

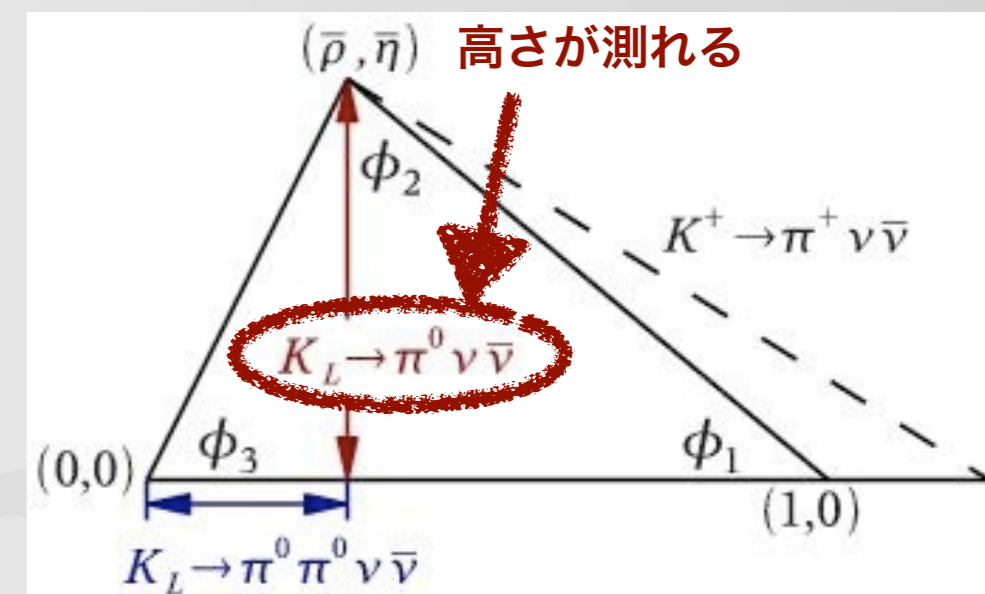
# J-PARC KOTO実験 荷電粒子検出器の建設

内藤 大地  
京都大学



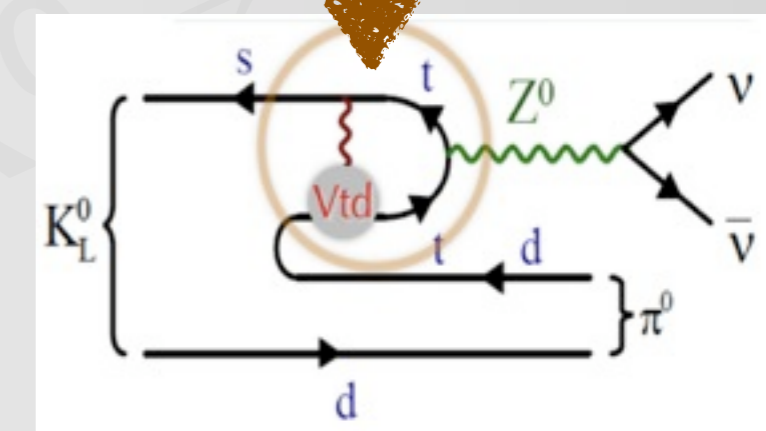
- KOTO実験について(概要と実験原理)
- KOTO実験 荷電粒子検出器(Charged Veto)の概要
- Charged Vetoの建設
- 性能評価の速報

- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  稀崩壊探索実験 (@J-PARC)
- 実験目的
  - 小林益川理論 (CKM) の精密検証  
 $\rightarrow \text{Br}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \propto \eta^2$  ( $\eta$  は CKM の複素位相)
  - 新物理の探索
- 理論的不定性が小さい ( $\sim 1, 2\%$ )
- $\text{Br} \doteq 2.4 \times 10^{-11}$ , 反応に関わる粒子が中性粒子  
 $\rightarrow$  実験的困難から未観測

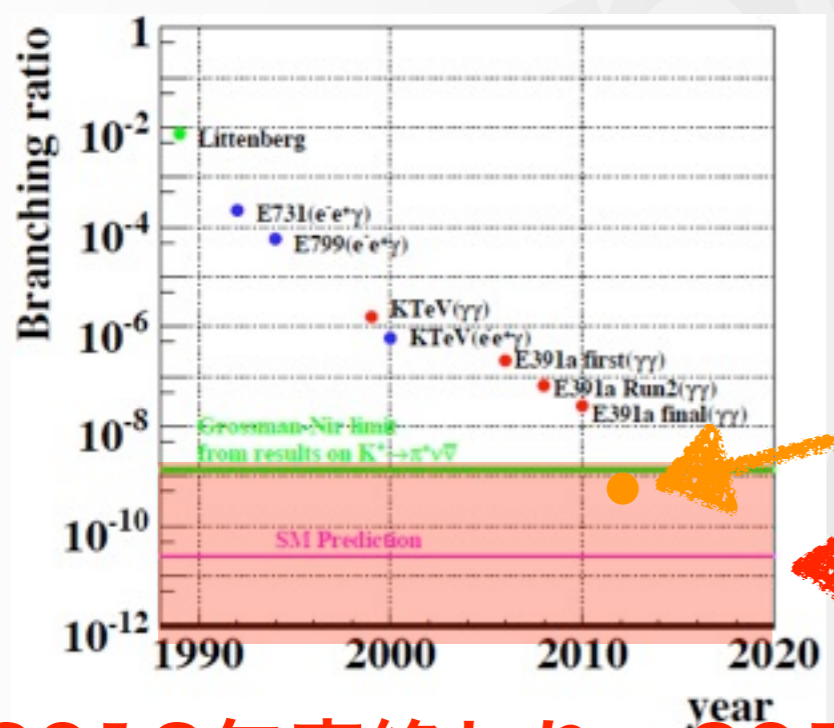


<CKMのユニタリー三角形>

未知の粒子 (ex. SUSY) の寄与により  
分岐比がズれる可能性



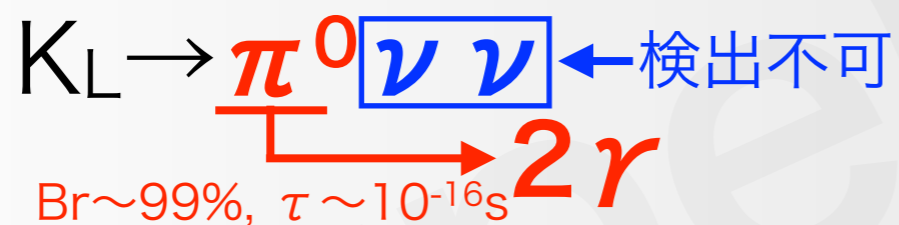
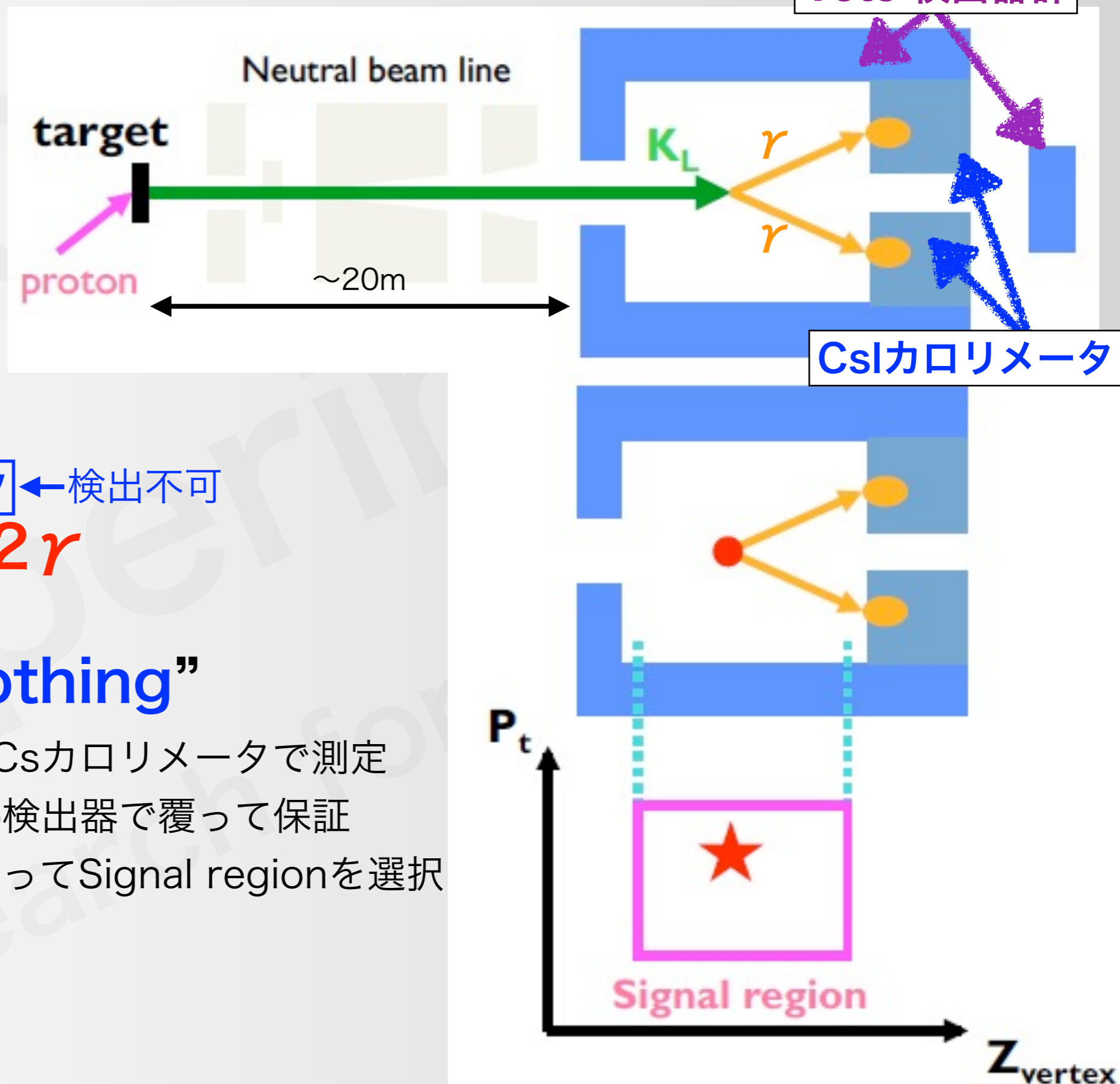
<崩壊のダイアグラム>



- KOTO実験初の物理ラン
- $\sim 10^{-9}$  の感度

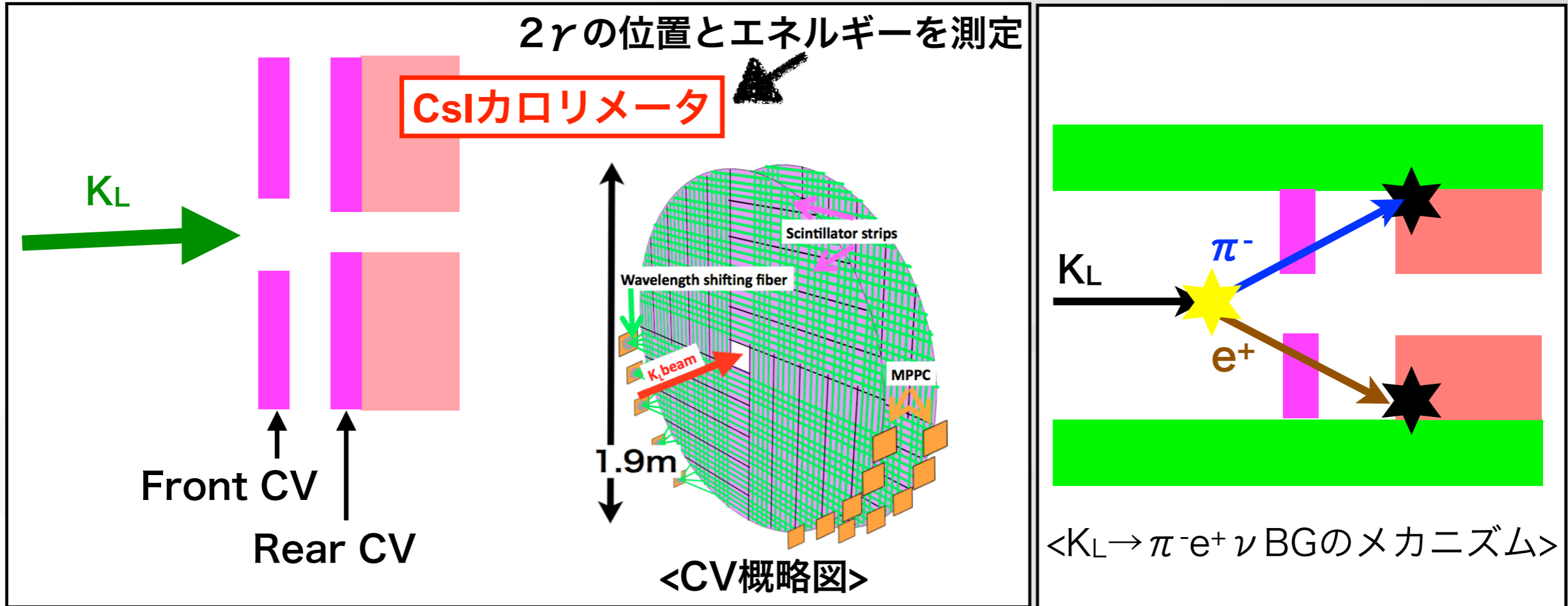
新物理領域

• 2012年度終わり～2013年度初めにかけて初の物理ランを開始！！  
 $\rightarrow$  世界で初めて新物理に感度のある領域へ到達！！



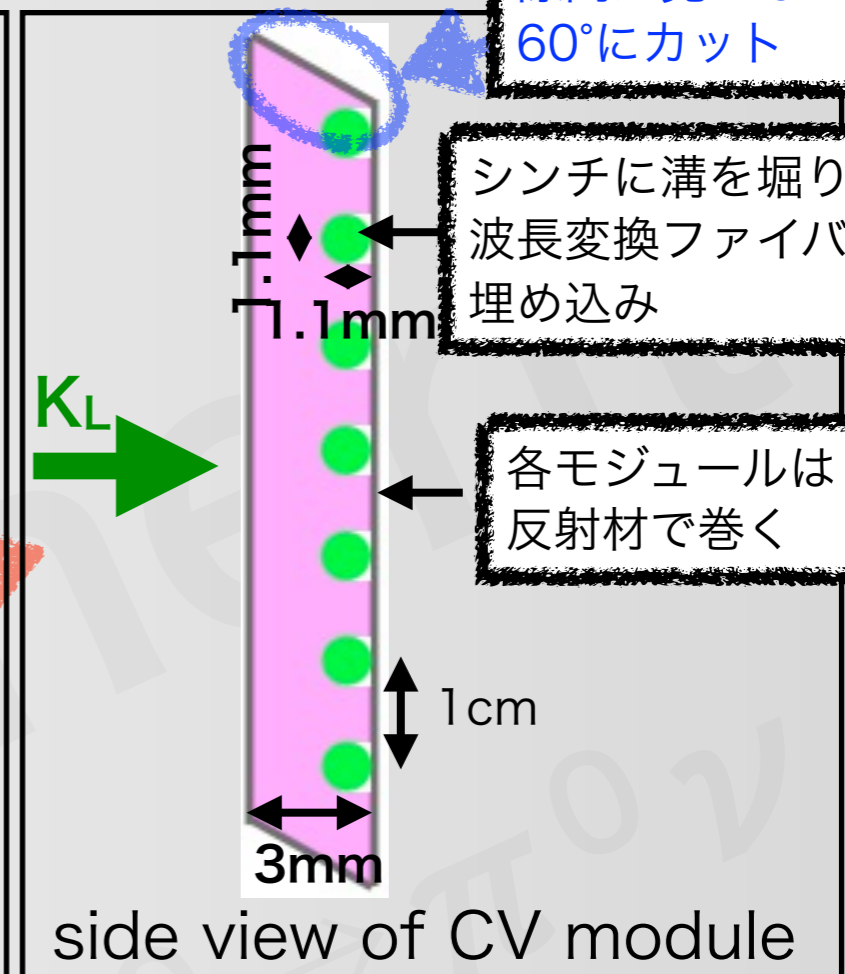
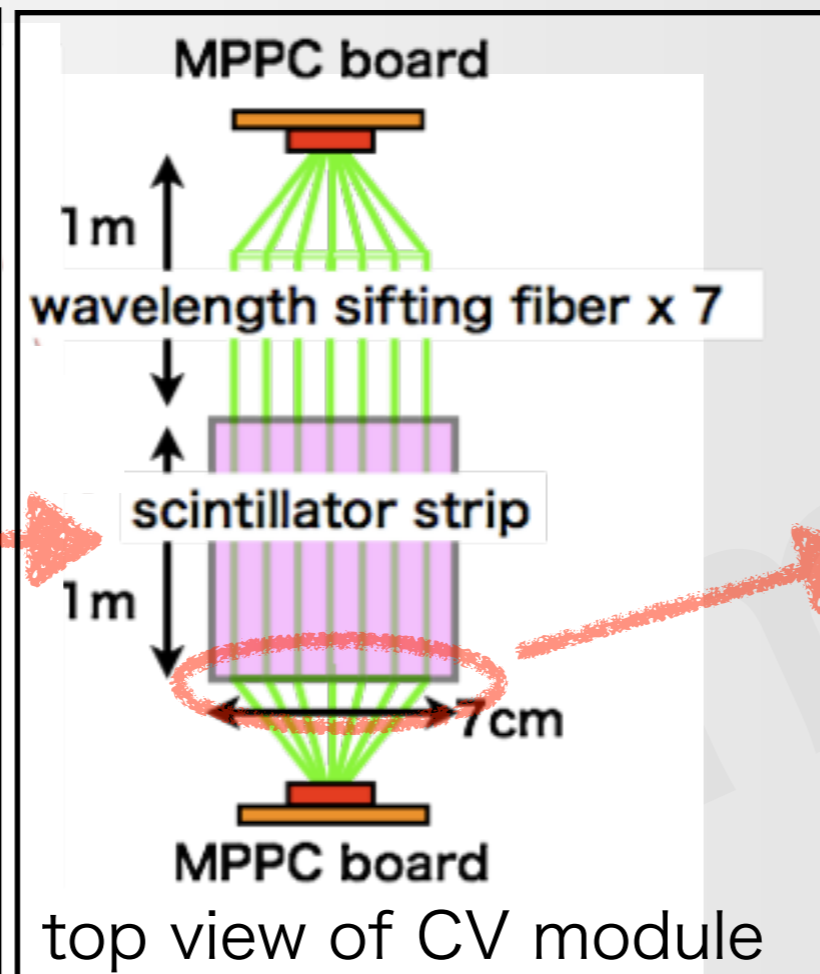
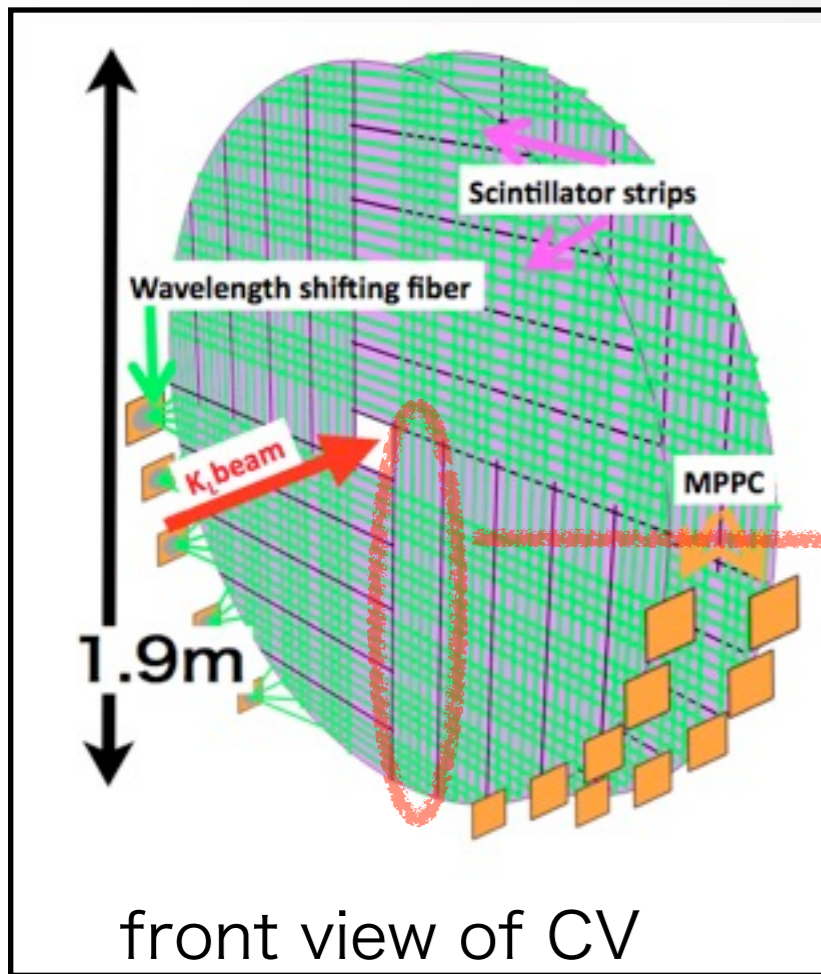
- 終状態は” $2\gamma + \text{nothing}$ ”
- $2\gamma$  → 位置とエネルギーをCsカロリメータで測定
- nothing → 全立体角をVeto検出器で覆って保証
- 崩壊点と横方向運動量によってSignal regionを選択





- 荷電粒子の検出により荷電粒子を含むK<sub>L</sub>崩壊BGを排除  
ex,  $K_L \rightarrow \pi^{+/-} e^{-/+} \nu$ ,  $K_L \rightarrow \pi^{+/-} \mu^{-/+} \nu$ ,  $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  (全崩壊分岐比の約7割!!)
- CsIを覆う唯一の荷電粒子検出器、単独での荷電BG10桁排除が必須**
  - CsIカロリメータの直近と25cm上流の2層置く (真空中~0.1Pa)
  - 1層のみでは $K_L \rightarrow \pi^{+/-} e^{-/+} \nu$  BGを排除できないため
  - **突き抜け荷電粒子に対して一層当たり $10^{-3}$ 以下の不感率が必要**

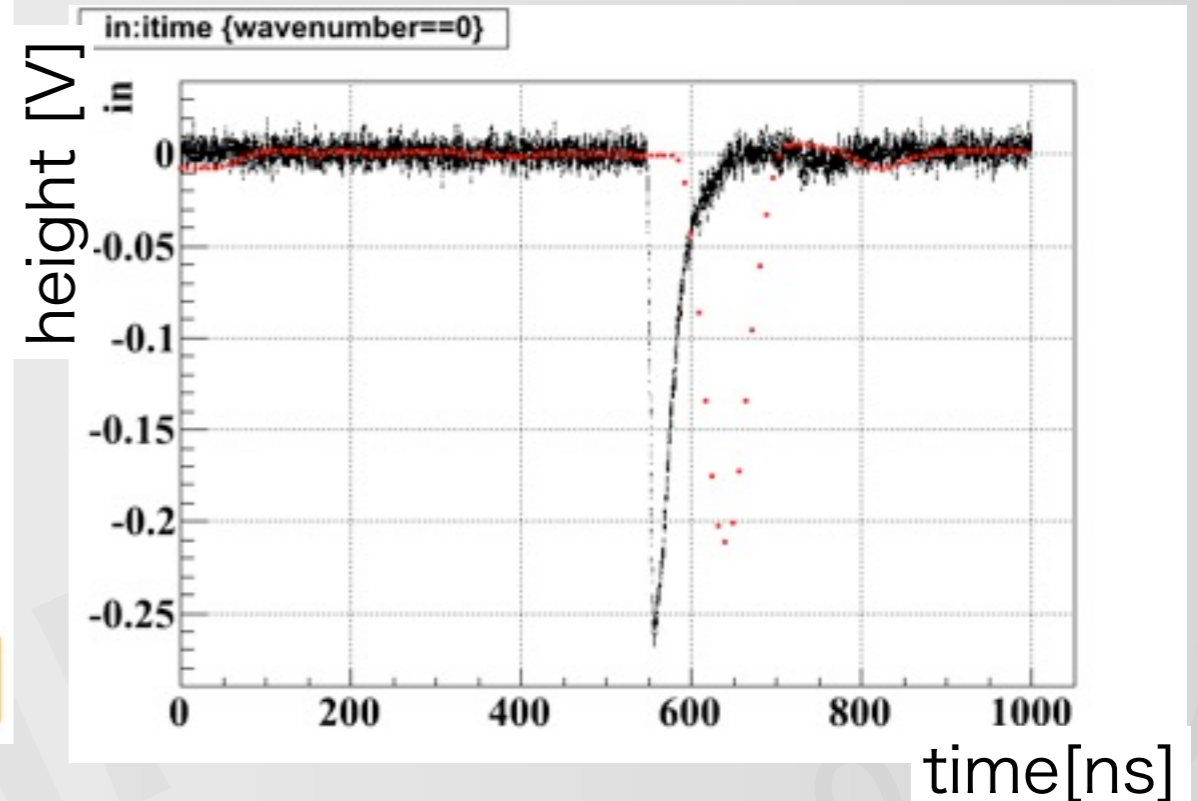
**不感率の達成には高い光量が必須！！**



- ビーム周辺の残存中性子との相互作用で生じる  $\pi^0$  の数を低く抑える (先行実験の mainBG)
  - 厚さ 3mm のプラスチックシンチレータ (幅 7cm, 92枚で構成)
- 全域で高い光量確保
  - **波長変換ファイバー (光量の一様性確保) + MPPC (省スペース, 高い量子効率)**



## KOTO ver. MPPC scheme



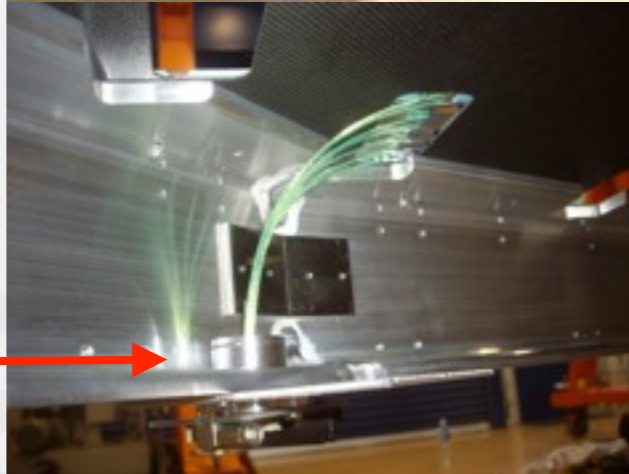
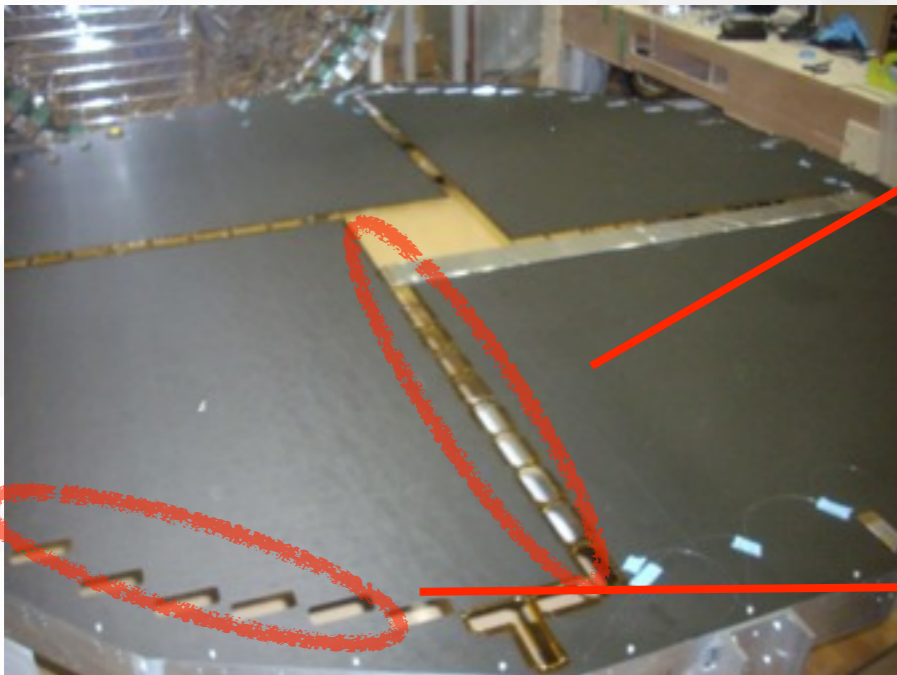
- MPPCはPMTに比べゲインが低い( $\sim 10^5$ )  
→倍率50倍, BW200MHz, dynamic range 2.5Vの  
プリアンプを開発
- MPPCのゲインとQEは温度に対して敏感  
(温度が $1^\circ\text{C}$ 変化すると5%変化する)
- 真空中で使用するので周りからの熱流入が  
問題となる(ダークノイズの増加)
- **MPPC温度のコントロールが必要)**  
→**浜ホトと冷却素子付きMPPCを共同開発**
- 波形整形したのち125MHzFADCで読み出す

MPPC

サーミスタ

※MPPCはピクセルサイズ $50\mu\text{m}^2$ 、受光面 $3\text{mm}^2$

正16角形のアルミフレームに  
厚さ0.8mmのCFRPをネジ止め  
(カーボンファイバーの板)



ファイバーを裏へ逃がすための穴

テグス

600 $\mu$ mの切りかき

CFRP

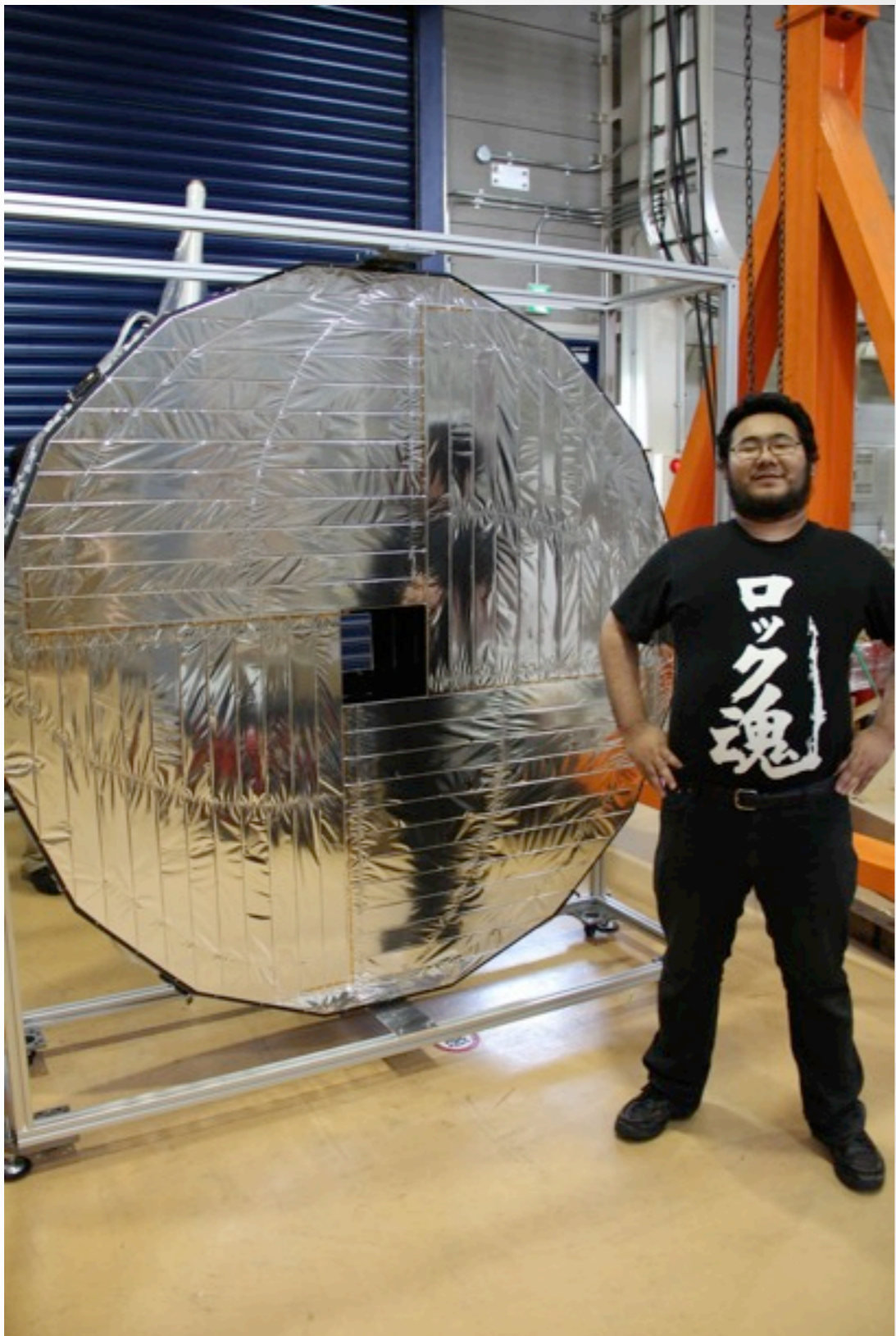
ケーブルタイ



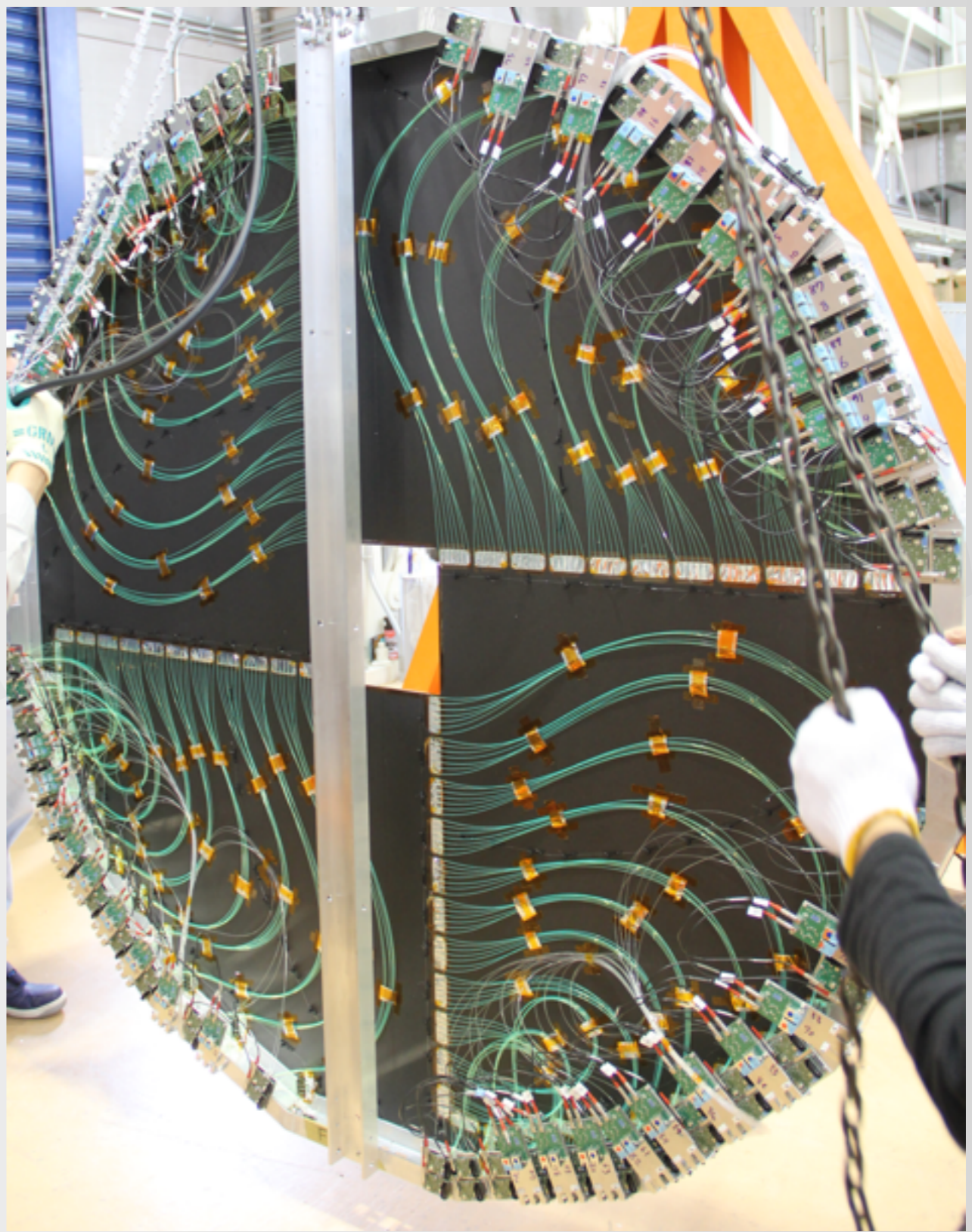
1モジュール当たり3カ所固定

シンチレータはテグスとケーブルタイでCFRPに固定





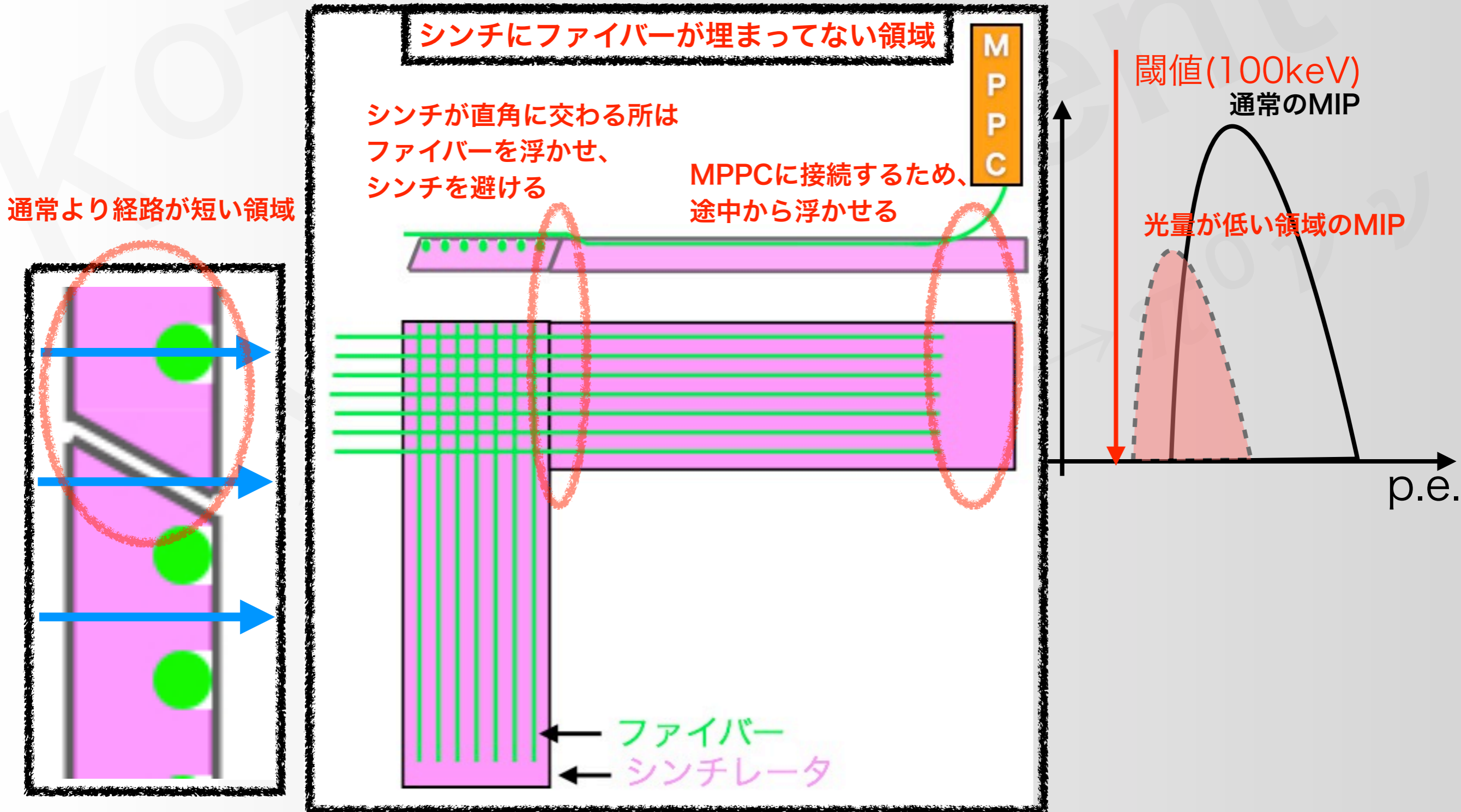
ビーム上流



ビーム下流



- CVで光量が低くなる領域
  1. 荷電粒子の進む距離が短い (energy deposit が小さい) 領域
  2. ファイバーが埋まっていない領域

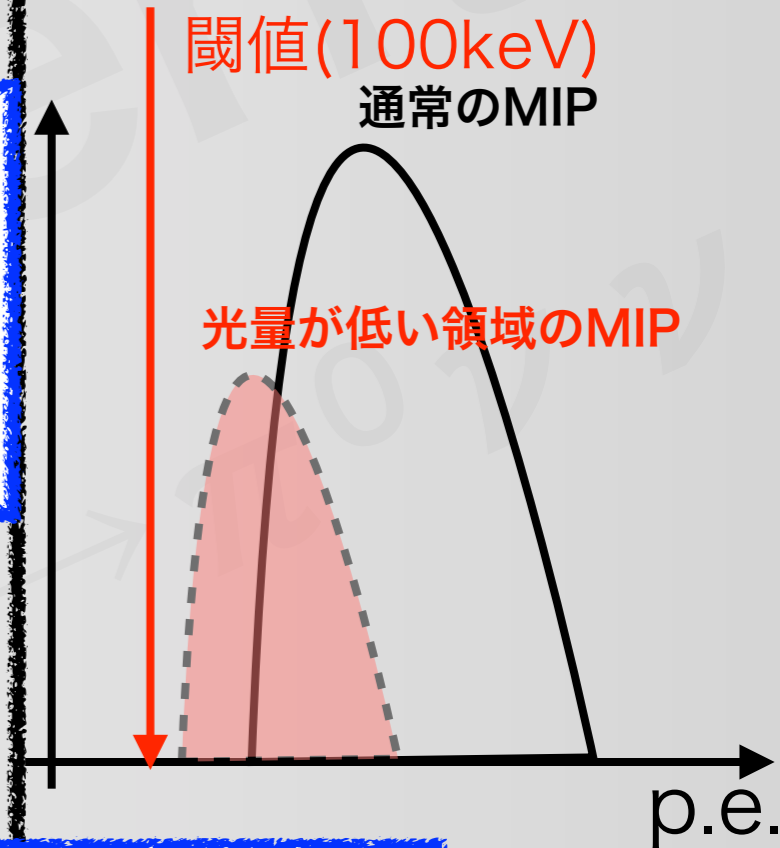


- CVで光量が低くなる領域
  1. 荷電粒子の進む距離が短い領域
  2. ファイバーが埋まっていない領域

シンチにファイバーが埋まってない領域

MIP

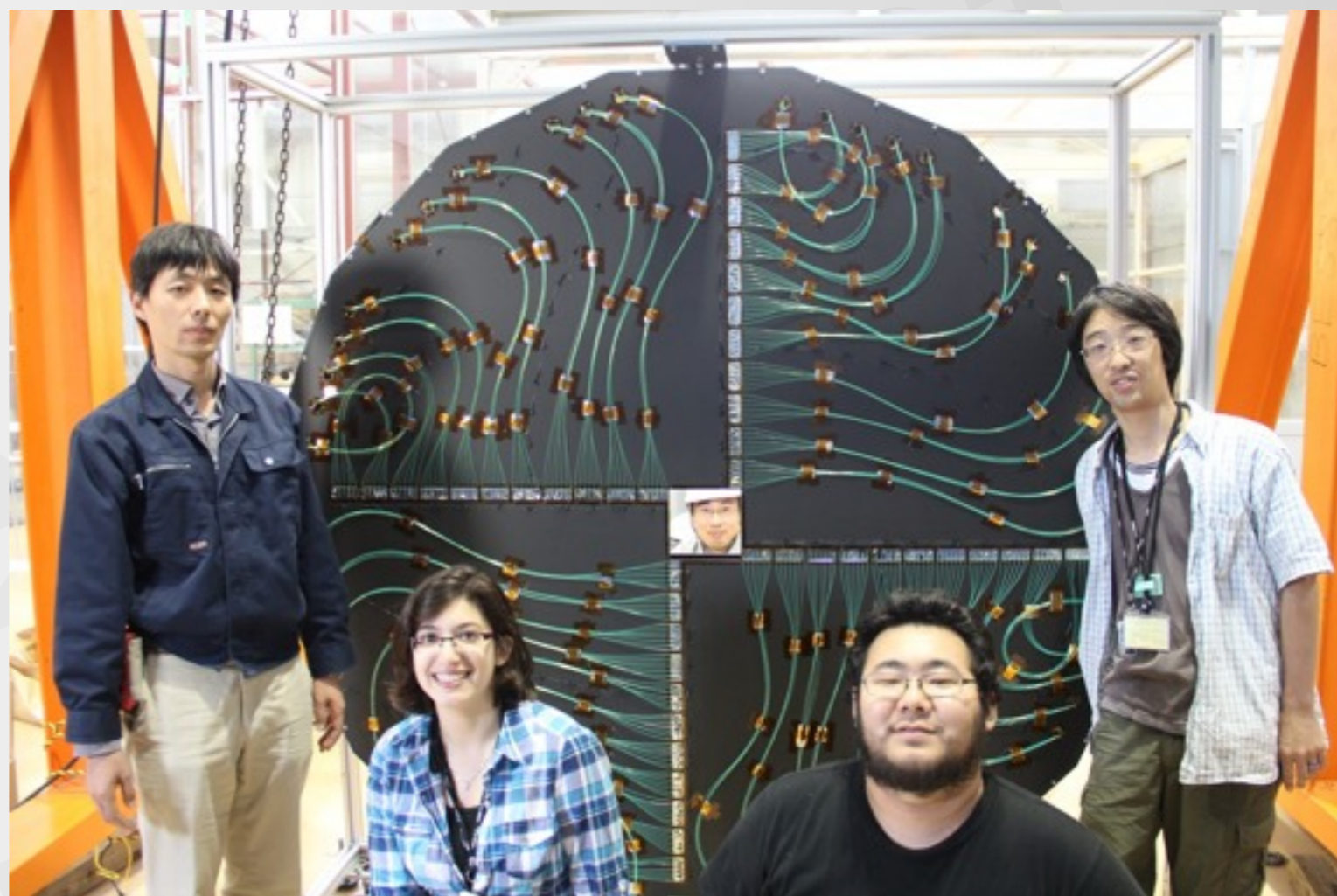
- 光量が低い領域ではポアソン統計により  
閾値を下回る可能性  
→ 10p.e./100keVが必要



- CVの全領域で10p.e./100keVを満たすか
- 全域で $10^{-3}$ の不感率を達成できるか







主に学生二人、スタッフ1人、アメリカの学部生3人で建設。





アルミフレームにCFRPを張りつけ



アルミフレームに”足”を取り付け

Search for





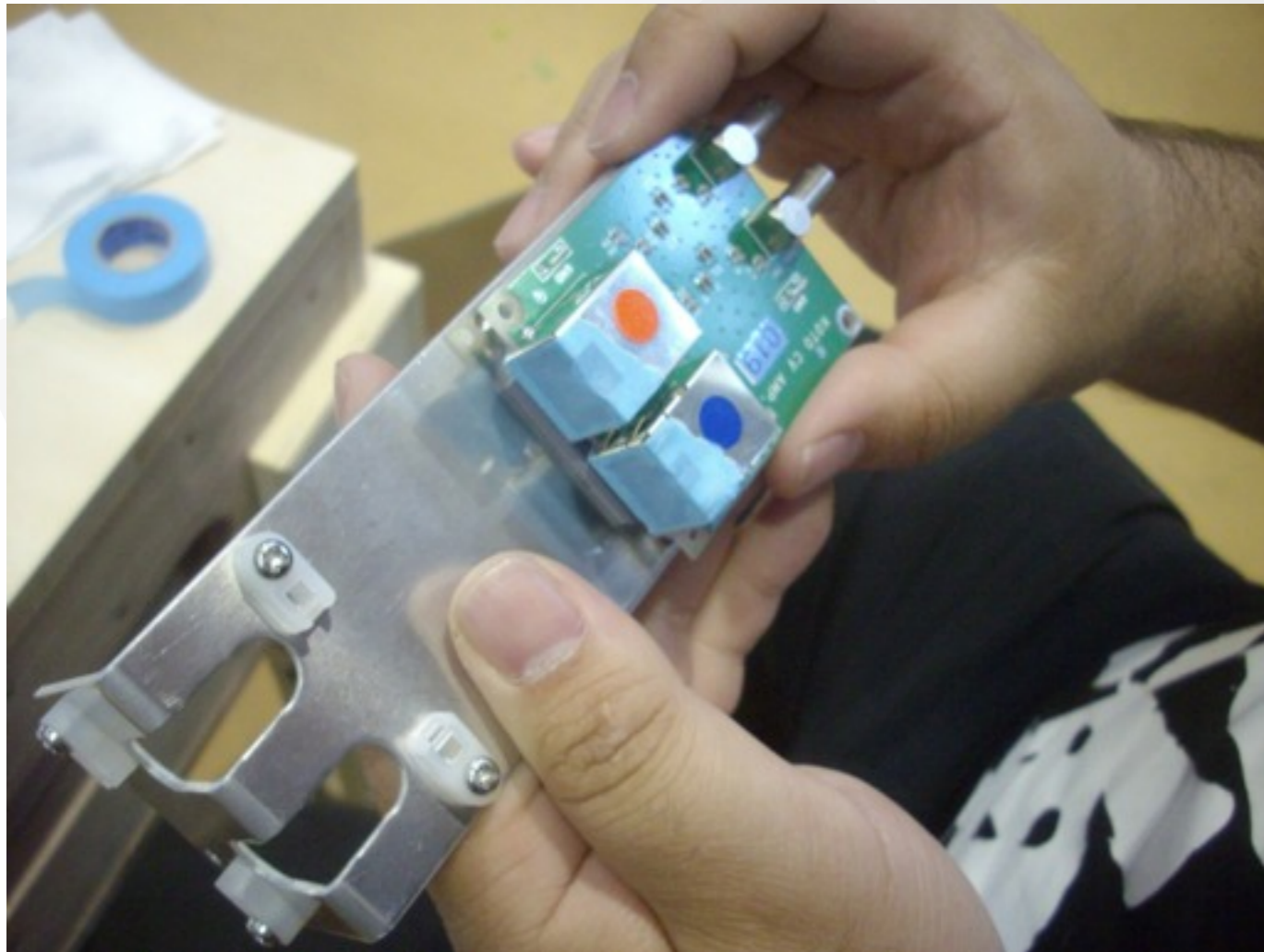
シンチレータをCFRPの上に置く



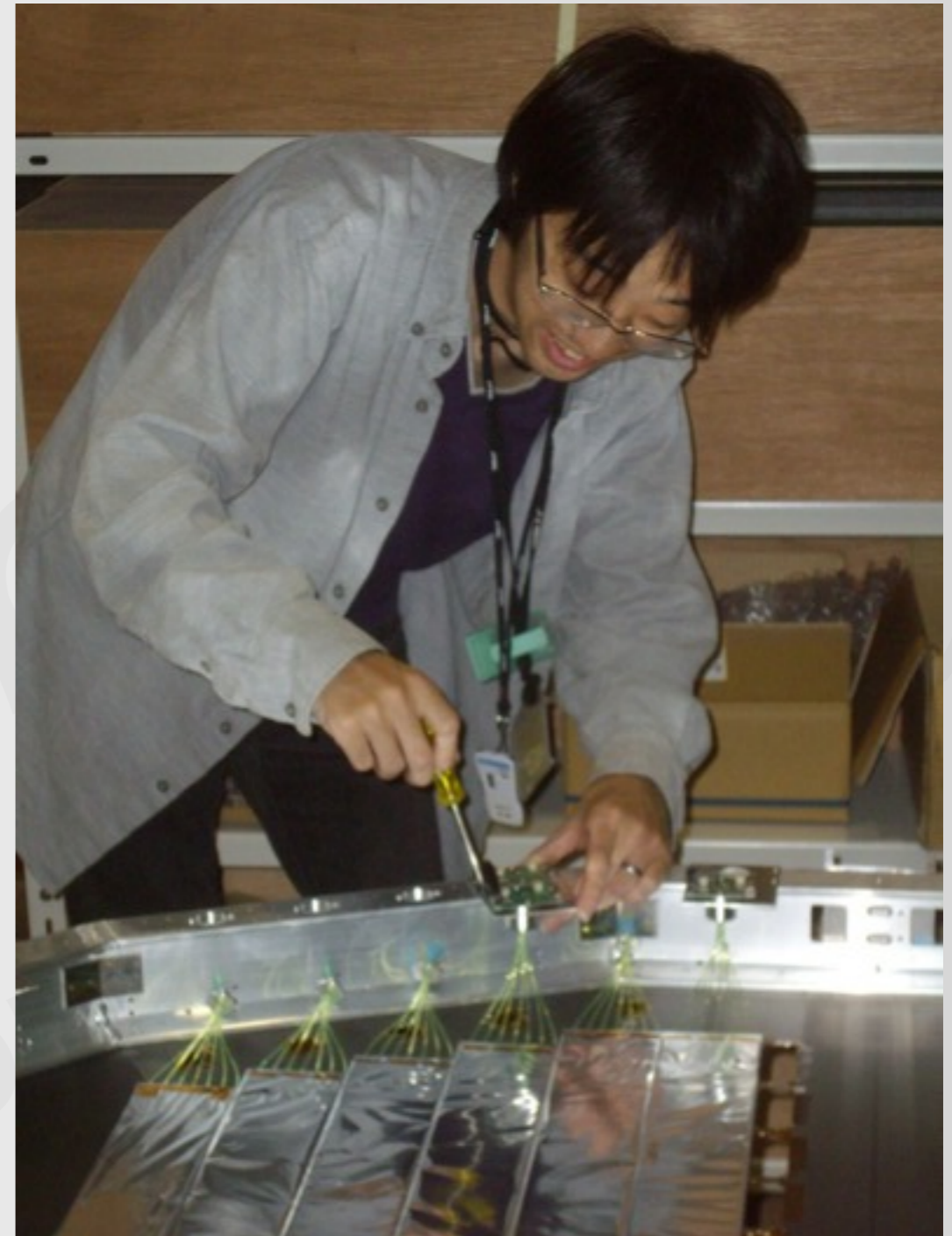
シンチレータを裏から固定

Search for



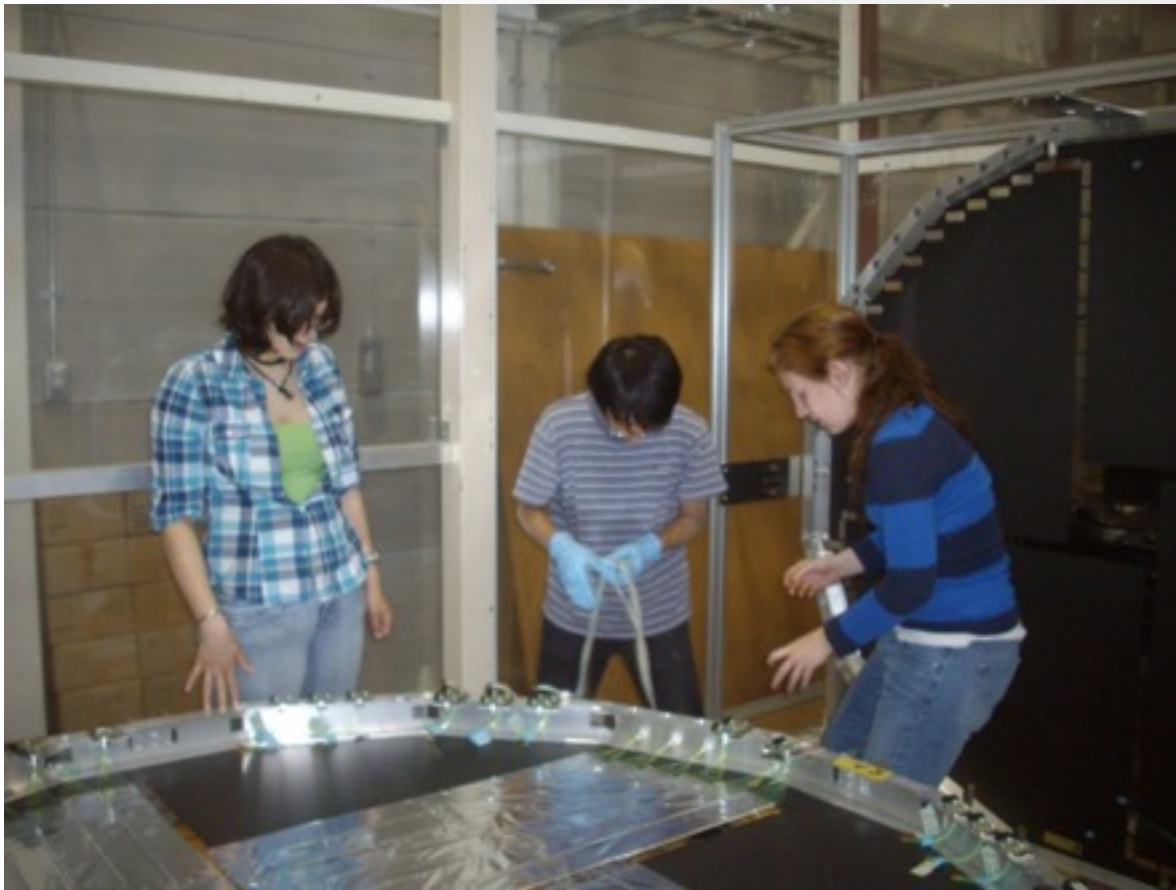


読み出し回路の組み立て



読み出し回路の取り付け

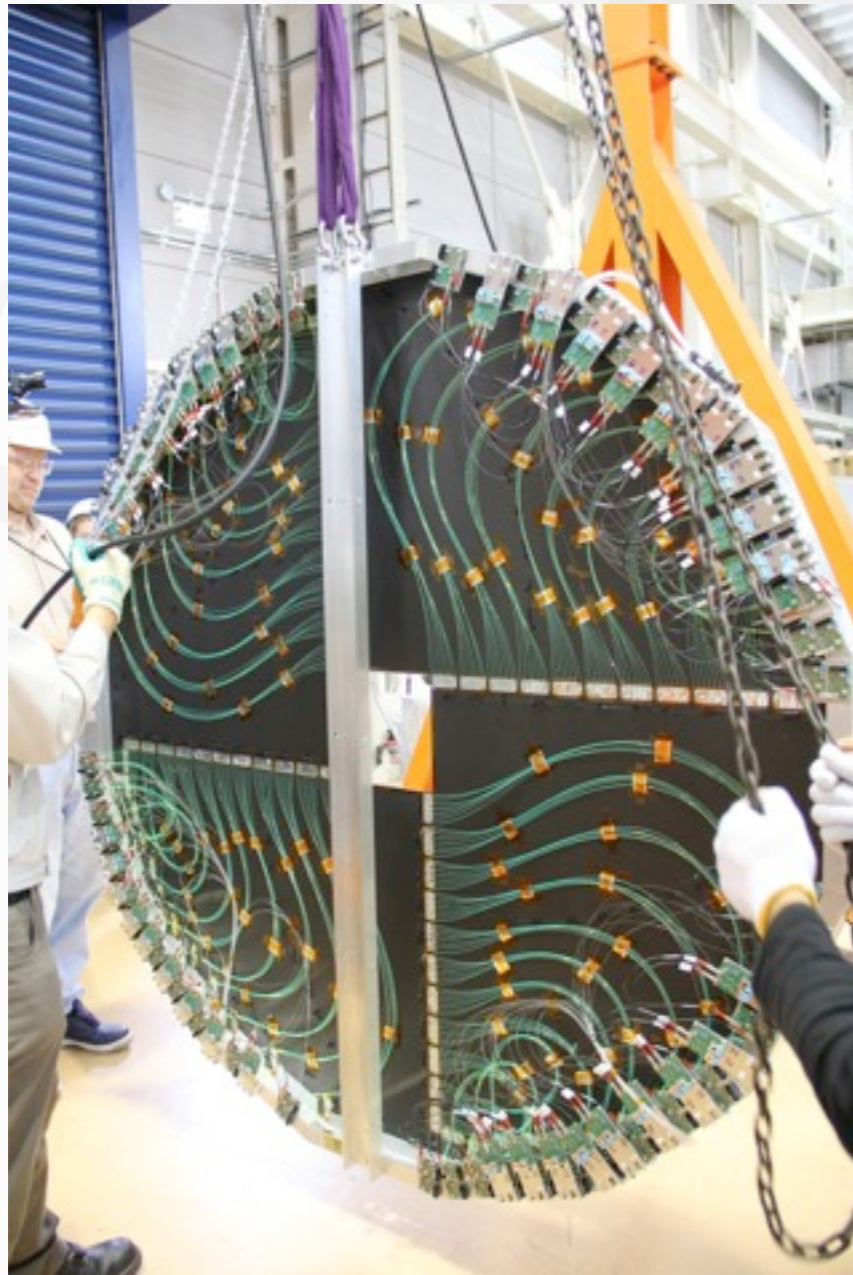




配線・遮光してシグナルチェック

EXR Search for KU





つり上げてマウントに固定





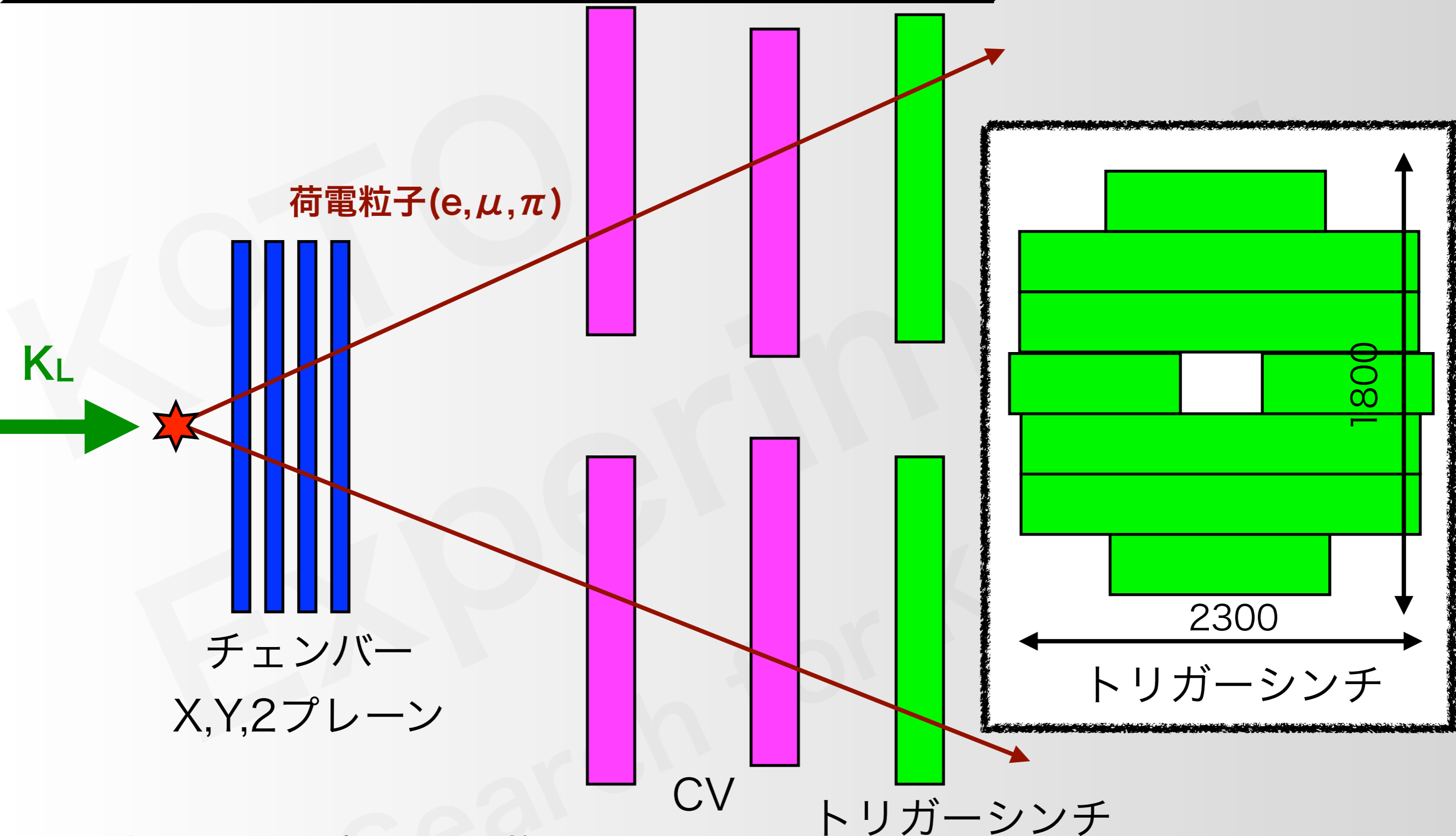
フォークで移動



エリアヘインストール

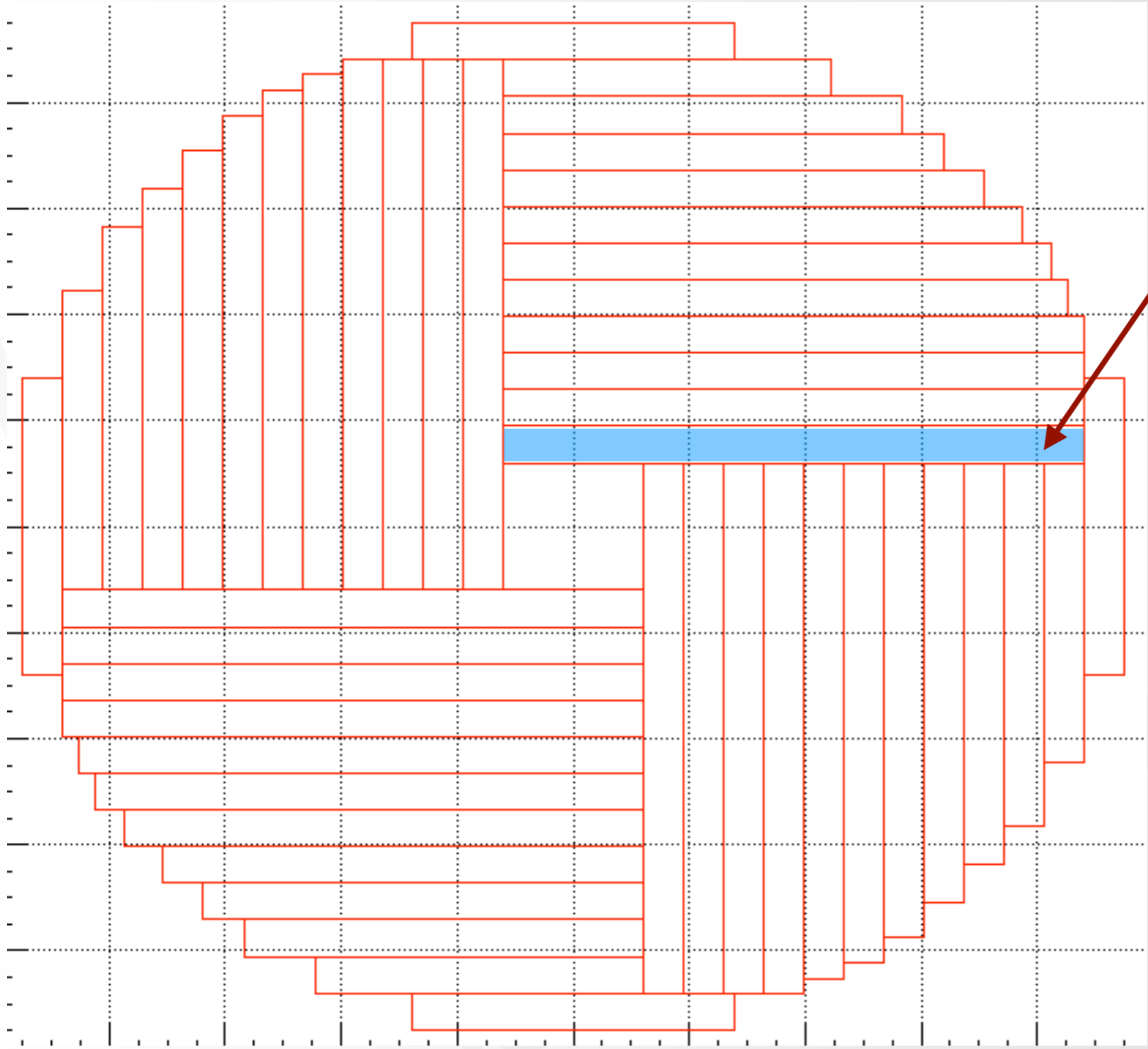


←配線して完成！！



- 上流で $K_L$ から崩壊した荷電粒子をチェンバーでトラック
- チェンバーとCV後方のトリガーシンチでトリガー
- 6/17~7/2までデータ取得

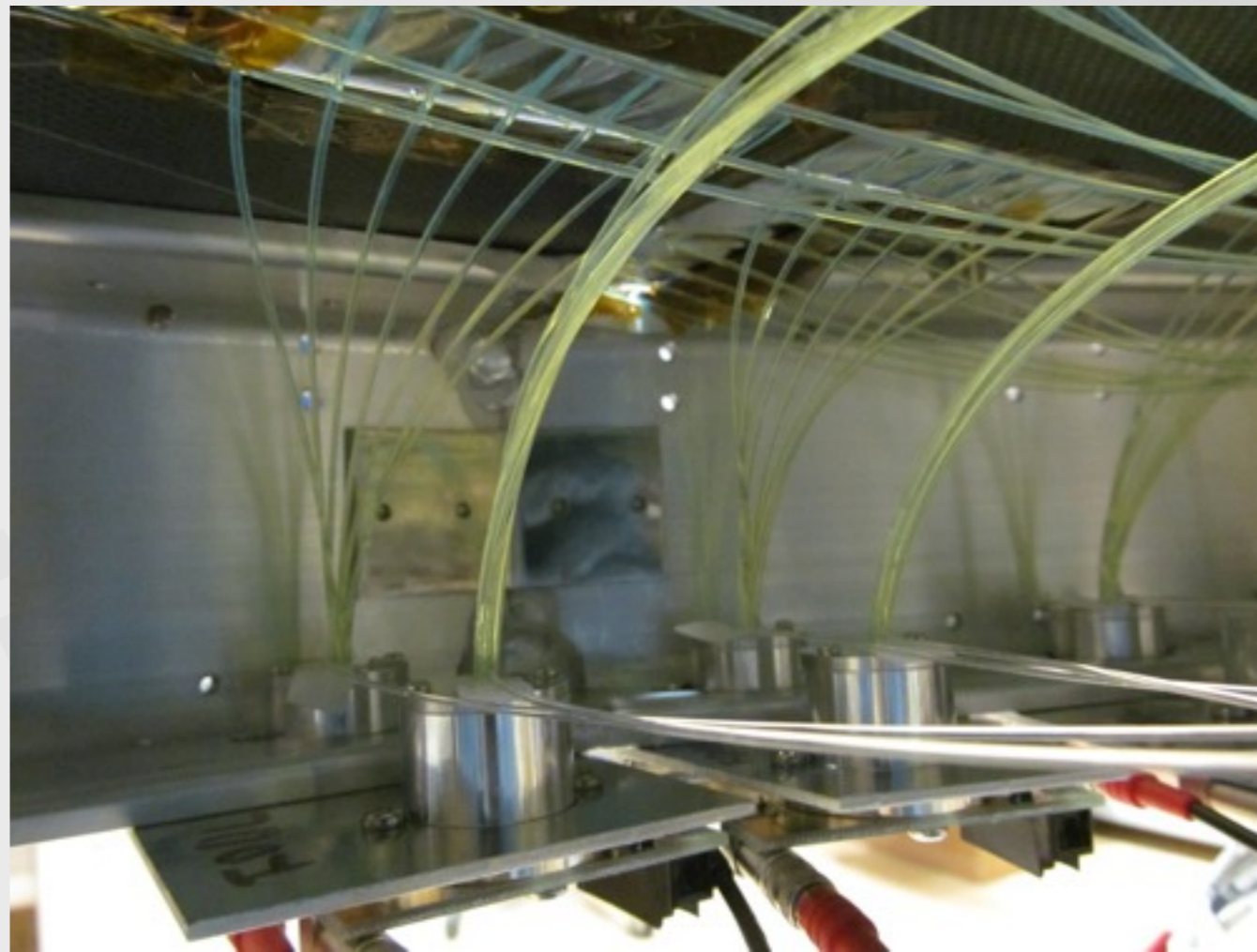




今回はFront CV再内層の  
シンチの結果を発表

- ゲイン
- 光量
- 時間分解能

# ゲイン1

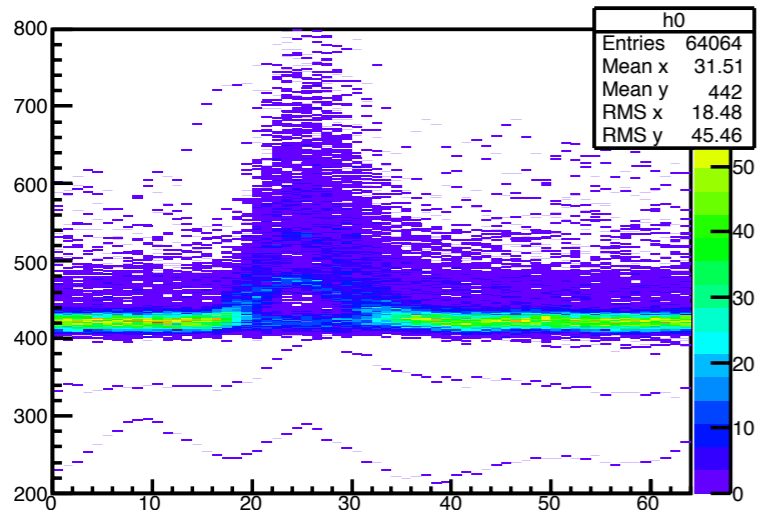


29本束ねたファイバーをLEDで照らす

一本一本のファイバーが  
MPPC直近の波長変換ファイバーを照らす

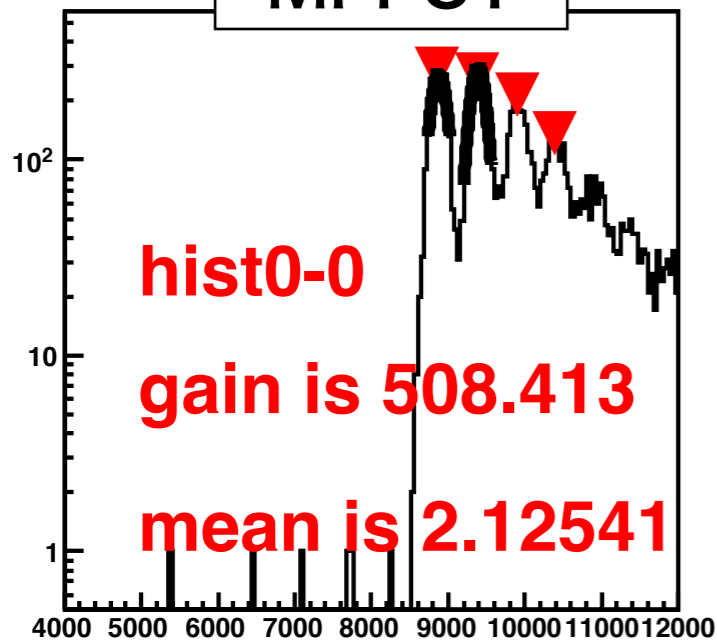
LEDを用いてMPPCの1p.e.ゲインをモニター

- ・ 4時間置きにゲイン測定ラン
- ・ 実験中は10Hzでモニター

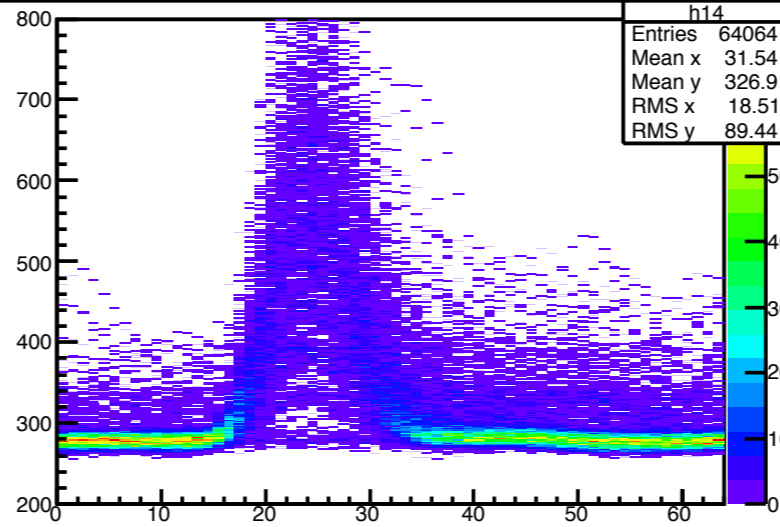


生波形(1カウント=8ns)

MPPC1

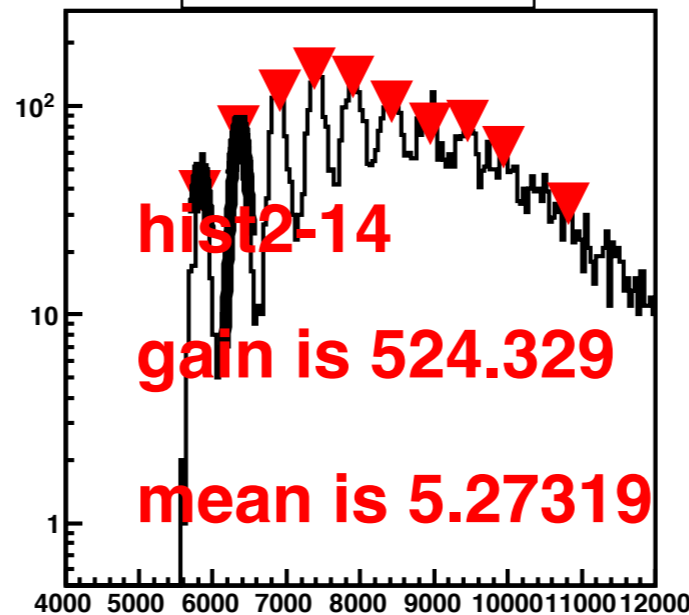


上図を一定区間積分



生波形(1カウント=8ns)

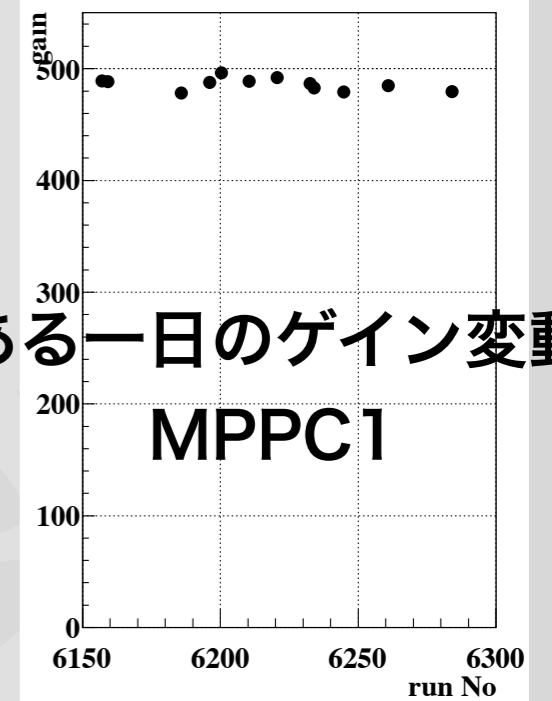
MPPC2



上図を一定区間積分

ある一日のゲイン変動

MPPC1



ある一日のゲイン変動

MPPC2



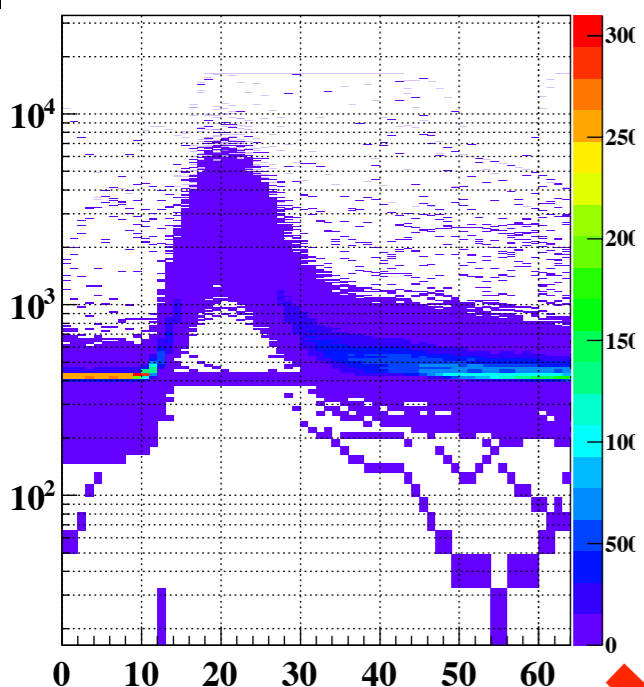
MPPC1

MPPC2

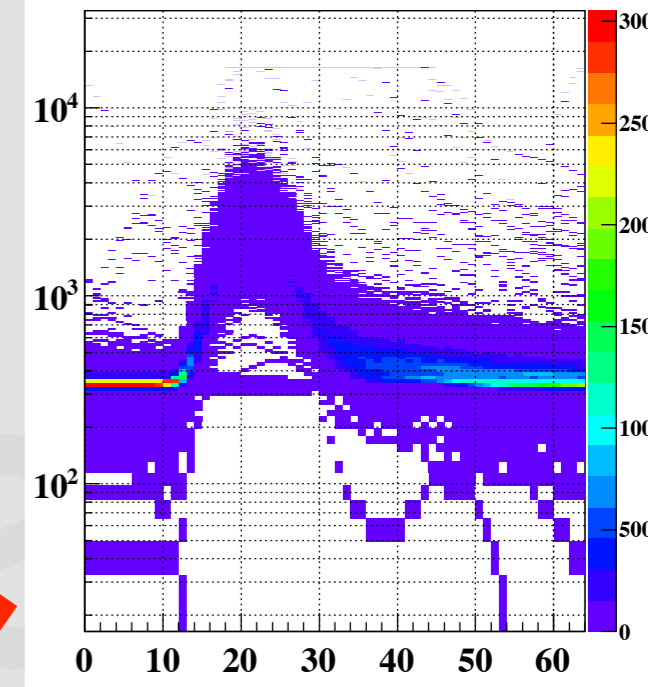
ちゃんとゲインがモニター出来ており、変動は±2%程度。

# 光量(全体)

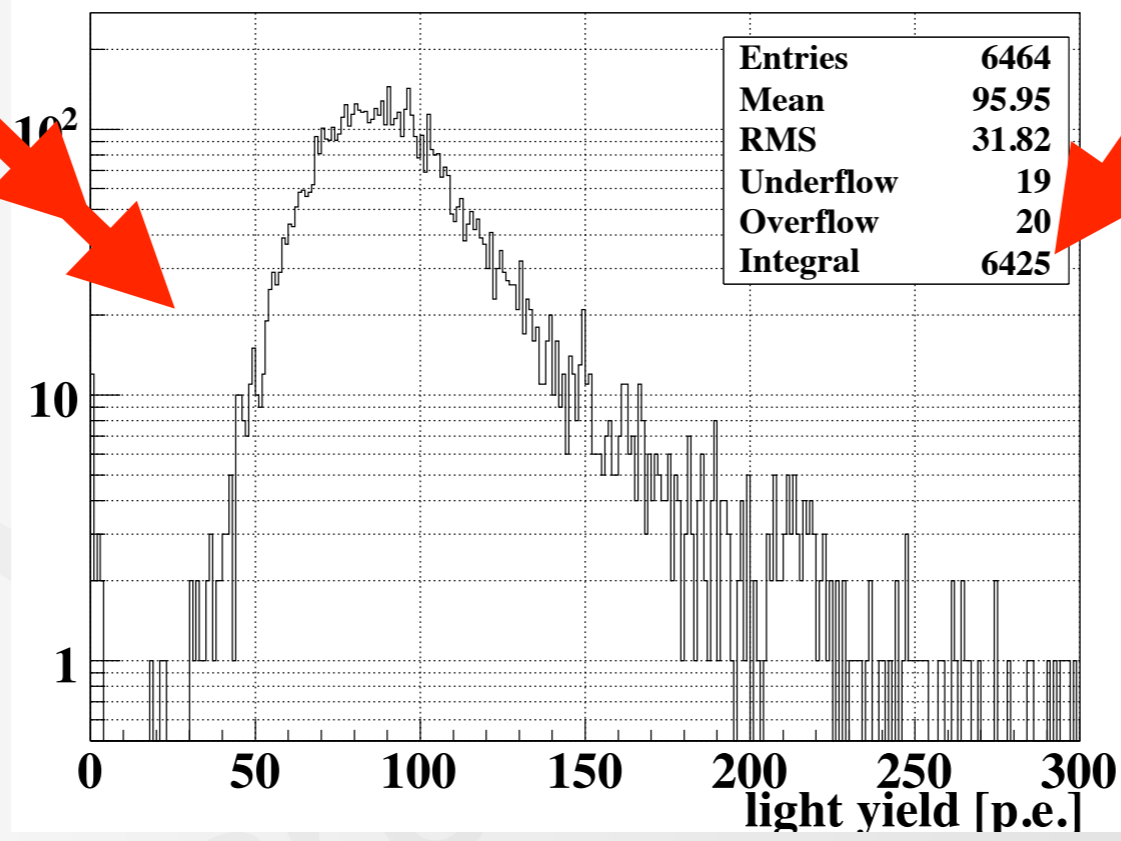
- ペDESTALを引き、積分
- 前ページのゲインを使って光量に変換
- 貫通するとpeakで600keV落とすと仮定  
→ ~15p.e./100keV、**十分な光量。**  
(Cf 垂直入射だと470keV)



生波形(MPPC1)  
(1カウント=8ns)



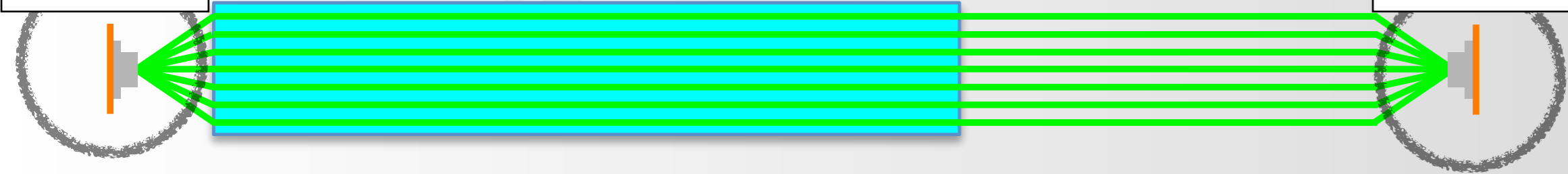
生波形(MPPC2)  
(1カウント=8ns)



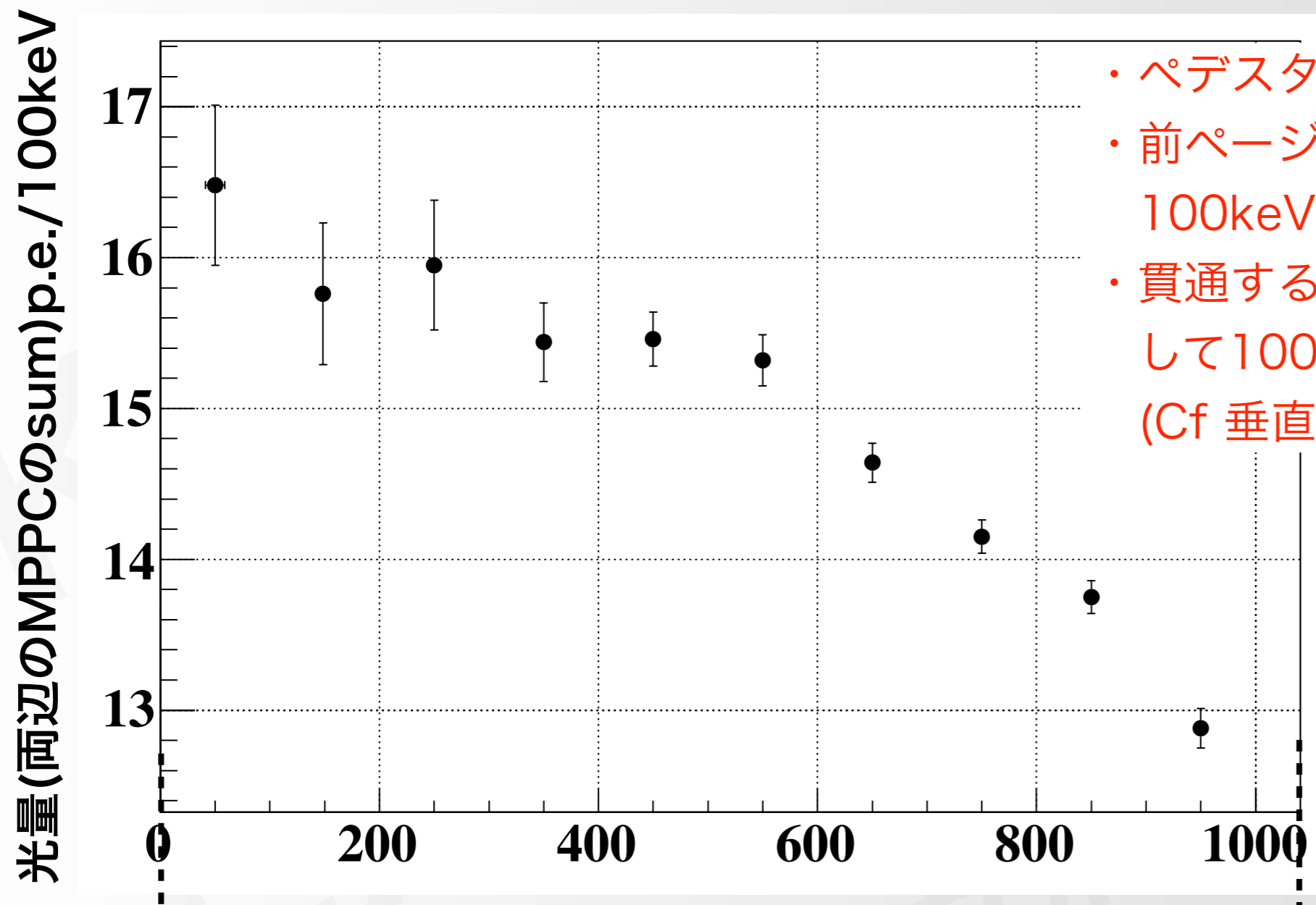
平均光量分布(SUM)

MPPC1

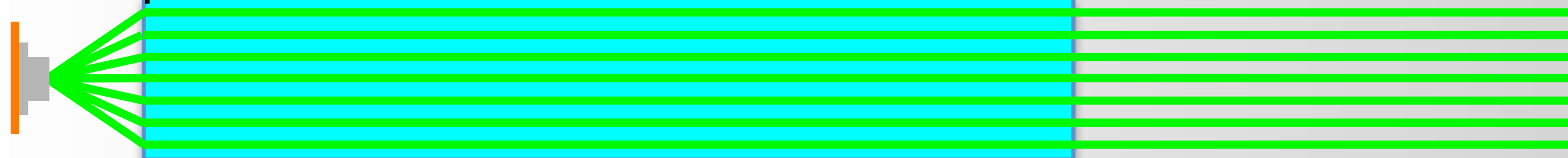
MPPC2



# 光量の位置依存性



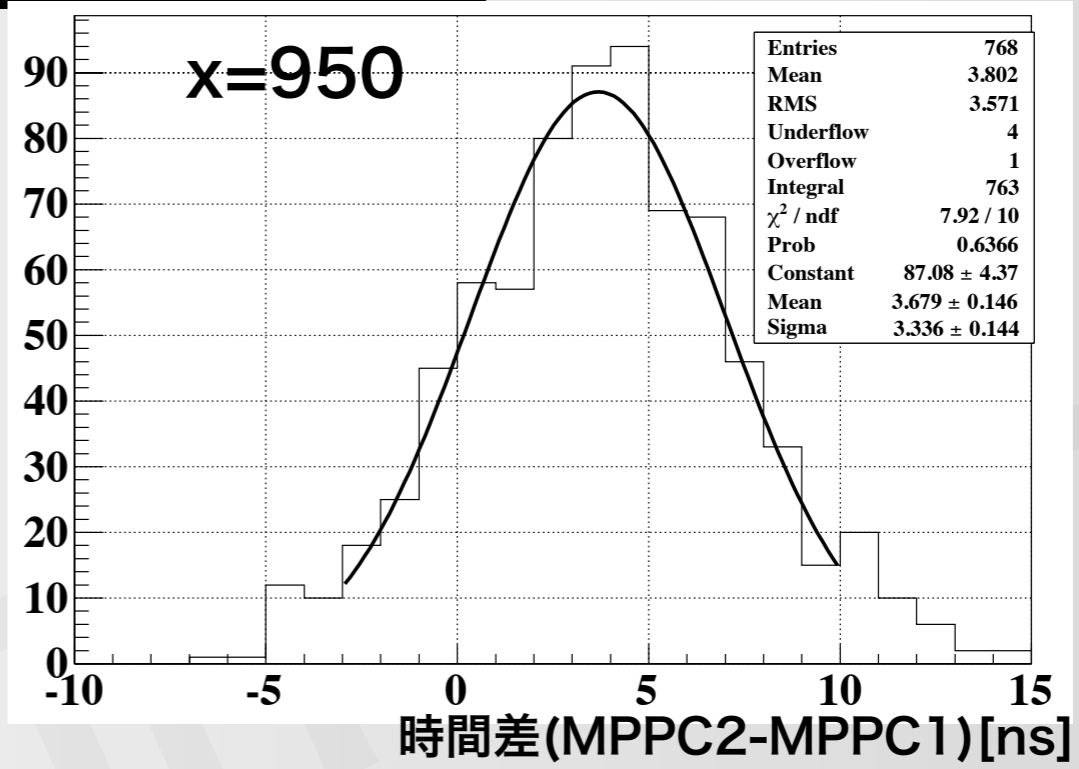
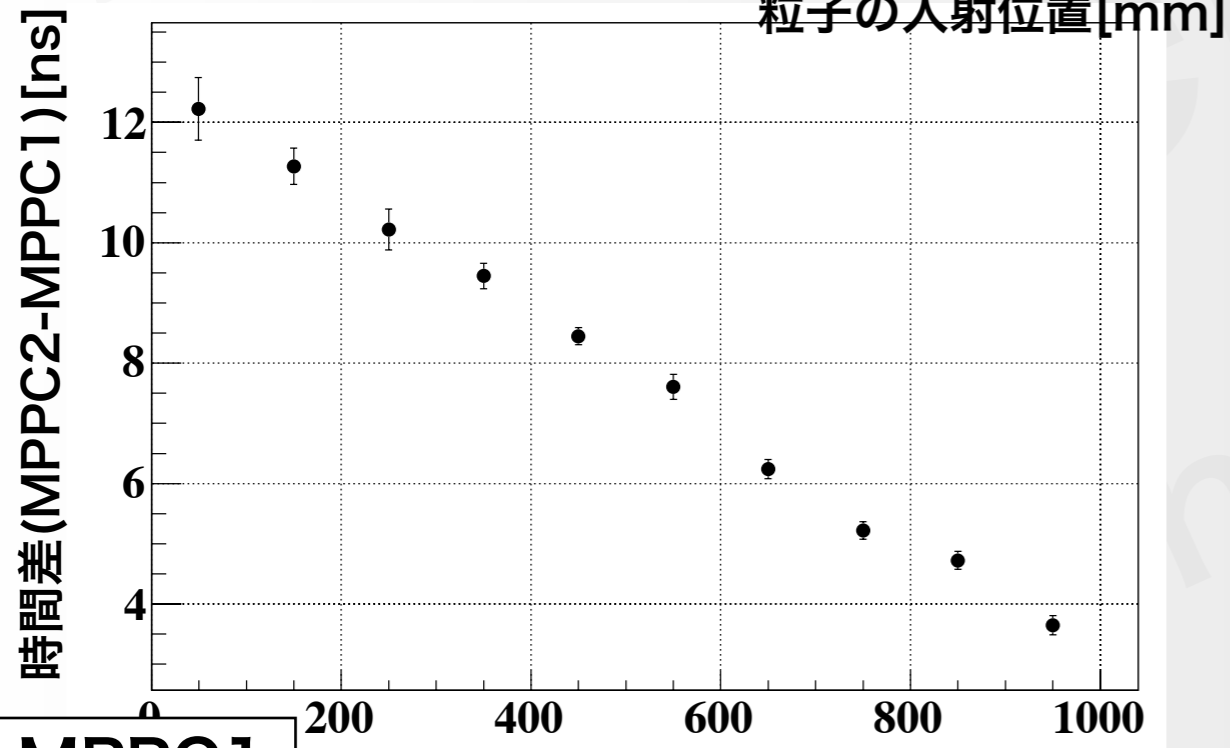
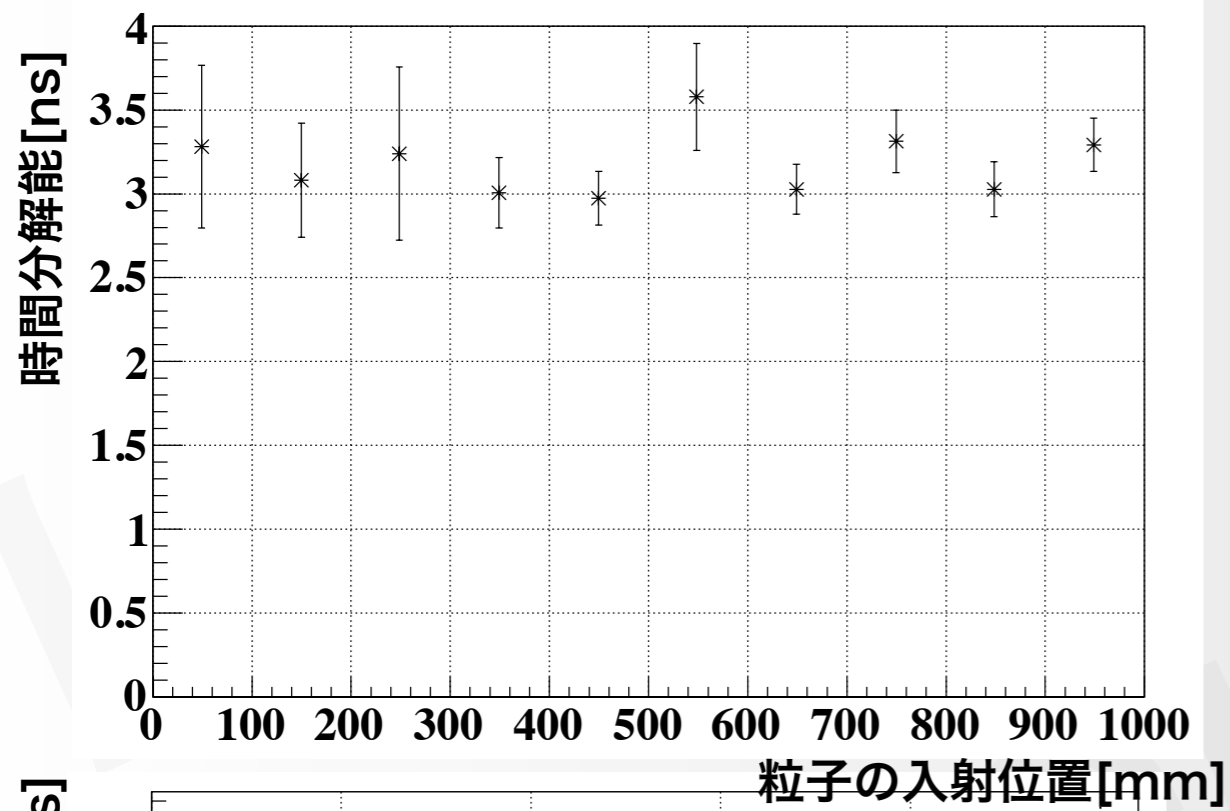
- ペDESTALを引き、積分
- 前ページのゲインを使って100keV当りの光量に変換
- 貫通すると600keV落とすと仮定して100keVに規格化 (Cf 垂直入射だと470keV)



- 外側に向かって光量が上がっている
  - • 外側の方が粒子の入射角度が大きいため。角度の補正が必要
  - 全領域で10p.e./100keVは満たしているよう。



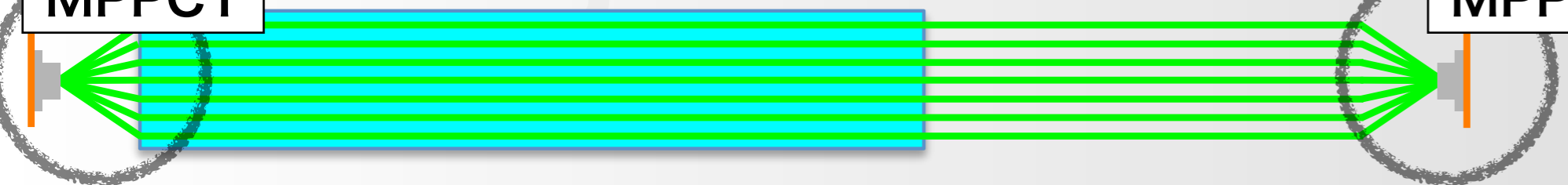
# 時間差・時間分解能



- 波形をfitしてピークをHit時間とした
- MPPCのHit時間差分布の $\sigma$ を時間分解能とした  
→Constant fractionを用いると $\sim 2\text{ns}$ に改善?  
(過去の実験から)
- 時間差分布は直線に乗っており、hitタイミングはOK
- ファイバーの伝播時間はConstant fractionを用いないと正しい値にならない(過去の実験から)  
• 今は4.7ns

MPPC1

MPPC2



- KOTO実験に用いる荷電粒子を建設・性能評価した
  - • MPPCのゲインは2%の範囲で安定して動作
  - • 最内層のモジュールについて光量の要求を全領域で満たす事を確認。
  - • 時間分解能も概ねOK。
- 今後
  - 全領域の時間分解能、入射角度を考慮した光量不感率の解析
  - 12月のエンジニアリングランに向けてのアップグレード
    - LEDキャリブレーション、読み出し制御etc..



KOTO

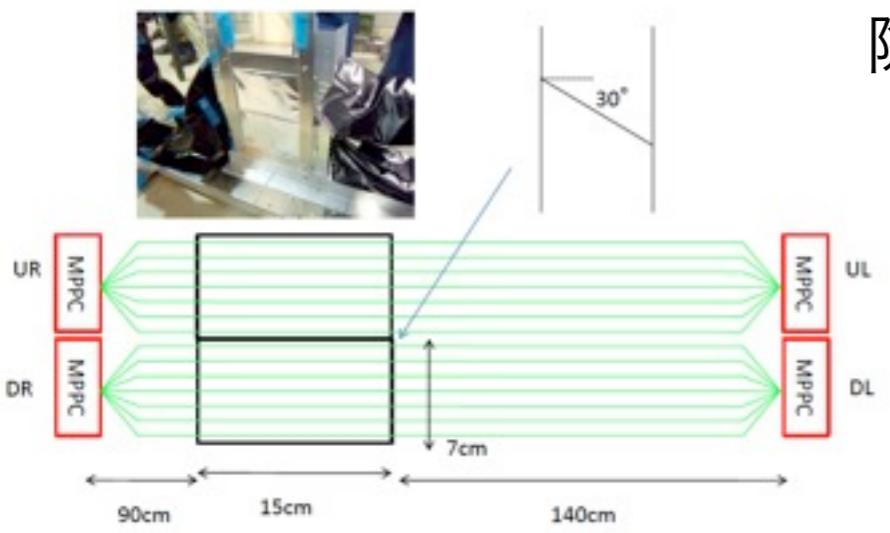
# Appendix

Experiment

Search for  $K_0 \rightarrow \pi^0 \nu \nu$

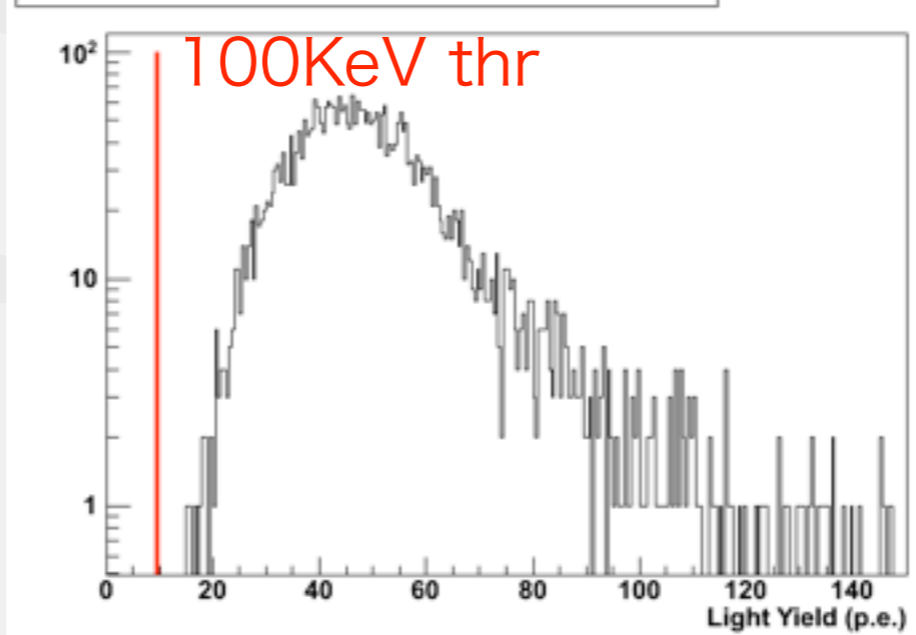
# これまでの測定結果(不感率)

## プロトタイプCV



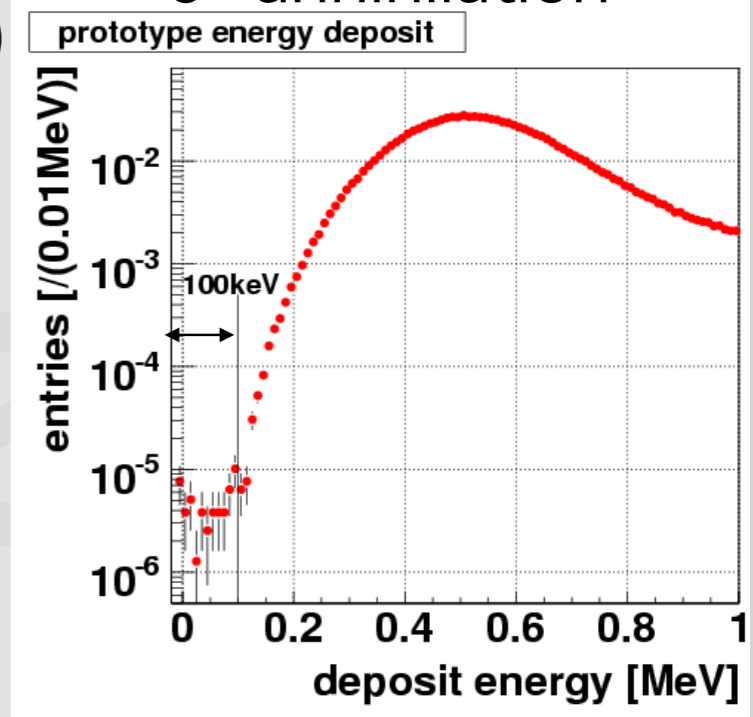
- 突抜けは2枚置いて間を狙う
- 対消滅は一枚の真ん中へ

隙間部のADC(突き抜け粒子に対して)



• inefficiency  $< 6.5 \times 10^{-4}$

## e<sup>+</sup> annihilation

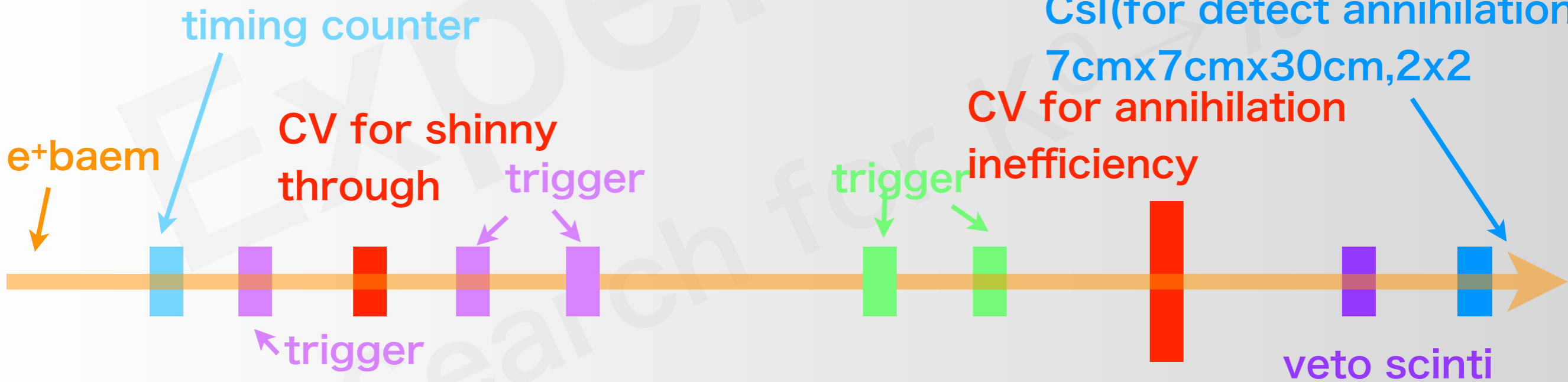


inefficiency :  $5.2 \pm 0.8 \times 10^{-4}$

CsI(for detect annihilation)

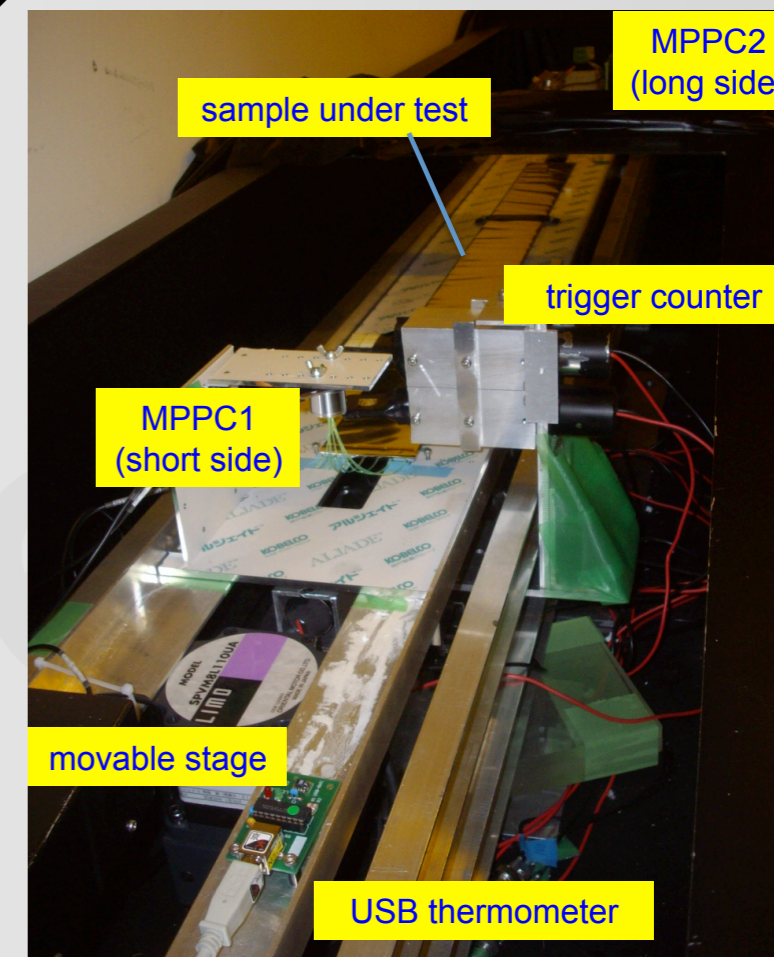
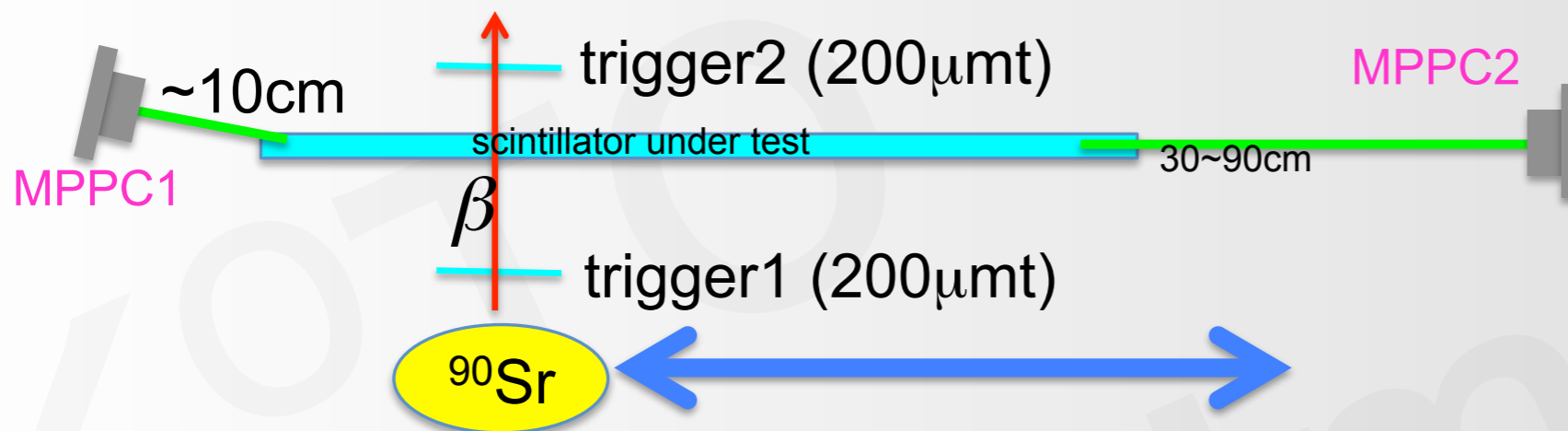
7cmx7cmx30cm, 2x2

CV for annihilation



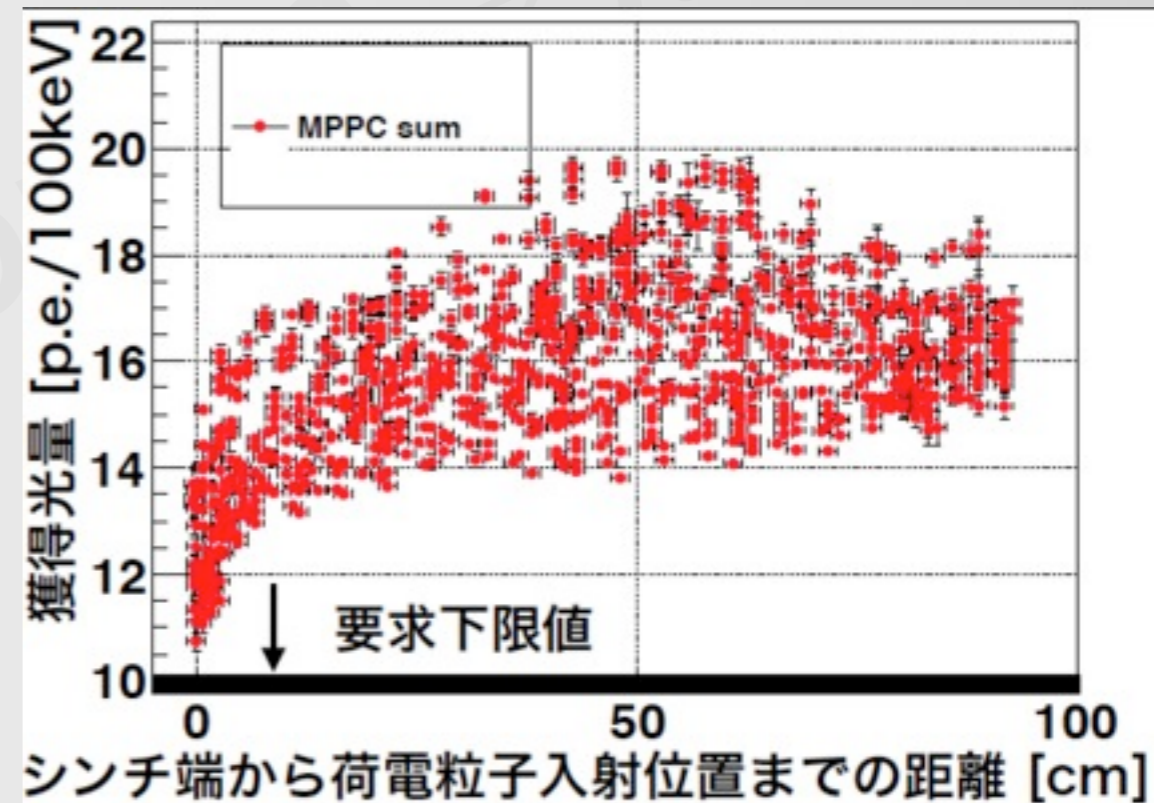
プロトタイプでは不感率はOK  
→実際に組み上がった検出器ではどうか、  
ビームを使って性能評価





- ・シンチレータモジュールは京都で全数製作  
→梱包してJ-PARCへ
- ・シンチレータモジュールは自動測定装置を作り、  
全数性能評価

個別のシンチレータモジュールでは  
全数、光量の要求を満たす  
→実際に組み上がった検出器では  
どうか、ビームを使って性能評価



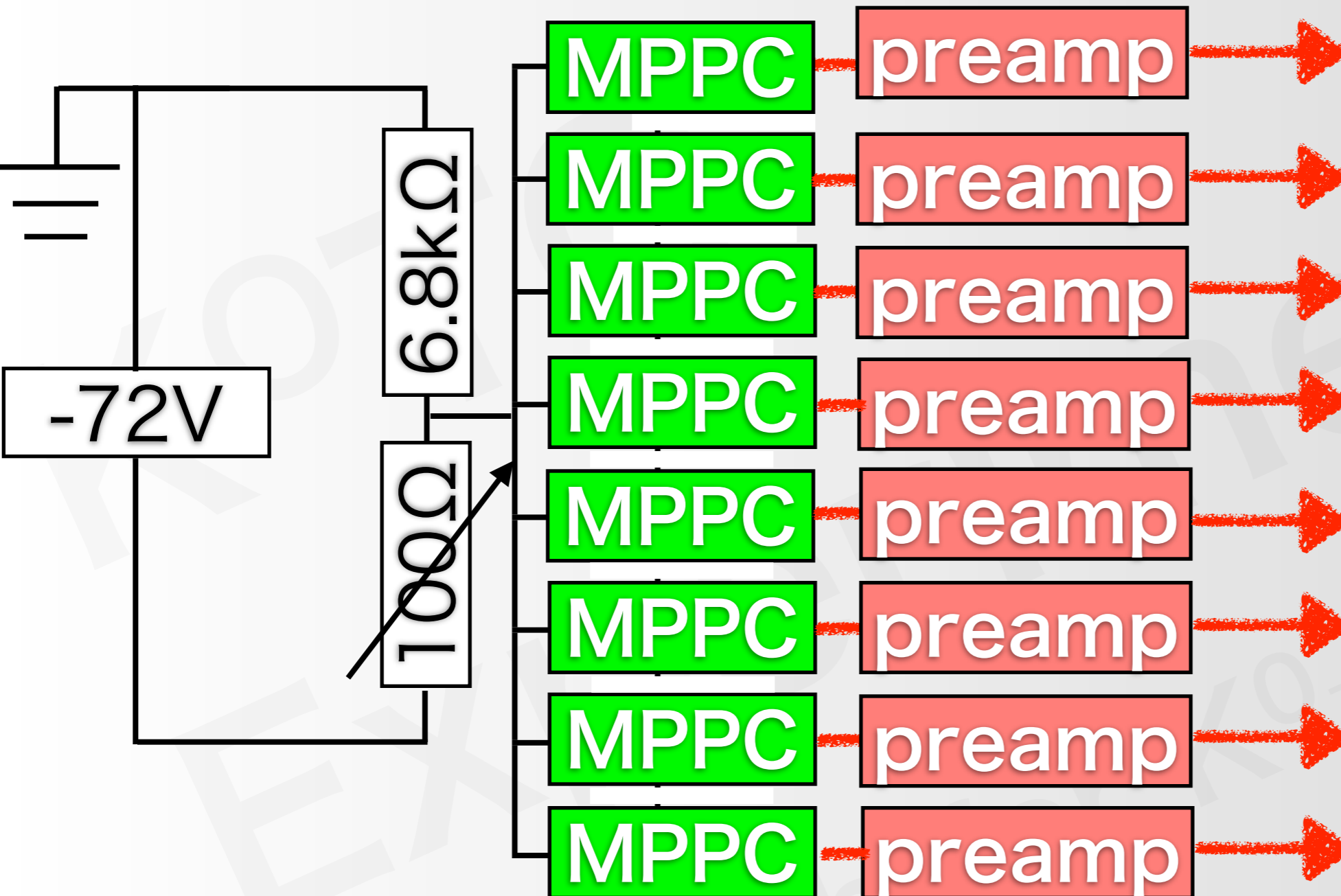


- main roll : veto charged particle from charged  $K_L$  decay
- veto  $Ke3 \rightarrow$  need  $<10^{-4}$  inefficiency against  $e^+$ (annihilation)
- veto charged  $K\pi 3$ 
  - need 100keV threshold
  - need  $<10^{-4}$  inefficiency against  $\pi^-(p+\pi^- \rightarrow \pi^0 n)$   
 $\rightarrow$  need light yield  $>10$ p.e./100keV(sum of both readout)
- need  $<3$ ns timing resolution from the point of accidental loss

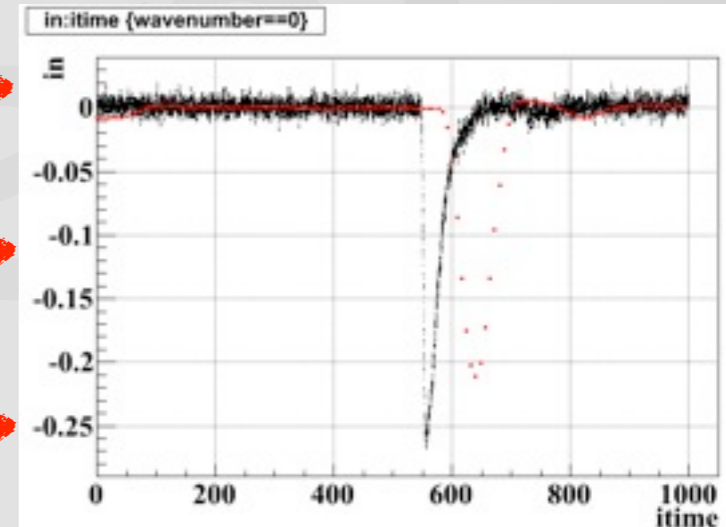
	requirement from simulation	value from measurement
$e^+$ inefficiency	$<10^{-4}$	$<5.2 \pm 0.8 \times 10^{-5}$
light yield	$>10$ p.e./100keV	$\sim 16$ p.e./100keV
timing resolution	$<3$ ns	$\sim 2$ ns(through 125MHz Fadc)

CV achieve good performance



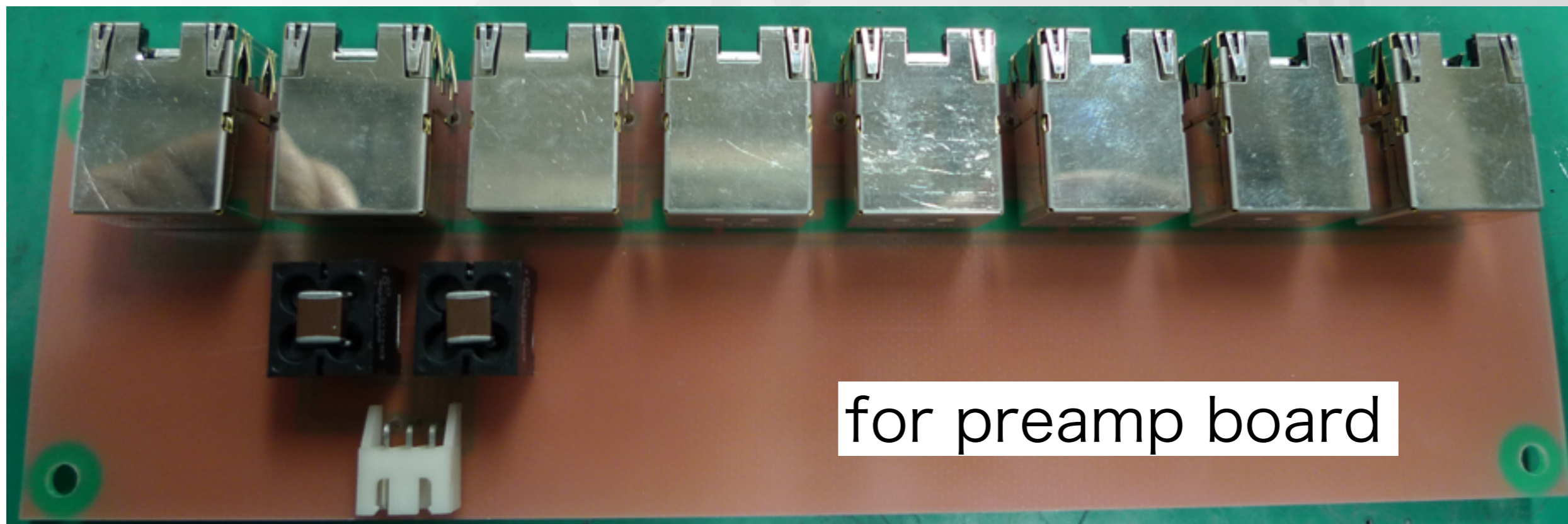
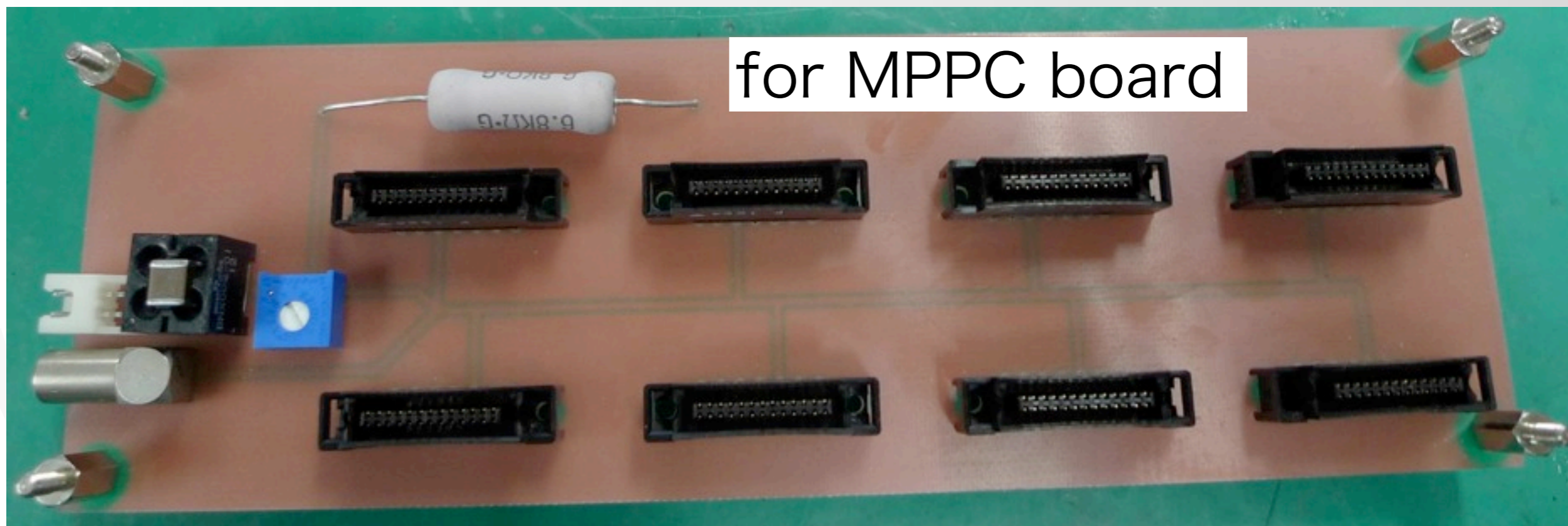


Bessel filterで  
波形整形した後、  
Flash ADCで読み出す



黒：生波形  
赤：FADC(125MHz)

- MPPC8個ずつに同じ電圧を印加(本実験では個別に制御, 184chなので23組)
- プリアンプは倍率50倍, ダイナミックレンジ2.5V, BW200MHz, 非反転+差動増幅アンプをCV用に開発(本番でも使用)
- MPPC、プリアンプは京都で全数性能評価
- 今回は温度コントロールなし(空気中で使うため、本番では必須)







- @5°C, 12°C, 20°C : calibrate MPPC gain, thermistor, temp monitor. measure dark count noise  
→3hour **measure elemental MPPC characteristics**
- operation test of peltier device  
(ambient temp 20°C , cool to 5°C)→30 minutes
- fracture testing in vacuum  
(MPPC work in vacuum or not)→30 minutes
- 4hour /1 cycle

### MPPC mount board

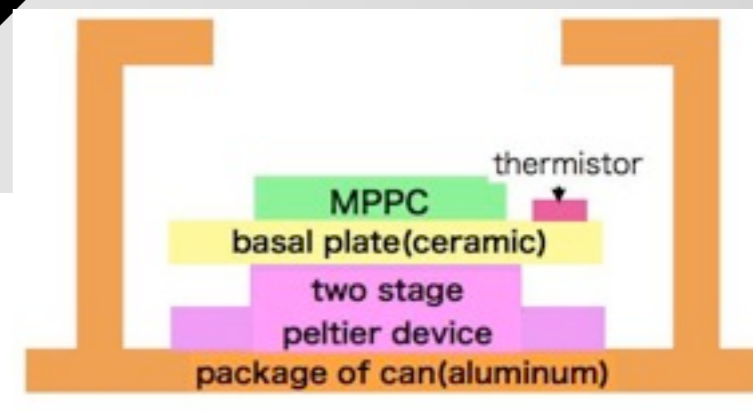
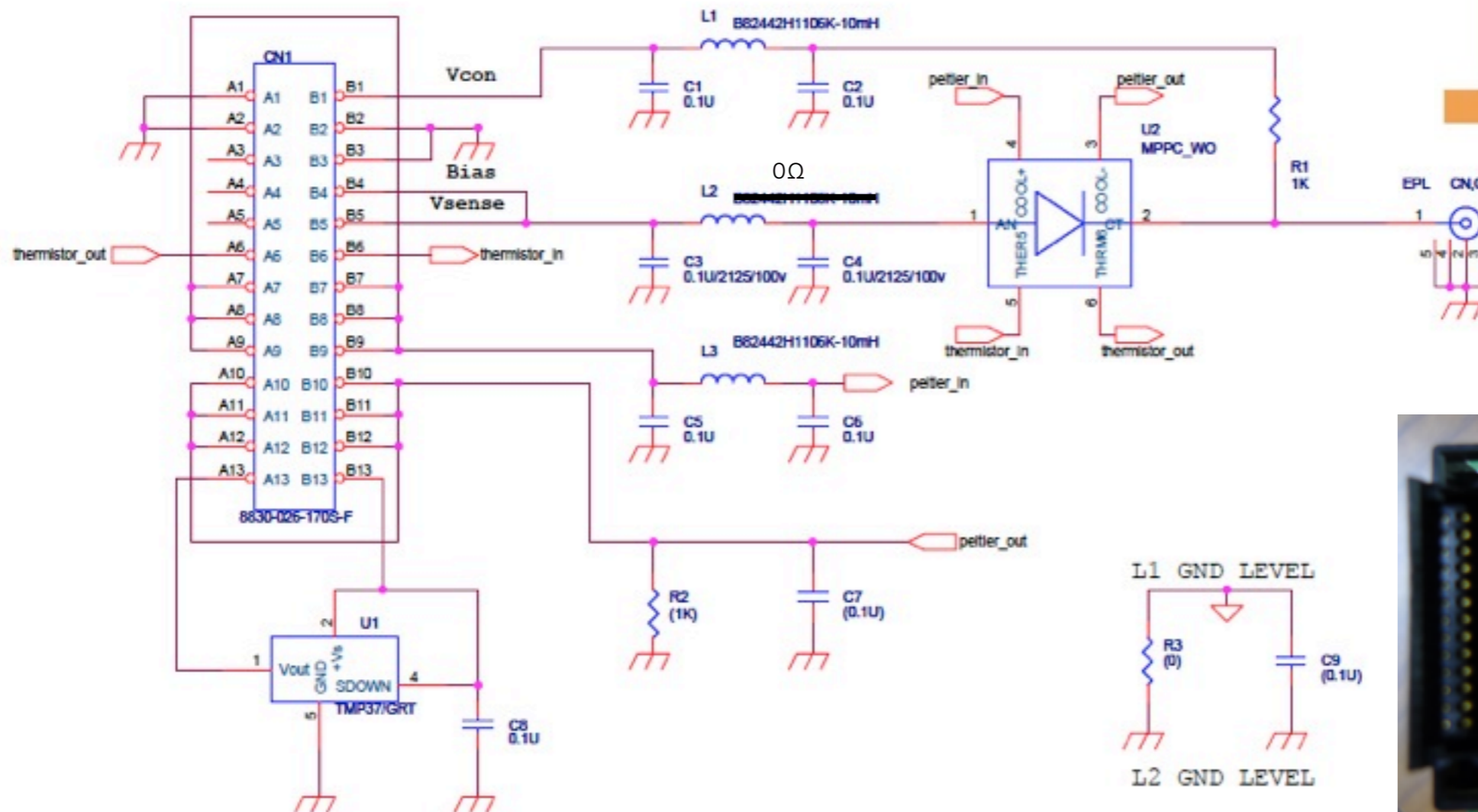


photo of backside

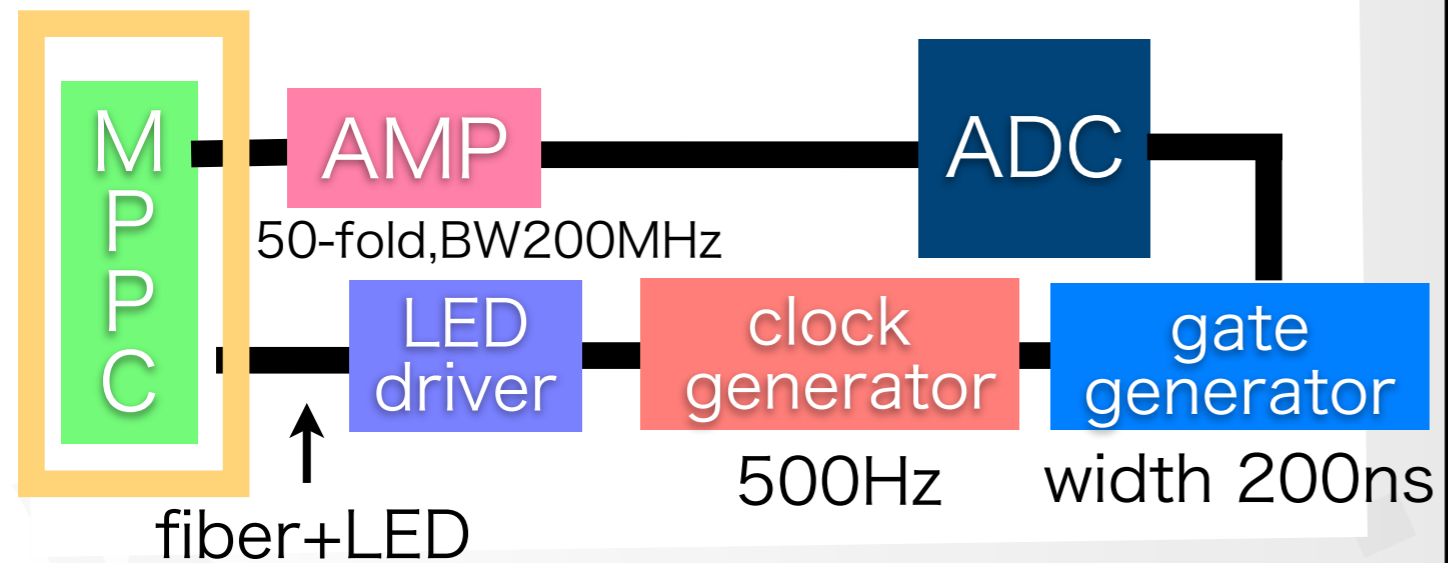


- supply voltage into MPPC and peltier
- supply voltage into thermistor and temp monitor(on mount board surface), readout their signal.
- readout MPPC signal

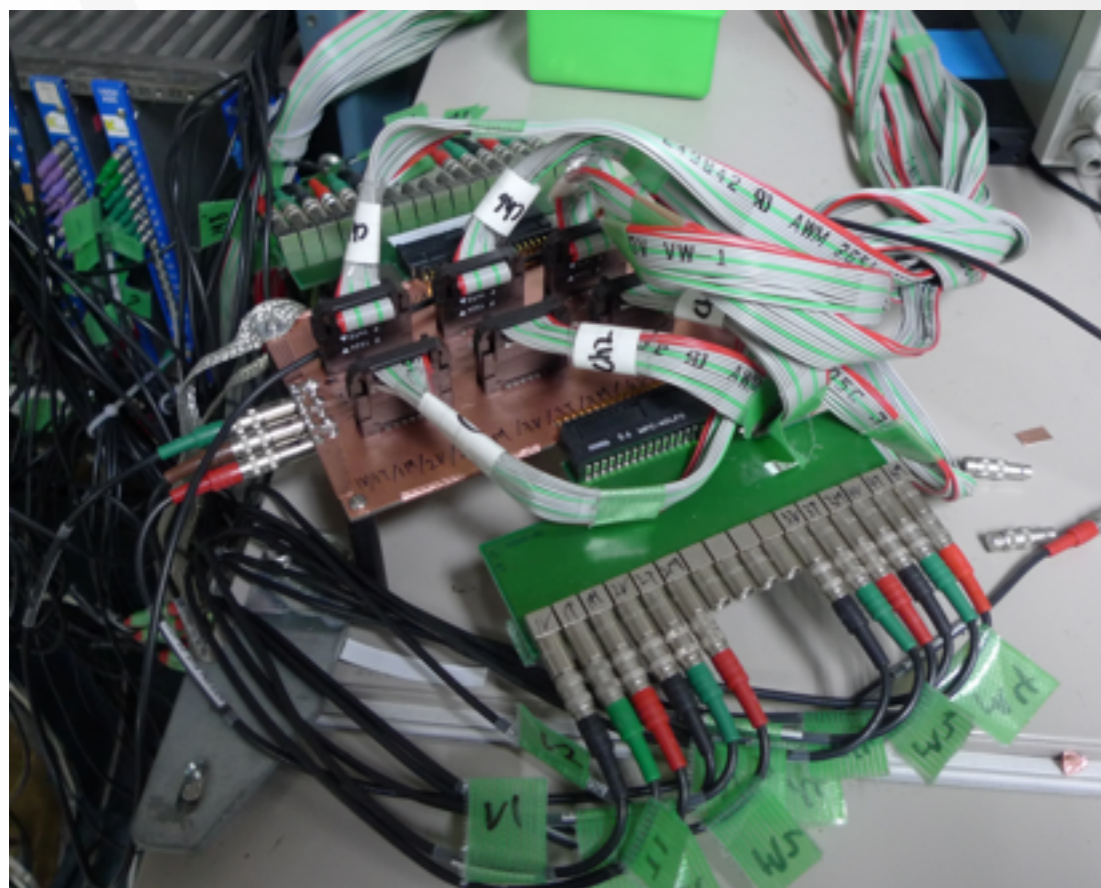
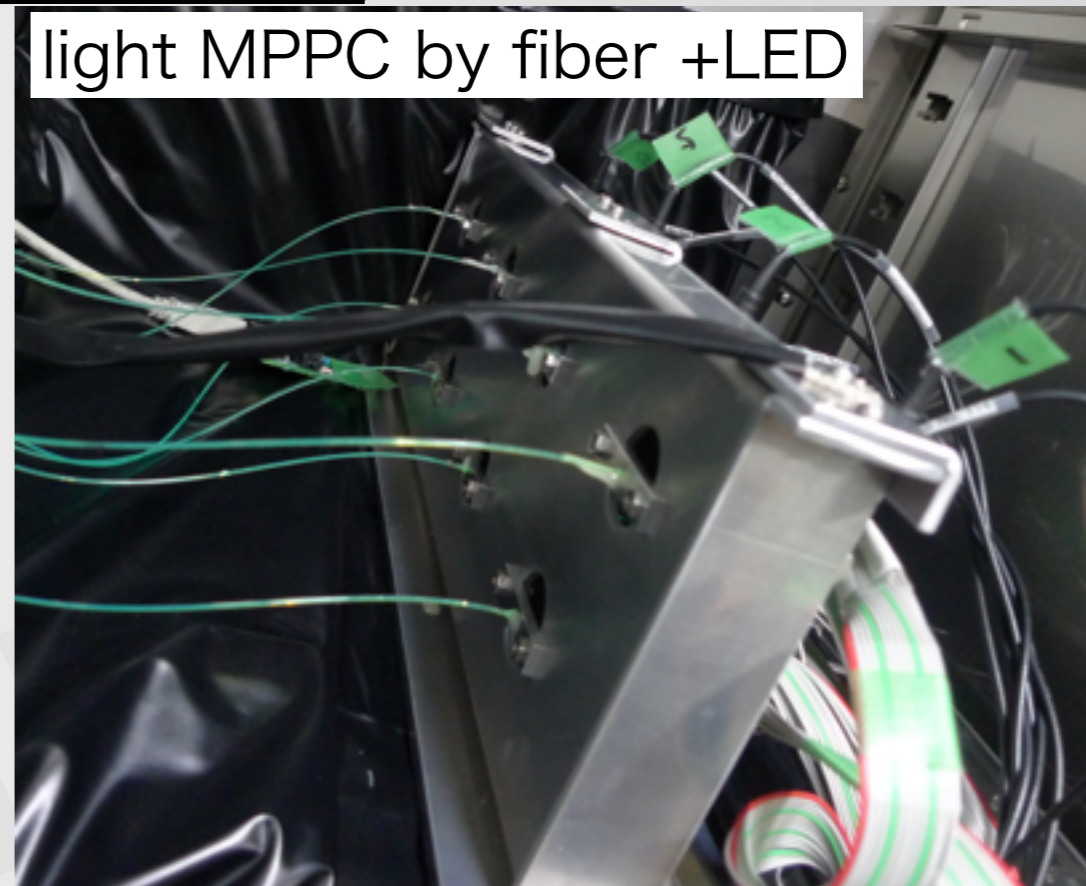


~set up1 (characteristic check)~

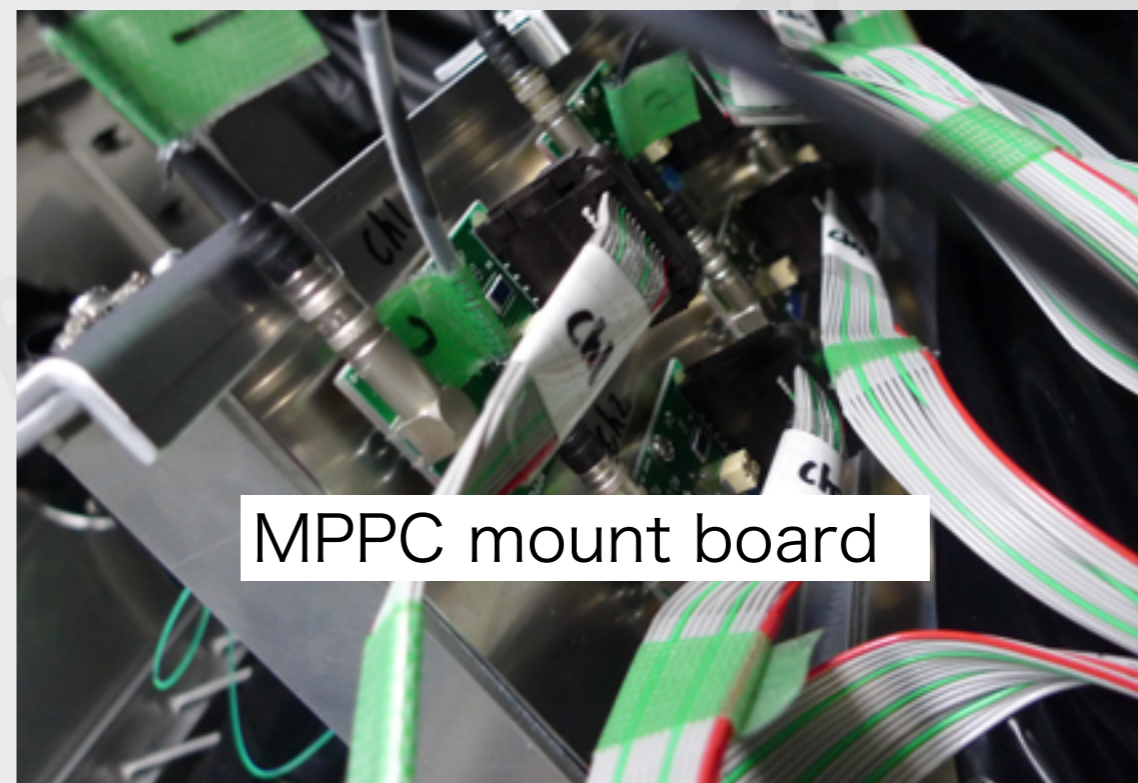
thermostat bath



light MPPC by fiber +LED

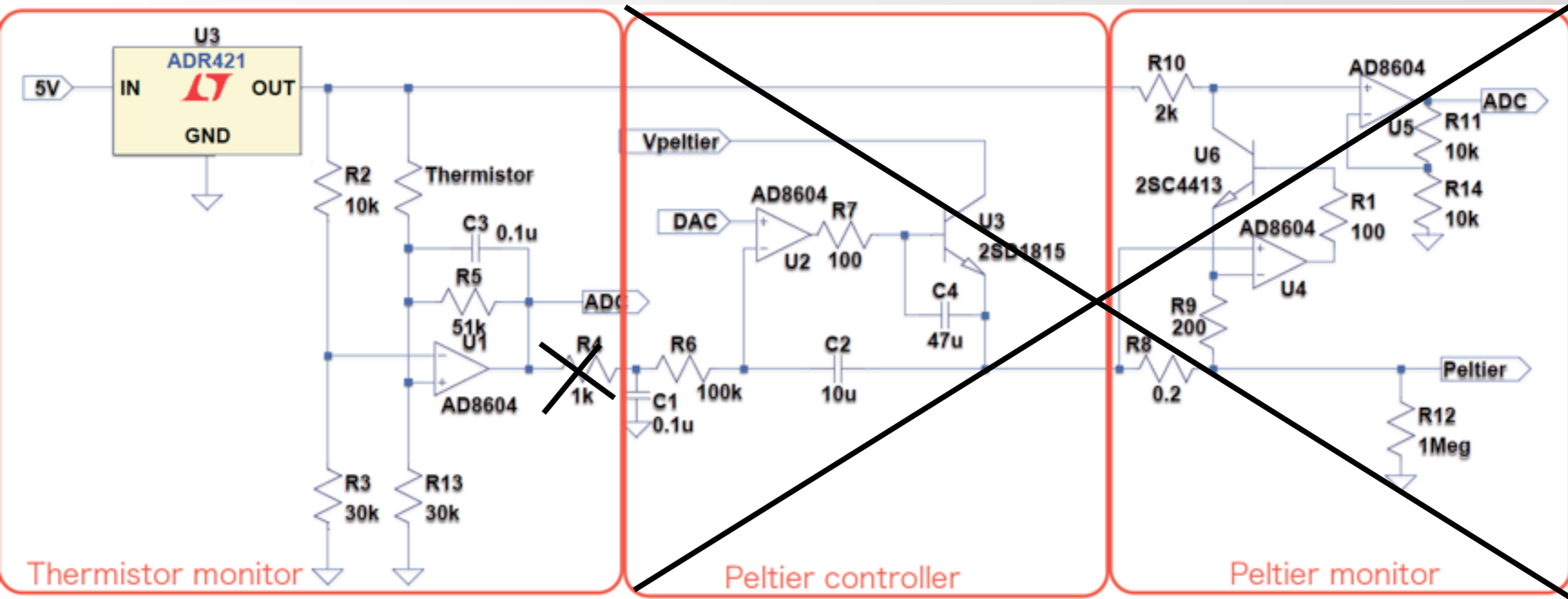


• board for supply voltage to each mount board



MPPC mount board

~set up2(characteristic check)~

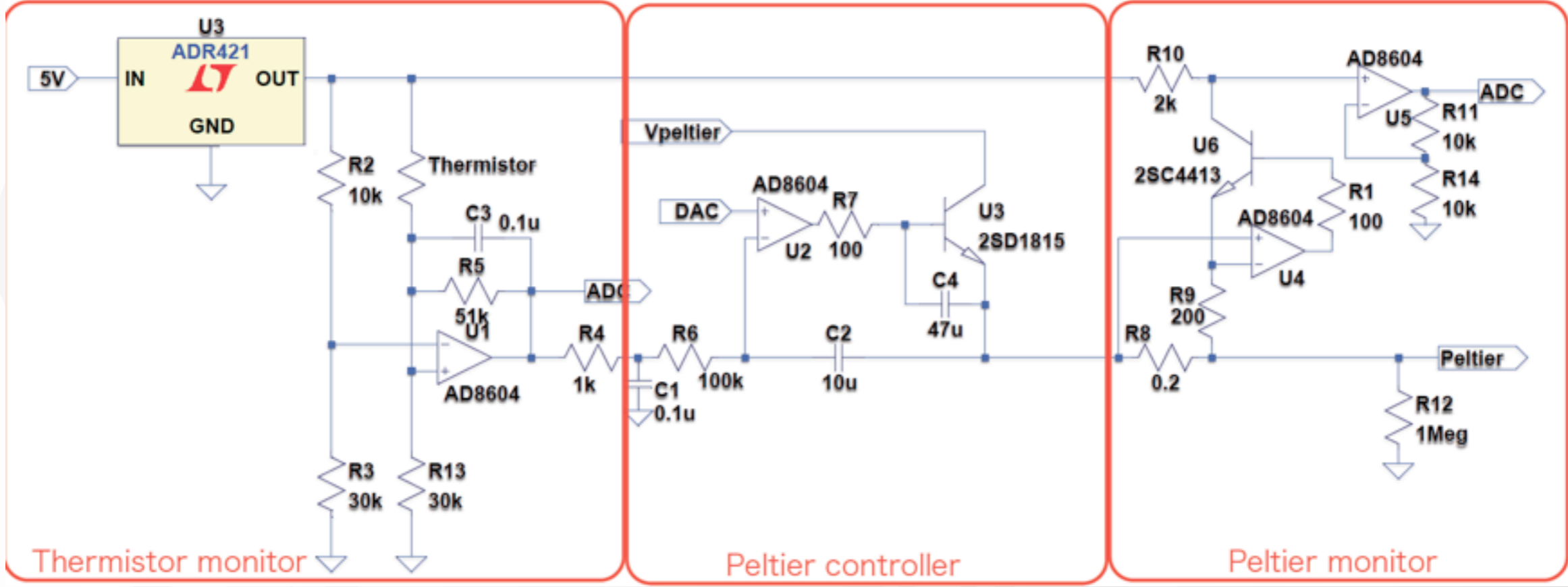


- change thermostat bath temperature to 5°C, 12°C, 20°C automatically
- output of thermistor monitor, temp monitor are read by slow ADC
- change MPPC apply voltage automatically
- divide MPPC signal two, one for gain calibration(no delay), another for dark count measurement(delay signal 10μs to separate LED timing).
- MPPC signal readout by ADC



~set up3(peltier test and vacuum test)~

- setup for peltier test
  - ambient temp is kept 20 °C by thermostat bath
  - to cool MPPC 5°C, supply DAC 3.47V(same voltage of thermistor @5°C)
  - peltier current, voltage, thermistor monitor, temp monitor are readout by OSC



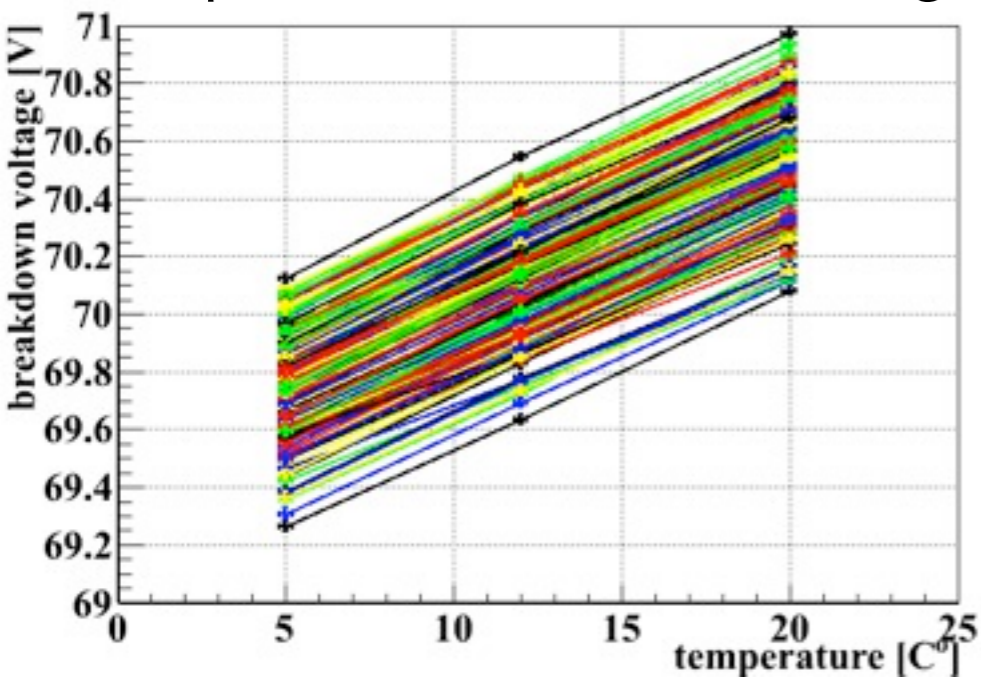
- Setup for vacuum test
  - put 4 MPPCs in vacuum chamber
  - at 20 Pa check MPPC work or not.
  - after that, at 1000Pa check MPPC work or not.



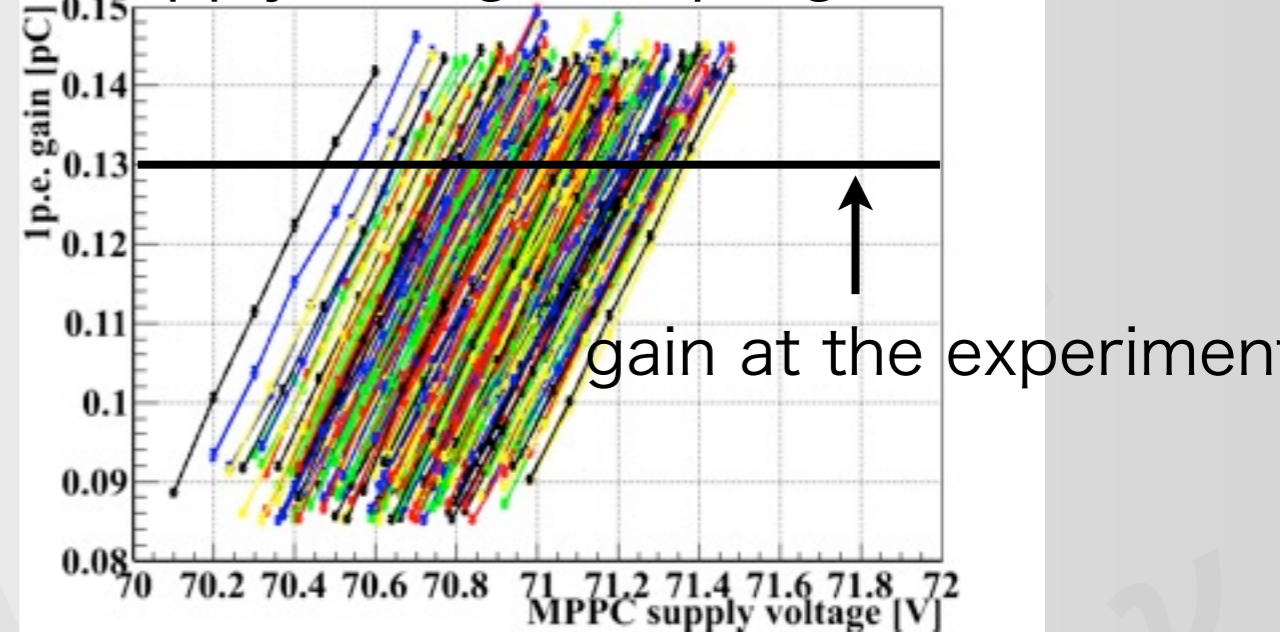
# Performance check of MPPC

~MPPC calibration~

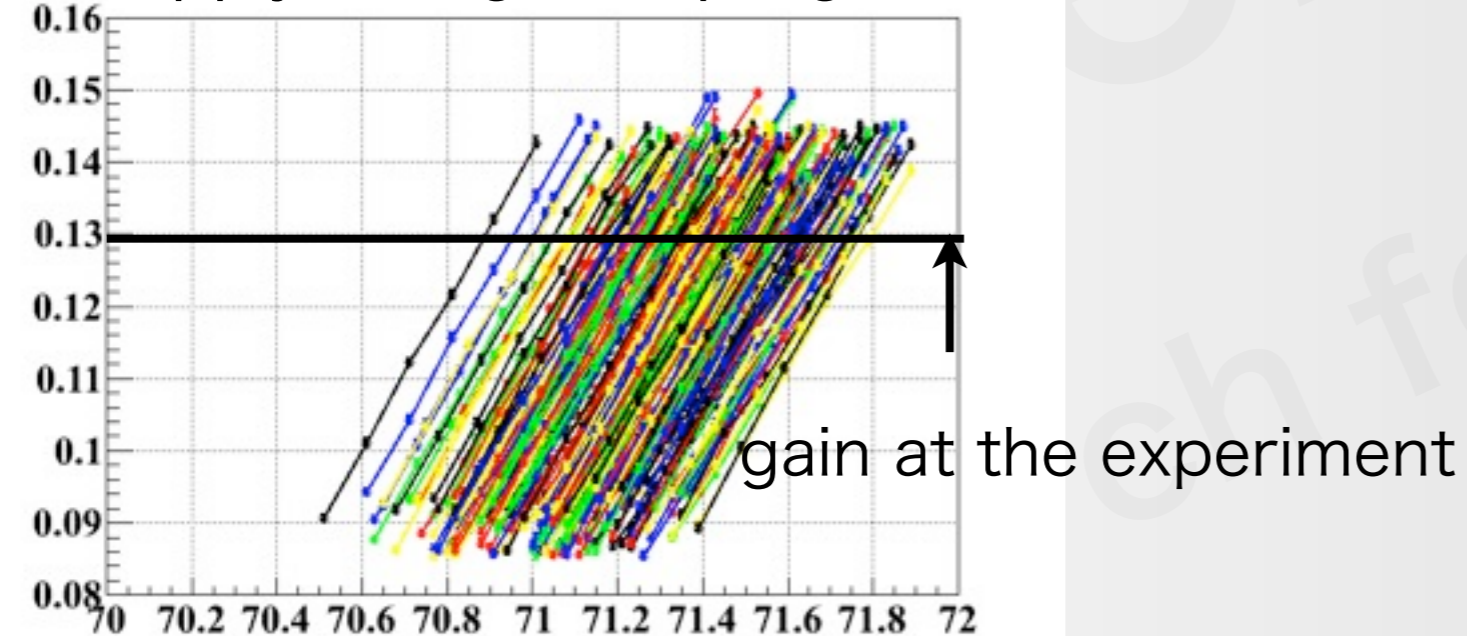
temp Vs brake down voltage



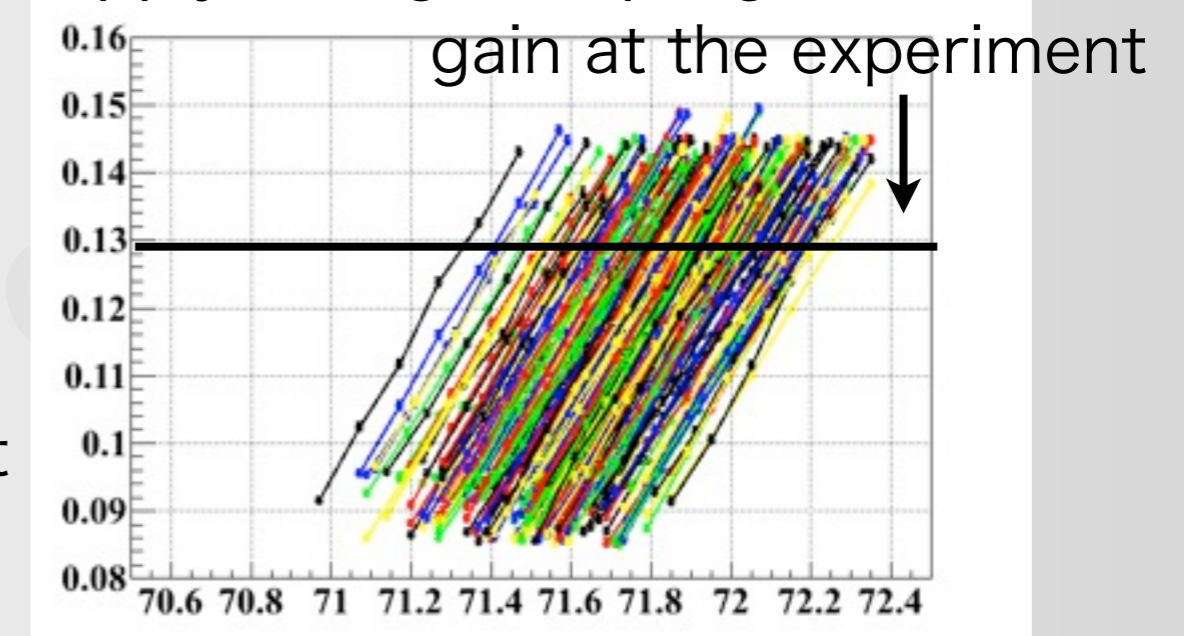
supply voltage Vs 1 p.e.gain(5°C)



supply voltage Vs 1 p.e.gain(12°C)

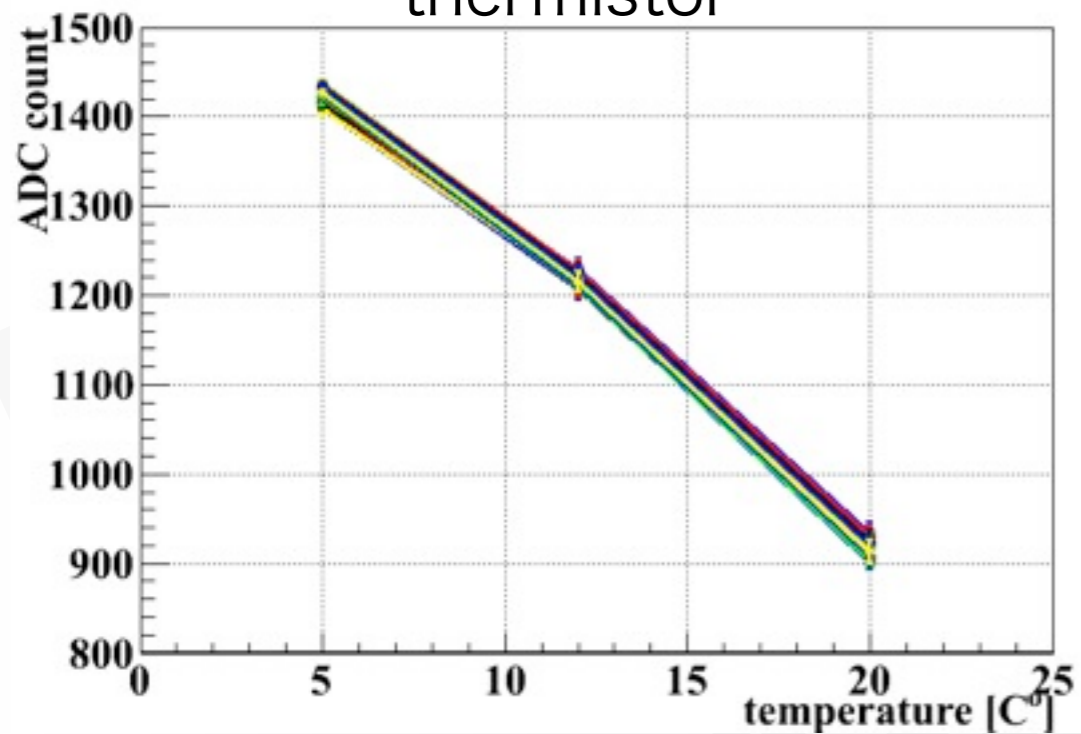


supply voltage Vs 1 p.e.gain(20°C)

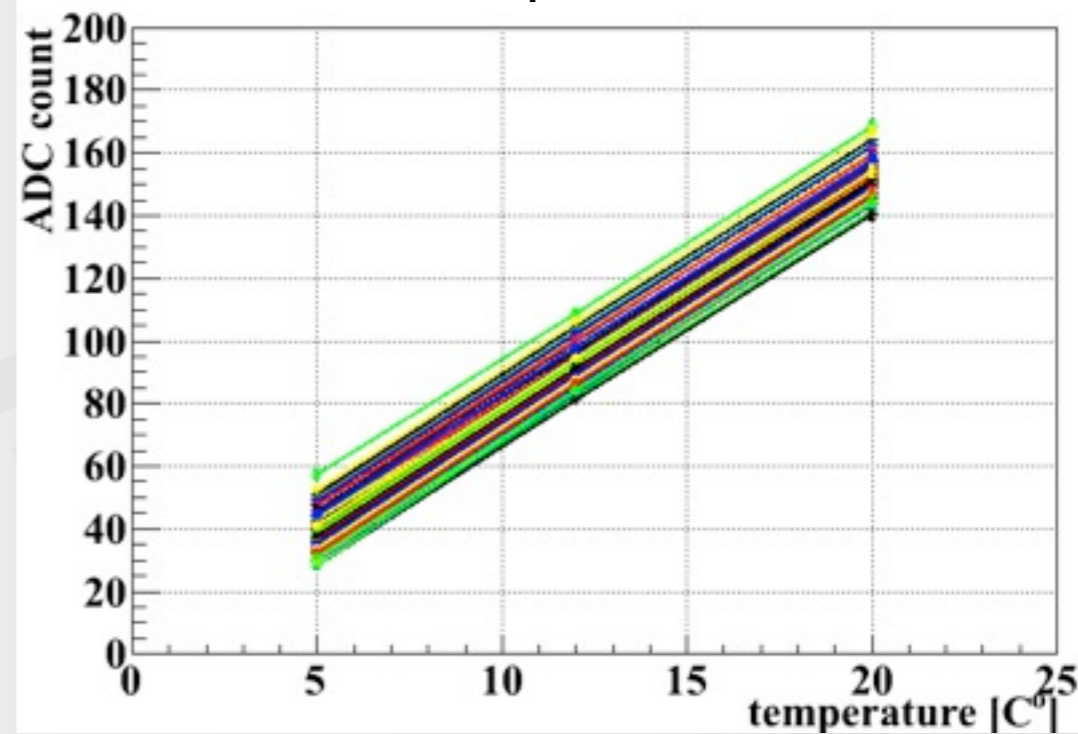




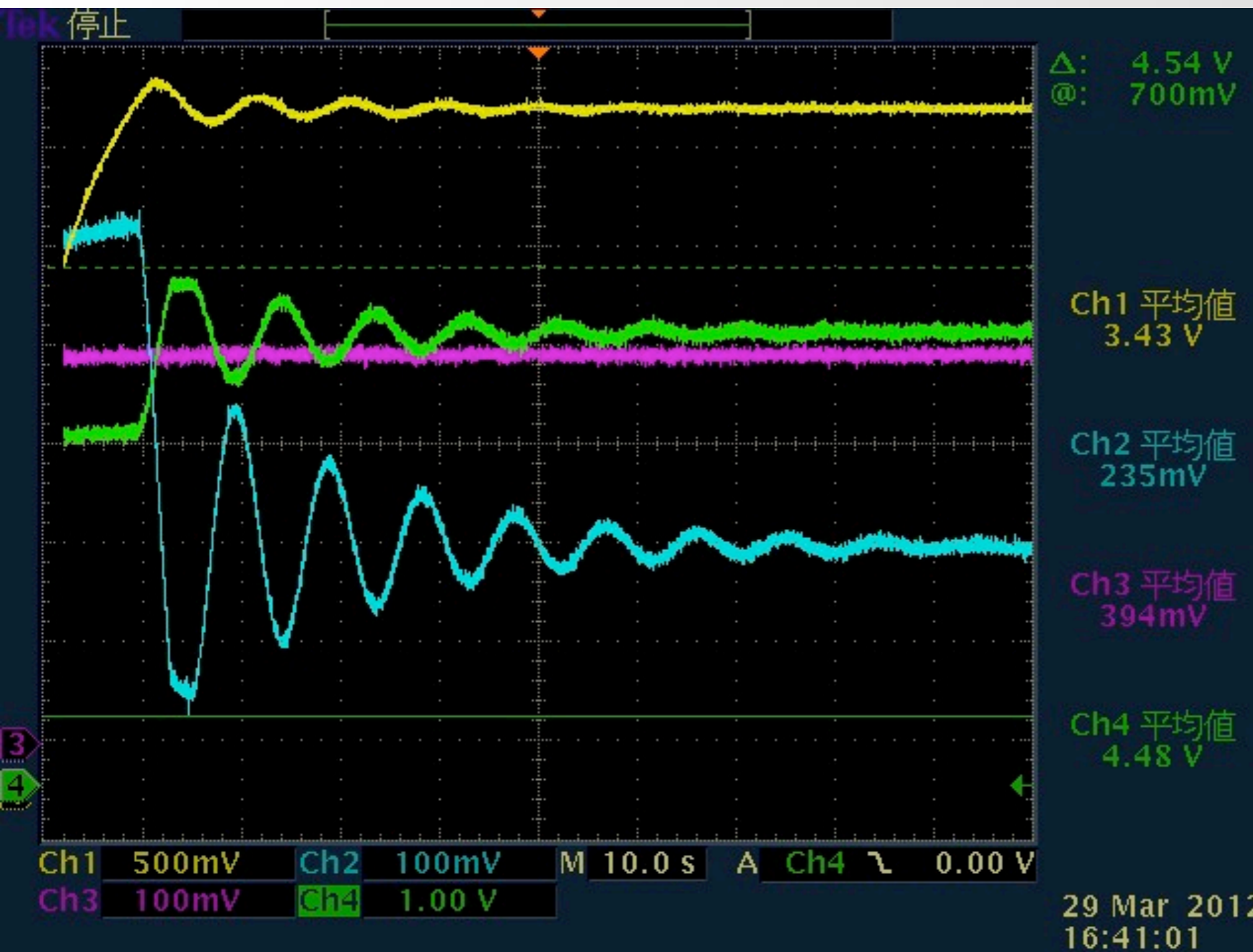
thermistor



temp monitor



EXPO Search for KO



thermistor out  
(if temp ↓, voltage ↑)

peltier voltage

temp monitor  
(if temp ↑, voltage ↑)

current monitor  
(if current ↓, voltage ↑)

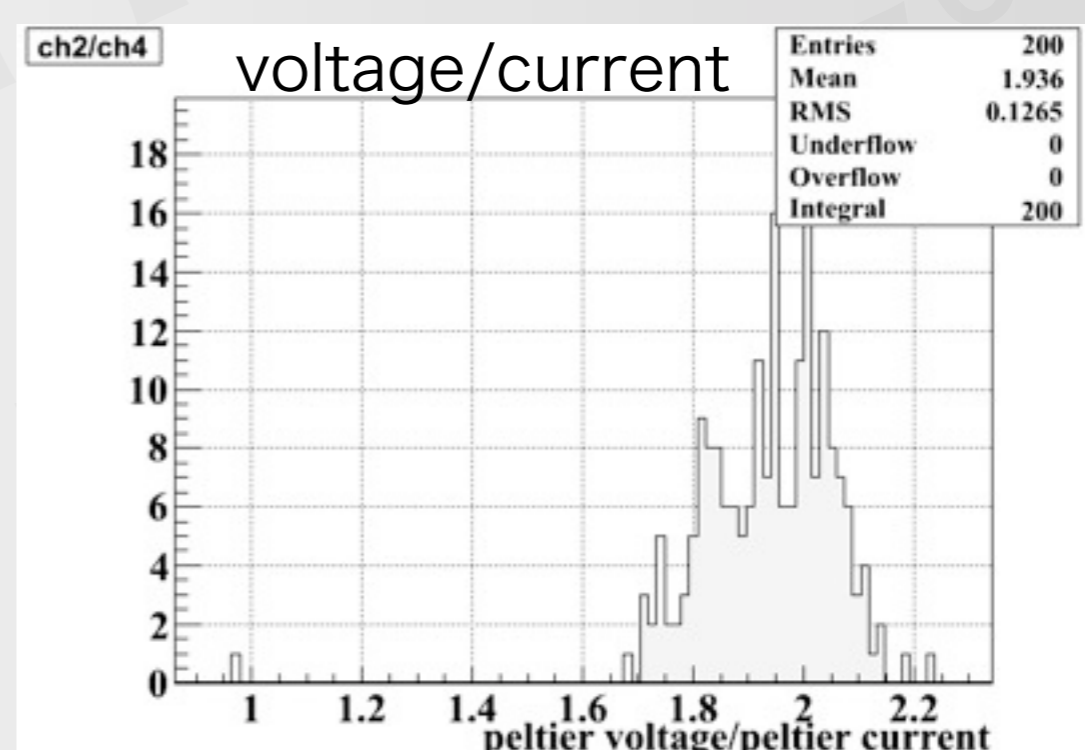
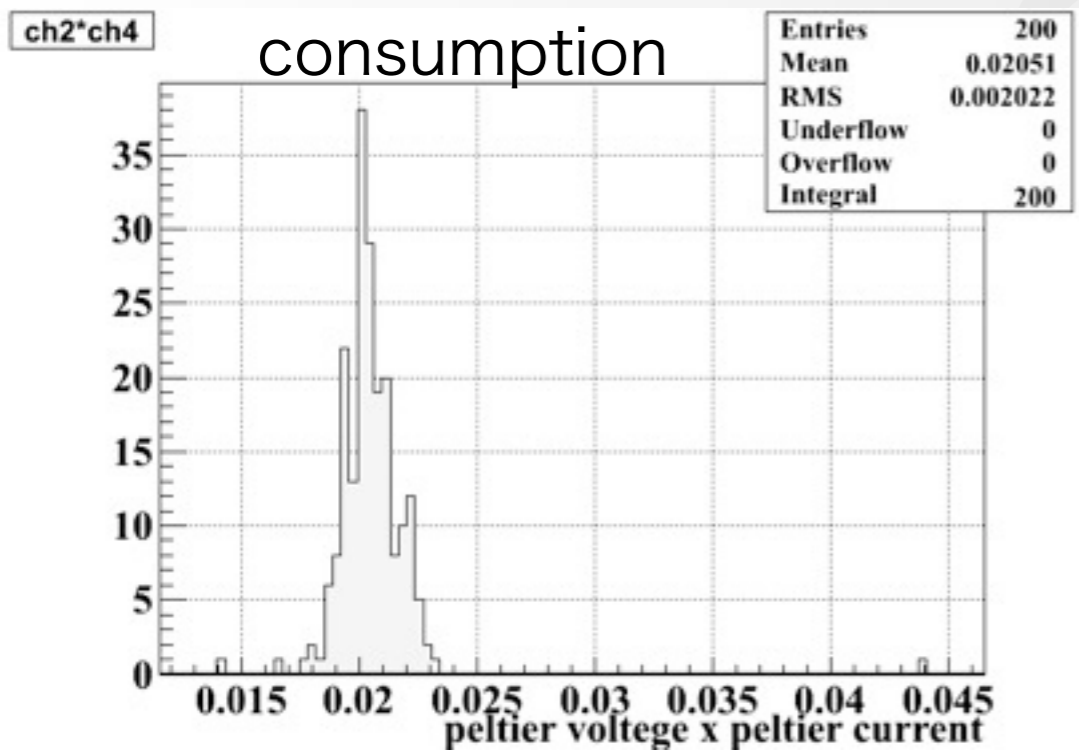
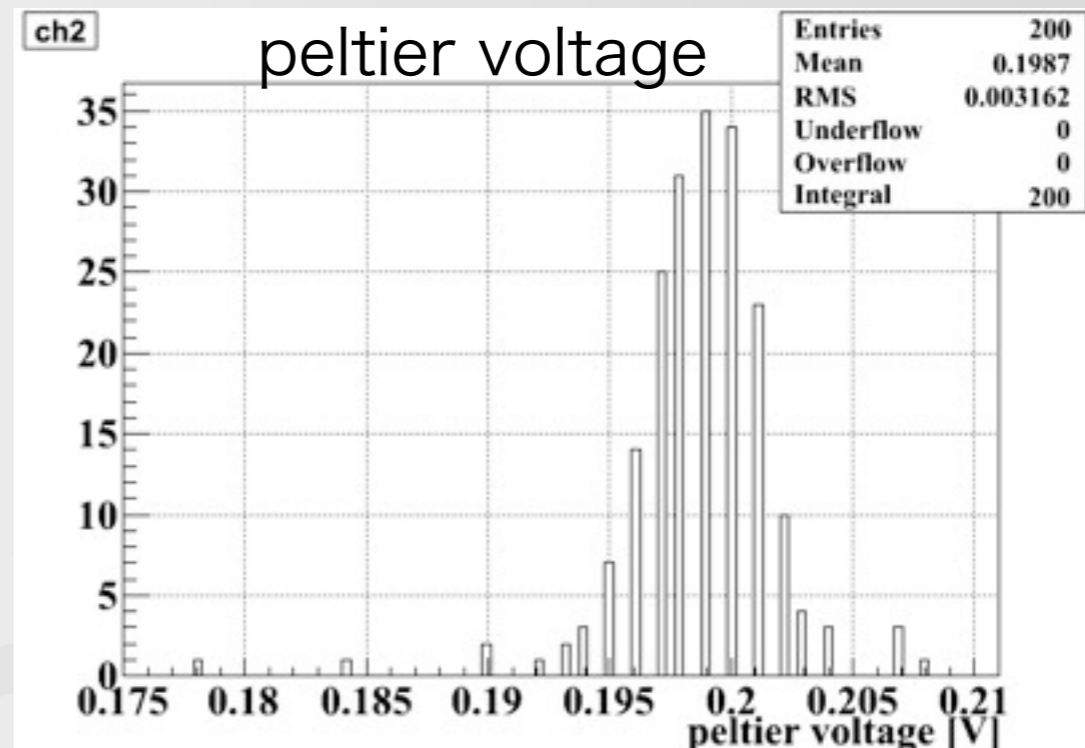
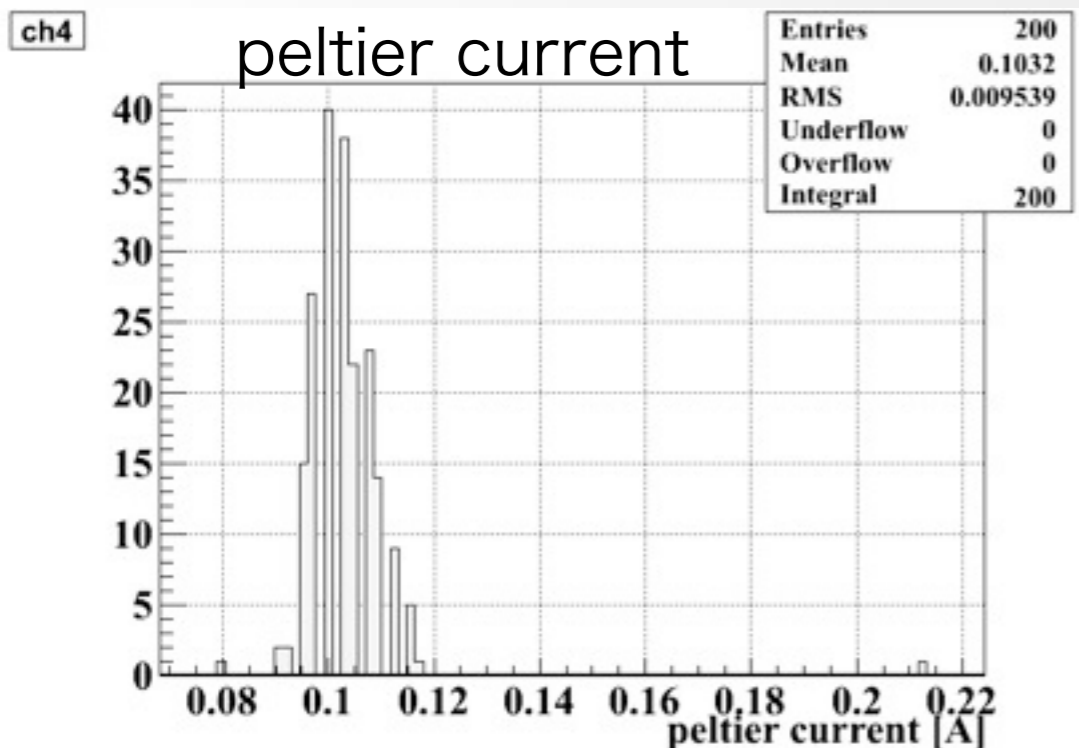
- take ~100s to become stable
- at the start of supply voltage, peltier voltage is 0.5V、 current is 0.5A。



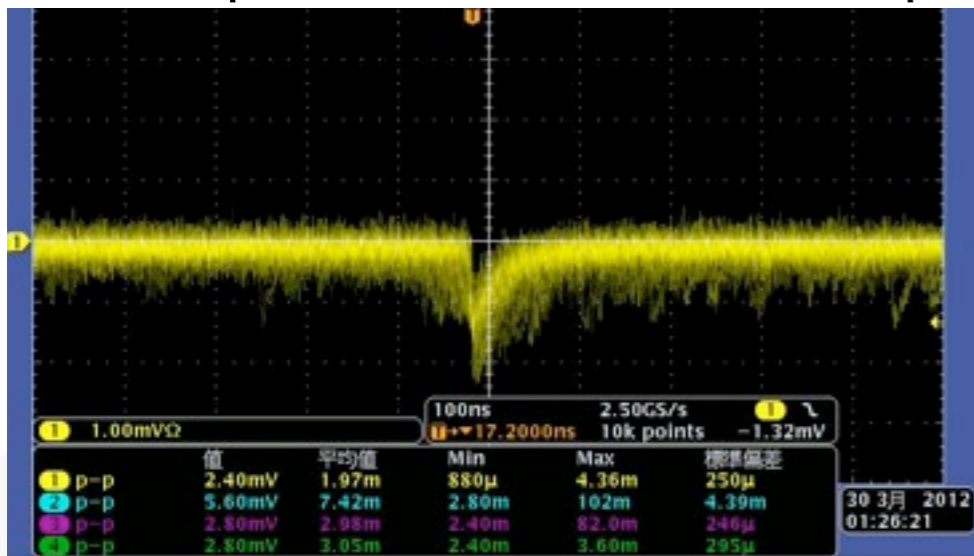


# Performance check of MPPC

~peltier test2~

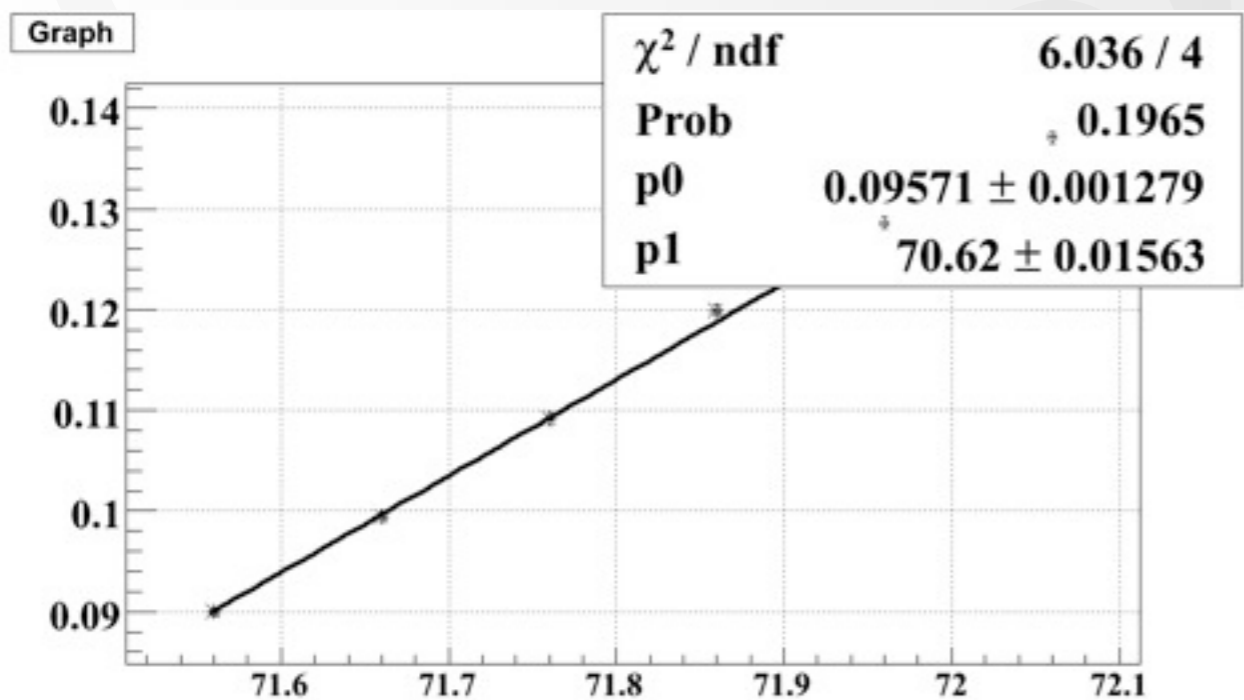


MPPC pulse in vacuum(@10pa)

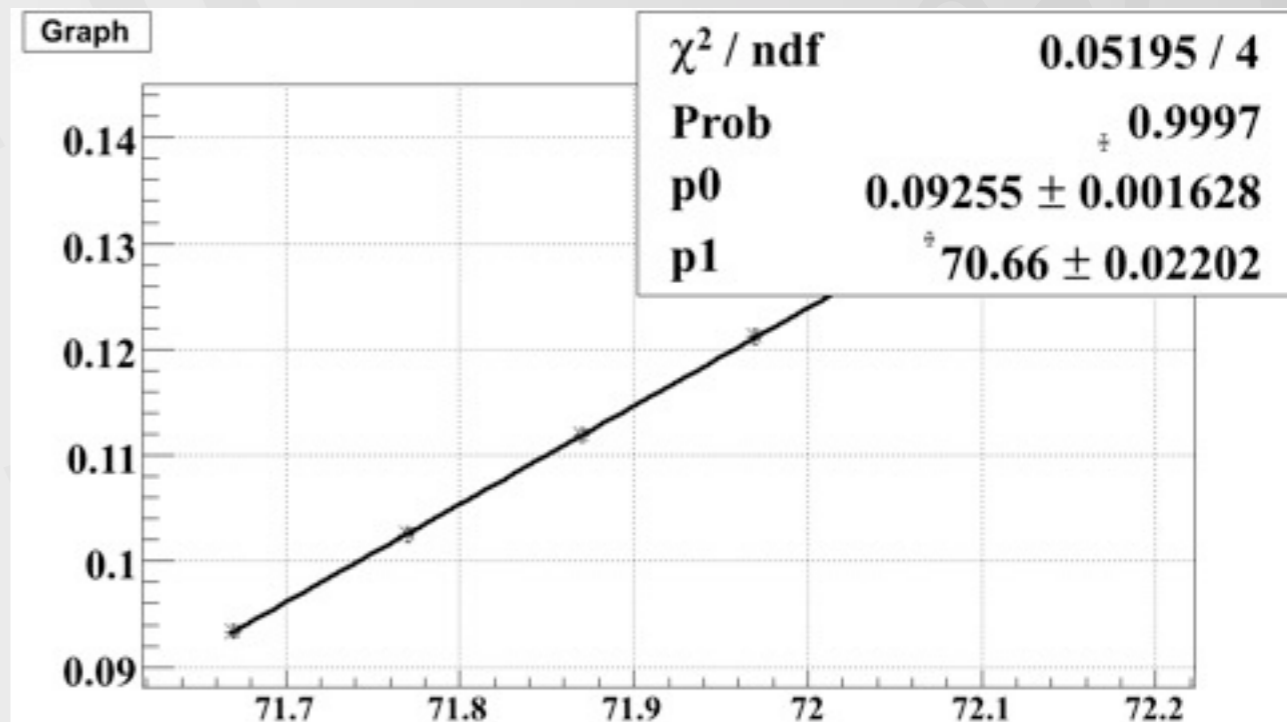


DPO3034 - 20:26:27 2012/03/29

- all MPPC were not broken in vacuum
- not change characteristics after vacuum



supply voltage Vs MPPC gain  
(before put in vacuum)



supply voltage Vs MPPC gain  
(after put in vacuum)





# Performance check of MPPC

~check list~

item	Note
MPPC noise(dark count noise)	<ul style="list-style-type: none"><li>• check the noise level is sufficient or not</li><li>• make the note to ensure stable operation in the experiment</li></ul>
power consumption of peltier device	check the consumption is sufficient or not
fracture testing of test in vacuum	check the MPPC work in vacuum
temperature dependence of MPPC break down voltage	to decide apply voltage of MPPC
calibration of the thermistor	check a reaction against temperature

EXPERIMENT Search for K...



item	Note
today's talk	
MPPC noise(dark count noise)	<ul style="list-style-type: none"><li>• check the noise level is sufficient or not</li><li>• make the note to ensure stable operation in the experiment</li></ul>
power consumption of peltier device	check the consumption is sufficient or not
fracture testing of test in vacuum	check the MPPC work in vacuum
MPPC gain dependence of temperature and apply voltage	to decide apply voltage of MPPC
calibration of the thermistor	check a reaction against temperature



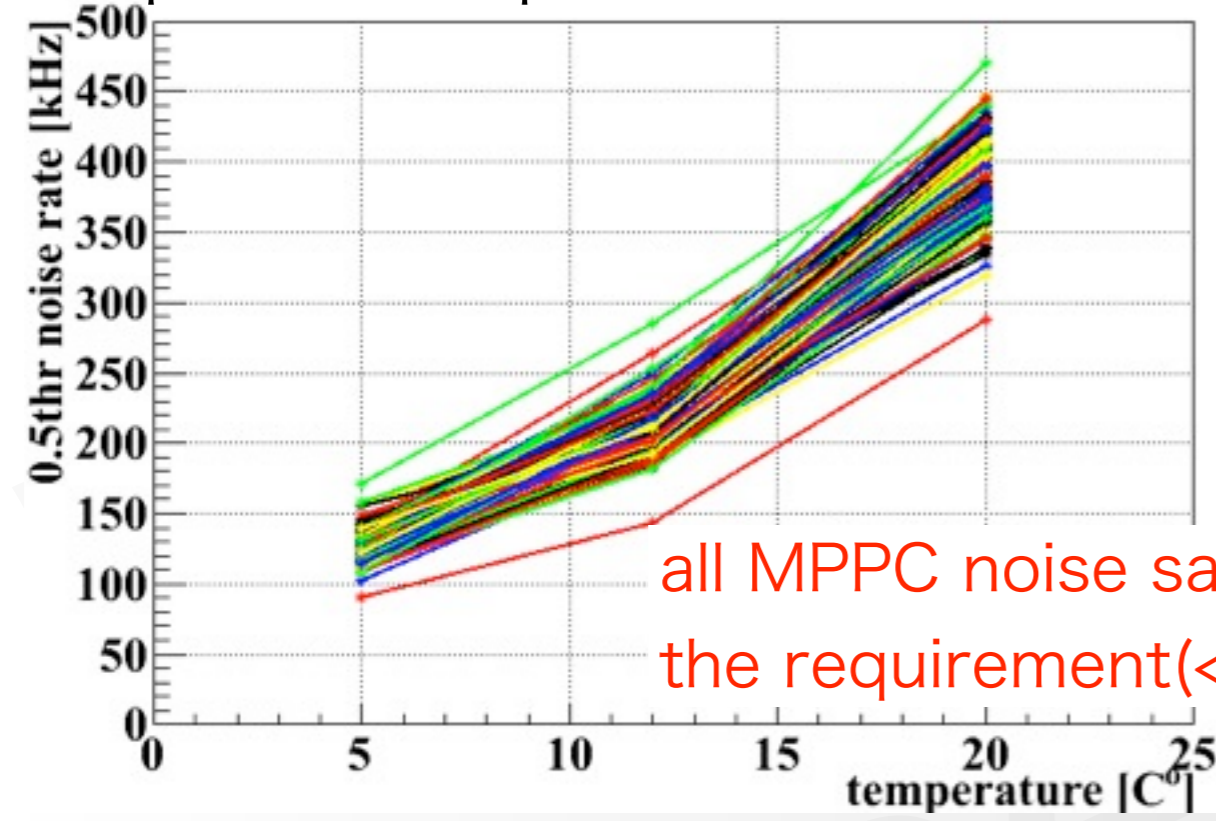
see the Appendix

※detail of the measurement is written in the Appendix



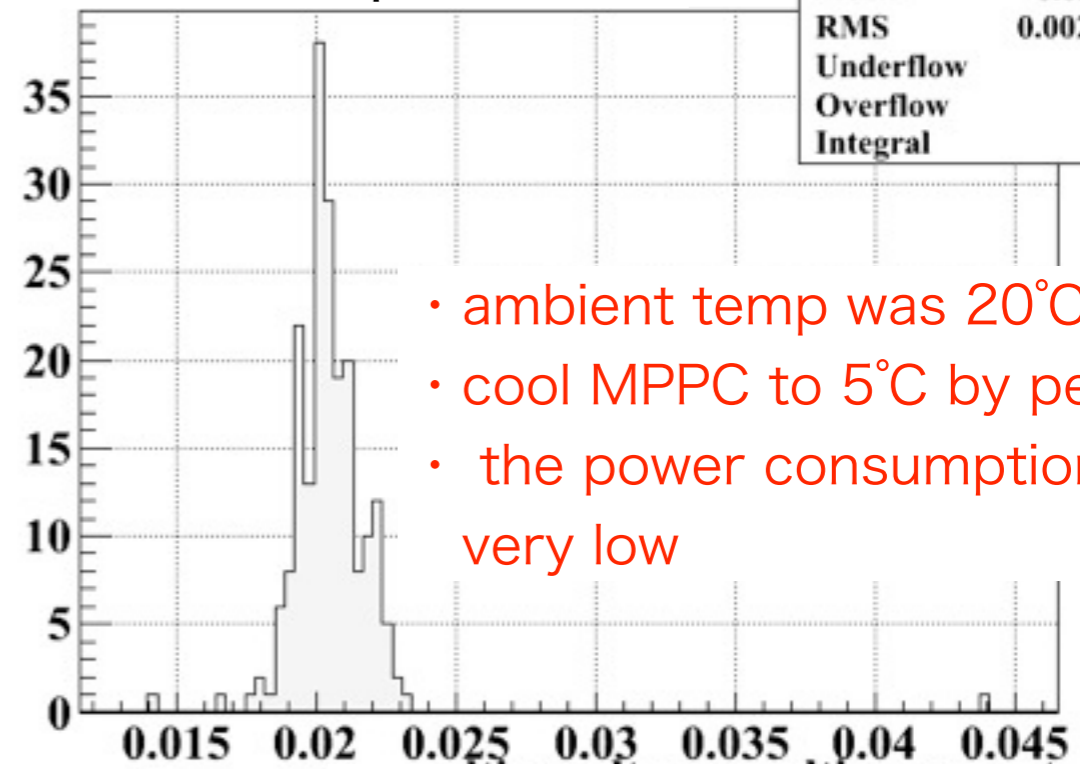
~result~

temperature dependence of MPPC noise



all MPPC noise satisfy the requirement (<math>< 2\text{MHz}</math>)

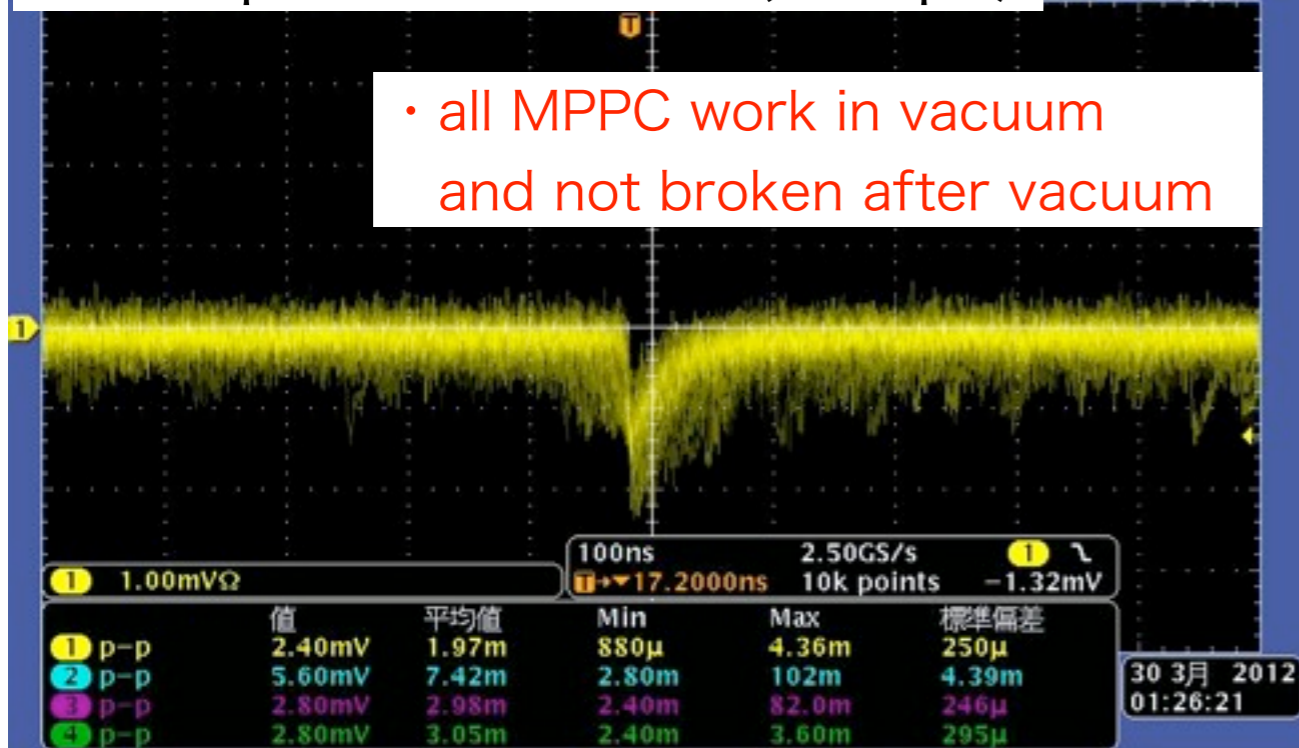
power consumption



- ambient temp was 20°C
- cool MPPC to 5°C by peltier
- the power consumption was very low

power consumption [W]

MPPC pulse in vacuum (@10pa)



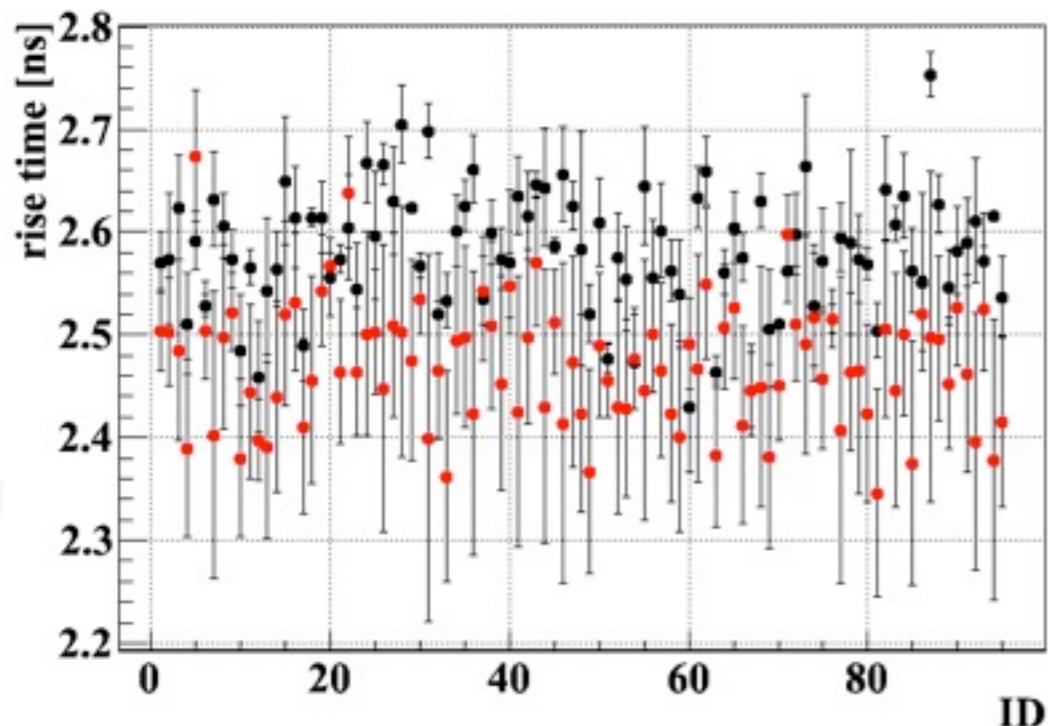
all MPPC work in vacuum and not broken after vacuum

- MPPC noise : low enough
- peltier consumption : low enough
- fracturing test in vacuum : not broken

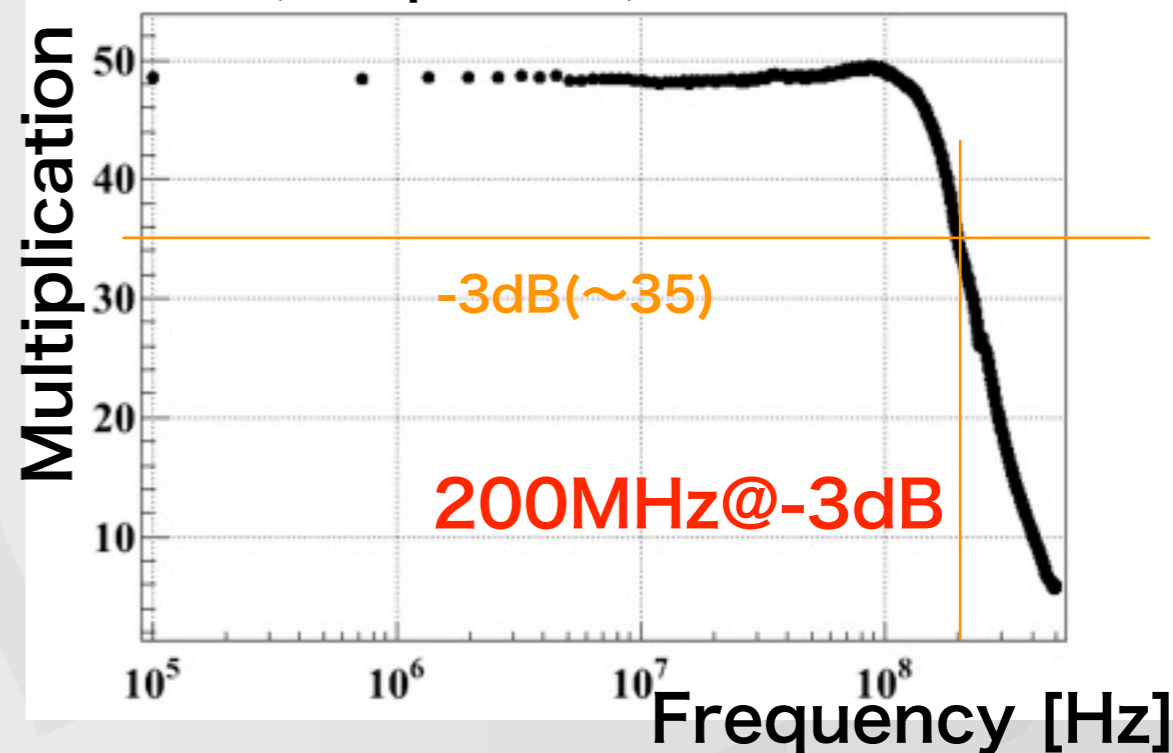
• all MPPCs are ready for June run

~result : band width ~

rise time Vs ID (black:ch1、red:ch2)

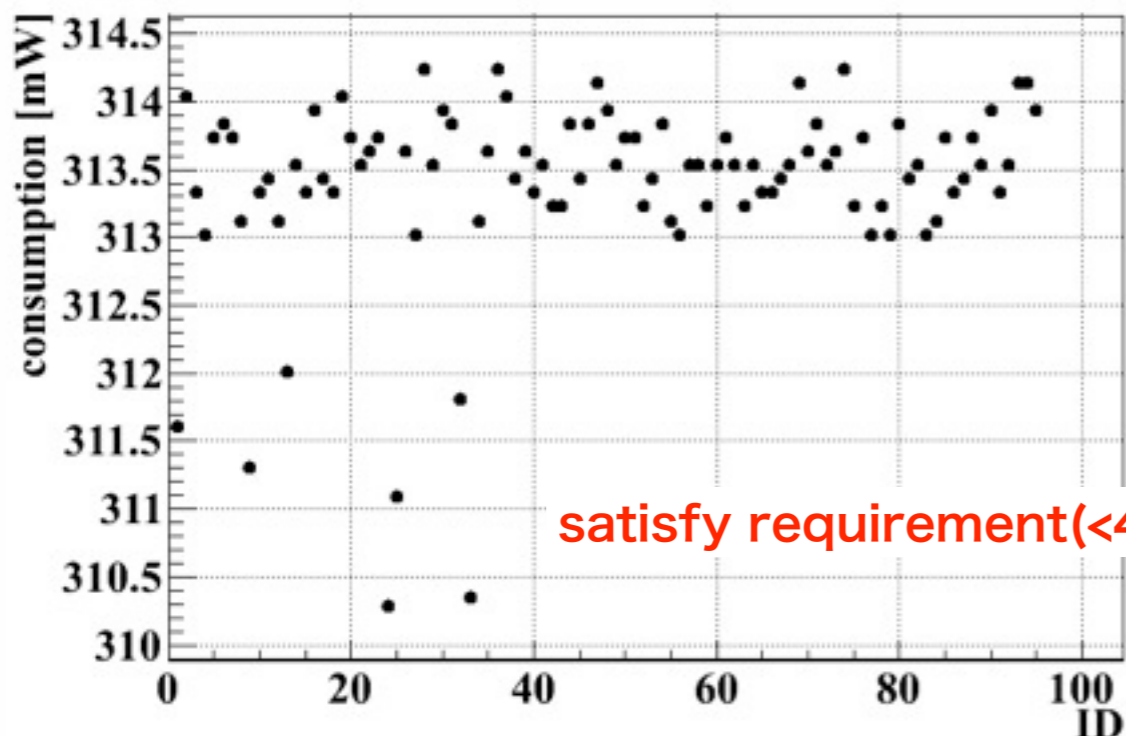


result of spectrum analyzing (sample test)



- input impulse and evaluate rise time  
→ensure amplifying without loss

power consumption(2ch sum) Vs ID



- achieve fast response
- power consumption satisfy the requirement
- all preamp are ready for June run





# Performance check of preamp

~check item and requirement~

item	requirement	note
noise	low	to monitor 1 p.e. of MPPC
multiplicity	>50	to monitor 1 p.e. of MPPC
power consumption	<200mW	capacity of water cooling system
band width	<100MHz	to amplify signal without loss

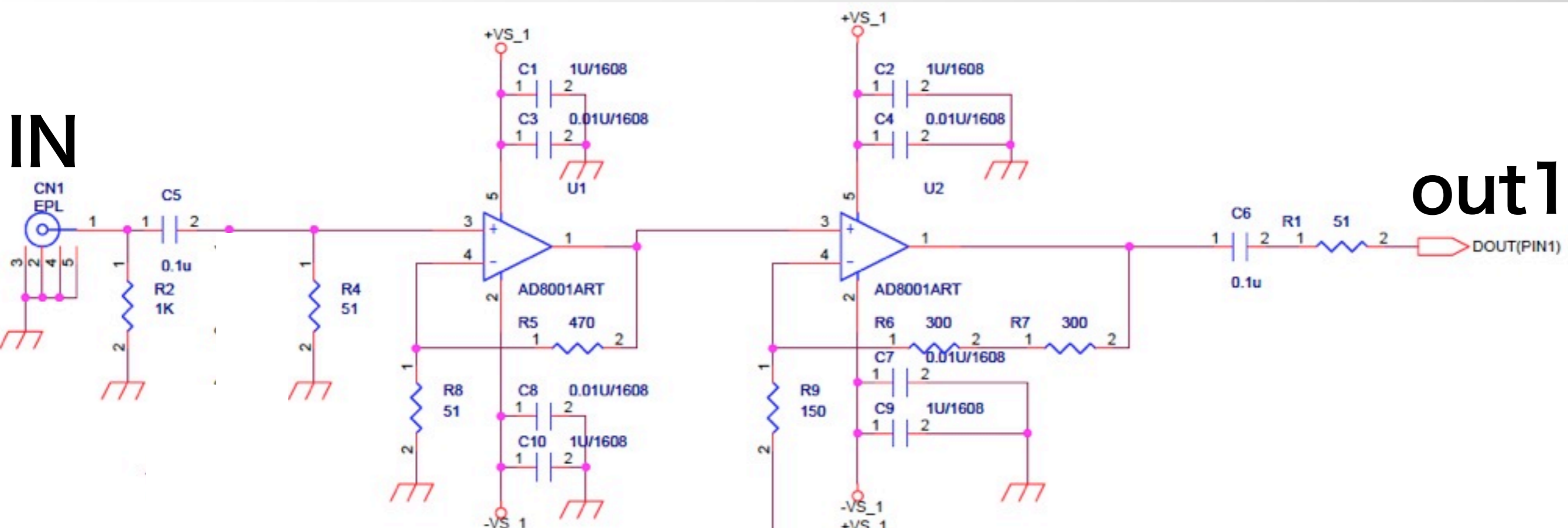


# Performance check of preamp

~design of preamp~

IN

out1



ch1

ch2

out2

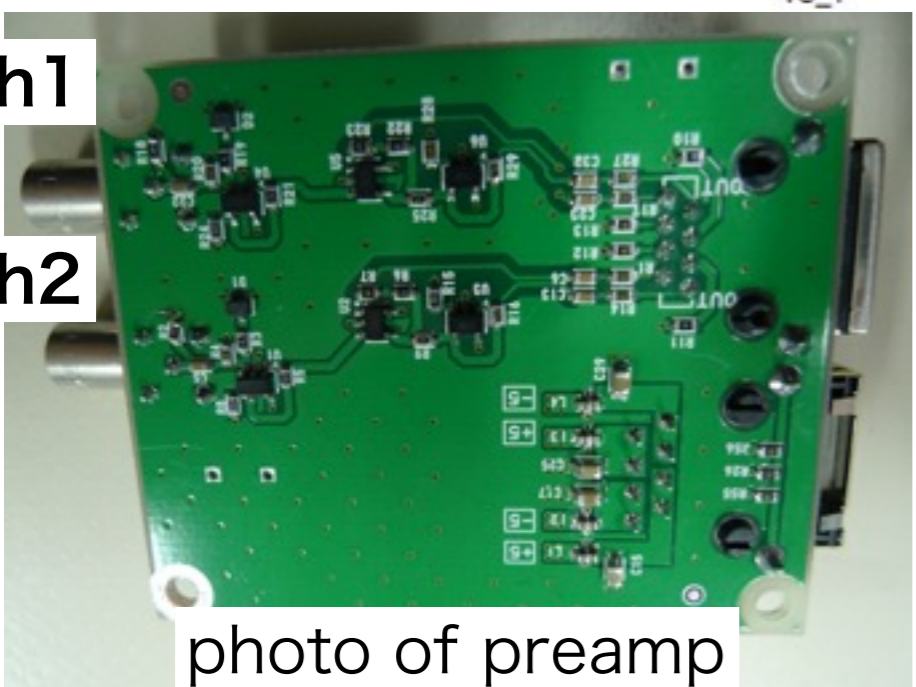
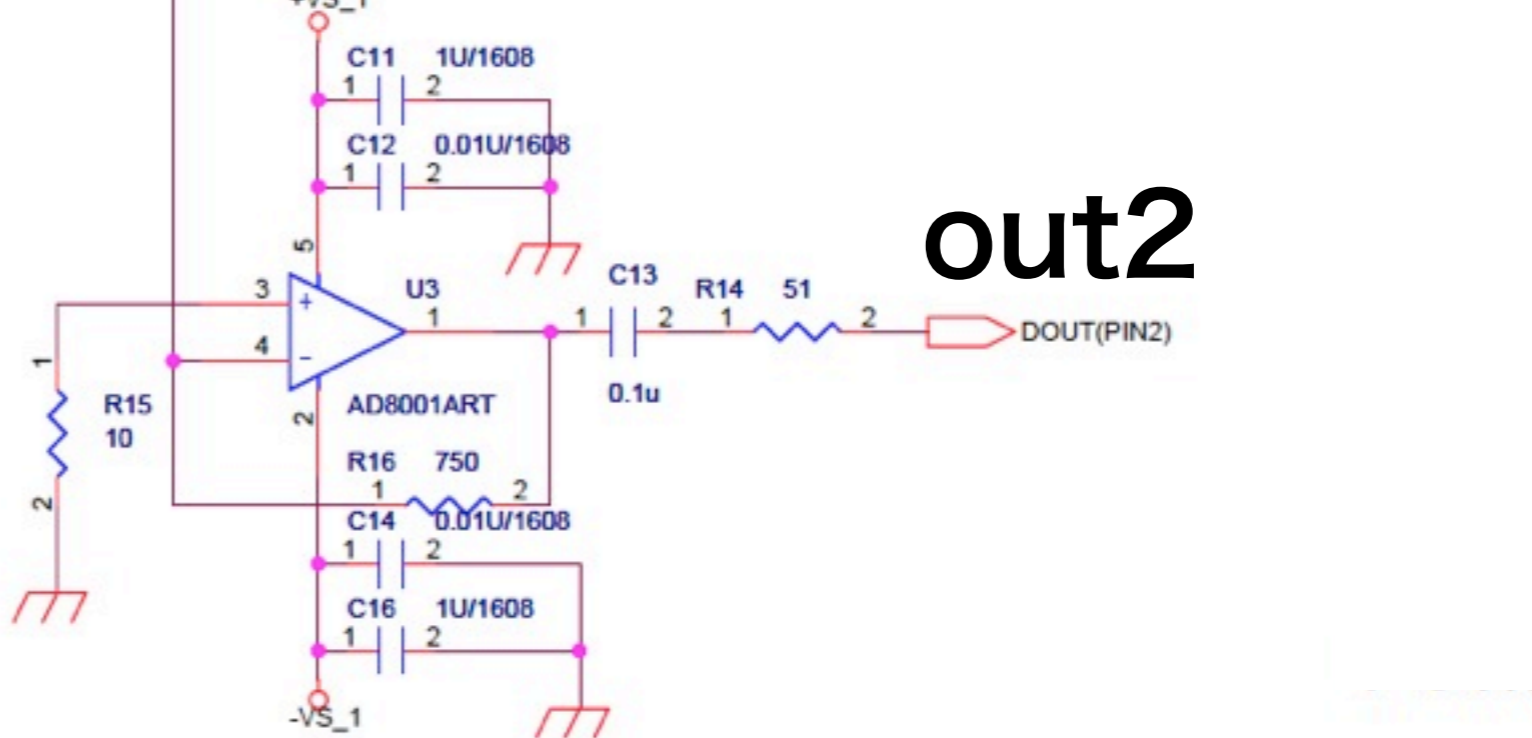


photo of preamp



- design multiplicity : non-inverted(10.2)+differential(2.5x2)=51
- signal and supply voltage are transmitted by LAN cable
- mount 2circuit in the same board, need 92 boards for CV





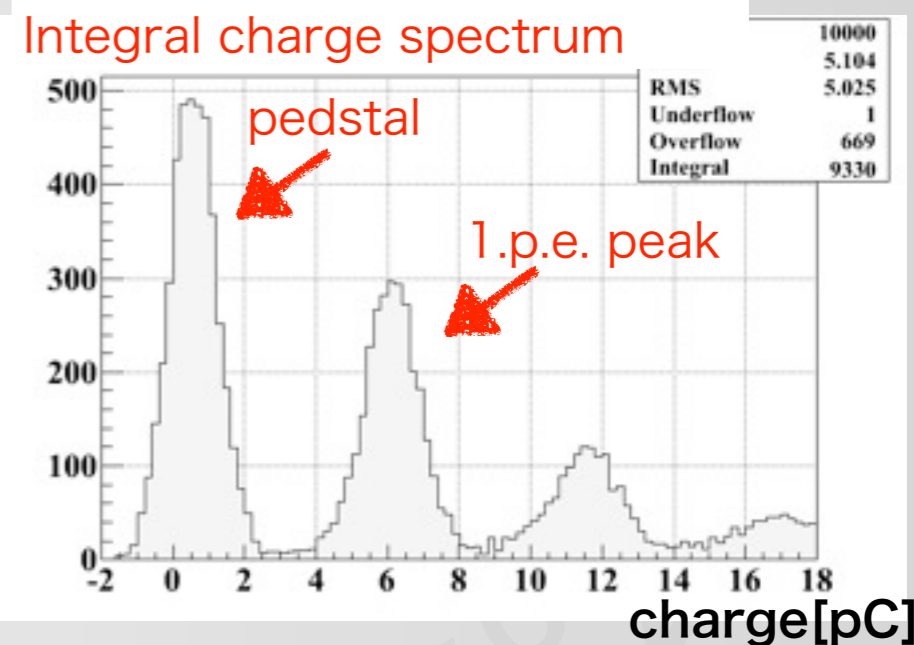
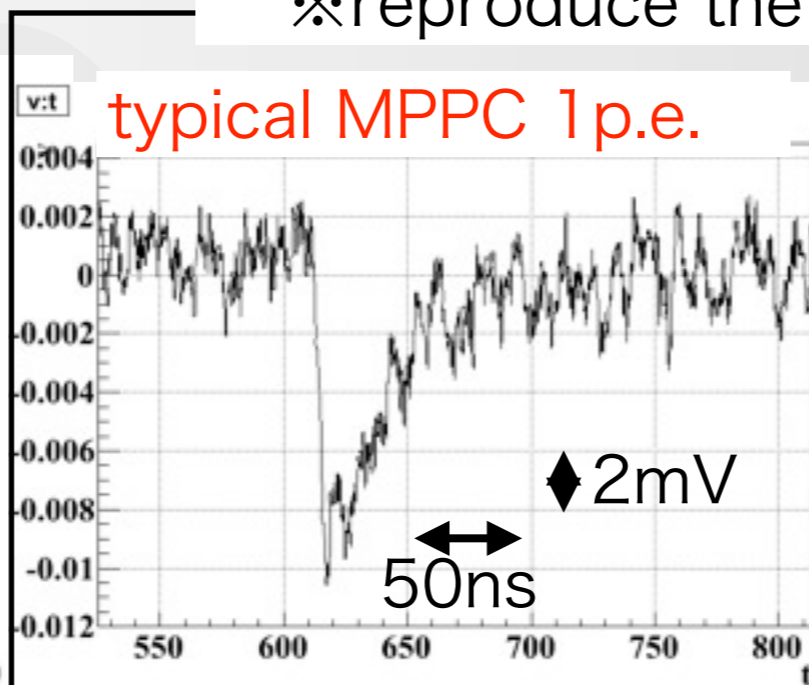
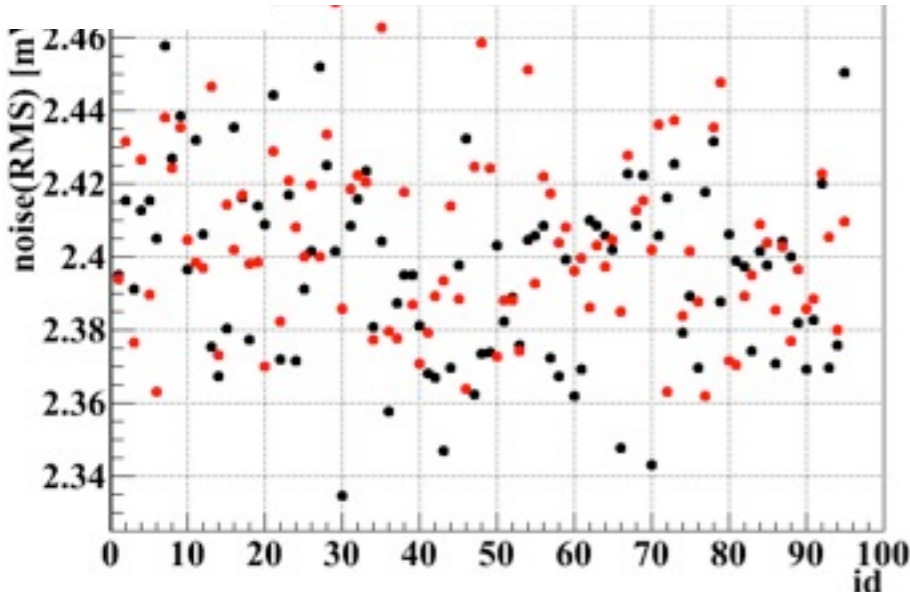
# Performance check of preamp

~result : noise and multiplicity~

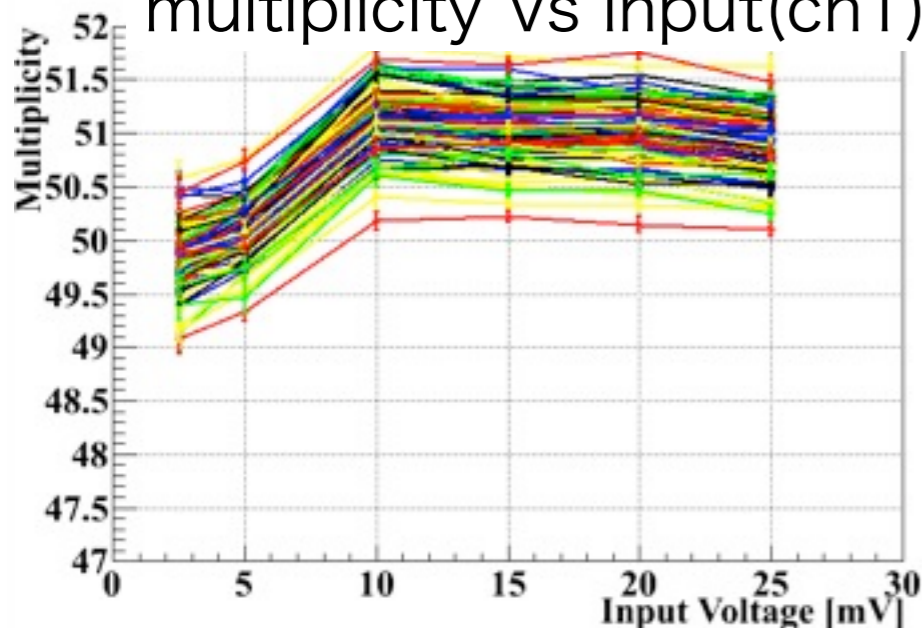
Input MPPC signal to preamp(sample test)

※reproduce the experimental condition

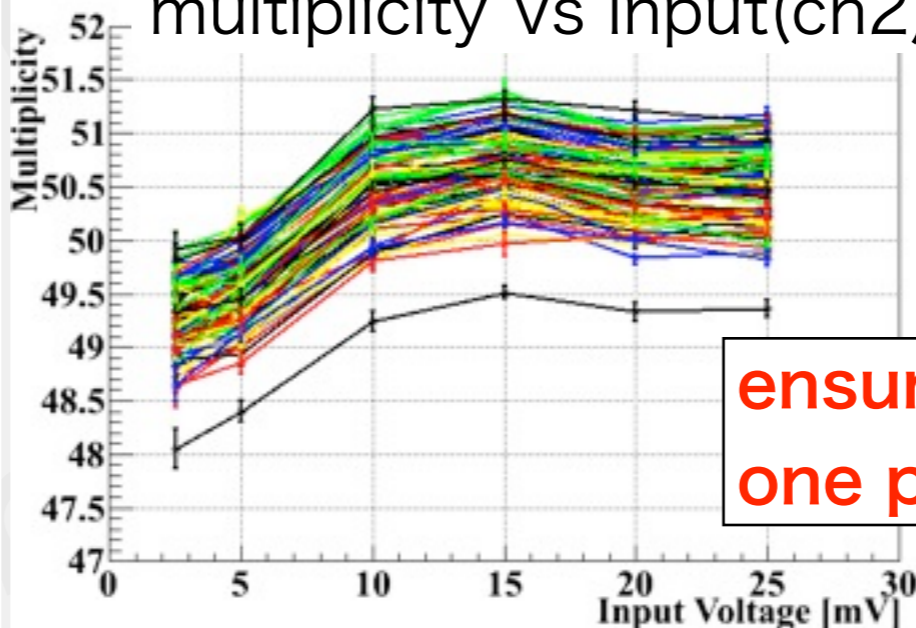
noise Vs preamp ID  
black : ch1、 red : ch2



multiplicity Vs Input(ch1)



multiplicity Vs Input(ch2)

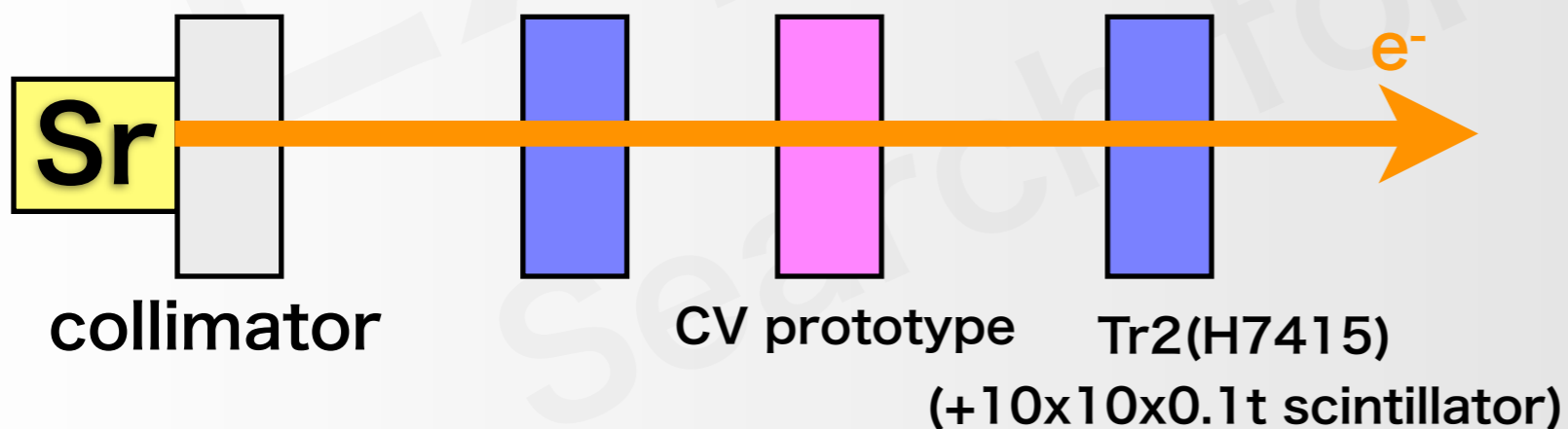
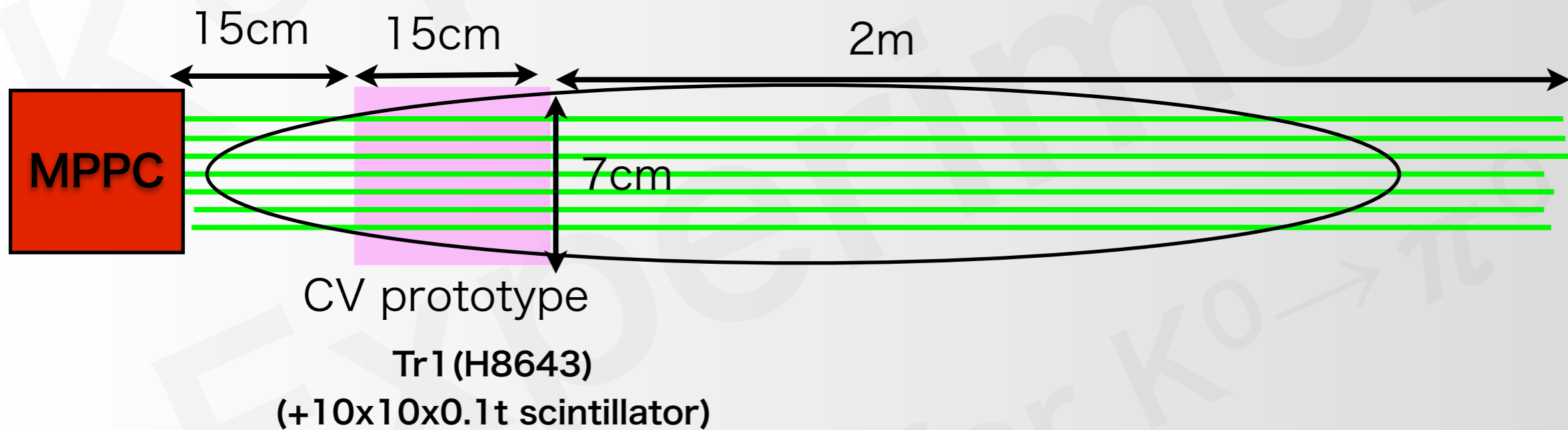


ensure monitoring  
one p.e. for the experiment

- check multiplicity equivalent to CV signal between 0.5 MIP and 5MIP
- Multiplicity : satisfy the requirement(50)
- ※nonlinearity : < 2.5% → enough to veto charged particle at CV

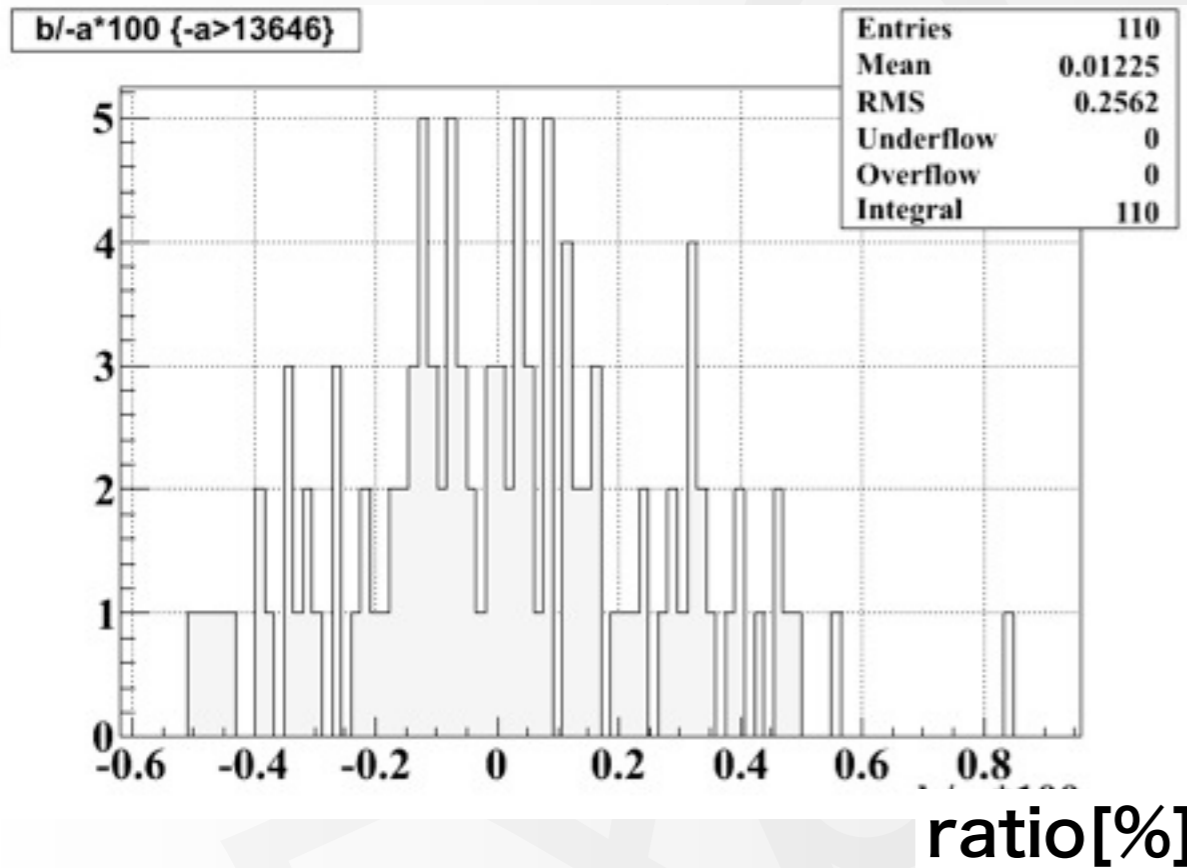


- use 22.5m Lan Cable
- measure mip signal by oscilloscope
- check cross talk in the LAN cable

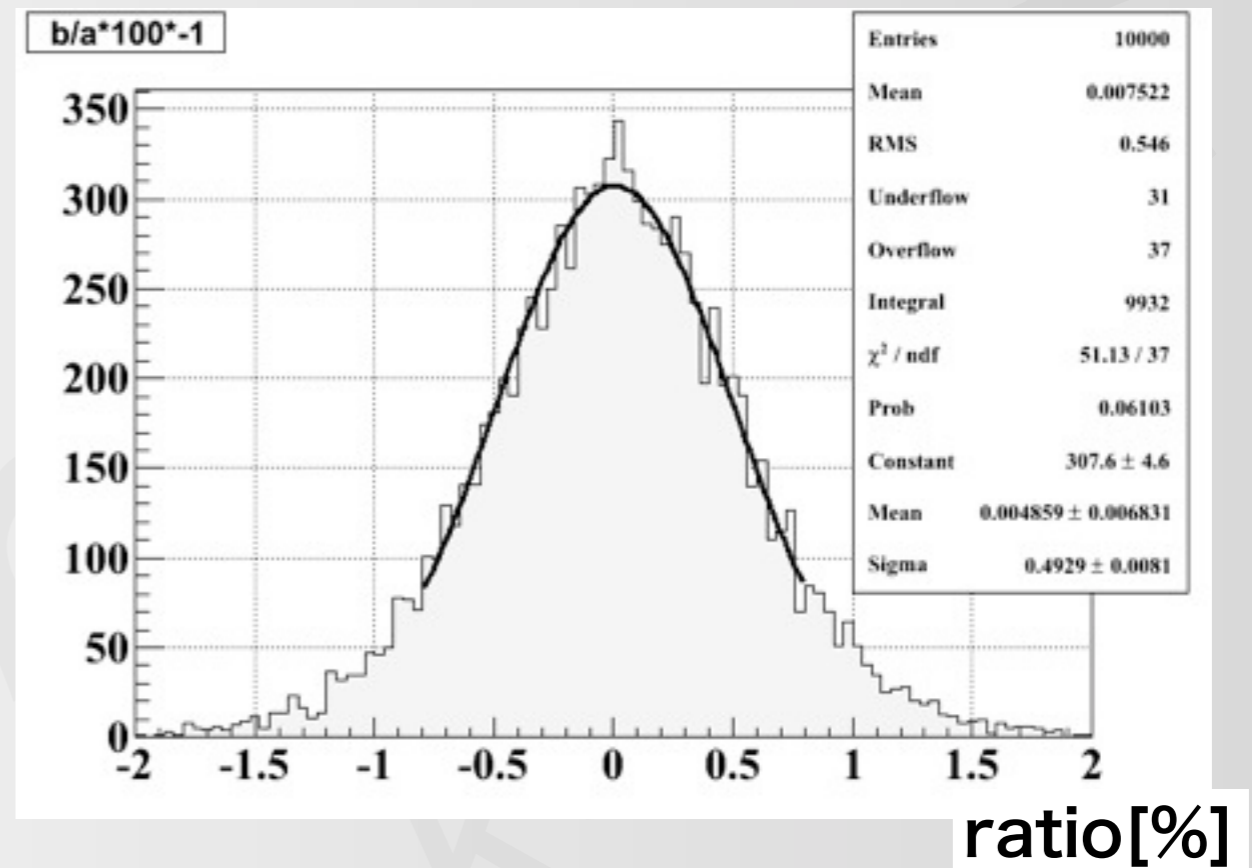




- integral pulse(200ns) after subtraction of pedestal
- check the ratio, channel with no signal/channel with MPPC signal



more than 2 MIPs



all signal

- cross talk > unsteadiness from noise were measured
- cross talk is negligible