

K⁰TO実験におけるCharged Vetoの コントロールシステム

京大理、KEK^A、岡山大^B

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^A、笹尾登^B

for the K⁰TO Collaboration



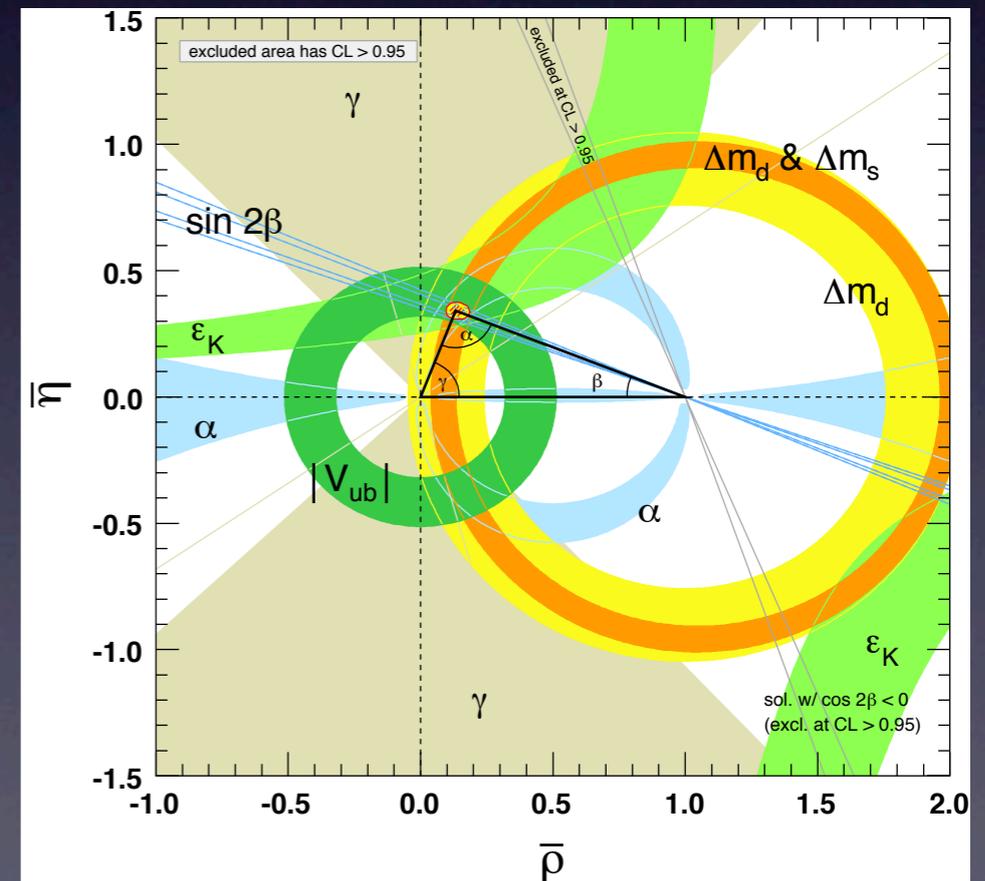
- Introduction
 - K^oTO実験
 - Charged Veto
 - 構成
 - コントロールシステム
 - MPPCの制御

K^0 TO experiment

- K^0 TO (K^0 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 η の直接決定

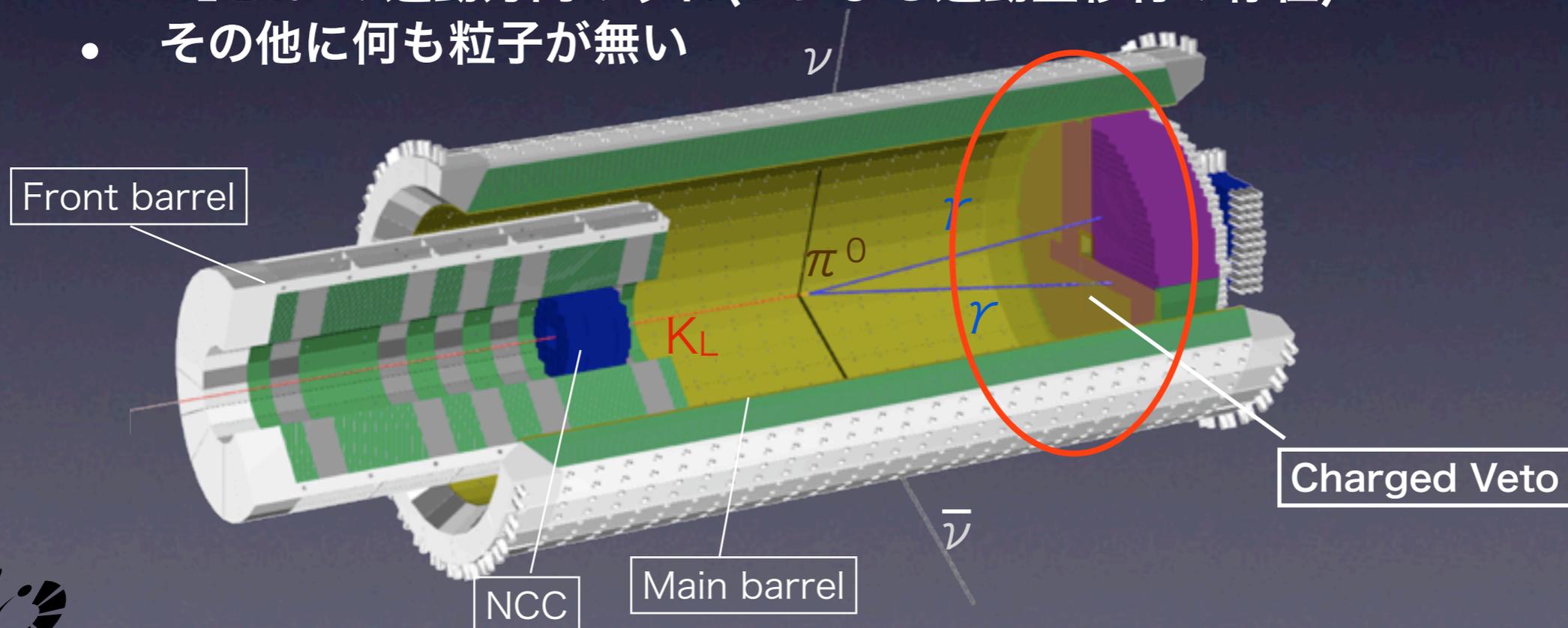


K. Nakamura *et al.* (Particle Data Group), J. Phys. G **37**, 075021 (2010)

Concept

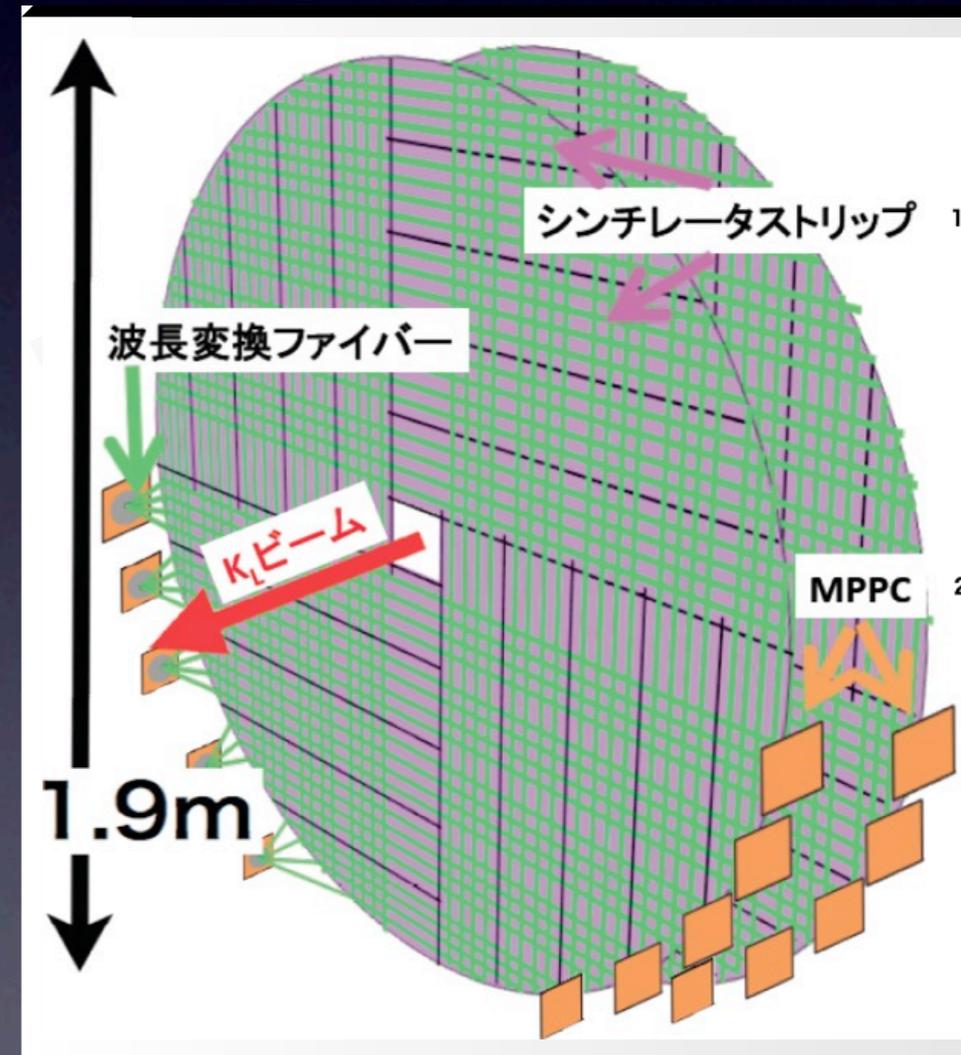
• 信号の同定

- ν は検出できないので、 π^0 からの崩壊粒子を見る
- π^0 の崩壊モード
 - $\pi^0 \rightarrow e^+e^- \gamma$ 荷電粒子のtrackingによる π^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%)
- π^0 からの 2γ
 - CsIカロリメータで γ の位置・エネルギーを求め、 π^0 を再構成
 - K_L と π^0 の運動方向のずれ(ν 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

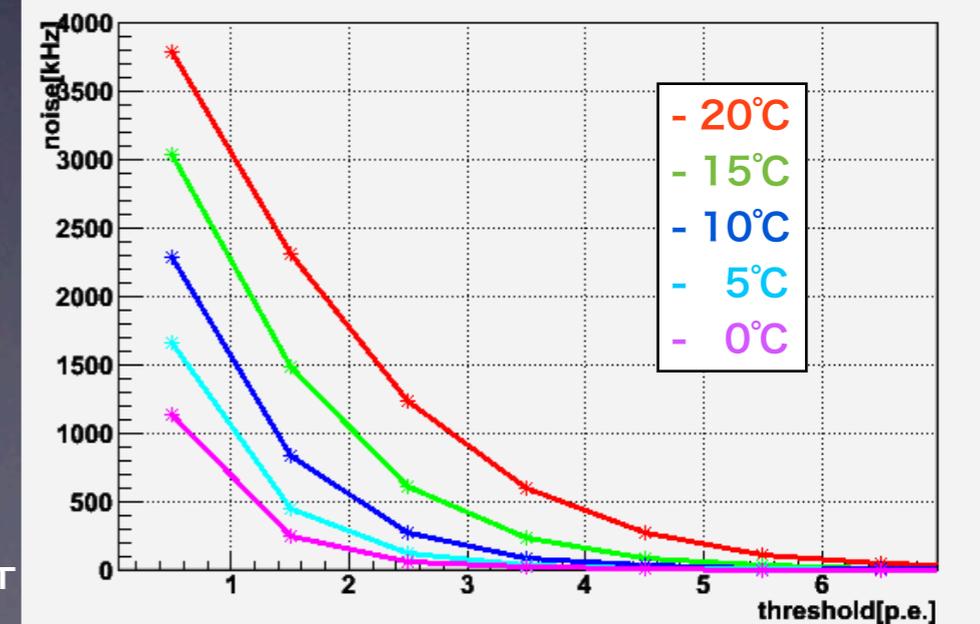
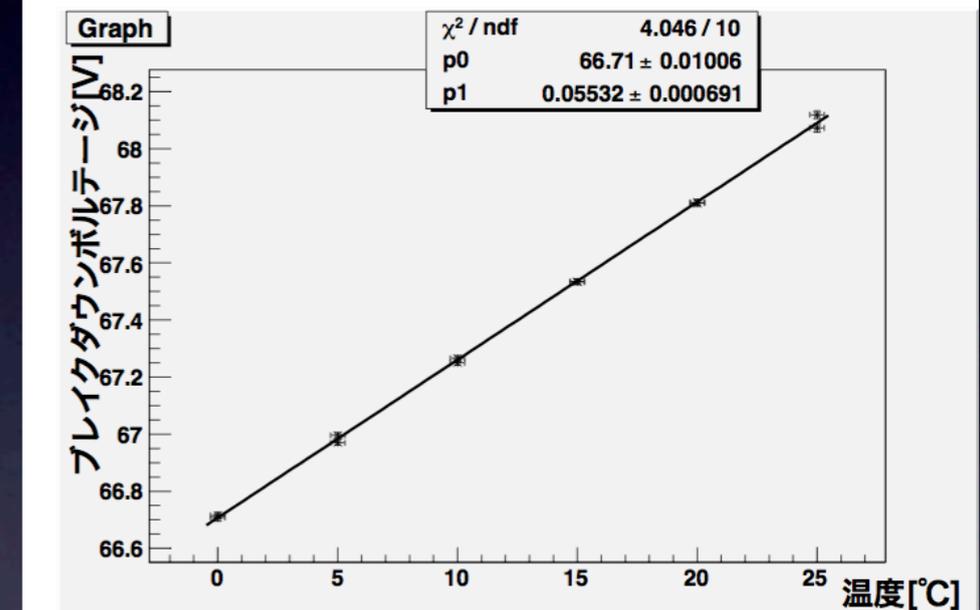
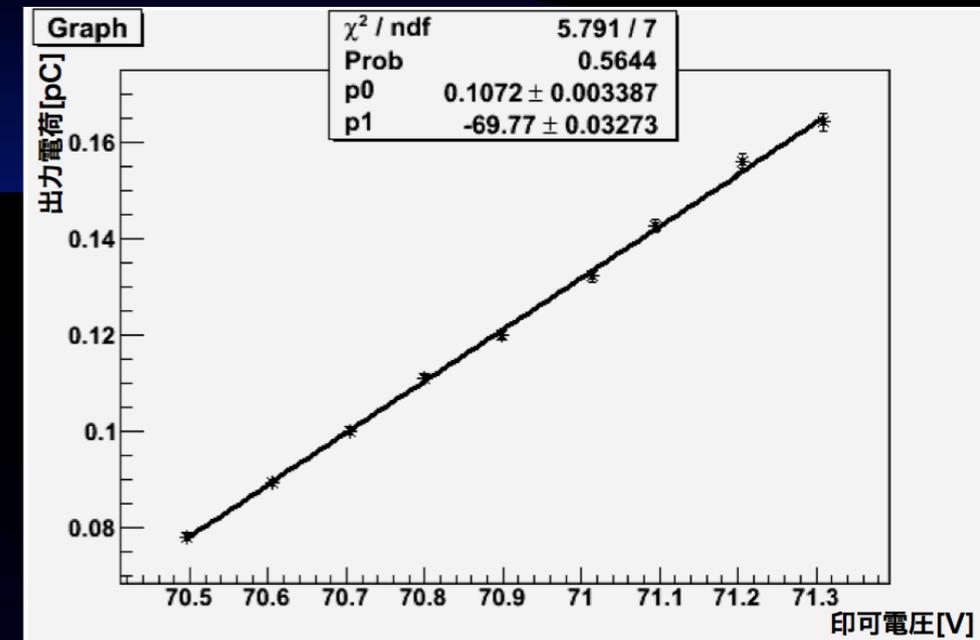
- CVは読み出しにMPPCを用いている

✓ 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°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

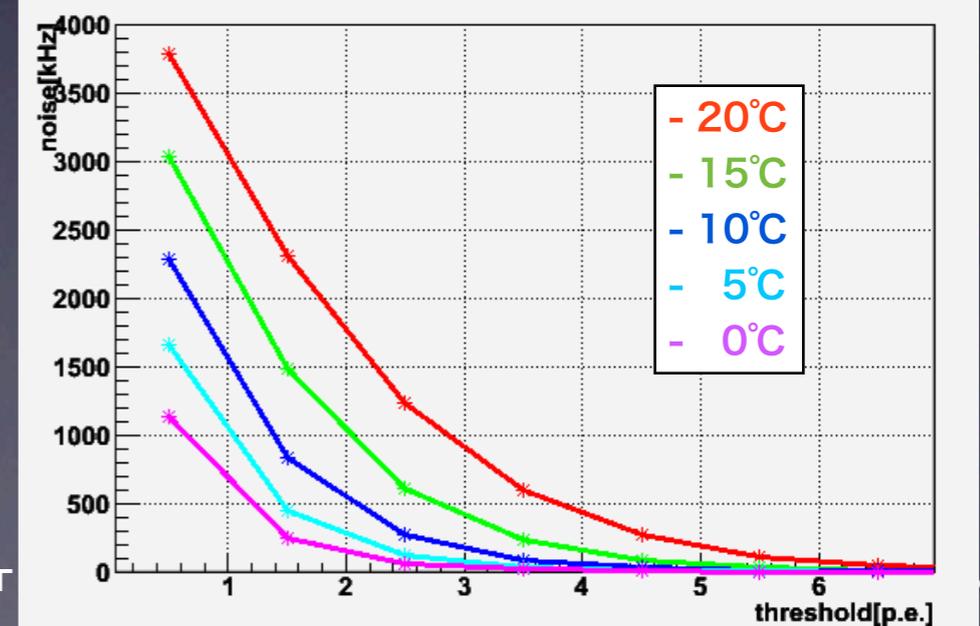
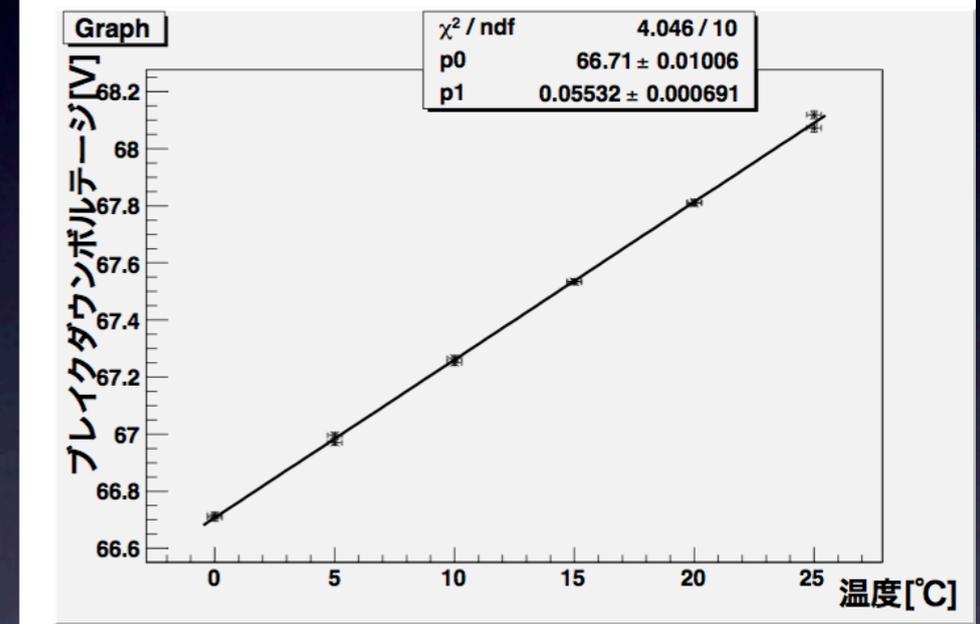
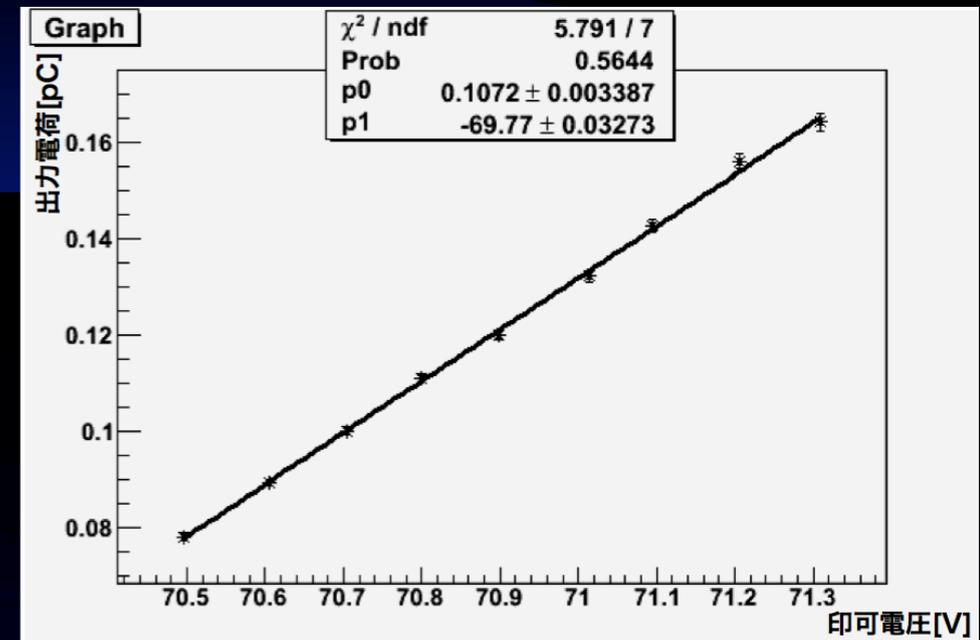
- 低ゲイン ($\sim 10^5$)
- 高ダークカウントレート ($\sim 1\text{MHz}$ @ 20°C , 1p.e.)
- 温度依存性
 - Break down voltage ($50\text{mV}/^\circ\text{C}$)
 - 量子効率($5\%/^\circ\text{C}$)
 - ダークカウントレート(右下図)

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

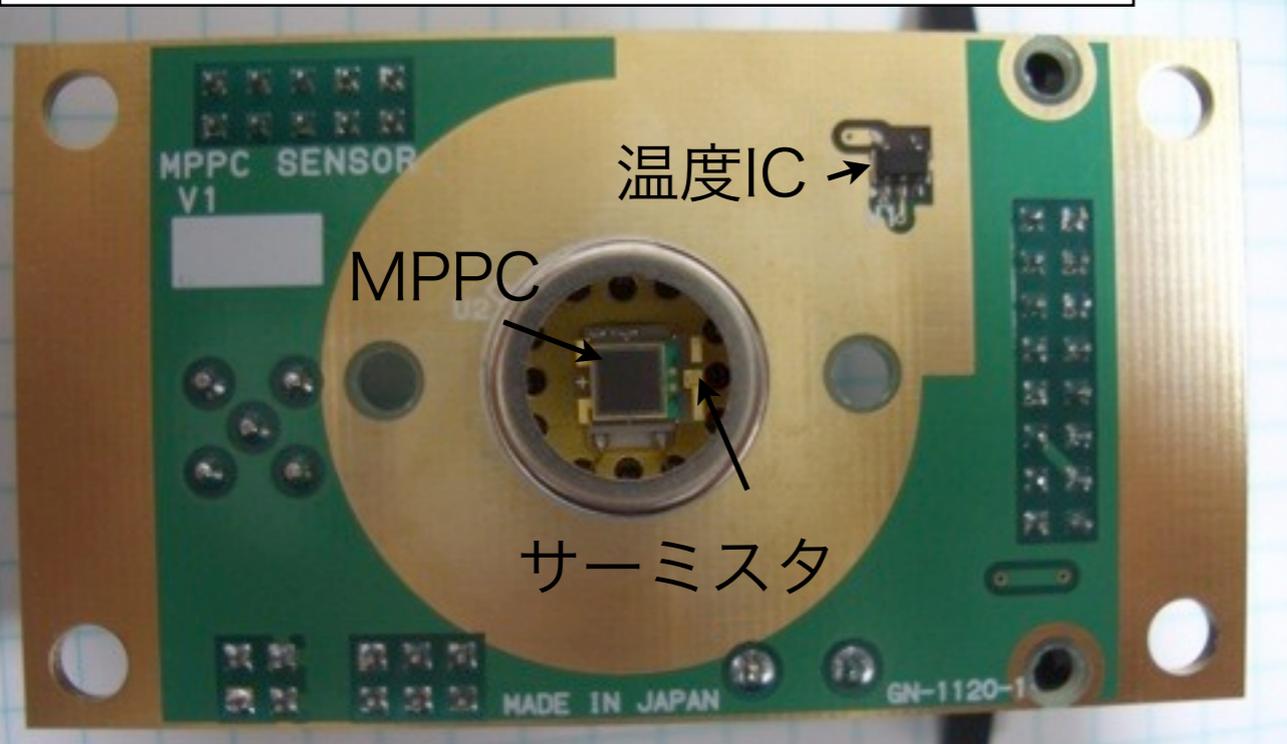
低温で動作させるのが望ましい



MPPPC温度コントロール

- K^oTO実験では、MPPPC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MPPPC」を開発した。
 - ピクセルサイズ 50×50μm²
 - 受光面 3×3mm²
 - 2段型ペルチェ素子内蔵

K^oTO-MPPPCボードに実装した状態



KOTO ver. MPPPC 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 μ 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 Ω)	MPPCの温度測定
		Temperature monitor	K ^o 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

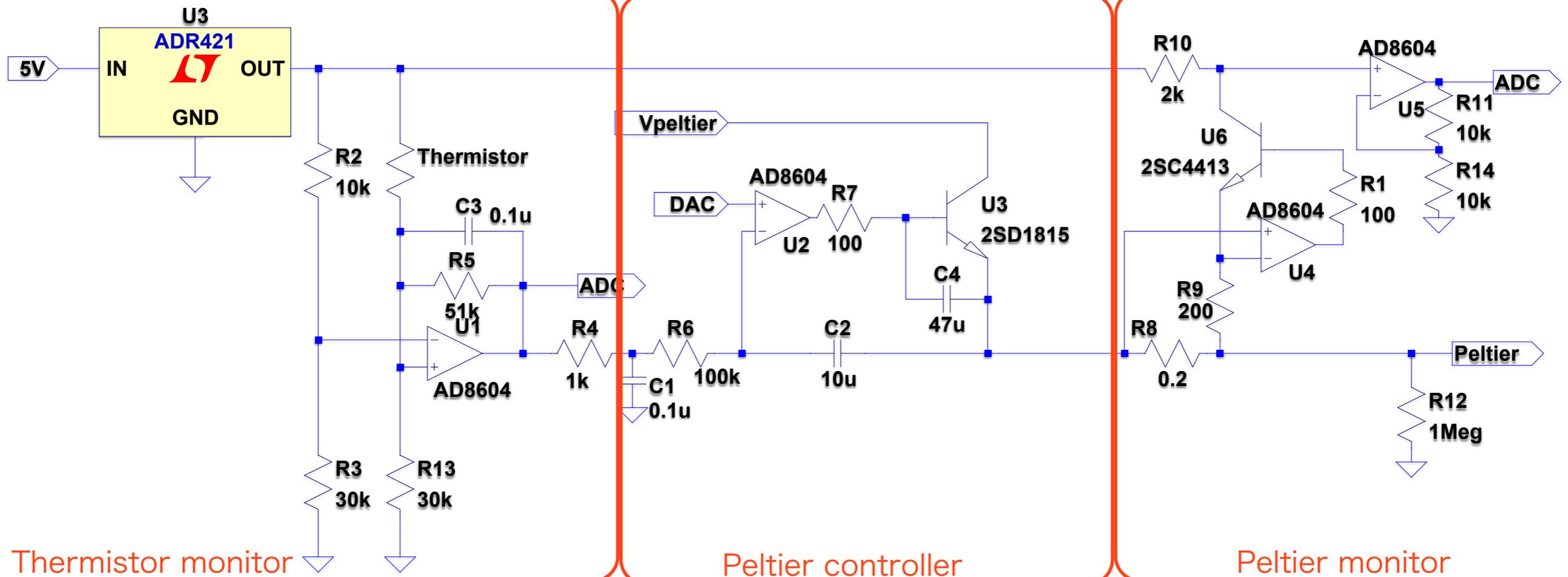
CVコントロール

- 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 μ 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 Ω)	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

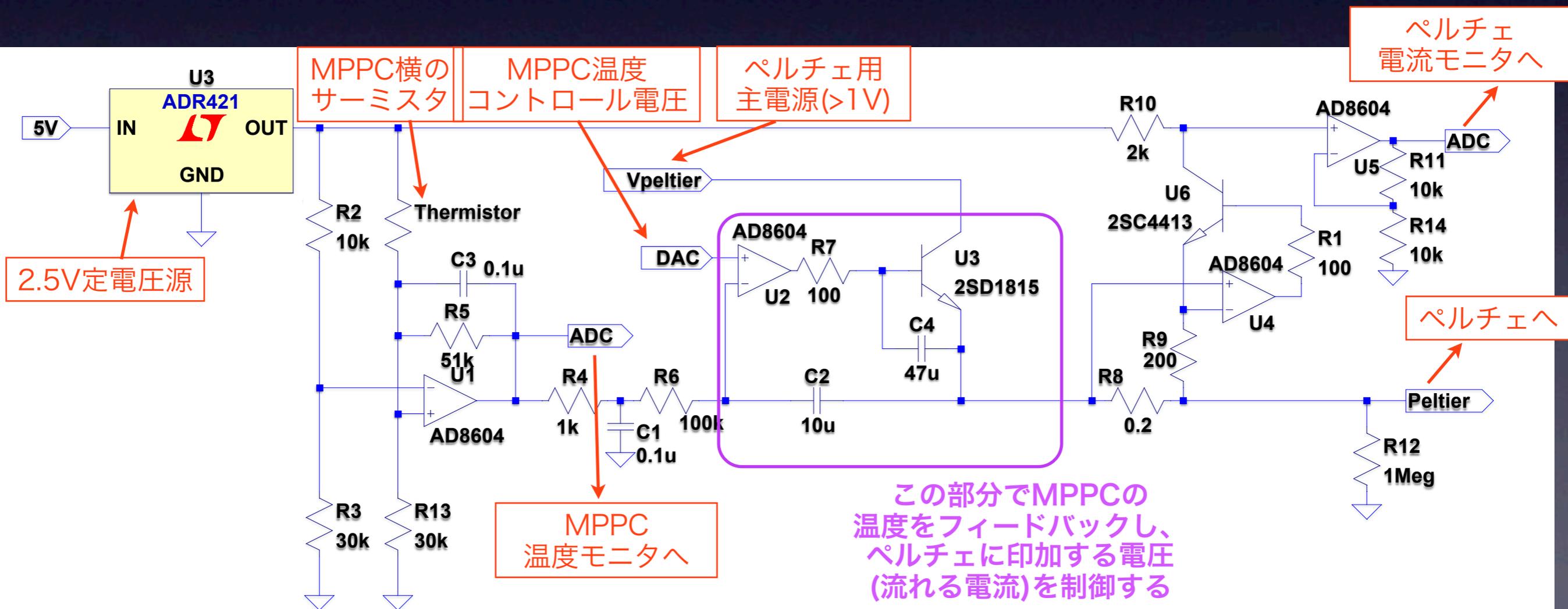
温度コントロール回路

- 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

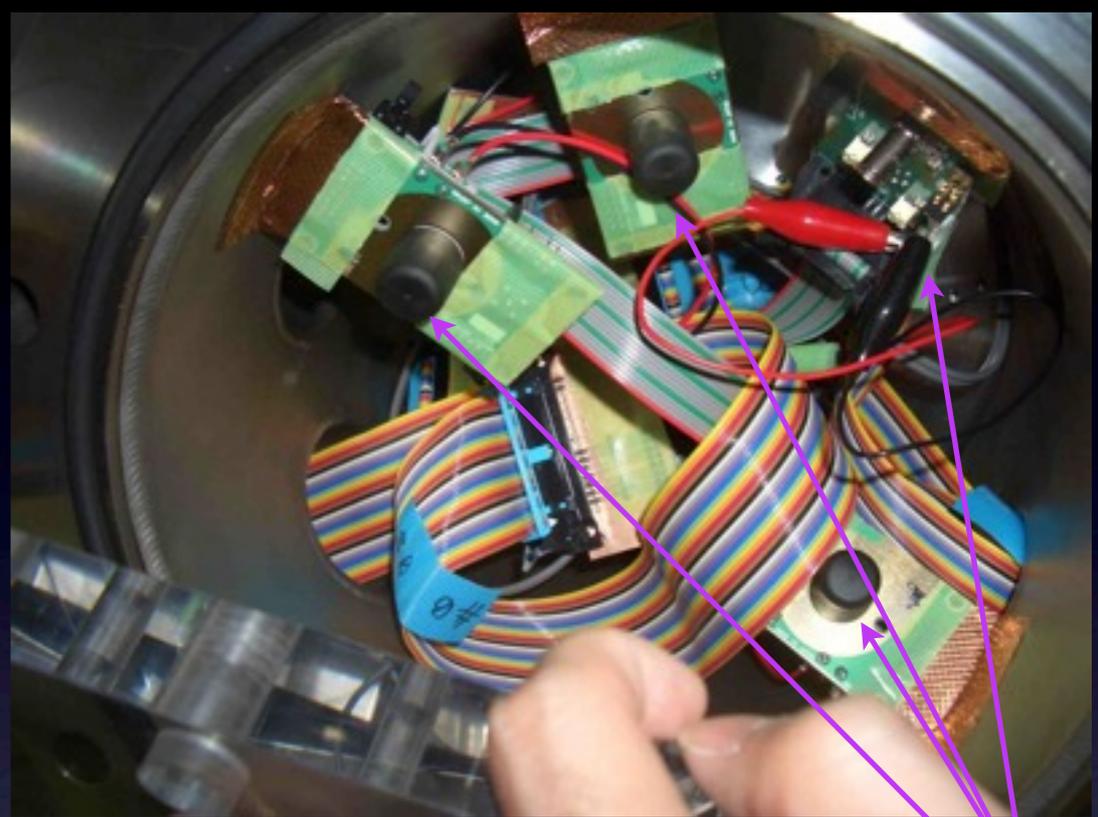
- PID制御のうち、I制御のみでコントロール
- アナログ制御なので、運用が簡便
 - MPPC(のすぐ横のサーミスタ)の温度を読み取り、フィードバックをかけてペルチェにかかる電圧(電流)を制御する



試験Set up

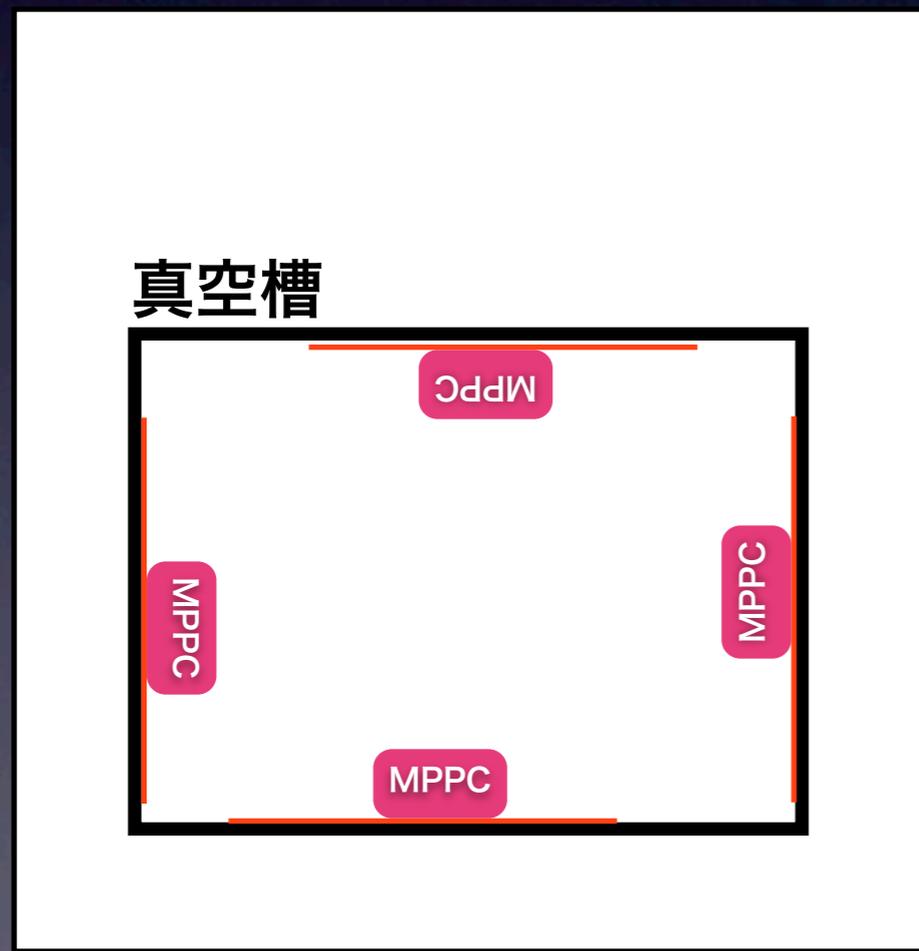
試作した回路を用いて、長期試験を行った

- 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

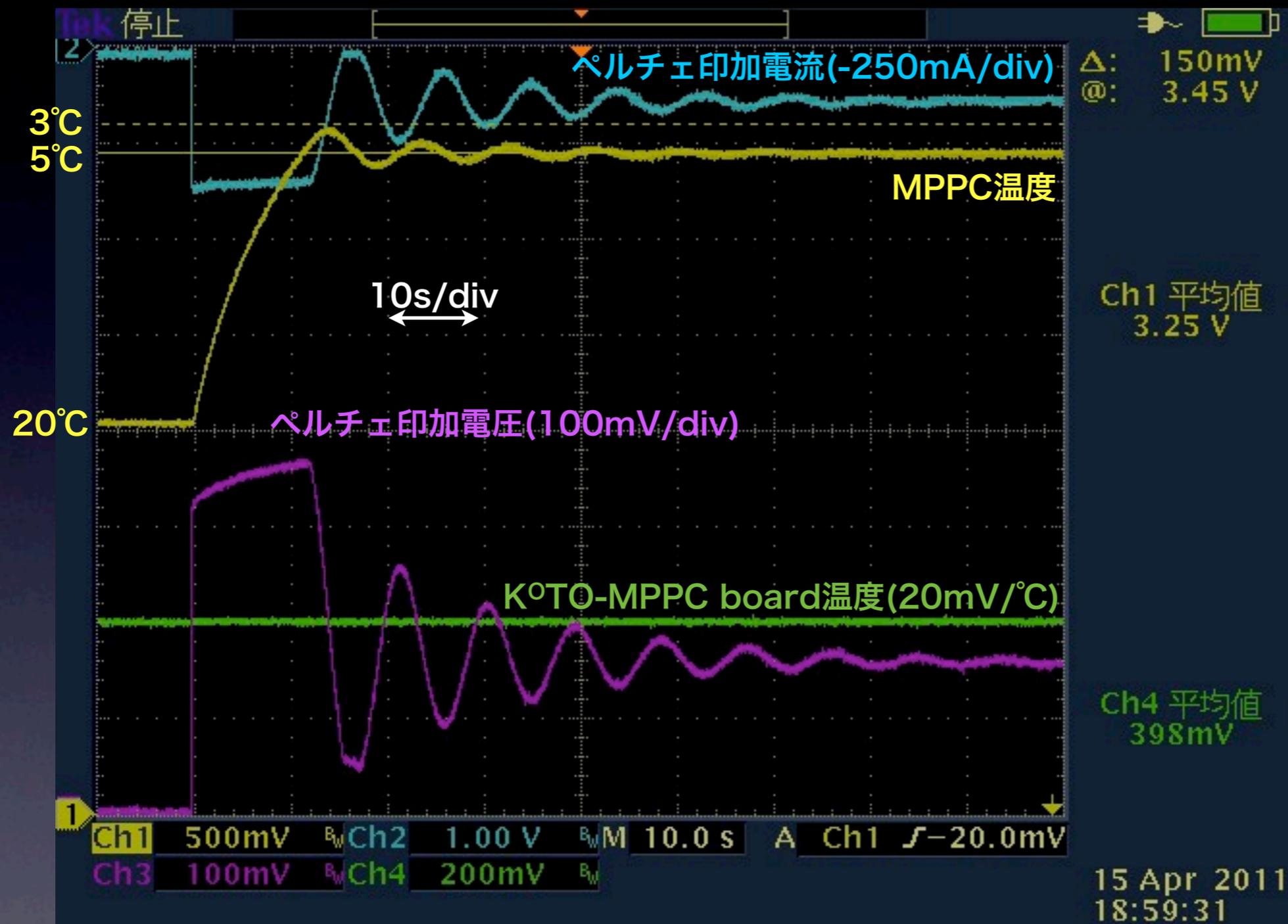


MPPC

恒温槽



初期変化 (20°C→5°C)

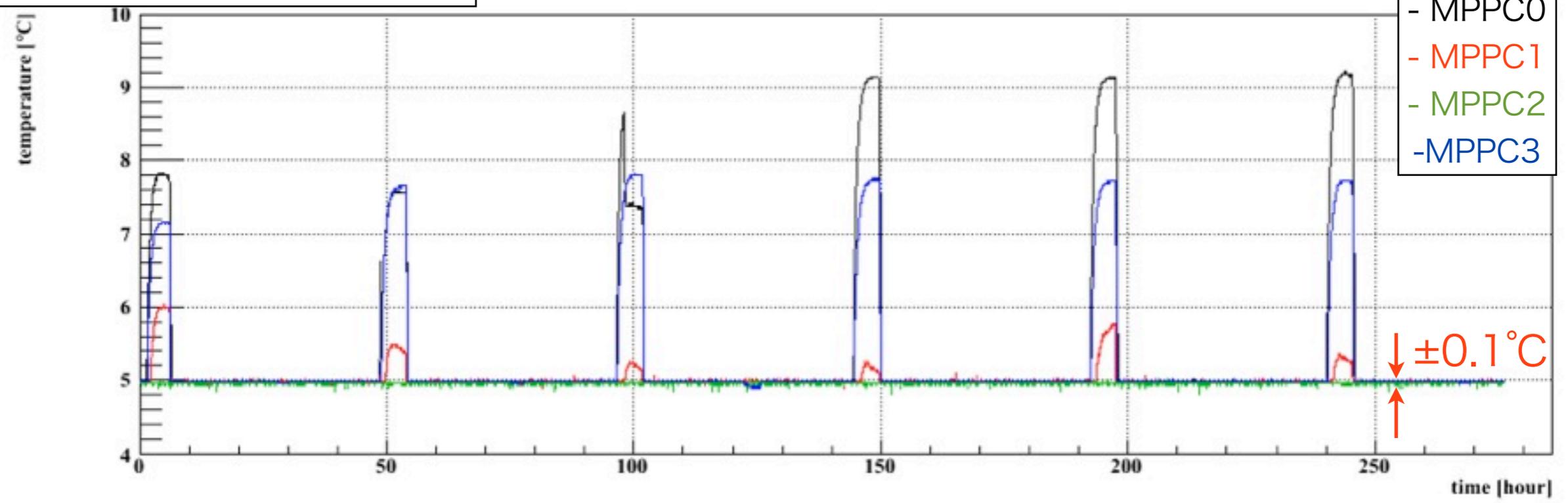


恒温槽 20°C
真空度 7Pa
Vpeltier 1V
設定値 5°C

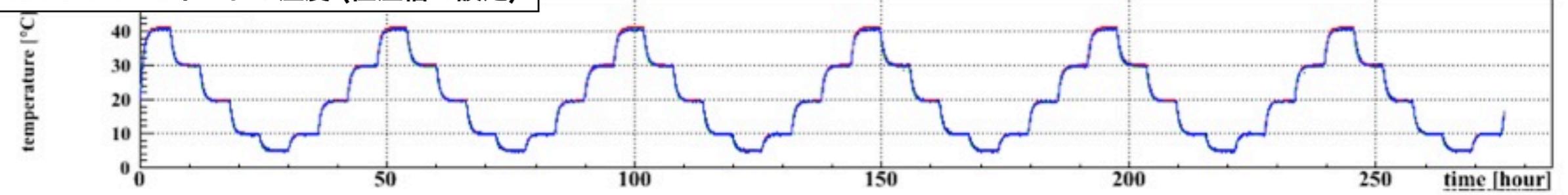
- 約1分で安定化

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

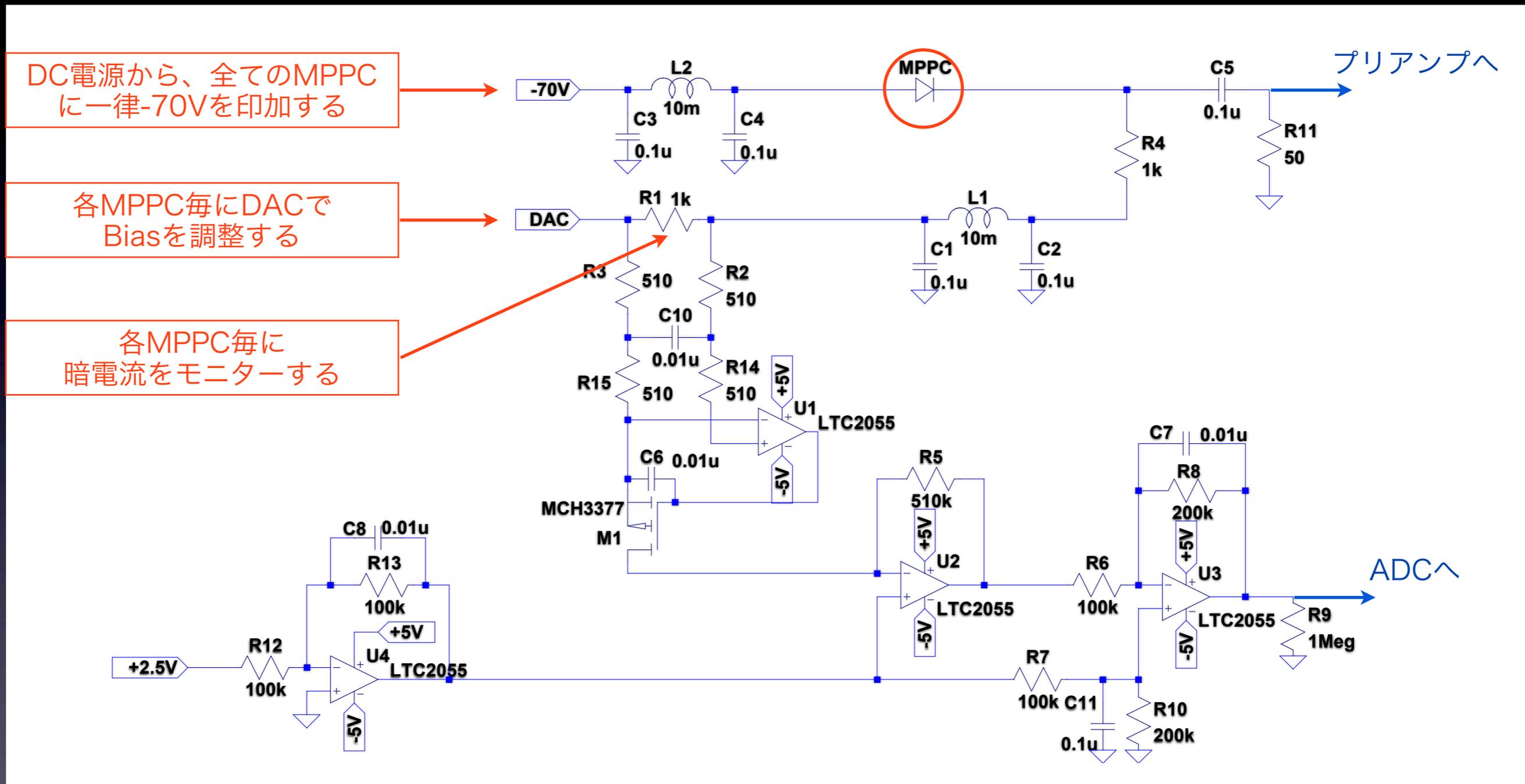
	Control	Monitor	Note
MPPC bias	Negative bias (-70V) ON/OFF	Negative bias voltage	1ch毎にBiasのOn/Offを行う
	Control bias 0-5V	Control bias voltage	1ch毎にGain調整
		Bias current (0.1 μ A)	MPPCに流れている暗電流の確認
MPPC temp.	Temperature feedback	Peltier voltage (100mV)	MPPCの温度調整
		Peltier current (100mA)	ペルチェ電流調整
		Thermistor resistance (10k Ω)	MPPCの温度測定
		Temperature monitor	K ^o 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 μ 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 Ω)	MPPCの温度測定
		Temperature monitor	K ^o 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

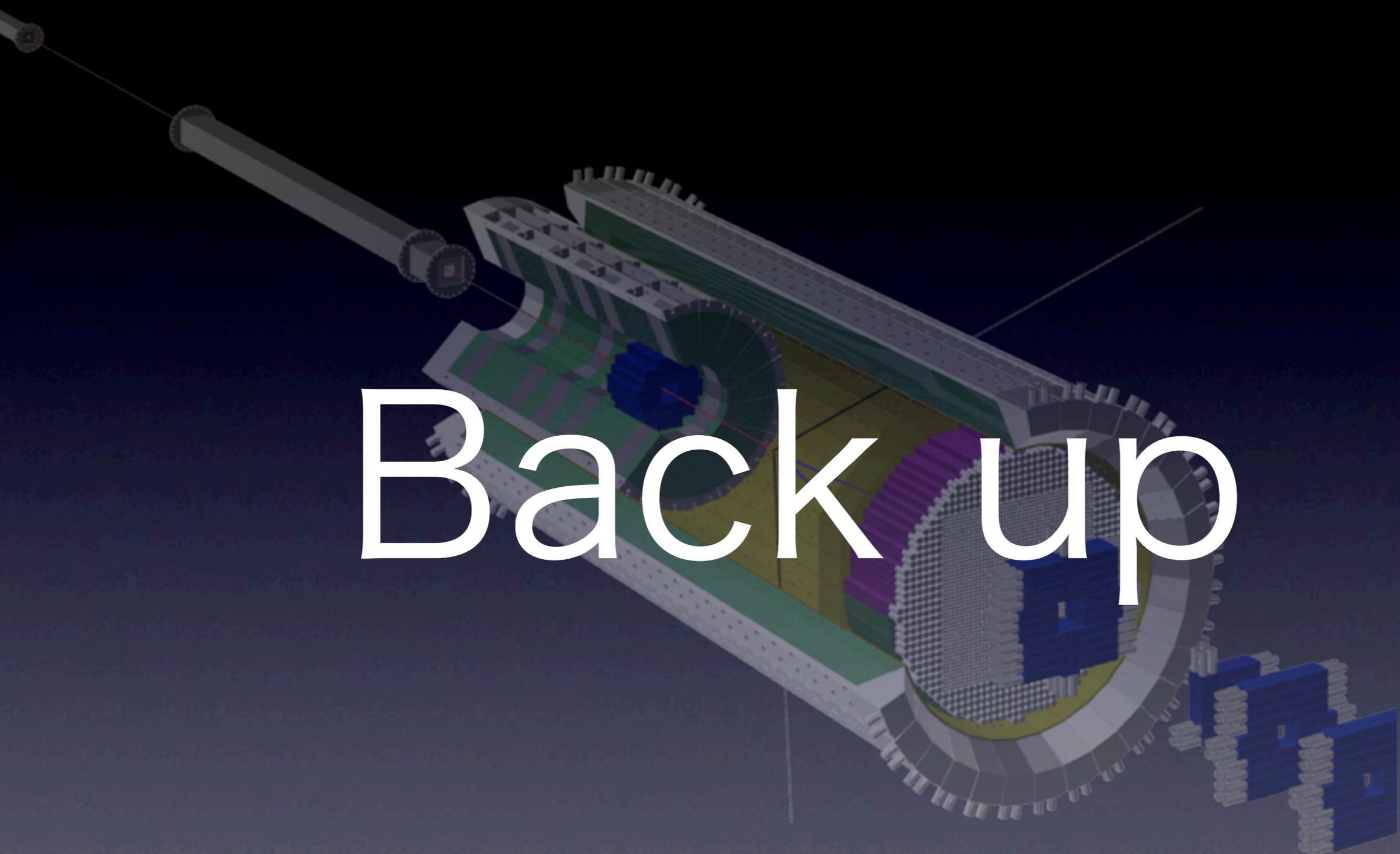


- アノード側(-70V)の電圧は全MPPC一律で固定とし、カソード側の電圧(0~5V)でBiasをコントロール
- MPPCの暗電流を常時モニターし、動作保証に用いる

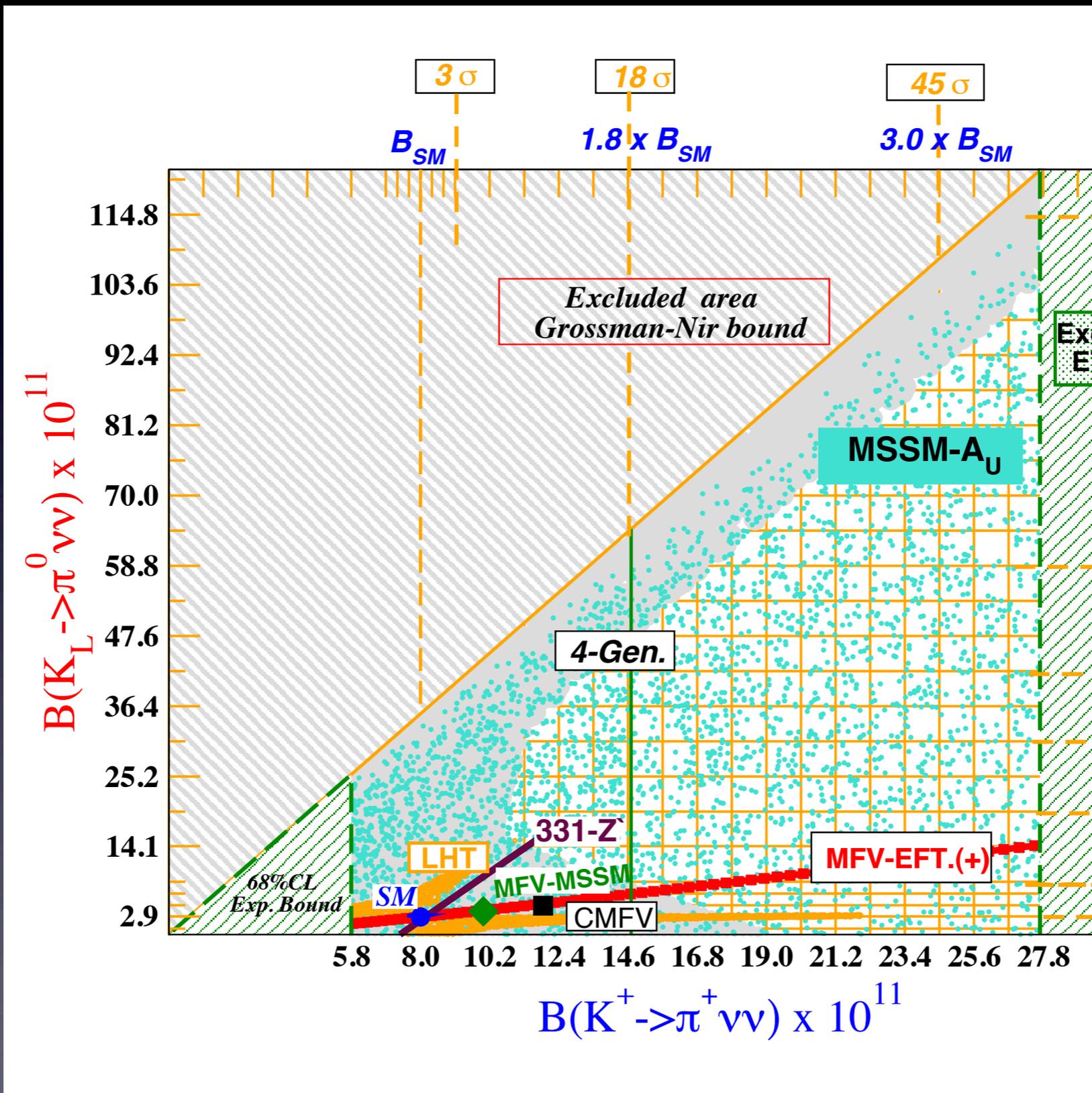
Summary & Schedule

- K⁰TO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。

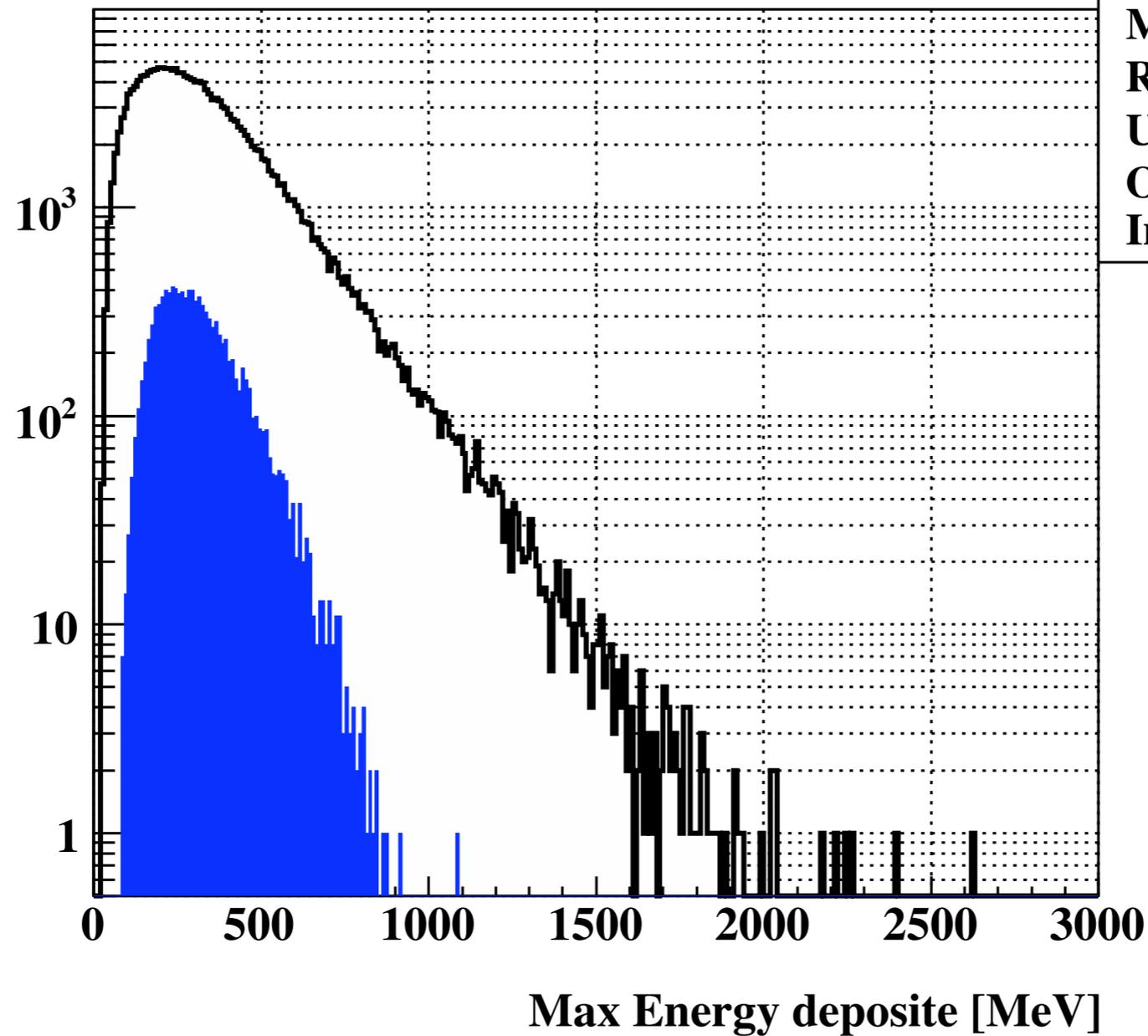
Backup



Beyond SM



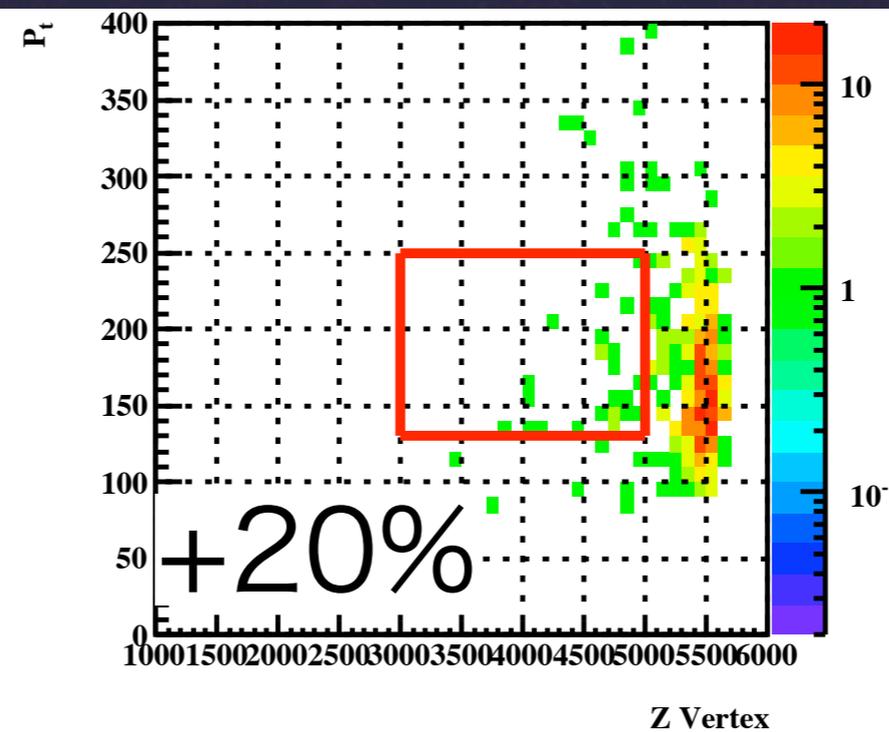
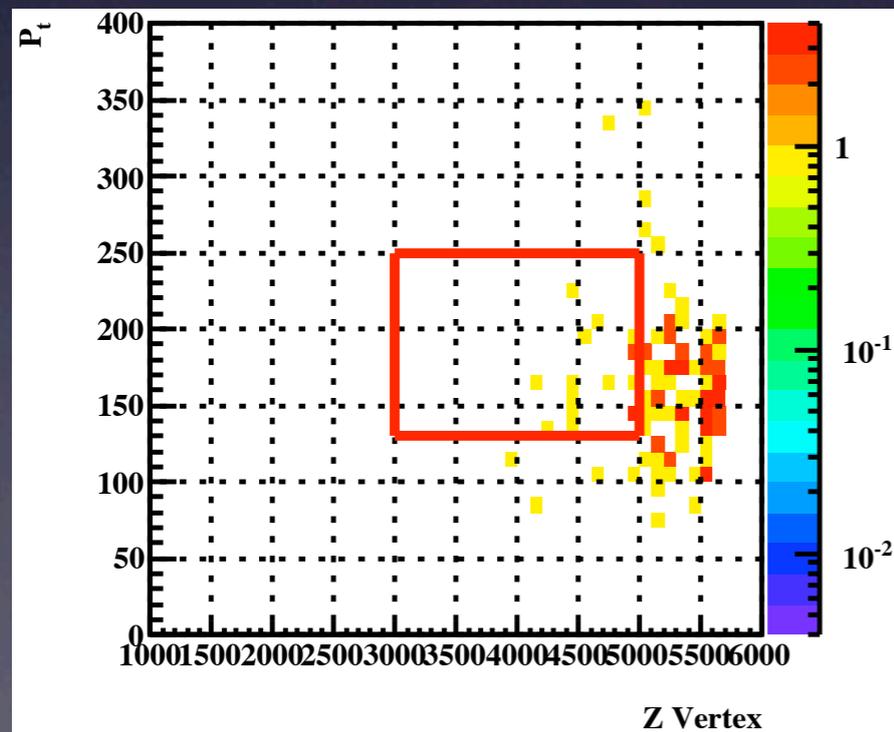
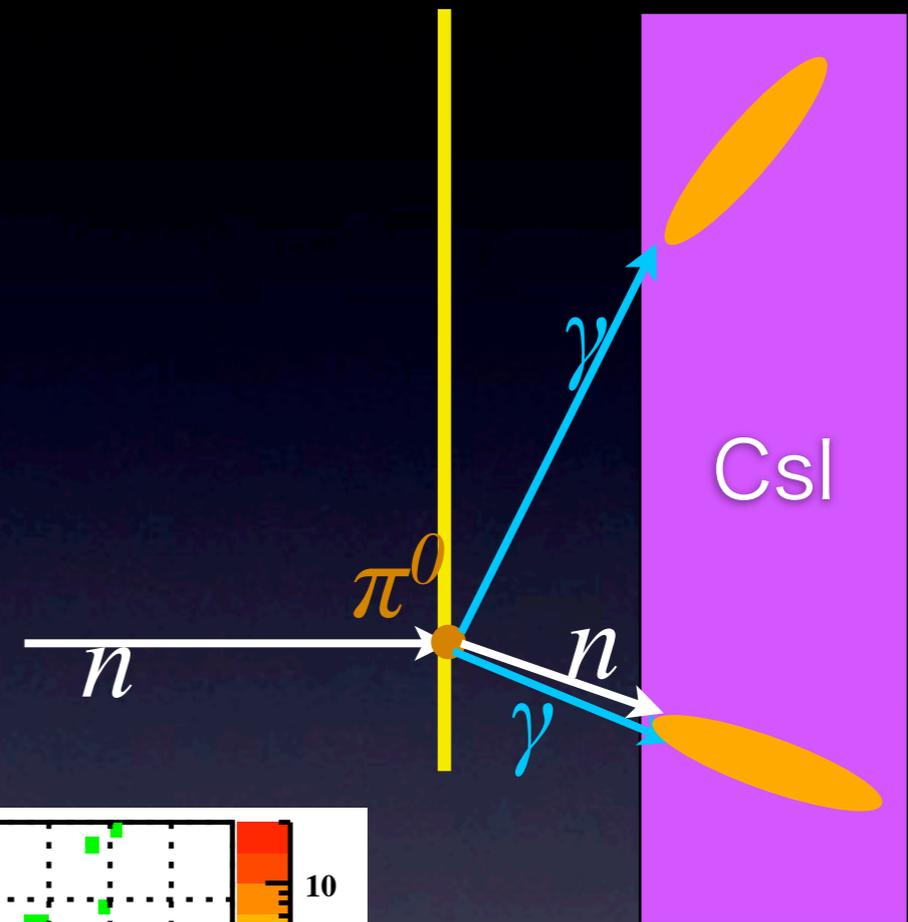
Energy deposit

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


CV- π^0 B.G.

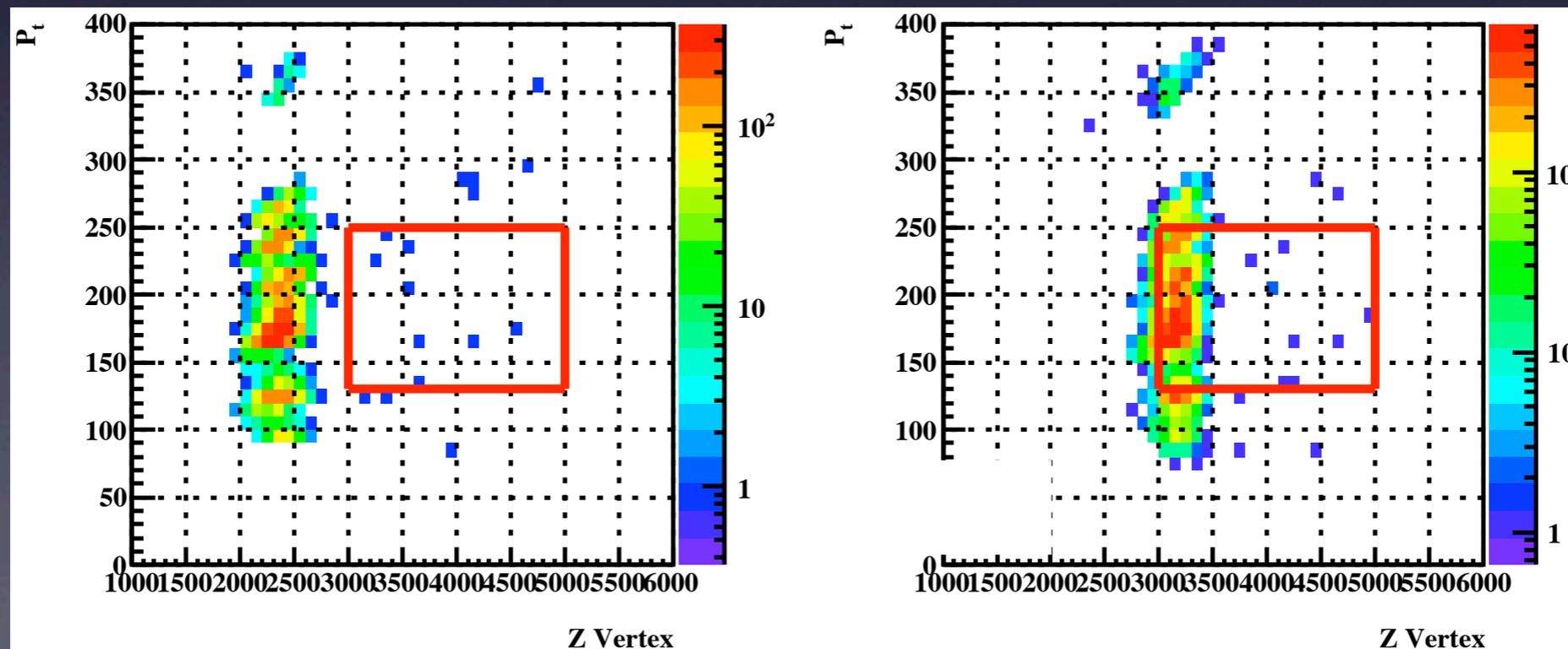
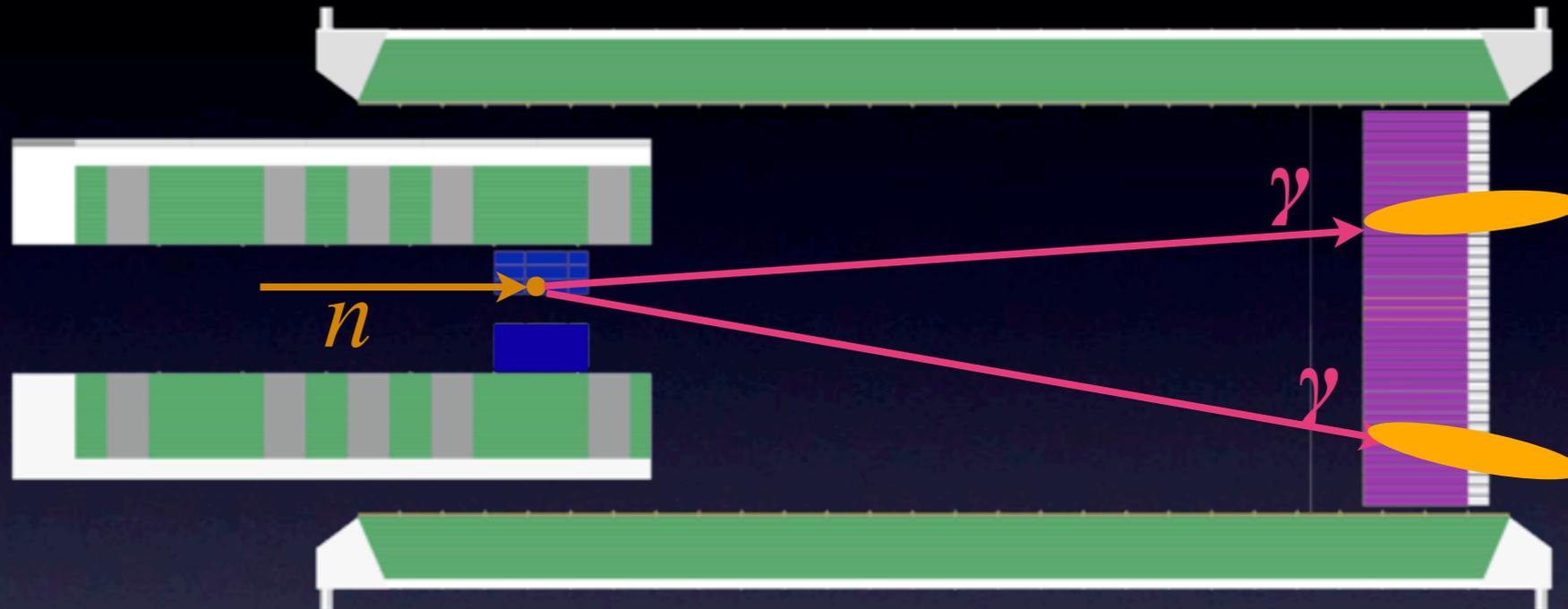
- エネルギーを大きく間違えると増加

CV



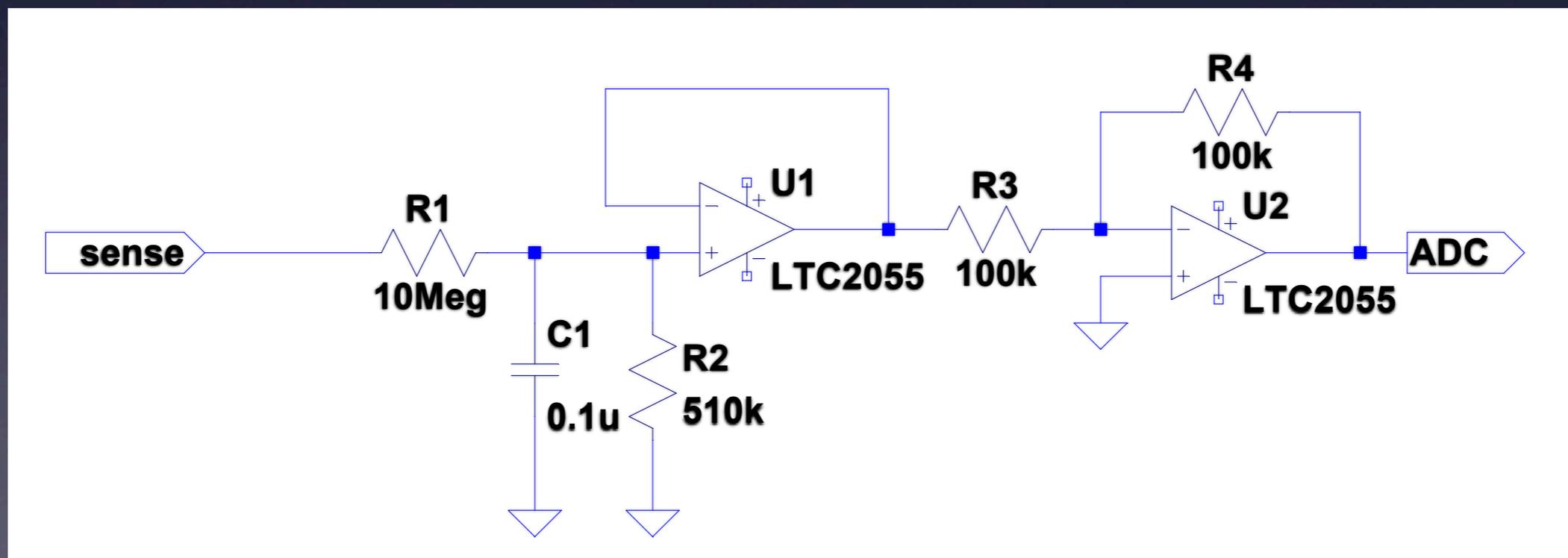
CC02- π^0 B.G.

- エネルギーを小さく間違えると増加



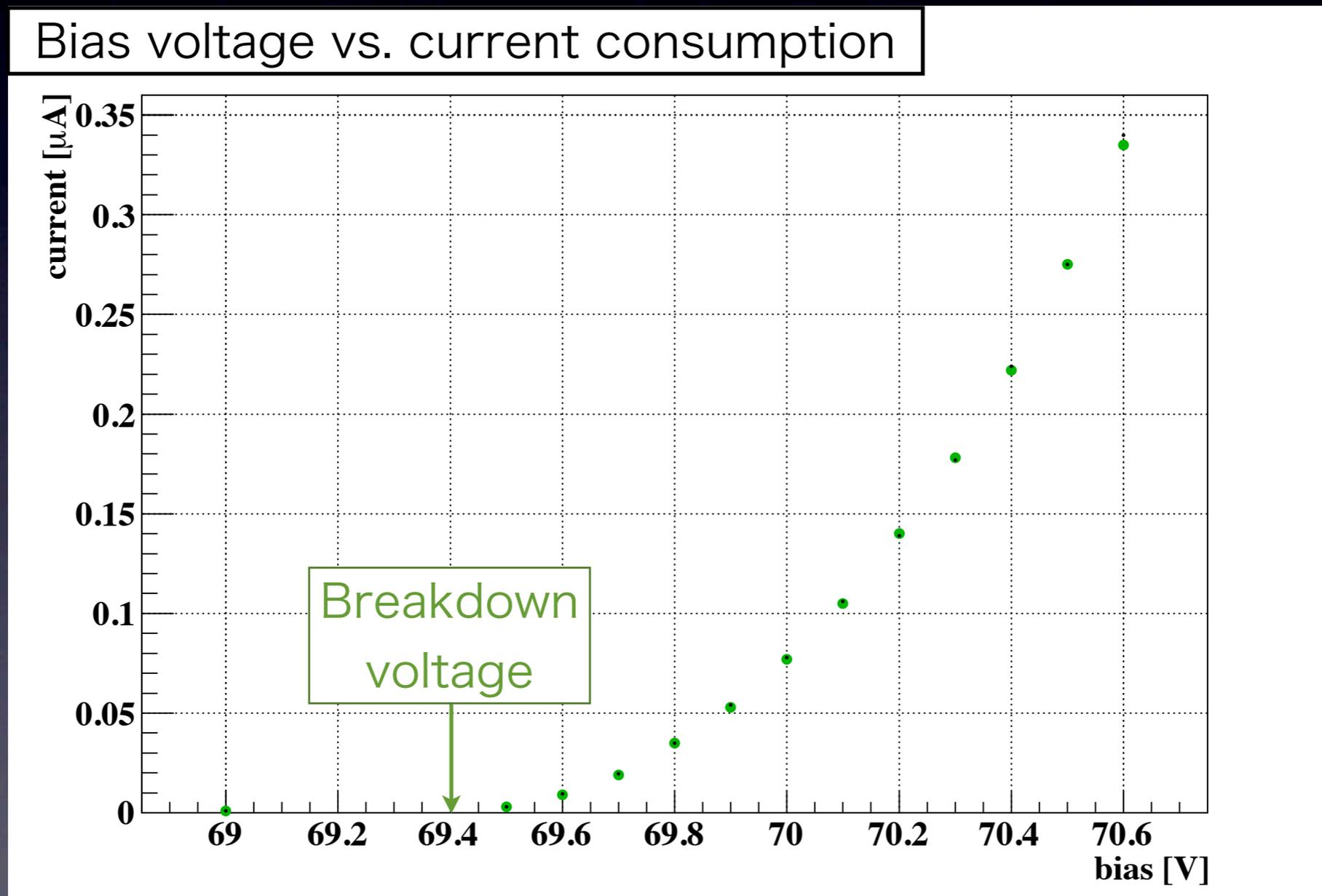
Bias On/Off/Monitor

- 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

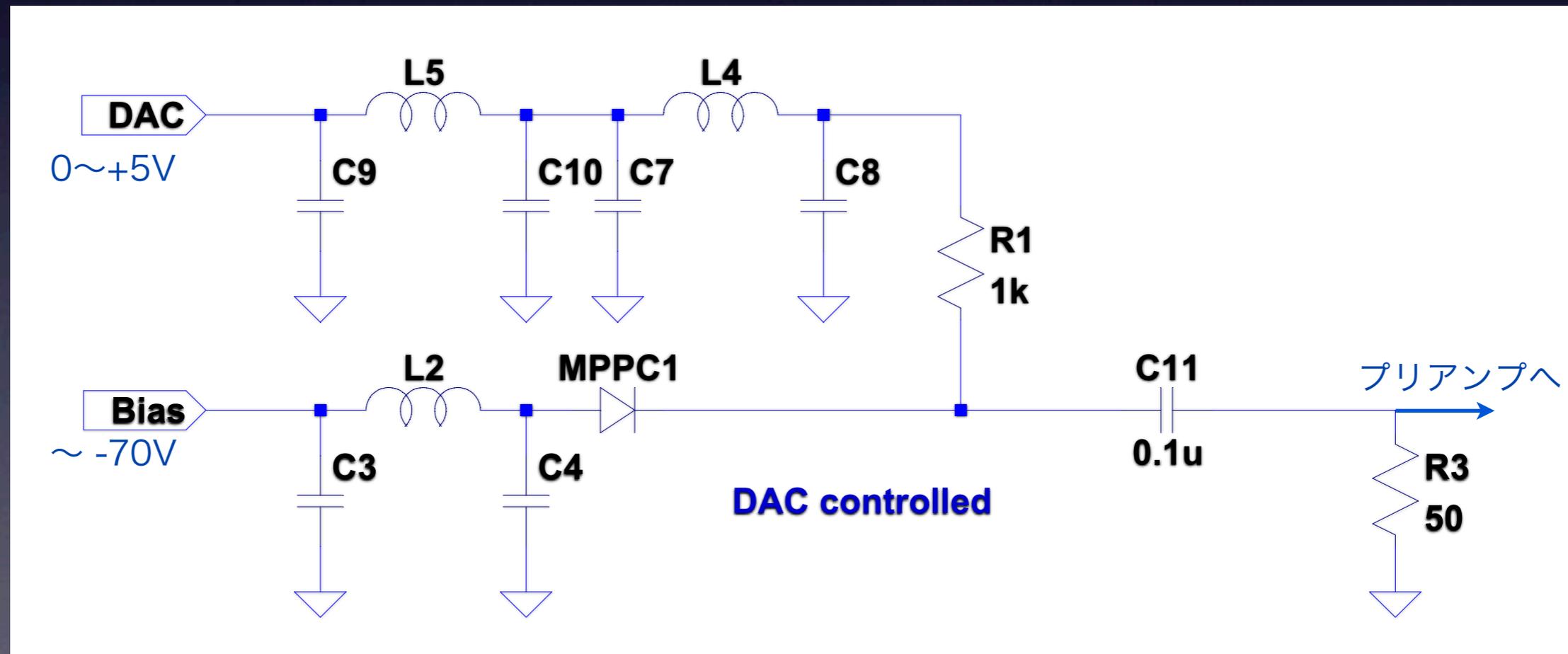


システム概要

	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 μ 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 Ω)	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

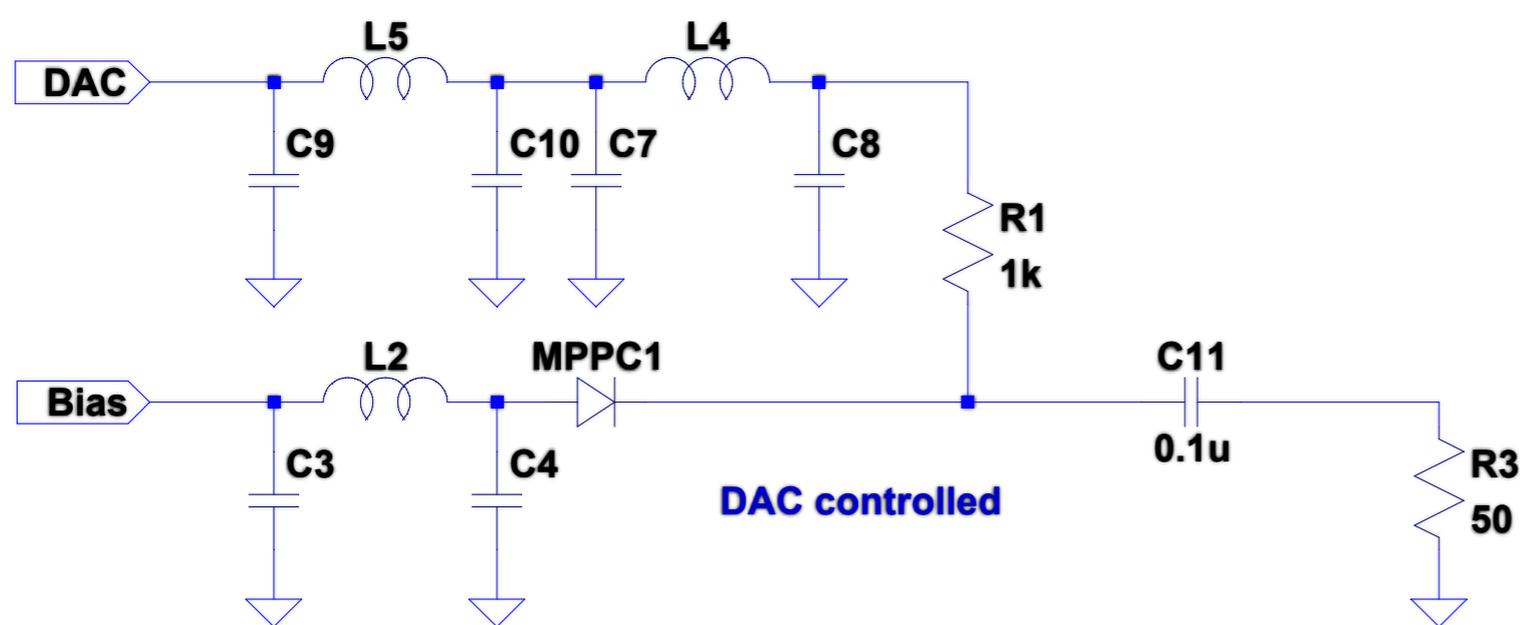
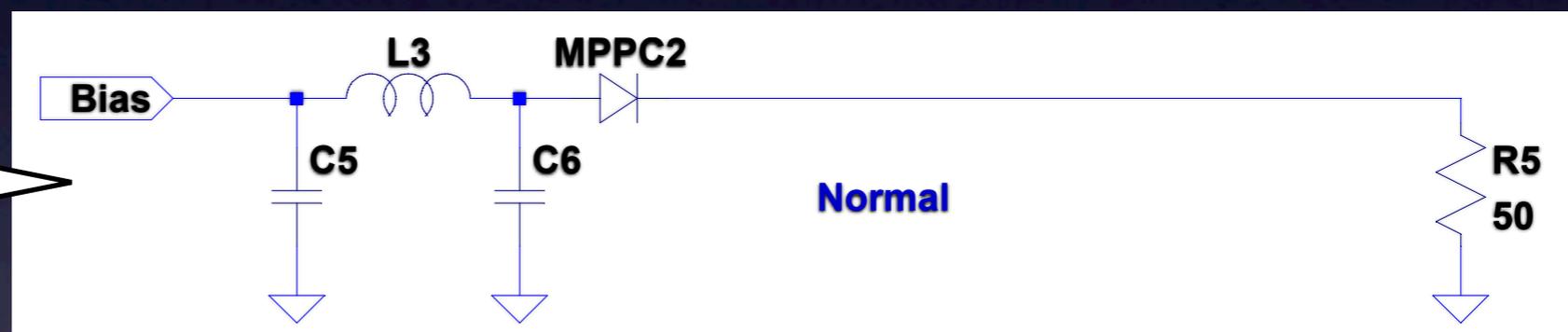
- 全MPPPCの出力を揃える
 - -70Vに対して100mV程度で調整を行う必要がある
- Negative bias(-70V)を全MPPPC一律にかけ、信号側の電位をDACで調整する方式を取る



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

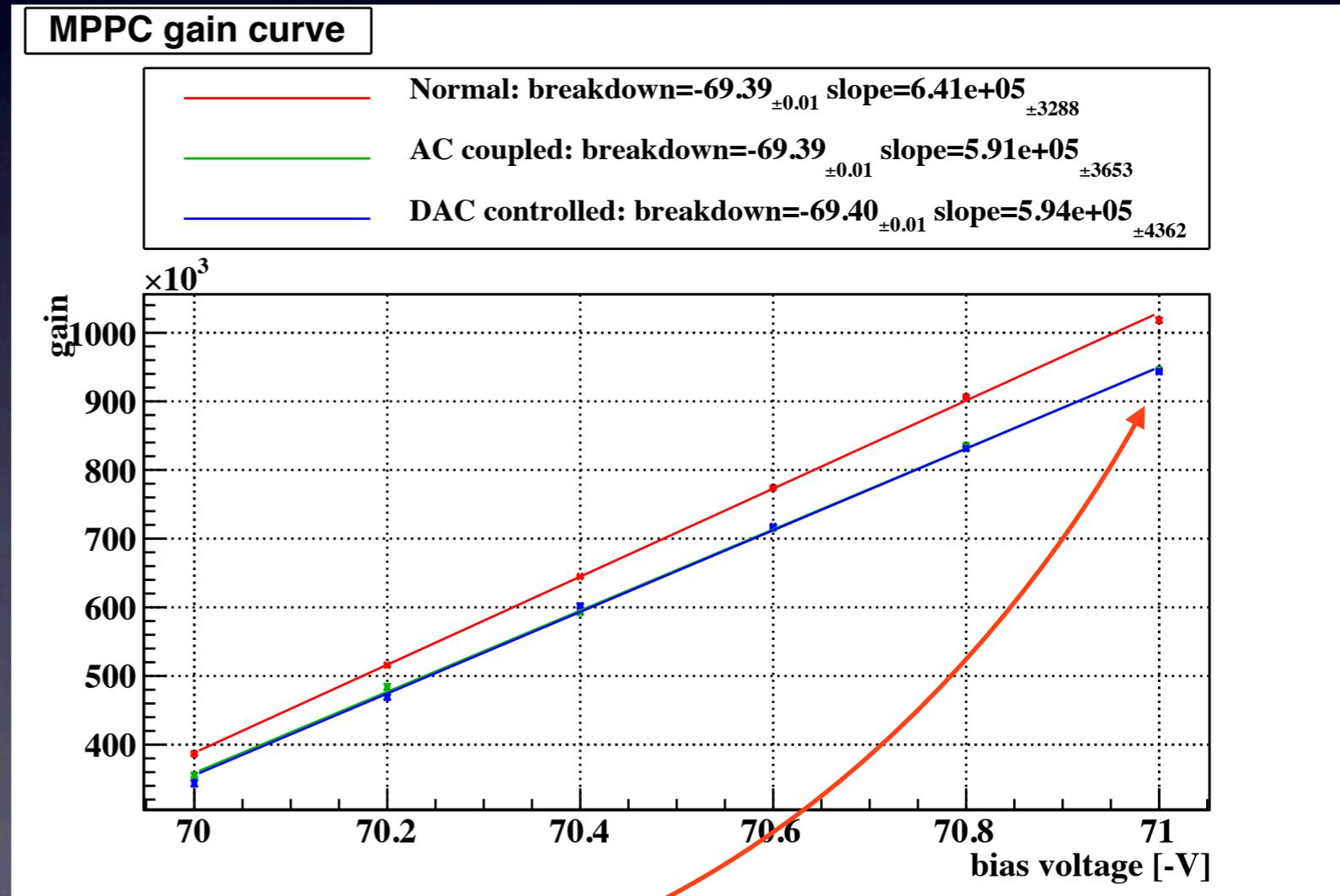
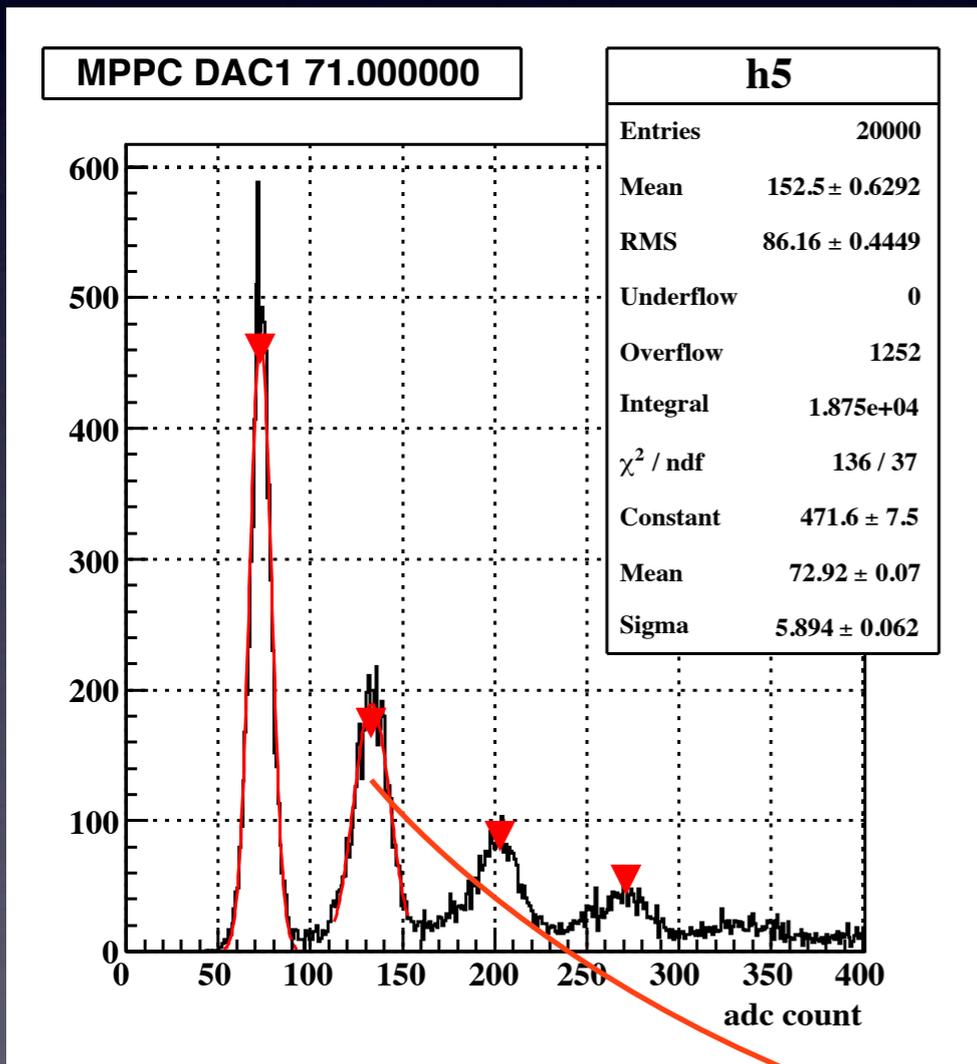
これまでの試験に
使っていた回路



本番用回路案

Gain curve

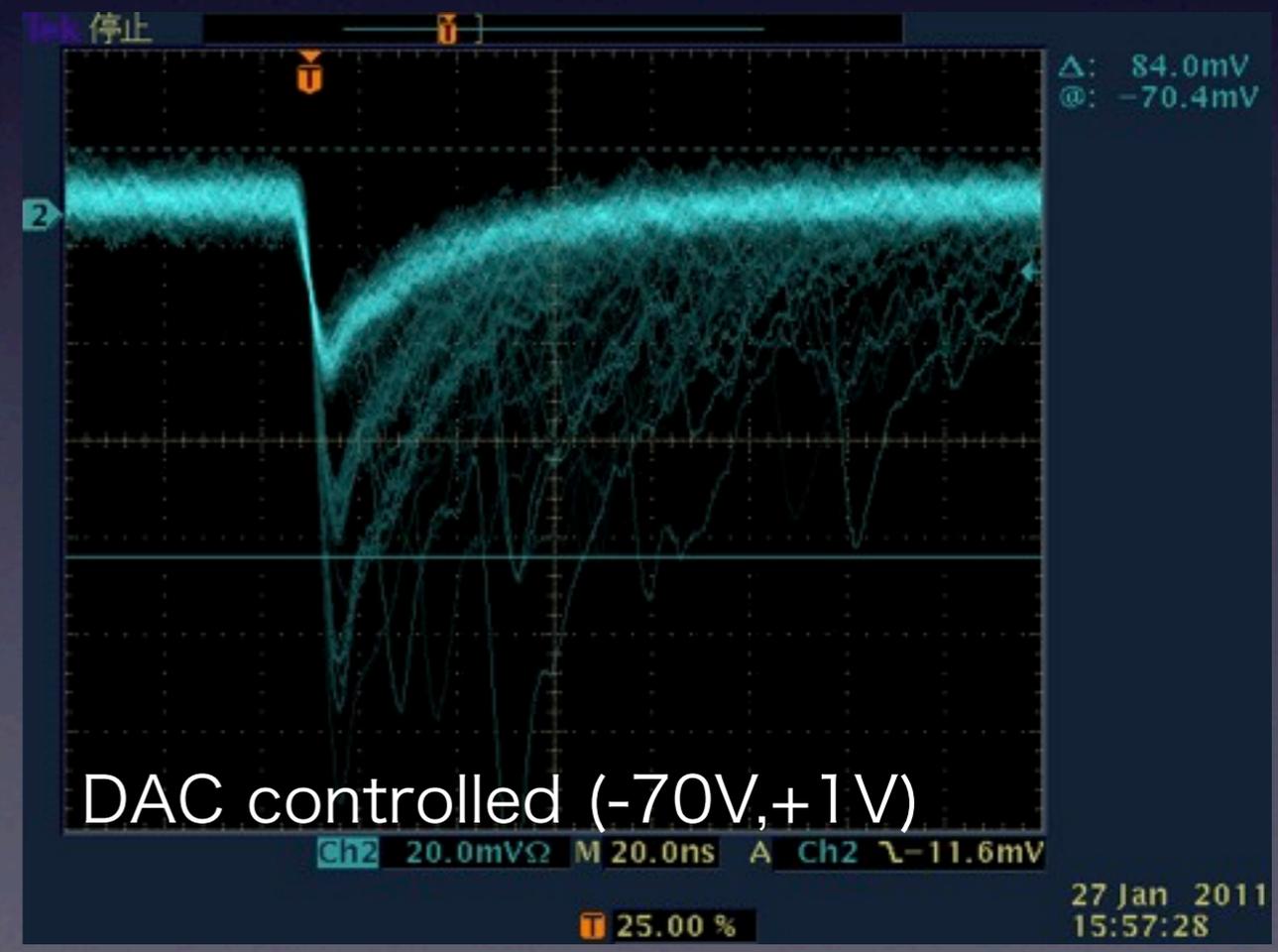
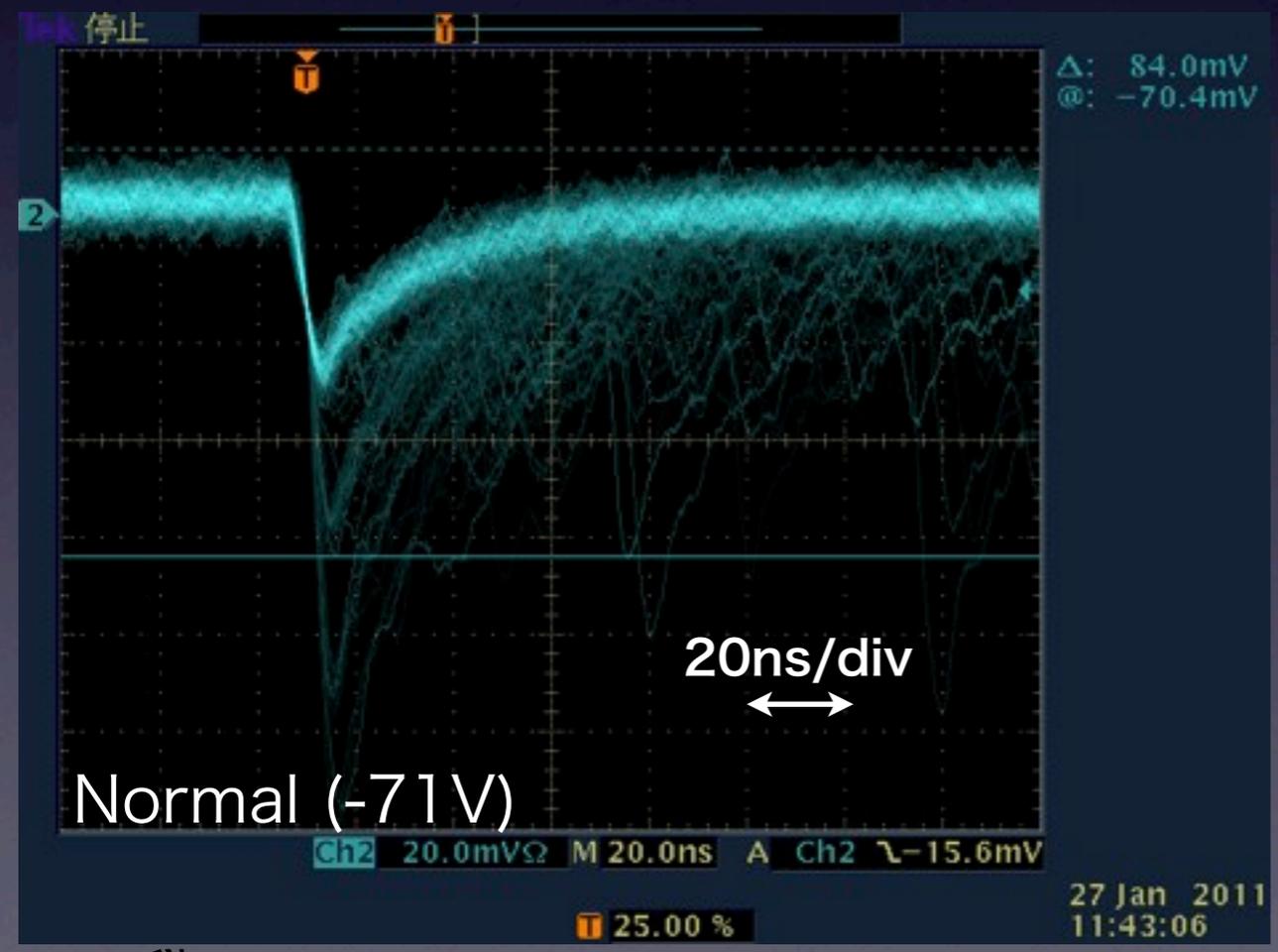
- One P.E. peakで測定
- Breakdown voltageは一致
- Gain slopeは約7%減少
 - 1k Ω を付けた効果(~5%)でほぼ説明できる



Pulse shape

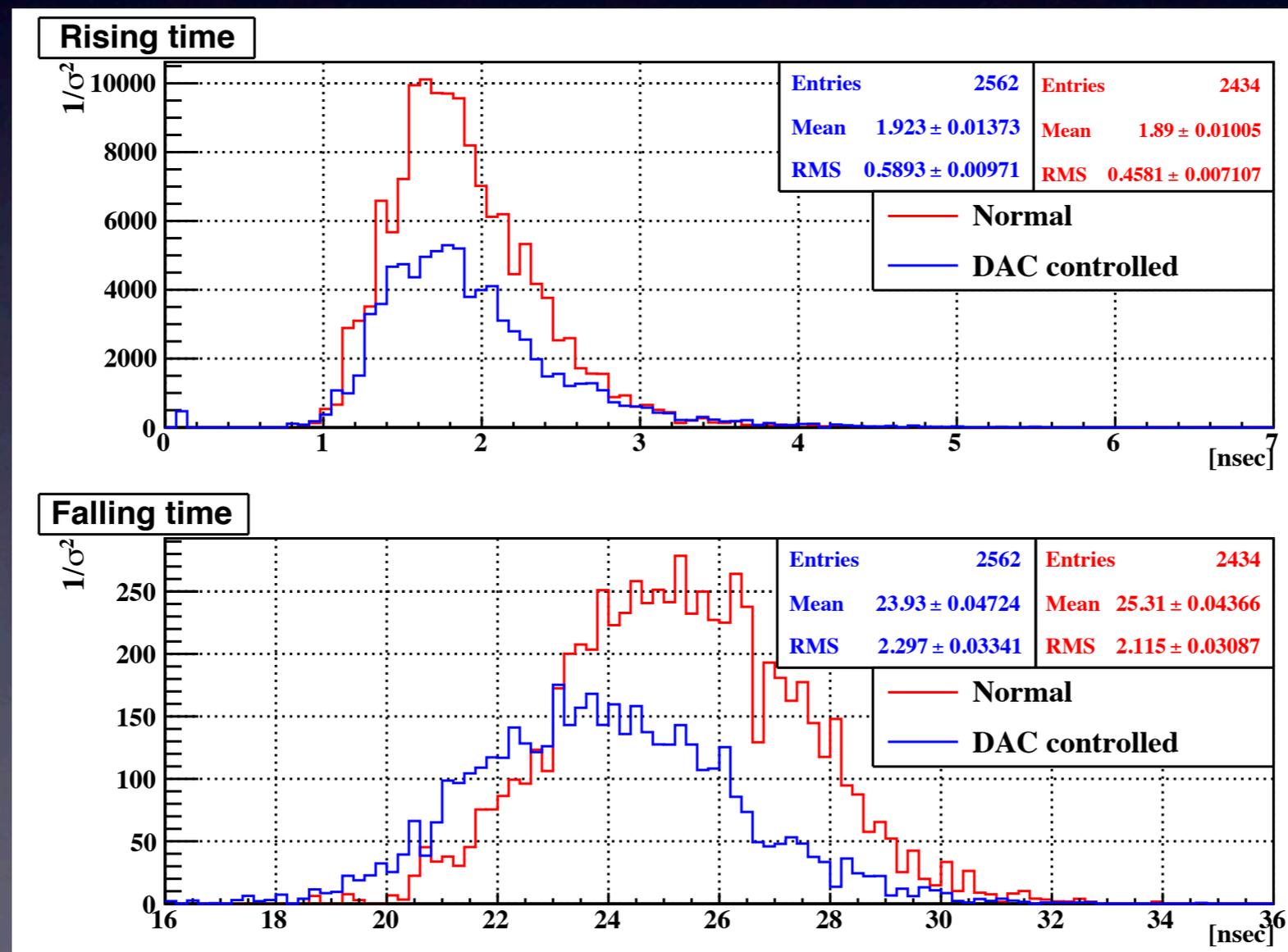
- 試験は-71Vのみ
- オシロスコープで波形を1万取得し、それぞれの立ち上がり・立ち下がり時間を求める

- 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%)
- 1k Ω 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 μ 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 μ A)	MPPCに流れている暗電流の確認

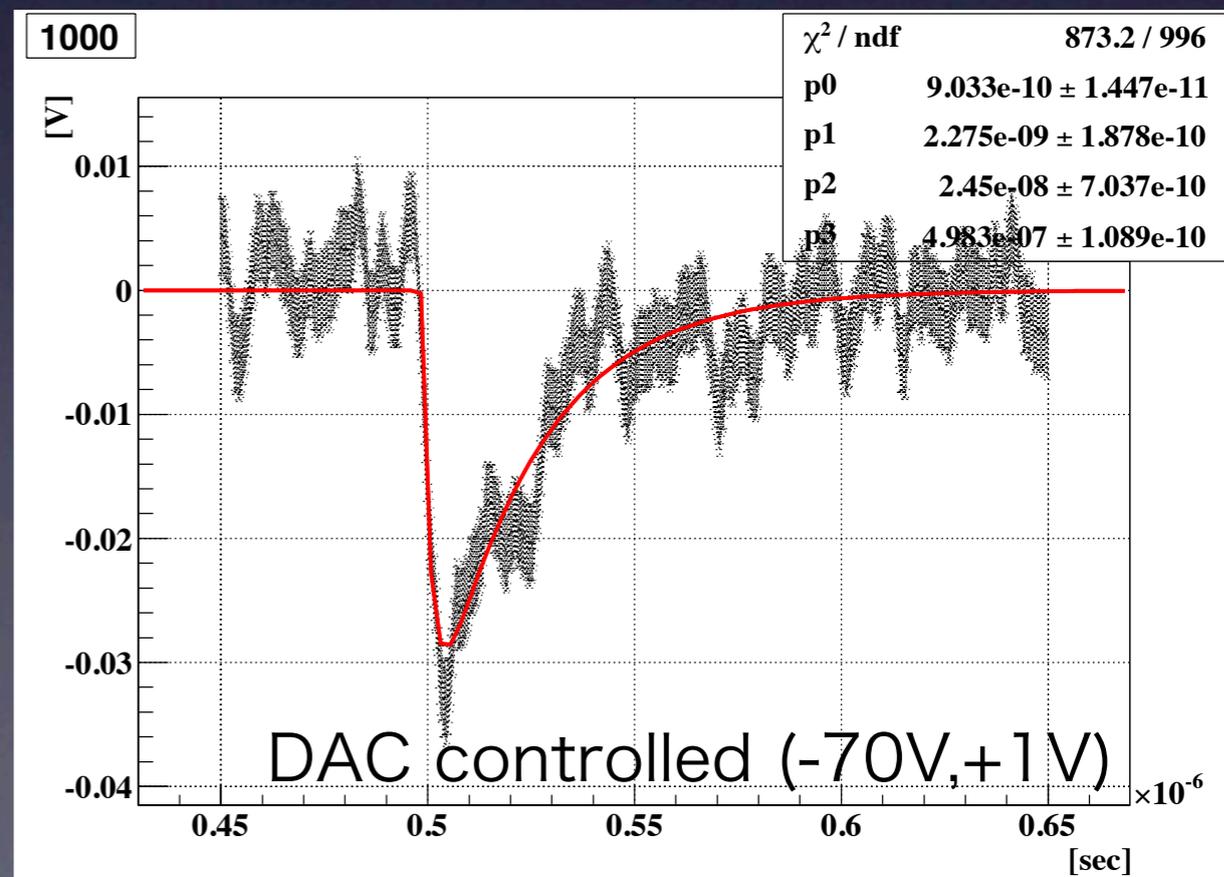
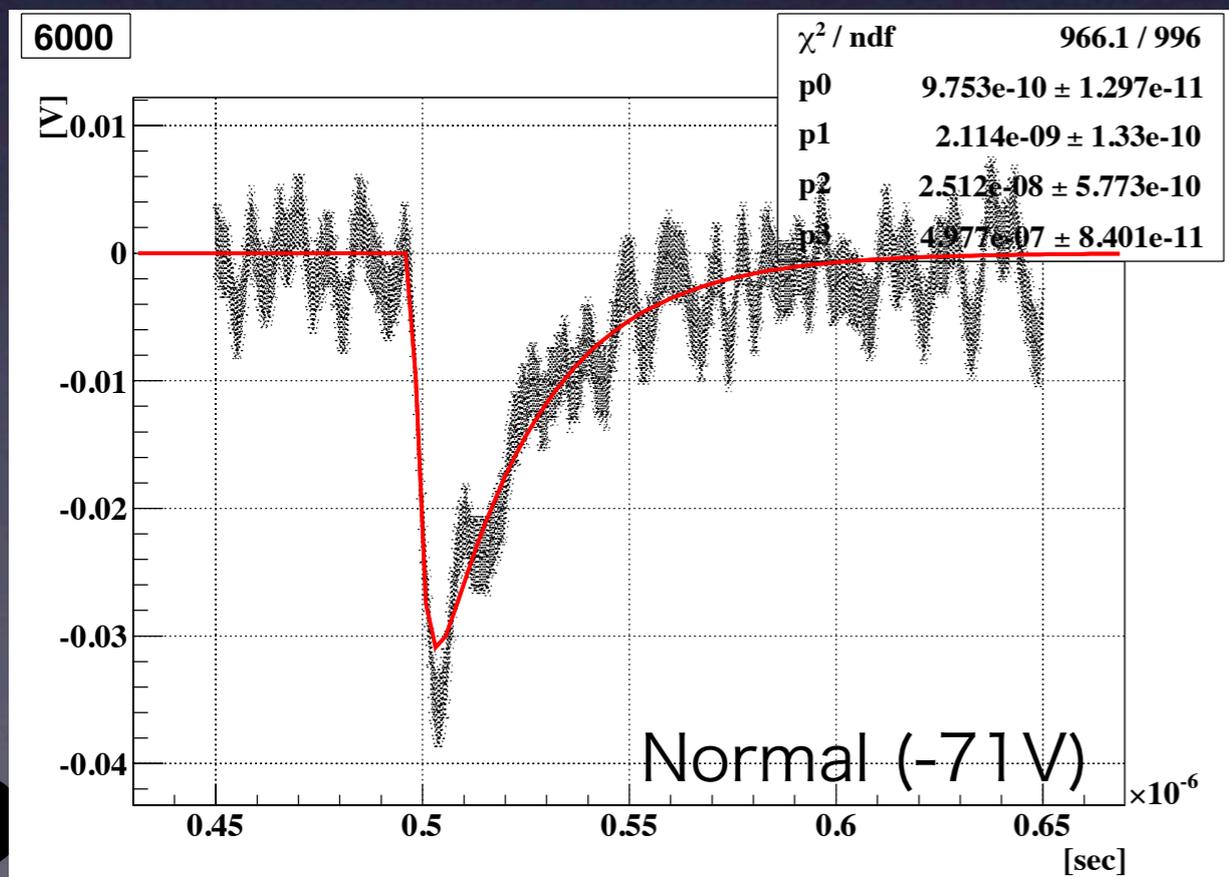
Pulse shape fit

- 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

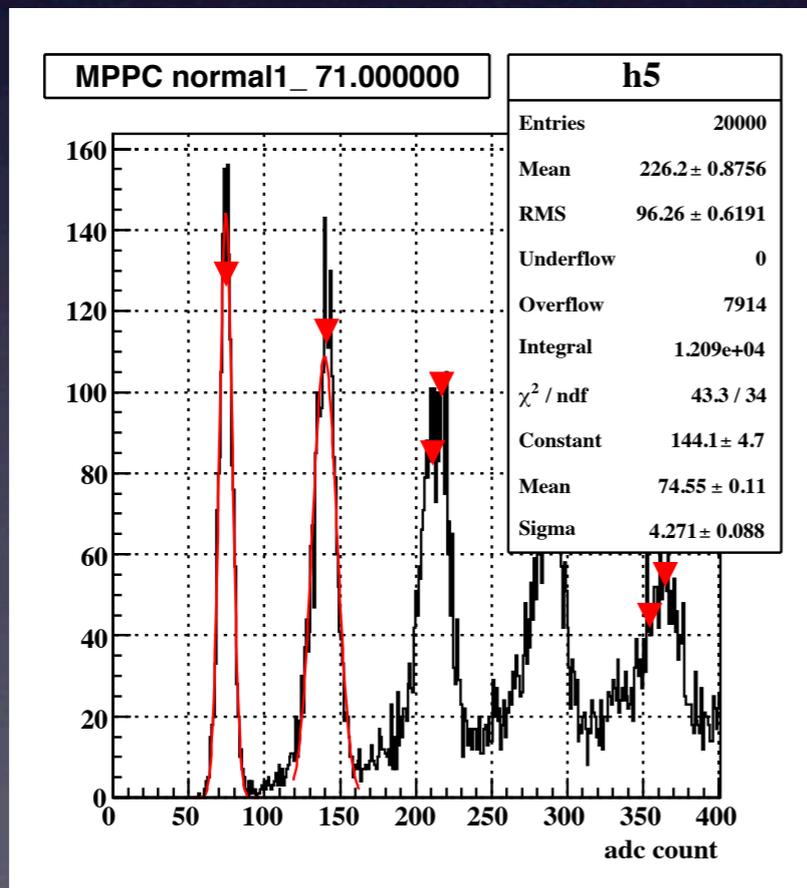
- Pulse height : 1 p.e. peak $\pm 1 \sigma$
- Charge : 1 p.e. peak $\pm 1 \sigma$
- Chi2/NDF : 0.75~1.25
 - Error bar はGND noiseのみ



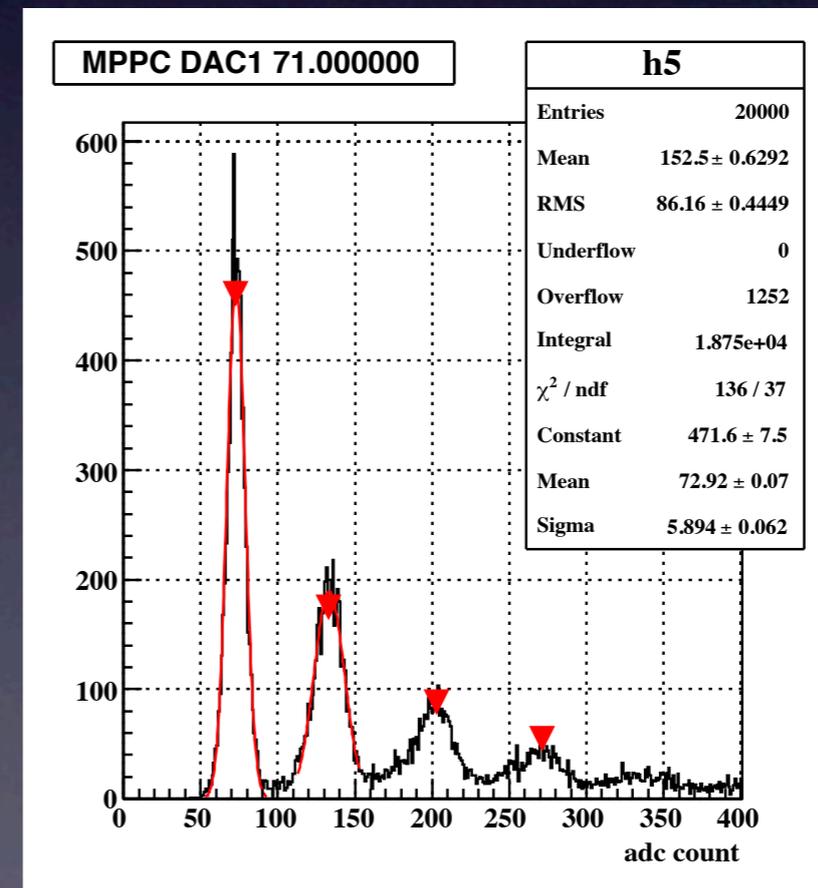
Gain curve

- 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)



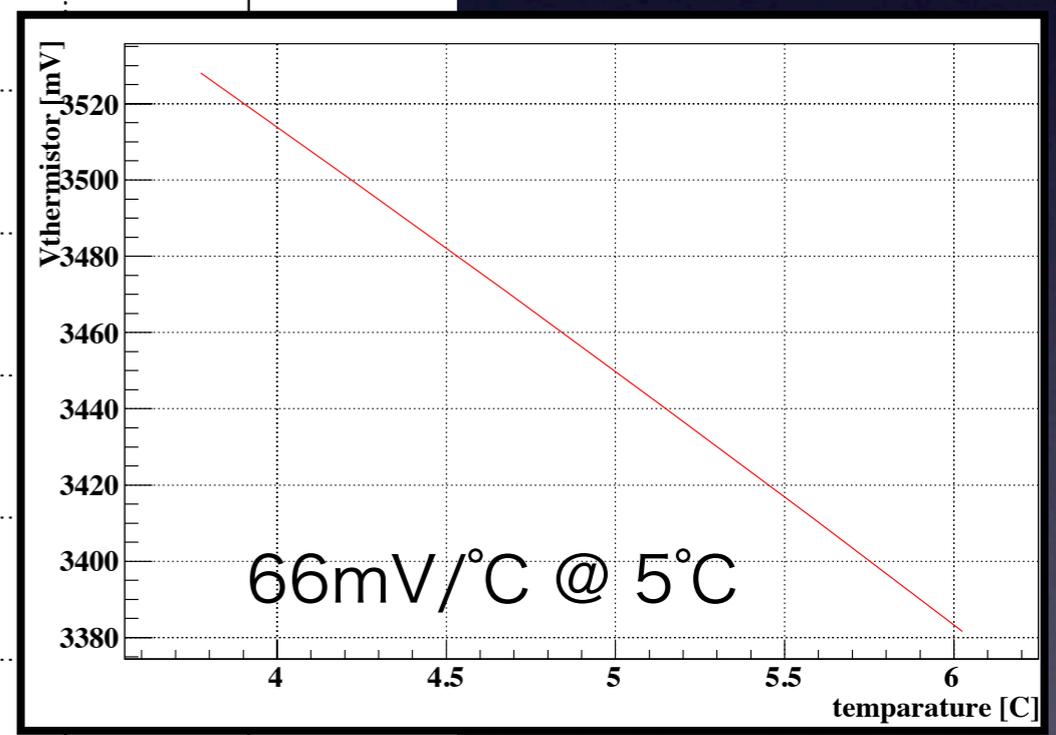
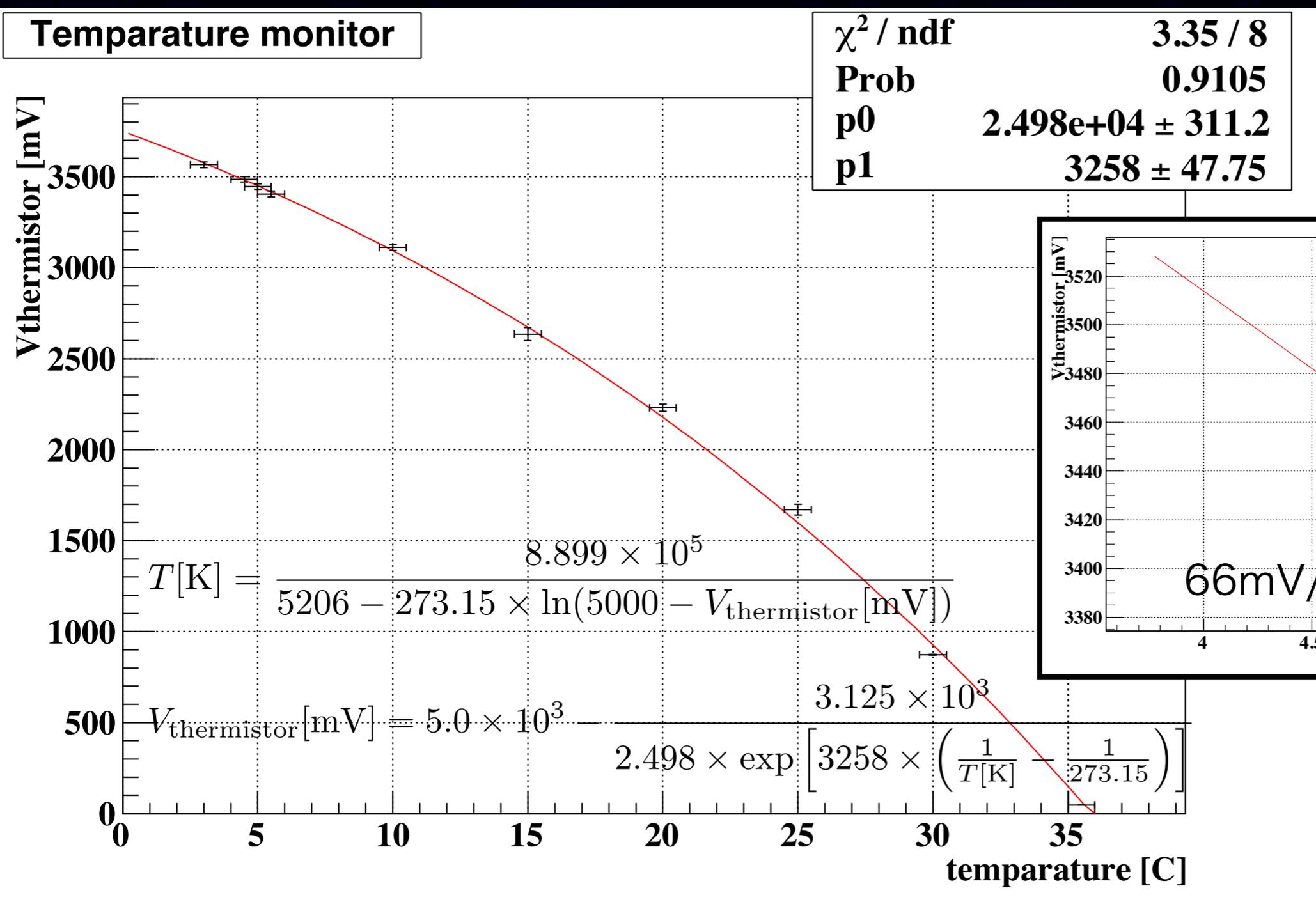
DAC controlled (-70V,+1V)

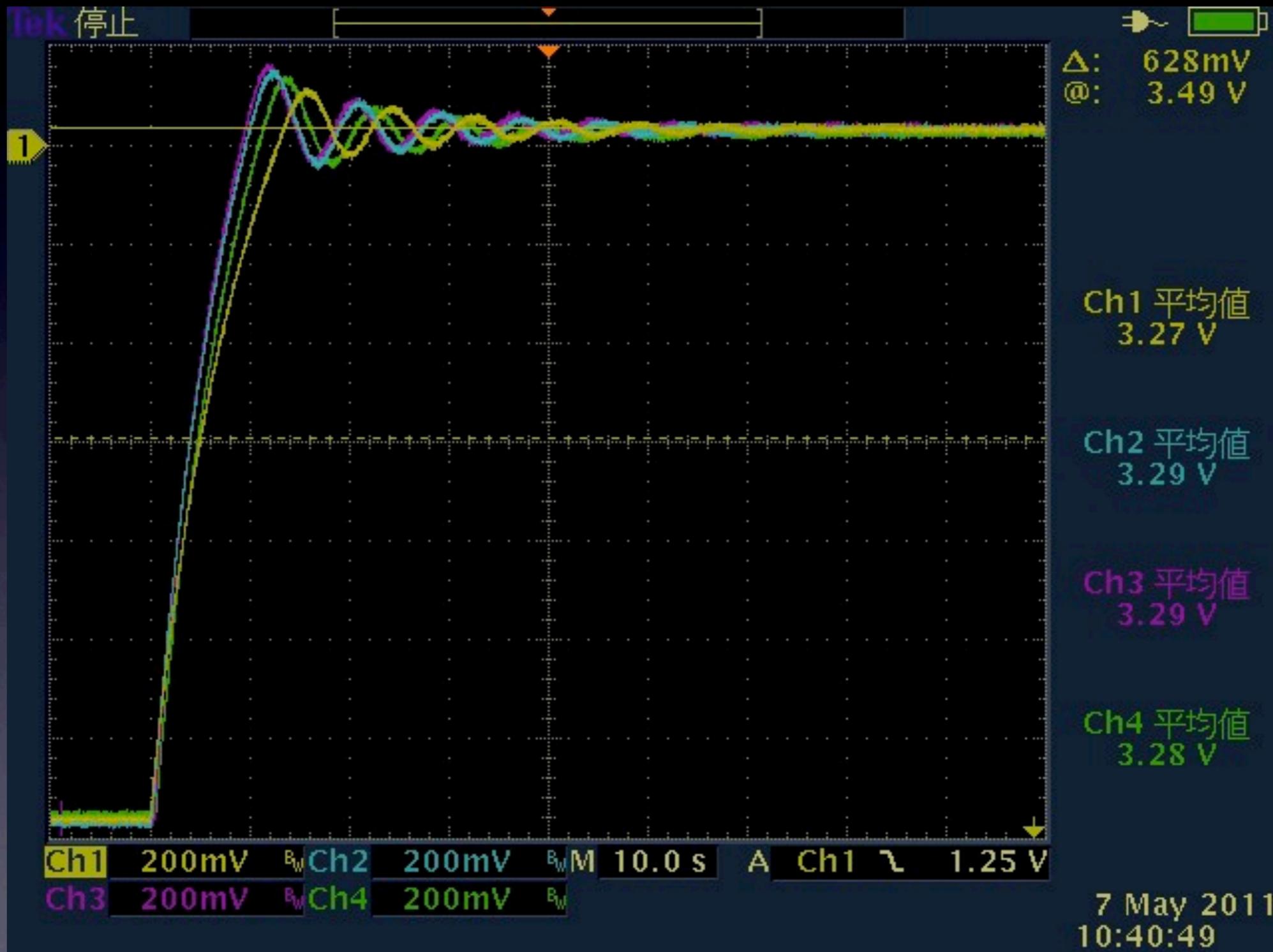


Charge ADCのデータ (LED光量はそれぞれ異なる)

温度モニタ

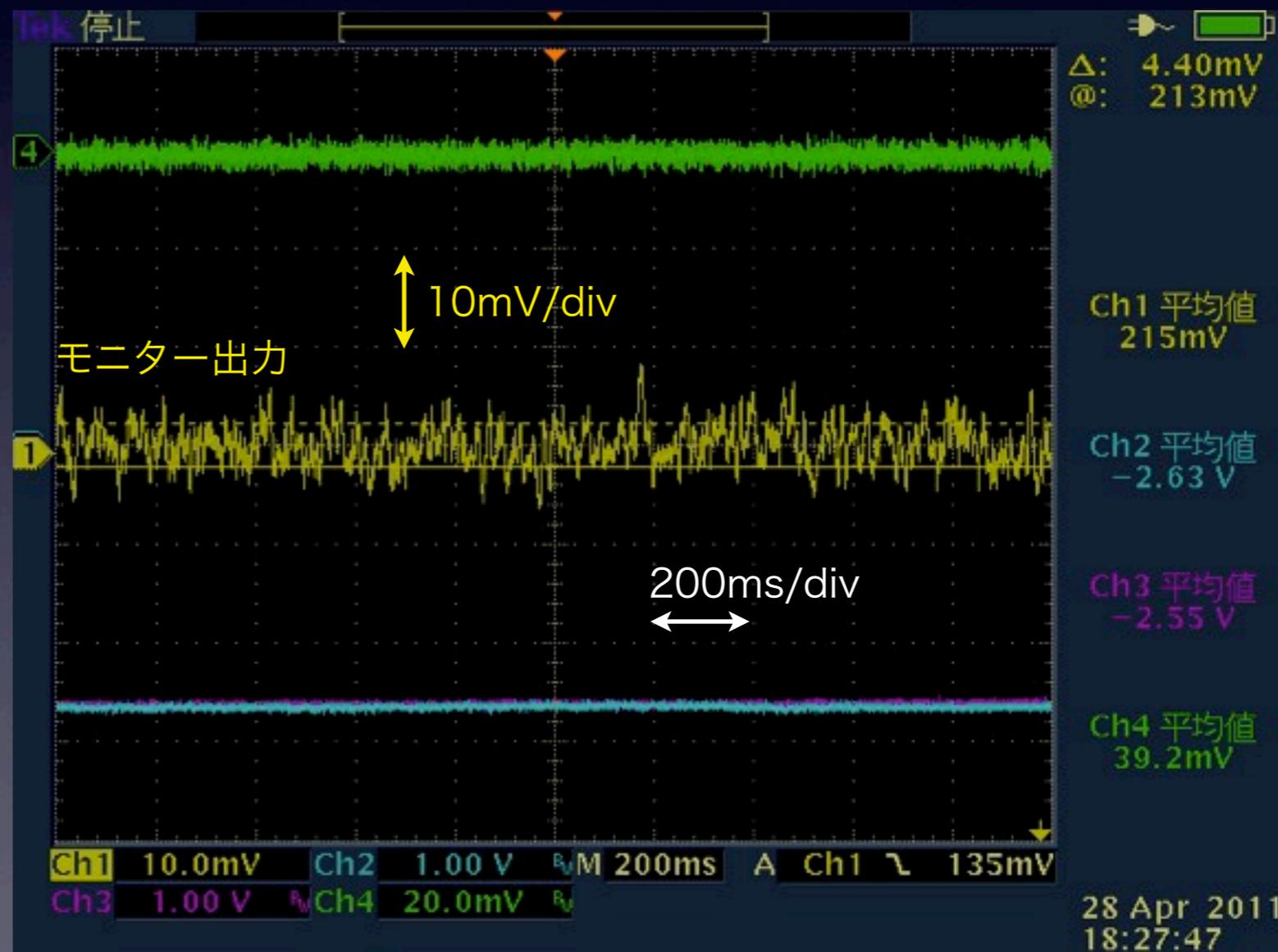
- 恒温槽にMPPPCを入れ、
3~35°Cの間で温度モニタ出力を測定





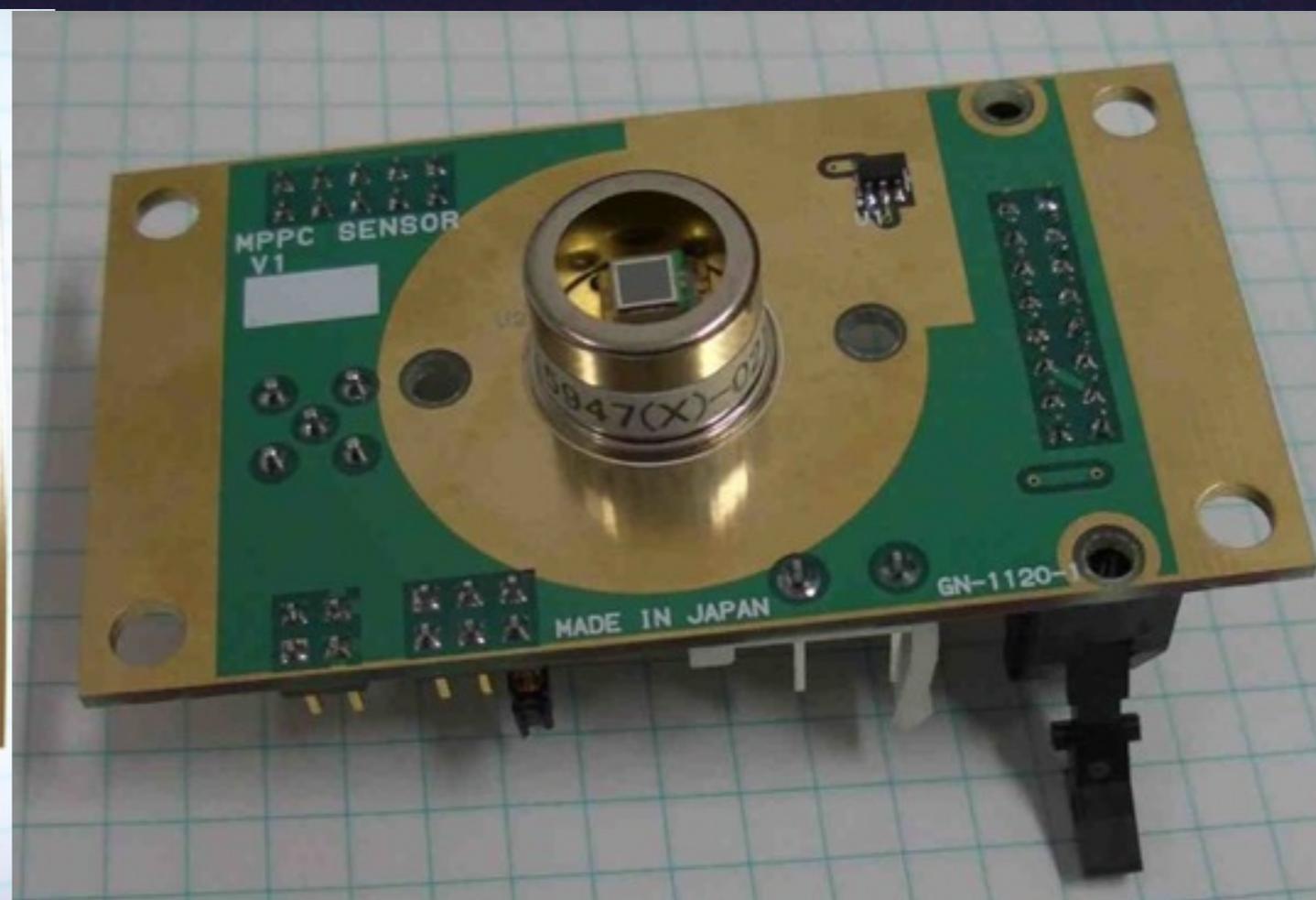
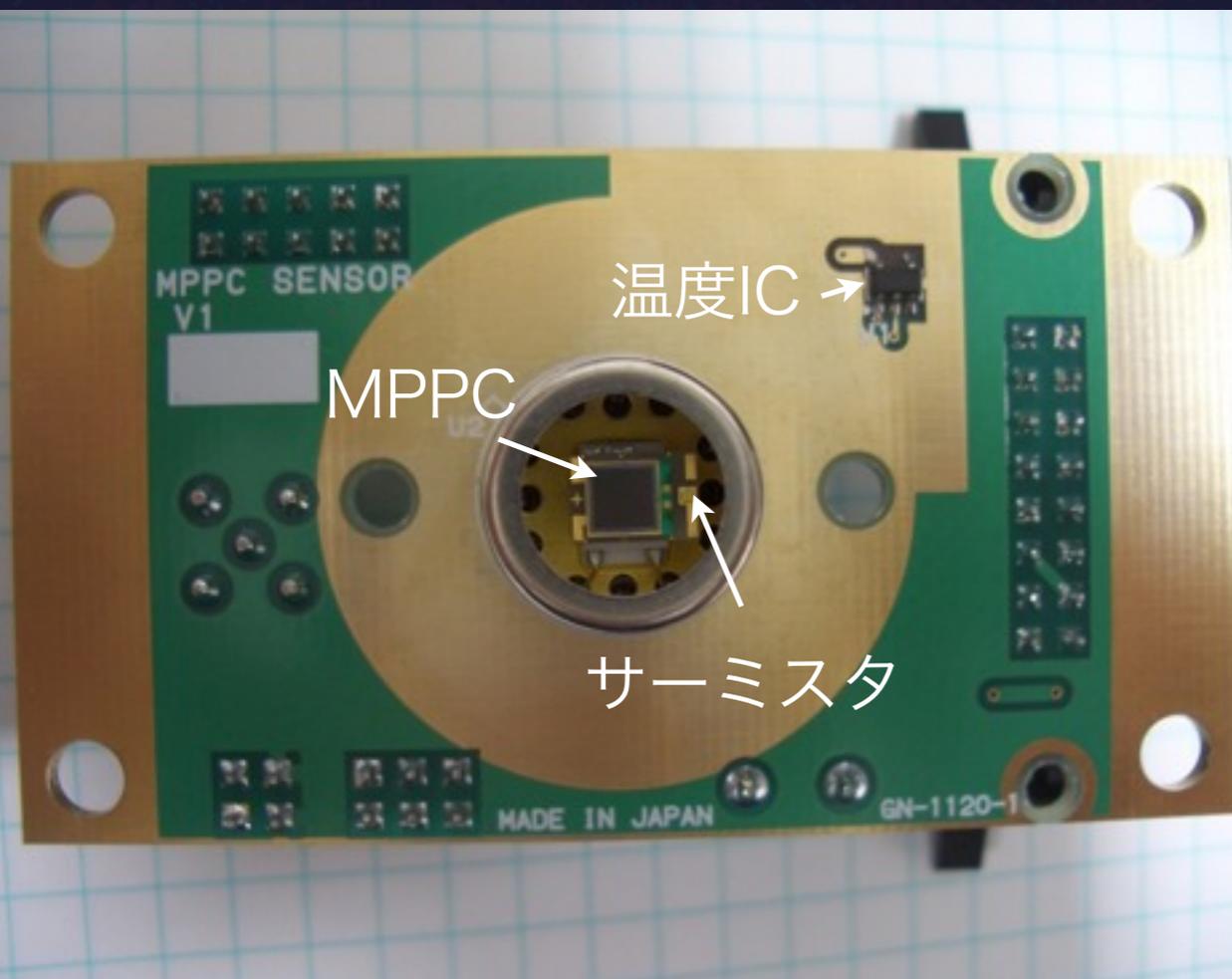
Noise level (bias current)

- Noise level : 2mV_{rms}
 - 2nA の精度で測定可能



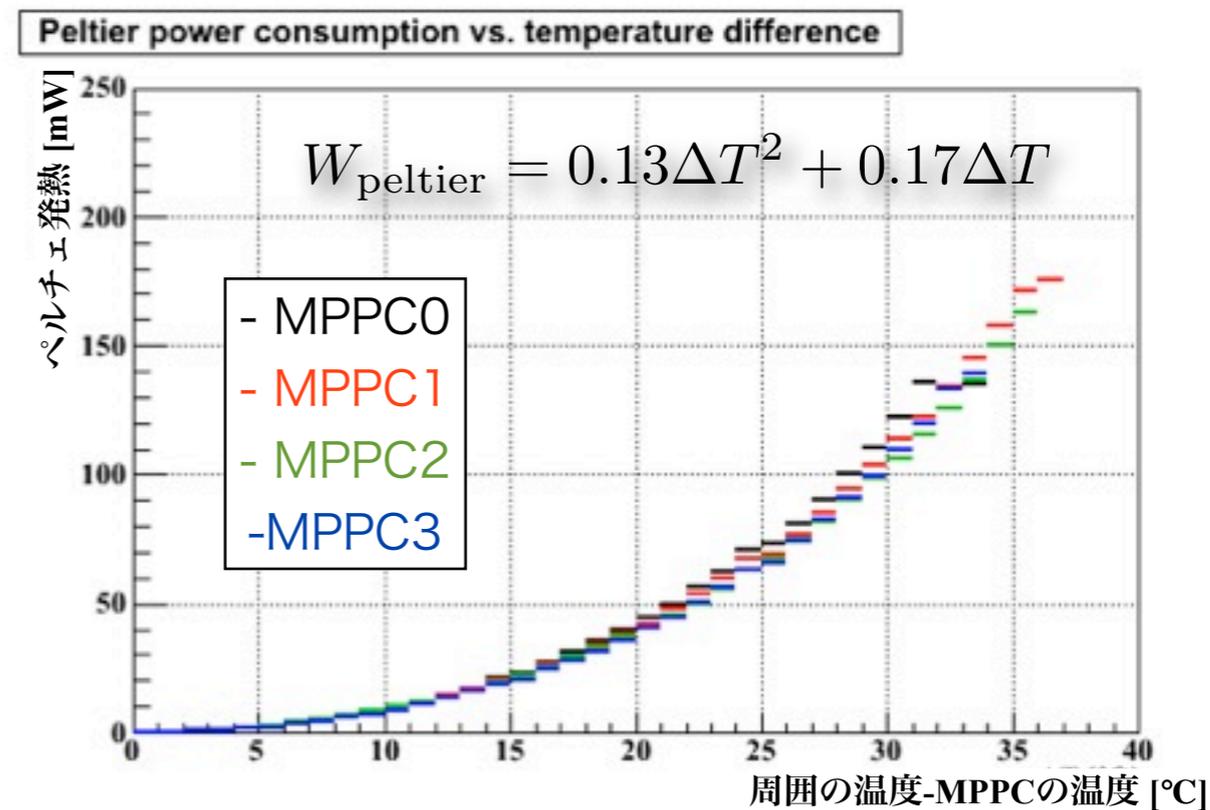
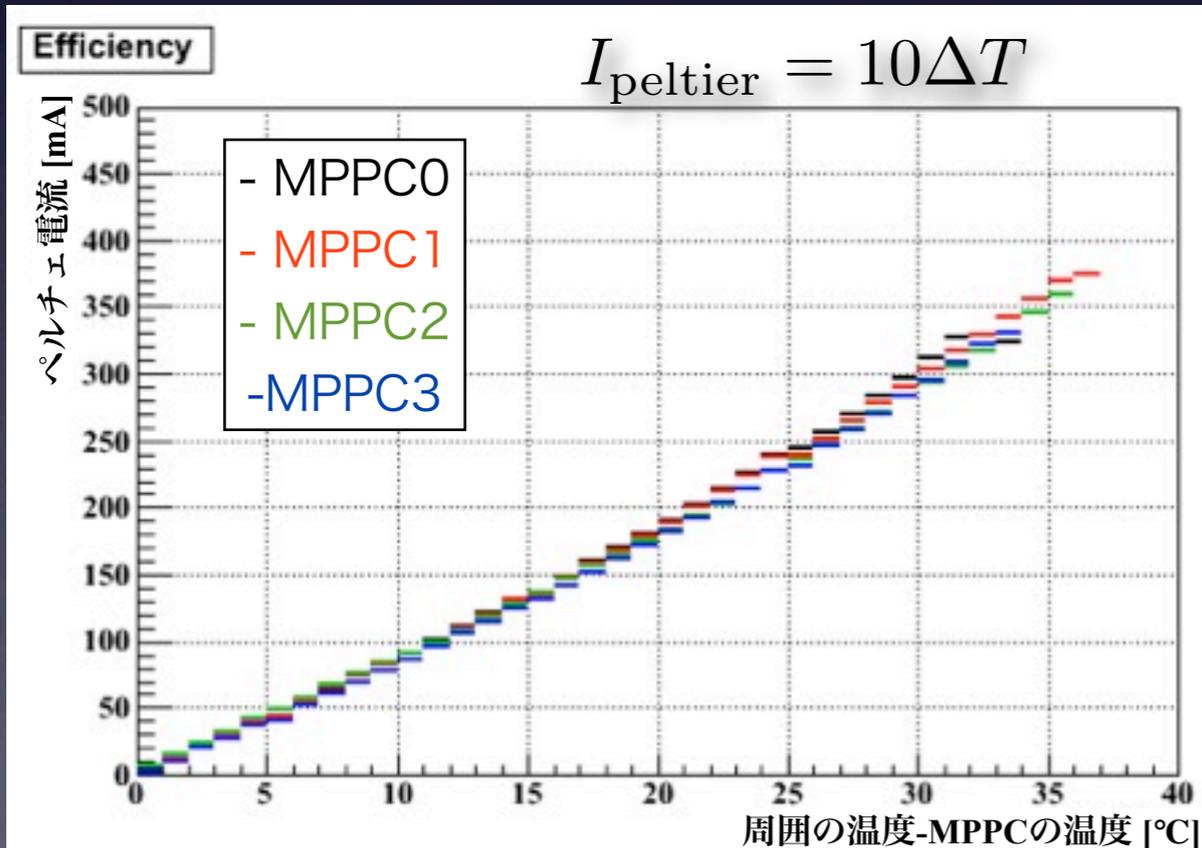
プレ量産MPPPC

- 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。

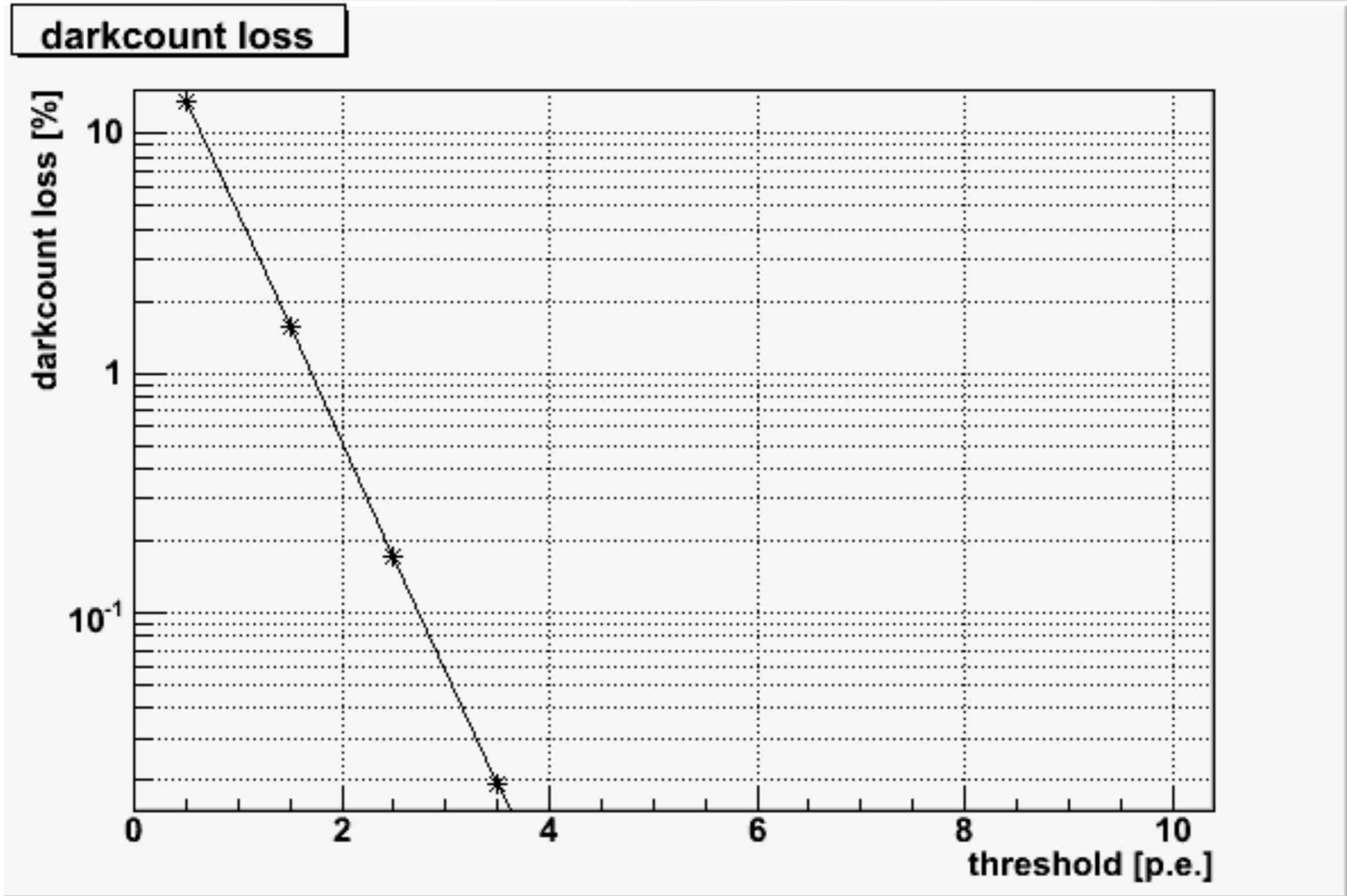
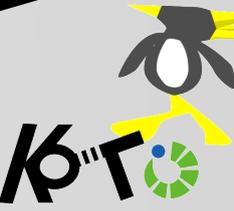


長期温度サイクル試験

- 4つのMPPCでは、明らかな個体差は確認されなかった



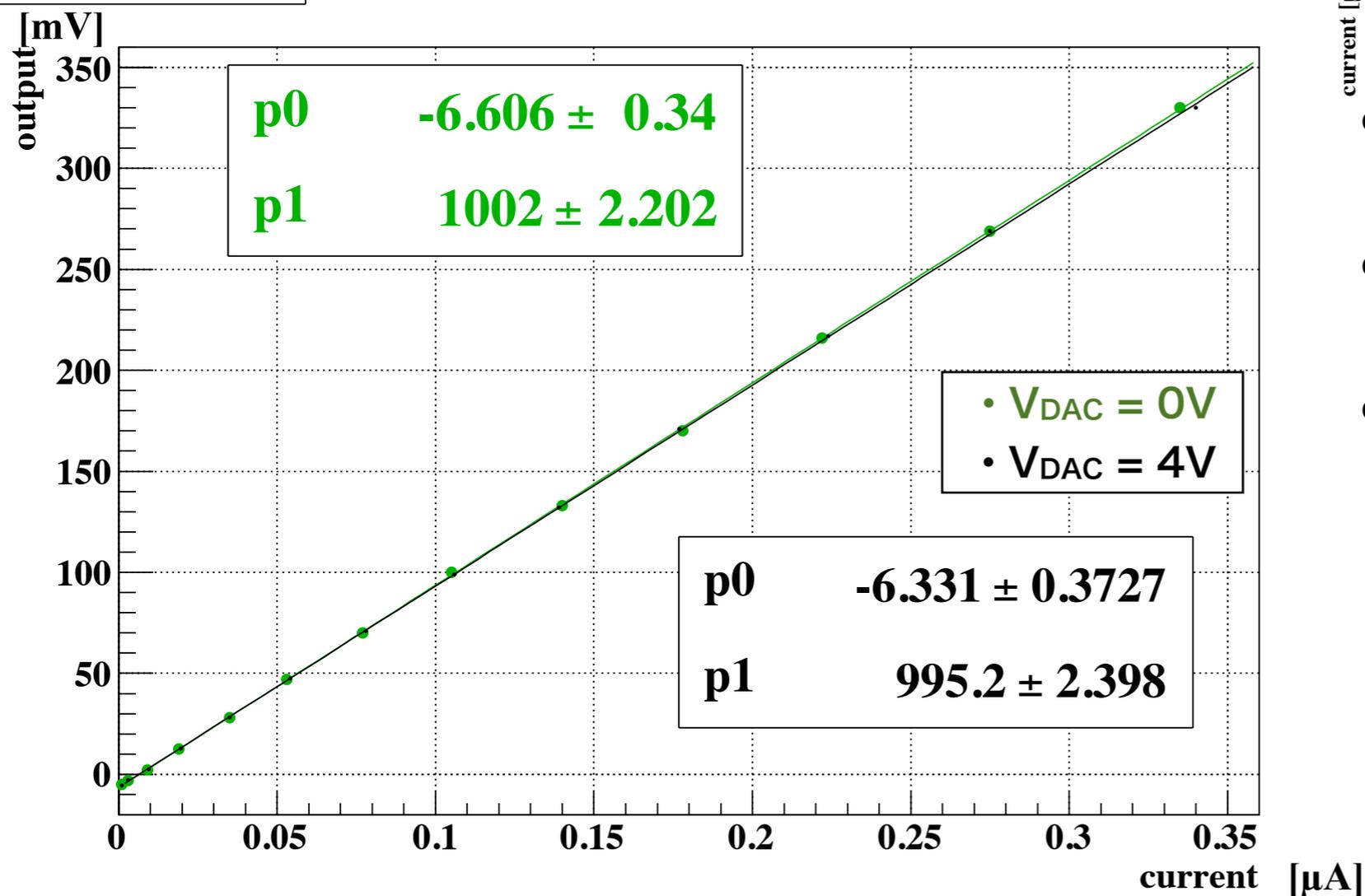
ダークカウントノイズによるロス



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

