

# K<sup>0</sup>TO実験におけるCharged Vetoの コントロールシステム

京大理、KEK<sup>A</sup>、岡山大<sup>B</sup>

増田孝彦、関繁人、内藤大地、前田陽祐

河崎直樹、塩見公志、南條創

野村正<sup>A</sup>、笹尾登<sup>B</sup>

for the K<sup>0</sup>TO Collaboration



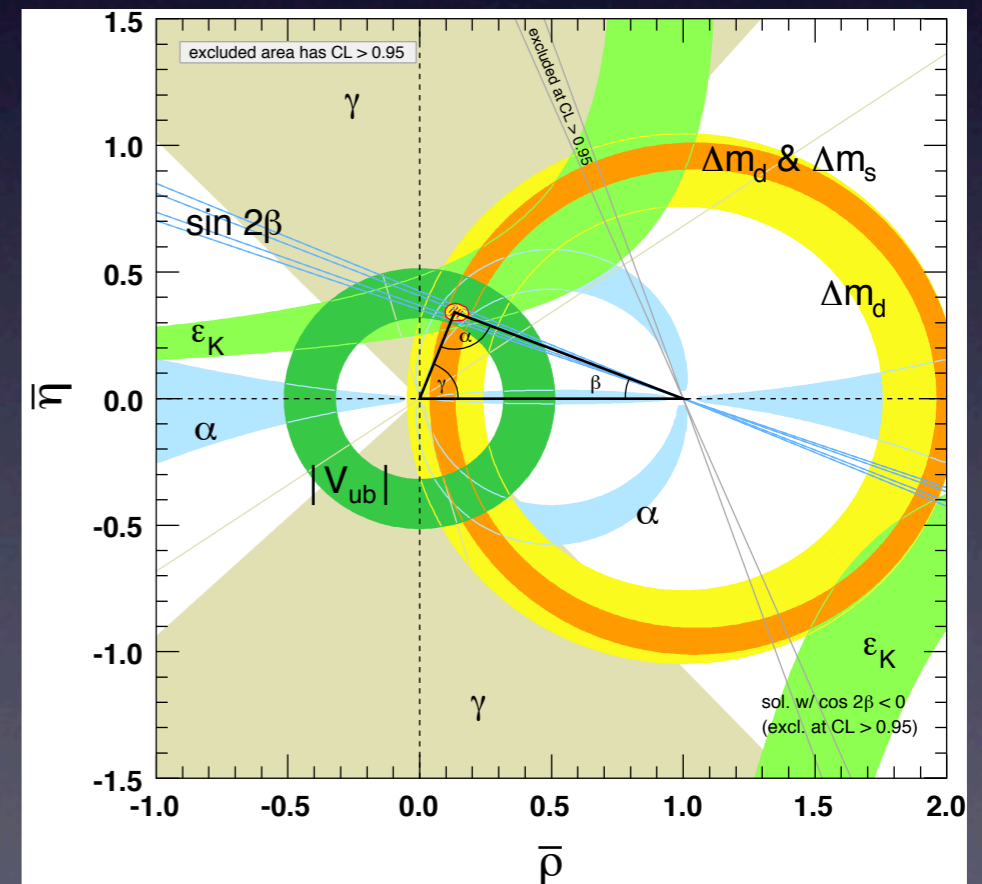
- Introduction
  - K<sup>o</sup>TO実験
  - Charged Veto
    - 構成
    - コントロールシステム
  - MPPCの制御

# K<sup>0</sup>TO experiment

- K<sup>0</sup>TO (K<sup>0</sup> at TOkai)
  - $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  : 長寿命中性K中間子( $K_L$ )の稀崩壊探索実験
    - $\text{Br}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \propto \eta^2 \sim 2.5 \times 10^{-11}$

- 実験目的

- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊事象の発見
- 崩壊分岐比測定による  
CPVパラメータ $\eta$ の直接決定



K. Nakamura *et al.* (Particle Data Group), J. Phys. G **37**, 075021 (2010)

# Concept

- 信号の同定

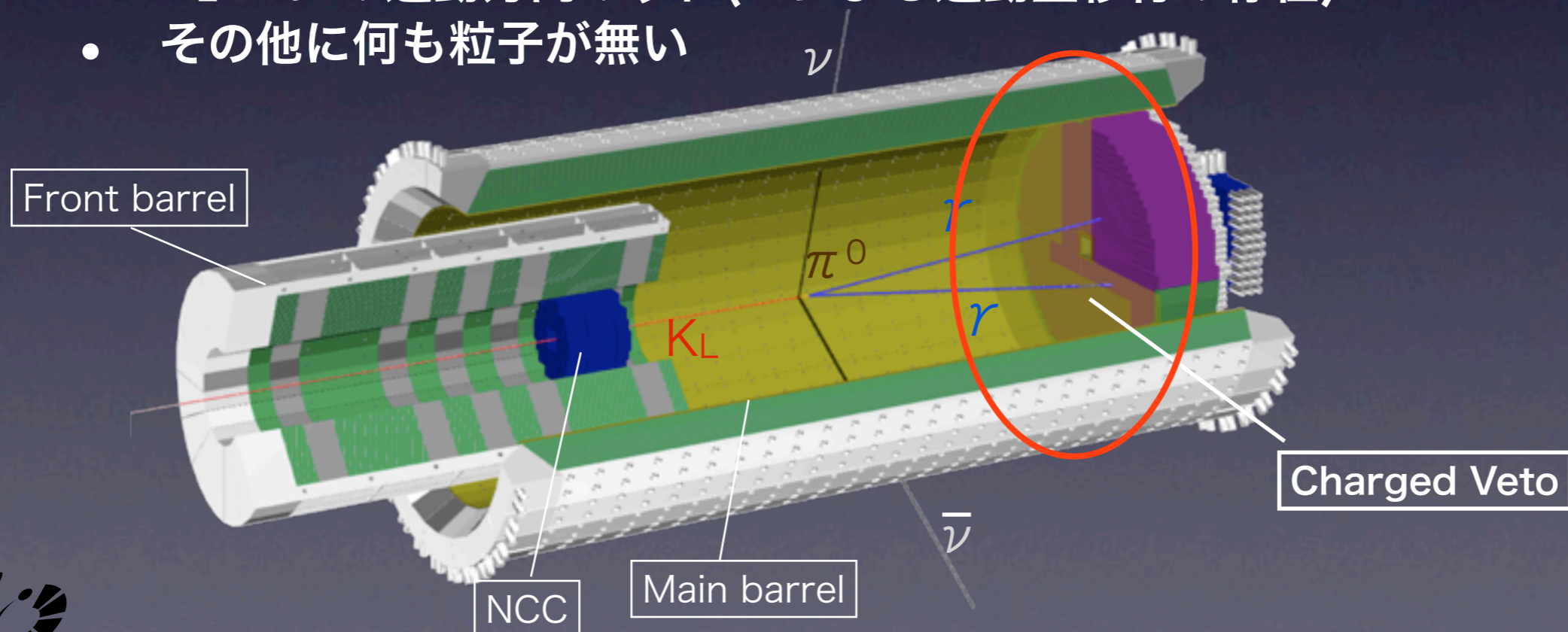
- $\nu$  は検出できないので、 $\pi^0$ からの崩壊粒子を見る

- $\pi^0$ の崩壊モード

- $\pi^0 \rightarrow e^+e^- \gamma$  荷電粒子のtrackingによる $\pi^0$ の再構成が可能 (Br 1.2%)
- $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  分岐比が大きい (Br 98.8%)

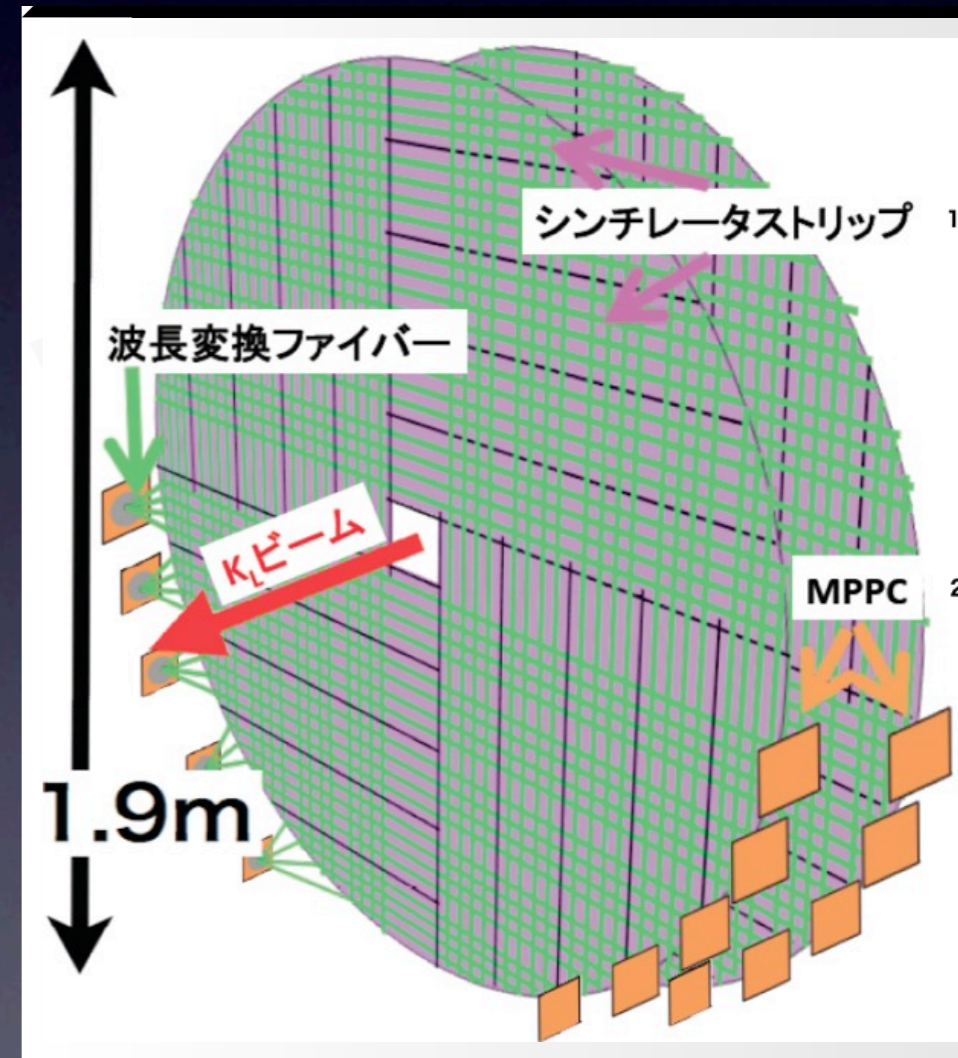
- $\pi^0$ からの $2\gamma$

- CsIカロリメータで $\gamma$ の位置・エネルギーを求め、 $\pi^0$ を再構成
- $K_L$ と $\pi^0$ の運動方向のずれ( $\nu$ による運動量移行の存在)
- その他に何も粒子が無い



# Charged Veto (CV)

- 役割
  - 荷電粒子を含む、 $K_L$ 崩壊由来のB.G.を排除する
    - $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ ,  $K_L \rightarrow \pi e \nu$ , ...
- デザイン
  - 真空中に設置 (0.1Pa)
  - CsIカロリメータの直近と250mm上流に置かれる2層からなる
  - 厚さ3mm、幅70mmのプラスチックシンチレータ92本で構成
  - プラスチックシンチレータ + 波長変換ファイバー + MPPCで読み出し
  - 総チャンネル数 184
- 性能
  - 出力 > 3p.e./100keV
  - 時間分解能 0.8ns



# MPPC

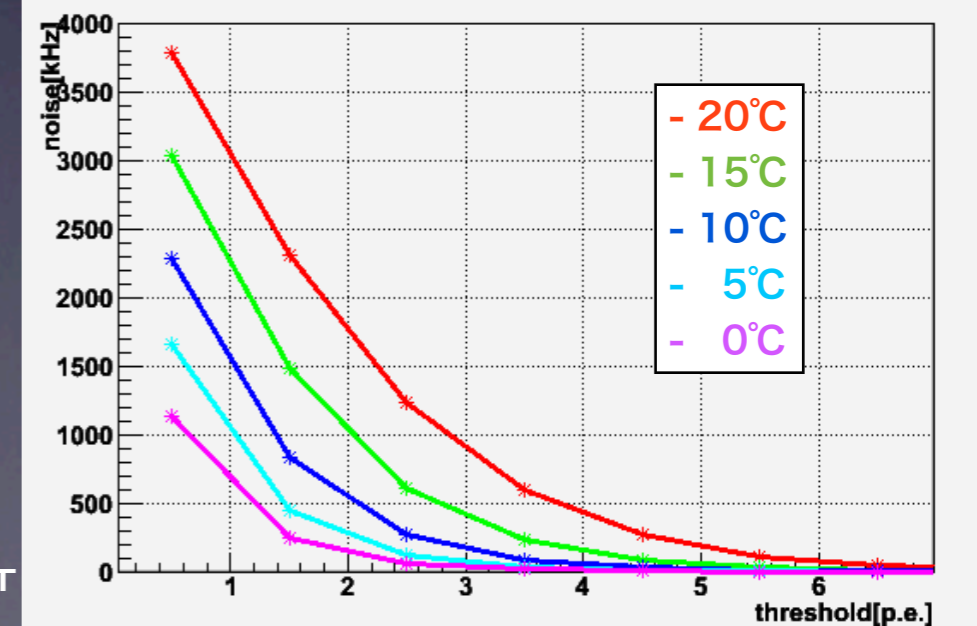
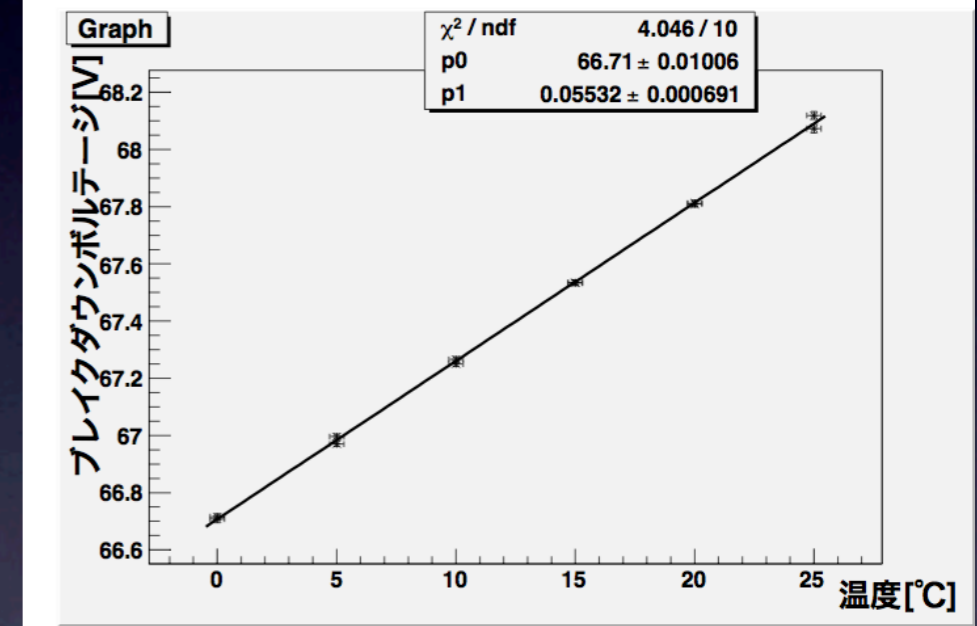
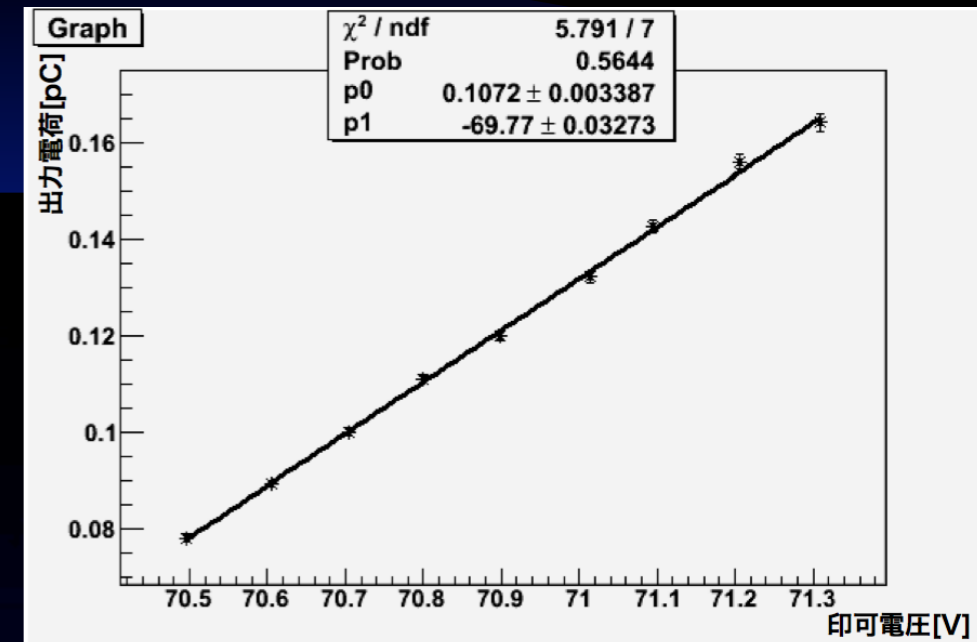
- CVは読み出しにMPPCを用いている

## ✓ MPPCのメリット

- 省スペース
- 高量子効率

## ✗ MPPCのデメリット

- 低ゲイン ( $\sim 10^5$ )
- 高ダークカウントレート ( $\sim 1\text{MHz}$  @  $20^\circ\text{C}$ , 1p.e.)
- 温度依存性
  - Break down voltage ( $50\text{mV}/^\circ\text{C}$ )
  - 量子効率( $5\%/^\circ\text{C}$ )
  - ダークカウントレート(右下図)



# MPPC

- CVは読み出しにMPPCを用いている

## ✓ MPPCのメリット

- 省スペース
- 高量子効率

## ✗ MPPCのデメリット

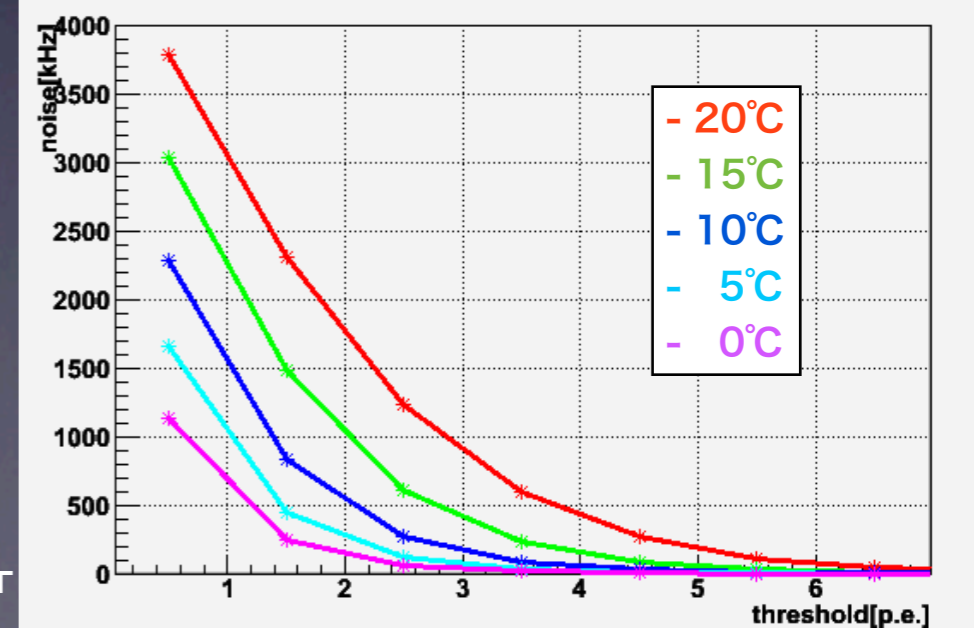
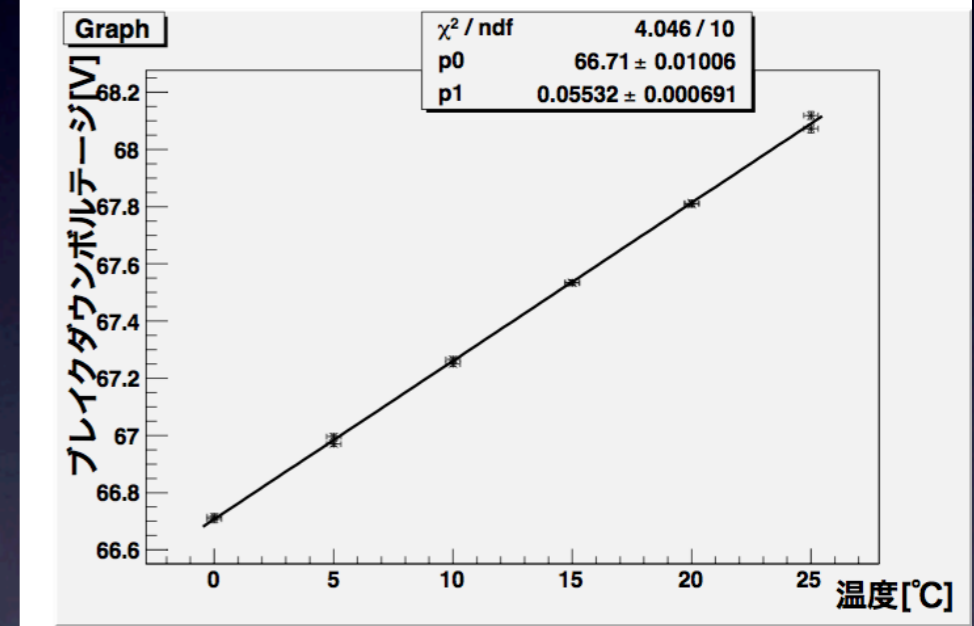
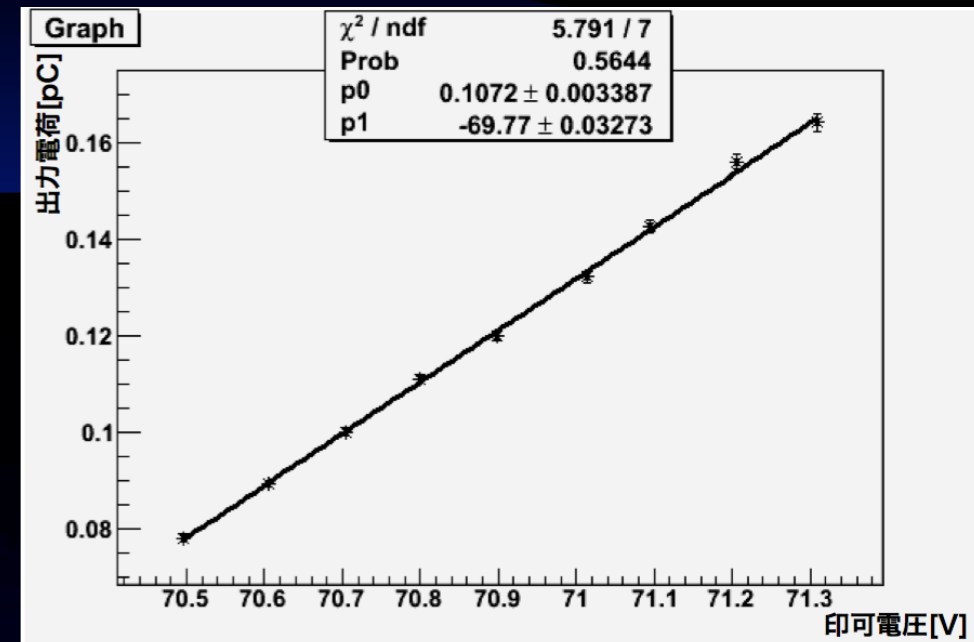
- 低ゲイン ( $\sim 10^5$ )
- 高ダークカウントレート ( $\sim 1\text{MHz}$  @  $20^\circ\text{C}$ , 1p.e.)
- 温度依存性
  - Break down voltage ( $50\text{mV}/^\circ\text{C}$ )
  - 量子効率( $5\%/^\circ\text{C}$ )
  - ダークカウントレート(右下図)

安定的に動作させるには**温度を一定に保つ**

システムを構築する必要がある

低ダークカウントレートで使用するために

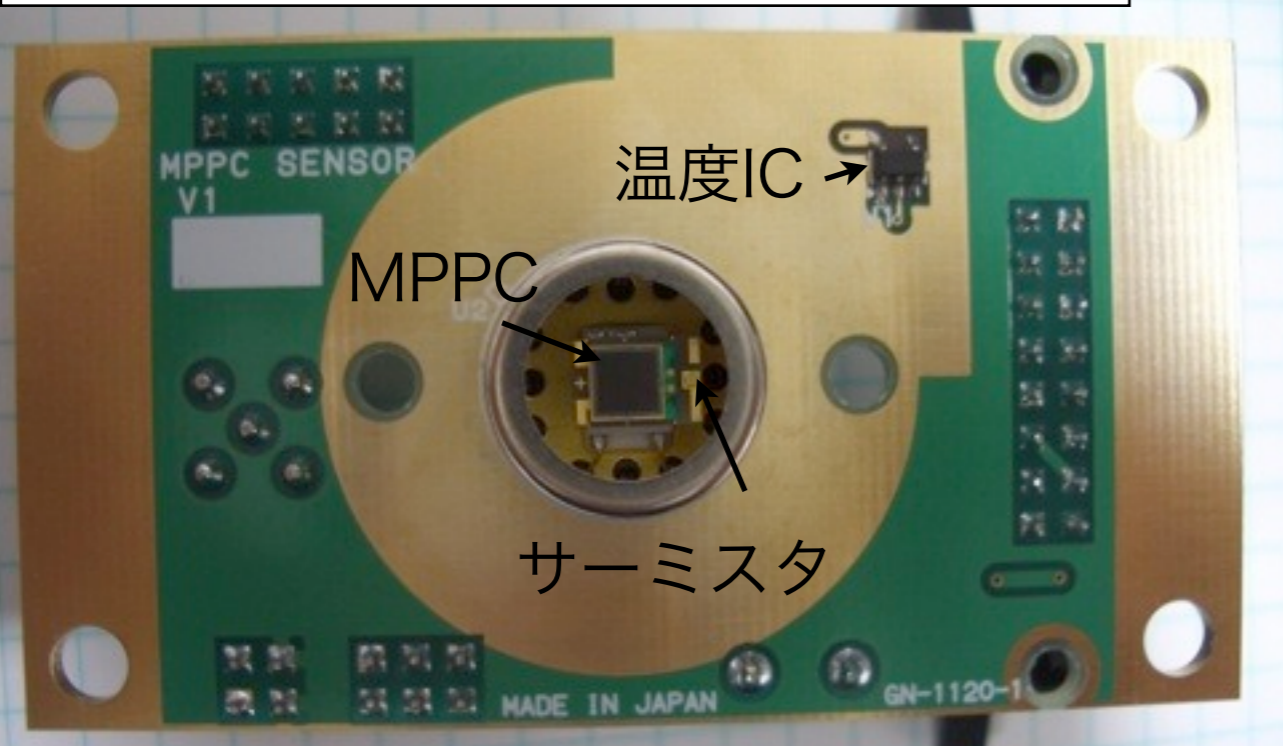
**低温で動作させるのが望ましい**



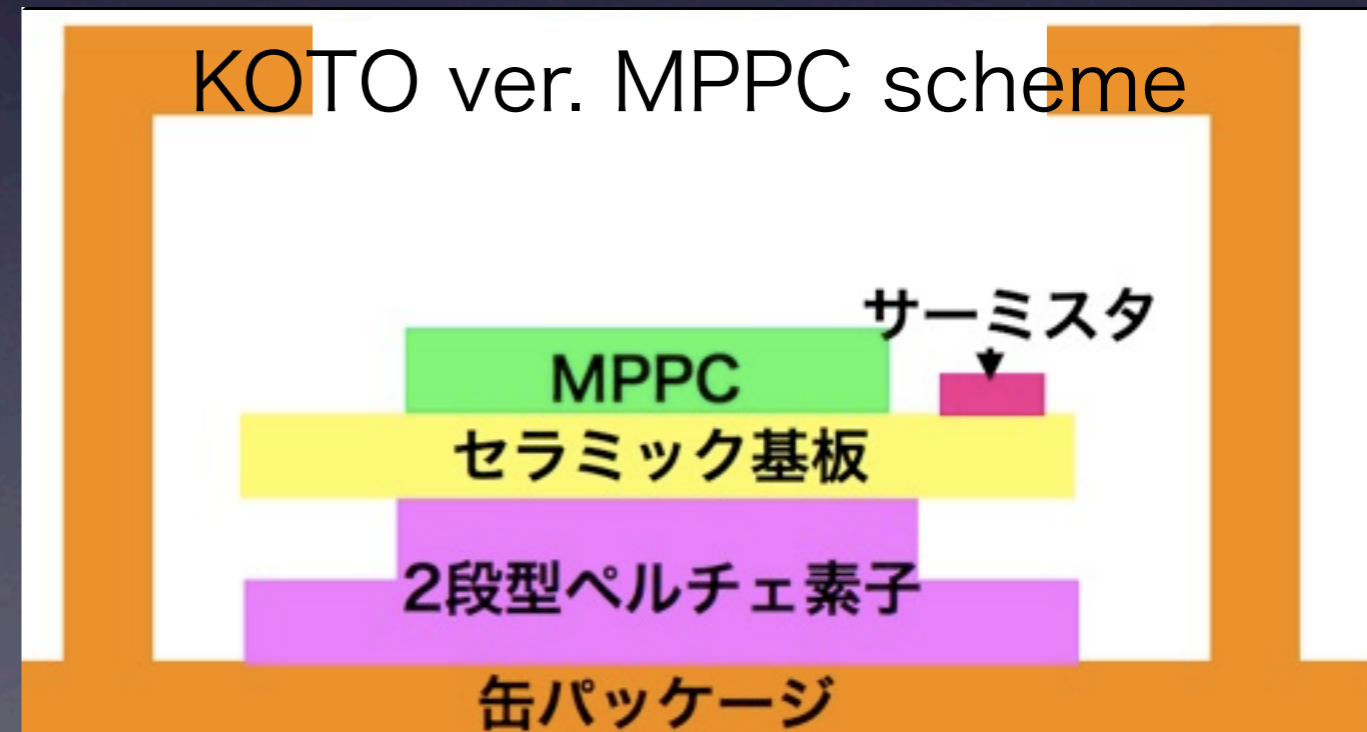
# MPPC温度コントロール

- K<sup>o</sup>TO実験では、MPPCの温度をコントロールするため  
浜松ホトニクスと共同で  
「ペルチェ冷却型MPPC」を開発した。
  - ピクセルサイズ 50×50μm<sup>2</sup>
  - 受光面 3×3mm<sup>2</sup>
  - 2段型ペルチェ素子内蔵

K<sup>o</sup>TO-MPPCボードに実装した状態



KOTO ver. MPPC scheme





# CV コントロールシステム

- 184個のMPPCに対して、1ch毎に
  - Main bias(-70V)のON/OFF
  - Biasコントロール
    - Gain調整
  - 温度コントロール
    - 全てのMPPCを  $5 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$  に調整する
    - Gain, Noise, Q.E.の安定化
  - Amp.の電源ON/OFF
- その他、正常動作を保証する各種電圧・電流モニター
  - MPPCの消費電流( $\sim 0.1\mu\text{A}$ )、温度モニターなど

# CVコントロール

- システム概要

	Control	Monitor	Note
MPPC bias	Negative bias (-70V) ON/OFF	Negative bias voltage	1ch毎にBiasのOn/Offを行う
	Control bias 0-5V	Control bias voltage	1ch毎にGain調整
		Bias current (0.1 $\mu$ A)	MPPCに流れている暗電流の確認
MPPC temp.	Temperature feedback	Peltier voltage (100mV)	MPPCの温度調整
		Peltier current (100mA)	ペルチェ電流調整
		Thermistor resistance (10k $\Omega$ )	MPPCの温度測定
		Temperature monitor	K <sup>o</sup> TO-MPPC boardの温度測定
Amp.	Power supply( $\pm$ 5V) ON/OFF	Power supply voltage( $\pm$ 5V)	1ch毎にAmp.のOn/Offを行う
		Power supply current(15mA)	プリアンプの消費電流を確認

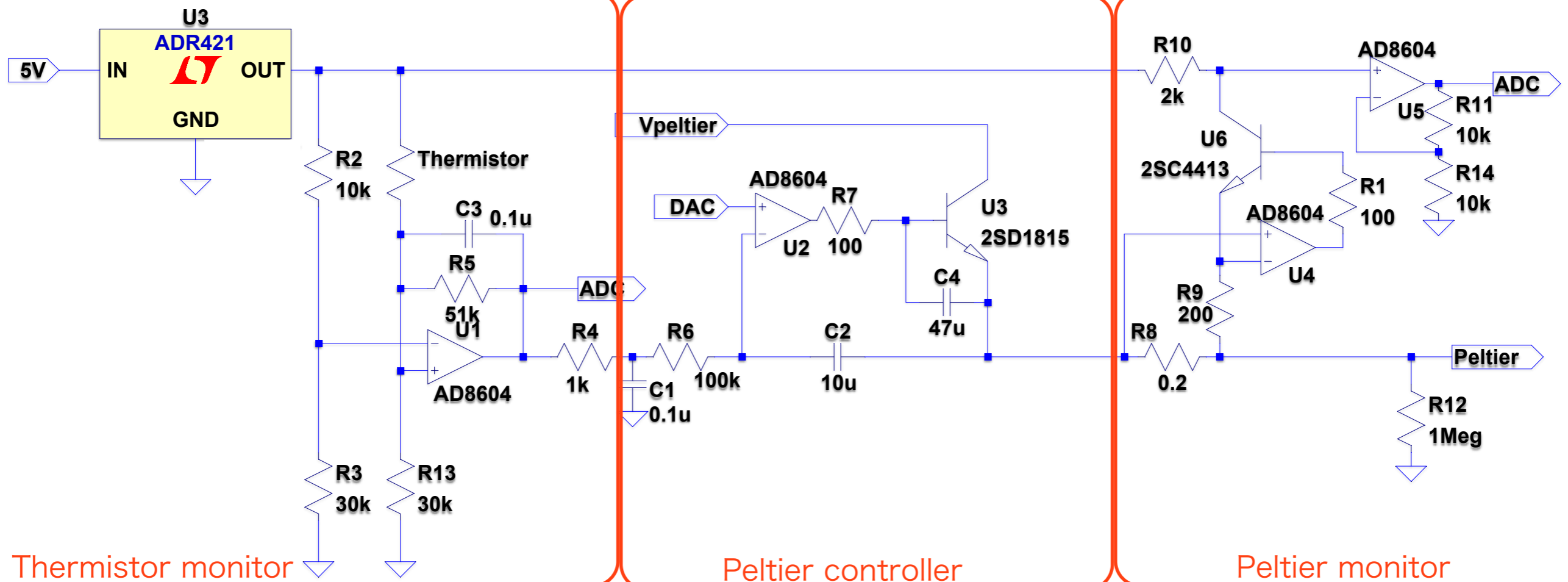
# CVコントロール

- システム概要

	Control	Monitor	Note
MPPC bias	Negative bias (-70V) ON/OFF	Negative bias voltage	1ch毎にBiasのOn/Offを行う
	Control bias 0-5V	Control bias voltage	1ch毎にGain調整
		Bias current (0.1 $\mu$ A)	MPPCに流れている暗電流の確認
MPPC temp.	Temperature feedback	Peltier voltage (100mV)	MPPCの温度調整
		Peltier current (100mA)	ペルチェ電流調整
		Thermistor resistance (10k $\Omega$ )	MPPCの温度測定
		Temperature monitor	K <sup>o</sup> TO-MPPC boardの温度測定
Amp.	Power supply( $\pm$ 5V) ON/OFF	Power supply voltage( $\pm$ 5V)	1ch毎にAmp.のOn/Offを行う
		Power supply current(15mA)	プリアンプの消費電流を確認

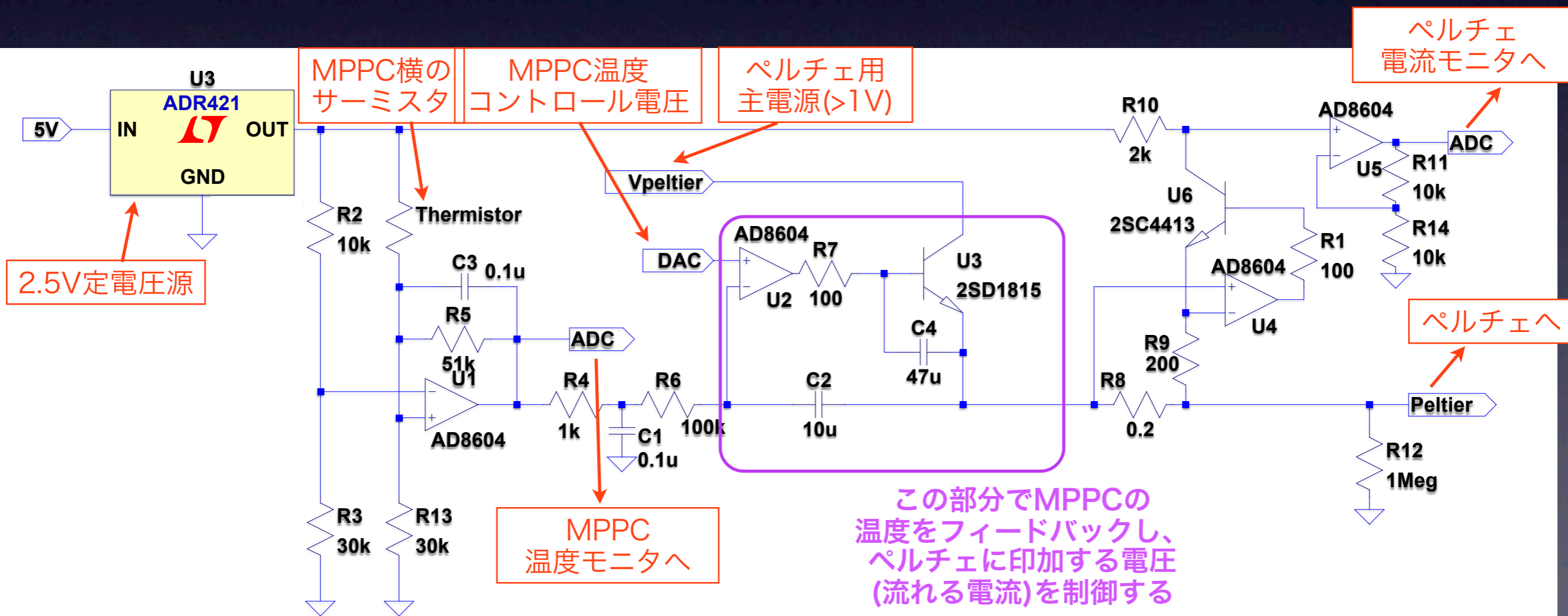
# 温度コントロール回路

- PID制御のうち、I制御のみでコントロール
- アナログ制御なので、運用が簡便
  - MPPC(のすぐ横のサーミスタ)の温度を読み取り、フィードバックをかけてペルチェにかかる電圧(電流)を制御する



# 温度コントロール回路

- PID制御のうち、I制御のみでコントロール
- アナログ制御なので、運用が簡便
  - MPPC(のすぐ横のサーミスタ)の温度を読み取り、フィードバックをかけてペルチェにかかる電圧(電流)を制御する

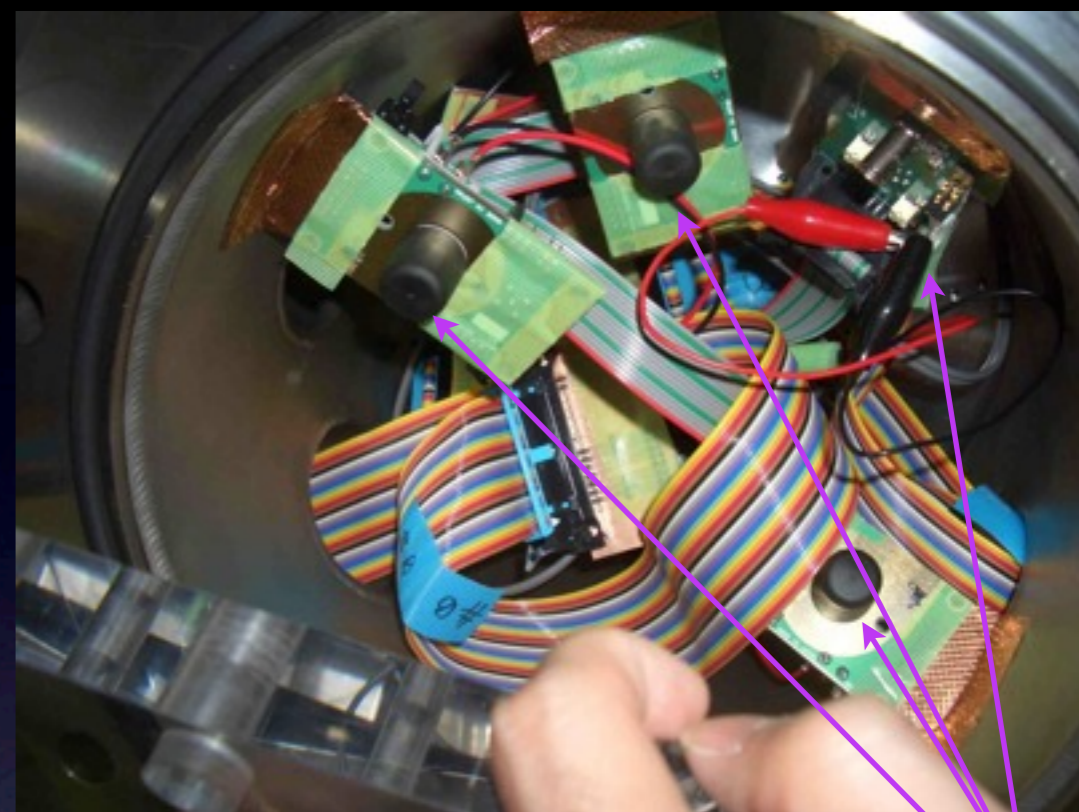
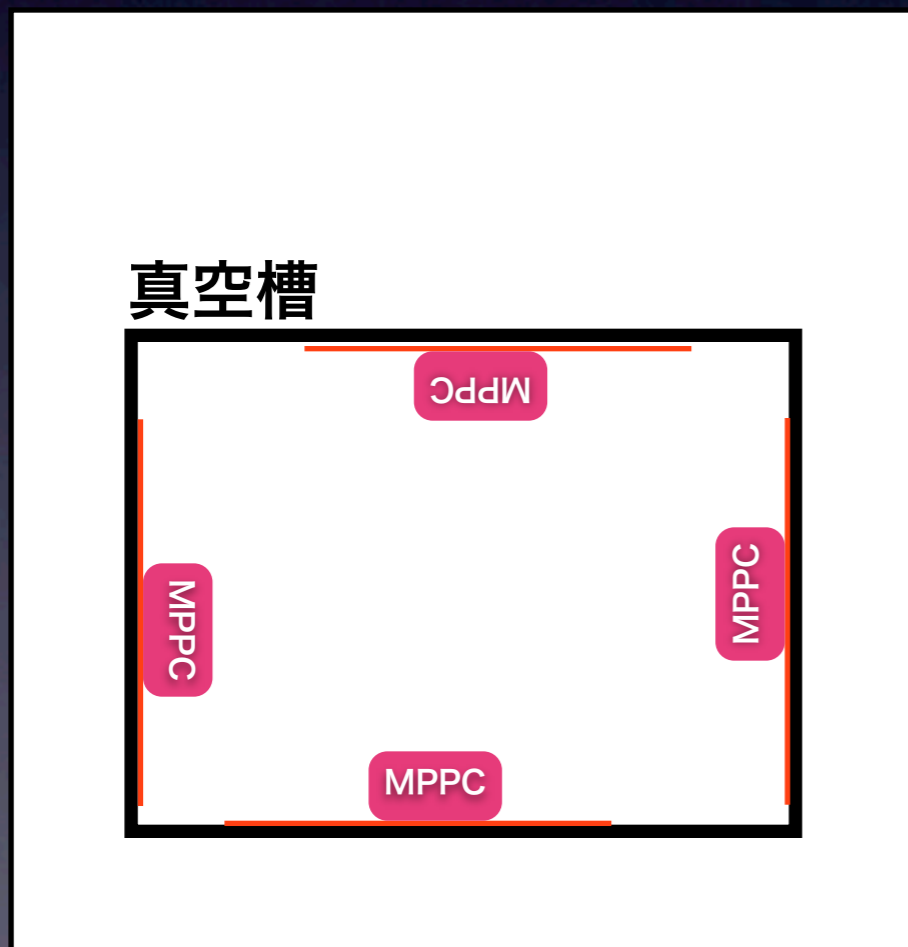


# 試験Set up

試作した回路を用いて、長期試験を行った

- MPPC4個を真空槽に封入(20Pa前後)
- MPPCの基板と真空槽を銅テープで熱接触
- 真空槽自体を恒温槽に入れ、温度コントロール

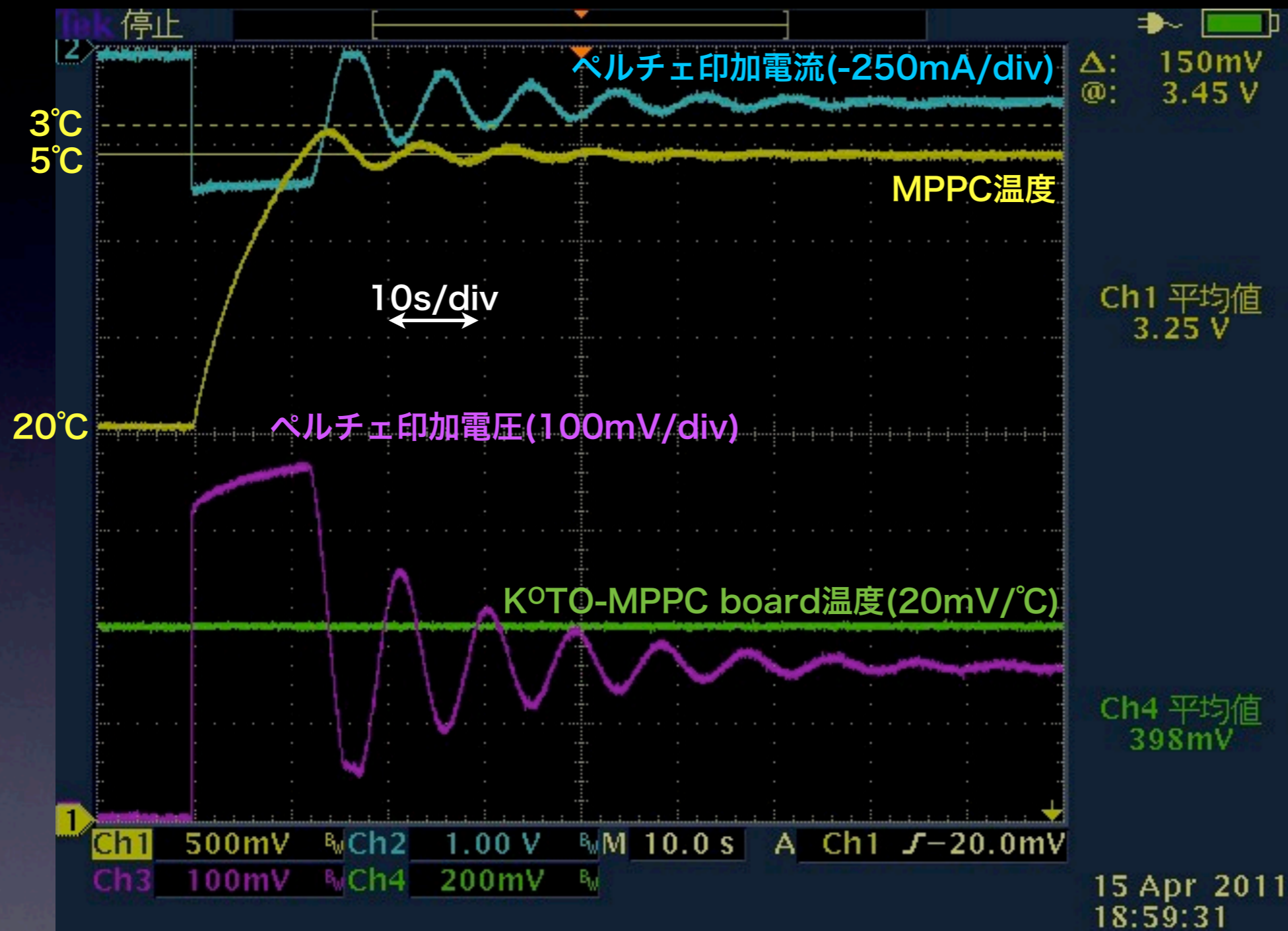
恒温槽



MPPC



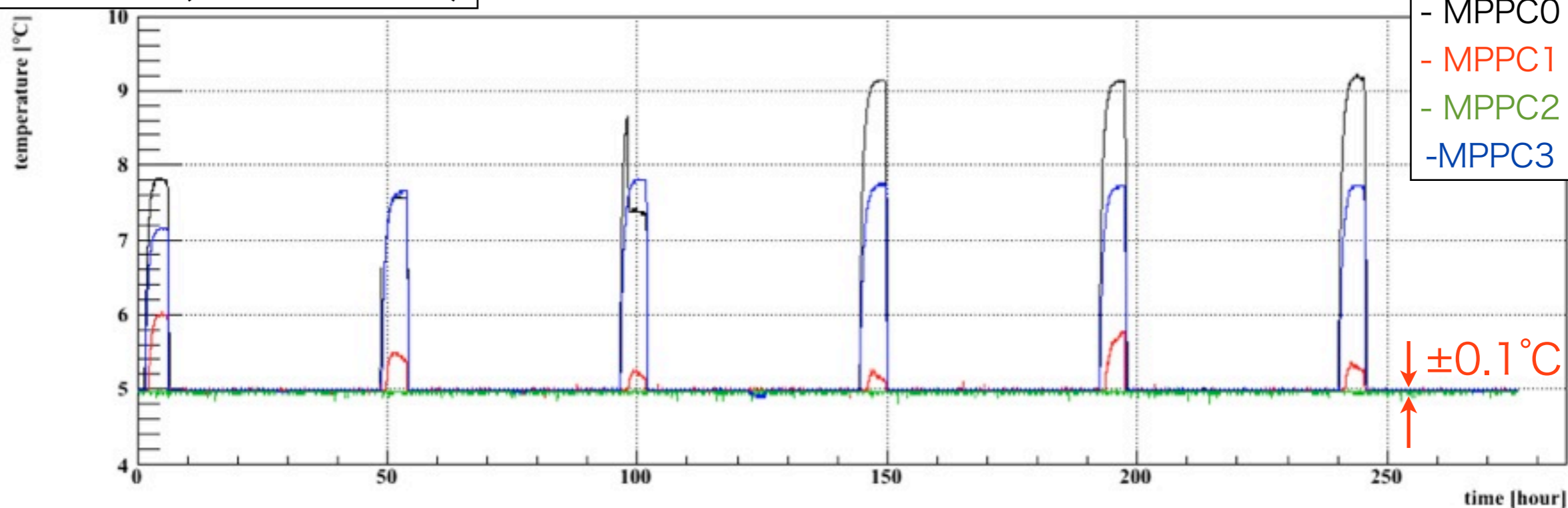
# 初期変化 (20°C→5°C)



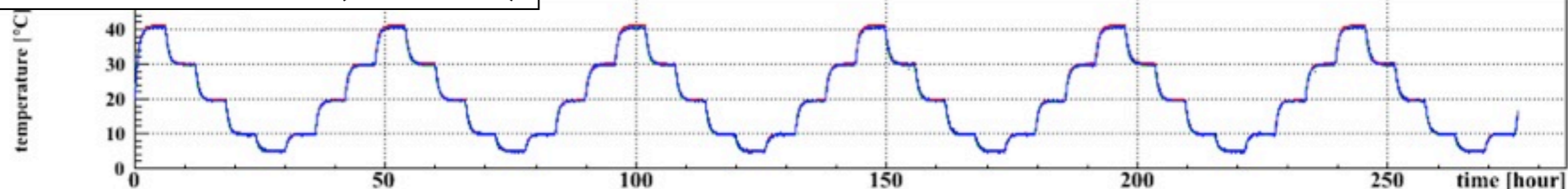
- 約1分で安定化

# 長期温度サイクル試験

MPPCの温度 (サーミスタで測定)



KOTO-MPPCボードの温度 (恒温槽で設定)



- ±0.1°C以内で制御できている
- 高温側が30°Cを超えた辺りで飽和している
- $V_{peltier}$ (ペルチェ用電源電圧)を上げればもっと冷やすことは可能だが、コントロール回路側の発熱が大きくなるので、なるべく低電圧で使いたい。

真空度	20Pa
$V_{peltier}$	1V
設定値	5°C



# CVコントロール

- システム概要

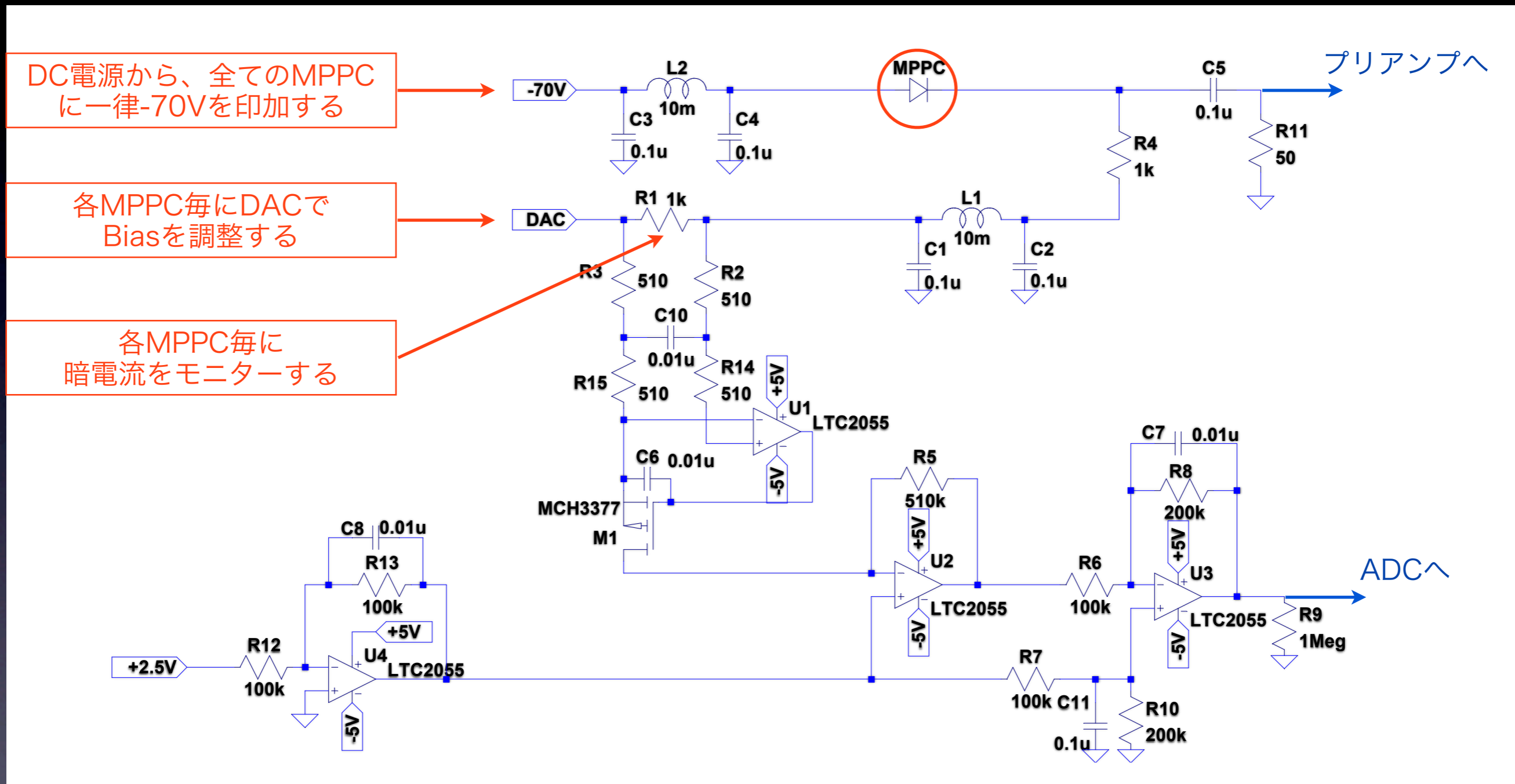
	Control	Monitor	Note
MPPC bias	Negative bias (-70V) ON/OFF	Negative bias voltage	1ch毎にBiasのOn/Offを行う
	Control bias 0-5V	Control bias voltage	1ch毎にGain調整
		Bias current (0.1 $\mu$ A)	MPPCに流れている暗電流の確認
MPPC temp.	Temperature feedback	Peltier voltage (100mV)	MPPCの温度調整
		Peltier current (100mA)	ペルチェ電流調整
		Thermistor resistance (10k $\Omega$ )	MPPCの温度測定
		Temperature monitor	K $^{\circ}$ TO-MPPC boardの温度測定
Amp.	Power supply( $\pm$ 5V) ON/OFF	Power supply voltage( $\pm$ 5V)	1ch毎にAmp.のOn/Offを行う
		Power supply current(15mA)	プリアンプの消費電流を確認

# CVコントロール

- システム概要

	Control	Monitor	Note
MPPC bias	Negative bias (-70V) ON/OFF	Negative bias voltage	1ch毎にBiasのOn/Offを行う
	Control bias 0-5V	Control bias voltage	1ch毎にGain調整
		Bias current (0.1 $\mu$ A)	MPPCに流れている暗電流の確認
MPPC temp.	Temperature feedback	Peltier voltage (100mV)	MPPCの温度調整
		Peltier current (100mA)	ペルチェ電流調整
		Thermistor resistance (10k $\Omega$ )	MPPCの温度測定
		Temperature monitor	K <sup>o</sup> TO-MPPC boardの温度測定
Amp.	Power supply( $\pm$ 5V) ON/OFF	Power supply voltage( $\pm$ 5V)	1ch毎にAmp.のOn/Offを行う
		Power supply current(15mA)	プリアンプの消費電流を確認

# Bias コントロール

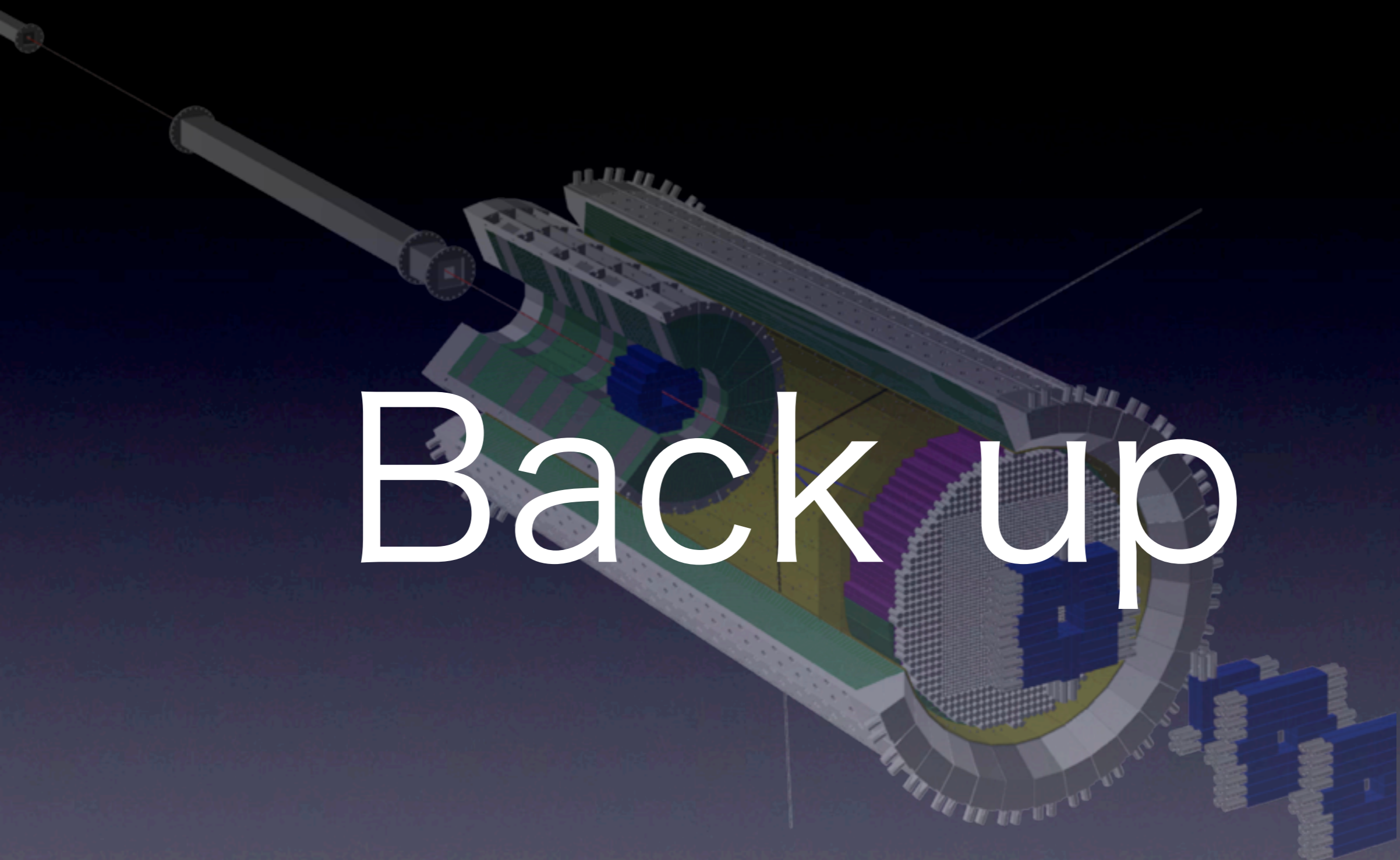


- アノード側(-70V)の電圧は全MPPC一律で固定とし、カソード側の電圧(0~5V)でBiasをコントロール
- MPPCの暗電流を常時モニターし、動作保証に用いる

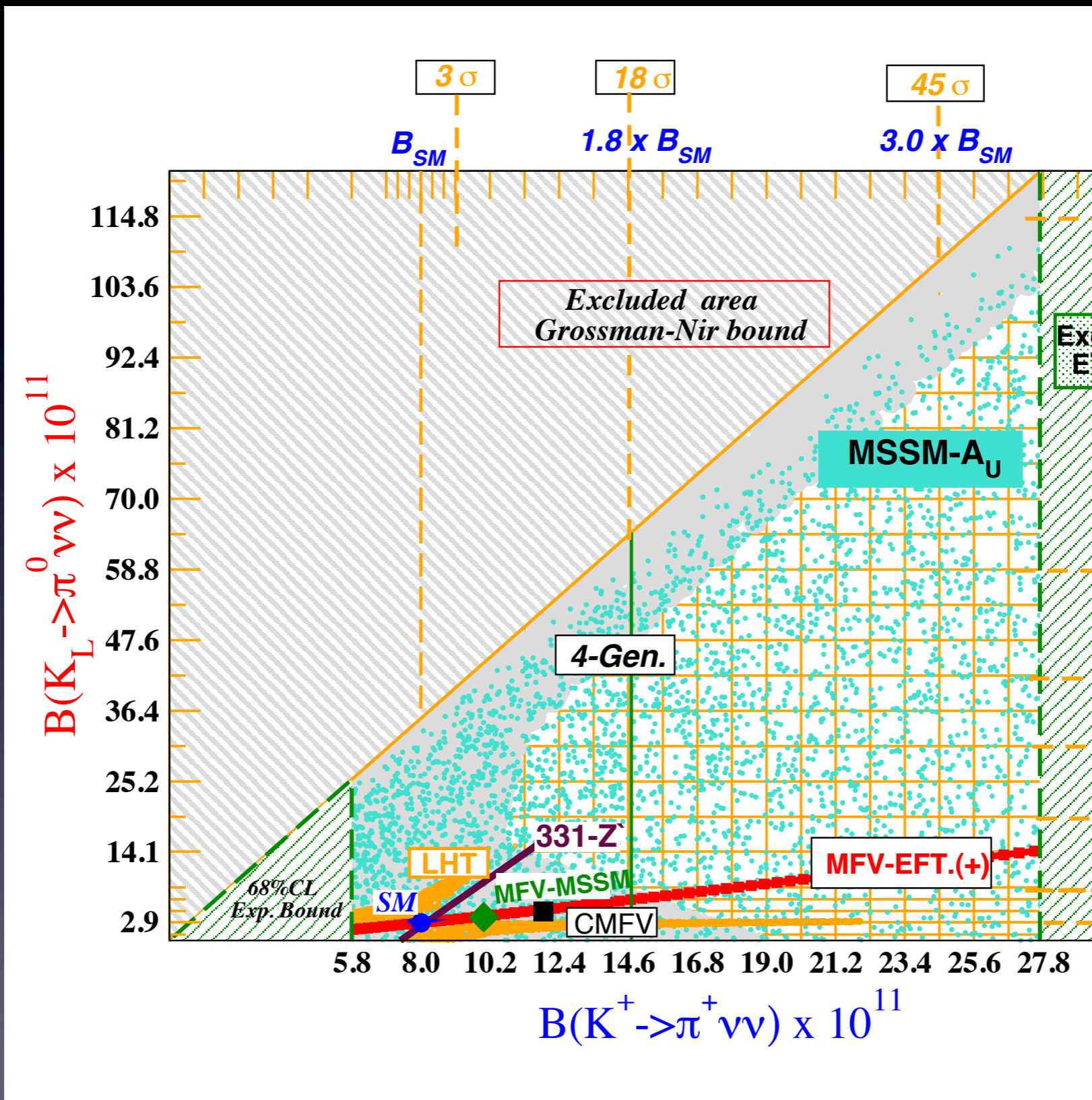
# Summary & Schedule

- K<sup>0</sup>TO実験
  - $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  探索実験
  - Charged Veto
    - MPPC読み出し
- CVコントロールシステム
  - MPPC温度のコントロール・モニター
  - MPPCバイアスのコントロール・モニター
  - アナログ制御回路の設計開発を行った
  - アナログ制御回路を試作し、  
実際にMPPCの温度・バイアスが  
正しくコントロール・モニター出来ている事を確認した
- Schedule
  - 1月中のインストールを目指し、試作・量産を進めて行く。

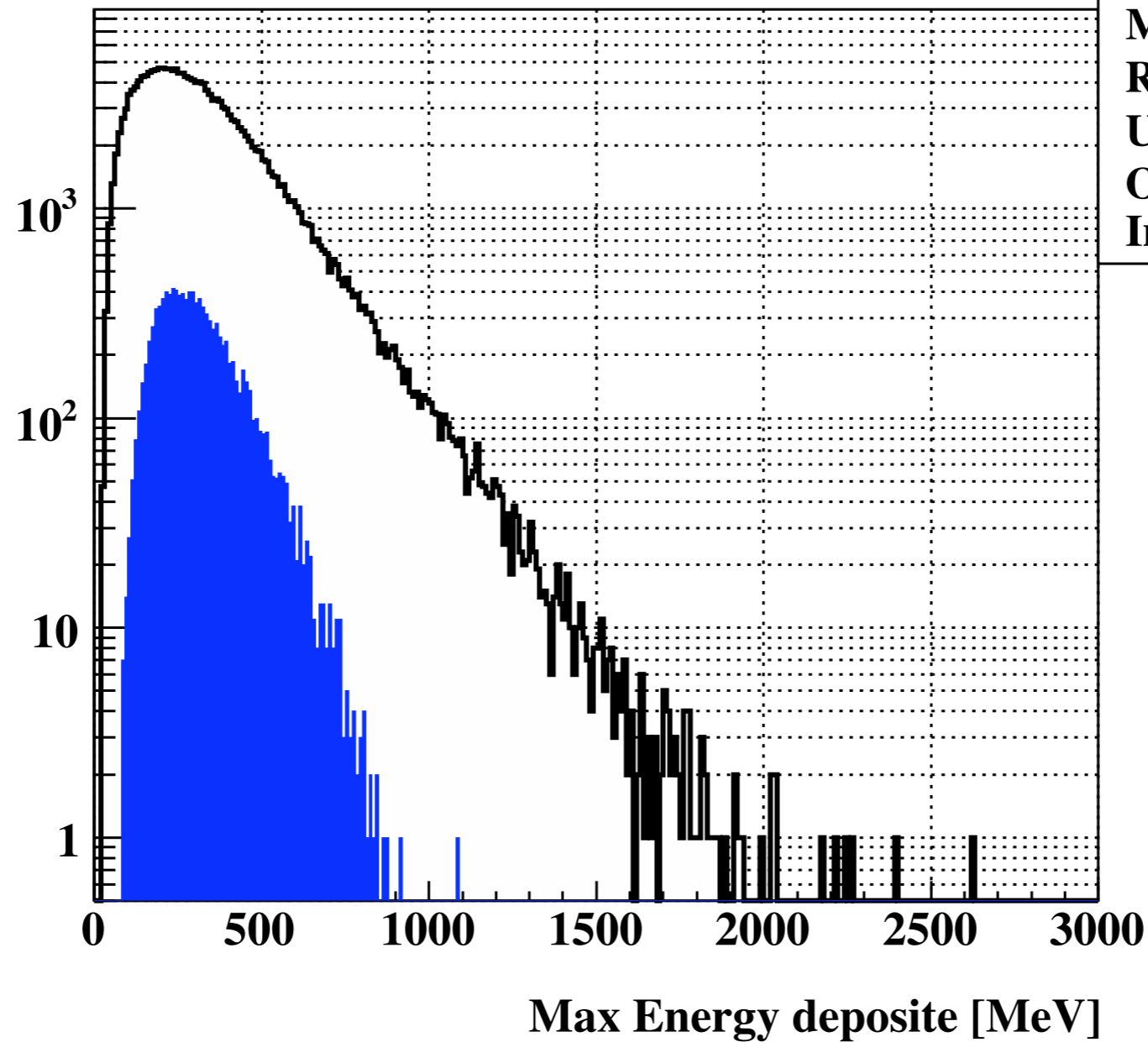
# Backup



# Beyond SM



# Energy deposit

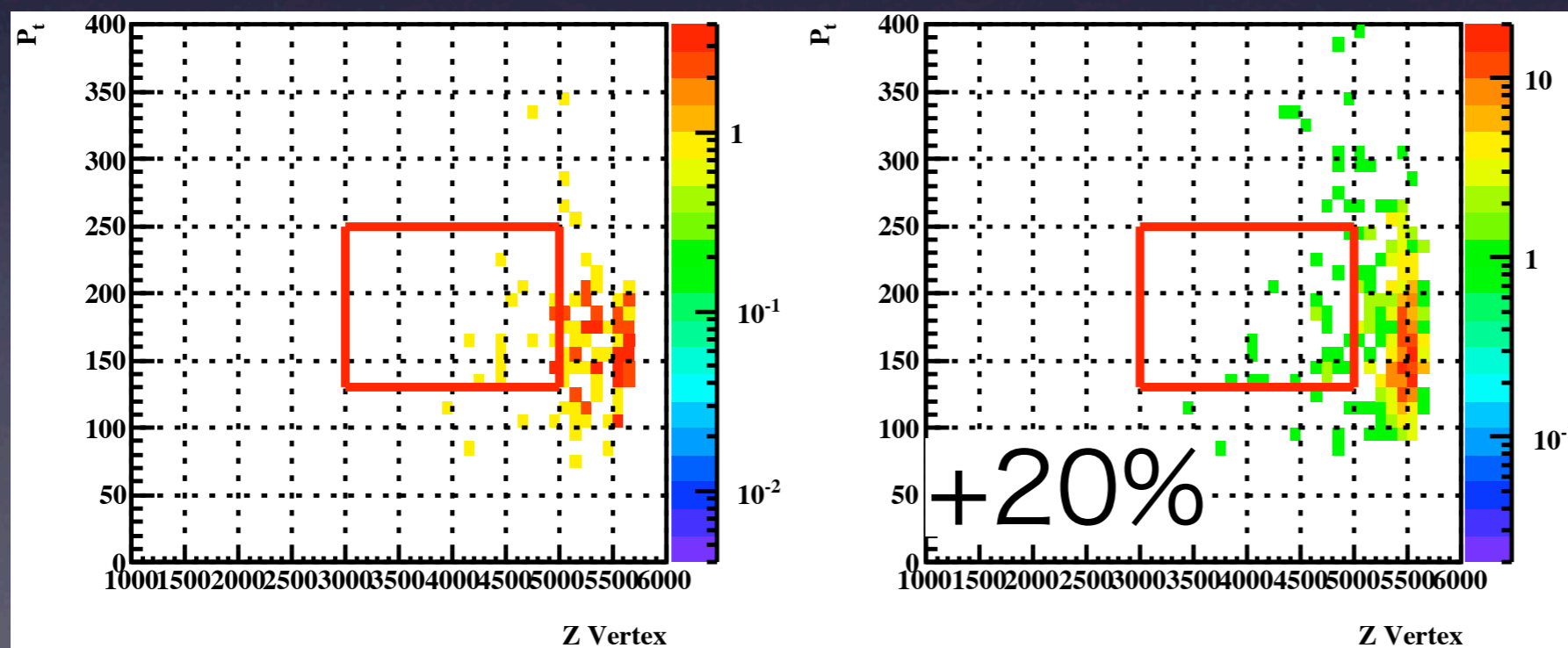
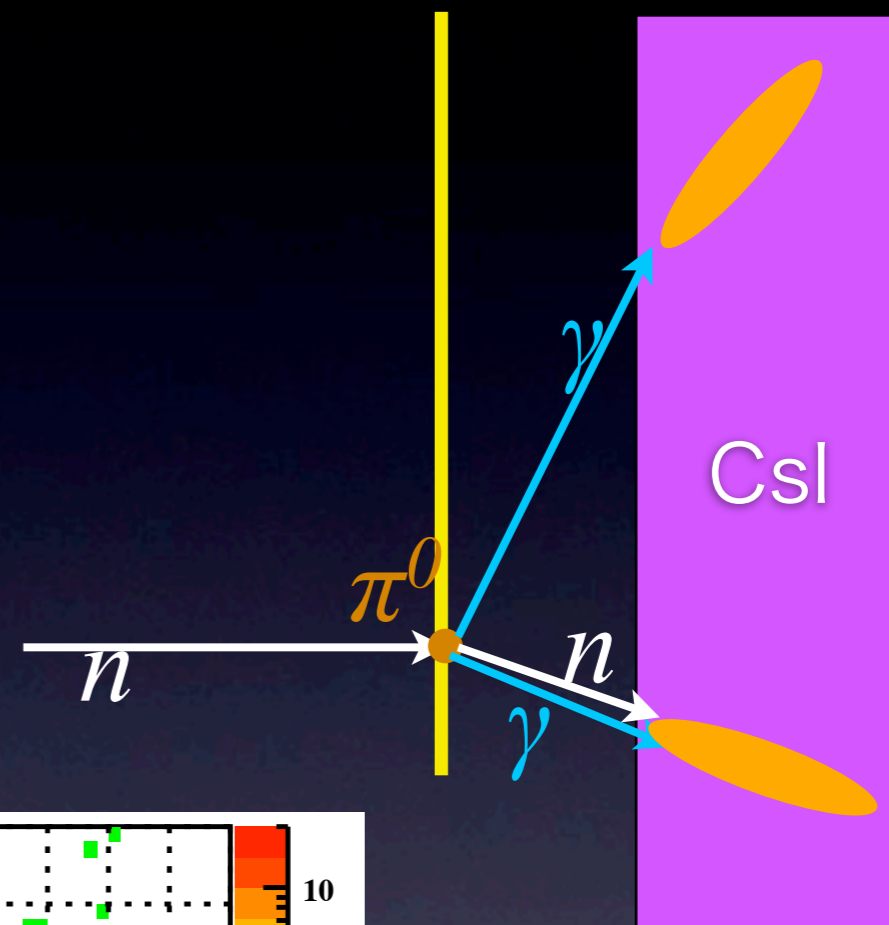
 $\pi^0 \nu \bar{\nu}$ 


h1	
Entries	188245
Mean	332.1
RMS	204.8
Underflow	0
Overflow	0
Integral	1.882e+05

# CV- $\pi^0$ B.G.

- エネルギーを大きく間違えると増加

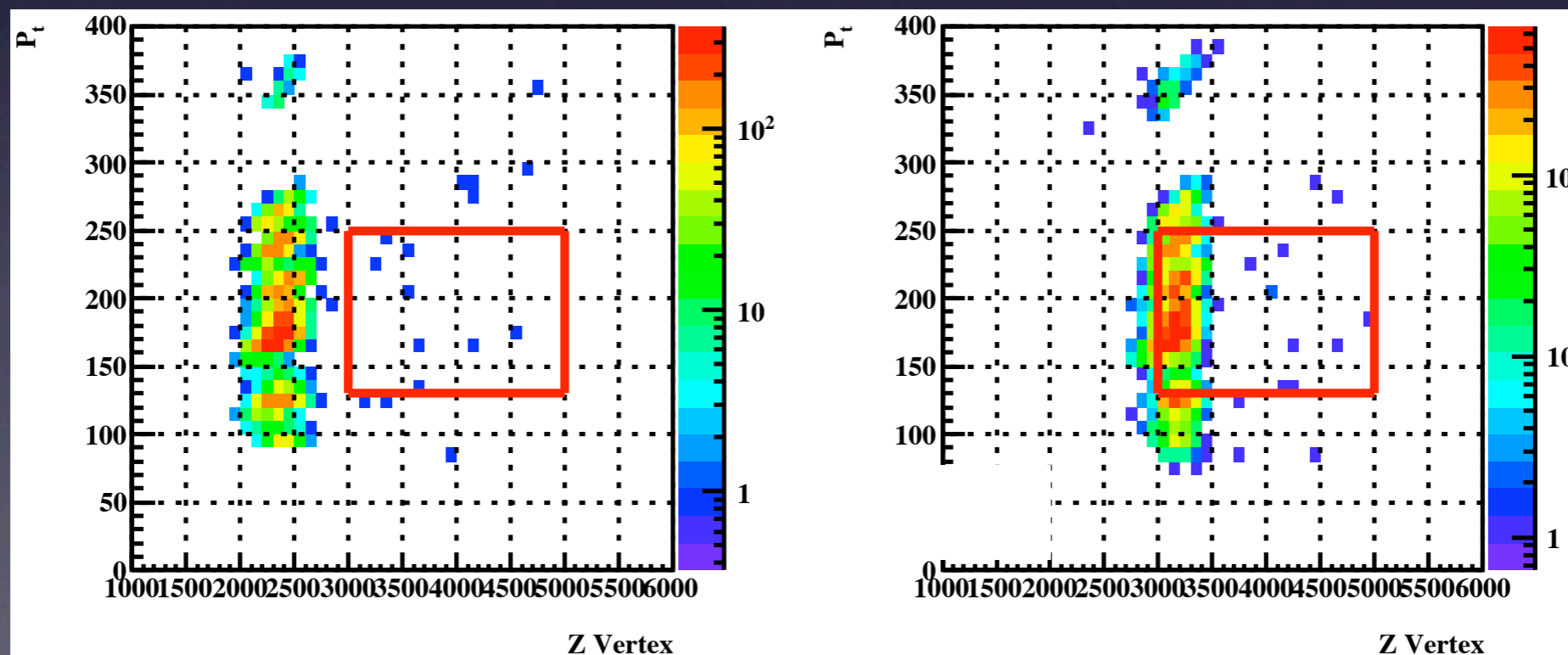
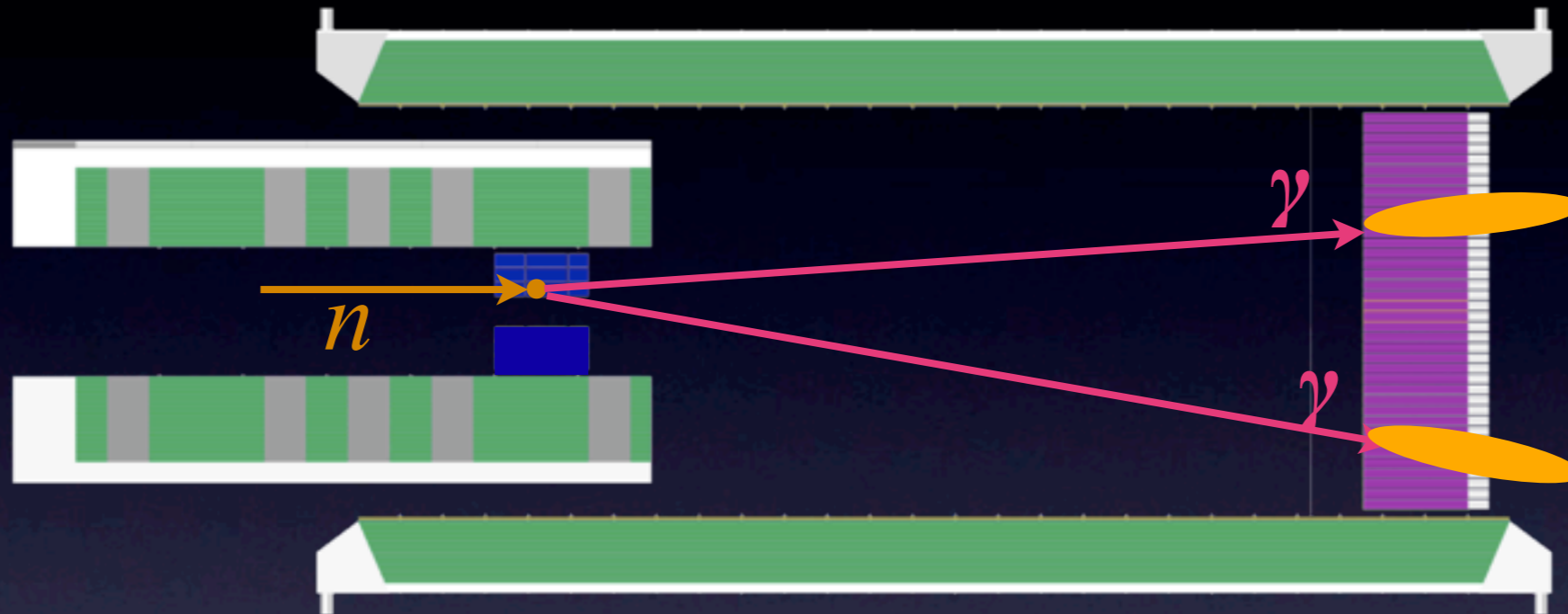
## CV





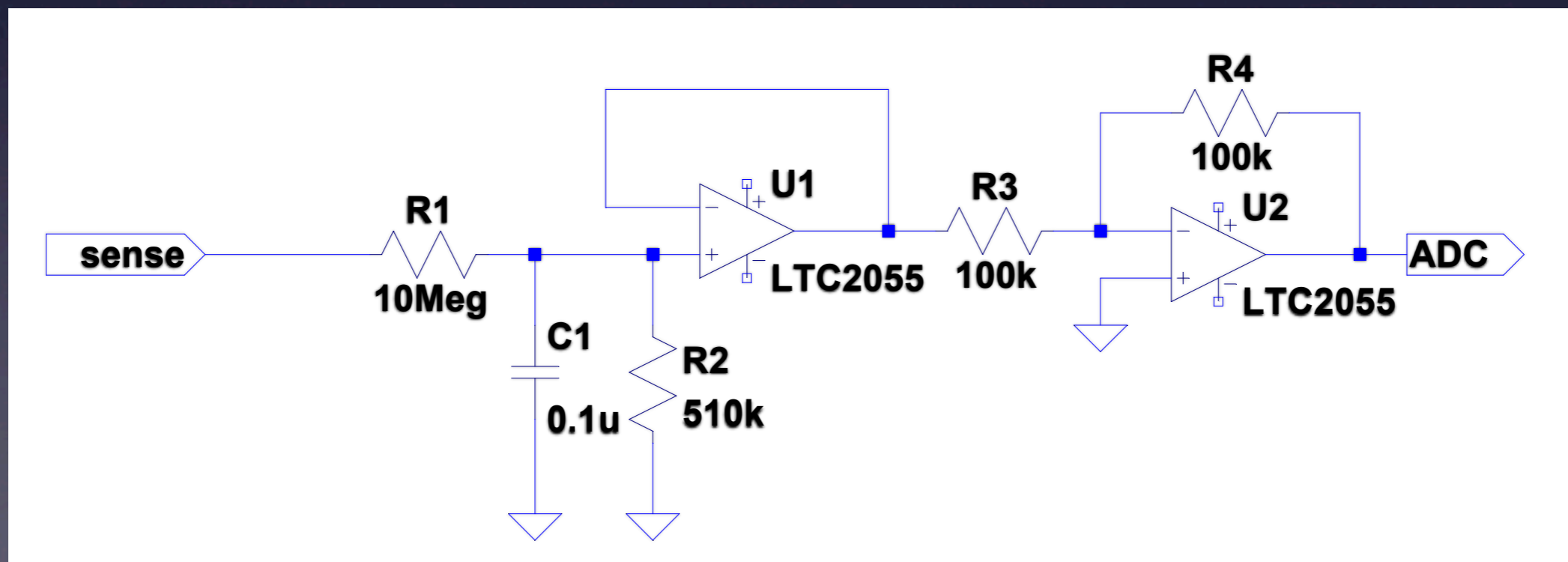
# CC02- $\pi^0$ B.G.

- エネルギーを小さく間違えると増加



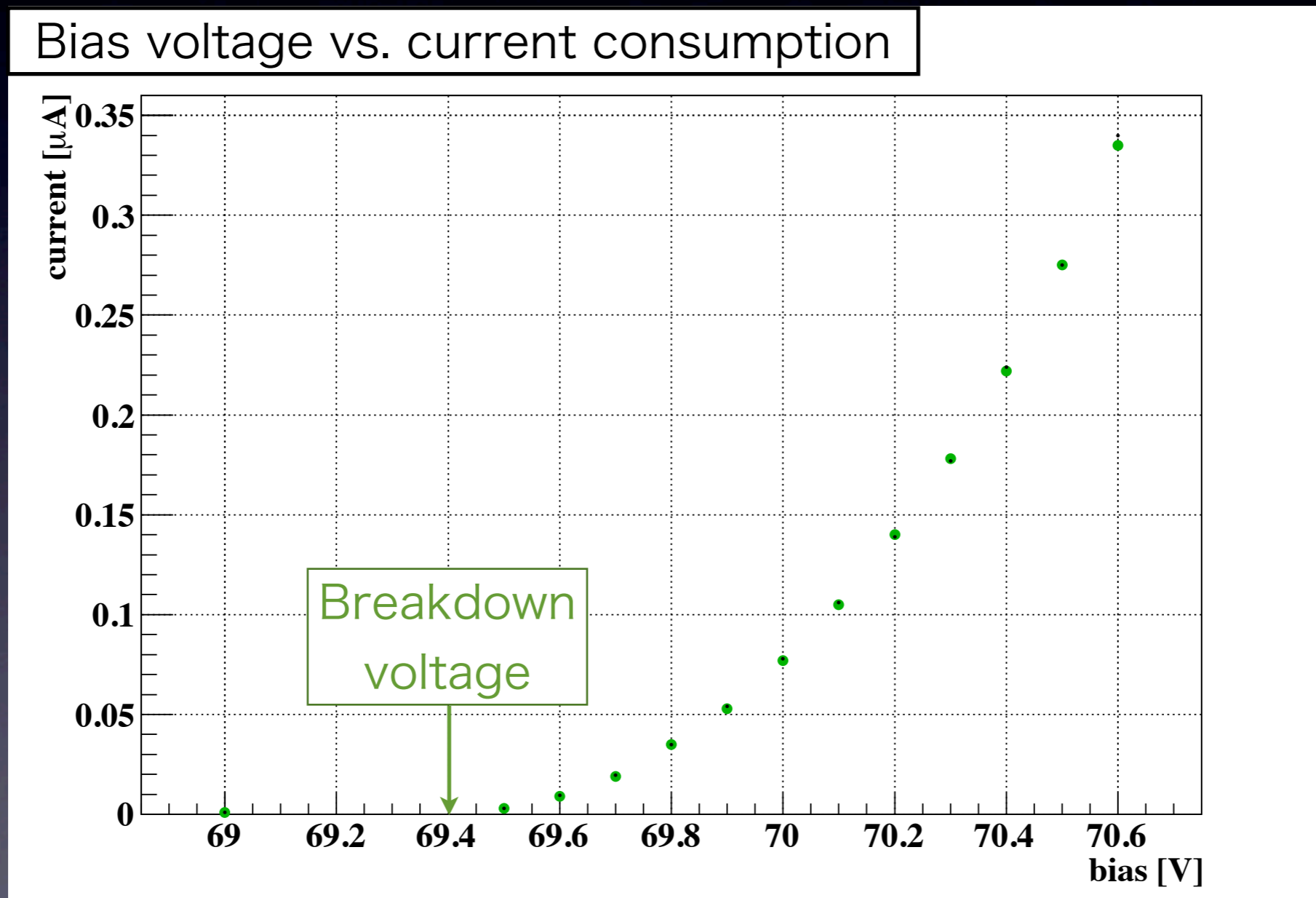
# Bias On/Off/Monitor

- MPPPCに-70Vを個別印加するスイッチ
  - Photoカプラで制御
    - Panasonic AQY210EH
- Biasのモニター
  - 確度 $\pm 20\text{mV}$ (@-70V)が欲しい
    - 温度変化を補正するためのセンサや、キャリブレーションが必要



# Bias current monitor

- MPPCに流れている電流( typ.  $0.2\mu\text{A}$ )をモニターしたい

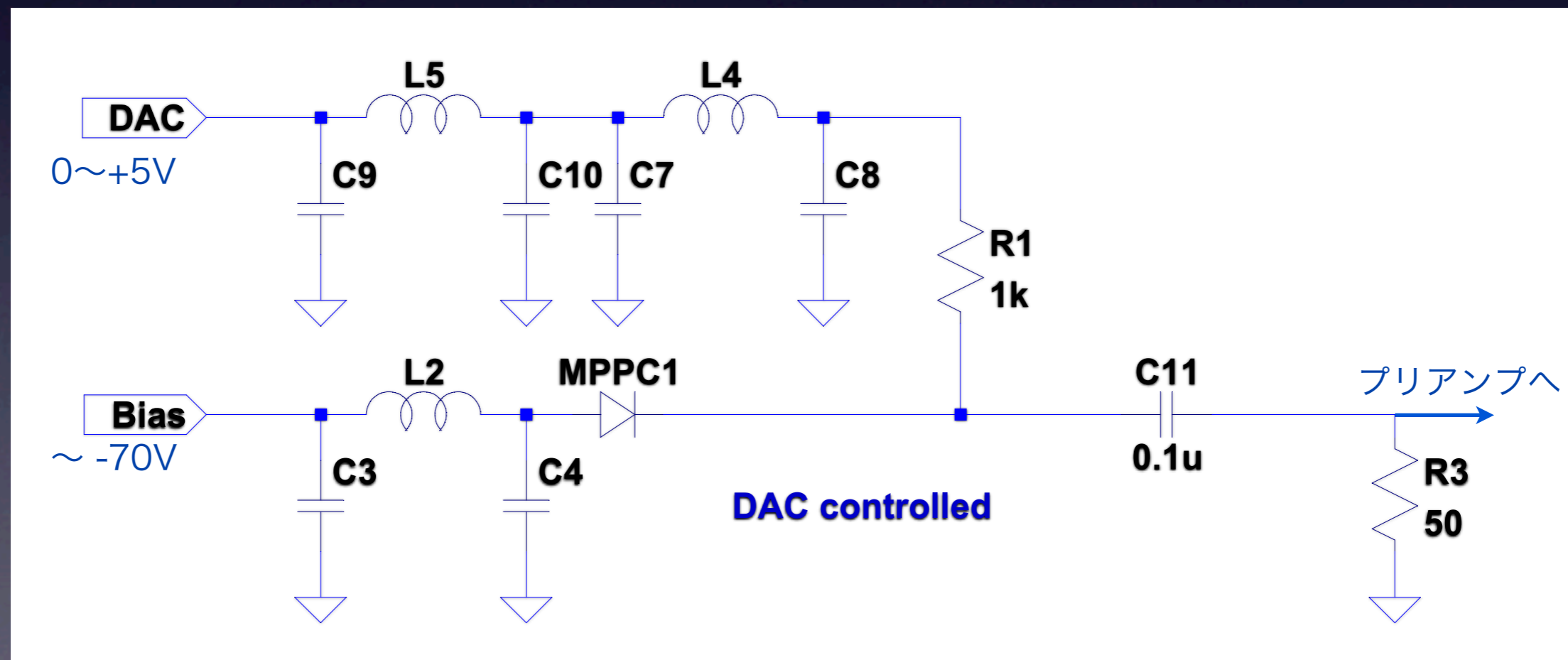


# システム概要

	Control	Monitor	Note
MPPC bias	Negative bias (-70V) ON/OFF	Negative bias voltage	1ch毎にBiasのOn/Offを行う
	Control bias 0-5V	Control bias voltage	1ch毎にGain調整
		Bias current (0.1 $\mu$ A)	MPPCに流れている暗電流の確認
MPPC temp.	Temperature feedback	Peltier voltage (100mV)	MPPCの低温側の温度調整
		Peltier current (100mA)	ペルチェ電流
		Thermistor resistance (10k $\Omega$ )	MPPCの低温側の温度測定
		Temperature monitor	MPPCの高温側の温度測定
Amp.	Power supply( $\pm$ 5V) ON/OFF	Power supply voltage( $\pm$ 5V)	1ch毎にAmp.のOn/Offを行う
		Power supply current(15mA)	プリアンプの消費電流を確認

# Bias control

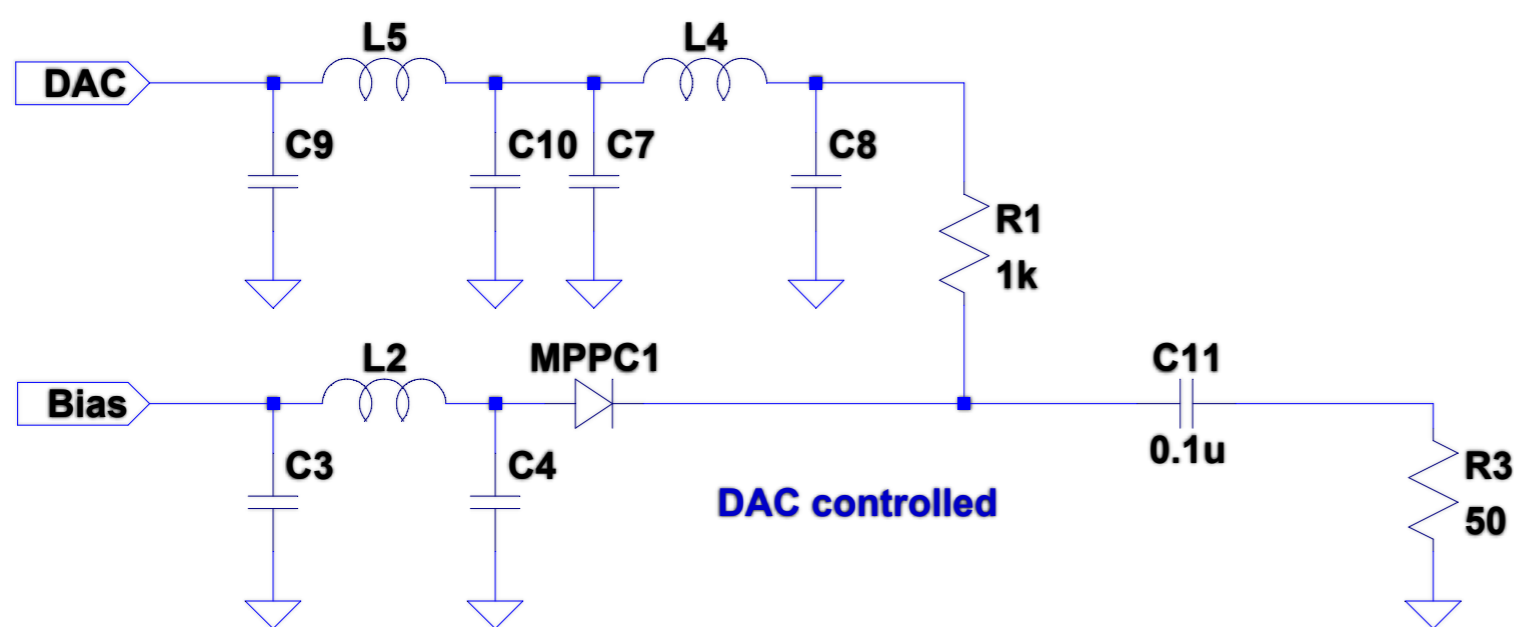
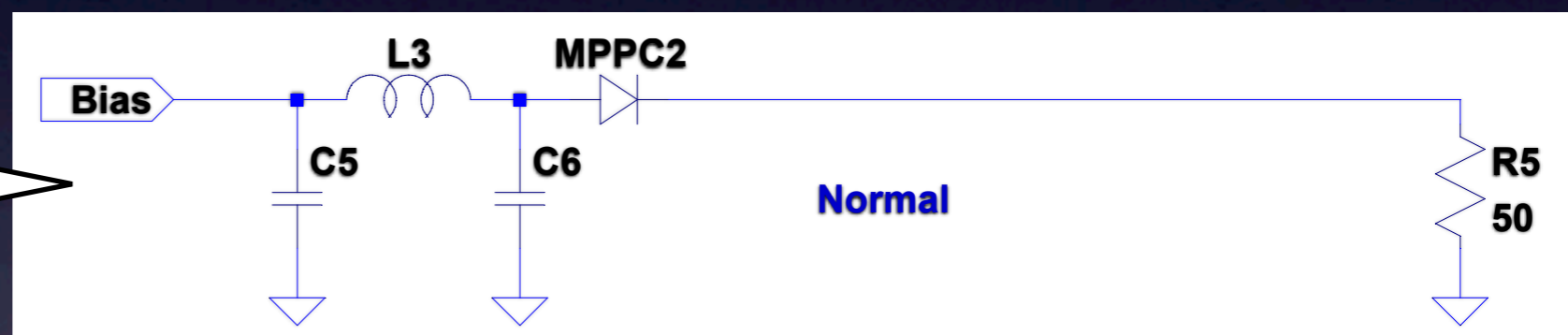
- 全MPPPCの出力を揃える
  - -70Vに対して100mV程度で調整を行う必要がある
- Negative bias(-70V)を全MPPPC一律にかけ、信号側の電位をDACで調整する方式を取る



# Bias control

- コントロール系を追加することによる影響の評価
  - ゲイン
  - 波形

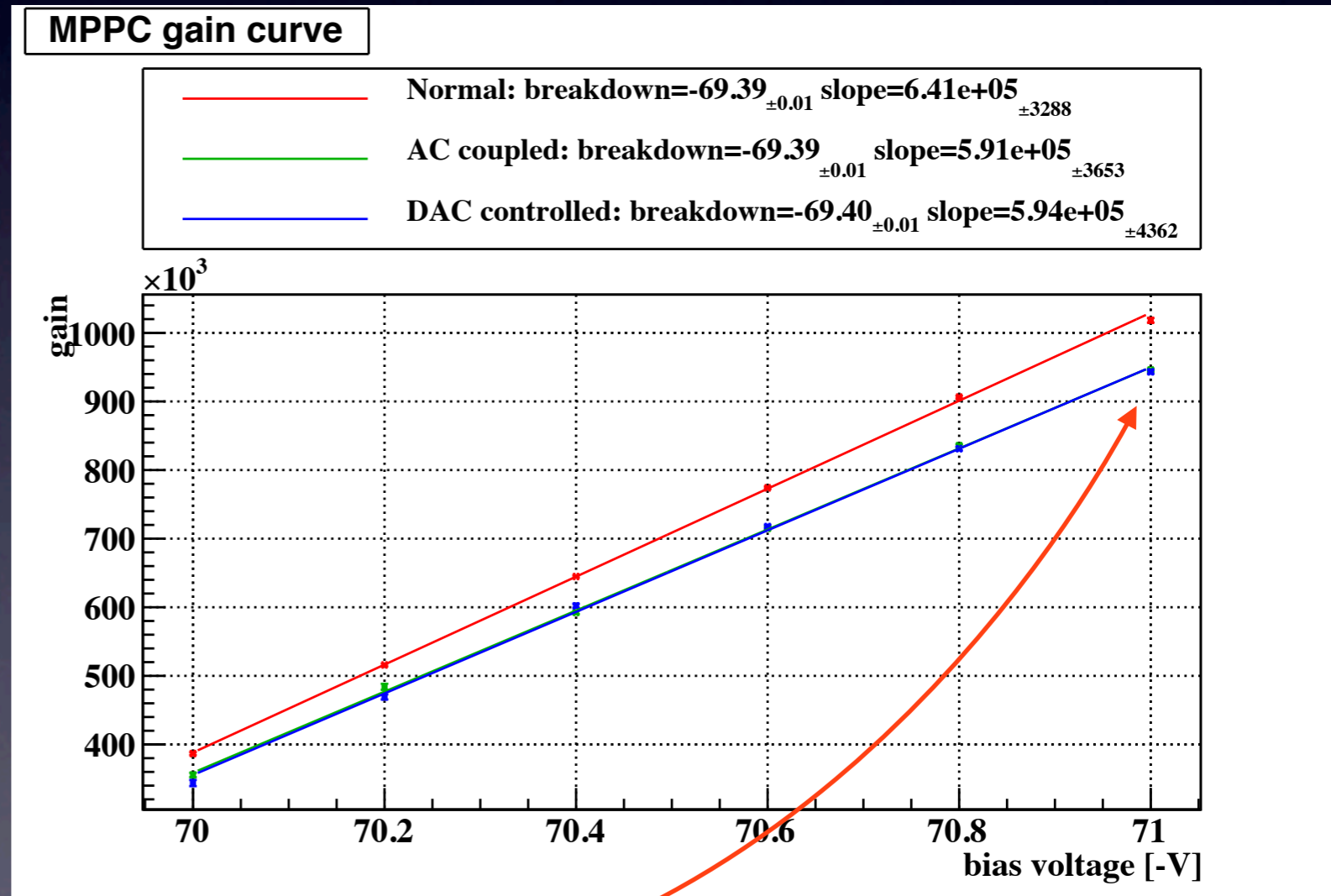
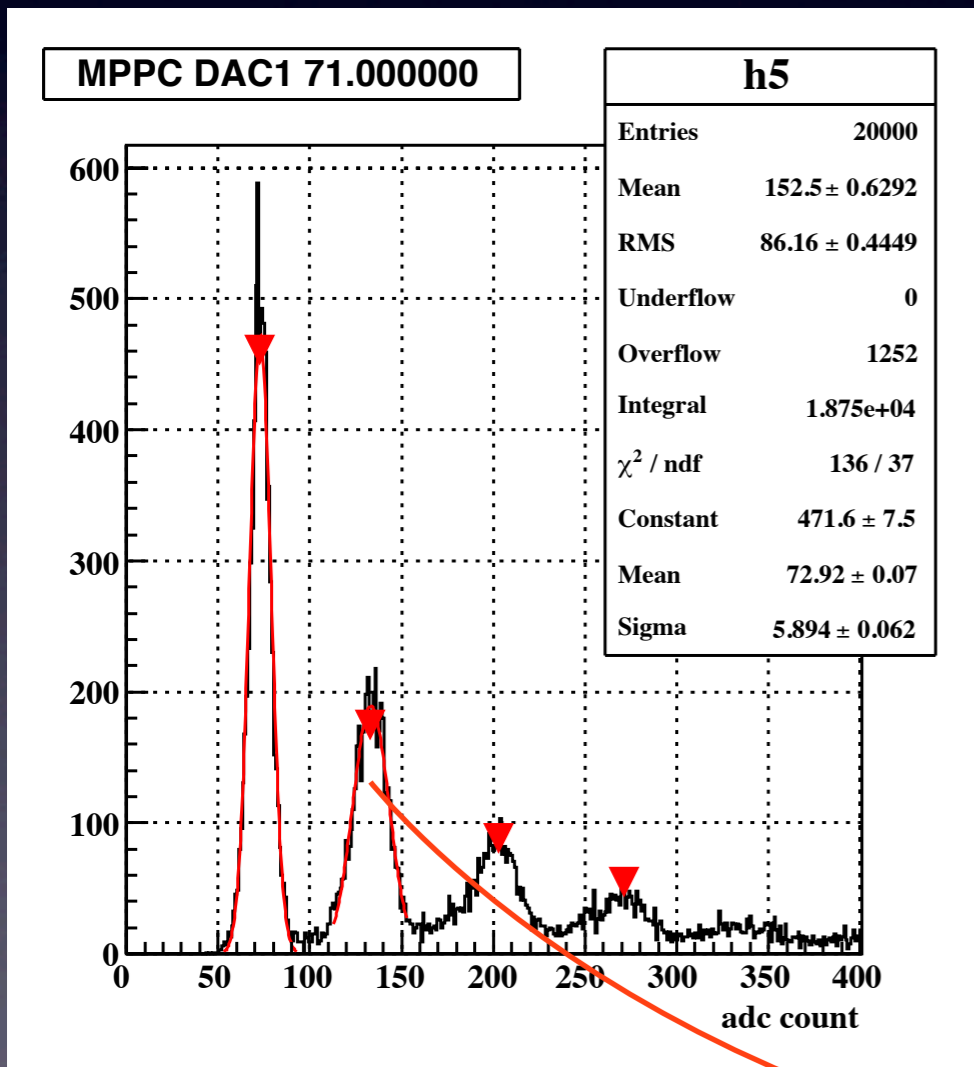
これまでの試験に  
使っていた回路



本番用回路案

# Gain curve

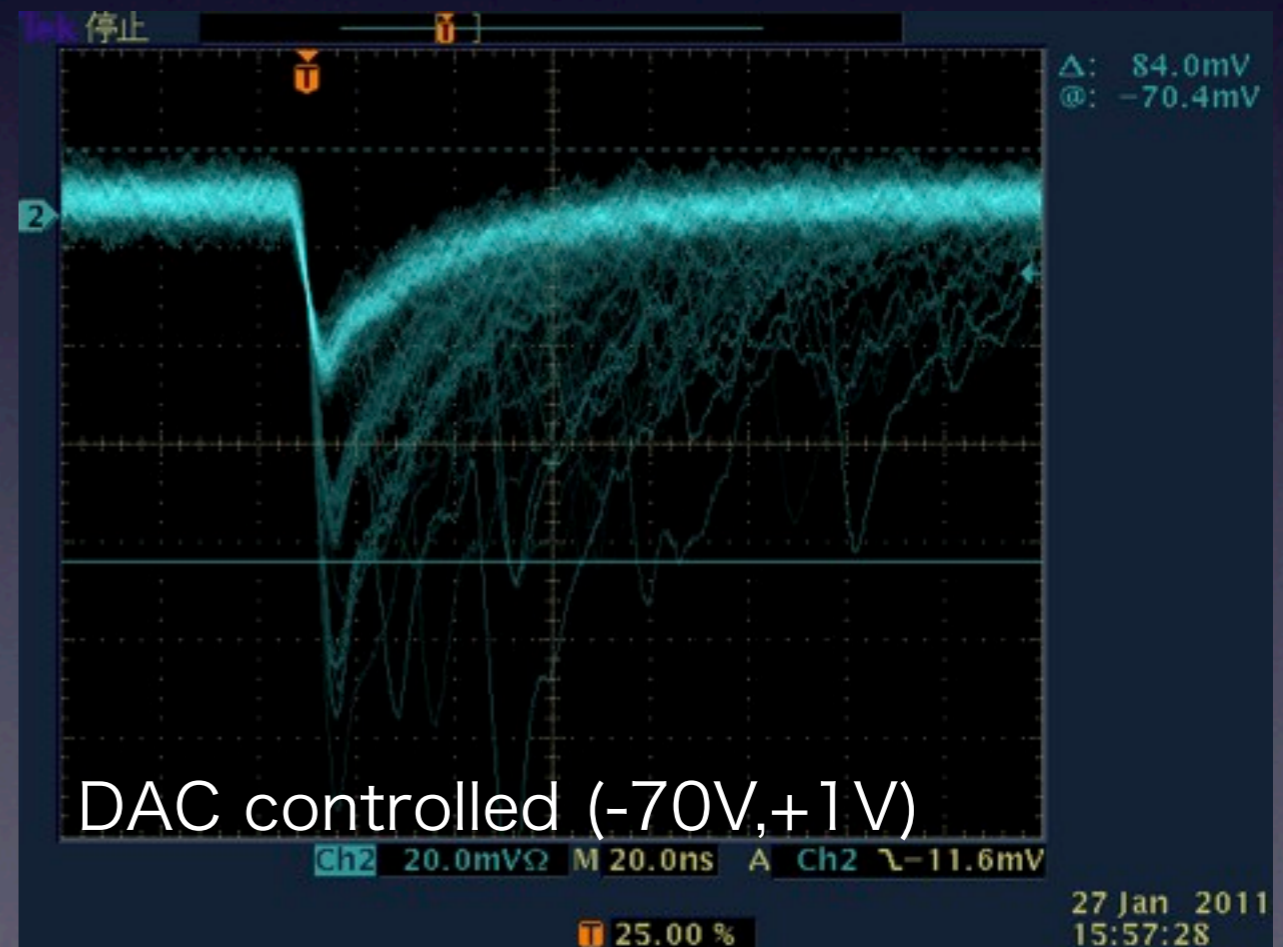
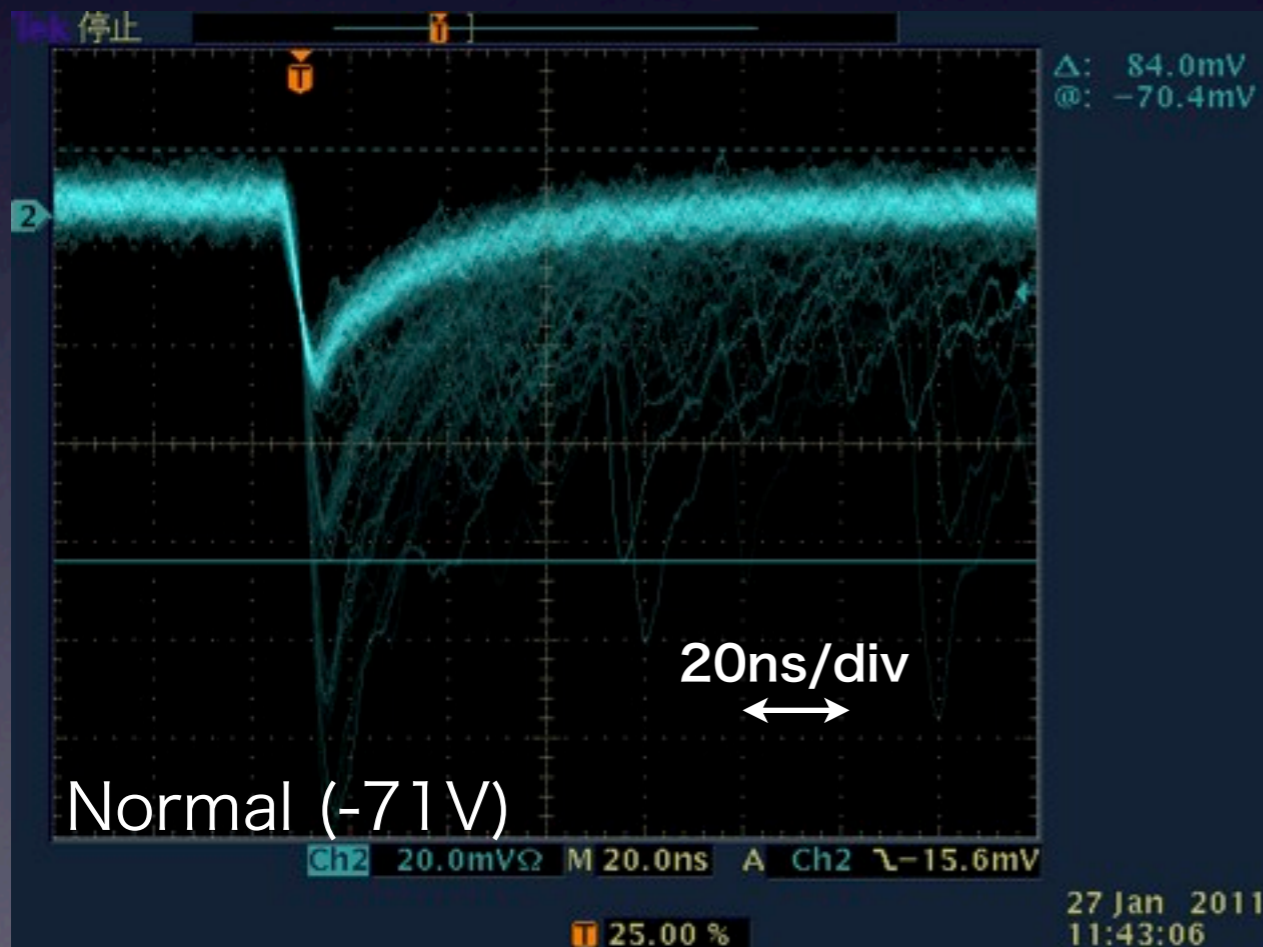
- One P.E. peakで測定
- Breakdown voltageは一致
- Gain slopeは約7%減少
  - 1k $\Omega$ を付けた効果(~5%)でほぼ説明できる



# Pulse shape

- 試験は-71Vのみ
- オシロスコープで波形を1万取得し、それぞれの立ち上がり・立ち下がり時間を求める

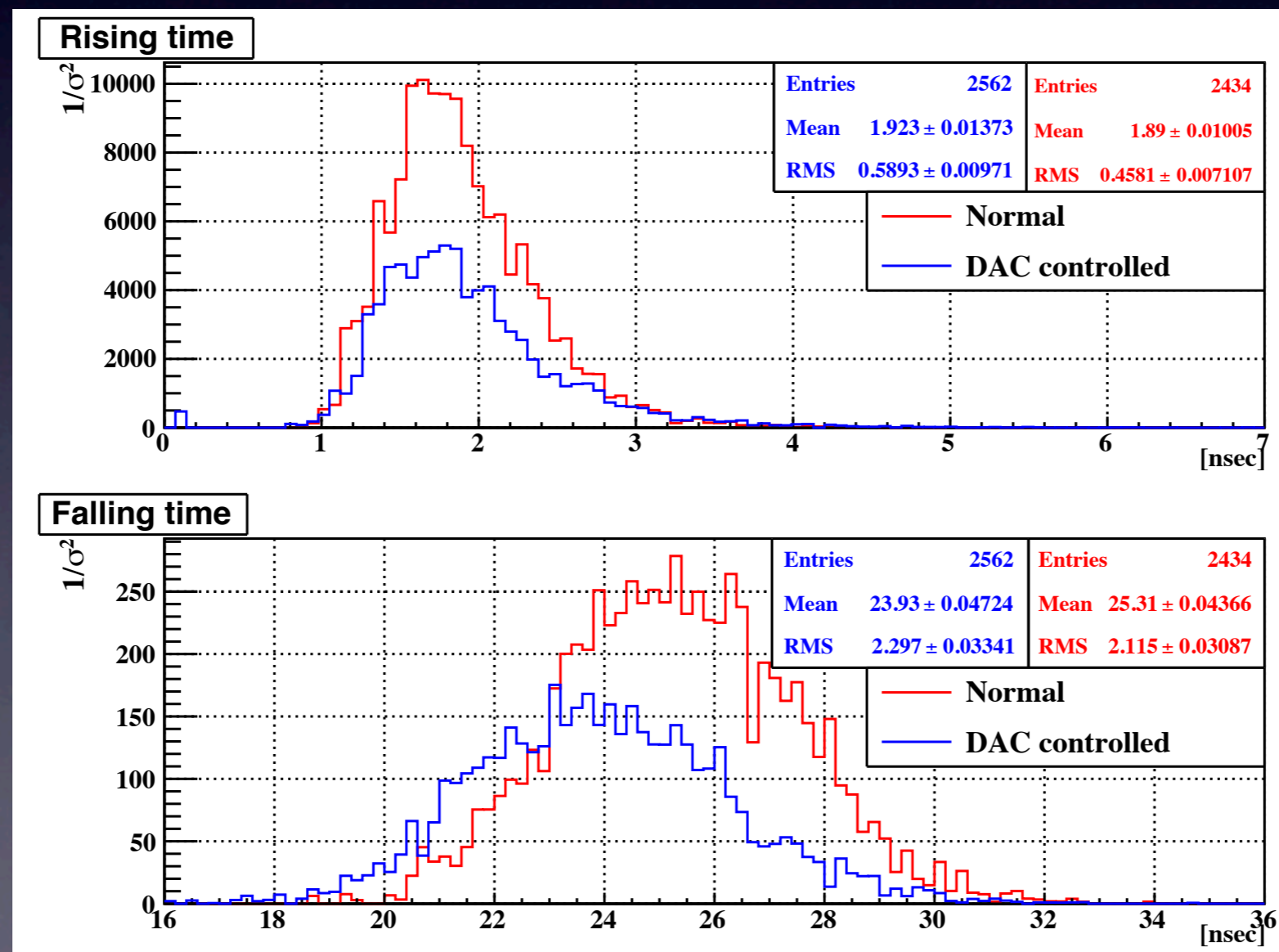
- Fit function 
$$\frac{C}{\tau_{\text{rise}} - \tau_{\text{fall}}} \left[ \exp\left(\frac{t_0 - t}{\tau_{\text{fall}}}\right) - \exp\left(\frac{t_0 - t}{\tau_{\text{rise}}}\right) \right] \theta(t_0)$$





# Pulse shape

- 立ち上がり(前半) 1.89 → 1.92 nsec (+1.6%)
- たち下がり(後半) 25.31 → 23.93 nsec (-5.5%)
- 1kΩの影響(~5%)で説明可能



# まとめ

- DAC 調整機構に依る大きな影響はない
  - Breakdown voltageには影響無し
  - gainが7%減少
  - 波形の立ち下がりが5.5%速くなる
- Control bias voltageモニターはDAC出力をADCで読むだけ

	Control	Monitor	Note
MPPC bias	Negative bias (-70V) ON/OFF	Negative bias voltage	1ch毎にBiasのOn/Offを行う
	Control bias 0-5V	Control bias voltage	1ch毎にGain調整
		Bias current (0.1 $\mu$ A)	MPPCに流れている暗電流の確認

# まとめ

- DAC 調整機構に依る大きな影響はない
  - Breakdown voltageには影響無し
  - gainが7%減少
  - 波形の立ち下がりが5.5%速くなる
- Control bias voltageモニターはDAC出力をADCで読むだけ

	Control	Monitor	Note
MPPC bias	Negative bias (-70V) ON/OFF	Negative bias voltage	1ch毎にBiasのOn/Offを行う
	Control bias 0-5V	Control bias voltage	1ch毎にGain調整
		Bias current (0.1 $\mu$ A)	MPPCに流れている暗電流の確認

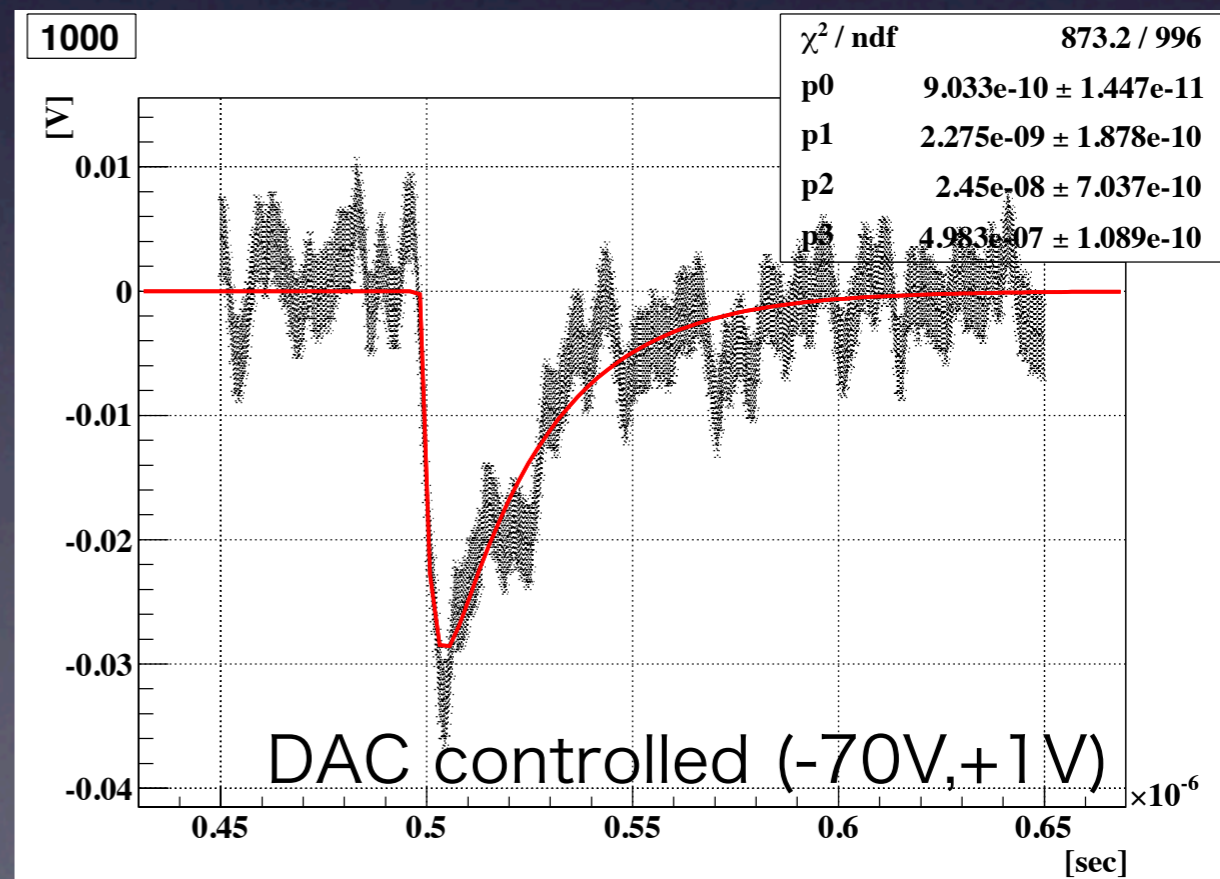
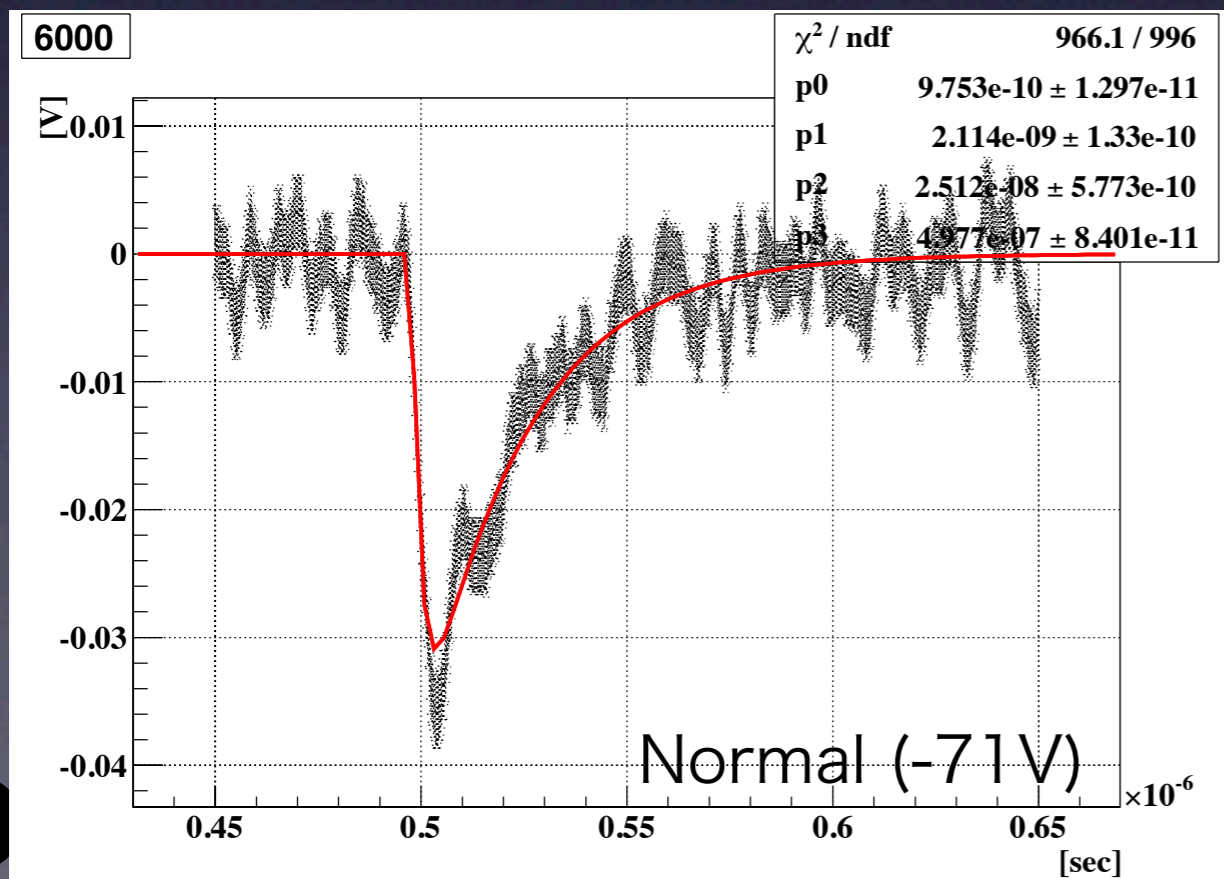
# Pulse shape fit

- Fit function

$$\frac{C}{\tau_{\text{rise}} - \tau_{\text{fall}}} \left[ \exp\left(\frac{t_0 - t}{\tau_{\text{fall}}}\right) - \exp\left(\frac{t_0 - t}{\tau_{\text{rise}}}\right) \right] \theta(t_0)$$

- Cut

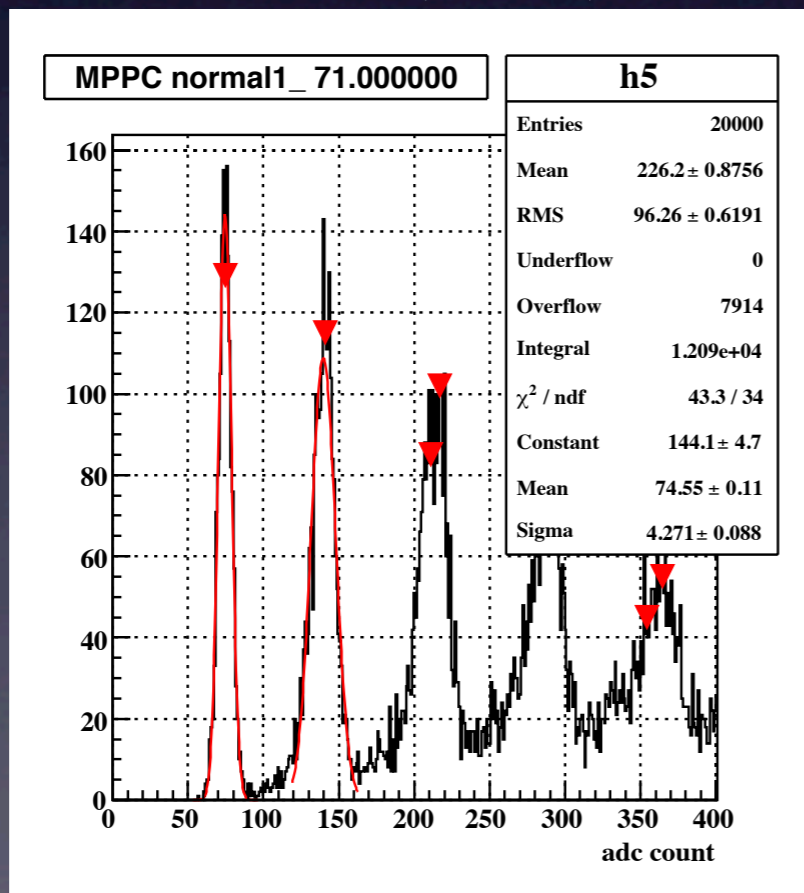
- Pulse height : 1 p.e. peak  $\pm 1 \sigma$
- Charge : 1 p.e. peak  $\pm 1 \sigma$
- Chi2/NDF : 0.75~1.25
  - Error bar はGND noiseのみ



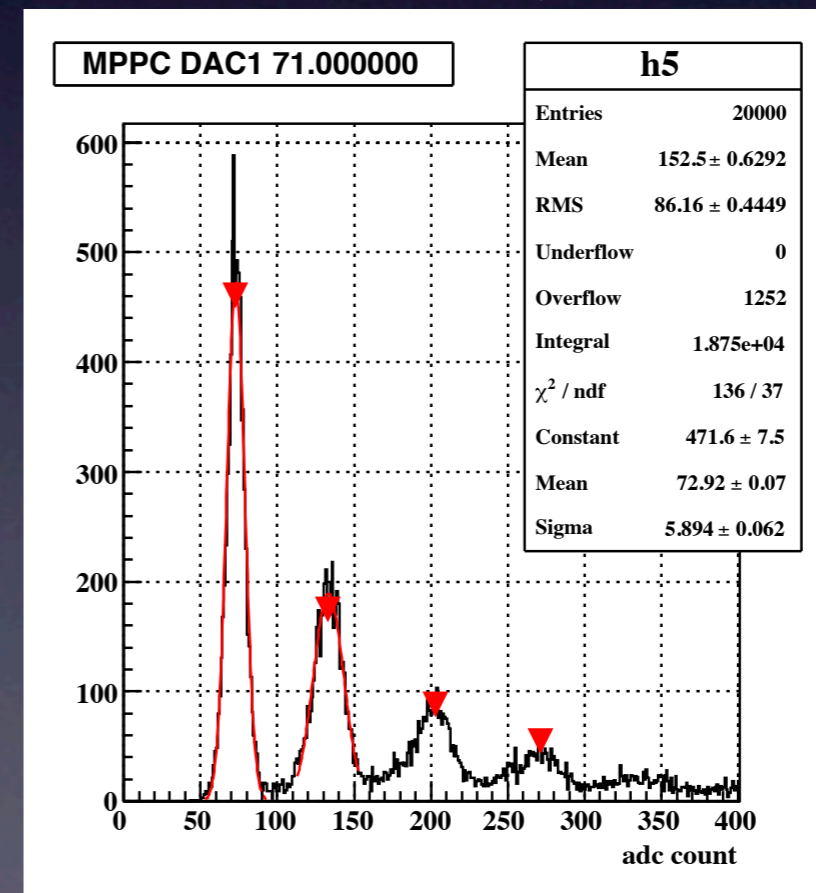
# Gain curve

- Set up
  - 測定環境 5°C(恒温槽)
  - LED 1kHz
  - Charge integrated ADC
  - ×10 NIM AMP 2段で100倍増幅
  - Bias -70V ~ -71V (DAC controlledは [-70V,+0V]~[-70V,+1V])

Normal (-71V)



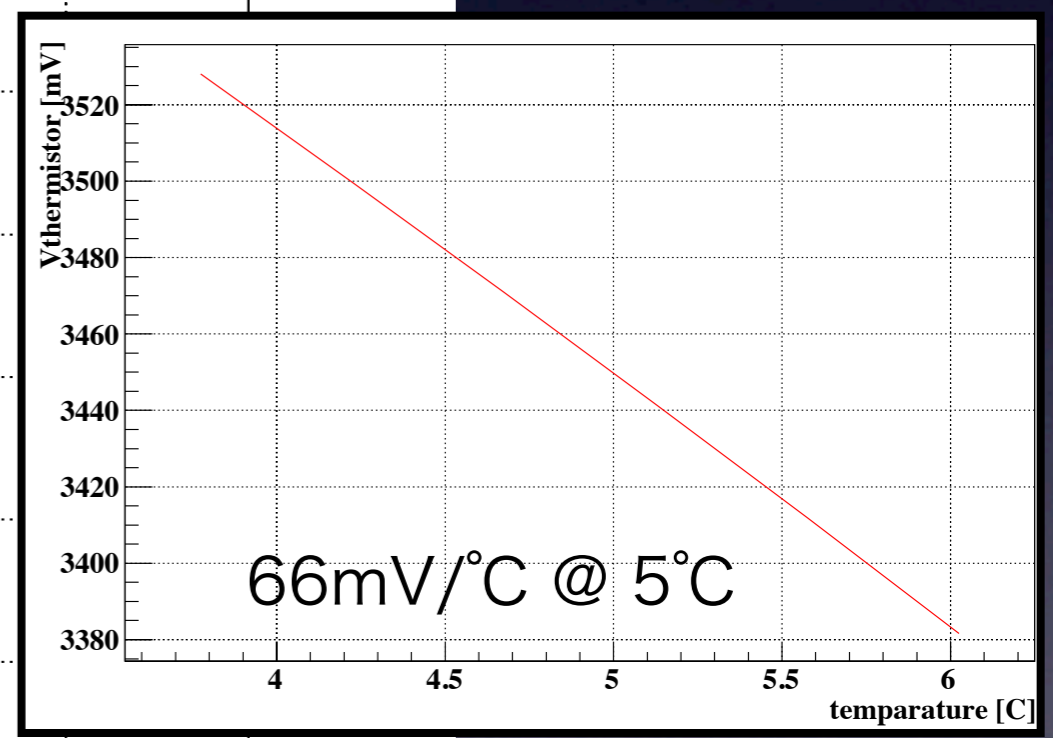
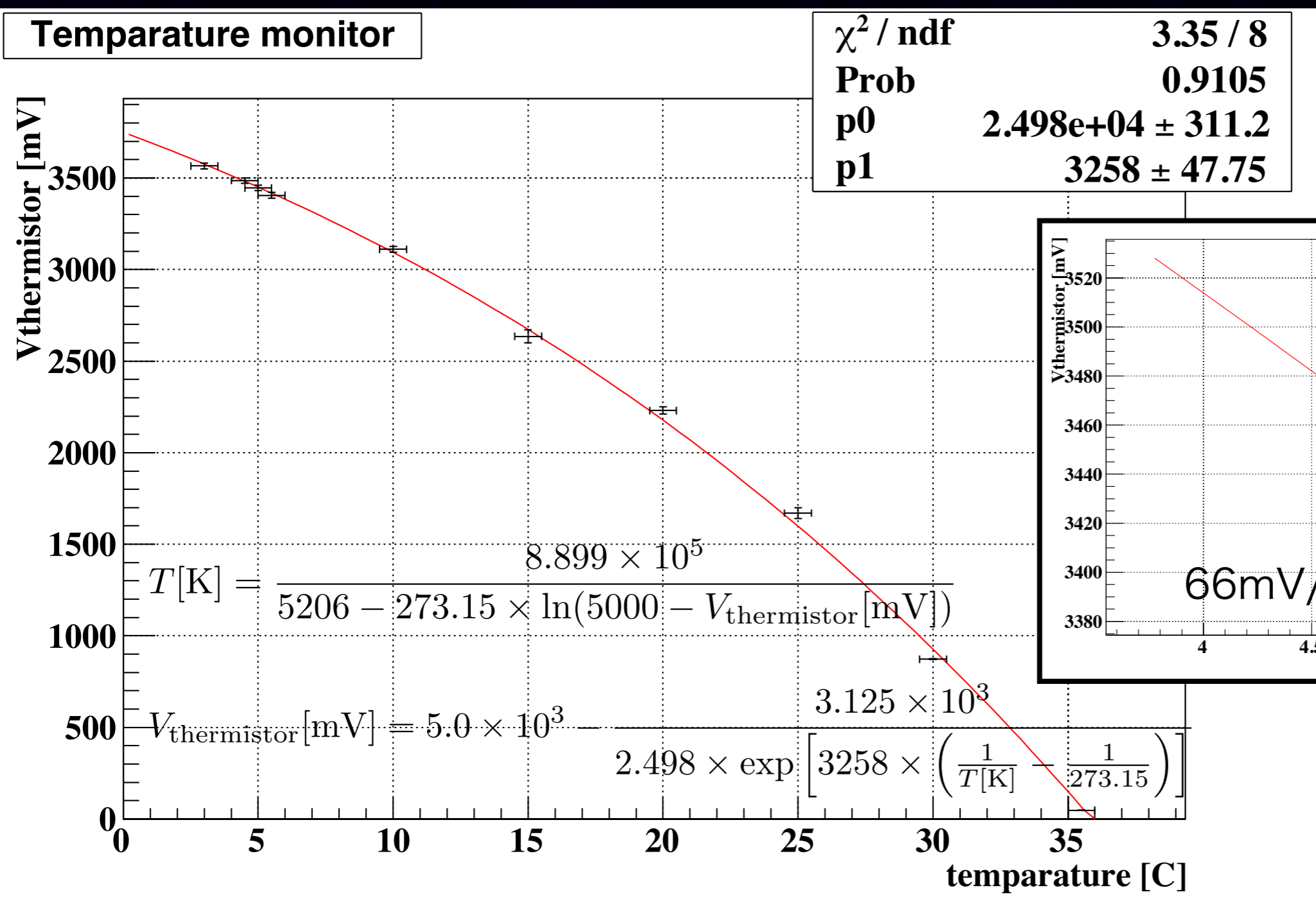
DAC controlled (-70V,+1V)

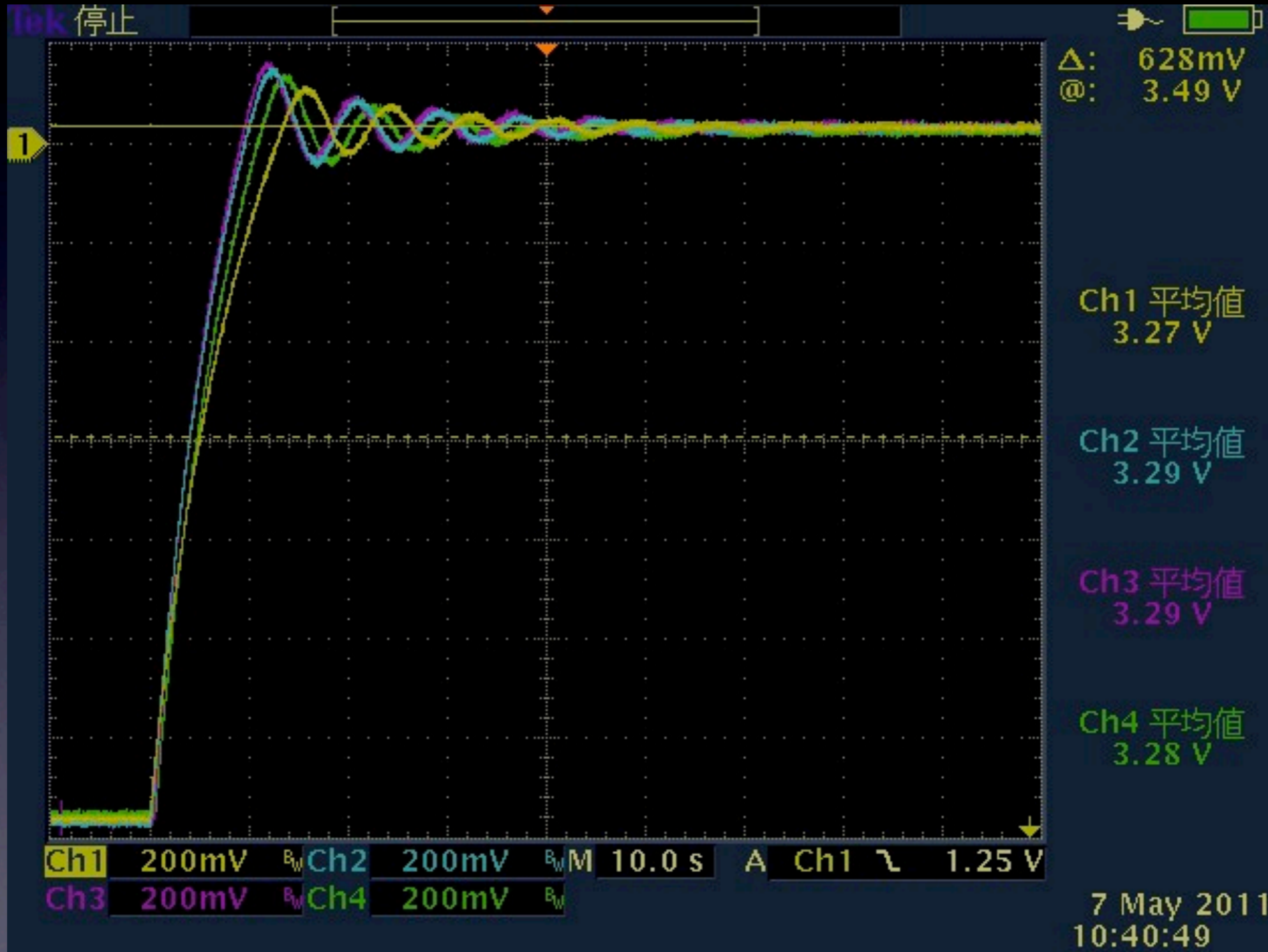


Charge ADCのデータ (LED光量はそれぞれ異なる)

# 温度モニタ

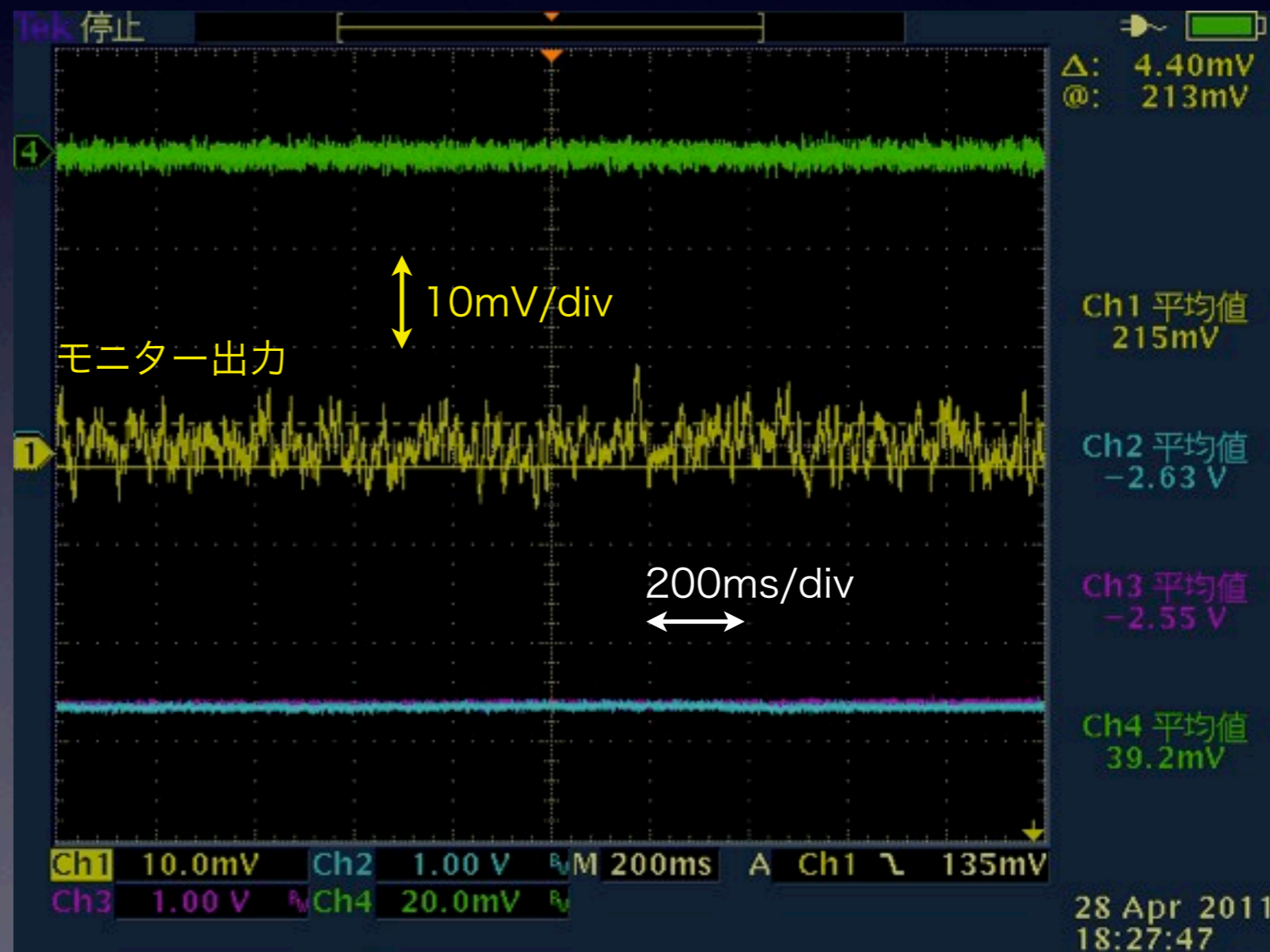
- 恒温槽にMPPPCを入れ、  
3~35°Cの間で温度モニタ出力を測定





# Noise level (bias current)

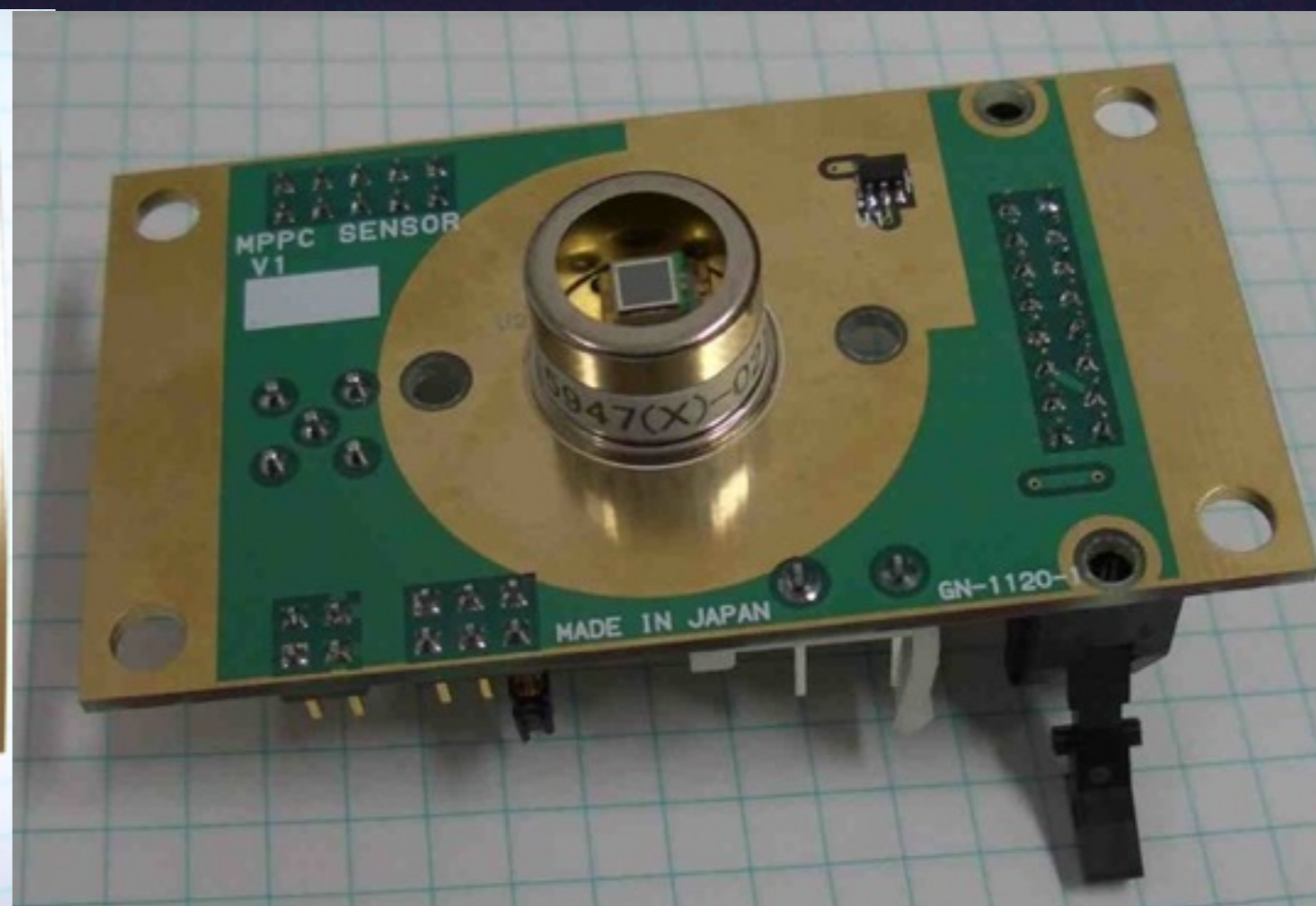
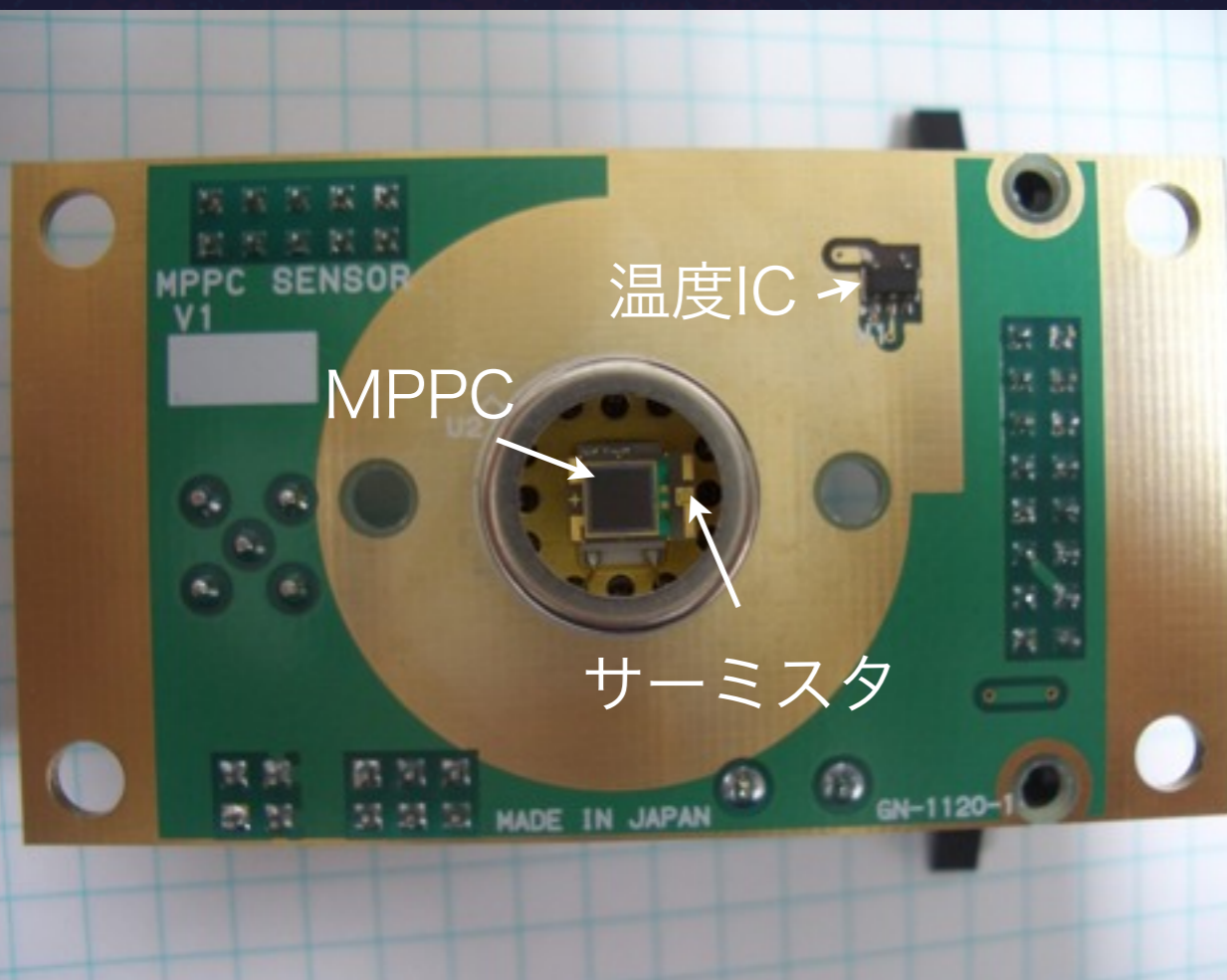
- Noise level :  $2\text{mV}_{\text{rms}}$ 
  - $2\text{nA}$ の精度で測定可能





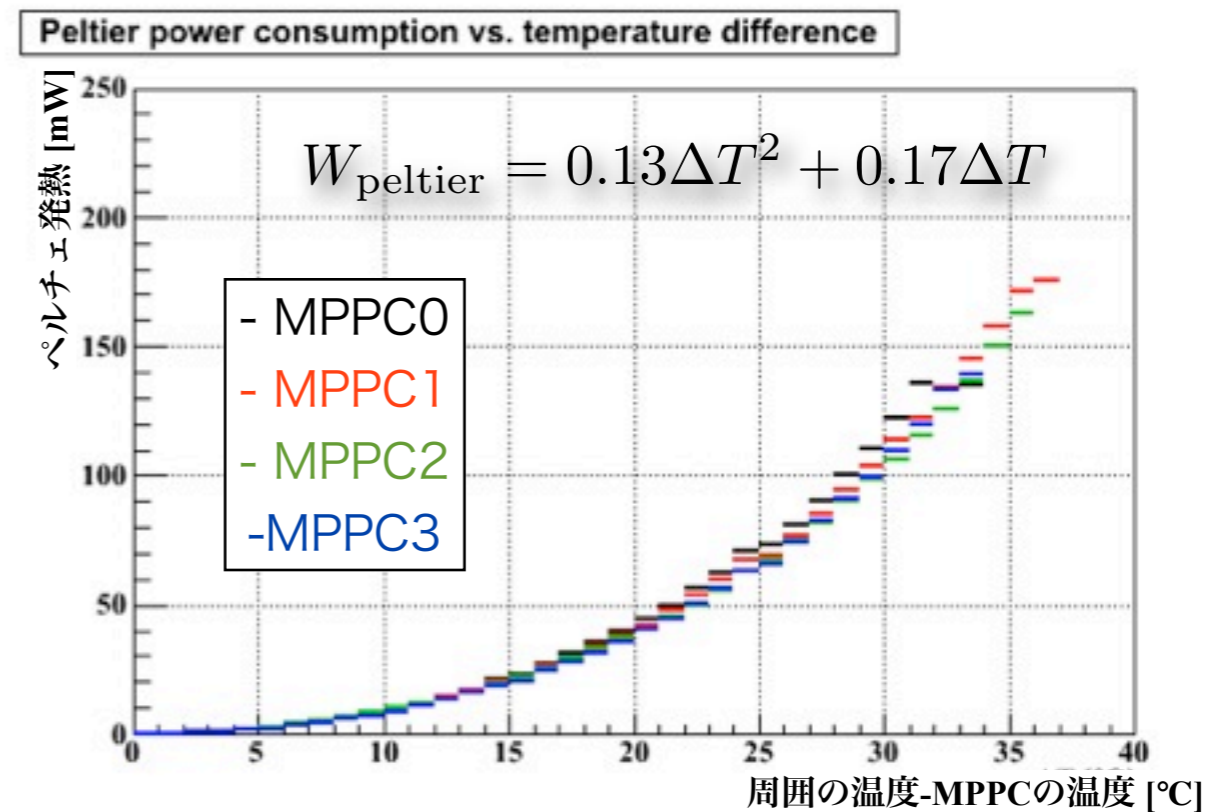
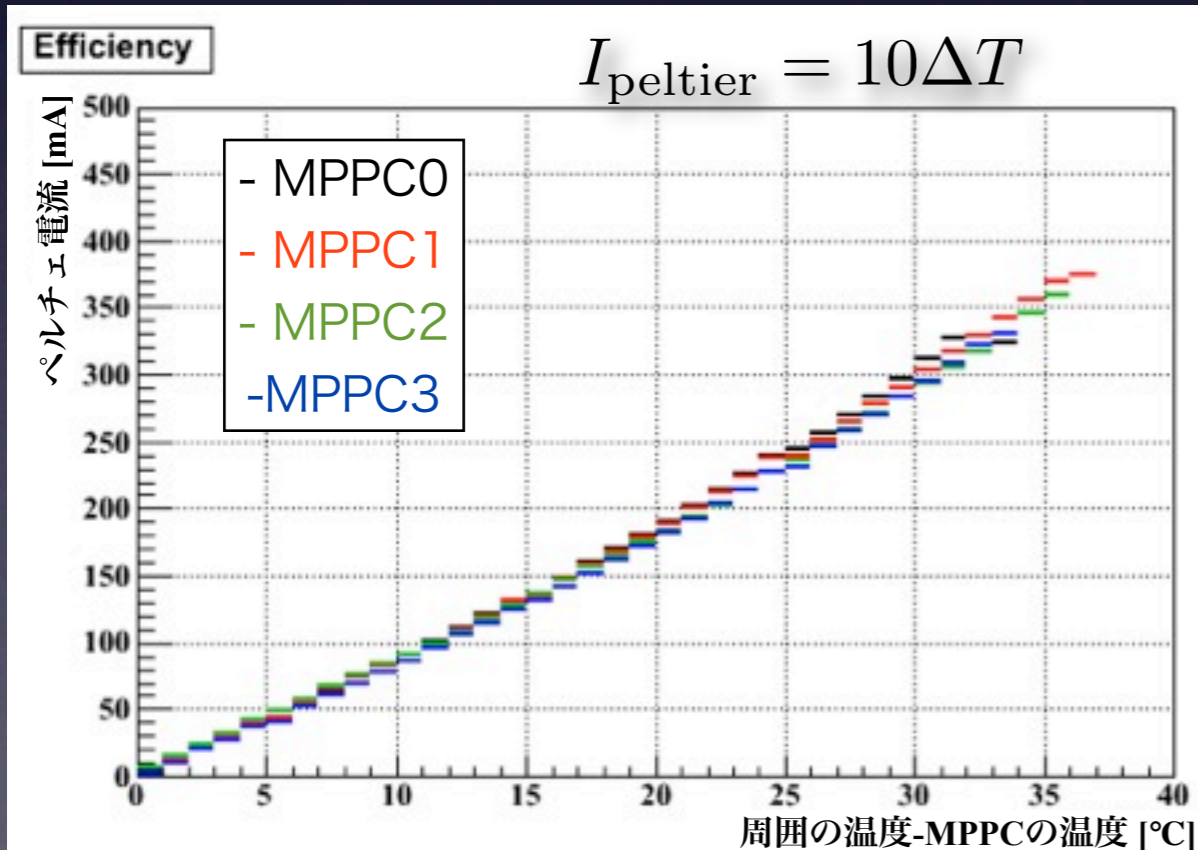
# プレ量産MPPPC

- MPPPCボード Ver.0 と プレ量産MPPPC を用いて 温度コントロールの真空長期試験を行った。

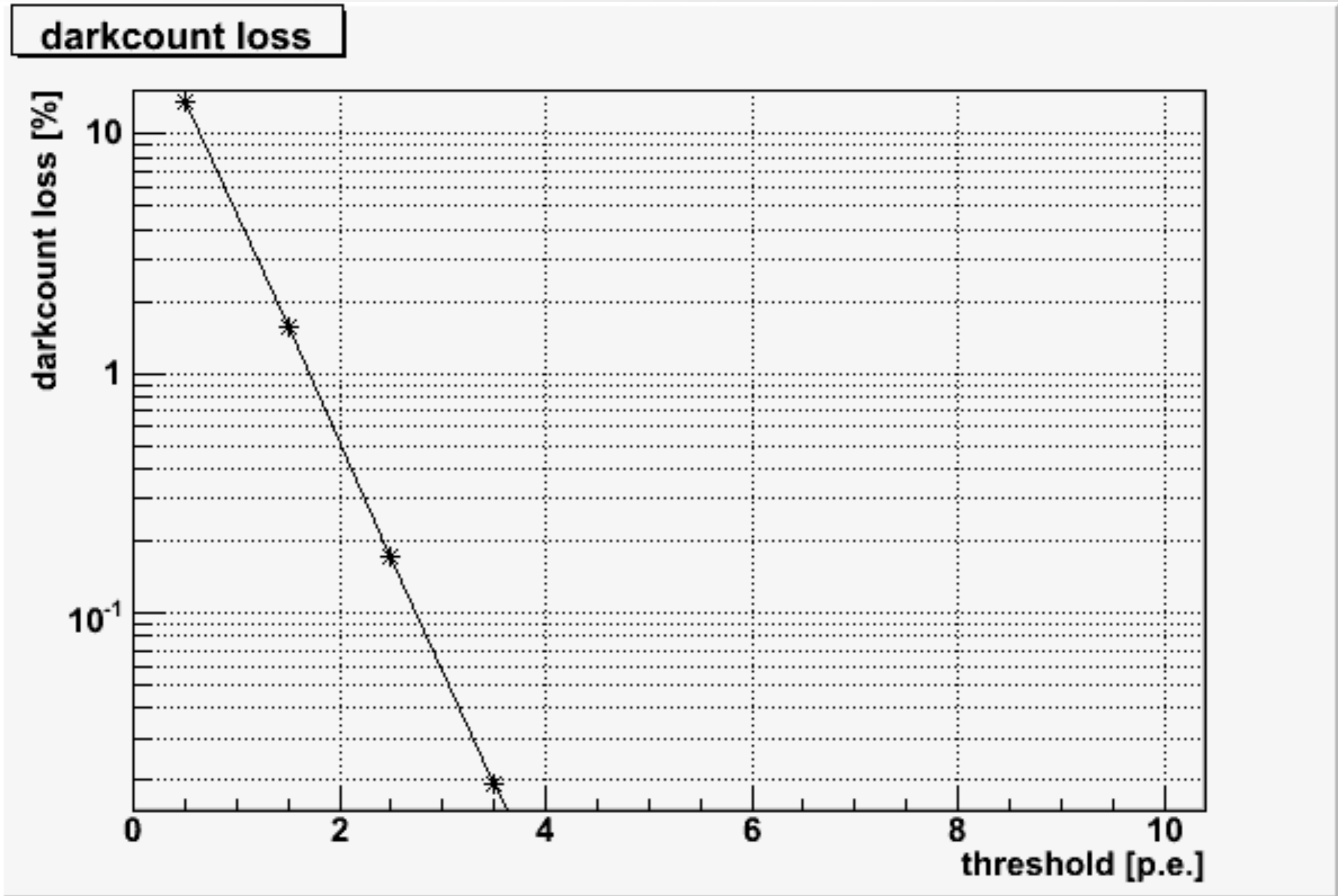
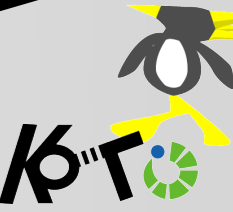


# 長期温度サイクル試験

- 4つのMPPCでは、明らかな個体差は確認されなかった



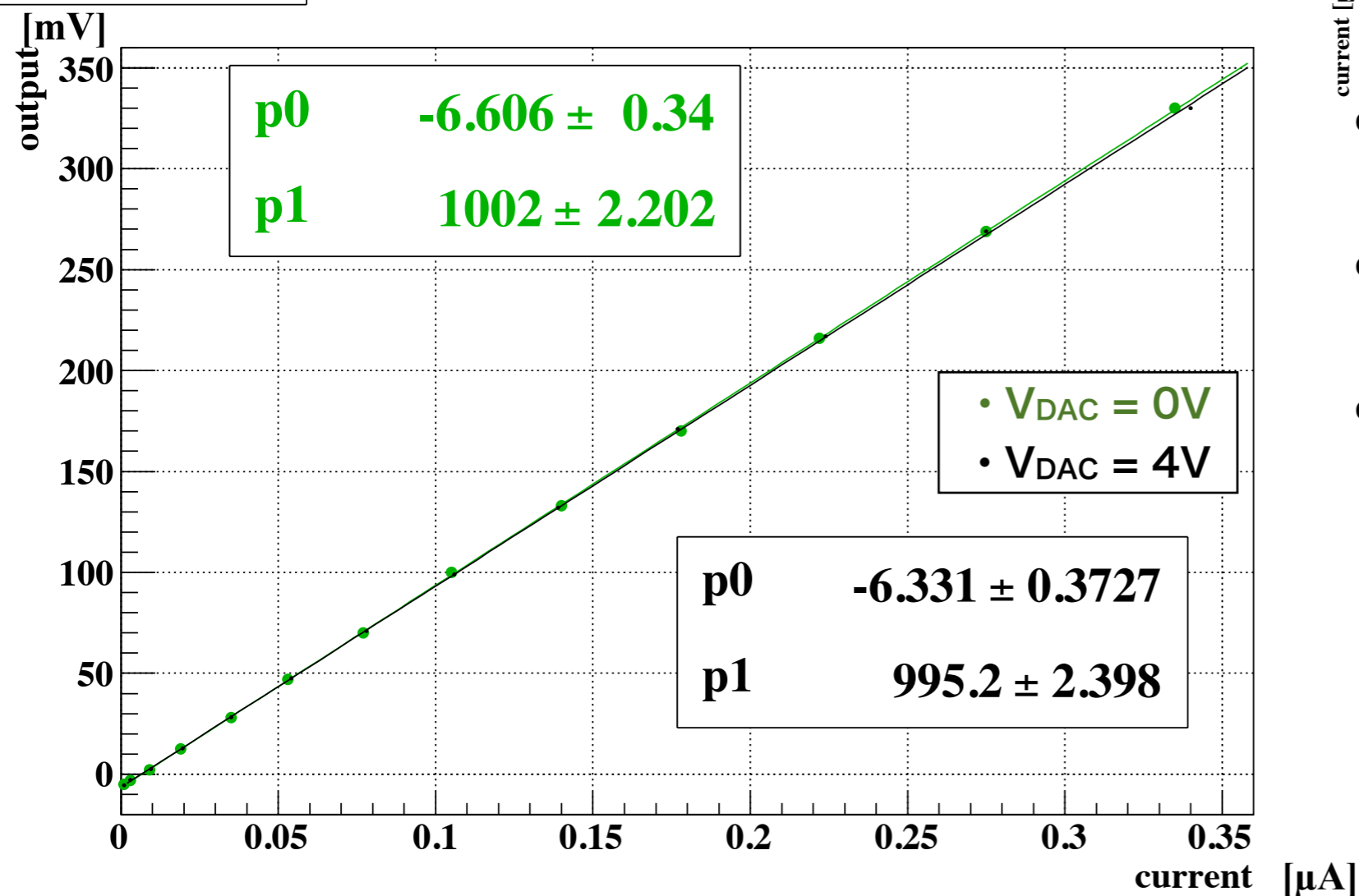
# ダークカウントノイズによるロス



# 試作、評価

- バイアスコントロール電圧が0V, 4Vで、Breakdown voltage ~ 1.5Vの範囲を試験した。
- どちらも設計通り動くことを確認した。

output:current



current:bias

