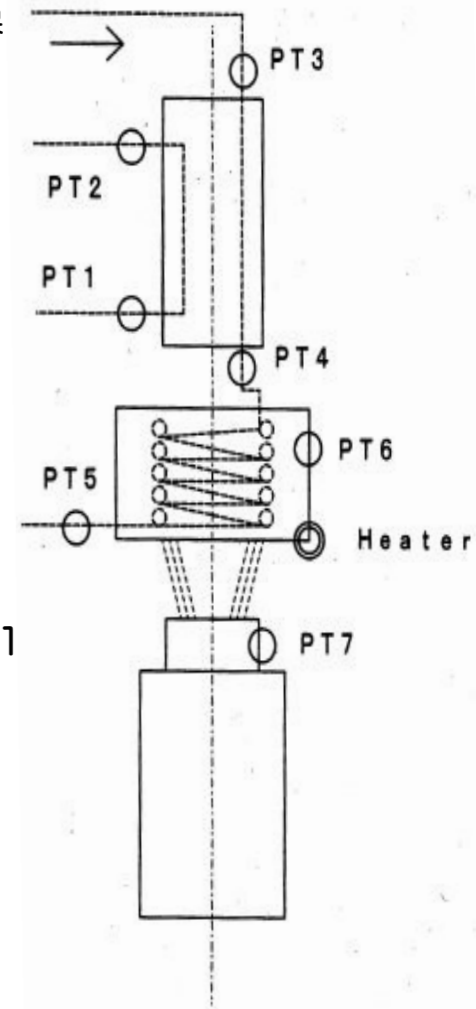
4.5 ℓ /min

試験結果-2

順調に稼働



真空断熱・熱交換器



TWINBIRD SC-UE1
173K@30W

DB1000

No.2 コイル

No.1

SV=162K

PV=146.55K

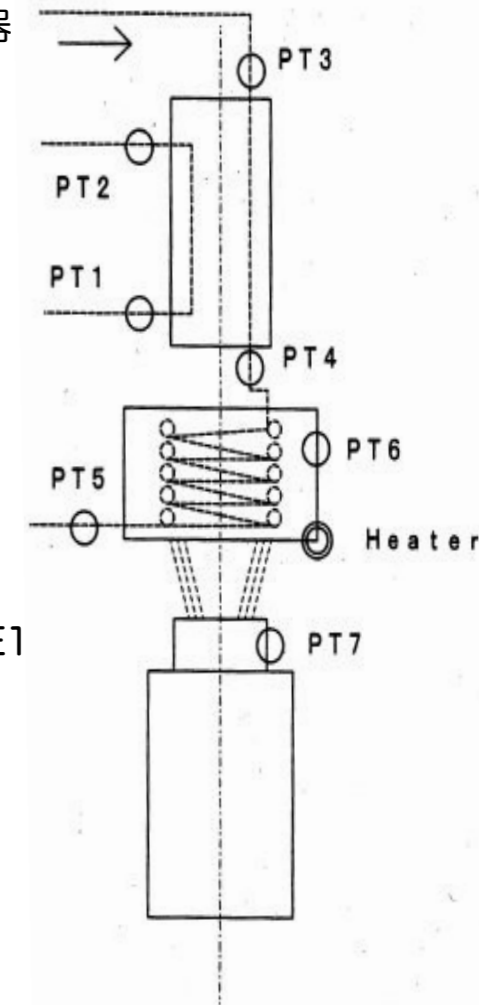
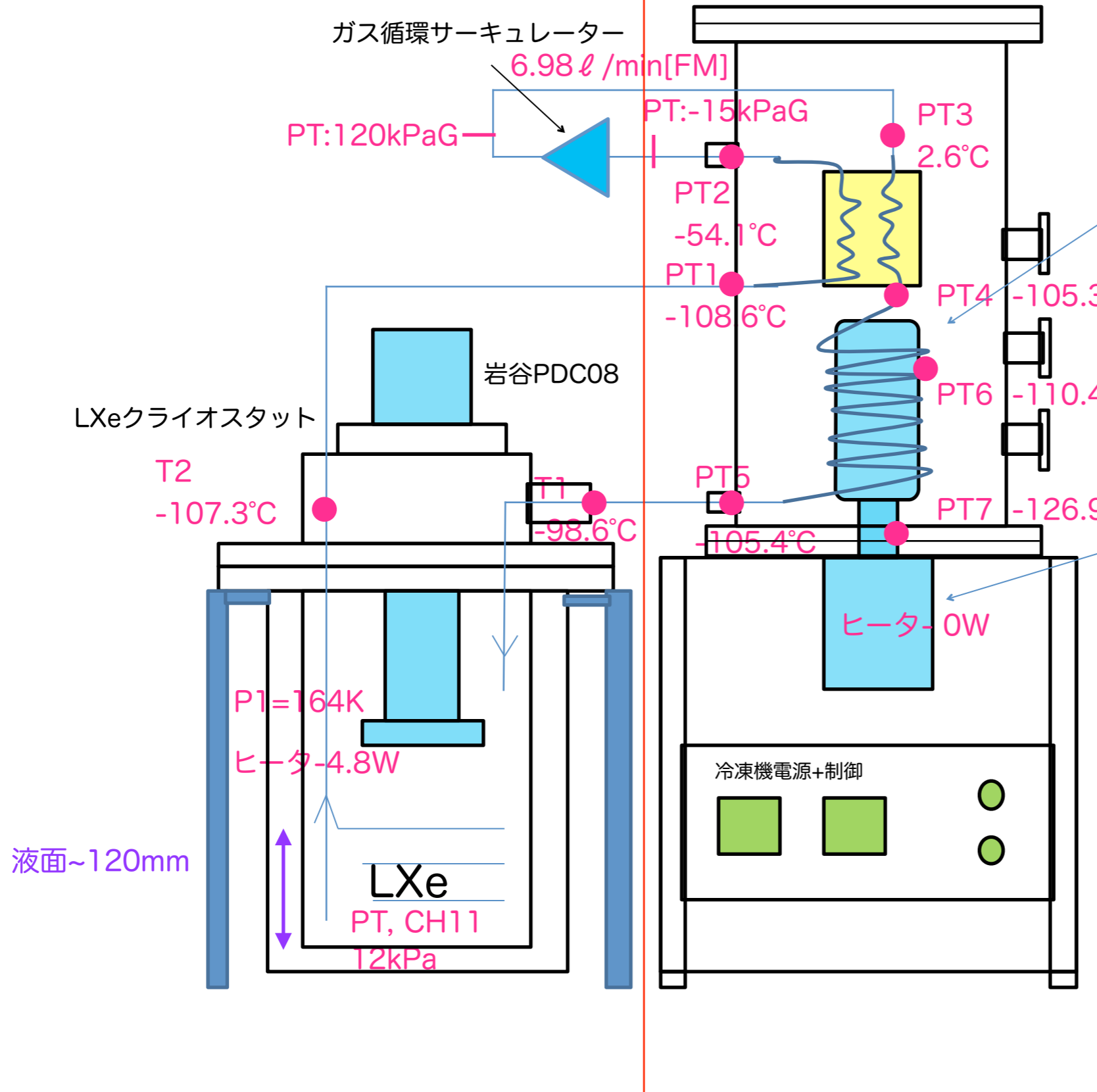
PV=162.41K

2015 3/6 11:34

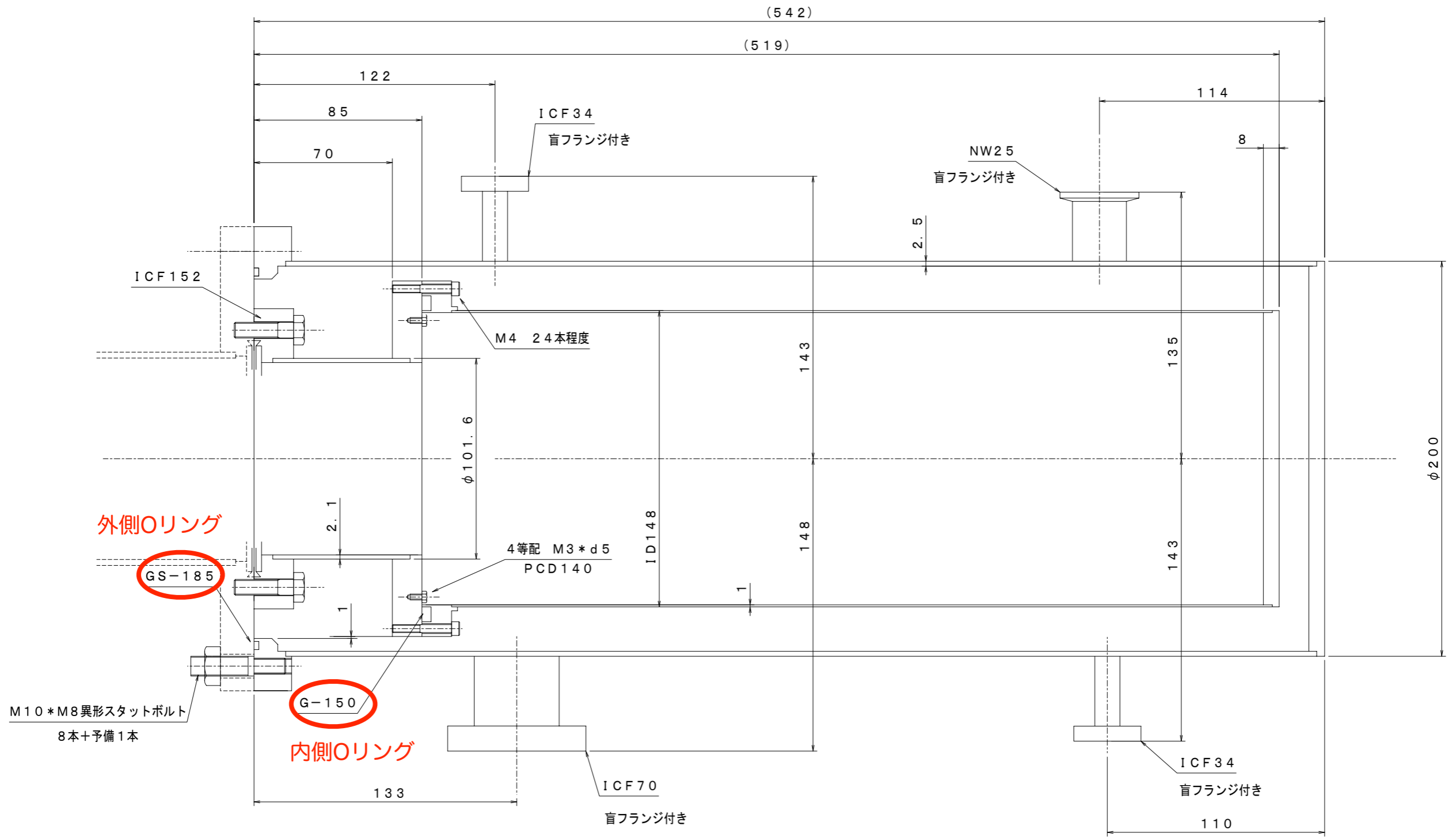
ベローズポンプ最大値：6.98 ℓ /min

試験結果-3


クライオスタットリーク？
TMP(turbomolecular pump)
が落ちる



DB1000	No.2 コイル
No.1,CH	SV=162K
PV=146.26K	PV=162.73K



ボルトオリエンテーション等につきましては、受注後、
ご提出とさせていただきます。

3RD ANGLE PROJECTION		NAME チャンバー改造案		A 3
APPROVED		PART No.	SCALE	
DRAWN 1/2		 株式会社 システムブレイン		

UNIT=mm

予冷装置の試験のまとめ

5 ℓ /min過ぎからTMPが少しすると停止状態になった。LXeクライオスタットの上部フランジ部がかなり冷えているので、硬くなったオーリング当たりから微少リークが発生しているかもしれない。

熱交換器が冷えきると順調に稼働する（熱交換器だけで十分な運転が可能）。

Xe純化用のゲッター流量が5 ℓ /minで最大なので、4から4.5 ℓ /minぐらいが実用流量である。これまでは、1.4 ℓ /minであったから、純化速度は3倍になると期待される。

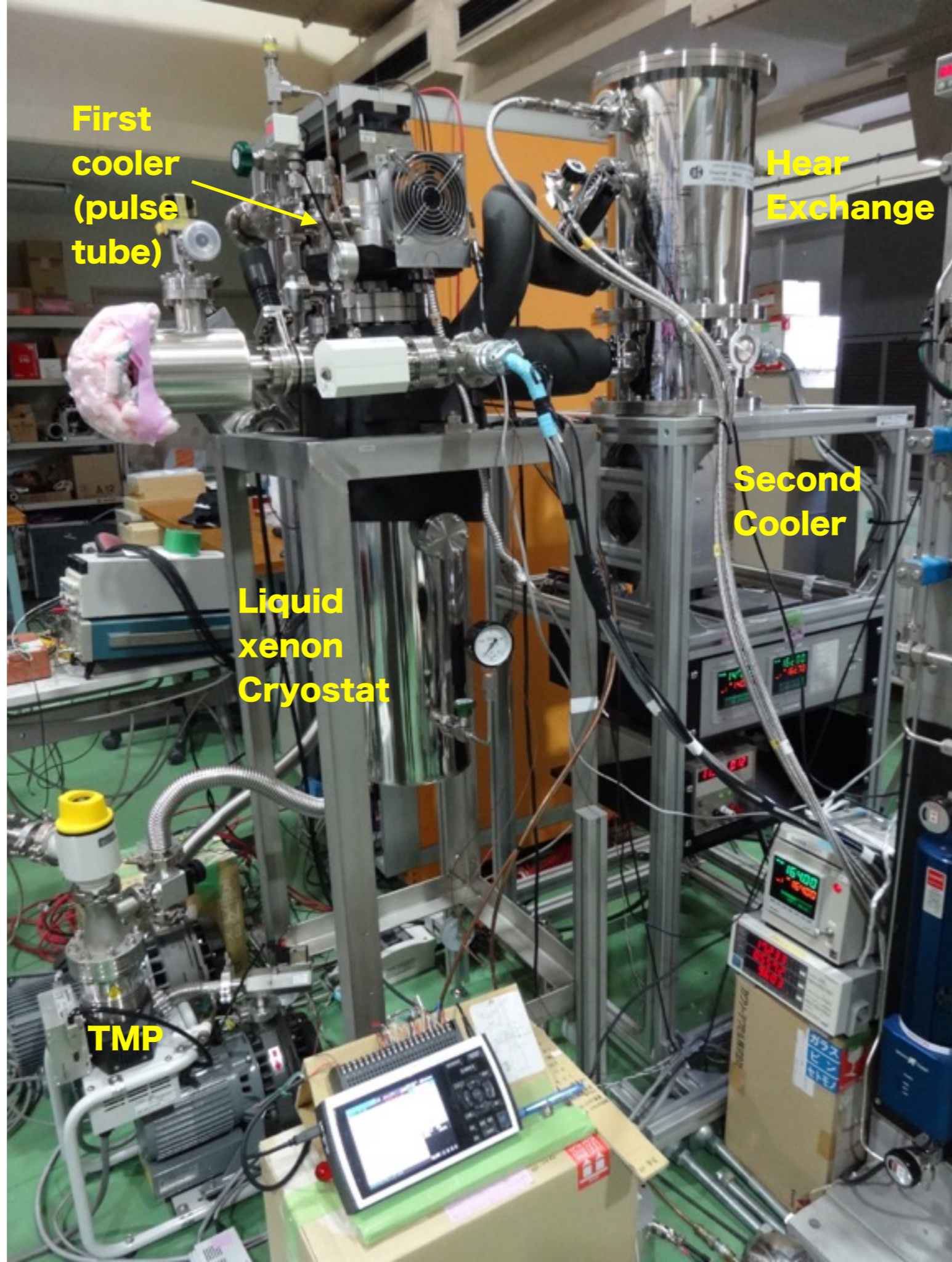
容器の中身とXe液高さ等の条件変化などの詳細な検討課題もあるが、予冷装置として使用出来るという見通しがたった。

次に、上のオーリングをヘリコフレックス金属ガスケットに交換して再試験を行う予定。最大流量6.98 ℓ /minでの順調な運転を確かめることが目的である。

来年度（H27, 2015）予算：

- ・ヘリコフレックス金属ガスケット
内層用 12,000円 × 10本
断熱層用 16,000円 × 10本
- ・VCRガスケット 5万円
- ・真空ガスケット 2万円
- ・接続配管類 10万円
- ・経年による真空ポンプ修理 30万円×2台
- ・経年による真空計の交換 20万円×2台

合計：145万円



**First
cooler
(pulse
tube)**

**Heat
Exchange**

**Second
Cooler**

**Liquid
xenon
Cryostat**

TMP

Windowless

APD

PMT signals

Charge and shaping amplifier with OPA2211

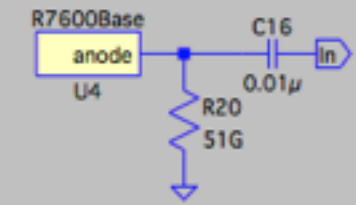
For the first optimization, you must set $C_f=1\mu\text{F}$, $R_f=20\text{M}\Omega$.

```

.param IO=0.0002u, r=2.0, PMT_HV=800, ts=101us, tr=2n, td=22n, tp=500u, np=1
.param Cf=1p, Rf=20meg, V_test=-0.4
.param Cf=0.1p, Rf=1G, V_test=-0.06
.tran 0 200us 0 10ns
.savebias charge_amp_test.nodes local
.loadbias charge_amp_test.nodes

```

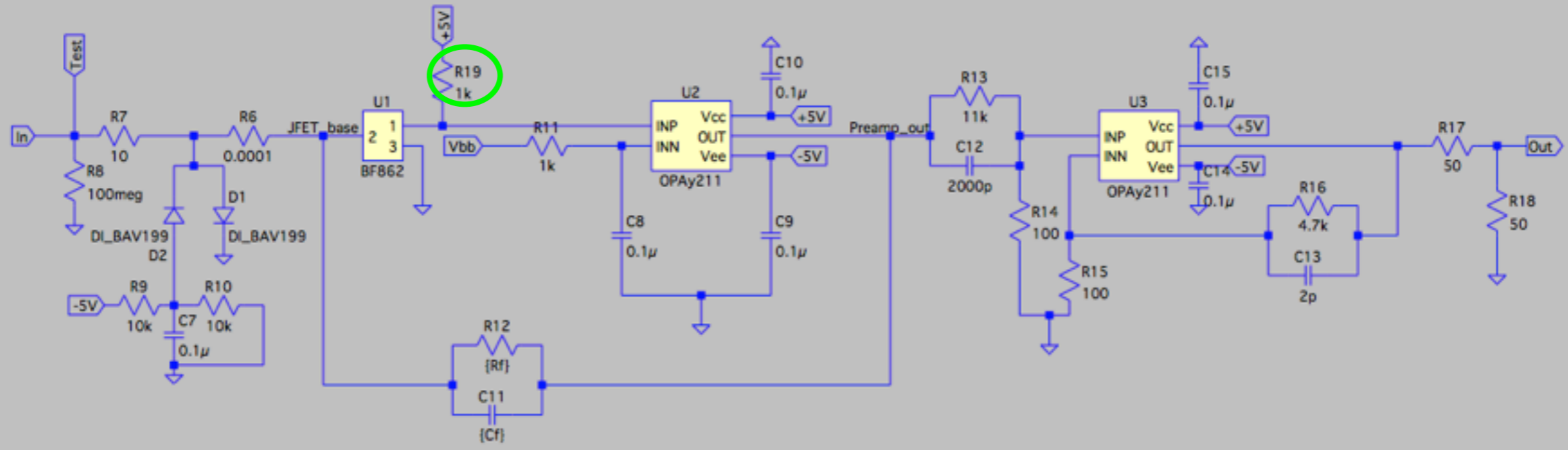
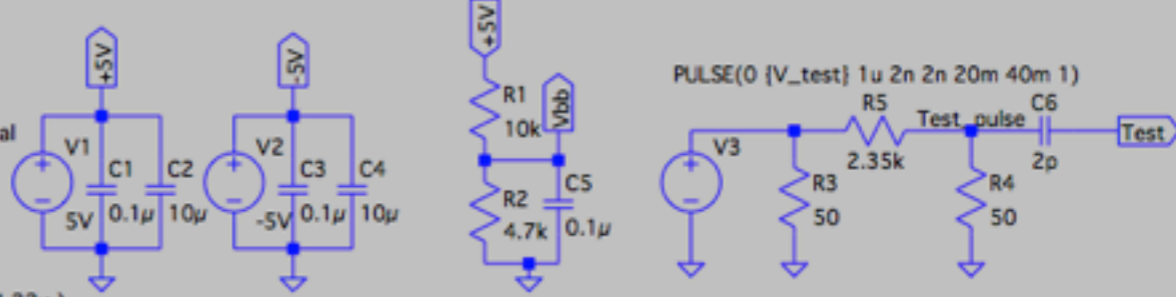
$\text{PULSE}(0 \text{ [V_test]} 1\text{u} 2\text{n} 2\text{n} 20\text{m} 40\text{m} 1)$



```

*SRC=BAV199;DI_BAV199;Diodes;Si; 85.0V 0.160A 3.00us Diodes, Inc. diode
.MODEL DI_BAV199 D ( IS=59.0p RS=0.262 BV=85.0 IBV=5.00n CJO=2.00p M=0.333 N=1.78 TT=4.32u )

```



```

.param IO=1u, r=2.0, PMT_HV=800, ts=10n, tr=2n, td=22n, tp=500n, np=1
Sum(i=1,n[ r**(i-1) ] = (1 - r**n)/(1-r)

```

$\text{PULSE}(0 \text{ [IO]**5} \text{ [ts] [tr] [td] 0 [tp] [np])$

$\text{PULSE}(0 \text{ [IO]**10} \text{ [ts] [tr] [td] 0 [tp] [np])$

$\text{PULSE}(0 \text{ [IO]**3} \text{ [ts] [tr] [td] 0 [tp] [np])$

$\text{PULSE}(0 \text{ [IO]**9} \text{ [ts] [tr] [td] 0 [tp] [np])$

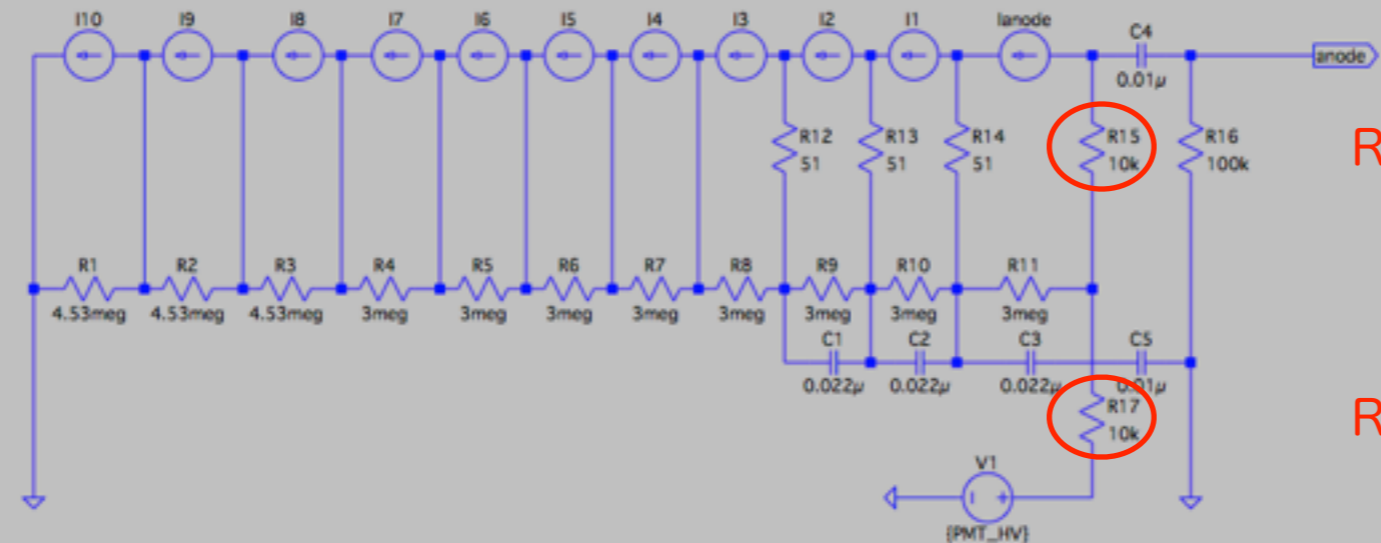
$\text{PULSE}(0 \text{ [IO]**2} \text{ [ts] [tr] [td] 0 [tp] [np])$

$\text{PULSE}(0 \text{ [IO]**8} \text{ [ts] [tr] [td] 0 [tp] [np])$

$\text{PULSE}(0 \text{ [IO]**1} \text{ [ts] [tr] [td] 0 [tp] [np])$

$\text{PULSE}(0 \text{ [IO]**7} \text{ [ts] [tr] [td] 0 [tp] [np])$

$\text{PULSE}(0 \text{ [IO]**6} \text{ [ts] [tr] [td] 0 [tp] [np])$

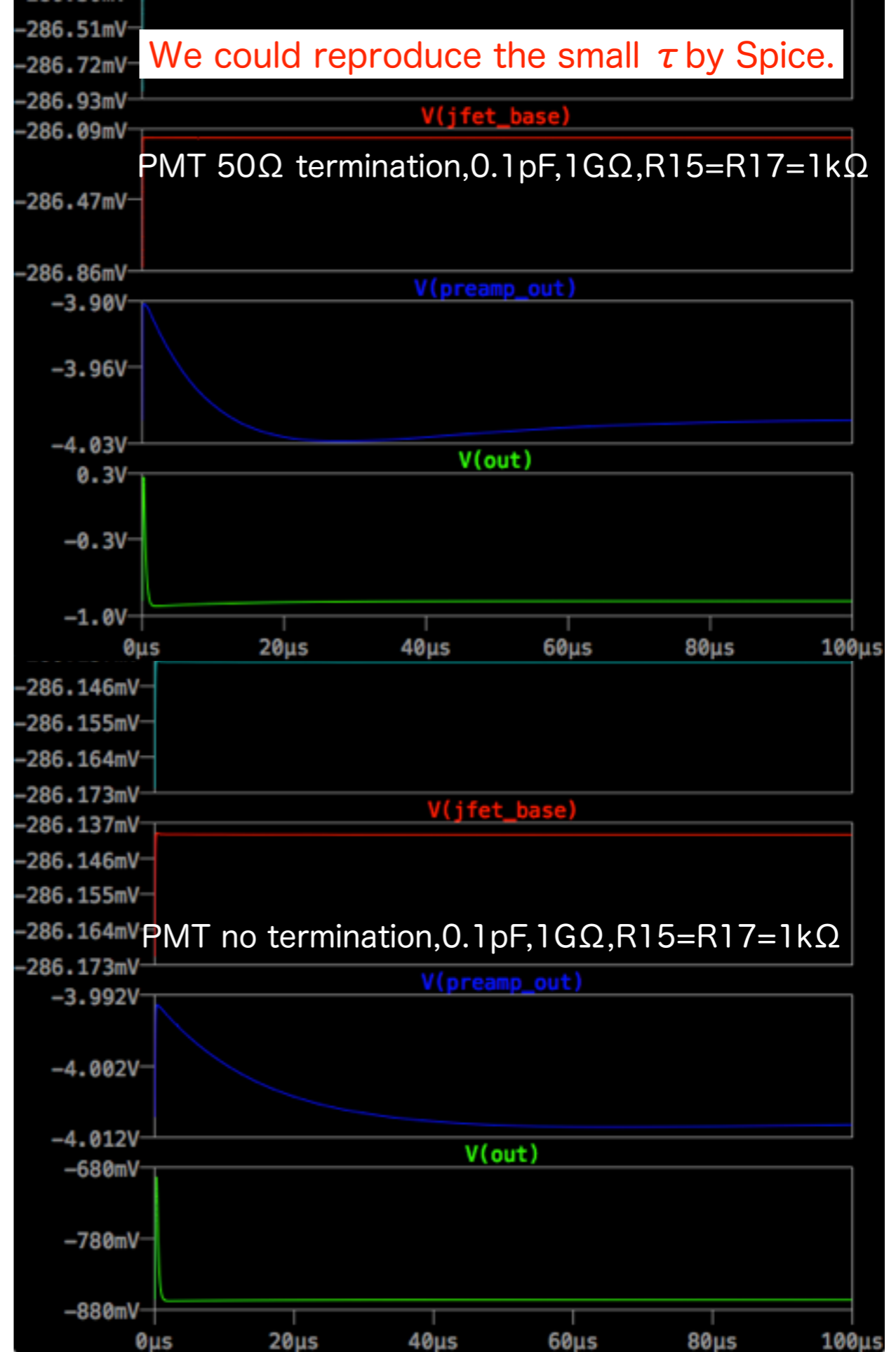
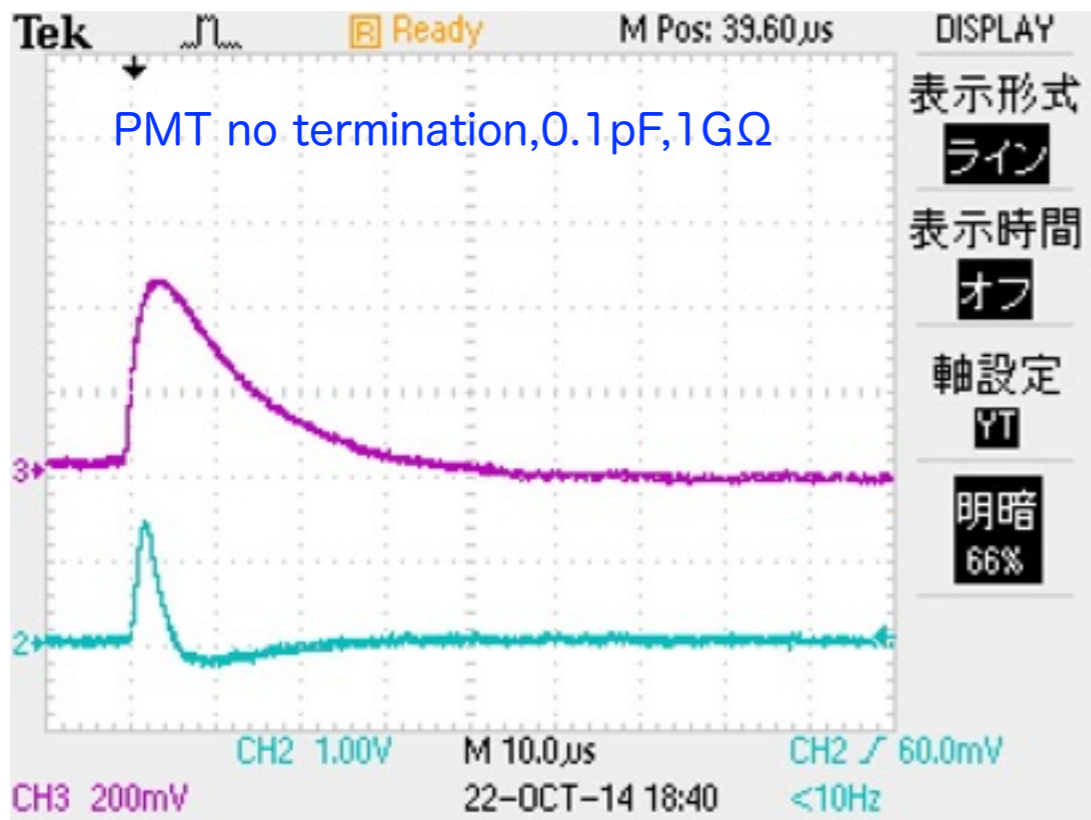
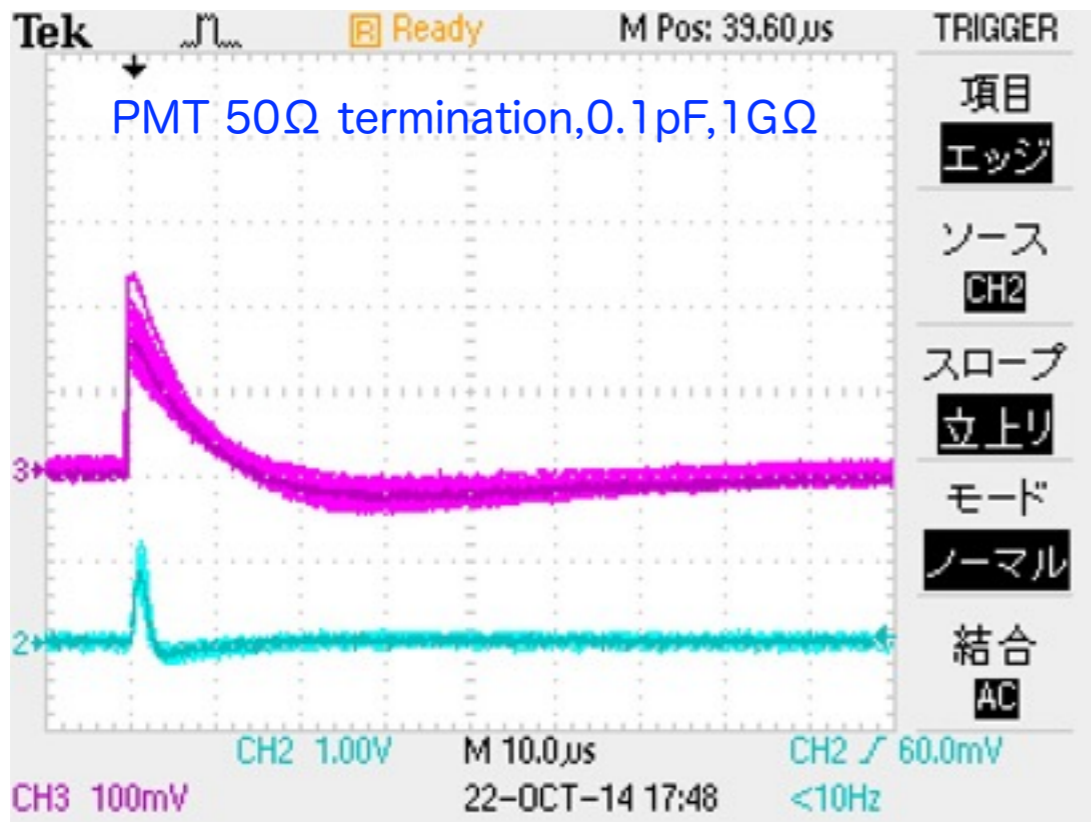


R7600Base
(PMT-R8700
Base circuit)

R15

R17

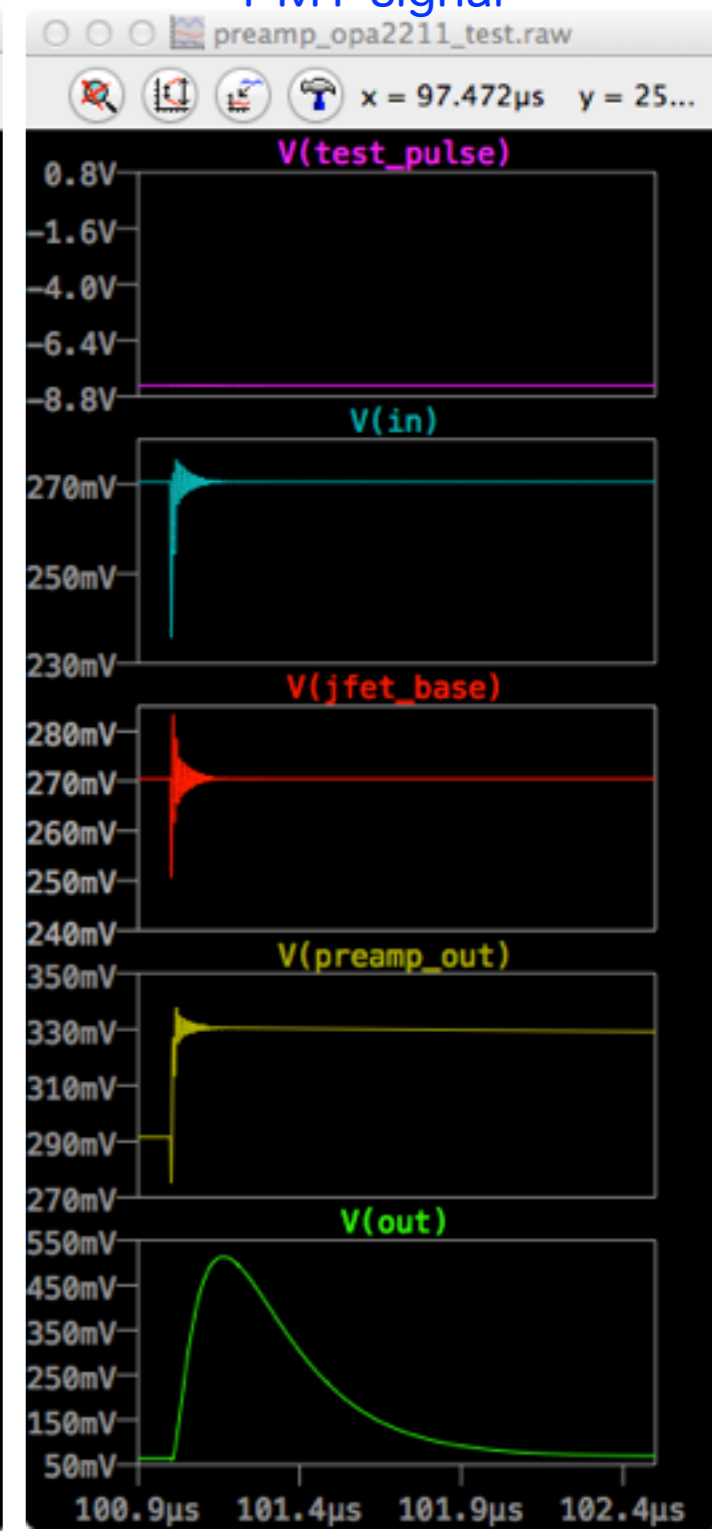
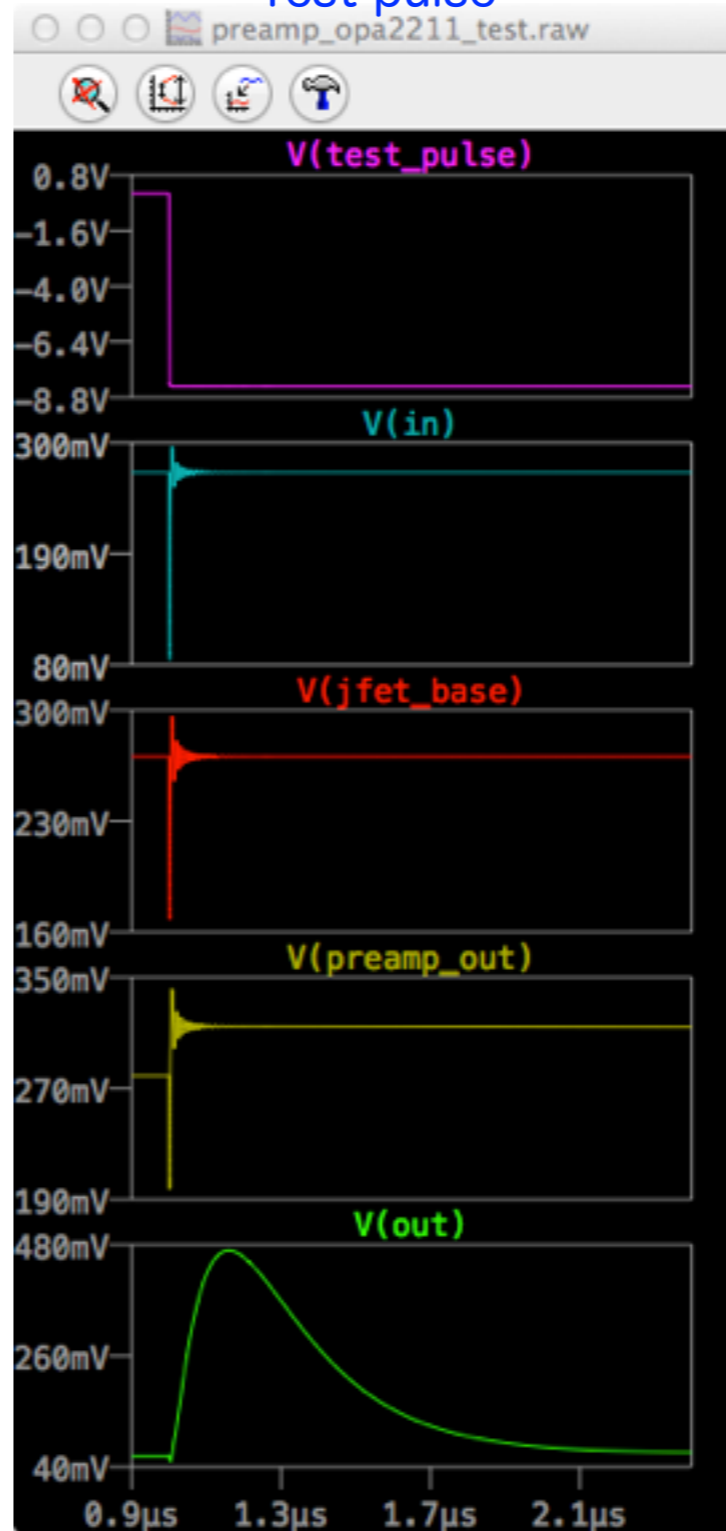
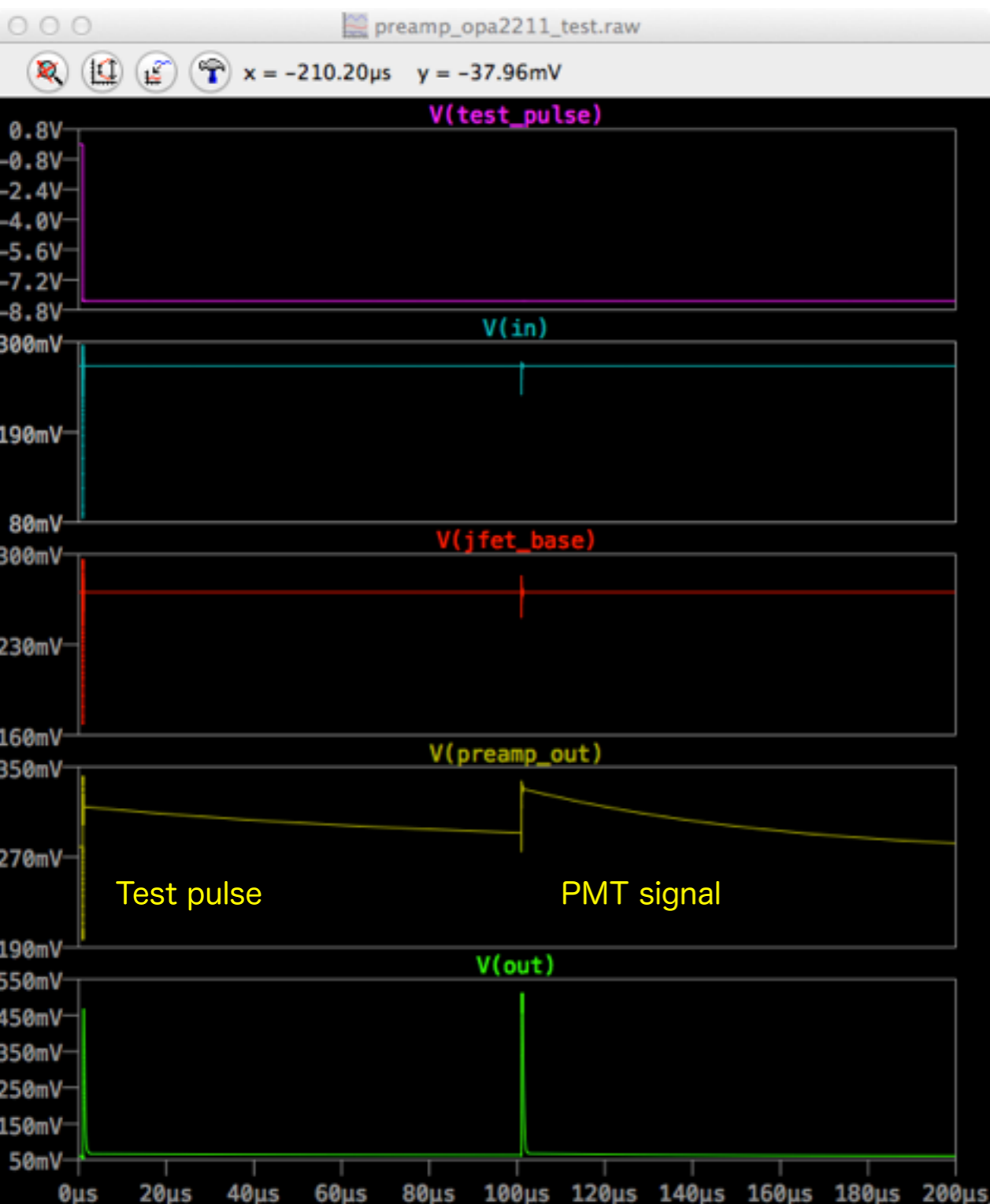
Charge amp : Observed $\tau = 1/10$ of design value



$C_f=470\text{pF}$, $R_f=200\text{k}\Omega$, $R_{19}=150$

Test pulse

PMT signal

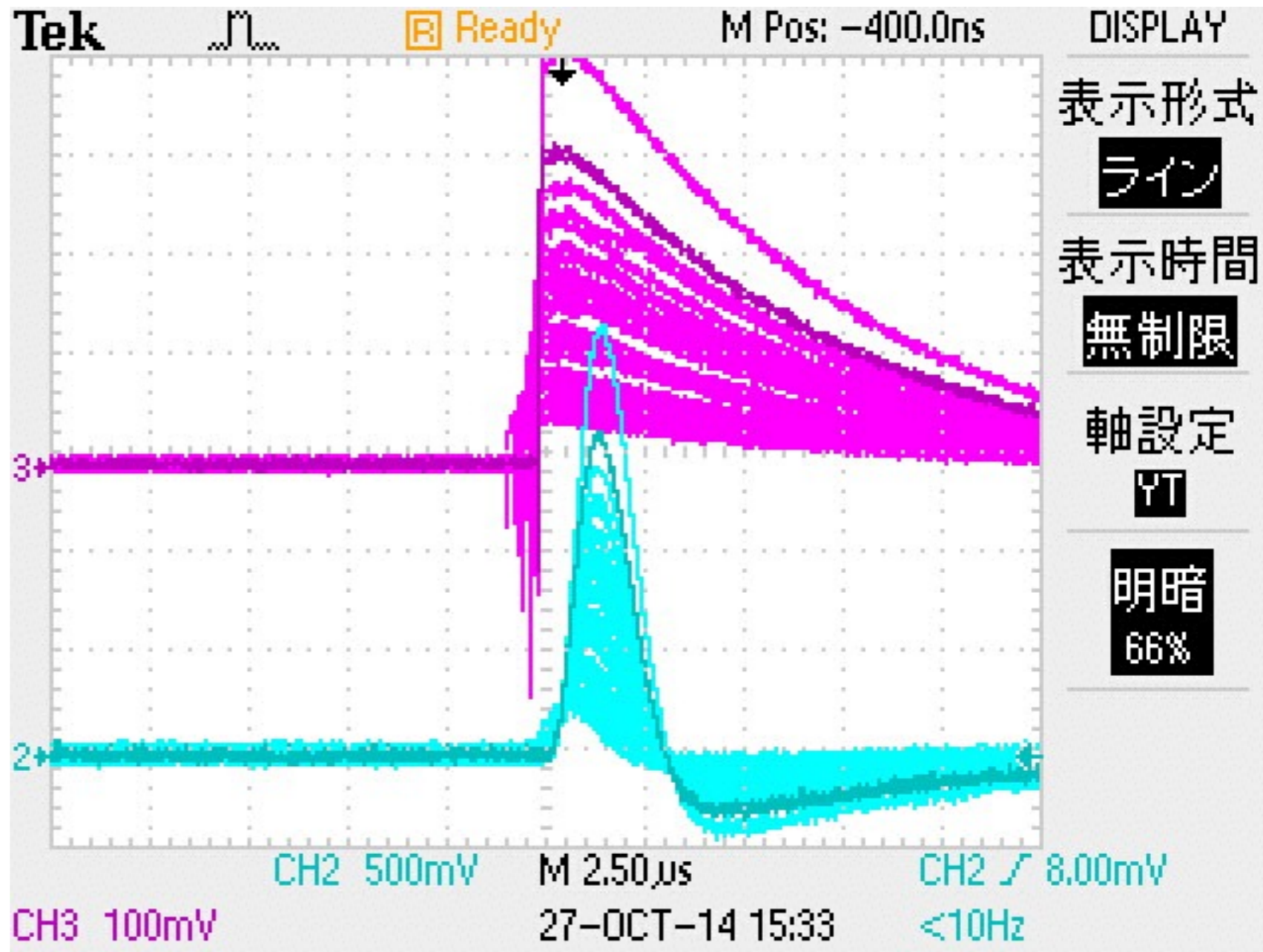
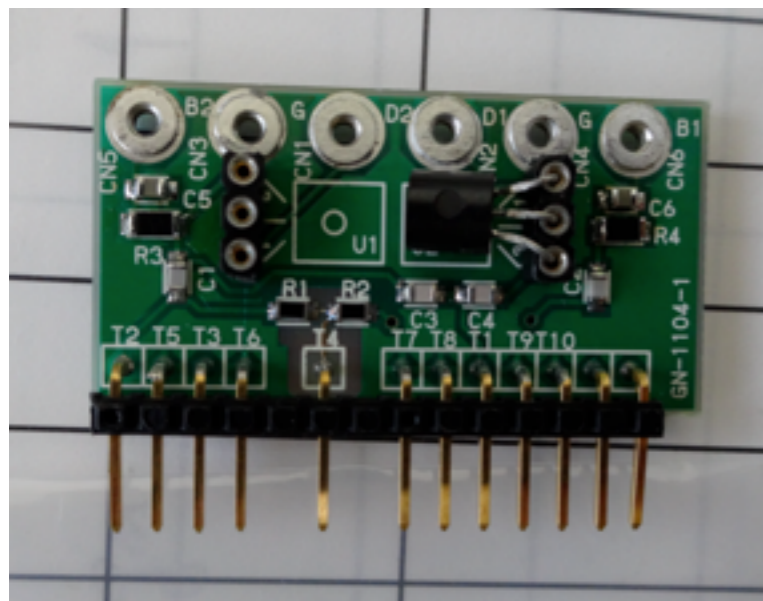


decay timeは約8usと、 $C_f=0.1\text{pF}$, $R_f=1\text{G}\Omega$ のときとほぼ同じであった。preamp出力の最初にnegativeになっている。shaper出力は20%程度のundershootがある。

PMT signals of ^{241}Am in 1.4 atm Xe gas, $C_f=470\text{pF}$, $R_f=0.2\text{M}\Omega$

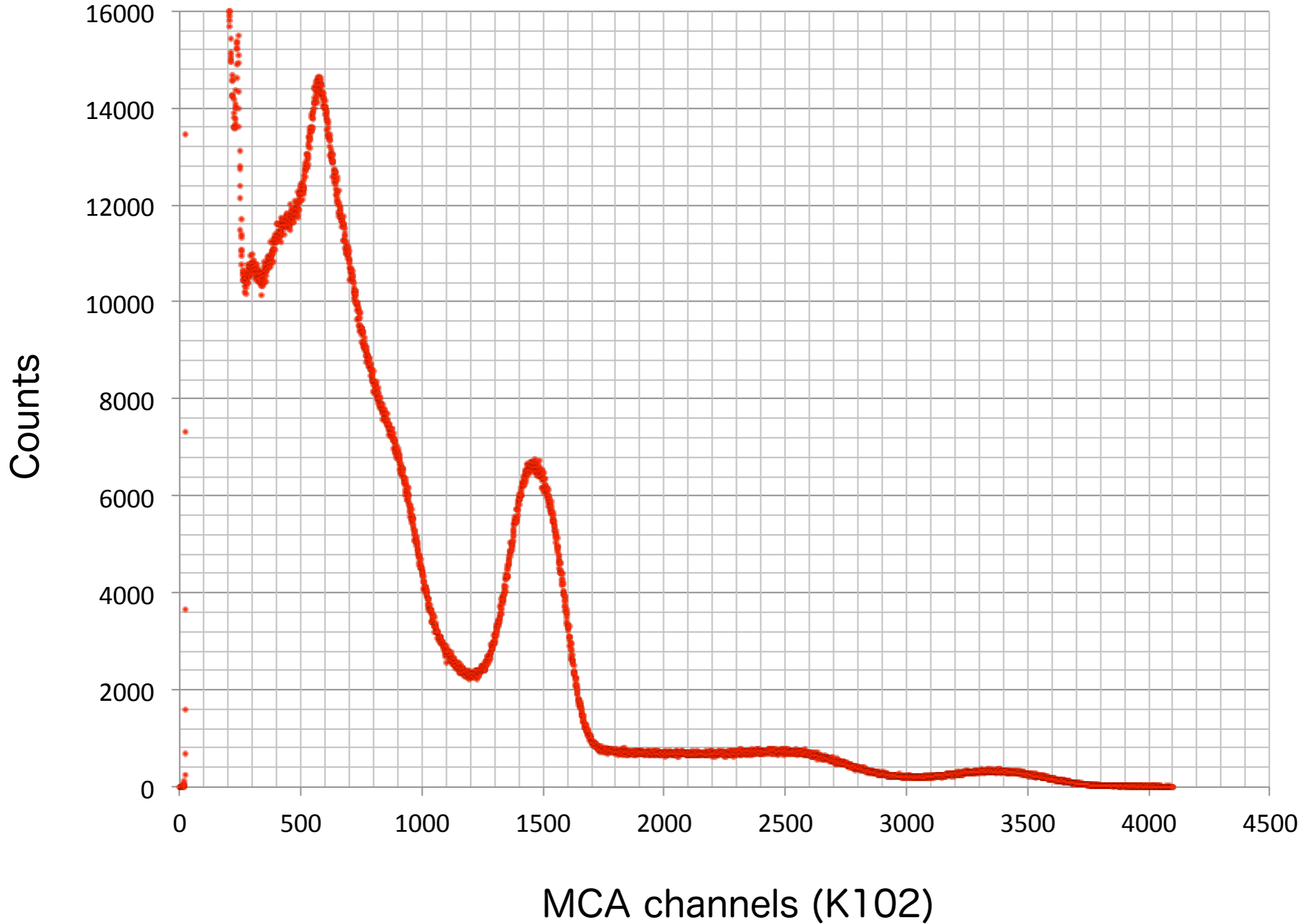
PMT(R8700) HV = +850V (nominal setting voltage)

Daughter Card with $C_f=470\text{pF}$, $R_f=0.2\text{M}\Omega$



Spectrum of ^{22}Na (100kBq) + ^{241}Am (200Bq) by PMT (R7600)

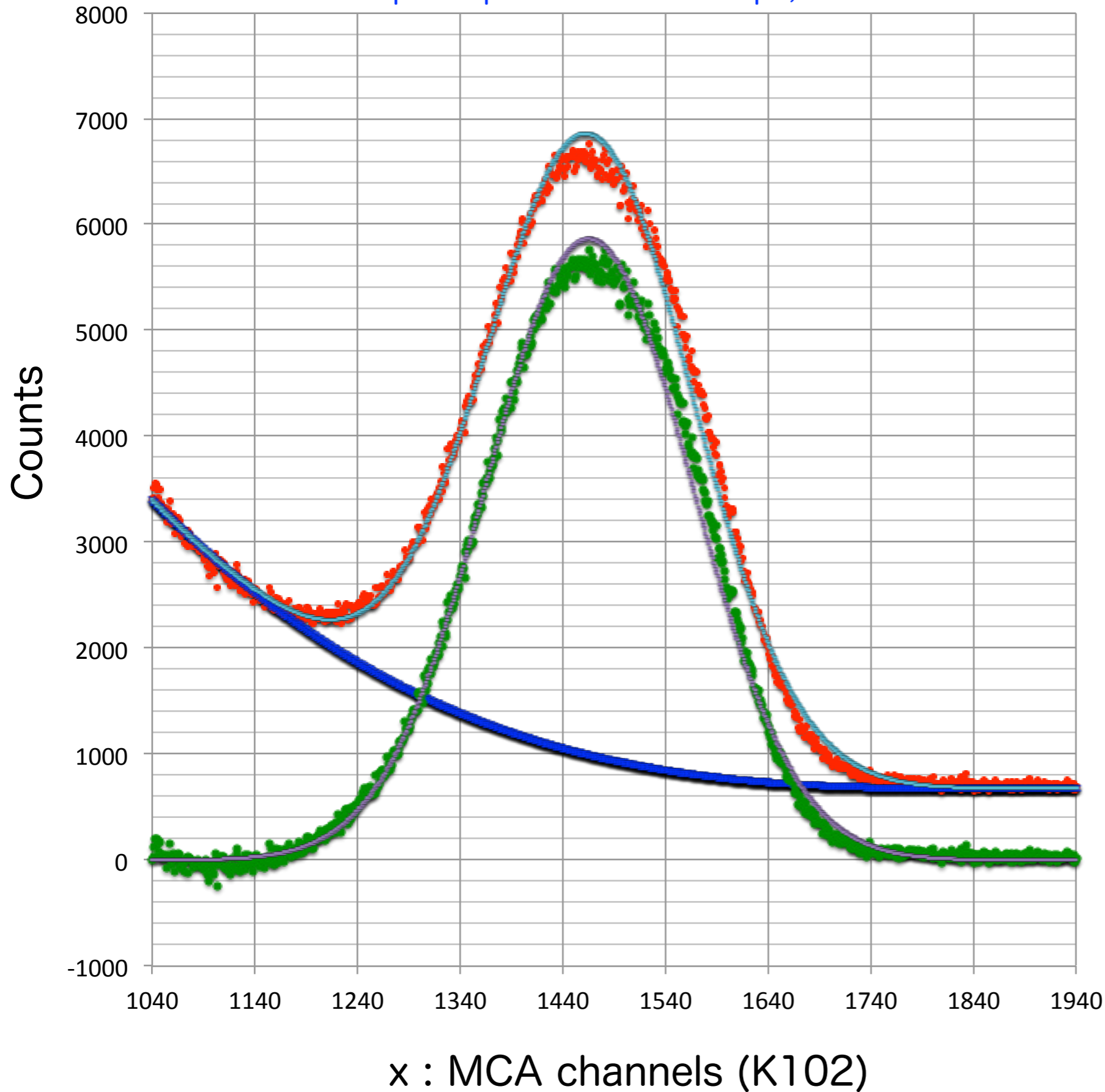
A250 preamplifier with $C_f=470\text{pF}$, $R_f=0.2\text{M}\Omega$



511 keV peak of ^{22}Na (100kBq) by PMT (R7600)

2014.11.21

A250 preamplifier with $C_f=470\text{pF}, R_f=0.2\text{M}\Omega$



$$\sigma_{511\text{keV}} = 0.07$$

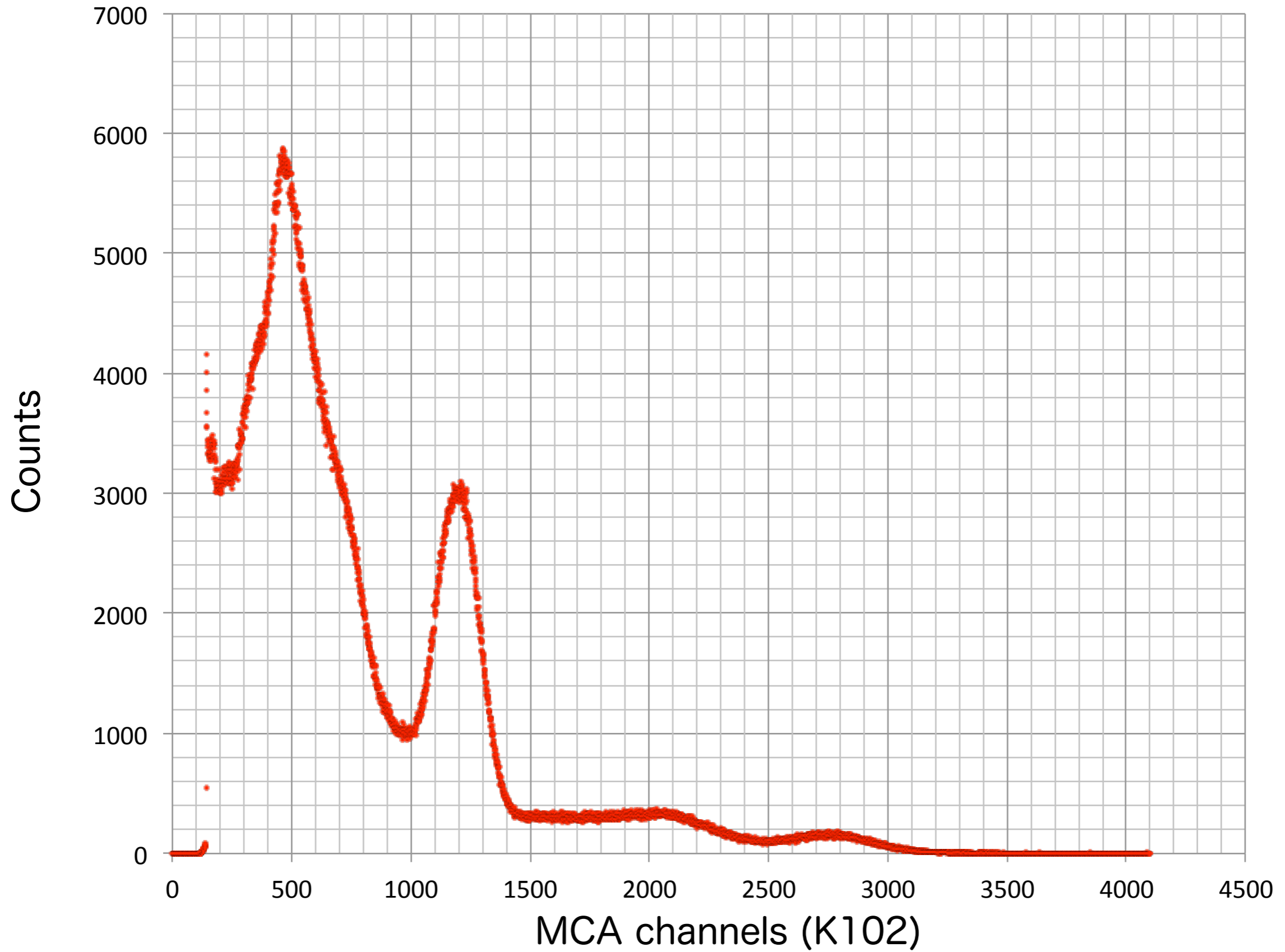
χ^2 fits with 6 parameters

$$\text{background} = 4.73\text{E-}6 (1871.6-x)^3 + 676.2$$

$$\text{signal (Gaussian distribution)} = 5863 \text{EXP}(- (x-1466.5)^2 / 2 / 100.3^2)$$

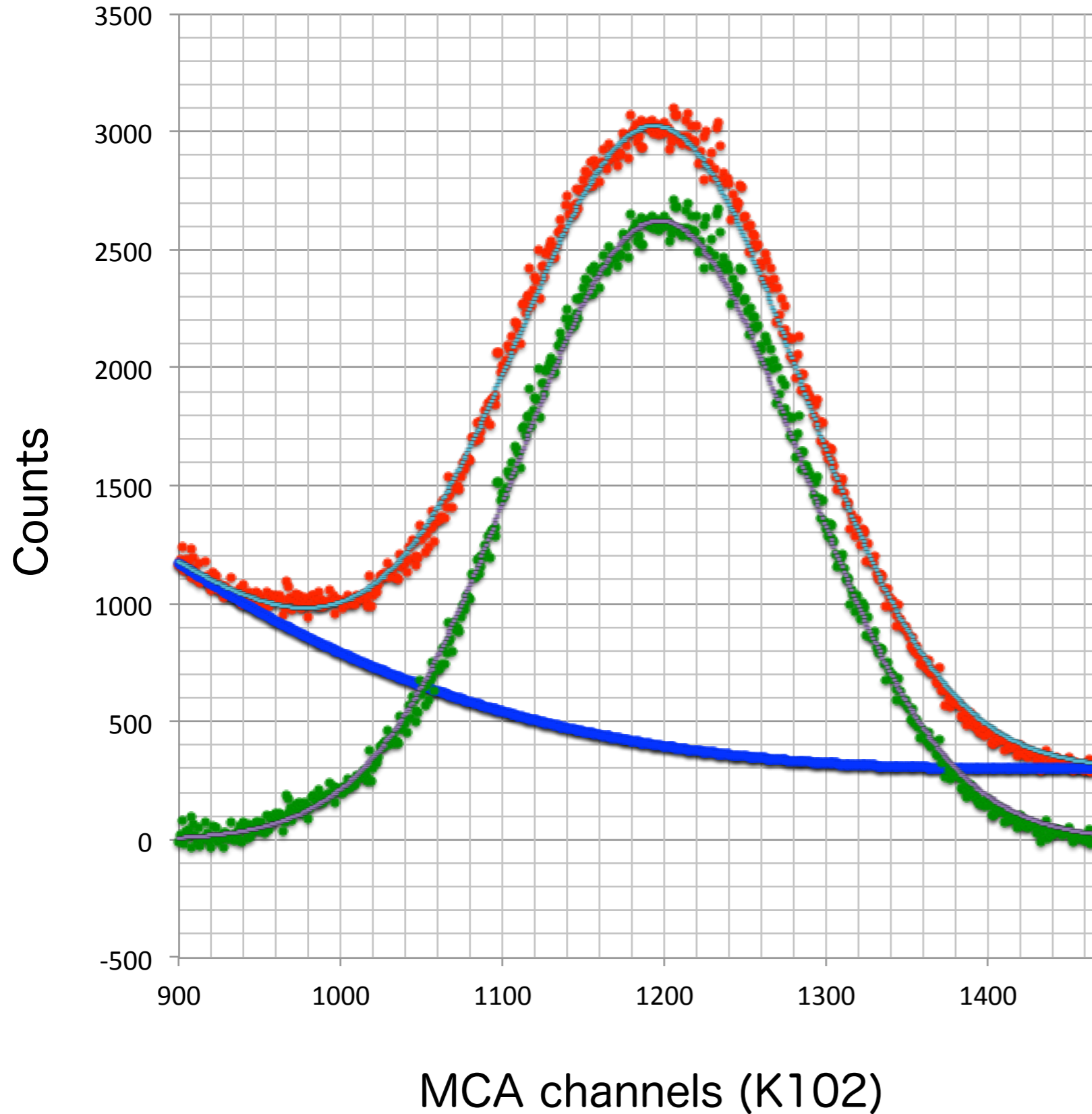
Spectrum of ^{22}Na (100kBq) by PMT (R7600)

ORTEC 142PC



Spectrum of ^{22}Na (100kBq) by PMT (R7600)

ORTEC 142PC



$$\sigma_{511\text{keV}} = 0.07$$

χ^2 fits with 6 parameters

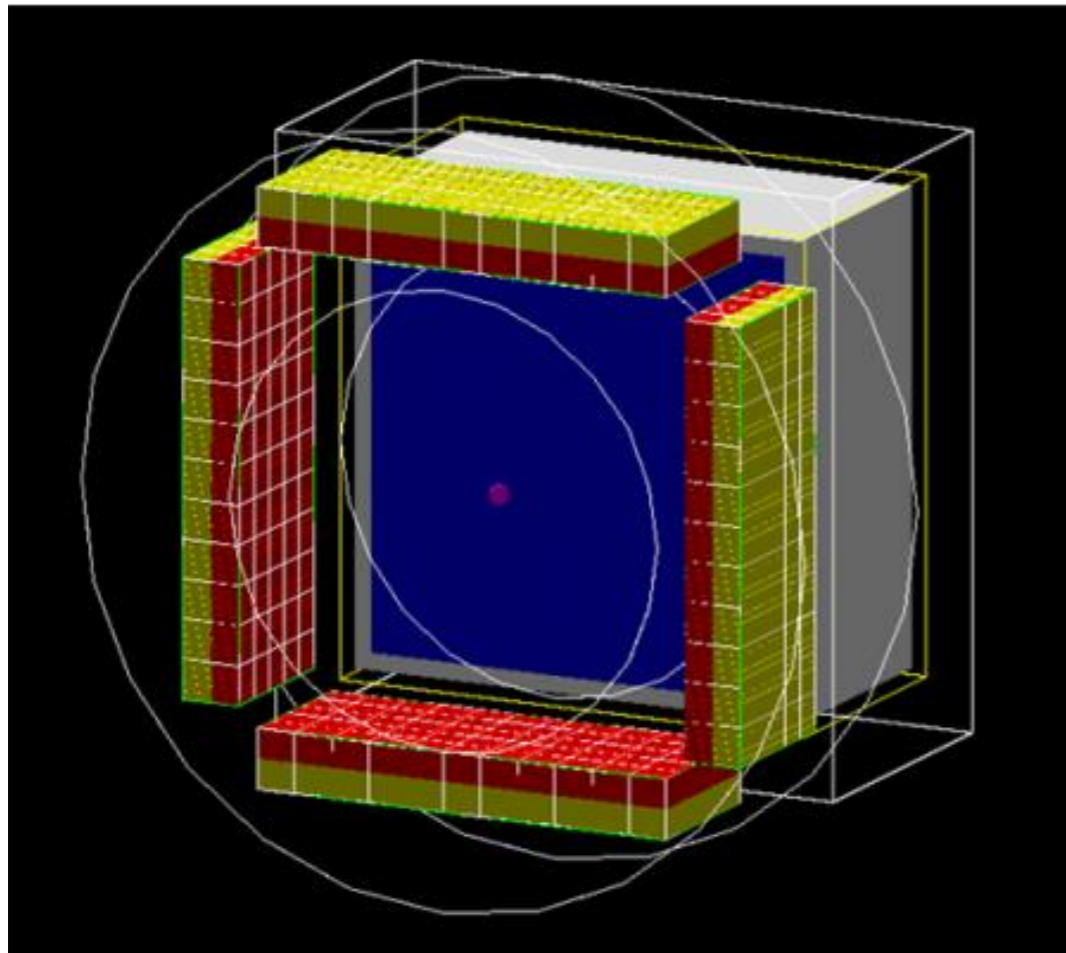
$$\text{background} = 4.49\text{E-}6 (1478.6-x)^3 + 300.0$$

$$\text{signal (Gaussian distribution)} = 2623 \text{EXP}(- (x-1197.1)^2 / 2 / 88^2)$$

XEMIS2

シミュレーション

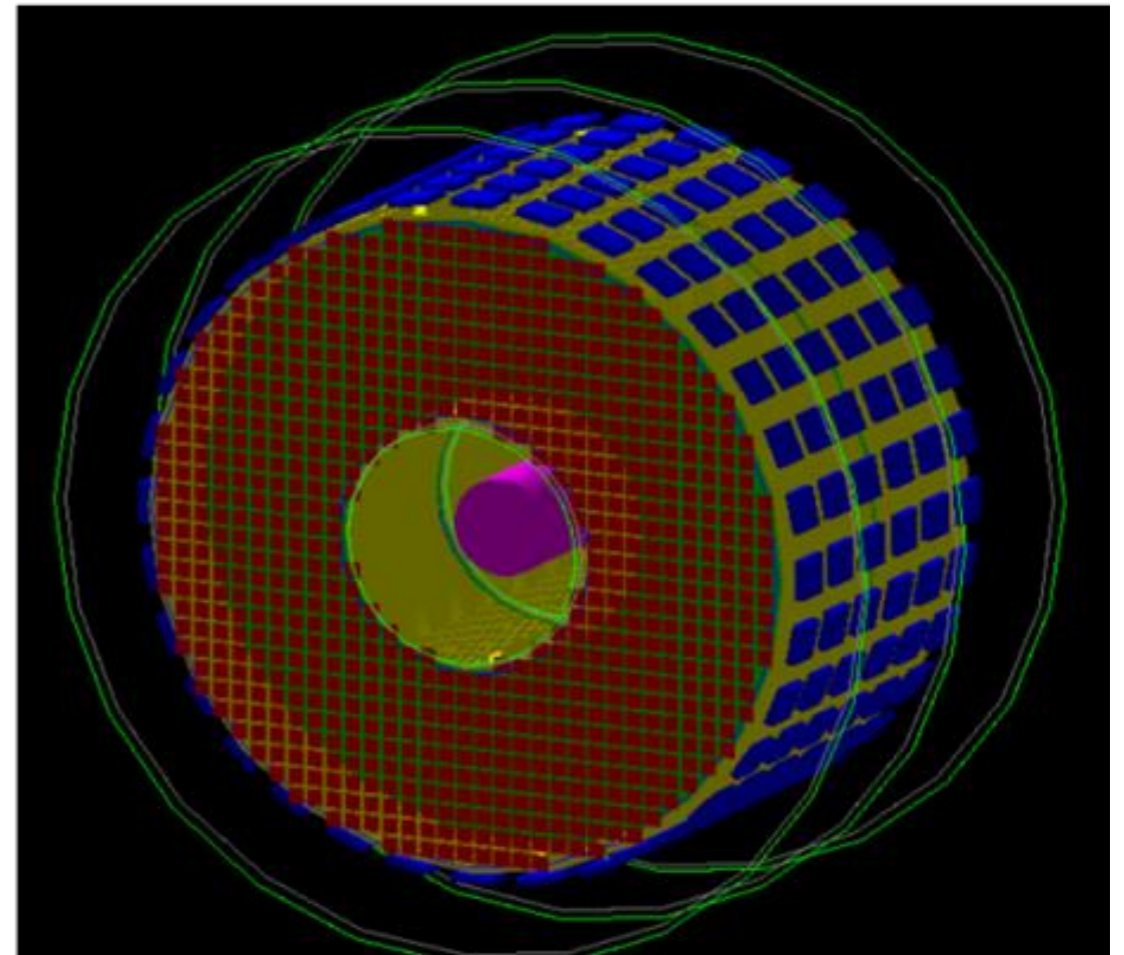
former proposed model



PET camera + LXe TPC
low sensitivity ~ 0.2%

(C. Grignon PhD)

last proposed model

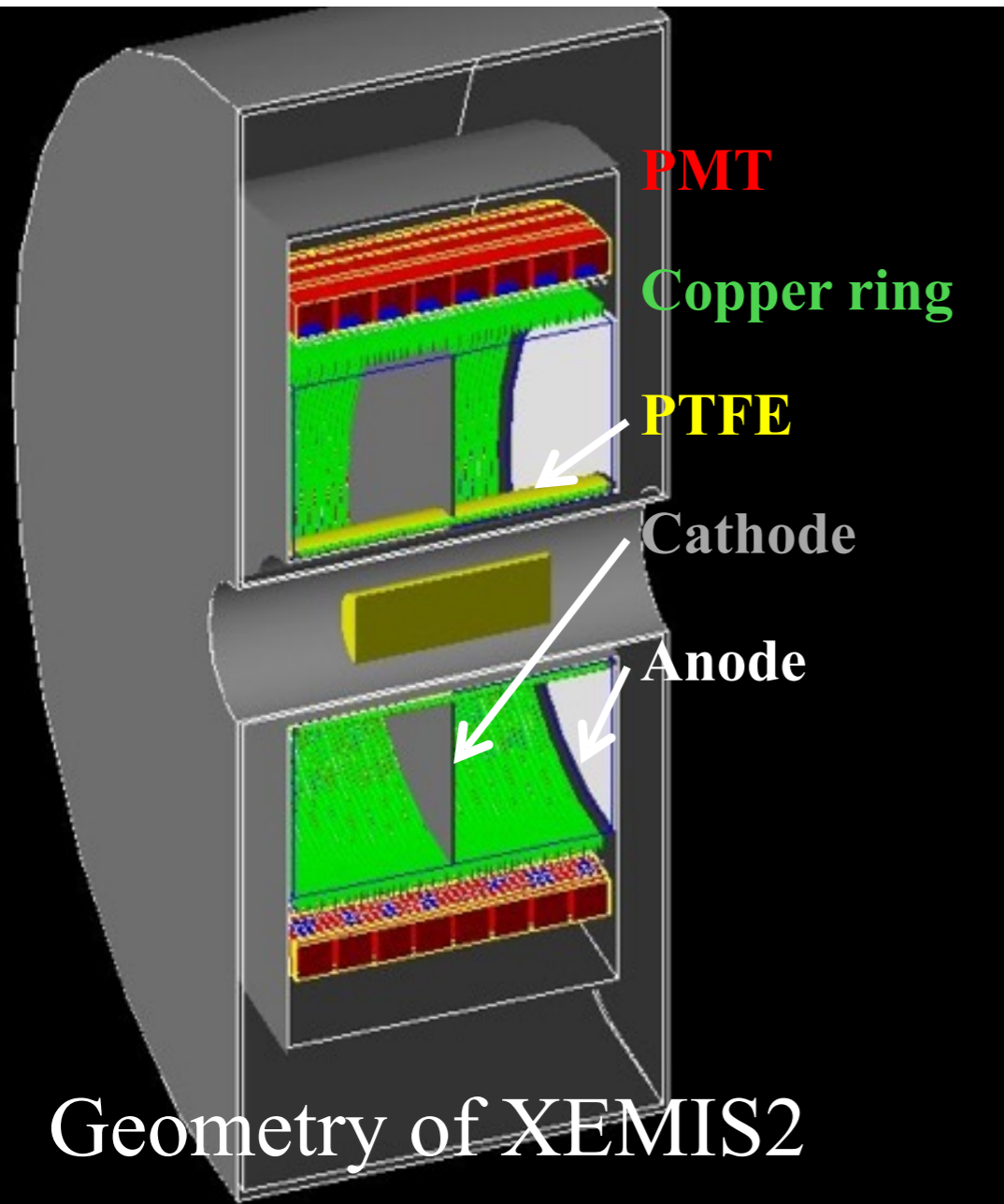


Full LXe camera (2TPCs)
Best sensitivity ~ 5%

Study of sensibility from Gate hits

図 3.2 XEMIS2 の旧モデル(左)と新規のモデル(右)

XEMIS2

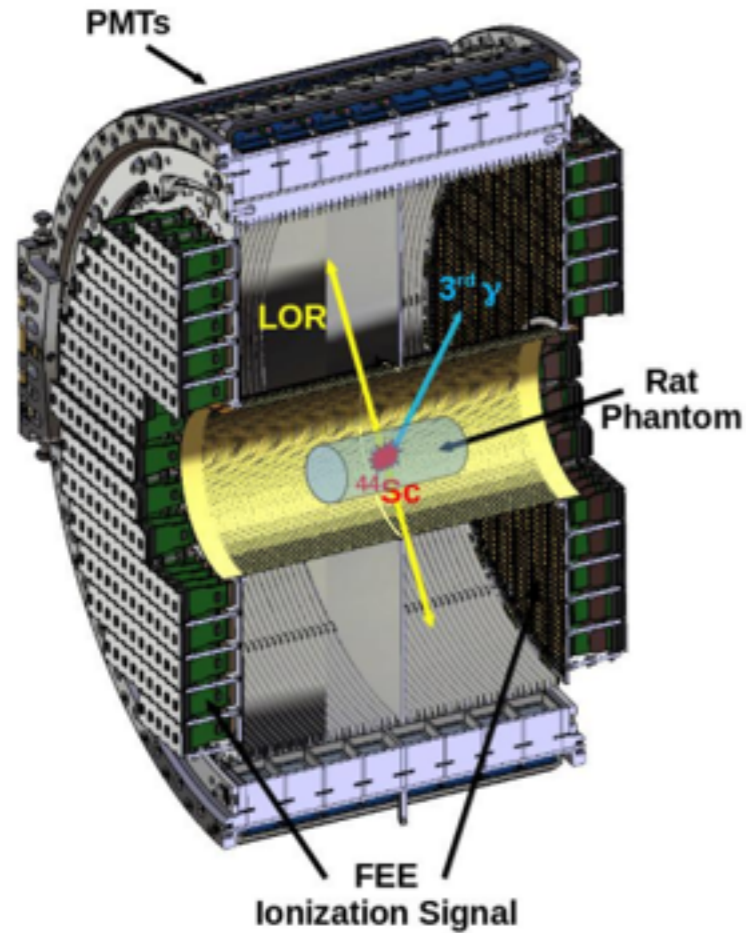


XEMIS2

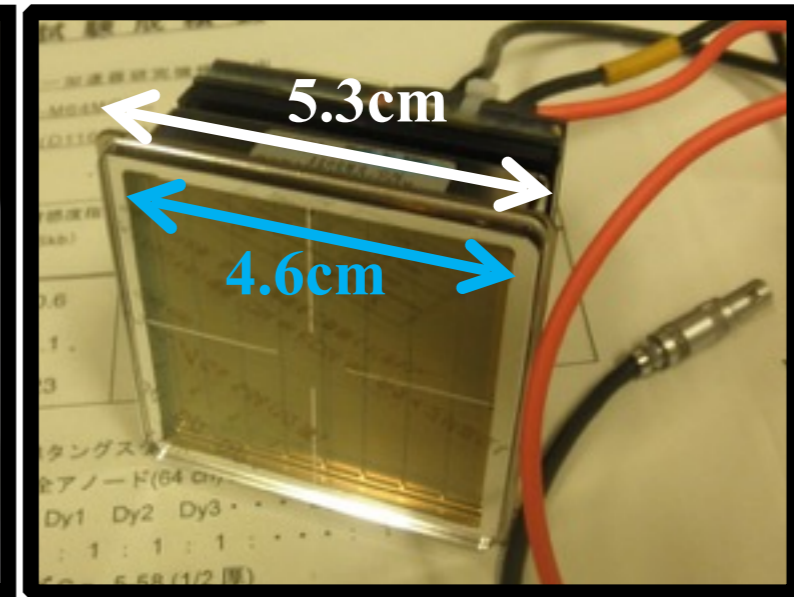
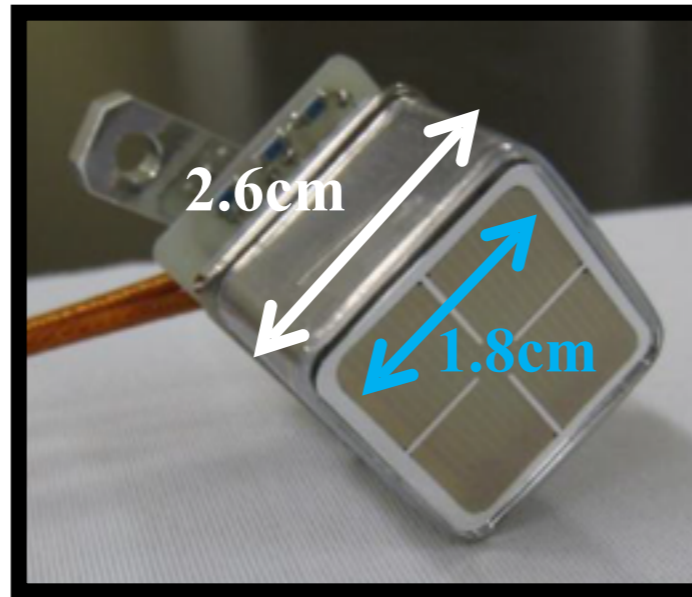
Full liquid xenon cylindrical camera for small animal imaging (~ 130 kg LXe)

- radial $7 < r < 19$ cm
- axial (z) Length 2×12 cm
- Electric Field in z direction 2 kV/cm
- PMT system 4 x 24 (R10551)
or 8 x 48 (R7600)
- Micromegas ionization read-out
- FEE Idef-X, pixels 3.175×3.175 mm²
(~25k channels)
- Electronic noise ~100 e⁻
- Source ⁴⁴Sc (20kBq)

Simulation



- PMT (PhotoMultiplier Tube)

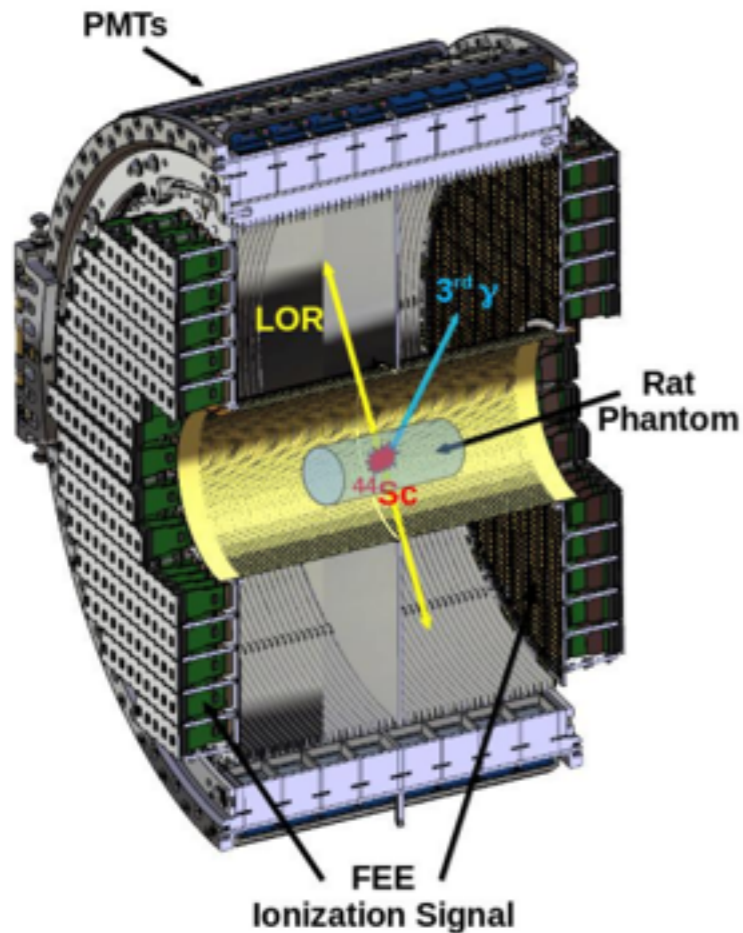


	R7600-06-AL	R10551-06-M64MOD
Quantum efficiency(@178nm)	30 %	34.82 %
Read out	1	4(u)x2(v) ; up to 8 x 8
Number	8 x 48 (384)	4 x 24 (96)
Size of photo cathode	1.8 x 1.8 cm ²	4.6 x 4.6 cm ²

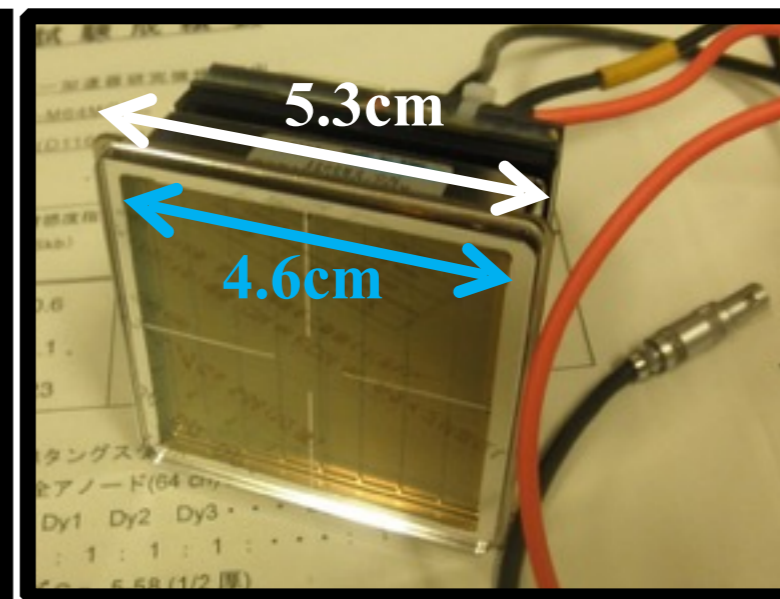
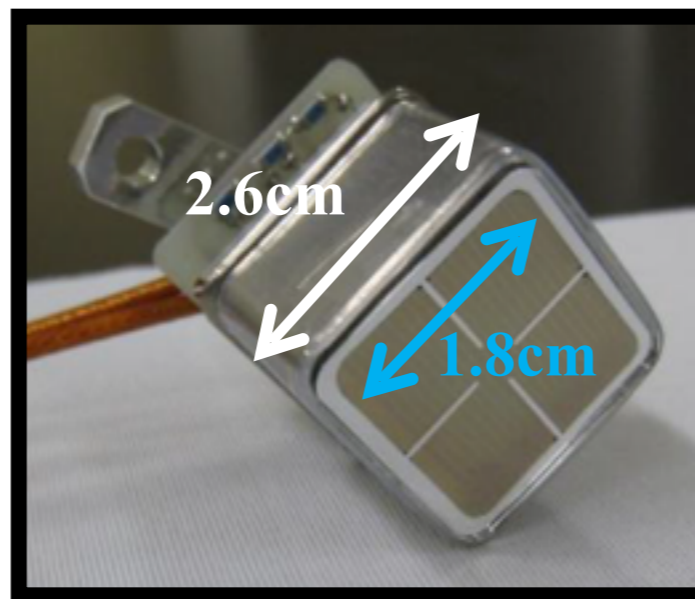
First proposal

New development

Simulation



- PMT (PhotoMultiplier Tube)



	R7600-06-AL	R10551-06-M64MOD
Quantum efficiency(@178nm)	30 %	34.82 %
Read out	1	16 (v) ; up to 8 x 8
Number	8 x 48 (384)	4 x 24 (96)
Size of photo cathode	1.8 x 1.8 cm ²	4.6 x 4.6 cm ²

Compare R10551 with R7600
 Total coverage : x 1.65
 Quantum efficiency : x 1.16
x 1.92

First proposal

New development

Simulation

- Number of photoelectrons
 - GATE can not simulate the electric field and the material of 2" PMT photocathode is not known in detail.
(Patent of HAMAMATSU)
 - Scintillation yield includes these effect to simulate how many number of photoelectrons are detected by PMTs
(It does not include some fluctuation, e.g. electric noise.)

2" PMT (1" PMT)

$$\frac{1.0 \times 10^6}{21.6} \times 0.3482(0.3) \times 0.3 \cong 4836(4167) [/ MeV]$$

Scintillation yield of Xe

Q.E.

Electric field

Scintillation yield for simulation

Simulation

- Parameter of reflection

- Teflon

- Reflectance : 95 [%]
 - Component : Diffuse

- SUS304

- Reflectance : 6.5 [%]
 - Calculated
 - Component : Specular lobe

$$\left(\frac{n_a - n_b}{n_a + n_b} \right)^2 \quad \begin{array}{l} n_a = 2.36 \text{ (RINDEX of SUS304)} \\ n_b = 1.615 \text{ (RINDEX of LXe)} \end{array}$$

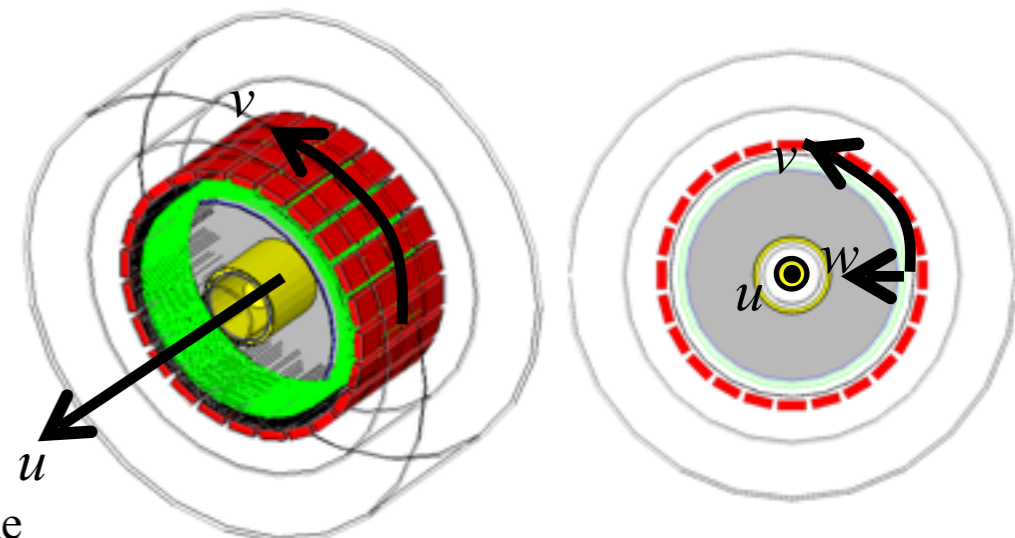
- Copper

- Reflectance : 23 [%]
 - reference : <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass/prelist/2004AutumnTomita.pdf>
 - Component : Specular lobe

Simulation : uniform incident angles

$$35^\circ < \Theta < 85^\circ$$

- Evaluate the resolution of reconstruction of the interaction point with scintillation signal
 - Get the detection position based on the IDs assigned to each photocathode
 - Express 2-D coordinate (u, v)
 - Calculate the mean of distribution by center of gravity method

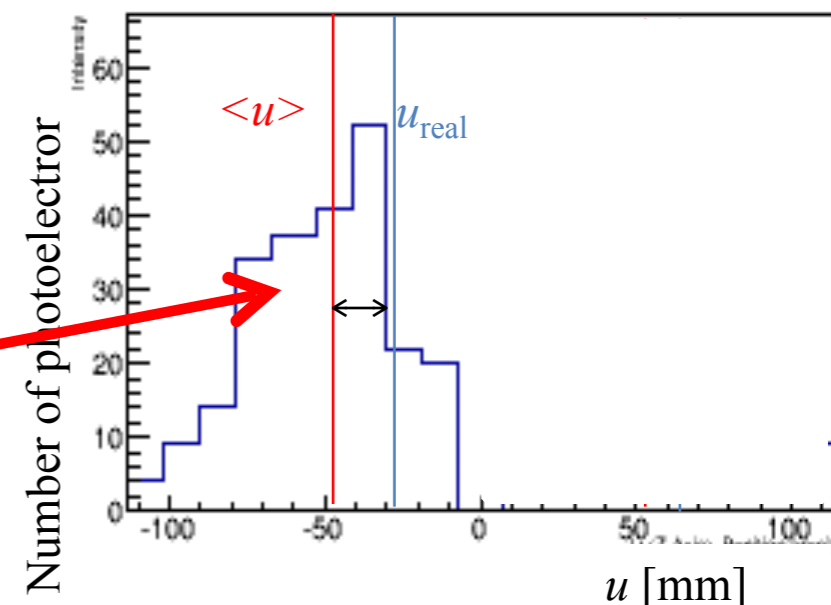


$$\langle u \rangle = \frac{\sum_i q_i \cdot u_i}{\sum_i q_i} \quad \langle v \rangle = \frac{\sum_j q_j \cdot v_j}{\sum_j q_j}$$

i, j : ID of photocathode
 $q_{i,j}$: Number of photoelectron

- Compare the mean with real interaction point per event

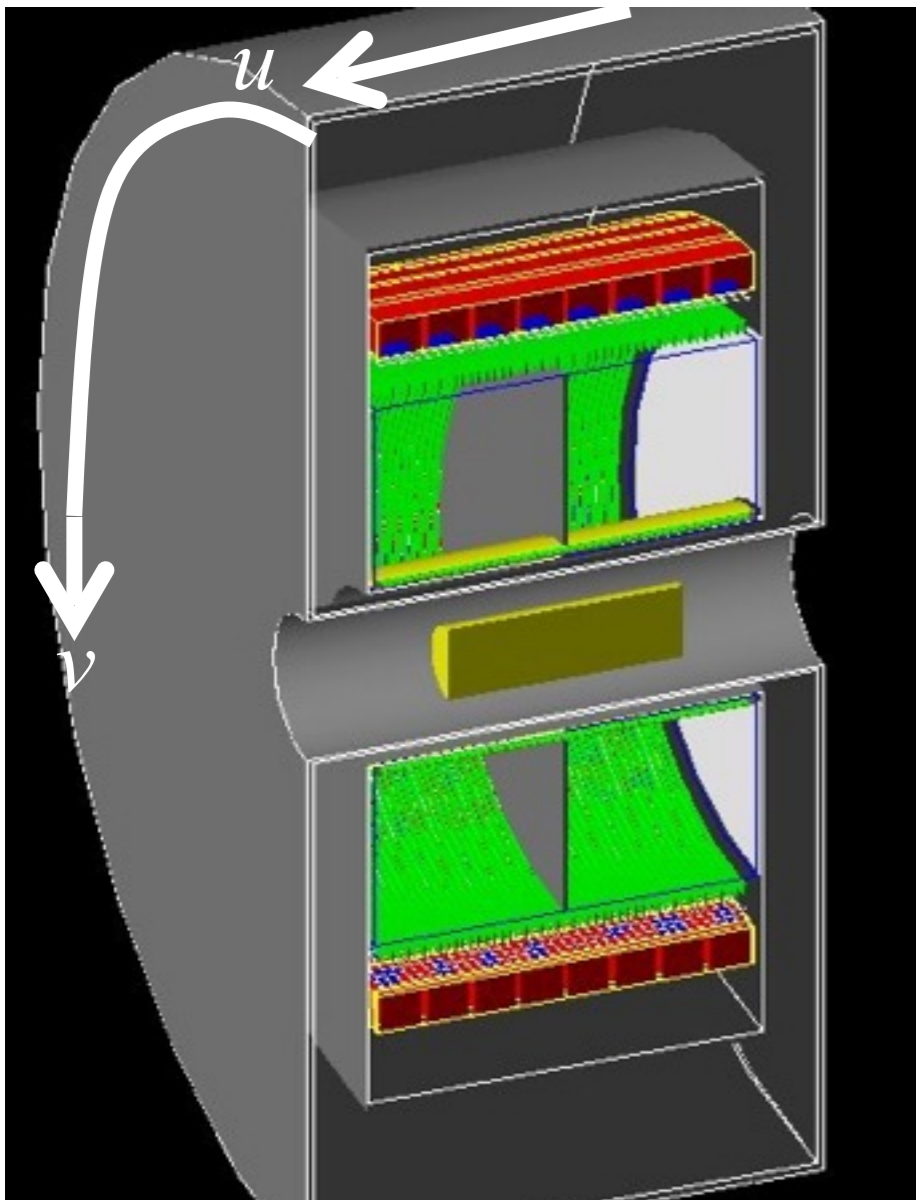
$$(\langle u \rangle - u_{\text{real}}, \langle v \rangle - v_{\text{real}})$$



Simulation : uniform incident angles

$$35^\circ < \Theta < 85^\circ$$

- Evaluate the resolution of reconstruction of the interaction point with scintillation signal



Condition of simulation

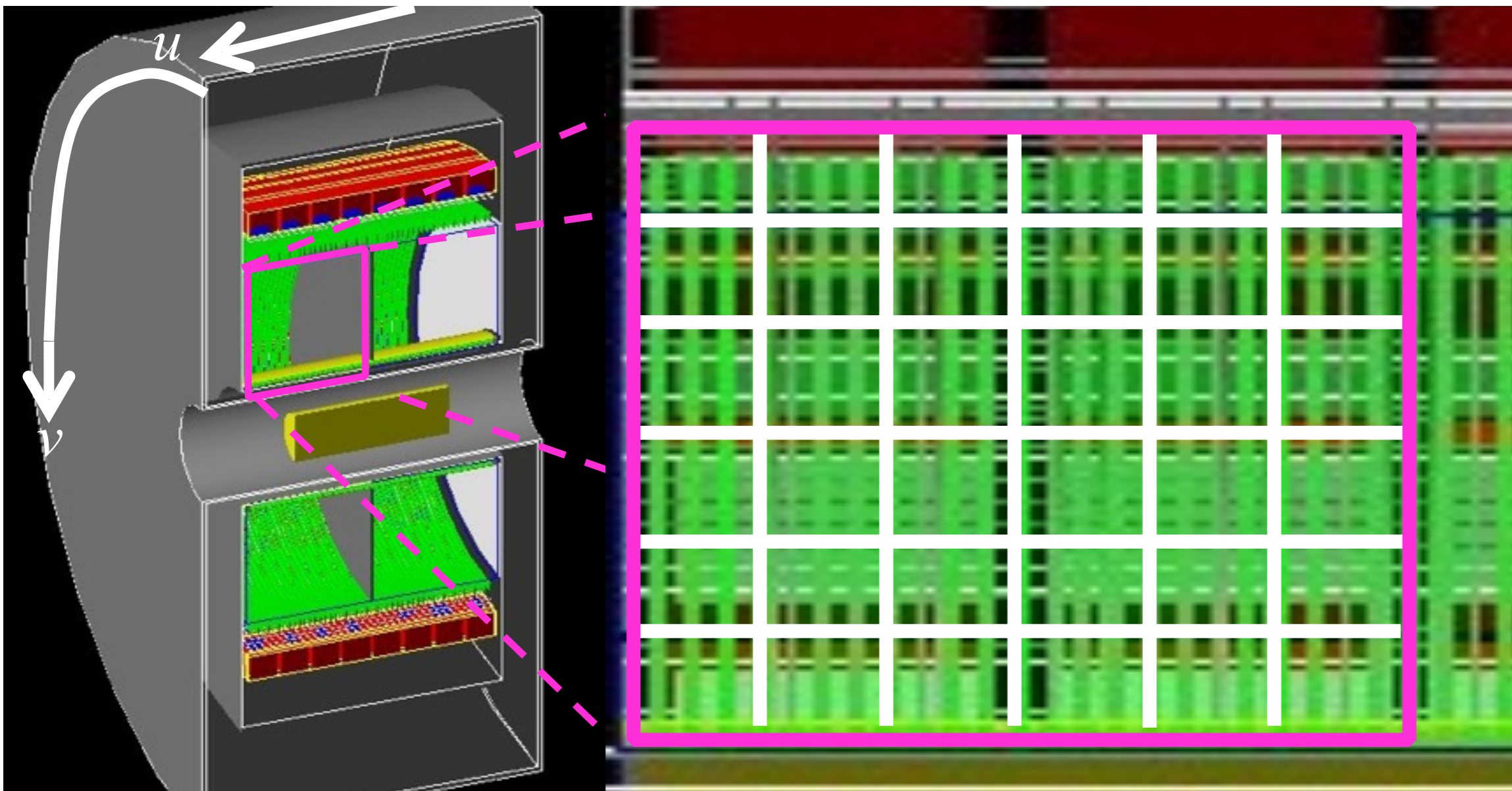
γ	Only two gammas, 20kBq
<i>Time</i>	<i>5.0s</i>

Only photoelectric was occurred

Simulation : uniform incident angles

$$35^\circ < \Theta < 85^\circ$$

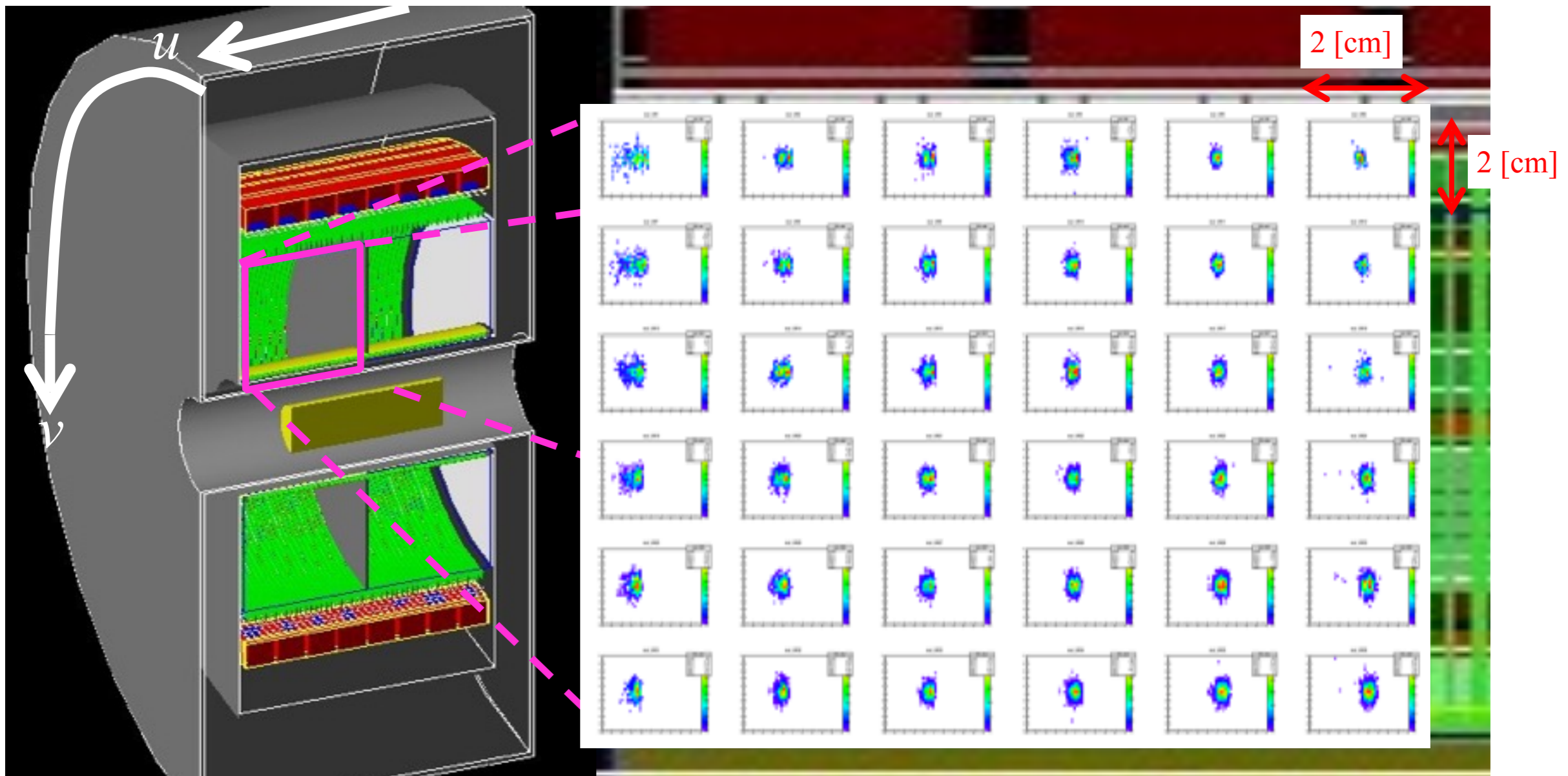
- Evaluate the resolution of reconstruction of the interaction point with scintillation signal



Simulation : uniform incident angles

$35^\circ < \Theta < 85^\circ$

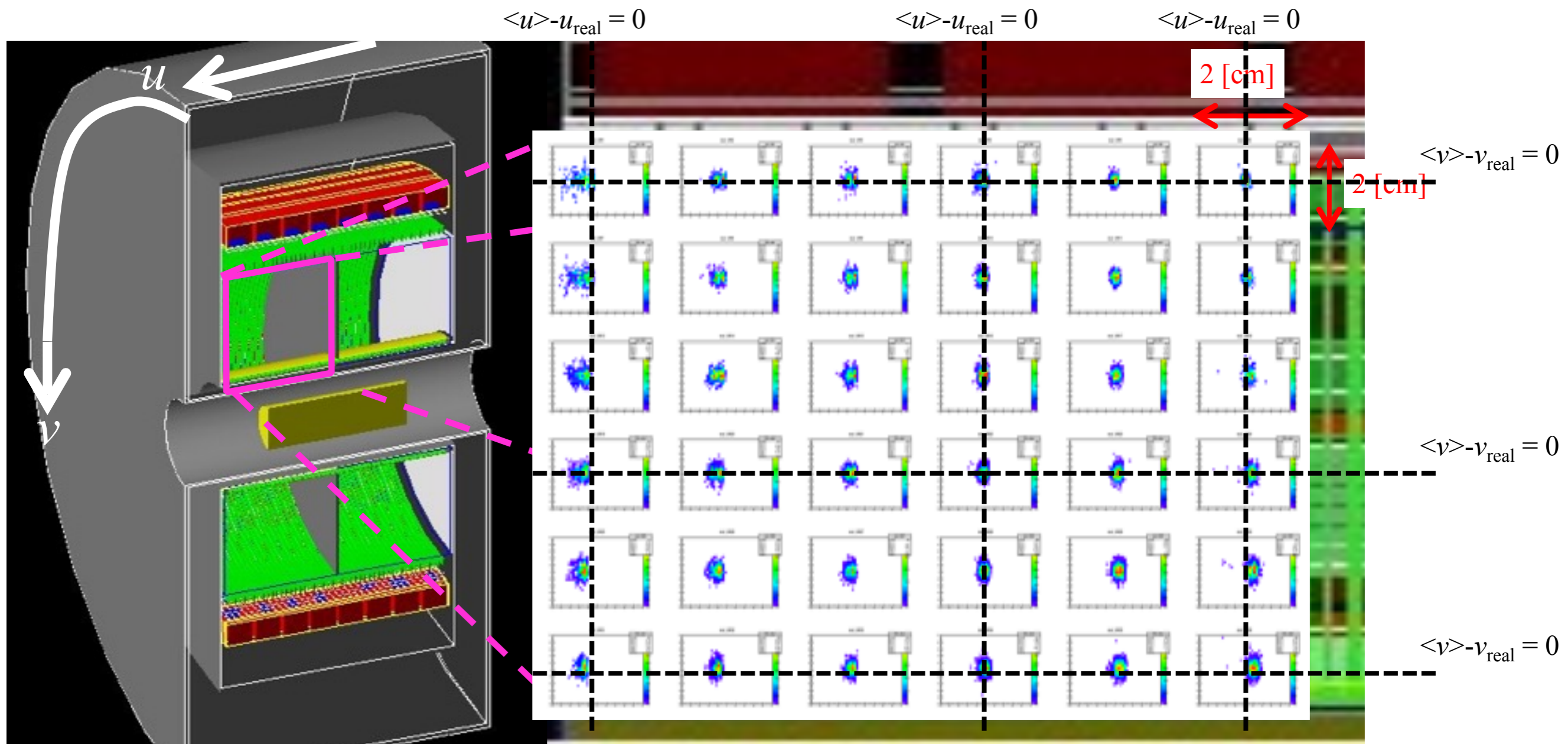
- Evaluate the resolution of reconstruction of the interaction point with scintillation signal



Simulation : uniform incident angles

$35^\circ < \Theta < 85^\circ$

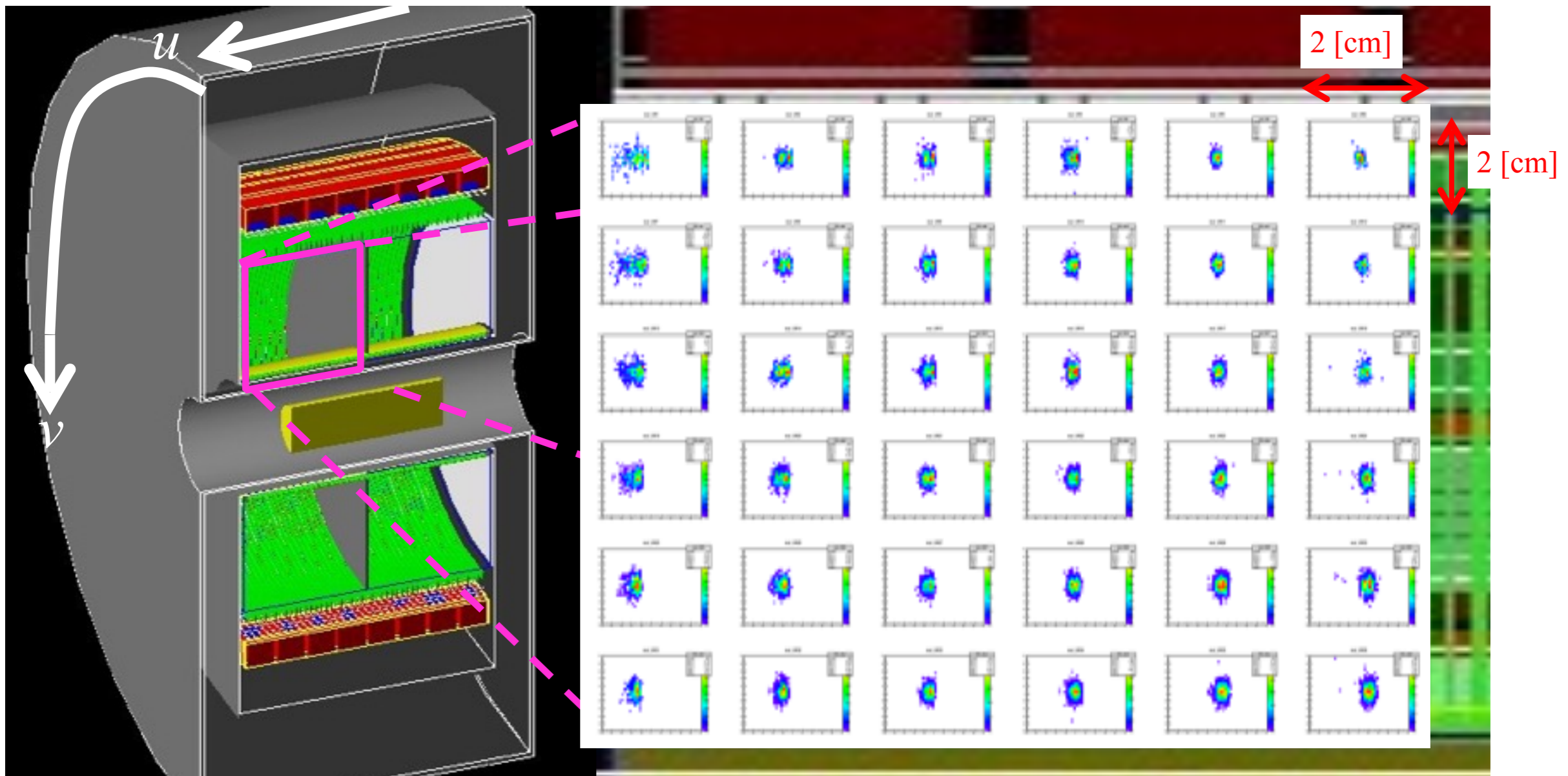
- Evaluate the resolution of reconstruction of the interaction point with scintillation signal

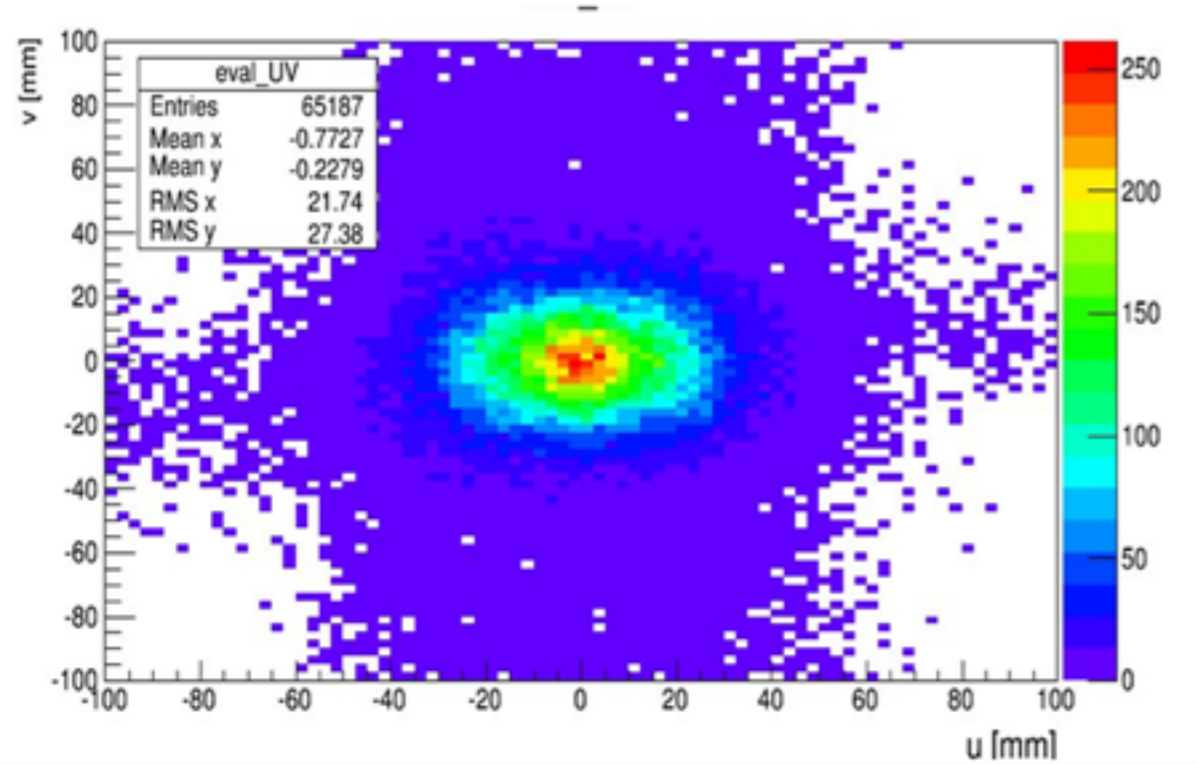


Simulation : uniform incident angles

$35^\circ < \Theta < 85^\circ$

- Evaluate the resolution of reconstruction of the interaction point with scintillation signal



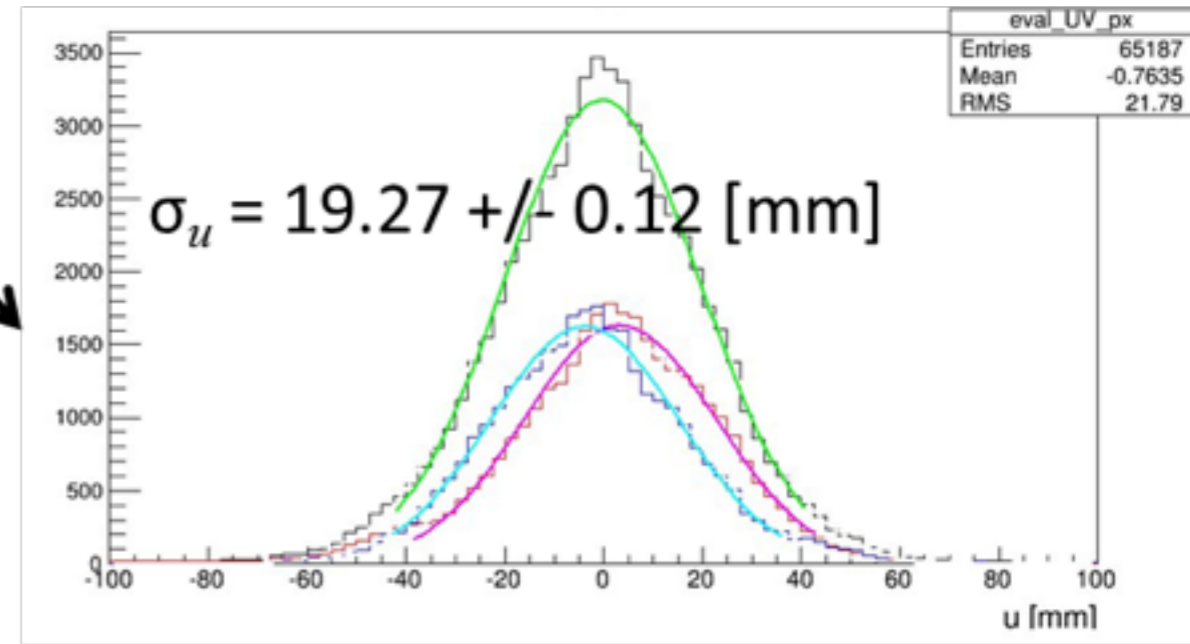


ProjectionX

Fitting range

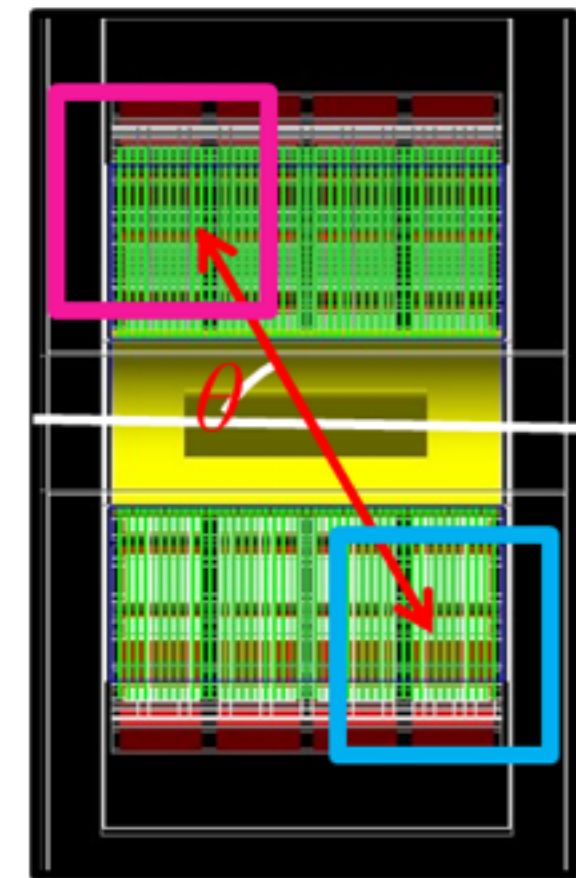
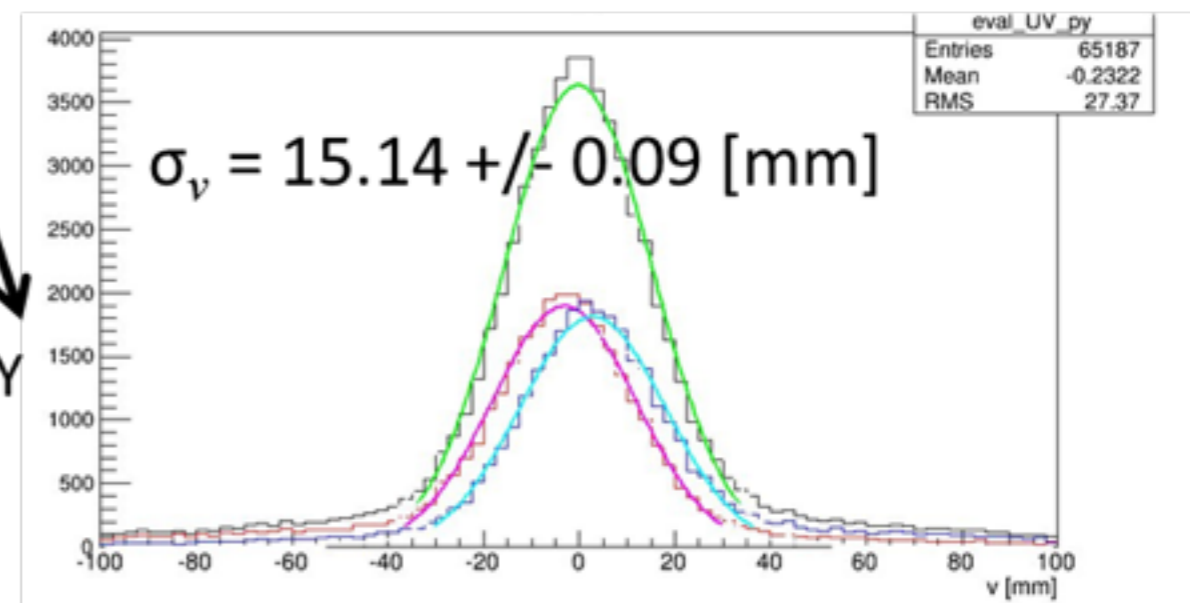
1st : +/- 100

2nd : +/- $2\sigma_{1st}$



- 左の図の左上のセグメント
- 左の図の右下のセグメント
- 全イベント

ProjectionY



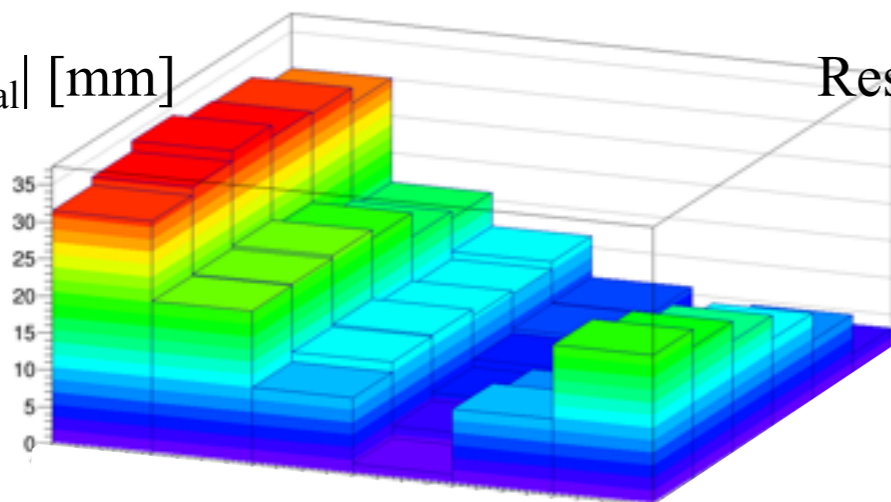
Simulation : uniform incident angles

$$35^\circ < \Theta < 85^\circ$$

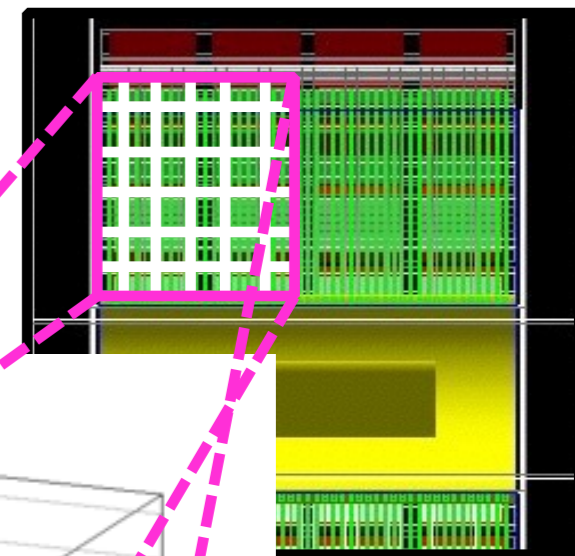
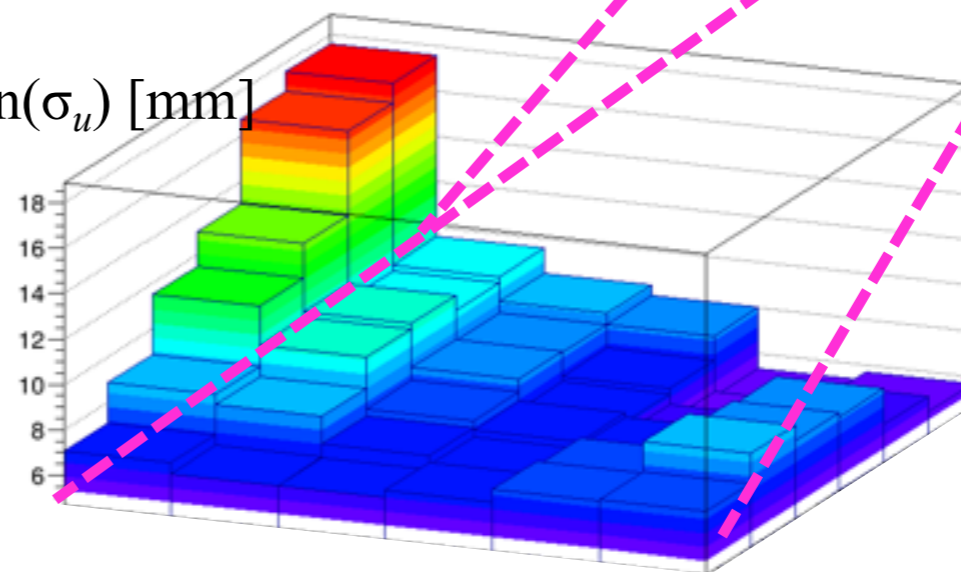
- Evaluate the resolution of reconstruction of the interaction point with scintillation signal
 - Evaluate each area

■ 1/1

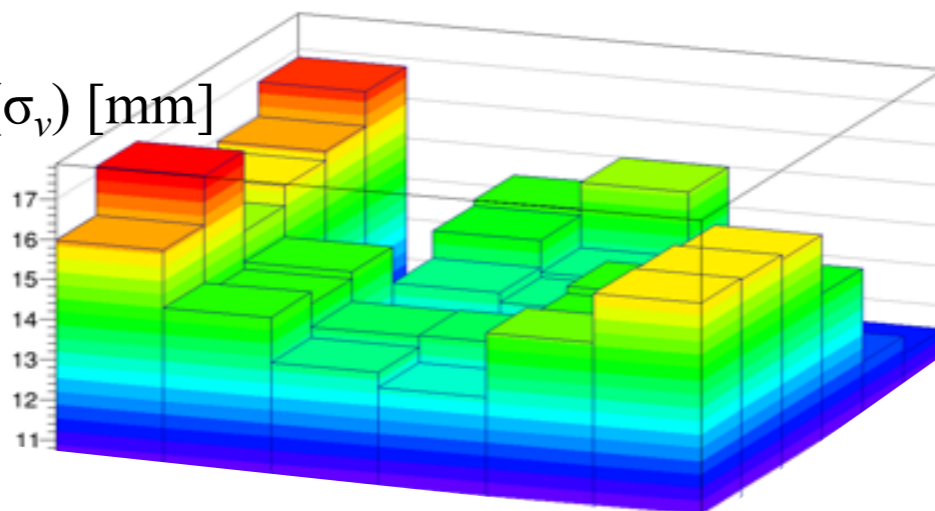
$|\langle u \rangle - u_{\text{real}}|$ [mm]



Resolution(σ_u) [mm]



Resolution(σ_v) [mm]

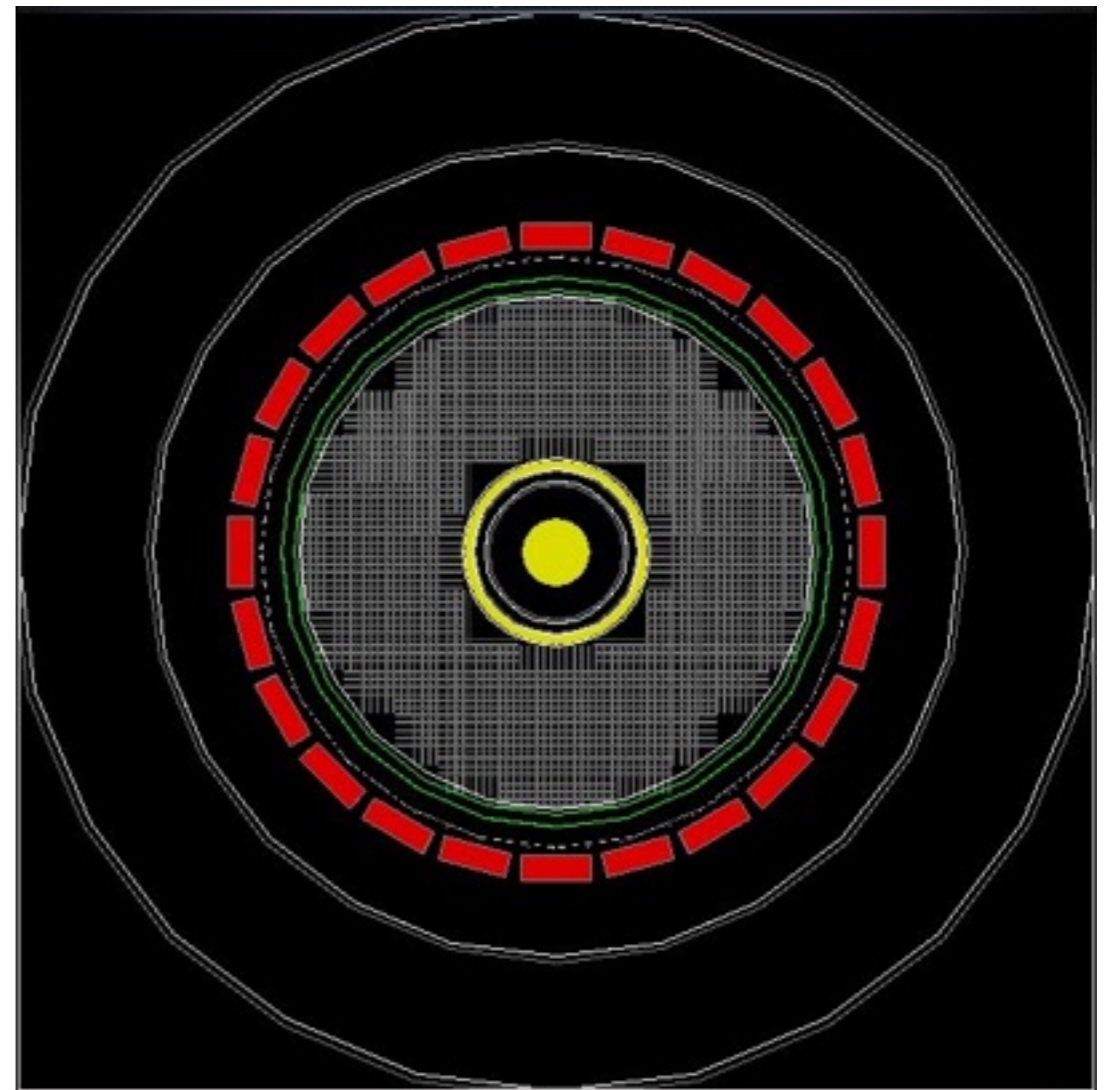
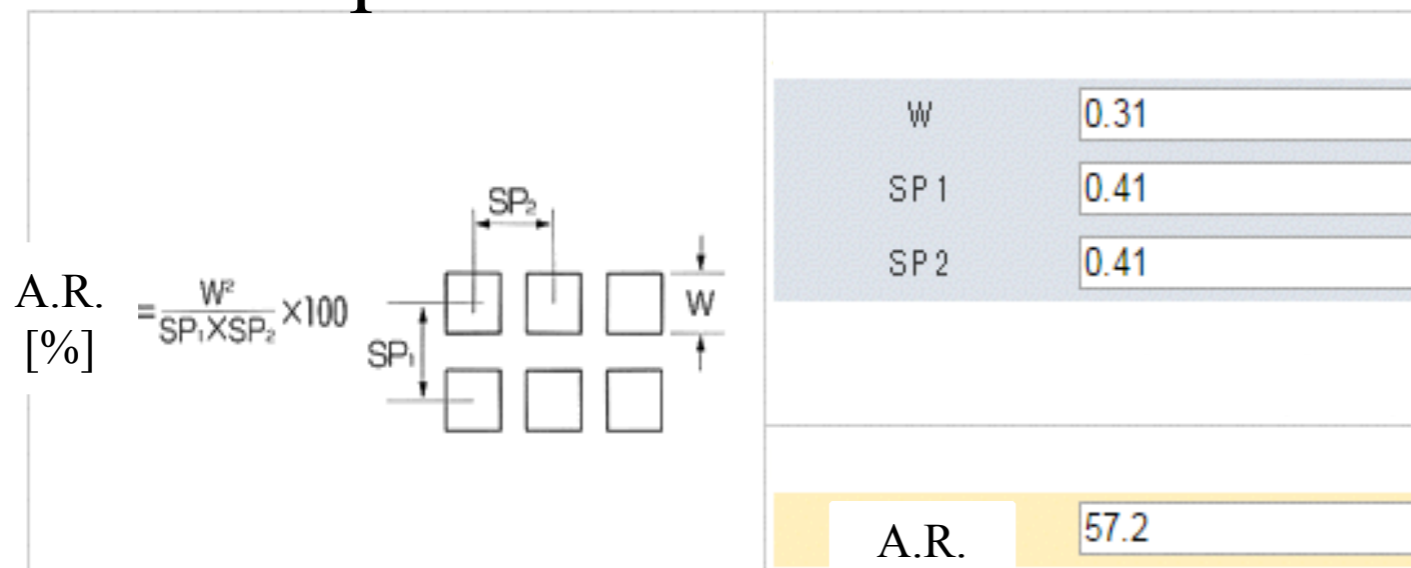


	R10551	R7600
Average σ_u	$8.32 \pm 0.26 \text{mm}$	$8.12 \pm 0.26 \text{mm}$
Average σ_v	$14.24 \pm 0.42 \text{mm}$	$18.89 \pm 0.58 \text{mm}$
$\sigma_u \times \sigma_v$	$118.5 \pm 5.09 \text{mm}^2$	$153.3 \pm 6.81 \text{mm}^2$

Simulation - mesh cathode

- Evaluate the resolution of reconstruction of the interaction point with scintillation signal
 - Evaluate mesh cathode
 - Aperture ratio (A.R.) :
19% and 57%

Example



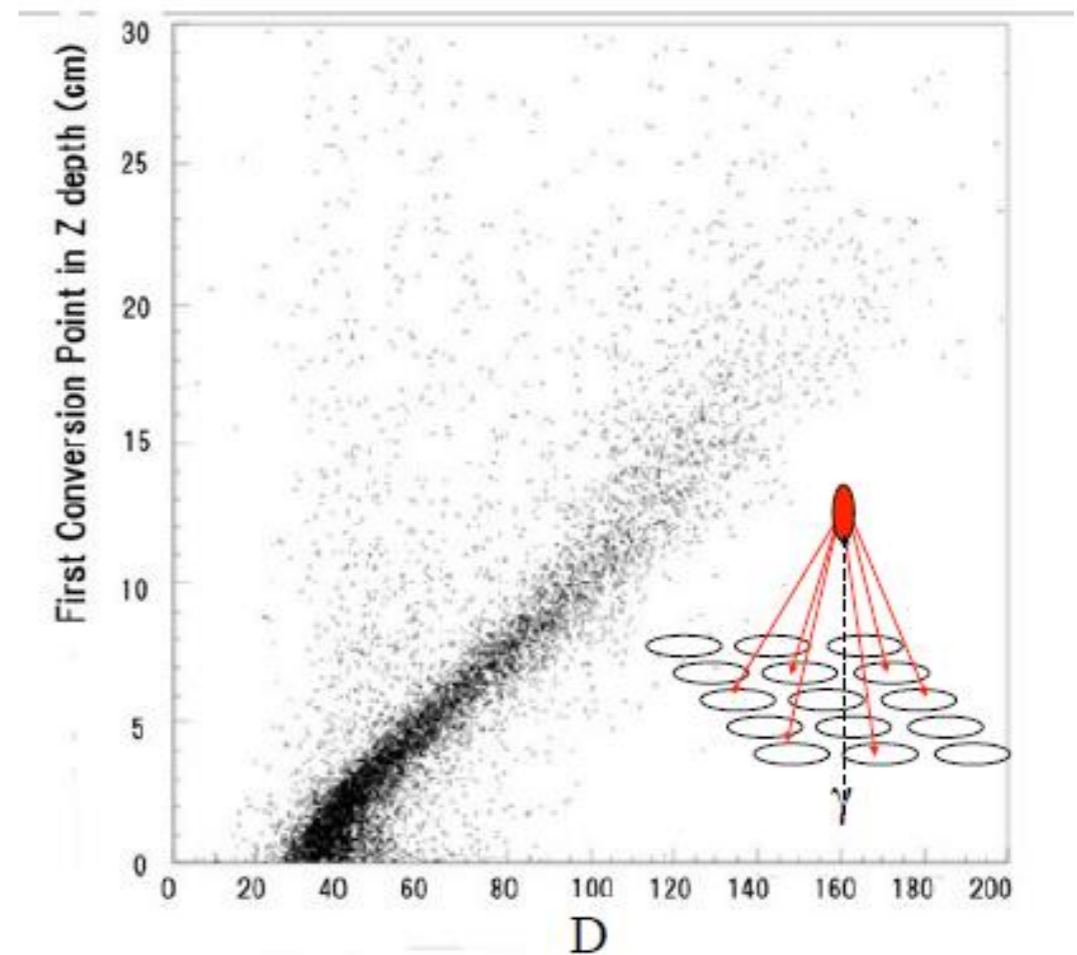
深さ方向の測定：Dパラメータの導入

•解析フロー

1. 1イベントごとにPMTに検出された光電子数の u, v 座標の平均値 $\langle u \rangle, \langle v \rangle$ と D 値を算出

$$D = \frac{\sum_i q_i \cdot u_i^2 + \sum_j q_j \cdot v_j^2}{q} - \left(\frac{\sum_i q_i \cdot u_i + \sum_j q_j \cdot v_j}{q} \right)^2$$

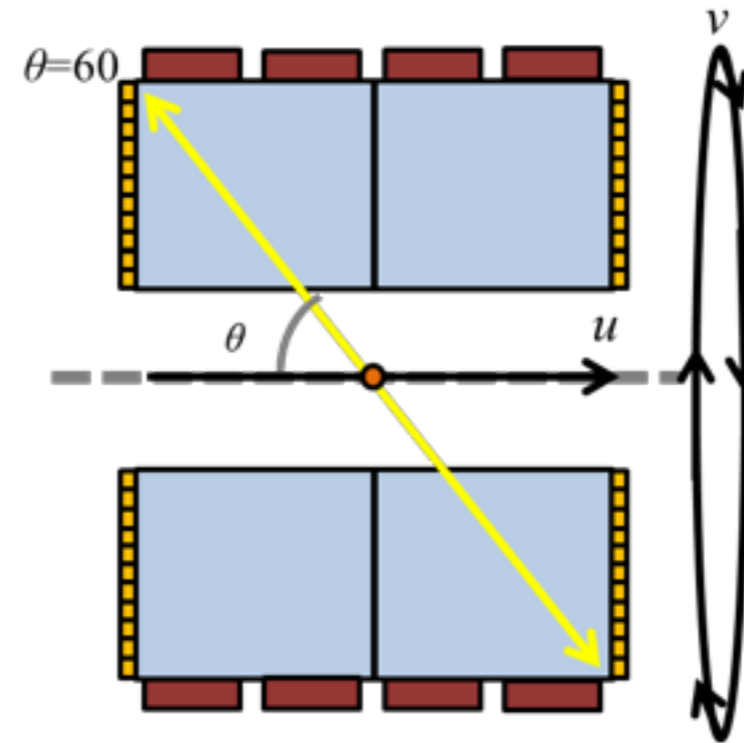
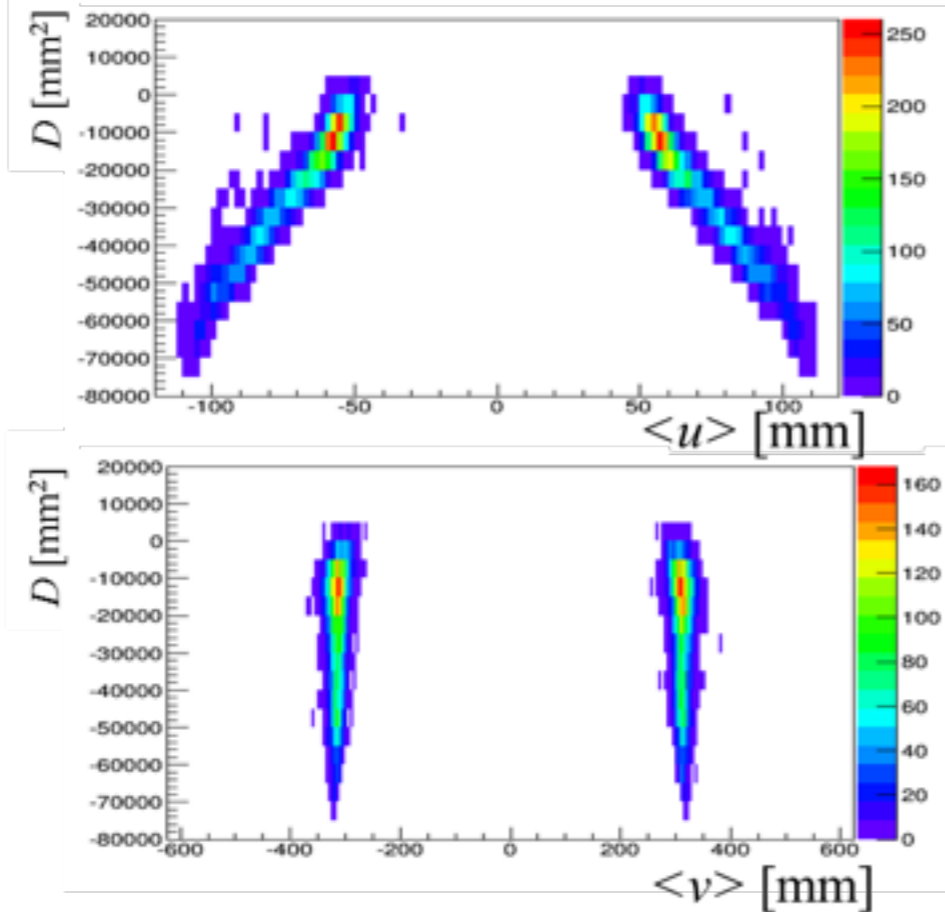
PMTの検出面から見た γ 線反応位置の深さと D は比例関係にある。



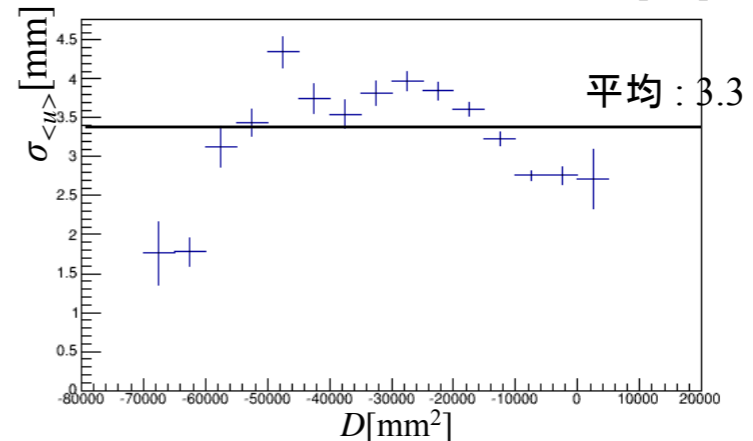
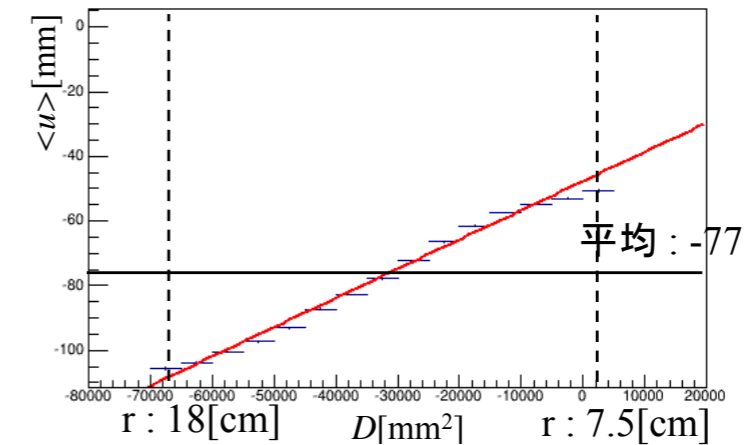
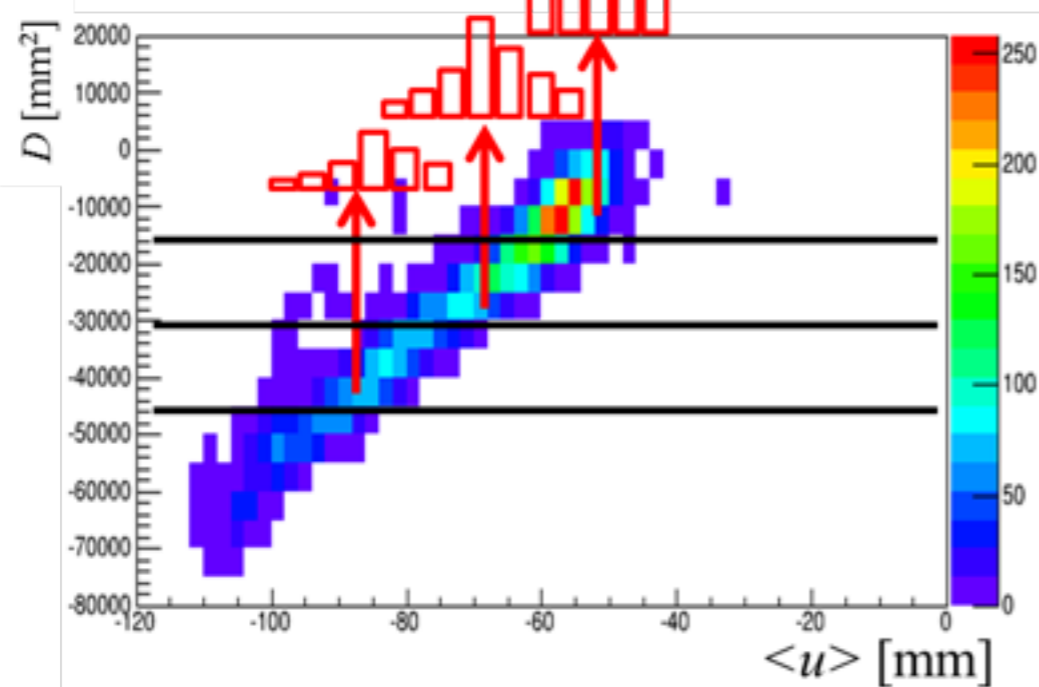
MEG Experiment

σ_u, σ_v as a function of D (~depth)

$\theta=60$

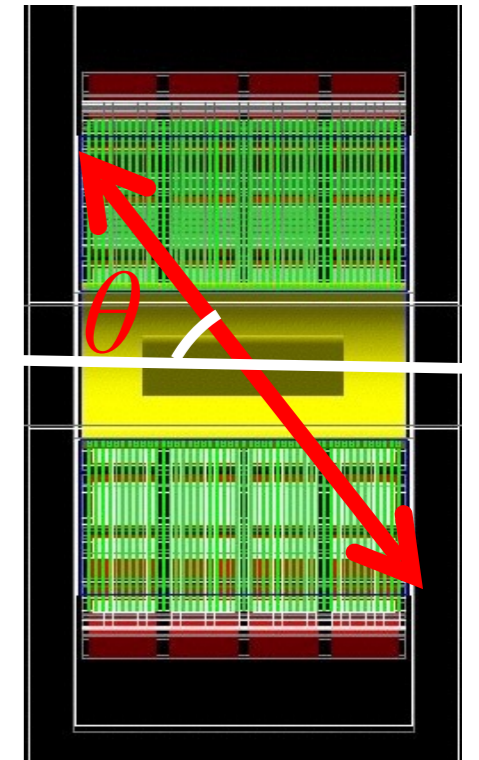
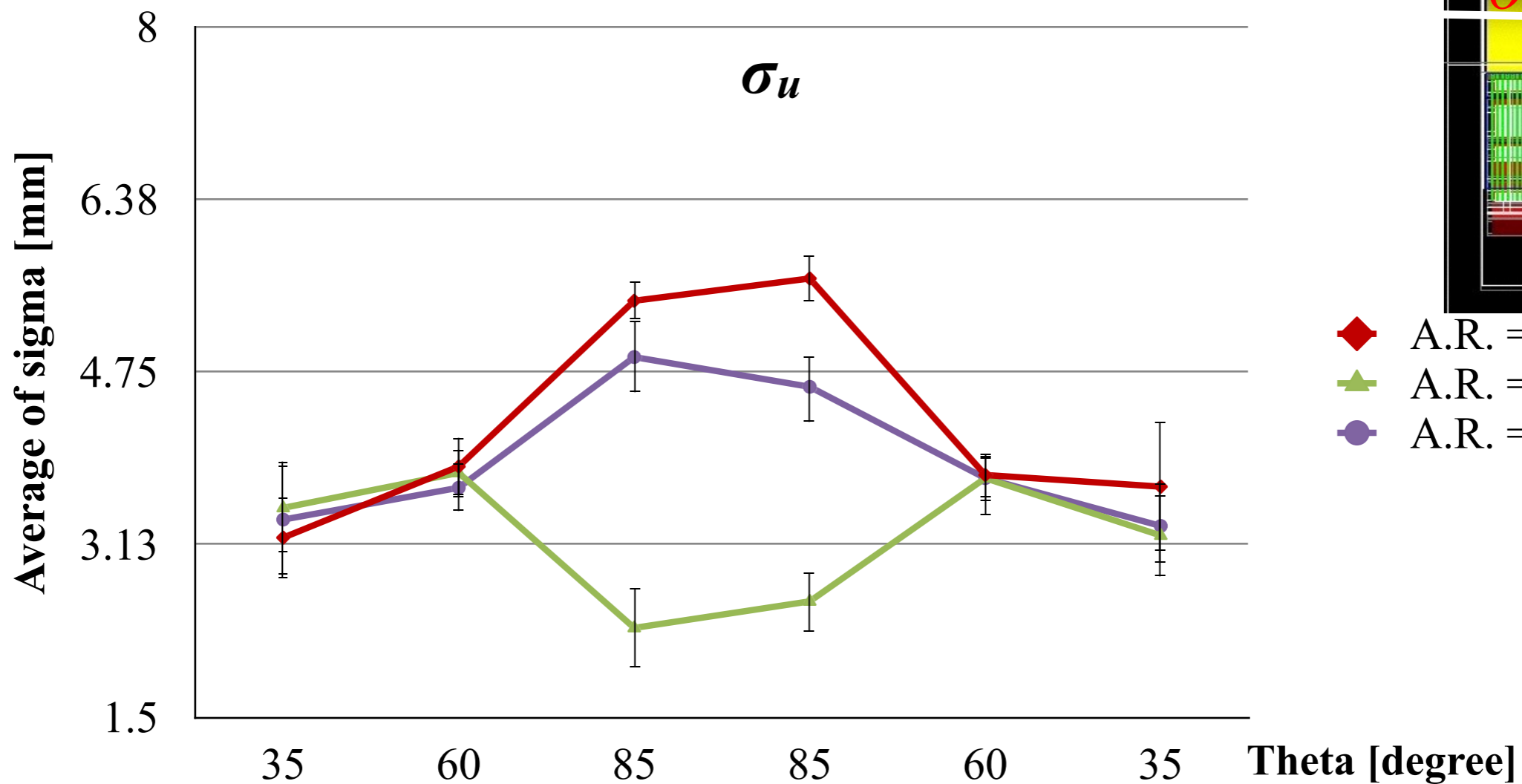


$\theta=60$



Simulation - mesh cathode as a function of Θ

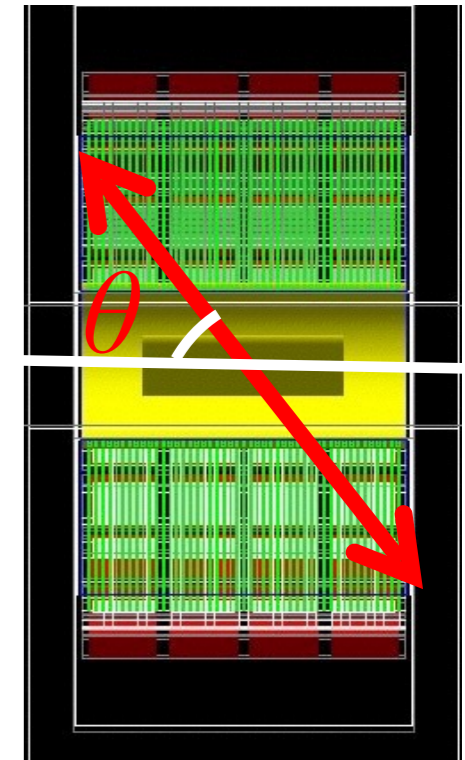
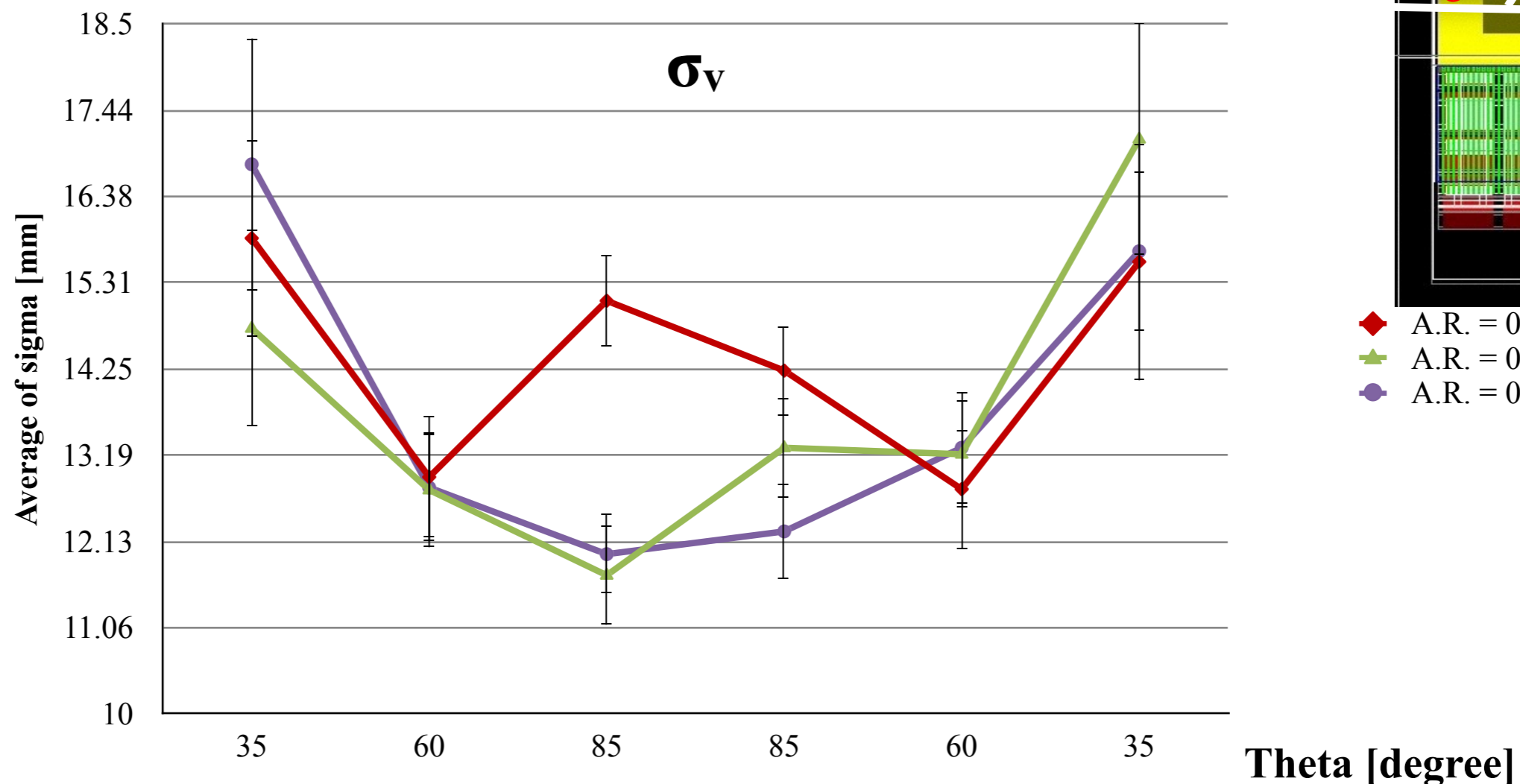
- Evaluate the resolution of reconstruction of the interaction point with scintillation signal
 - Evaluate the u resolution per angle of gamma



- ◆ A.R. = 0.0
- ▲ A.R. = 0.57
- A.R. = 0.19

Simulation - mesh cathode as a function of Θ

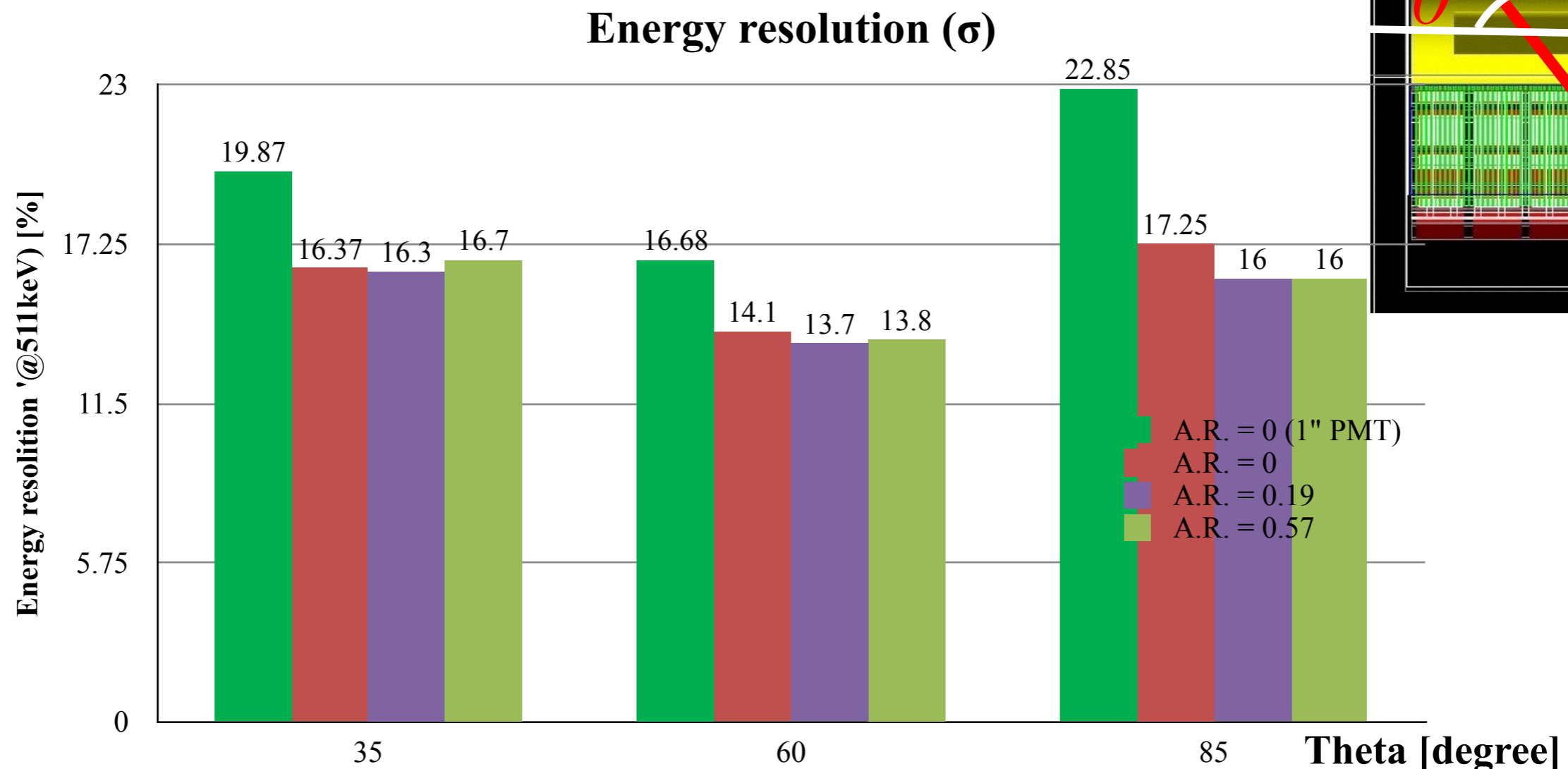
- Evaluate the resolution of reconstruction of the interaction point with scintillation signal
 - Evaluate the ν resolution per angle of gamma



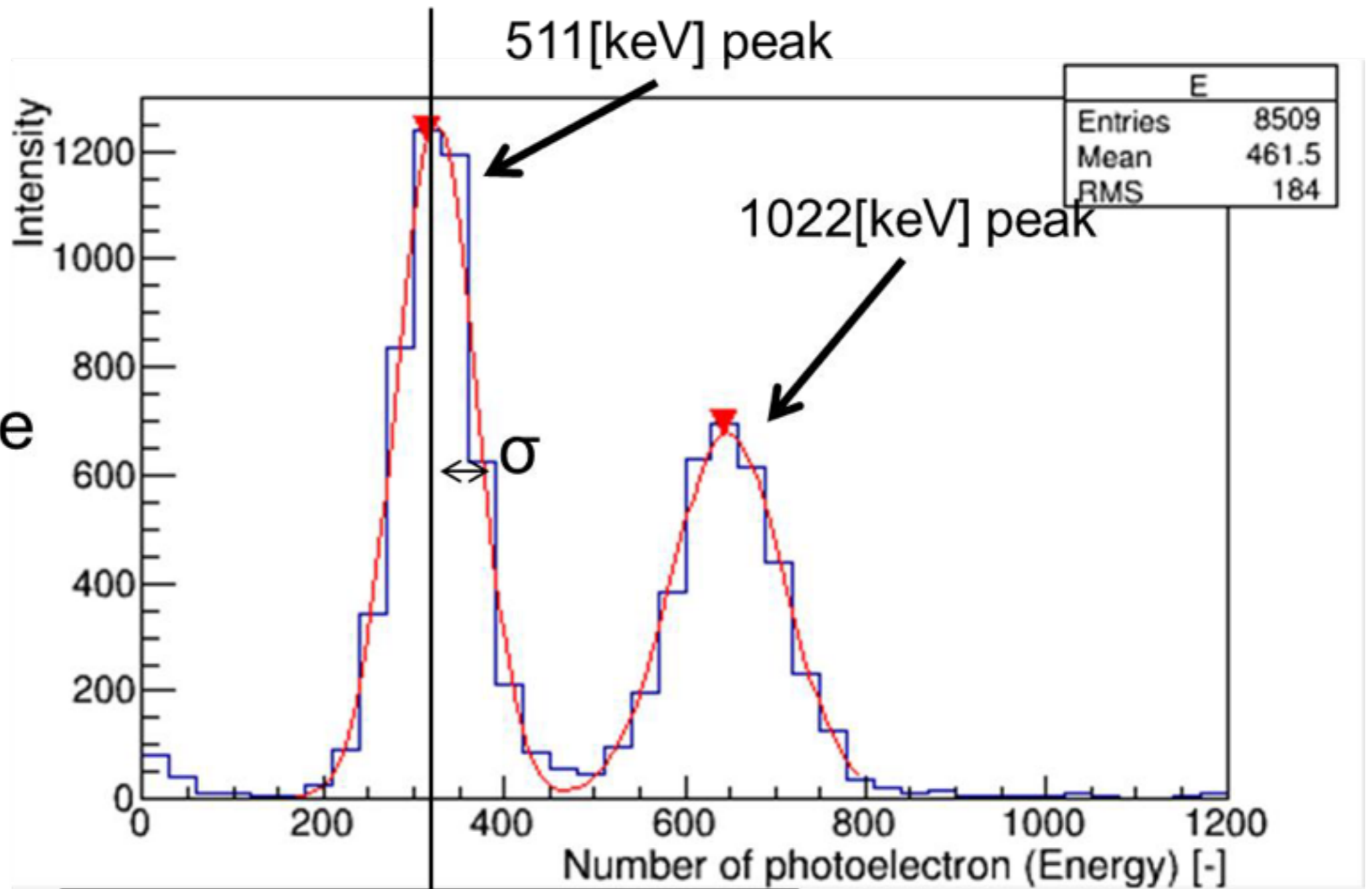
- ◆ A.R. = 0.0
- ▲ A.R. = 0.57
- A.R. = 0.19

Simulation - mesh cathode as a function of Θ

- Evaluate the resolution of reconstruction of the interaction point with scintillation signal
 - Evaluate the energy resolution per angle of gamma



Example



Number of photoelectron
detected by PMT in one event

Conclusion

- We have developed a small animal PET which has full cylindrical LXe-TPC.
- In order to operate the XEMIS2 at higher count rate, I studied the photon collection system.
 - Simulate the trigger
 - I could increase the number of photoelectron by using the 2'PMT system up to 1.92 fold.
 - Evaluation of position resolution for the interaction points by using scintillation signals
 - $\sigma_u=8.32\text{mm}$, $\sigma_v=14.24\text{mm}$ (2'PMT system)
 - the position shifts were observed in u-direction near the anode, which can be corrected
 - Better resolutions of the energy and the position with mesh cathode

1. Windowless APDによる液体キセノン中での γ 線スペクトラムの測定

比較のためにPMT(R8700)による測定; Charge amp readoutでdecay timeが設計値の約1/10となった。これをSPICE計算で再現した。

PMT用のドータカード(470pF,0.2M Ω)でスペクトラム測定による $\sigma=6.8\%$ (511keV) ただし、APDでは511keV光電ピークは見えなかった。

2. キセノン純化等の効率化のため予冷装置の試験; 成功

ガス循環速度の4.5リットル/分で安定運転可能となった。

これまでの3倍の純化速度が期待できる (ゲッターでの最大流量で制限)。

3. この予冷装置の運転で、新フロントエンドエレクトロニクスシステムの試験を予定。

4. GATE/GEANT4シミュレーションにより、日仏共同研究のXEMIS2 (小動物用PET) のPTMシステムの性能評価とUpgradeのための研究を行った。

2" PMT使用により測定される総光量が2倍となること、カソードをメッシュにすることにより一様な光測定ができることを示した。位置分解能は約1cm (σ)である。

横浜国大・濱西亮 氏の修士論文