

# 冷却素子付きMPPPCの性能評価

2010/12

京都大学 高エネルギー物理学研究室

D1 内藤大地

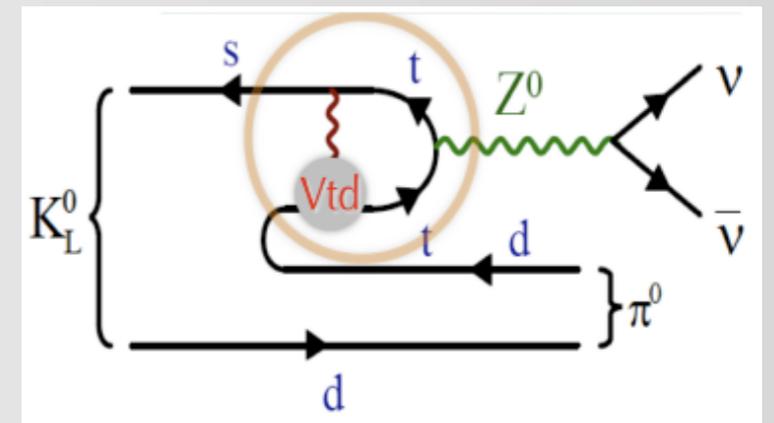
- **冷却素子付き受光面3mm角MPPCを  
浜松ホトニクスと共同開発**  
→ **KOTO実験での要求を満たすかどうか性能評価**

# Contents

- Introduction
  - KOTO実験
  - MPPC application@KOTO
  - design concept of MPPC
- 冷却素子付き受光面3mm角MPPC
  - レイアウト
  - 性能評価テスト
    - 測定項目
    - セットアップ
    - 結果
- summary

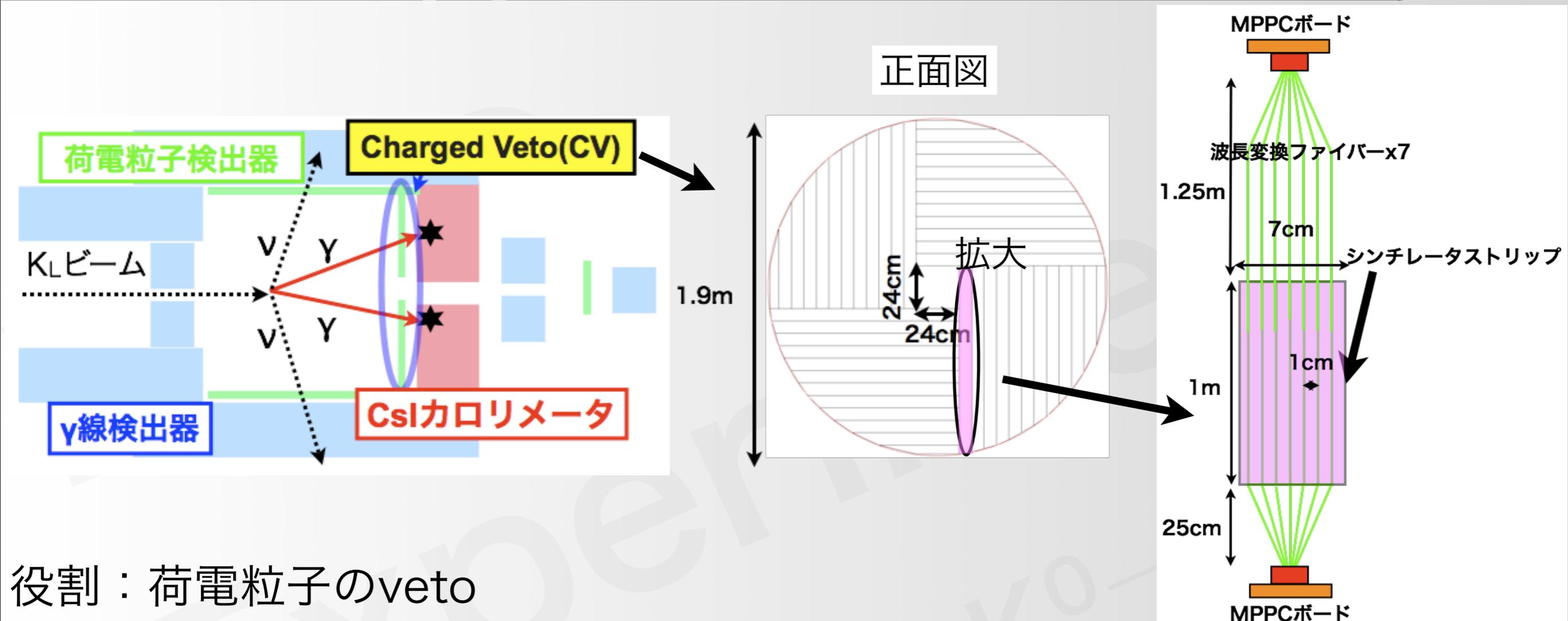
# KOTO実験

- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  稀崩壊探索実験
- 実験目的
  - 小林益川理論(CKM)の精密検証
    - $\text{Br}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu) \propto \eta^2$  ( $\eta$ はCKMの複素位相)
  - 新物理の探索
- $\text{Br} \approx 2.5 \times 10^{-11}$ , 反応に関わる粒子が中性粒子
  - 実験的困難
- J-PARCで2011年秋物理ラン開始
- 今年度秋は
  - Cslメインカロリメータのエンジニアリングラン
  - ビームコア測定 ( $r$ ,  $n$ )



崩壊のダイアグラム

# MPPC application @ KOTO



役割：荷電粒子のveto

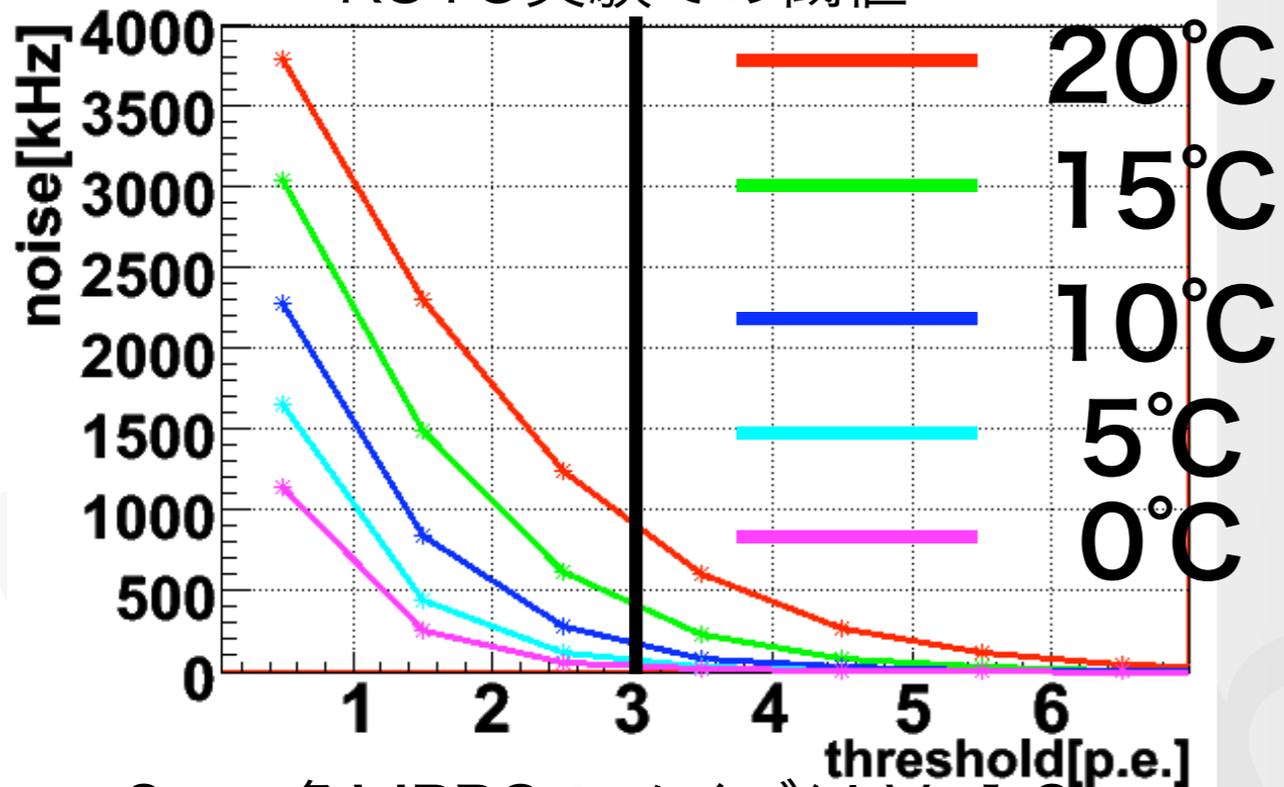
- 要請：
- ・荷電粒子に対する高いefficiency→ 全域で 99.9%以上
  - ・低エネルギー(100keV)を検出可能な光量

デザイン：

- ・全域でefficiency確保→シンチレータに波長変換ファイバーを埋め込む
- ・高い光量→**光検出器としてMPPC採用(受光面3mm角、pixel size 50 $\mu$ m)**  
→ファイバー(直径1mm)7本まとめ読みで読み出し削減

# design concept of MPPC 1

KOTO実験での閾値



3mm角MPPCのノイズ( $\Delta V=1.3$ )

cf.  $\Delta V$ =印可電圧-ブレイクダウンボルテージ

- ノイズレートが高いとノイズを荷電粒子検出と誤認する確率増大  
→20°Cだと誤認確率100%
- KOTO実験で誤認確率を十分小さくするには5°C以下に冷却が必要  
→冷却素子で冷却 (ペルチェ素子)
- 我々の実験ではMPPCを真空中(1Pa)で使用  
→ペルチェ素子での冷却ではペルチェ素子の放熱が問題



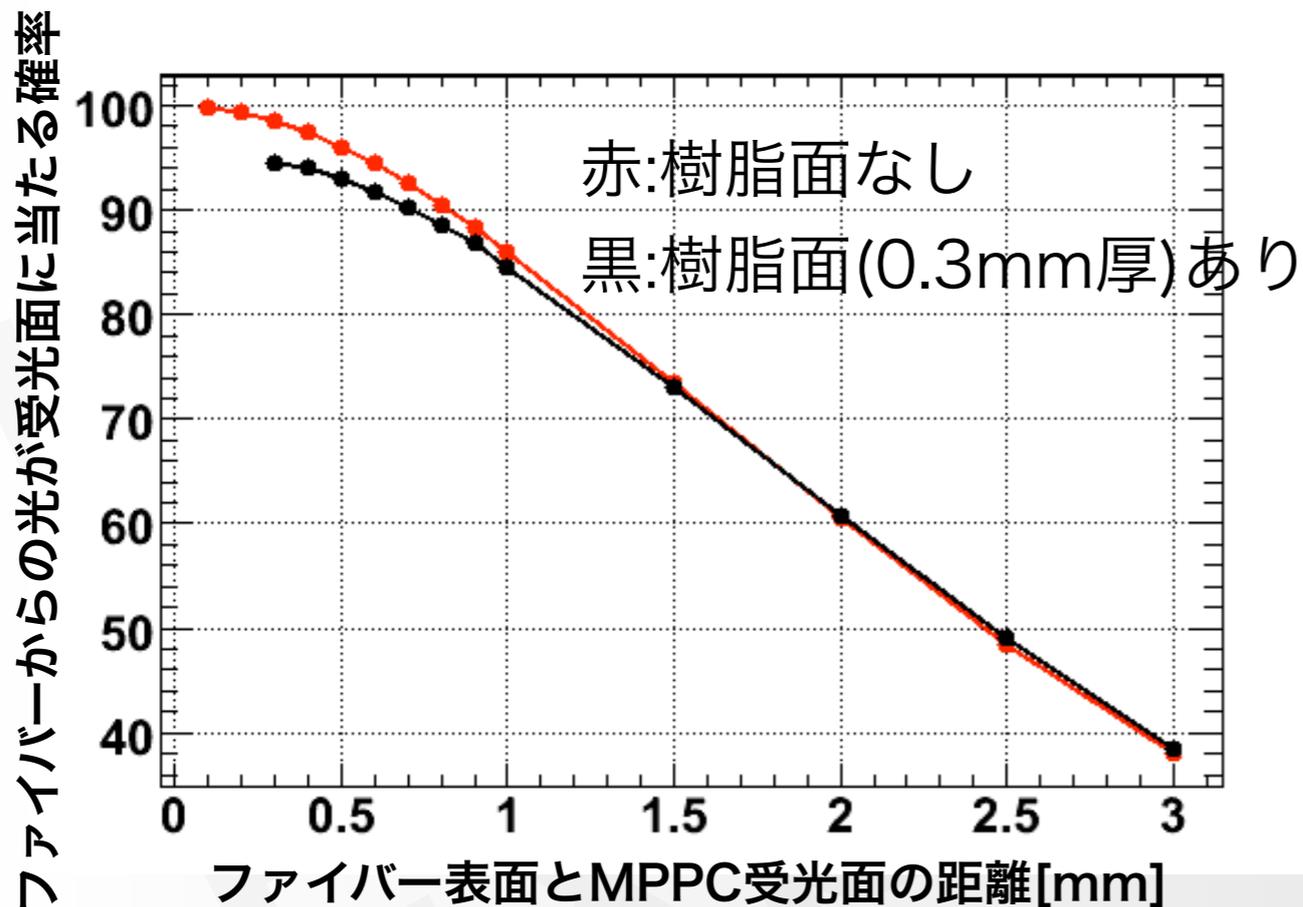
ペルチェ素子

片面で吸熱し、もう片方の面で放熱する

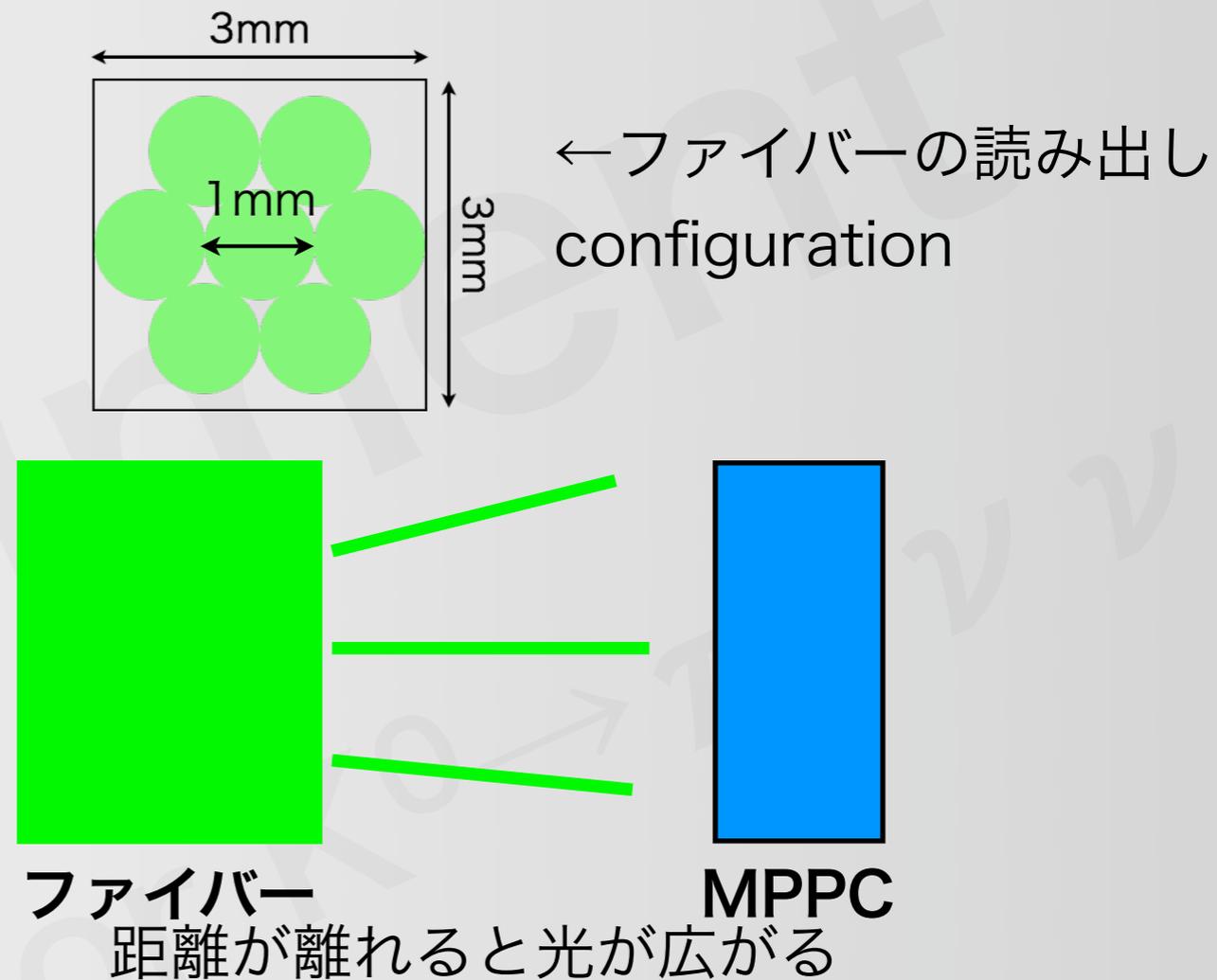
我々の実験で使用するには100mW程度でなければならない

# design concept of MPPC 2

- ・ファイバー7本を1個のMPPCで読み出す
- ・なるべく光量をlossせず読み出したい→ファイバーと受光面の距離が問題



↑  
シミュレーション結果



ファイバーを受光面から0.5mmまで近づけて読み出したい

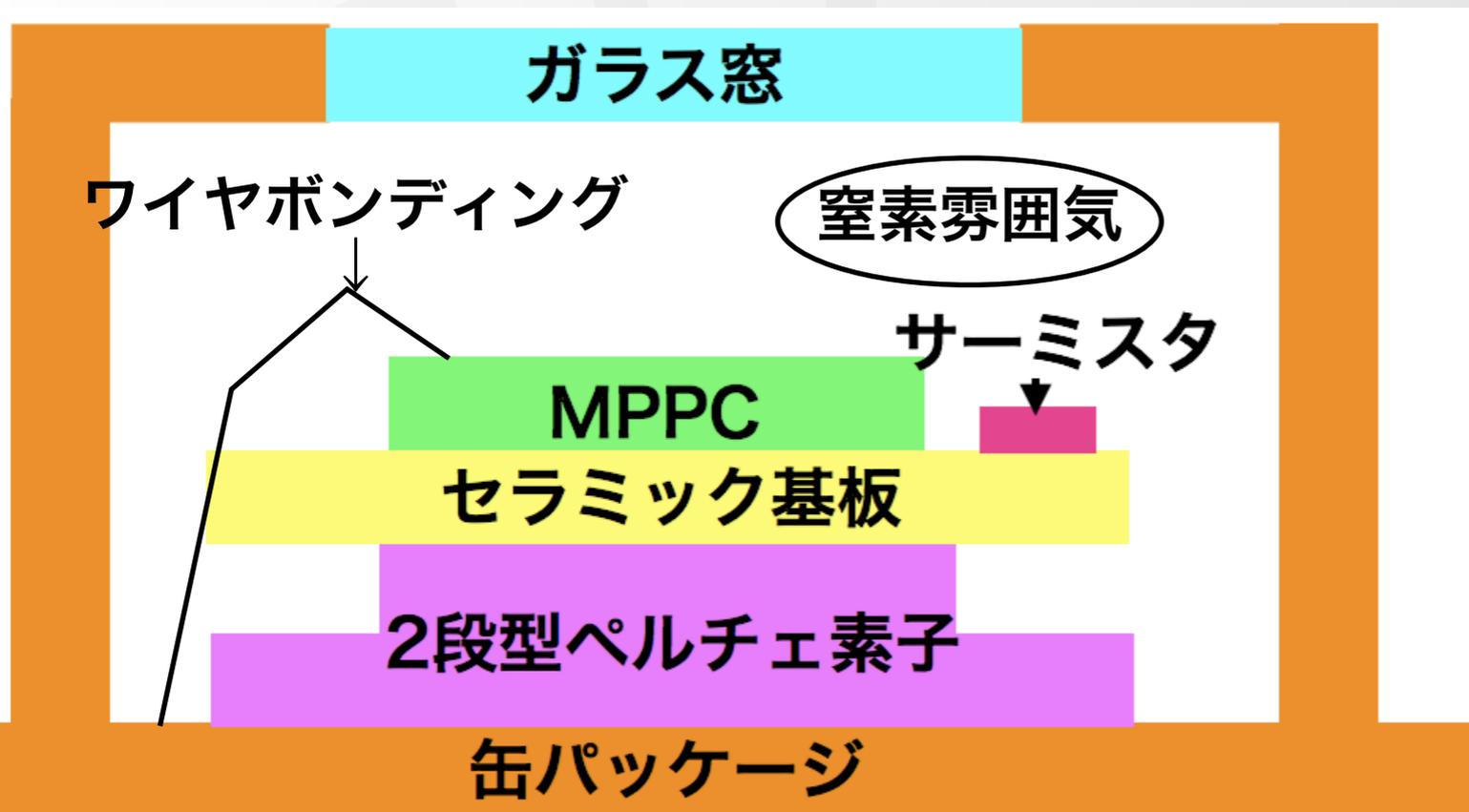
## デザインコンセプト

- ・ ダークカウントを減らすために冷却素子を用いて5°Cまで冷却  
→ 温度モニターが必要
- ・ ファイバーとMPPC受光面間を0.5mmまで近づけられる

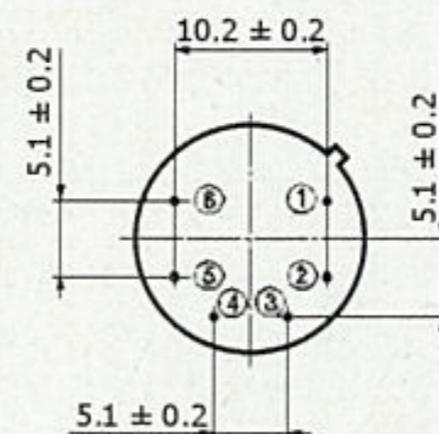
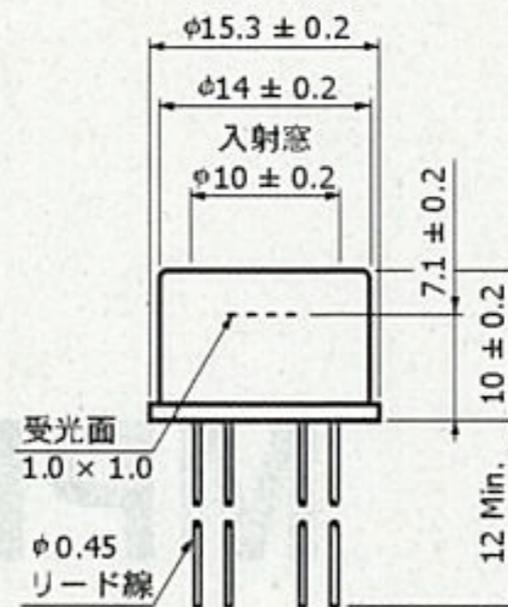
## 問題点

- ・ 5°Cまで冷却が可能か
- ・ ペルチェ素子の放熱が100mW以下になるか

# MPPCレイアウト



市販ver レイアウト



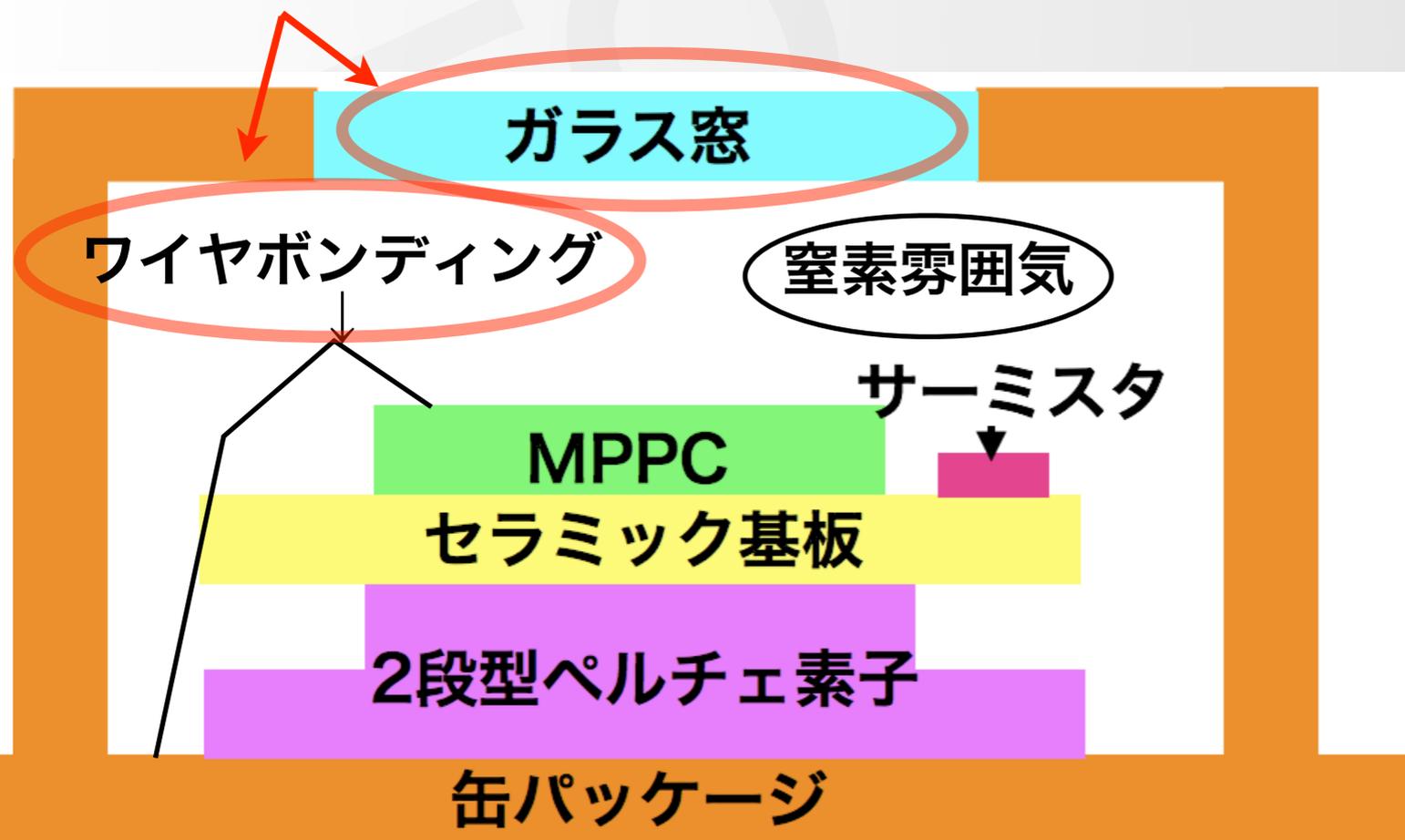
- ① 検出素子 (アノード)
- ② 検出素子 (カソード)
- ③ 電子冷却素子 (-)
- ④ 電子冷却素子 (+)
- ⑤⑥ サーミスタ

	ガラス窓	MPPC素子パッケージ	受光面サイズ	温度保証
市販1mm角ver	あり	チップタイプ	1mm	—
KOTOver	なし	SMD※(表面実装型)	3mm	0°C

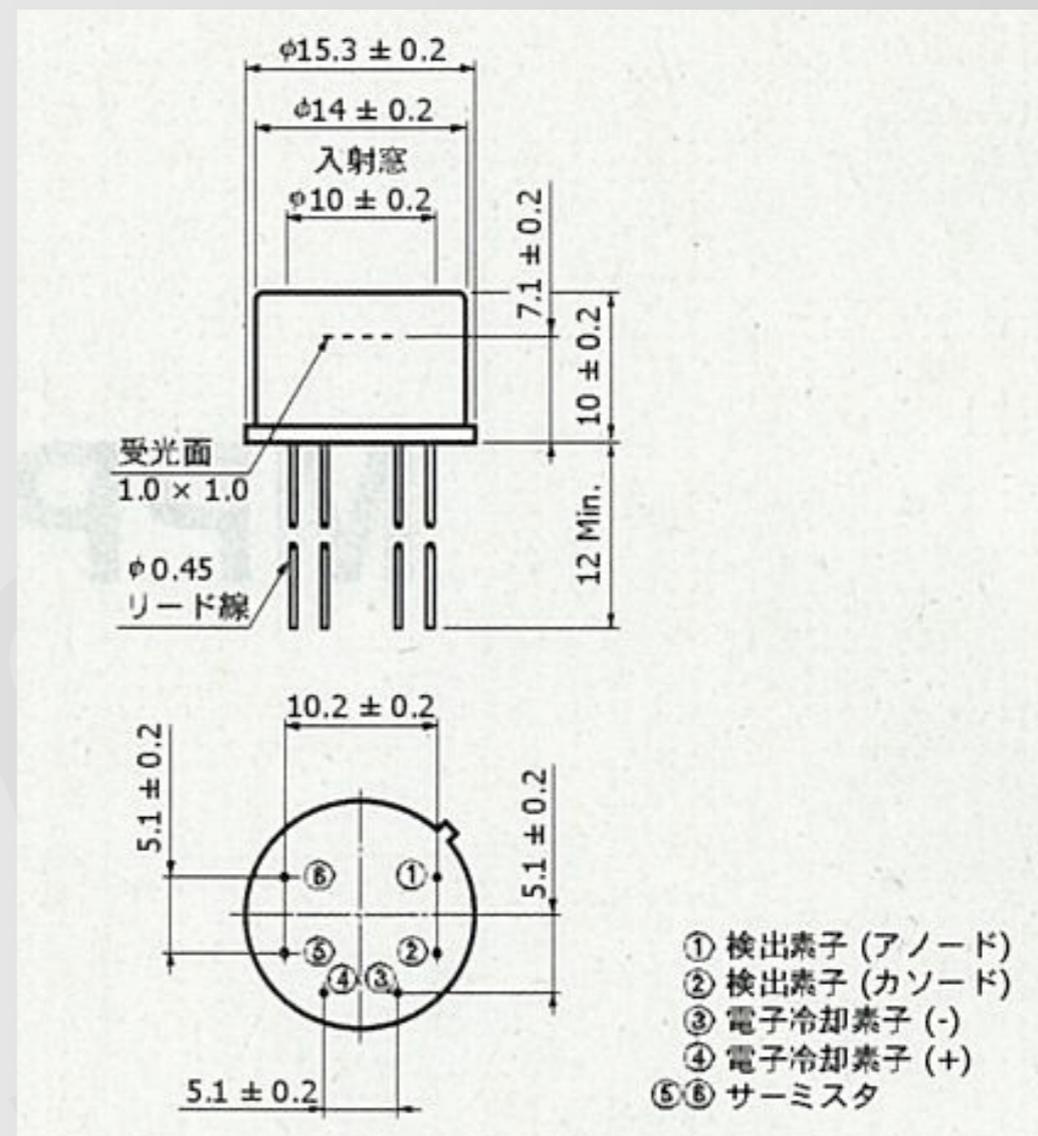
※koto ver には新型 low noise MPPC を実装

# MPPCレイアウト

ファイバーとMPPCを近づけるために排除



市販ver レイアウト



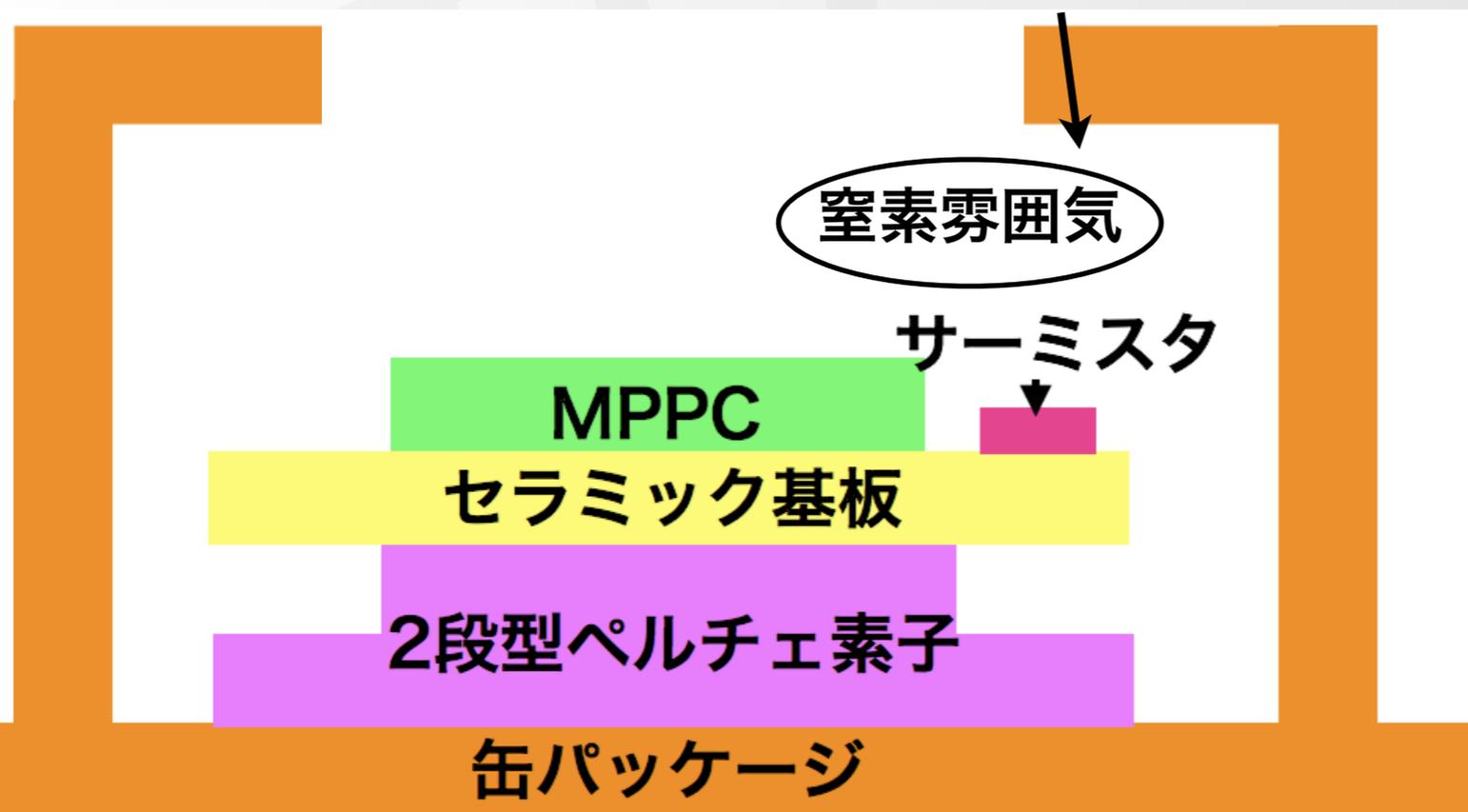
- ① 検出素子 (アノード)
- ② 検出素子 (カソード)
- ③ 電子冷却素子 (-)
- ④ 電子冷却素子 (+)
- ⑤⑥ サーミスタ

	ガラス窓	MPPC素子パッケージ	受光面サイズ	温度保証
市販1mm角ver	あり	チップタイプ	1mm	—
KOTOver	なし	SMD※(表面実装型)	3mm	0°C

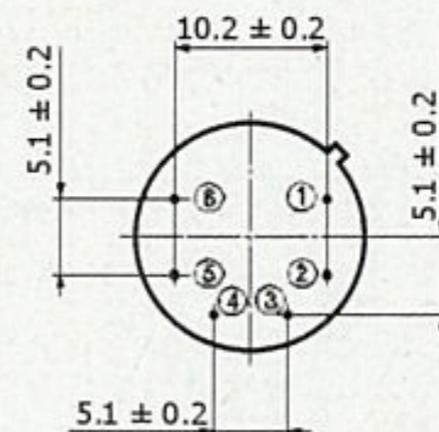
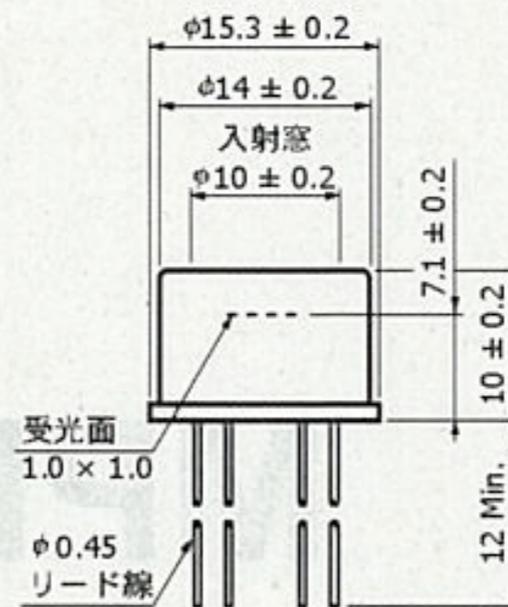
※koto ver には新型 low noise MPPC を実装

# MPPCレイアウト

ガラス窓を排除したのでMPPCは大気中に置かれる  
 →結露に注意が必要(cf:KOTO実験は真空中なので問題ない)



市販ver レイアウト



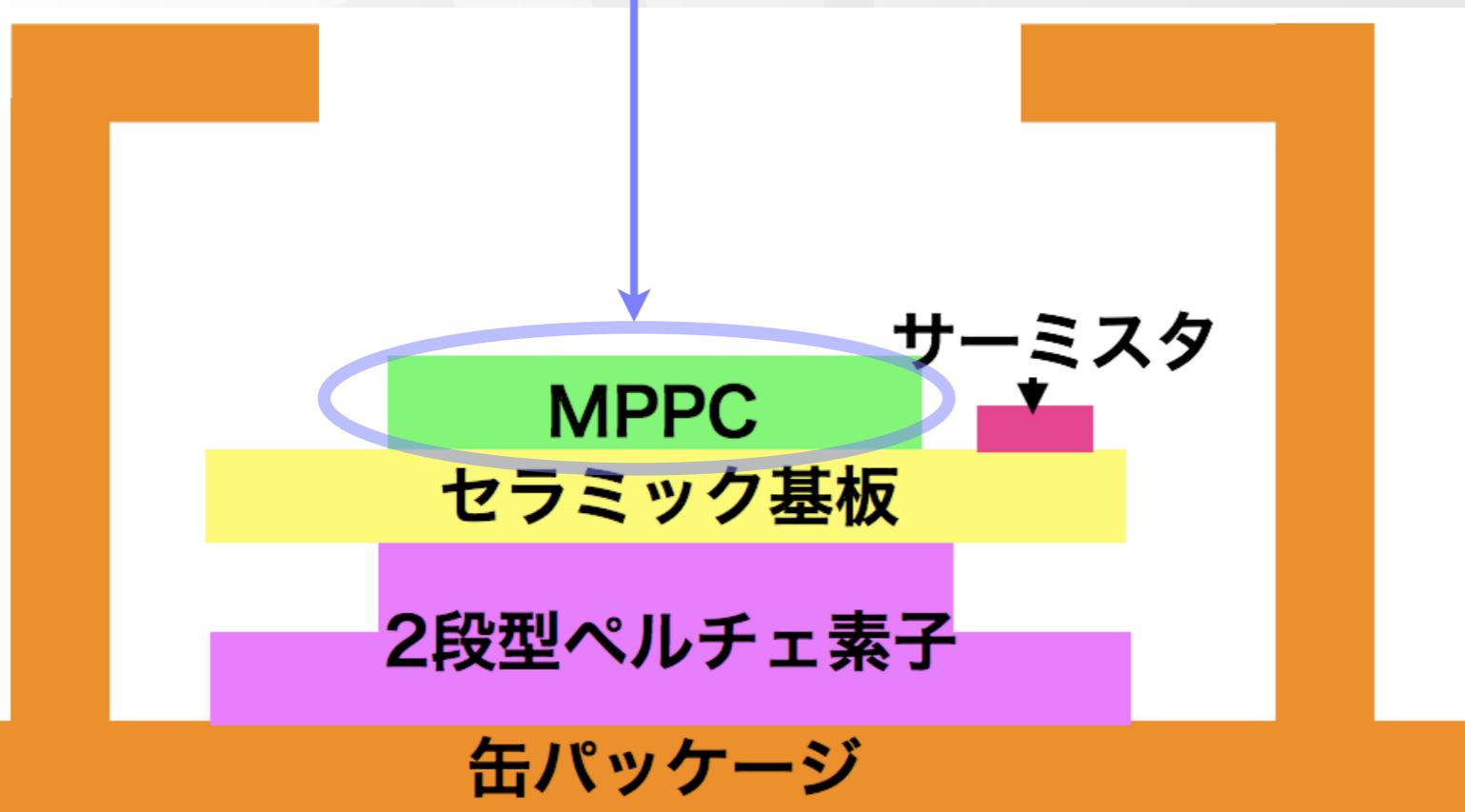
- ① 検出素子 (アノード)
- ② 検出素子 (カソード)
- ③ 電子冷却素子 (-)
- ④ 電子冷却素子 (+)
- ⑤⑥ サーミスタ

	ガラス窓	MPPC素子パッケージ	受光面サイズ	温度保証
市販1mm角ver	あり	チップタイプ	1mm	—
KOTO ver	なし	SMD※(表面実装型)	3mm	0°C

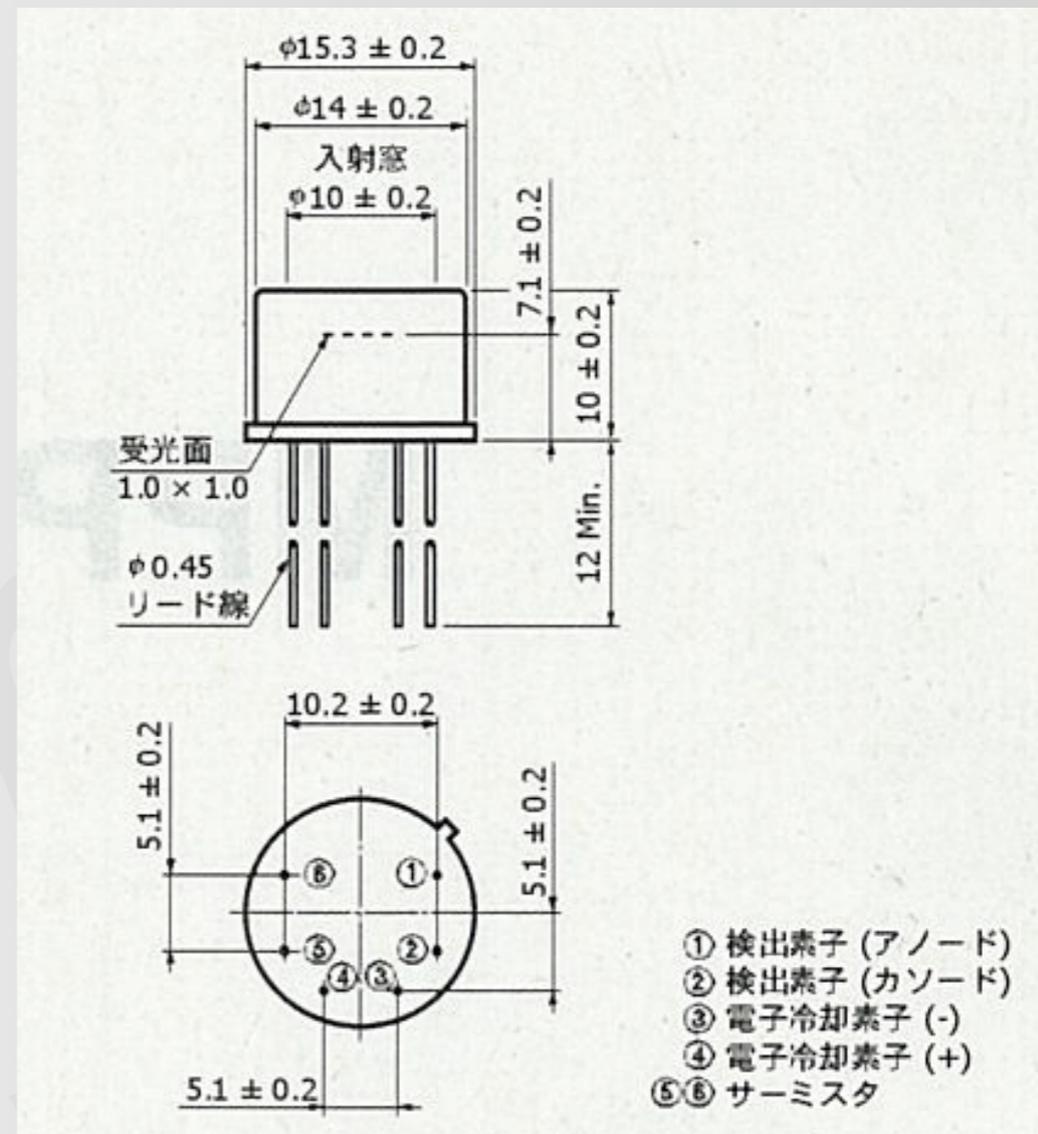
※koto ver には新型 low noise MPPC を実装

# MPPCレイアウト

ワイヤーボンディングの排除、受光面保護のために  
 SMDタイプのMPPCをマウント  
 →樹脂耐性で保証温度0°Cに



市販ver レイアウト

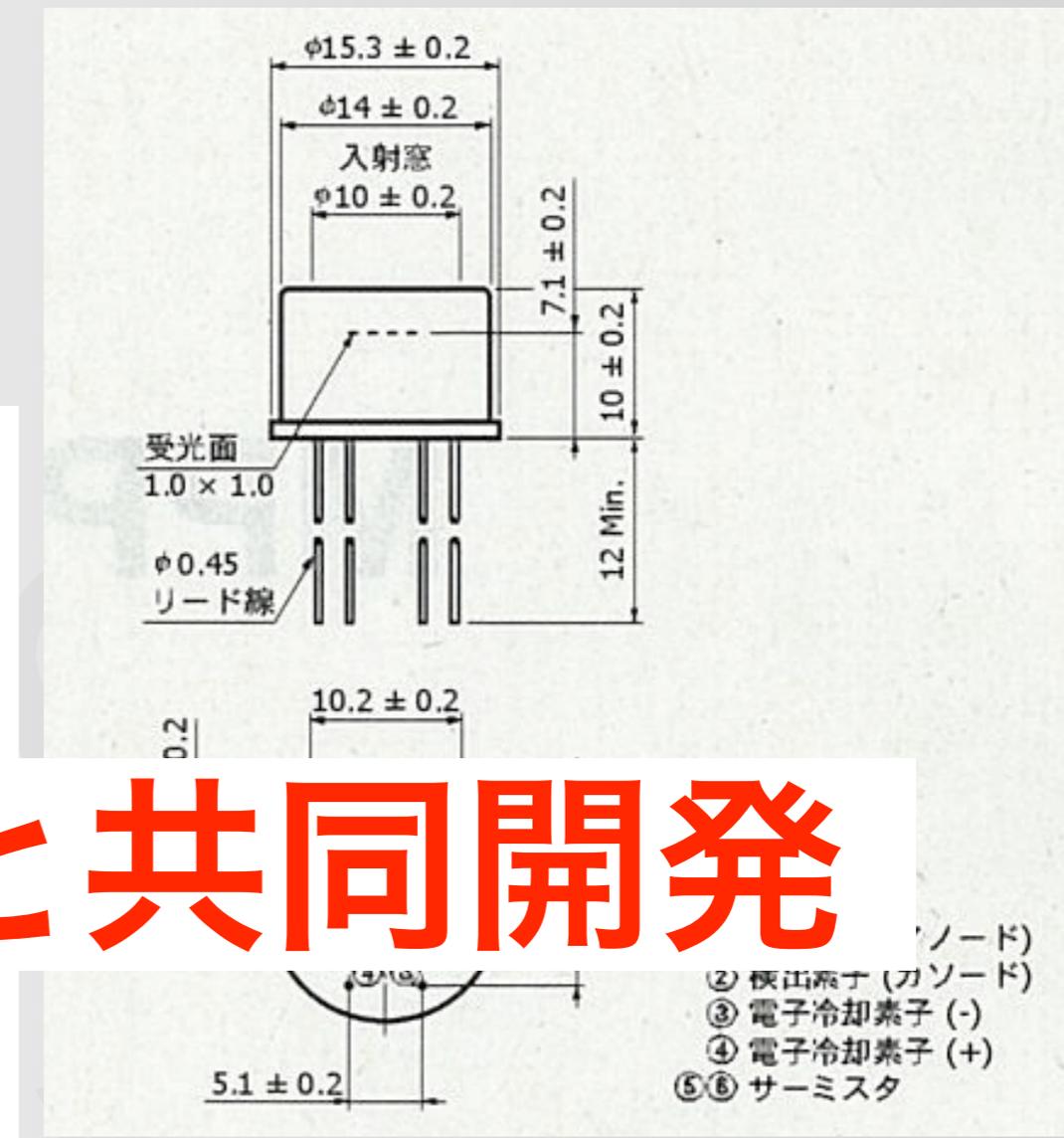


- ① 検出素子 (アノード)
- ② 検出素子 (カソード)
- ③ 電子冷却素子 (-)
- ④ 電子冷却素子 (+)
- ⑤⑥ サーミスタ

	ガラス窓	MPPC素子パッケージ	受光面サイズ	温度保証
市販1mm角ver	あり	チップタイプ	1mm	—
KOTOver	なし	SMD※(表面実装型)	3mm	0°C

※koto ver には新型 low noise MPPC を実装

# MPPCレイアウト



## 浜松ホトニクスと共同開発

2段型ペルチェ素子

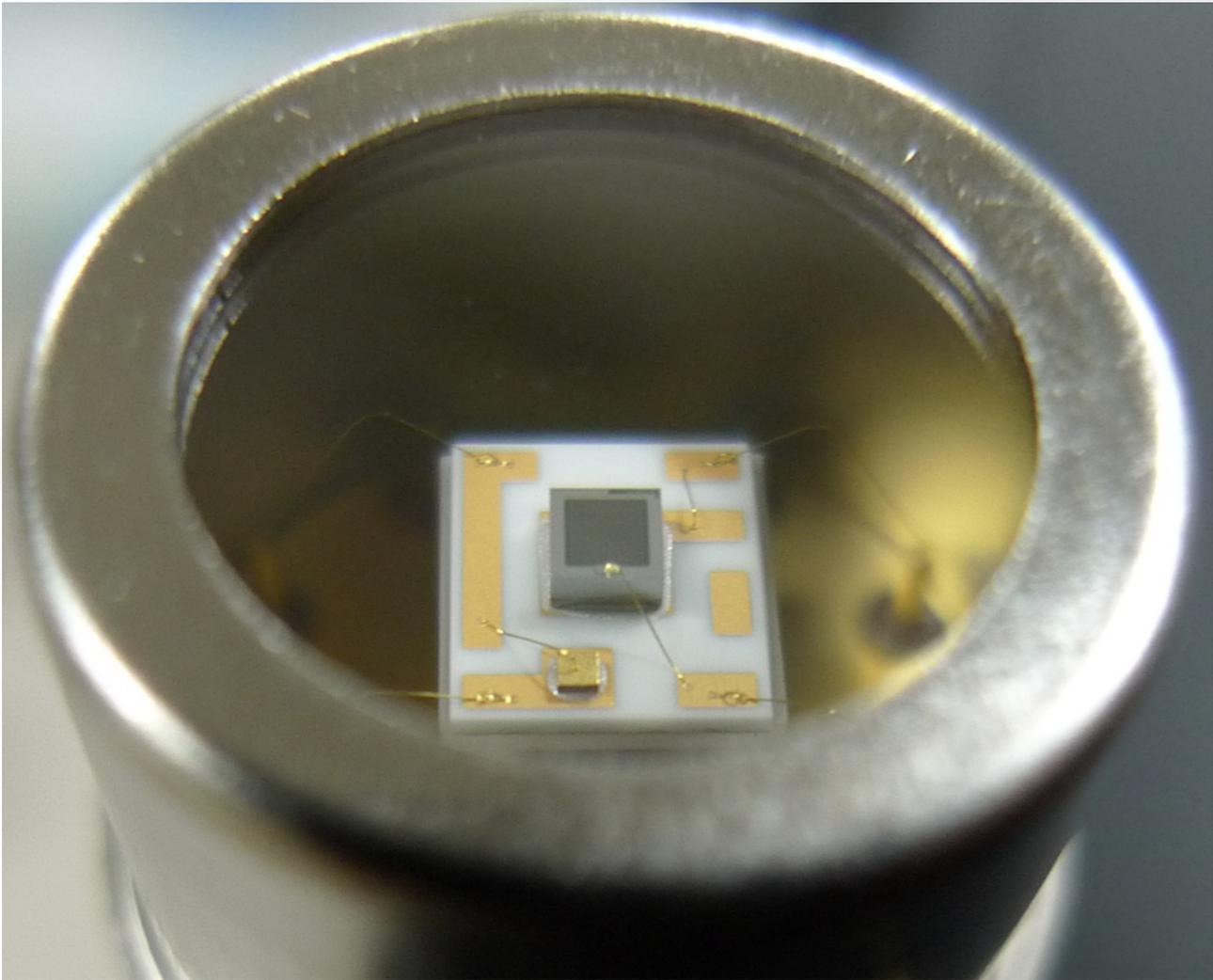
缶パッケージ

KOTOOver レイアウト

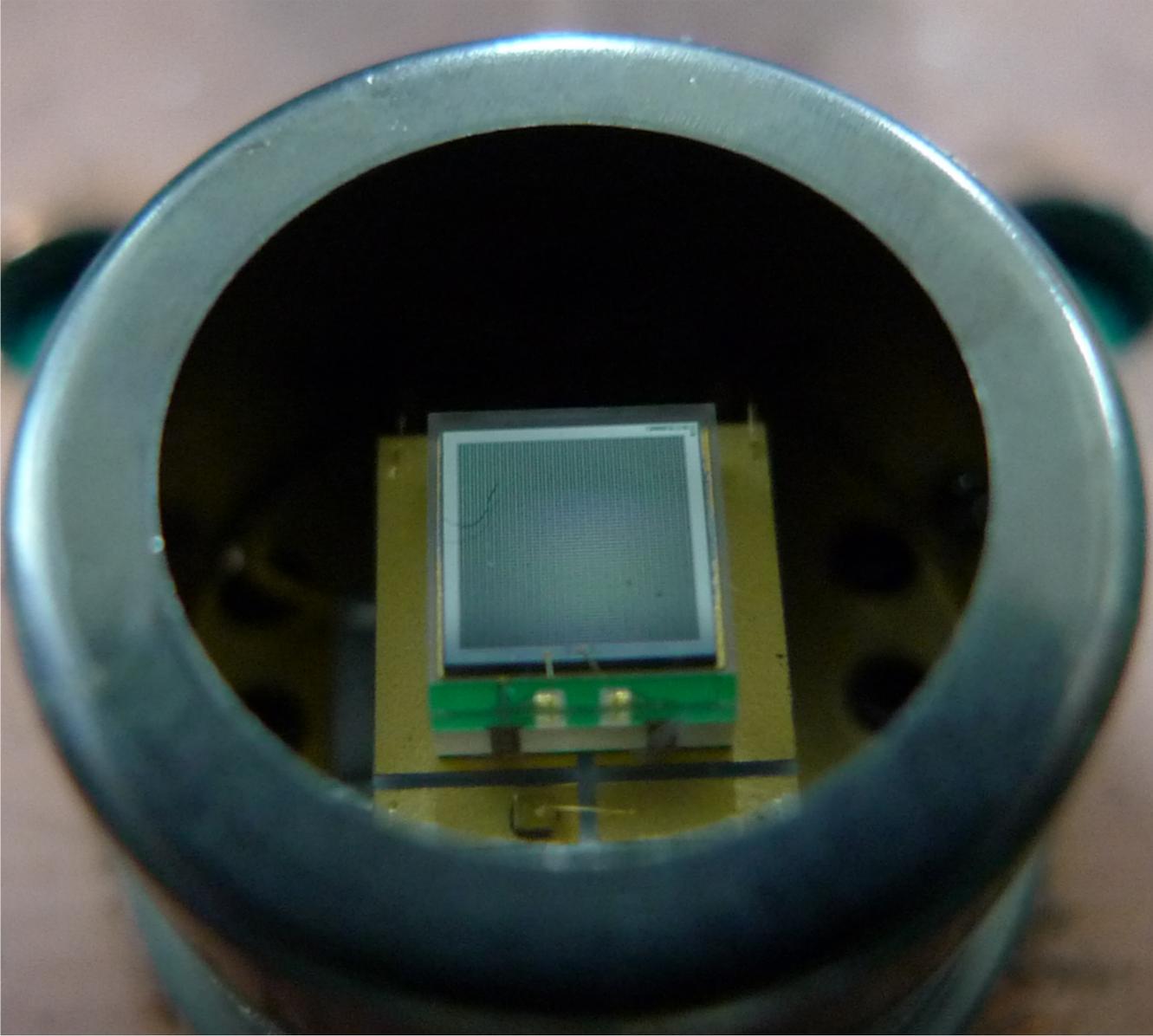
	ガラス窓	MPPC素子パッケージ	受光面サイズ	温度保証
市販1mm角ver	あり	チップタイプ	1mm	—
KOTOOver	なし	SMD※(表面実装型)	3mm	0°C

※koto ver には新型 low noise MPPC を実装

# 実際の素子



市販タイプ



KOTOバージョン

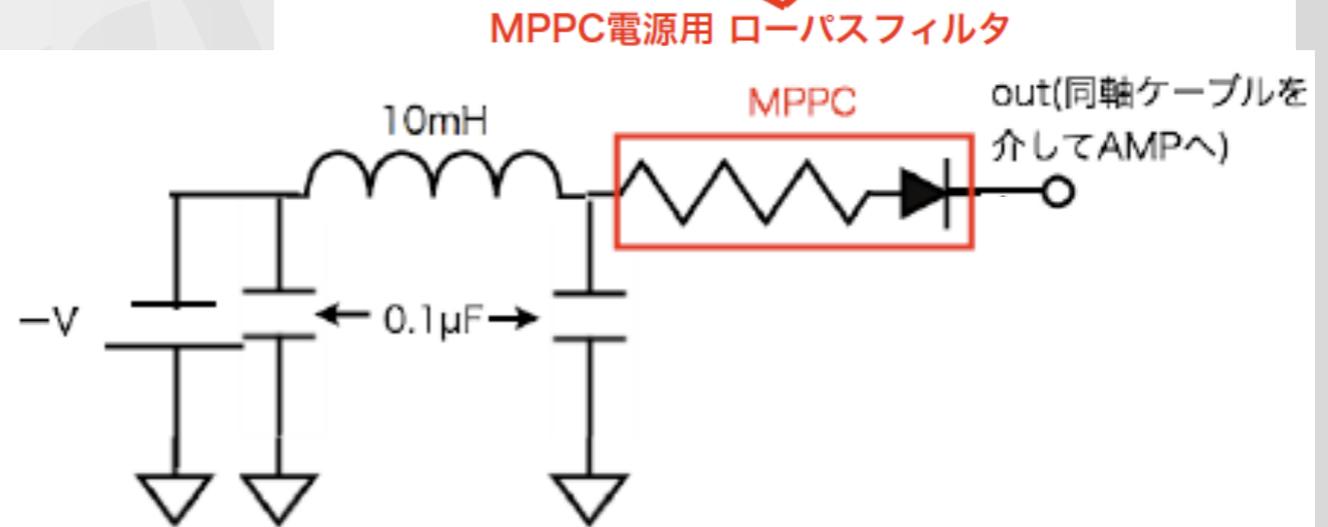
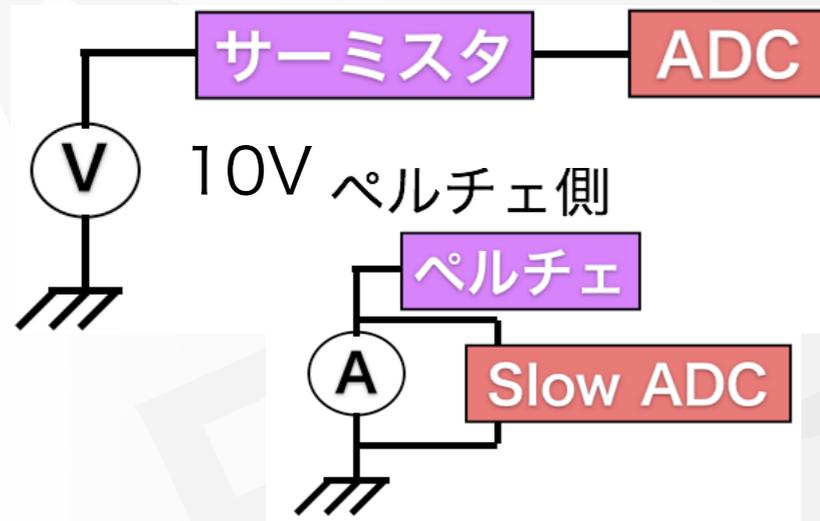
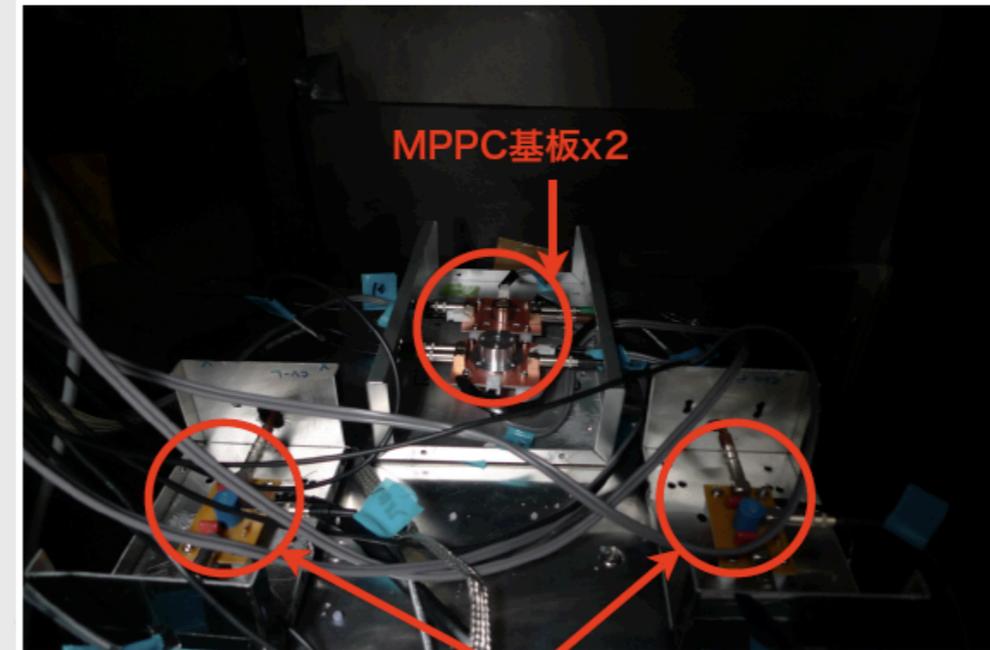
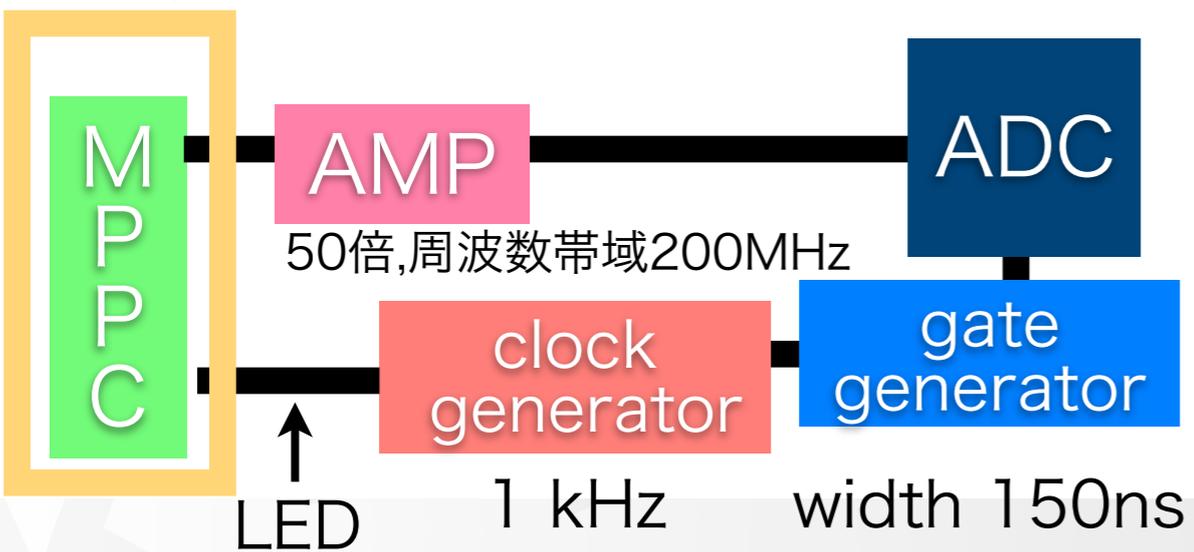
Search for

# 性能評価テスト-測定項目-

1. ペルチェ素子の動作がMPPCに悪影響があるか(電氣的ノイズの変化等)
  - ・ MPPC波形のcheck
  - ・ ダークカウントノイズの変化
2. 5°Cまで冷却可能か、温度モニターができているか
  - ・ ペルチェ素子の冷却能力&モニター(サーミスタ)のチェック
3. ペルチェ素子による放熱を100mW以下にできるか
  - ・ ペルチェの消費電力測定

# 性能評価テスト-セットアップ

恒温槽 MPPC ゲインを測定セットアップ



- 波形を測定する時はAMPからの波形をオシロで観測
- ダークカウントノイズはランダムゲートでADCを取って解析
- 恒温槽の温度を変えてダークカウント、ブレイクダウンボルテージを測定
- ペルチェ素子で冷却してダークカウント、ブレイクダウンボルテージを測定

# 測定結果 - 波形チェック -

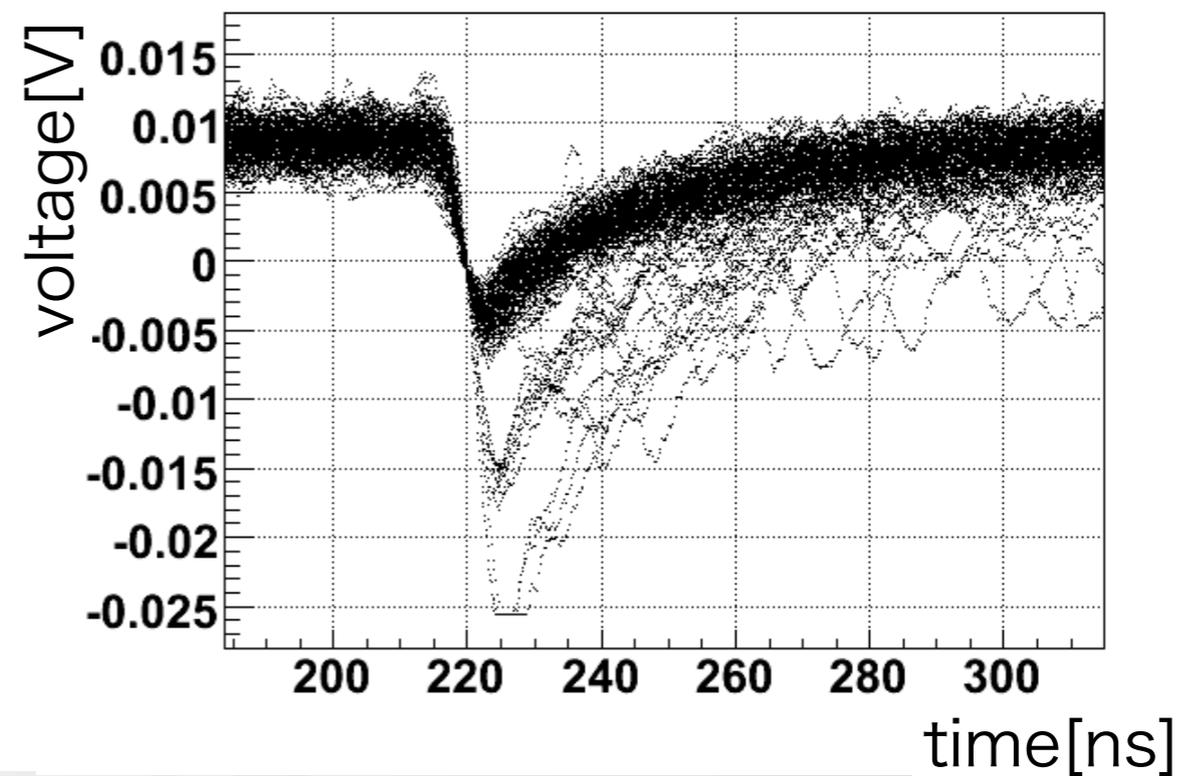
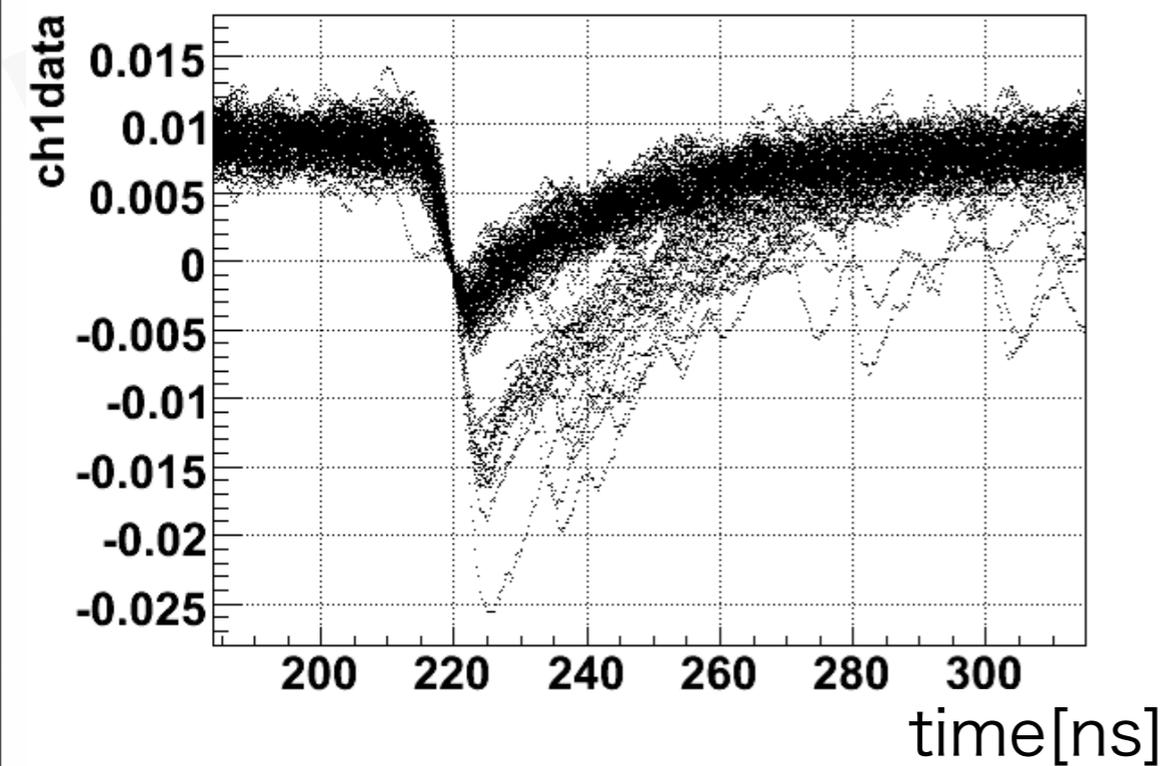
$\Delta V = 1.3V$  で 1 p.e. 閾値でダークカウントを測定

MPPC温度15°C

(恒温槽温度15°C、ペルチェoff)

MPPC温度14°C

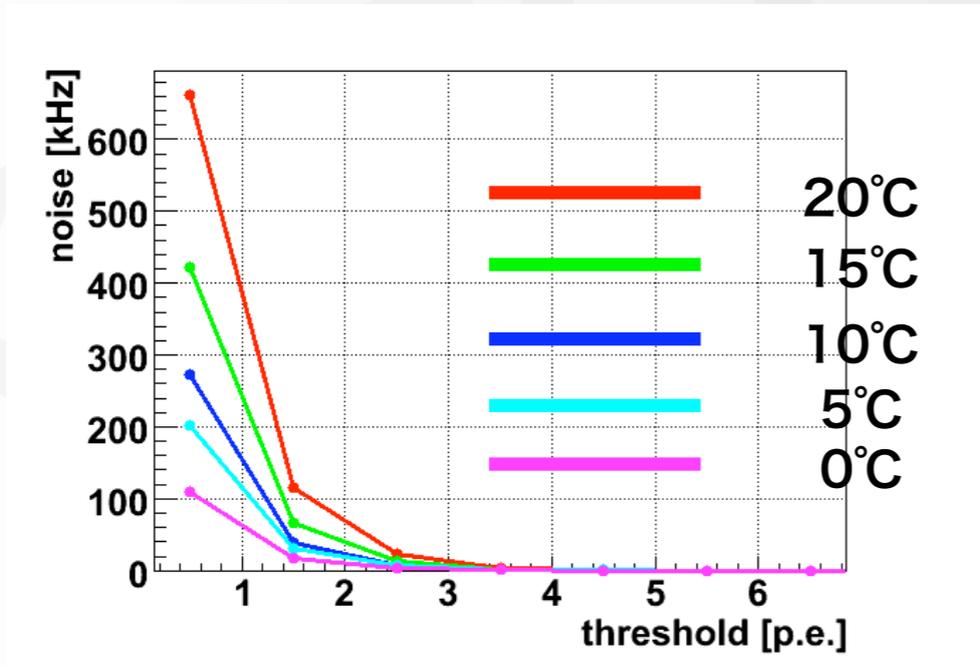
(恒温槽温度20°C、ペルチェon)



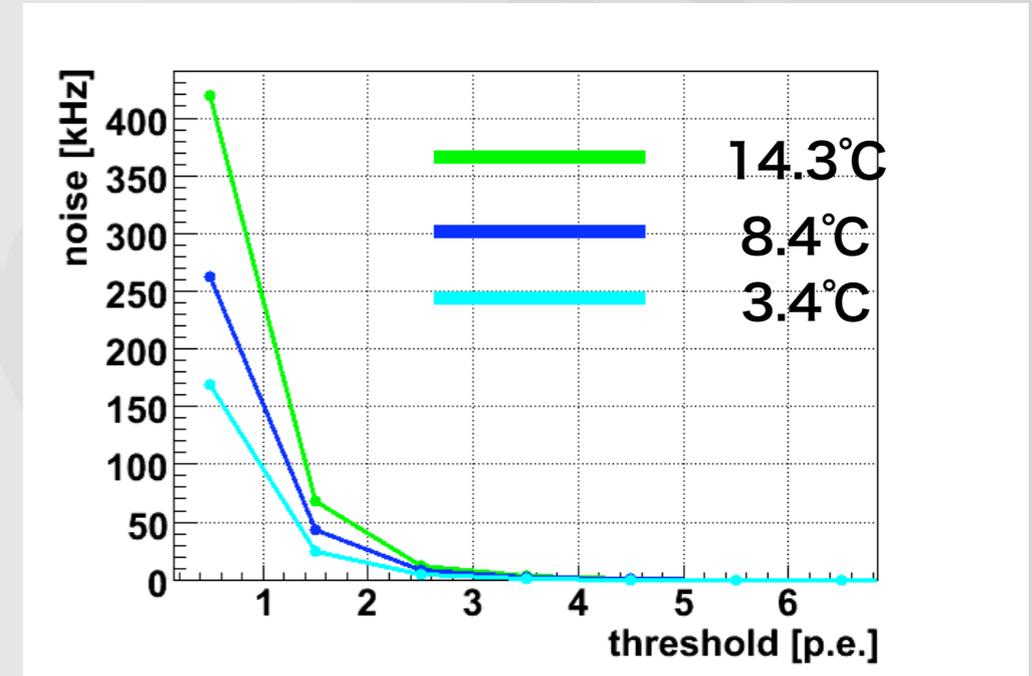
ペルチェ素子を使ってMPPCを冷却しても波形に変化なし

# 測定結果-ダークカウントノイズ-

- ・ アフターパルス、クロストークの影響含んだ状態で評価
- ・ 測定は全て  $\Delta V=1.3V$  時
- ・  $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 5^{\circ}\text{C}$  でダークカウントノイズ1/6に



KOTO ver, 恒温槽の温度を変化させて測定

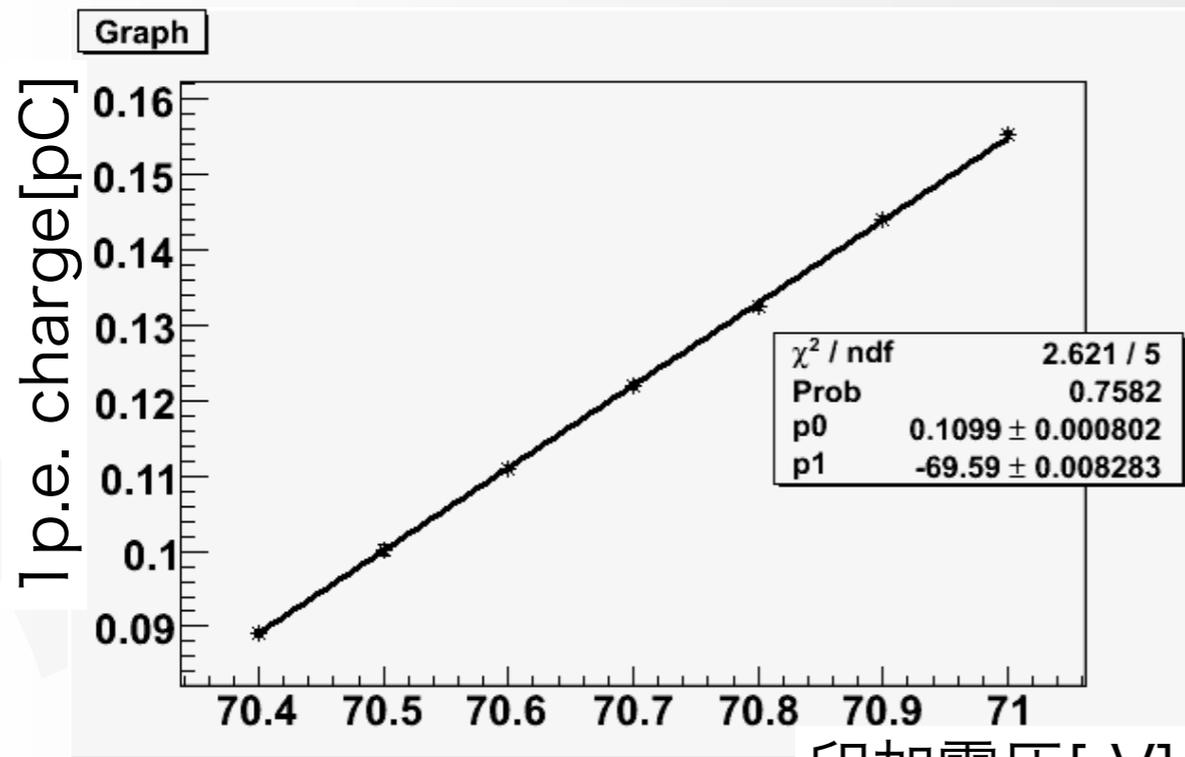


KOTO ver, 恒温槽 $20^{\circ}\text{C}$ 固定, ペルチェ素子で冷却

**ペルチェ素子で冷却しても変化なし**

# 測定結果 -冷却能力&モニターのチェック1-

KOTOバージョンのペルチェ素子に0.1Aかけた時(8°Cに冷却)

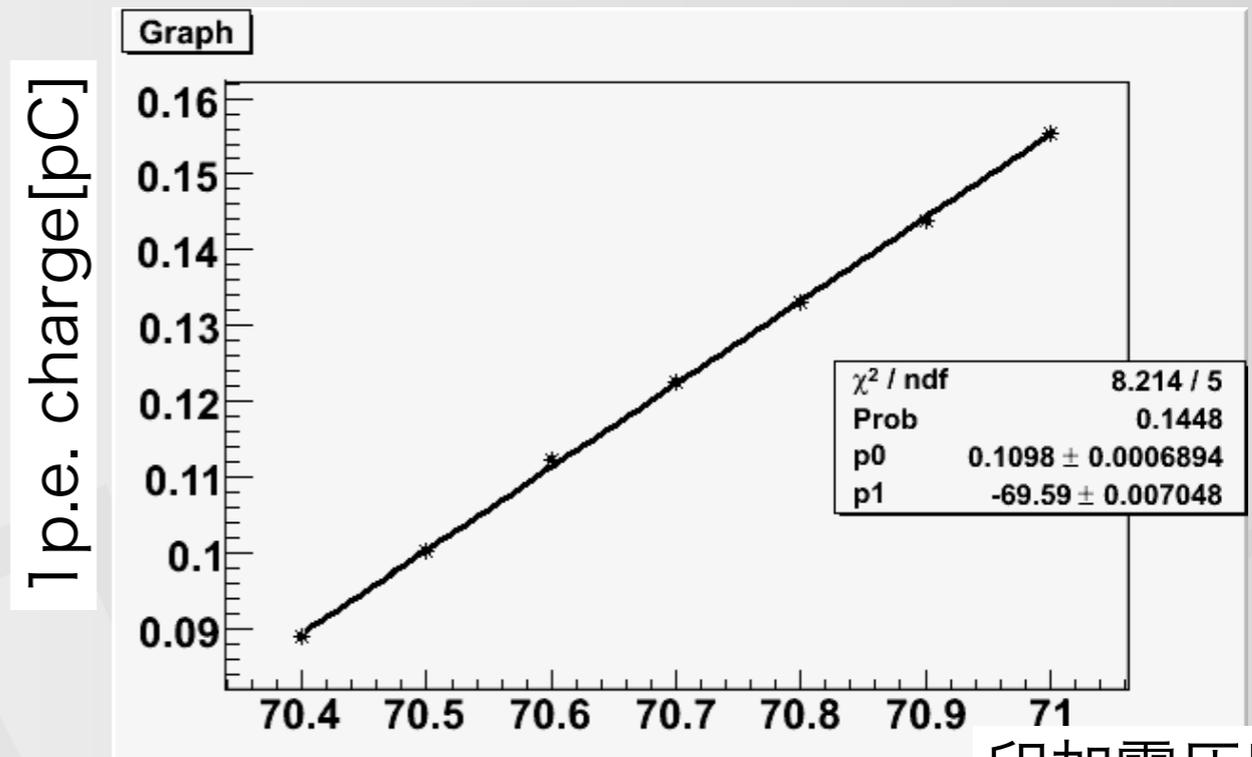


印加電圧[-V]

印加電圧 Vs 1 p.e. charge

電圧上昇

させて測定



印加電圧[-V]

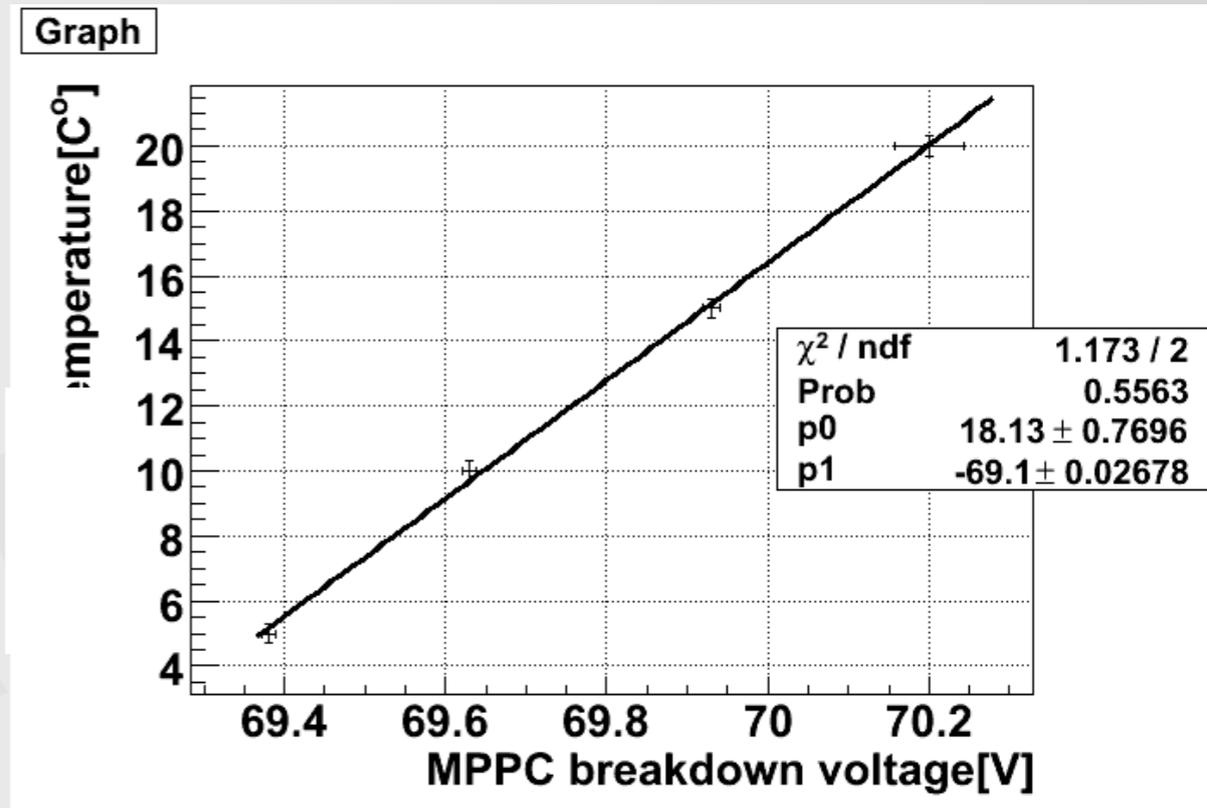
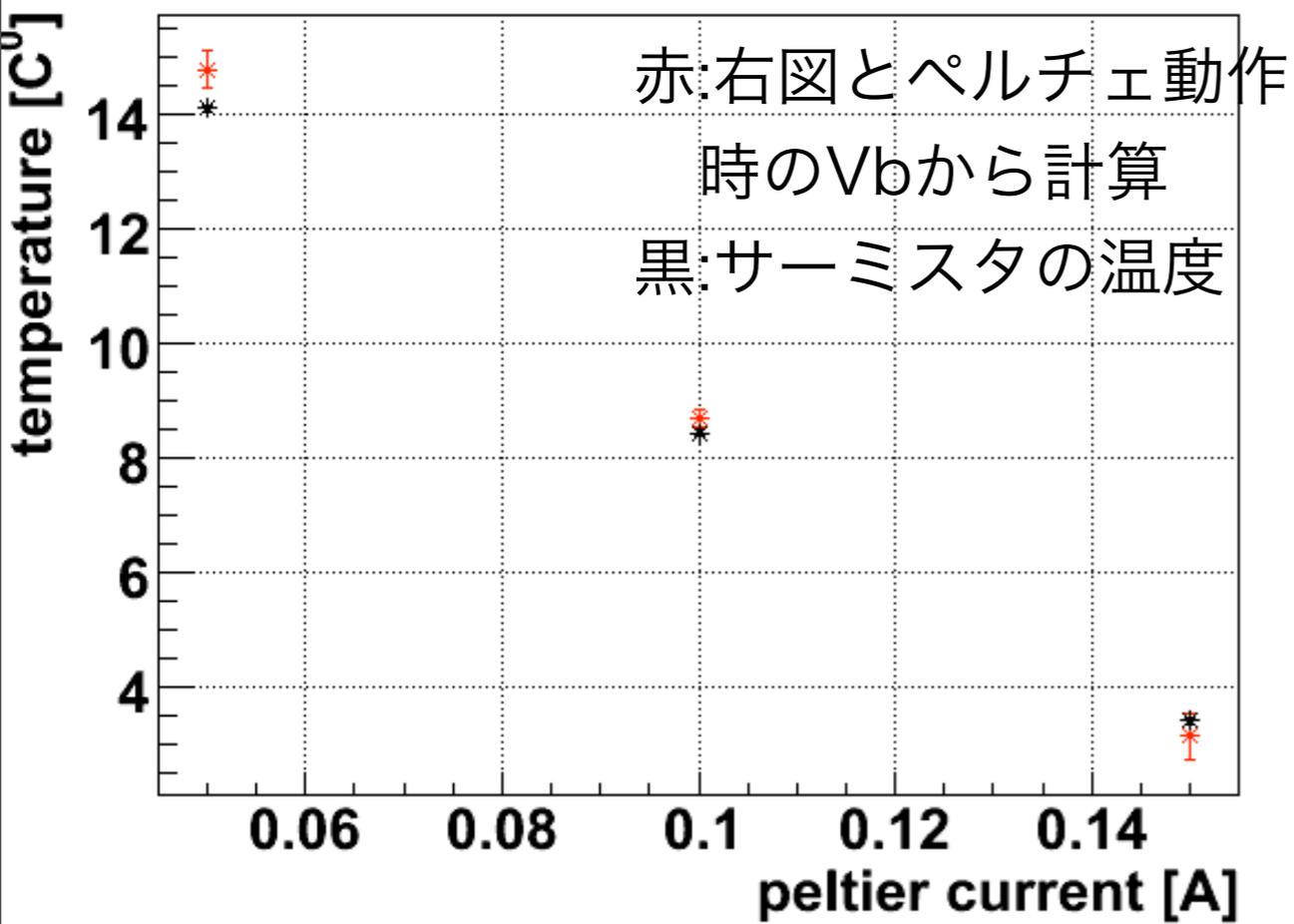
印加電圧 Vs 1 p.e. charge

電圧下降

させて測定

- MPPCに印可する電圧が増えても(暗電流が増えて発熱量が増えても)線形性が保たれている。
- MPPCの発熱量(~0.1mW、熱流入が支配的)なのでMPPCの発熱は問題なし。

# 測定結果 -冷却能力&モニターのチェック2-



温度とVbの関係(恒温槽で別に測定)

KOTOバージョン

- KOTO verでちゃんとサーミスタで温度モニターできている。
- KOTO実験で使用する5°Cに冷却するには0.12A流せばよい。

# 測定結果-消費電力特性-

- ・ペルチェ素子(2段型)の消費電力(放熱量)

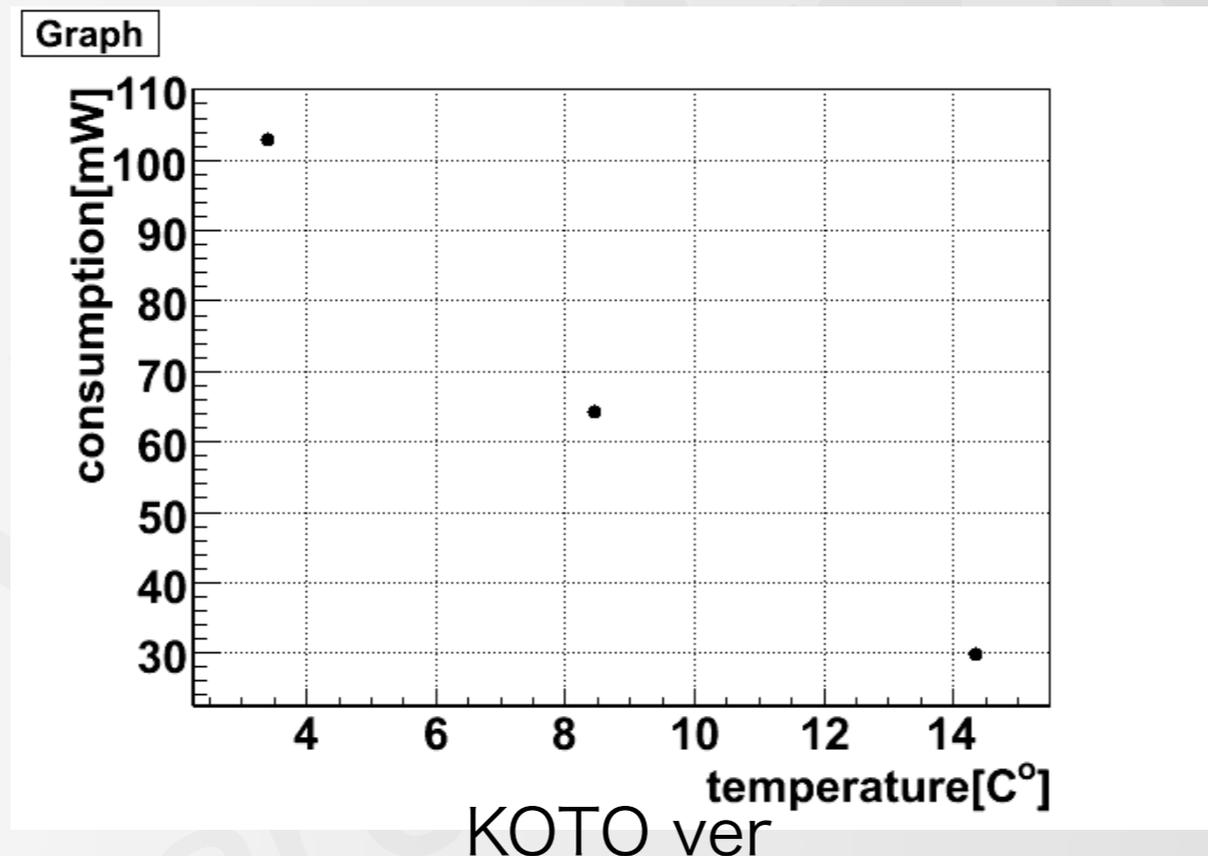
$$\text{消費電力} = S I T_1 + 5 V I / 6 \cdot (T_2 - T_1) / \theta \quad \leftarrow \text{今回は無視}$$

T1:サーミスタの温度, V:ペルチェの電圧, I:ペルチェの電流, S:ゼーベック係数

T2:ペルチェ素子1段目の放熱側温度,  $\theta$ :ペルチェ素子の熱抵抗

T1, V, Iを測定することで消費電力を計算

既知



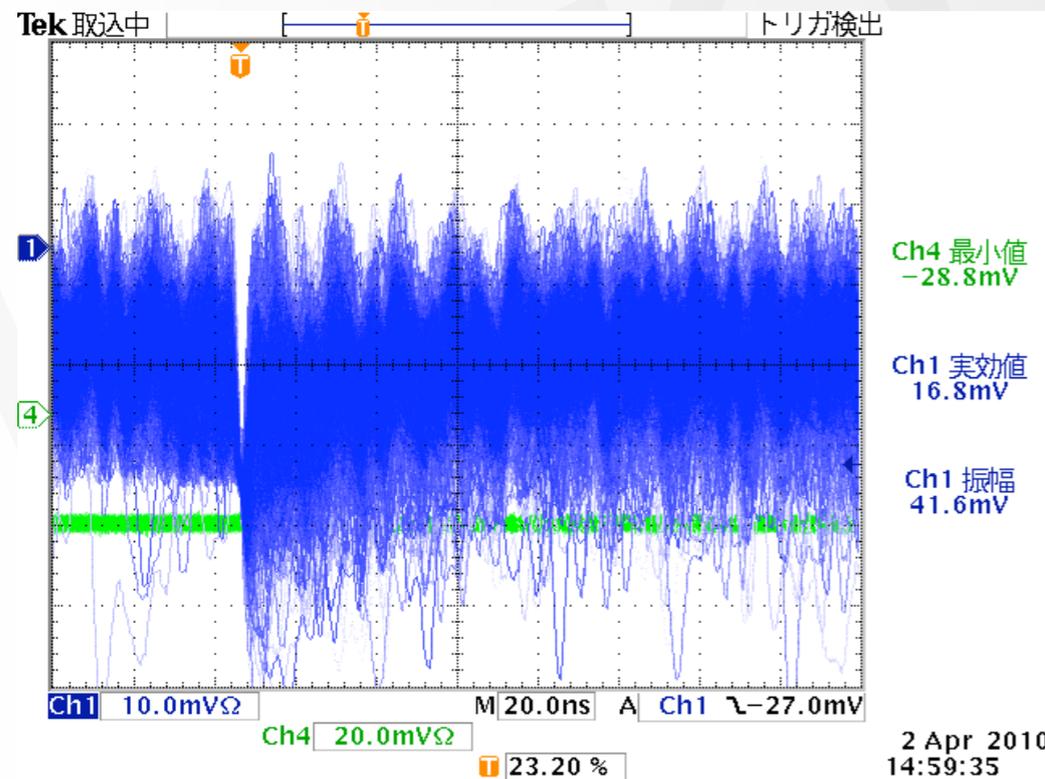
- ・ KOTO実験で使う5°Cでは消費電力が80mW程度
- ・ 消費電力~100mWというKOTO実験の要請を満たす

- 浜松ホトニクスと冷却素子付き受光面3mm角MPPCを共同開発
  - ペルチェ素子動作環境でのMPPC動作テスト  
→OK
  - 冷却能力&モニター
    - MPPCの発熱は問題なし
    - サーミスタでの温度モニターができています
    - KOTO実験の冷却温度 $5^{\circ}\text{C}$ を満たすには $0.12\text{A}$ が必要
  - 消費電力
    - $0.12\text{A}$ 時の消費電力は $80\text{mW}$ であり、 $\sim 100\text{mW}$ というKOTO実験の要請を満たした

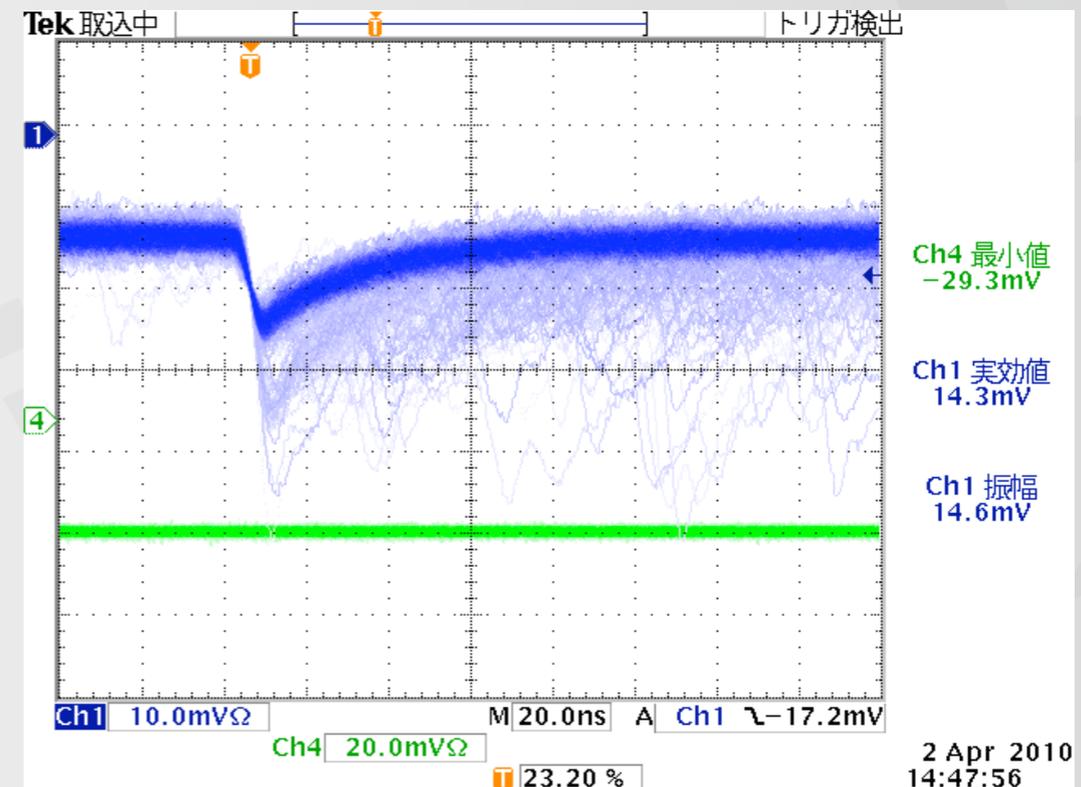
# -缶パッケージの課題-

恒温槽 $20^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta V=1.3\text{V}$ で1p.e.ダークカウントを観測(ペルチェ素子はoff)

cf.  $\Delta V$ =印可電圧-ブレイクダウンボルテージ



缶をグラウンドに落とさない



缶をグラウンドに落とす

缶のグラウンドが浮いているため、周りからノイズを拾う

- ・ 使用する時は缶のグラウンドを落とす必要がある
- ・ パッケージにグラウンドピンを増設すべき
- ・ KOTO実験では缶がベタグラウンドと接するので問題ない

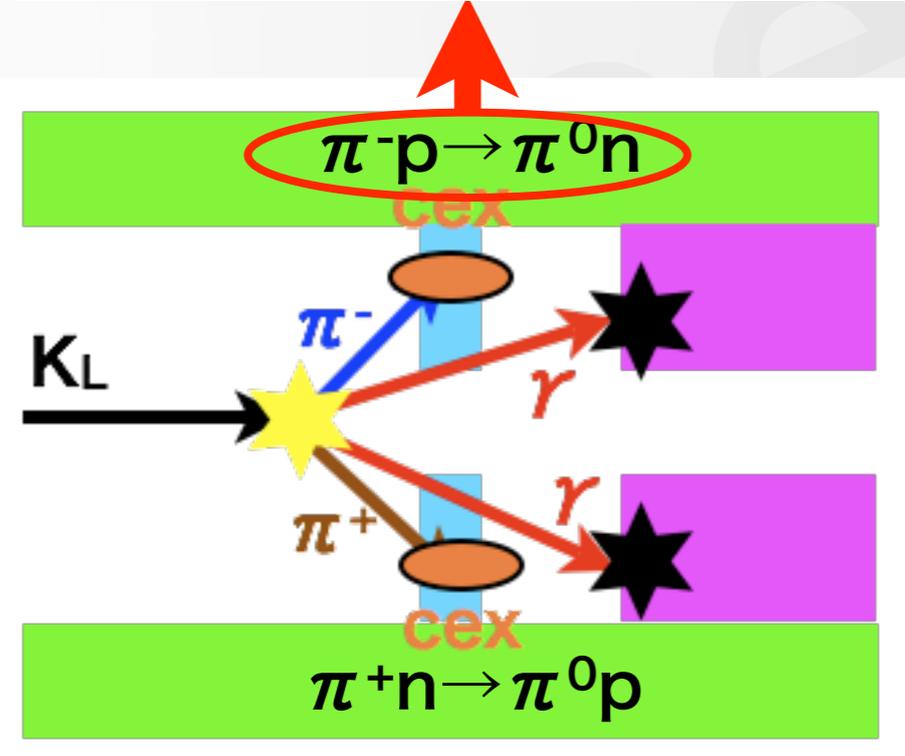
# APPENDIX

- CVで低エネルギー検出が必要な理由
- ペルチェ素子とは?
- 測定に用いた機器
- ダークカウント測定方法
- 消費電力の計算
- MPPCの読み出しデザイン(暫定版)
- MPPCとファイバーのライトコンタクト
- 冷却素子付き3mm角チップタイプver 性能評価
- 実機プロトタイプテスト

# 低エネルギー検出が必要な理由

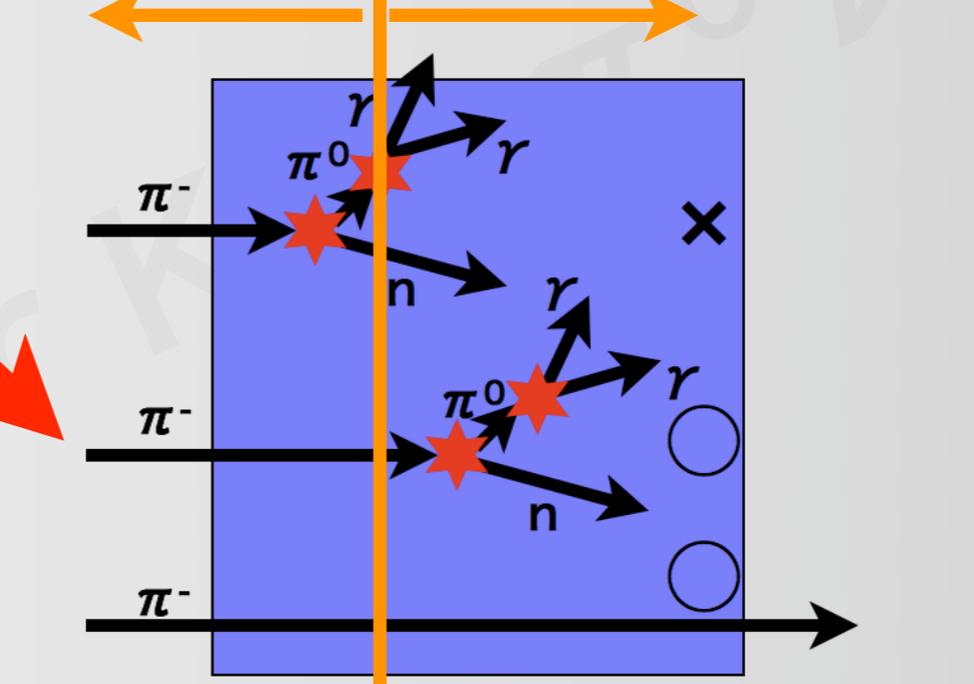
- CVでは主に $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ のvetoが重要
  - バックグラウンドを十分小さくしたい(目標はSMでのsignal 期待値1.41に対して0.15)
  - $\pi^-$ の不感率を十分小さく( $\sim 10^{-4}$ レベル)したい
  - 検出器として100keVの検出が必要(荷電交換反応確率 $\sim 10^{-4}$ )。

不感になるのが問題



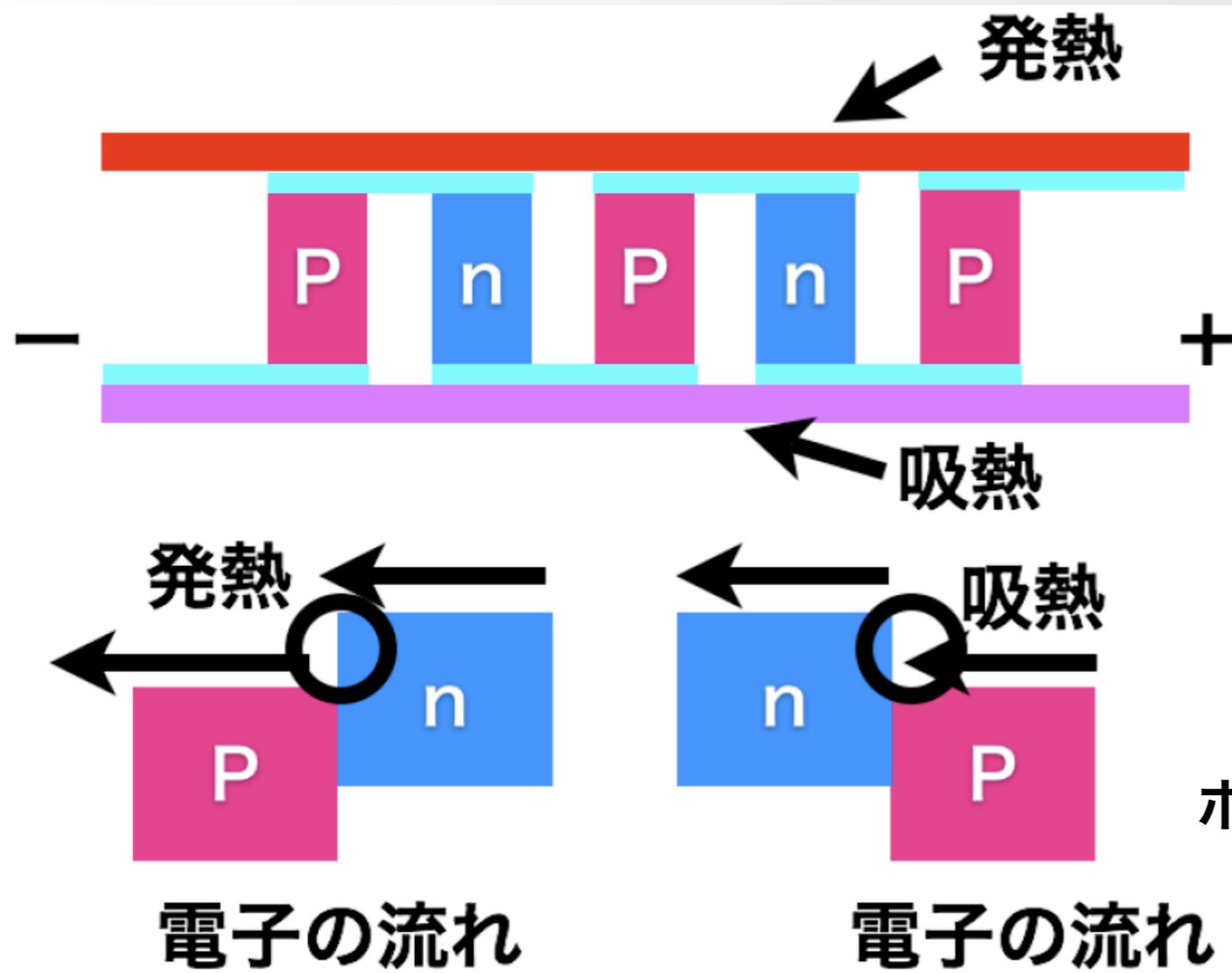
バックグラウンドのメカニズム。  
cexは荷電交換反応の意味。

検出不可 検出可能



CVで $\pi^-$ が不感になるメカニズム

# ペルチェ素子とは？



実際の写真



ポテンシャルの境界で吸熱・放熱が行われる

$$Q_C = SIT_C - \frac{I^2 R}{2} - (T_H - T_C)/\theta$$

$$Q_H = SIT_C + \frac{I^2 R}{2} - (T_H - T_C)/\theta$$

➡ ペルチェの吸熱量

➡ ペルチェの放熱量

ペルチェ効果

による吸熱・発熱

電流による発熱

高温側から低温側

への熱流入

# 測定に用いた機器一覧

- 恒温槽：ETAC, HIFLEX FL211C
- MPPC用AMP：FUJI DIAMOND INTERNATIONAL, TKY-0351
- MPPC用電源：YOKOGAWA, GS610
- サーミスタ用定電圧源：KIKUSUI, PMC18-5
- ペルチェ素子用定電流源：KIKUSUI, PAN110-1.5A
- オシロスコープ：TDS3034B

# ダークカウンントノイズ測定

ペDESTAL



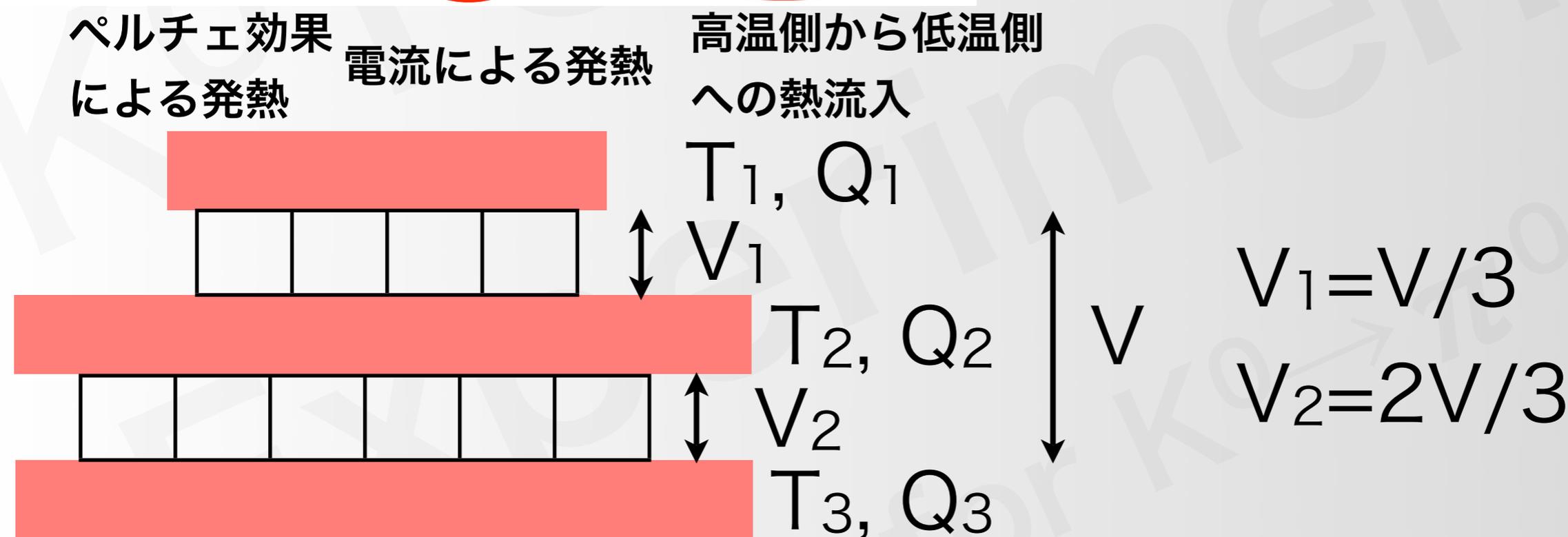
ペルチェ素子に0.1A流した時の  
 $\Delta V=1.3V$ のADC(ランダムゲート)

- ランダムトリガーでADCスペクトラムを取る
- 事前のキャリブレーションからNp.e.閾値を求め、閾値以上の数を数える(図では1.5p.e.)
- この値を測定時間で割ってノイズレートにする
- アフターパルス、クロストークの影響含んだ状態で評価
- 測定は全て $\Delta V=1.3V$ 時

# 消費電力の計算1

$$Q_C = SIT_C - \frac{I^2 R}{2} - (T_H - T_C)/\theta \quad \rightarrow \text{ペルチェの吸熱}$$

$$Q_H = SIT_C + \frac{I^2 R}{2} - (T_H - T_C)/\theta \quad \rightarrow \text{ペルチェの放熱}$$



ペルチェの上段からの発熱とペルチェ下段の吸熱が等しいと仮定

$$SIT_1 + V_1 I / 2 - (T_2 - T_1) / \theta = SIT_2 - V_2 I / 2 - (T_3 - T_2) / \theta$$

$$\rightarrow T_2 = (SIT_1 + VI/2 + (T_1 + T_3) / \theta) / (SI + 2 / \theta)$$

# 消費電力の計算2

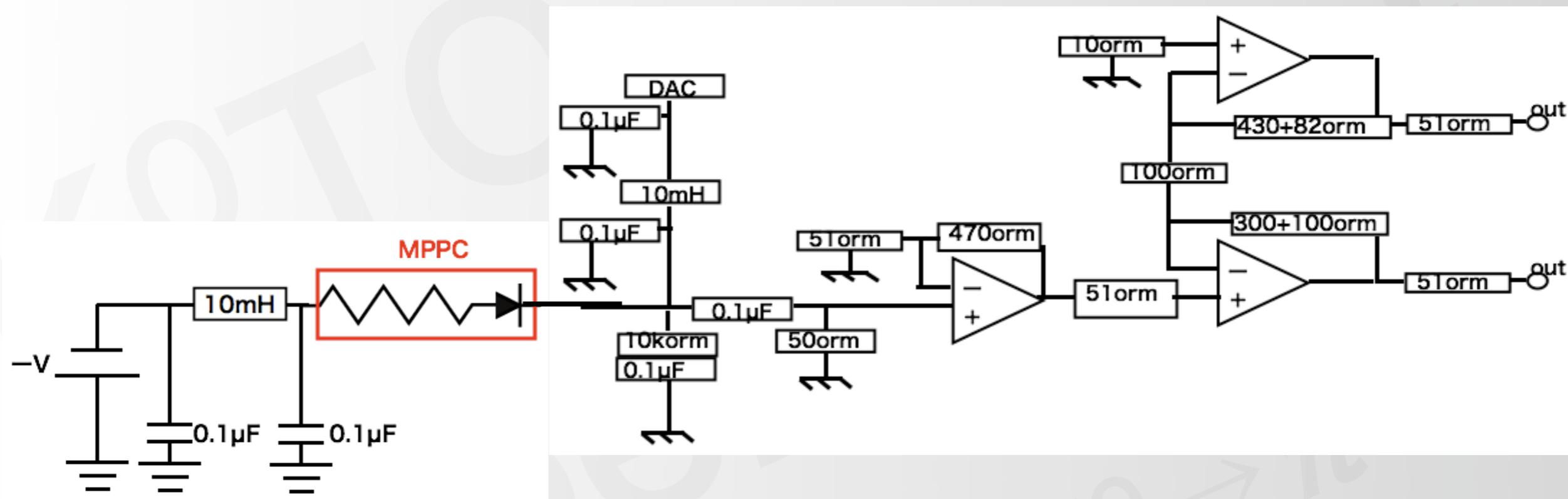
よって $T_3$ での発熱は

$$Q_3 = S I T_2 + V_2 I / 2 - (T_3 - T_2) / \theta$$

$$= S I T_1 + V I / 2 + (T_1 + T_3) / \theta + V I / 3 - (T_3 + T_2) / \theta$$

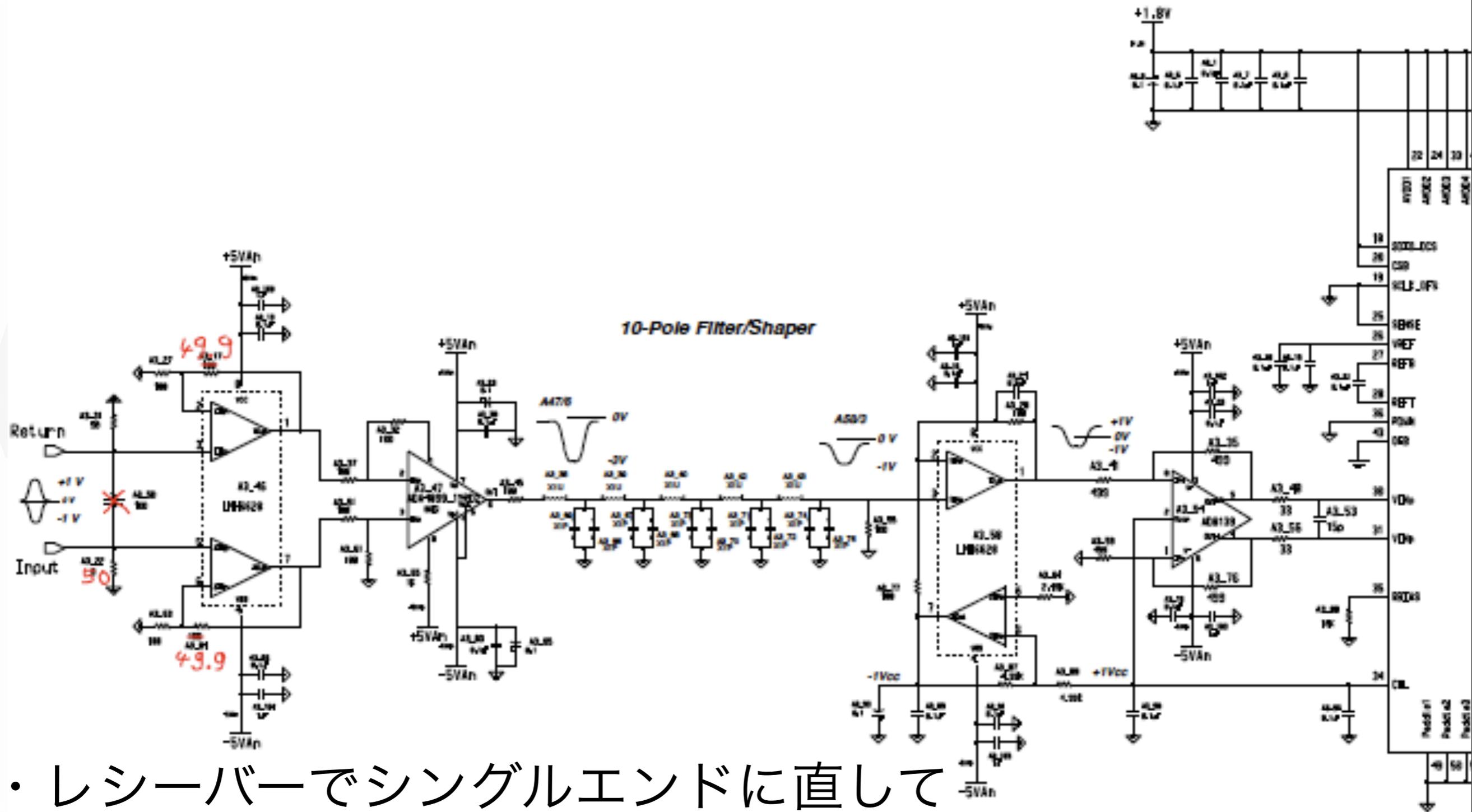
$$= S I T_1 + 5 V I / 6 - (T_2 - T_1) / \theta \leftarrow \text{今回は無視}$$

# MPPPC読み出し1 (暫定版)



- MPPPCの電圧はDACでつり上げ
- MPPPCはBW200MHz, 非反転+差動増幅で50倍
- MPPPCの信号はカテ6ケーブルで伝送

# MPPPC読み出し2(暫定版)

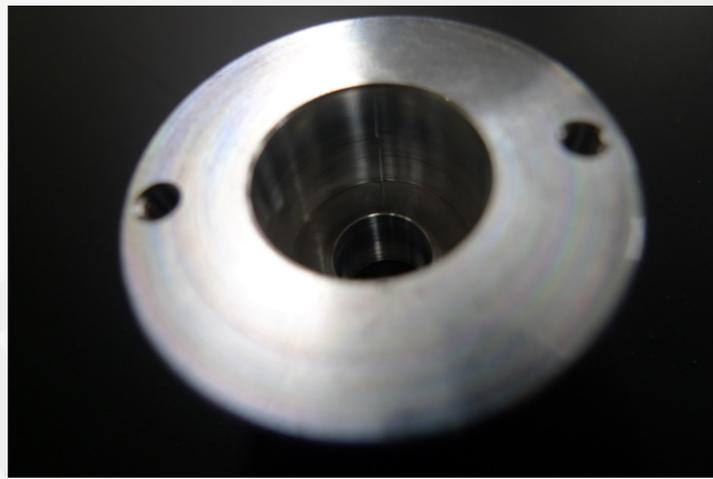


- レシーバーでシングルエンドに直して
- 10 pole gaussian filter(bessel filter)に入力
- 125MHz FADCで読み出し

# MPPPCとファイバーのコンタクト1

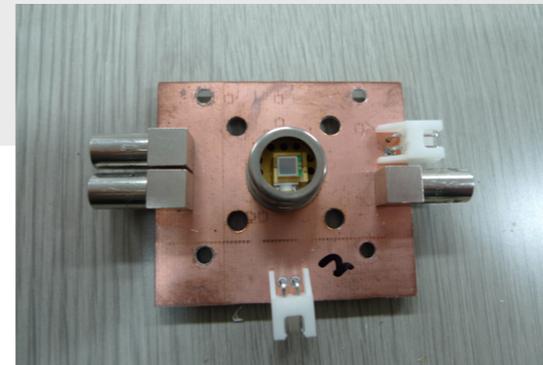


ジグ(表)



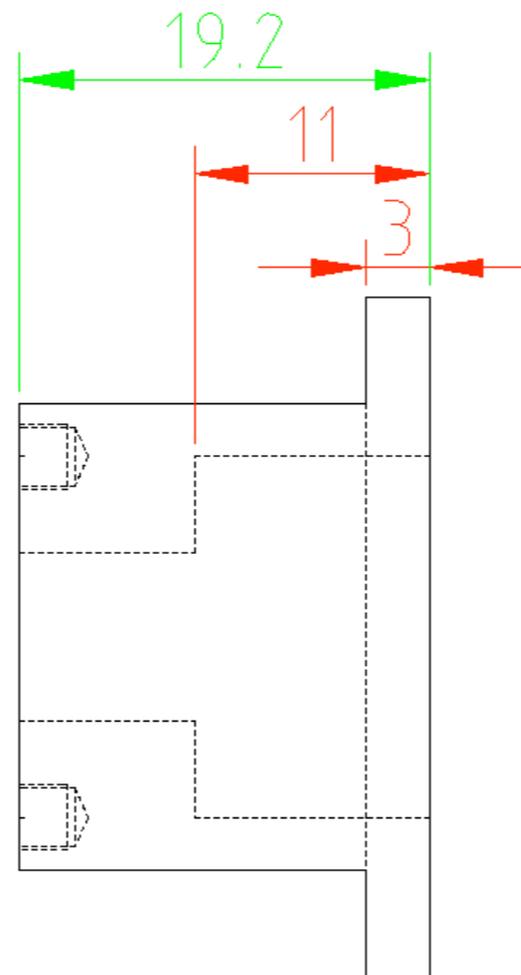
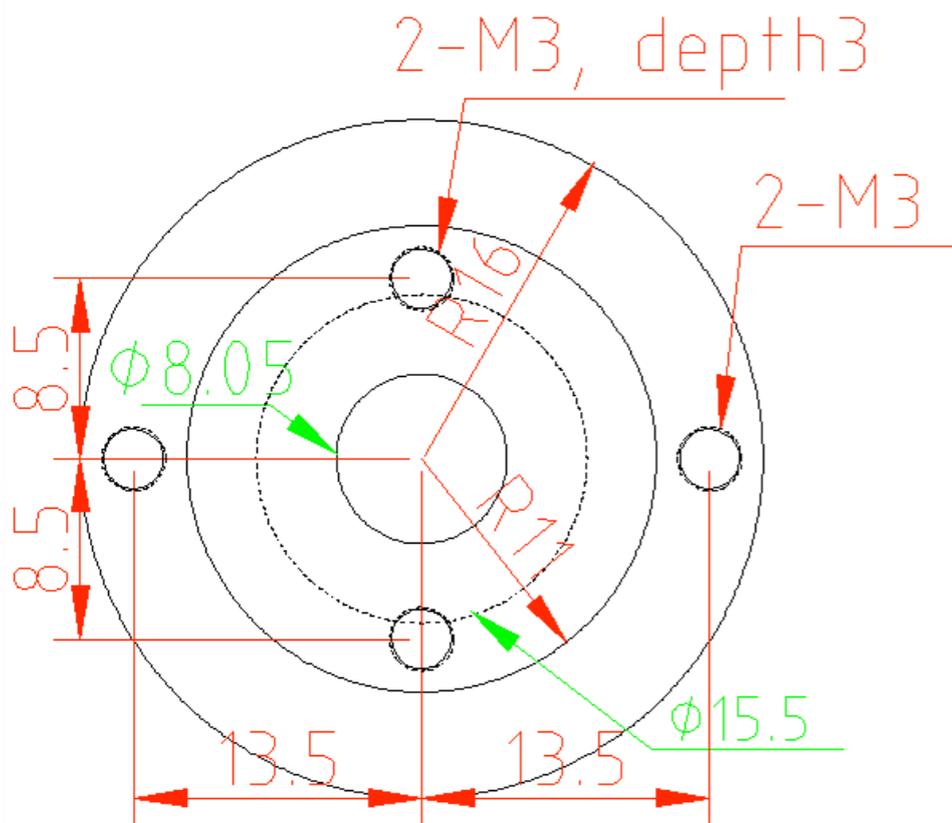
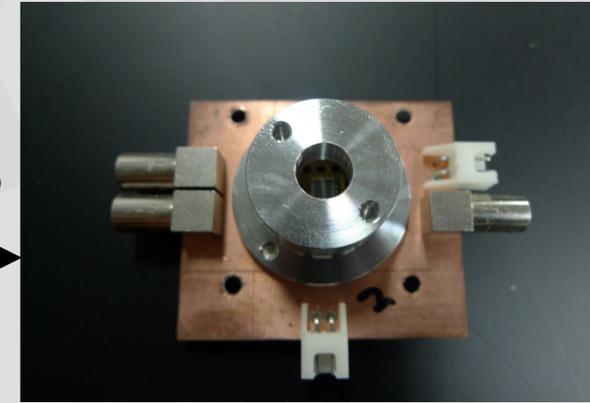
ジグ(裏)

- MPPPCは外側の缶に対してアライメントされて実装
- 缶とジグを嵌め合わせる



MPPPCが乗ったボード

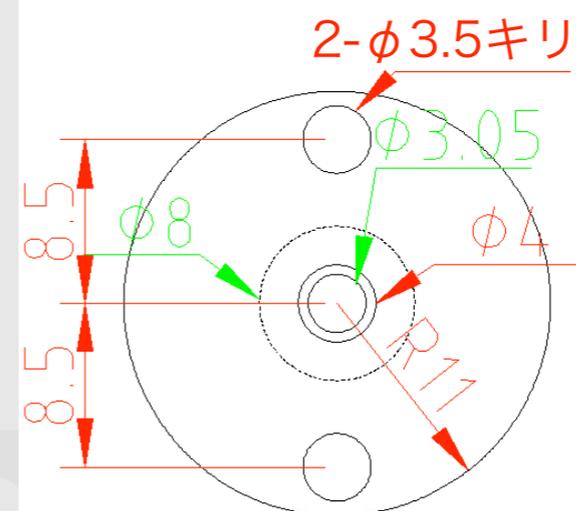
被せる



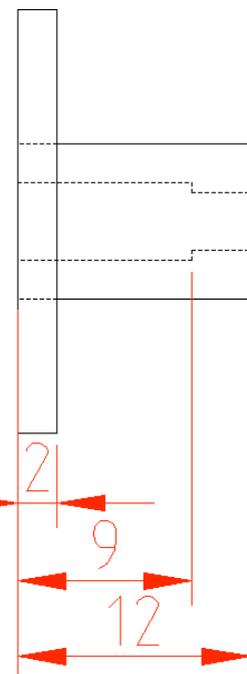
赤:誤差 $\pm 0.1$

緑:誤差 $\pm 0.05$

# MPPPCとファイバーのコンタクト2

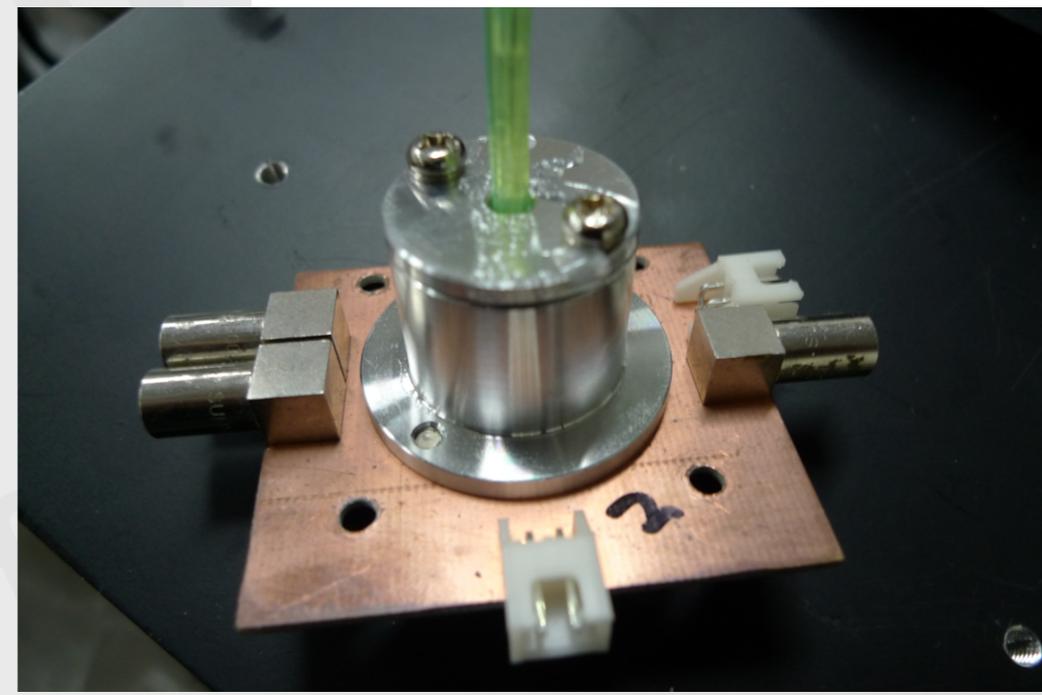


赤:誤差 $\pm 0.1$   
緑:誤差 $\pm 0.05$



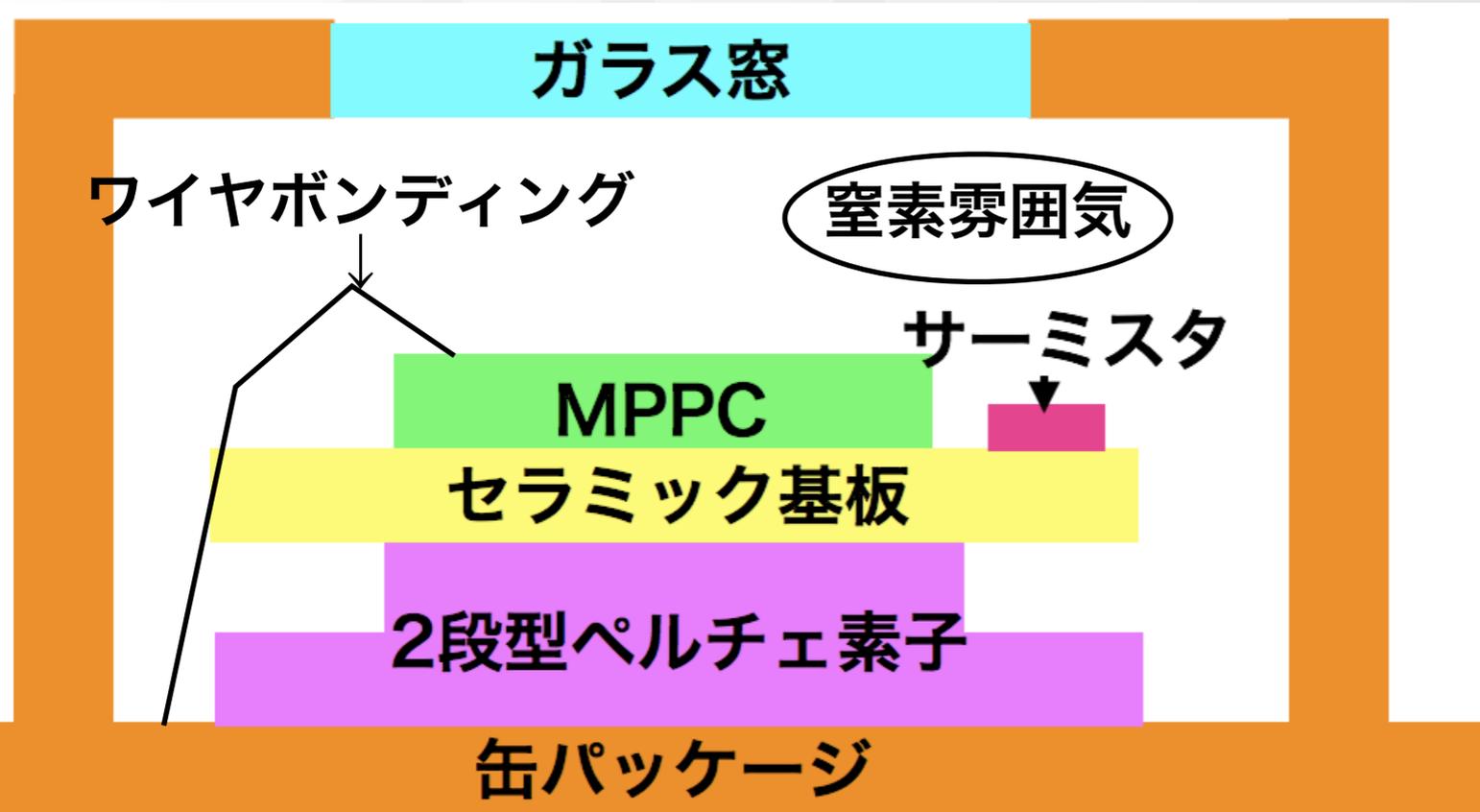
## クッキー

- ・ 嵌め合わせを利用  
→xy平面上のアライメント(ファイバーとMPPPC受光面)のズレを $< 200\mu\text{m}$ に抑える
- ・ fiber finで研磨し、クッキーから飛び出しているfiberの長さを調節  
→z方向のズレを $< 100\mu\text{m}$ に抑える

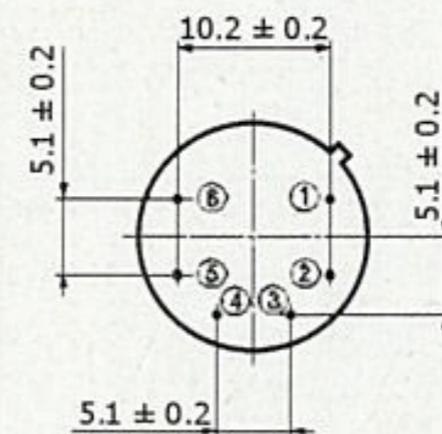
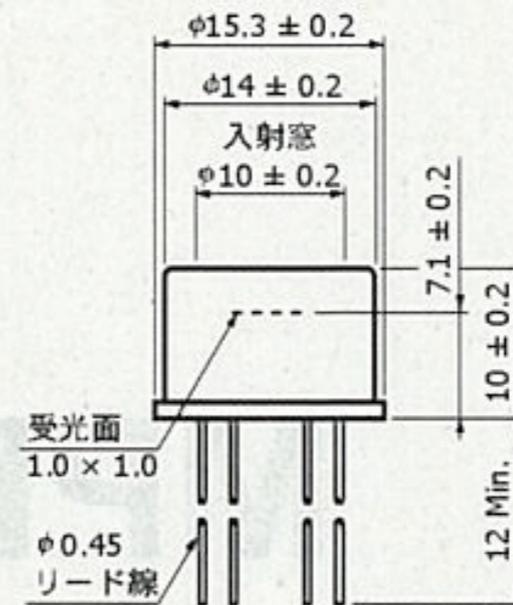


クッキーとジグを嵌め合わせて固定

# チップタイプver



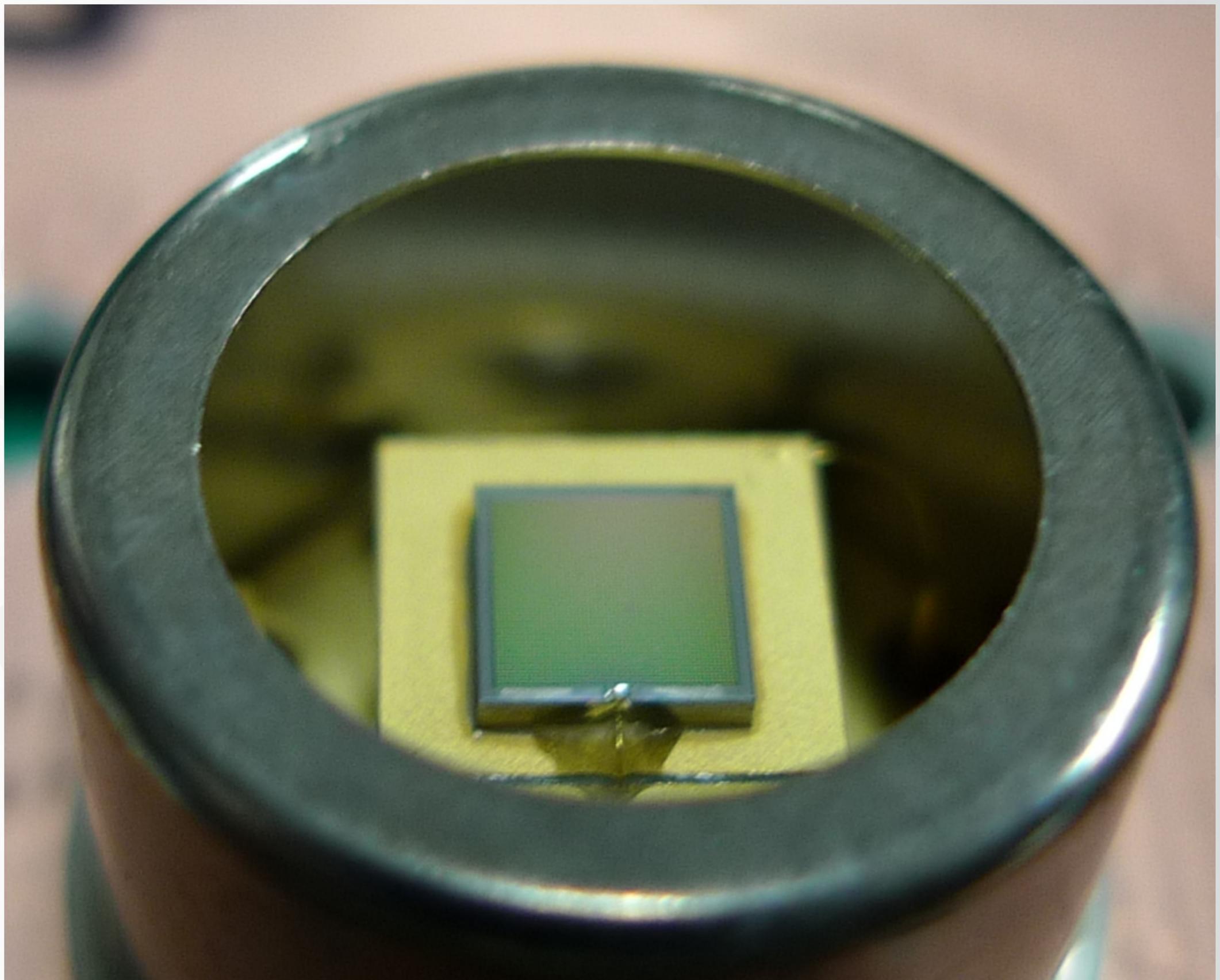
市販ver レイアウト



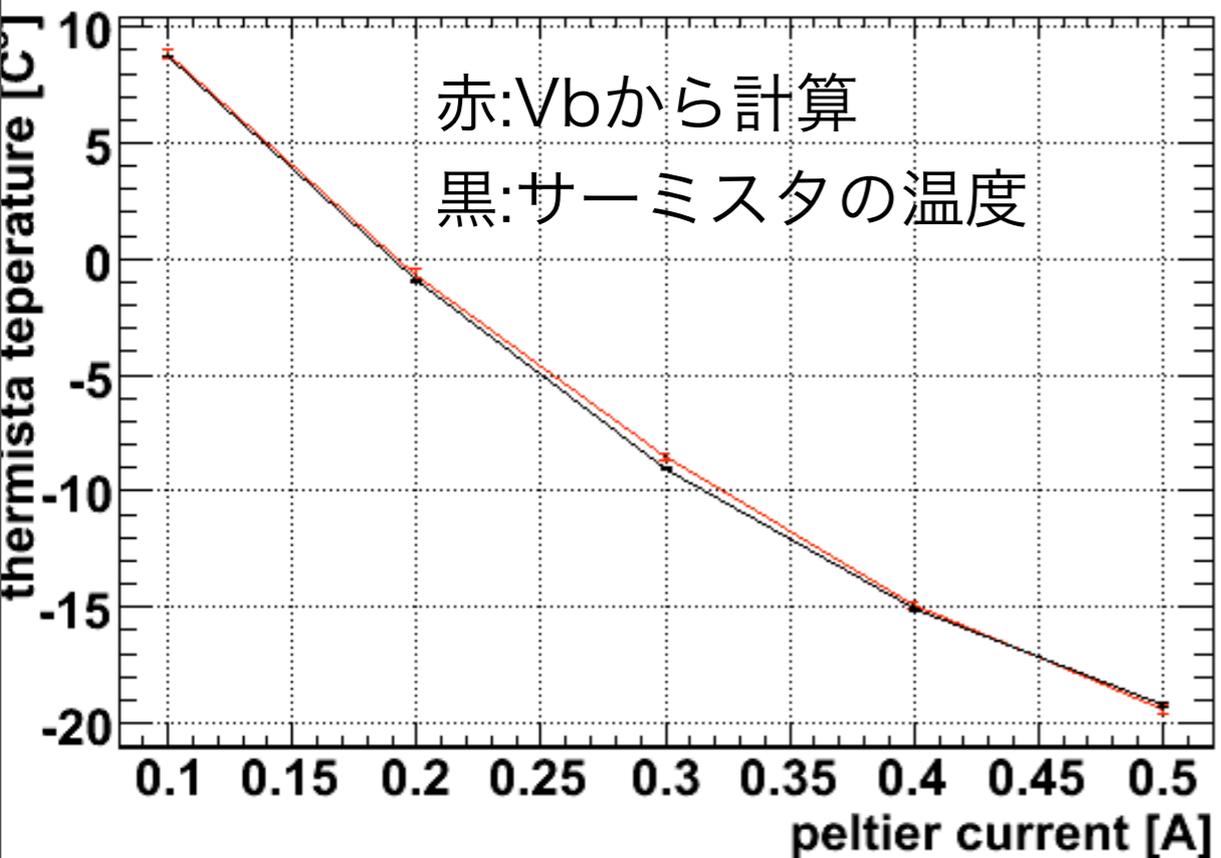
- ① 検出素子 (アノード)
- ② 検出素子 (カソード)
- ③ 電子冷却素子 (-)
- ④ 電子冷却素子 (+)
- ⑤⑥ サーミスタ

	ガラス窓	MPPC素子パッケージ	受光面サイズ	温度保証
市販1mm角ver	あり	チップタイプ	1mm	—
チップタイプver	あり	チップタイプ	3mm	—

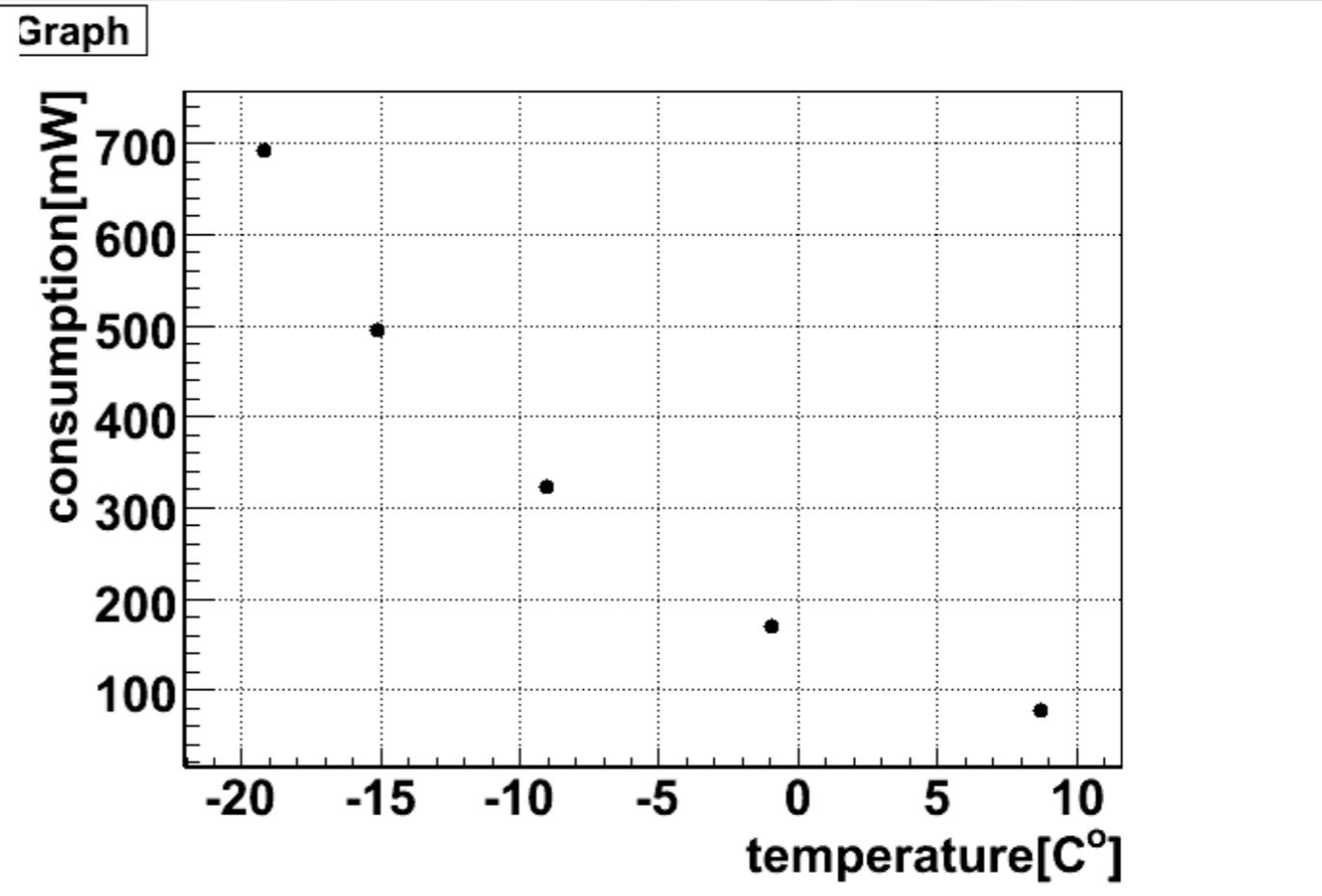
# チップタイプver 外観



# チップタイプ ver 性能評価



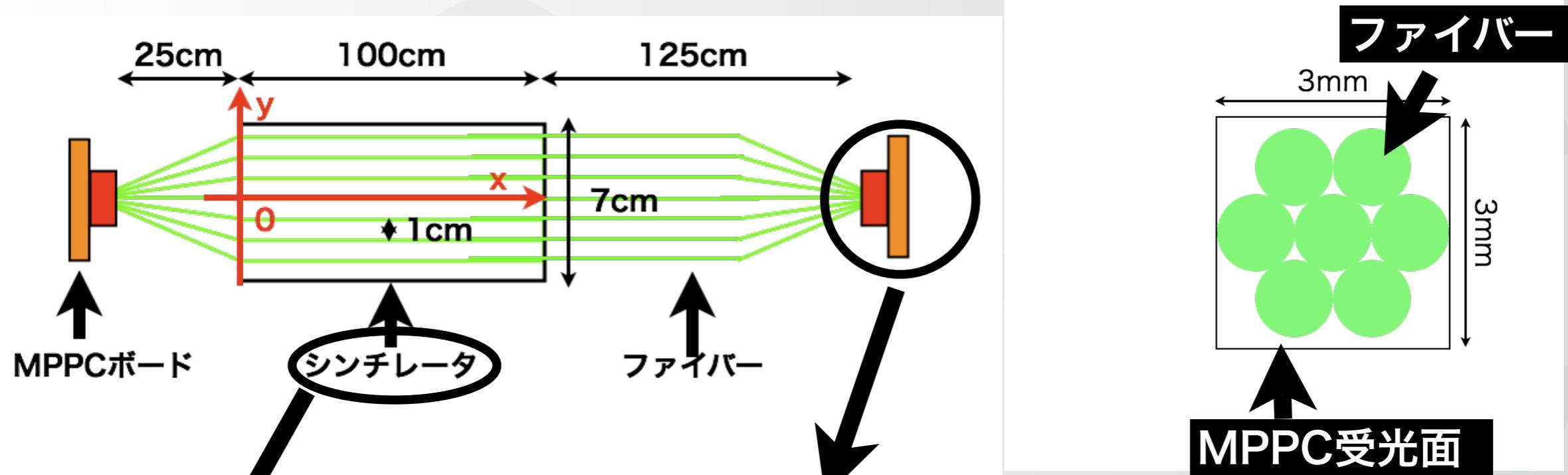
冷却能力&モニター



消費電力

# 実機プロトタイプテスト1

## プロトタイプCVの概念図



ビームテストでの光量比較  
→BC404に決定

ファイバーとMPPCの  
距離が $500\mu\text{m}$   
 $\pm 100\mu\text{m}$ に設計

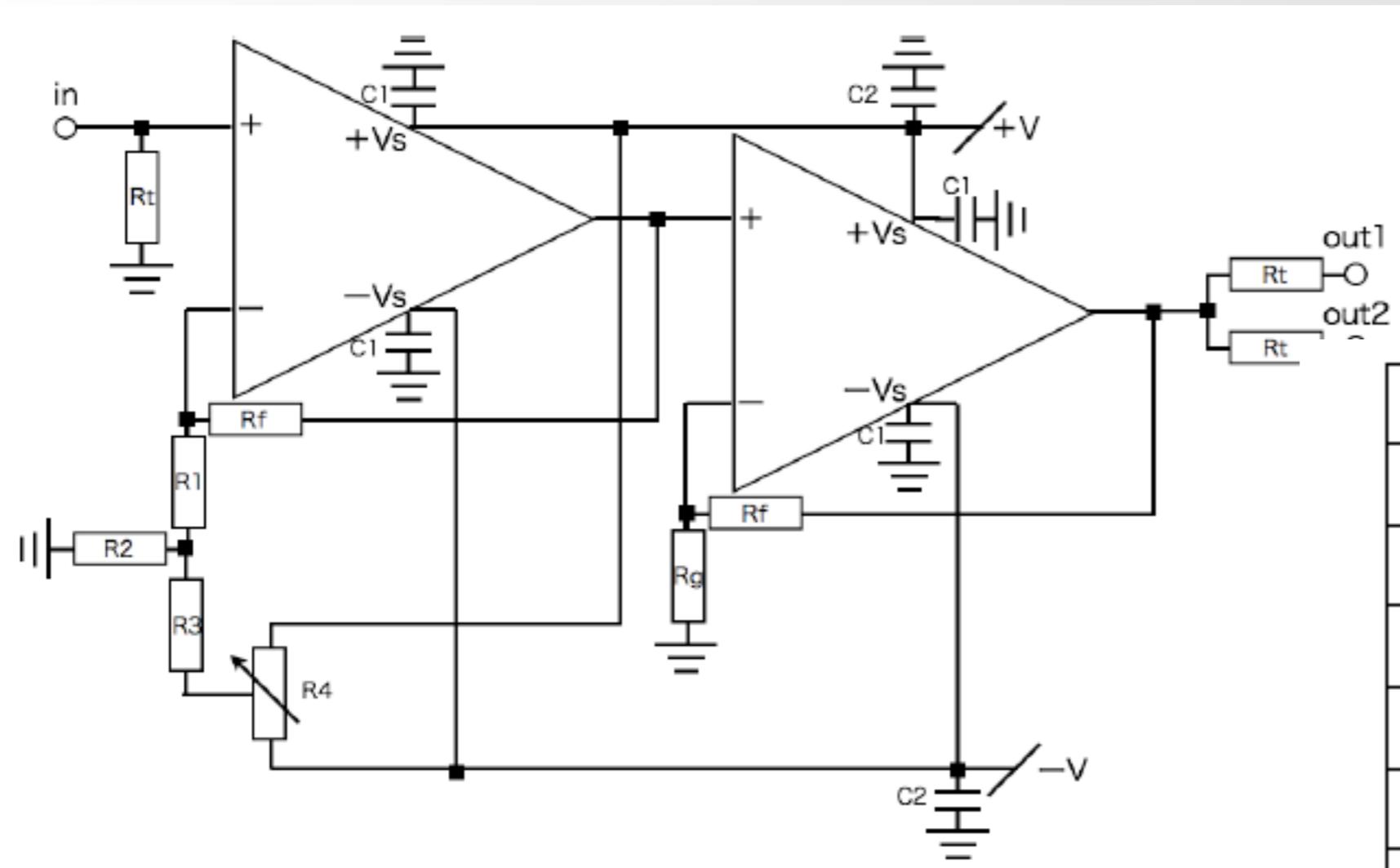
自作MPPC冷却システム  
→MPPCを $\sim 5^{\circ}\text{C}$ まで冷却  
MPPCはSMDタイプの  
受光面3mm角MPPC



ビームテストで要求性能  
見積もり  
→50倍高速アンプ自作

# 実機プロトタイプテスト2

## アンプ回路図

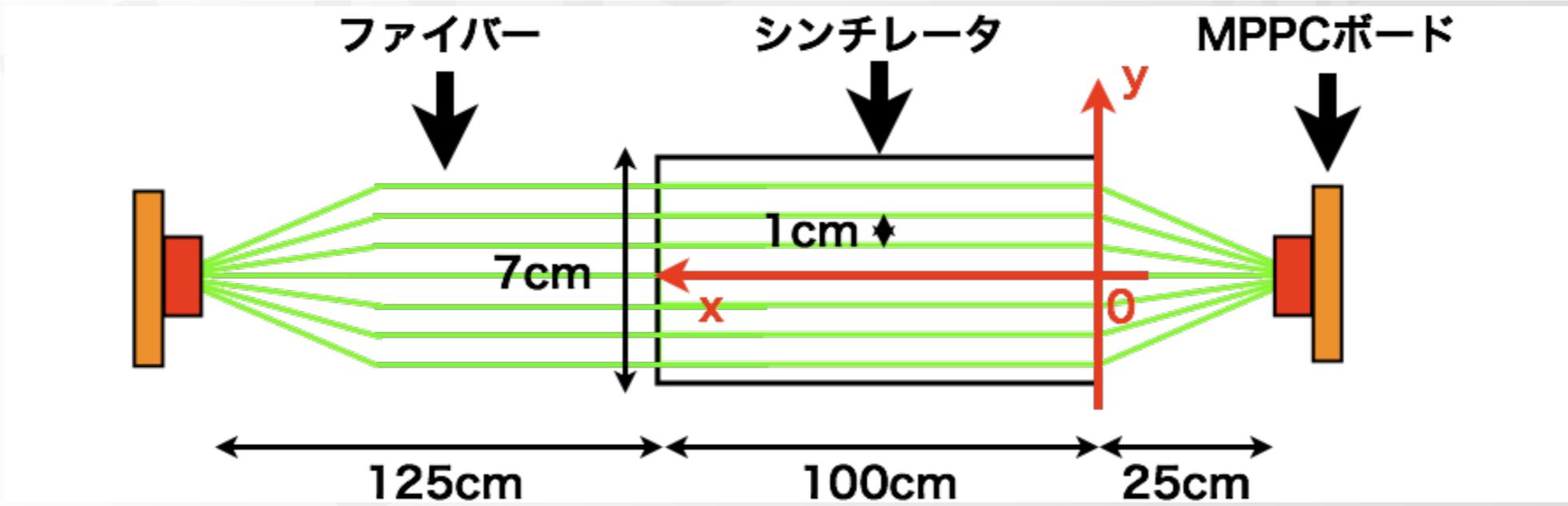
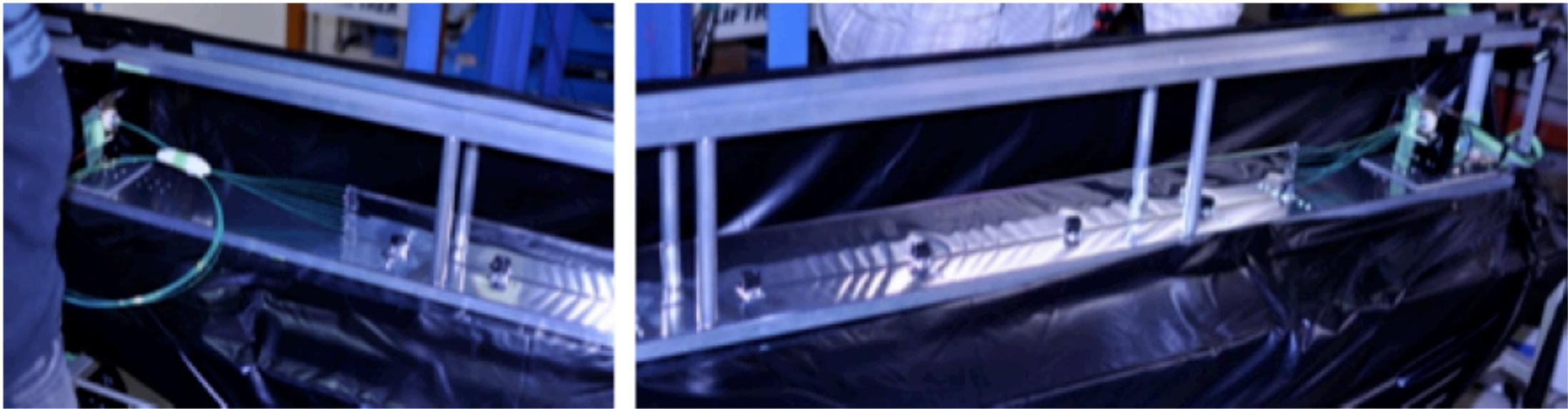


- 増倍率53
- 帯域幅150MHz
- ダイナミックレンジ(電圧)0~1V

	値または型番
opamp	AD8001
Rt	51 $\Omega$
Rf	470 $\Omega$
Rg	51 $\Omega$
R1	40 $\Omega$
R2	10 $\Omega$
R3	1k $\Omega$
R4	10k $\Omega$
C1	0.01 $\mu$ F
C2	1 $\mu$ F

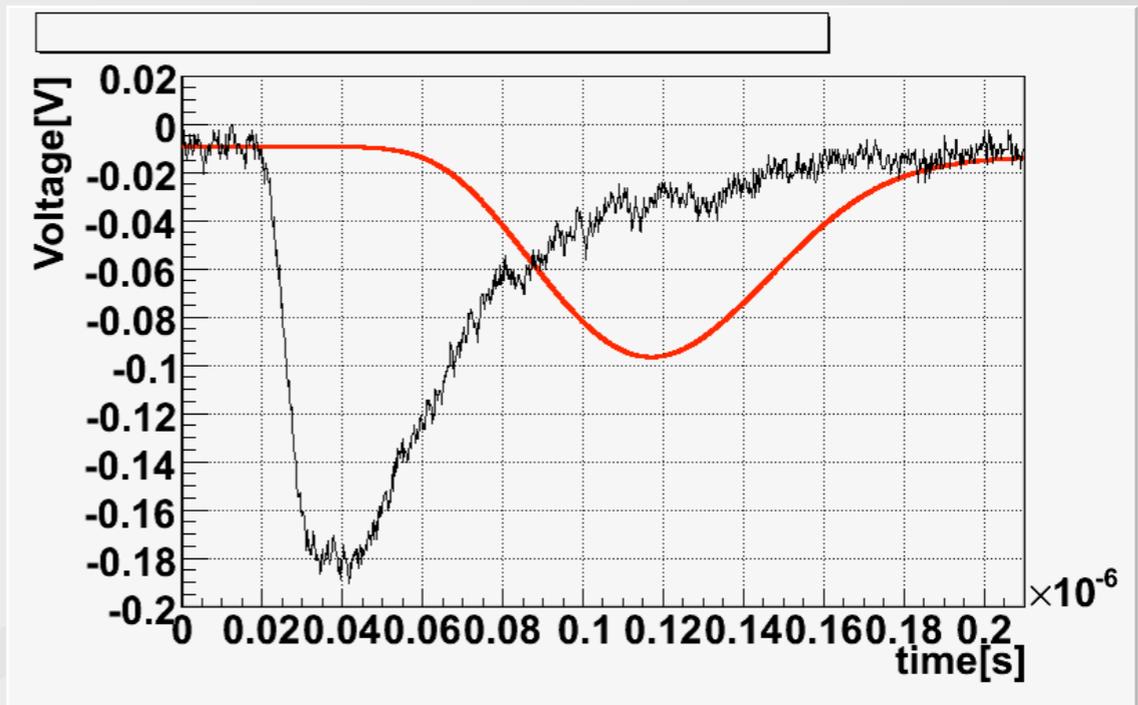
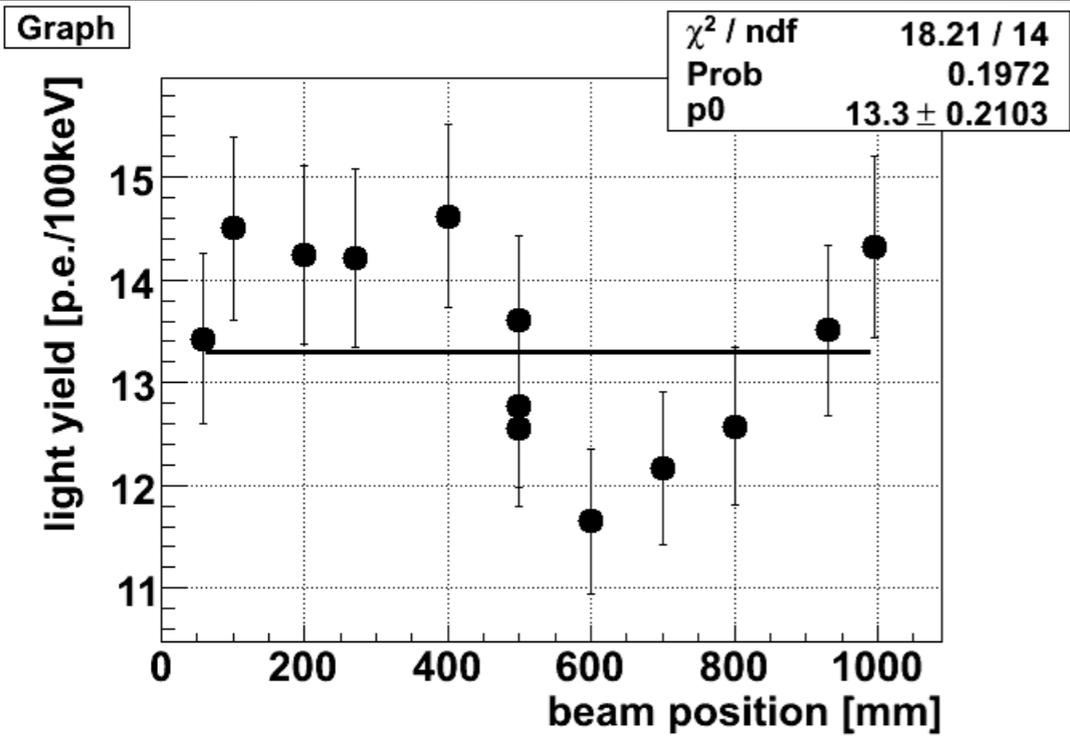
# 実機プロトタイプテスト3

- 東北大学電子光物理学研究センターの600MeV/cの陽電子ビームを使用



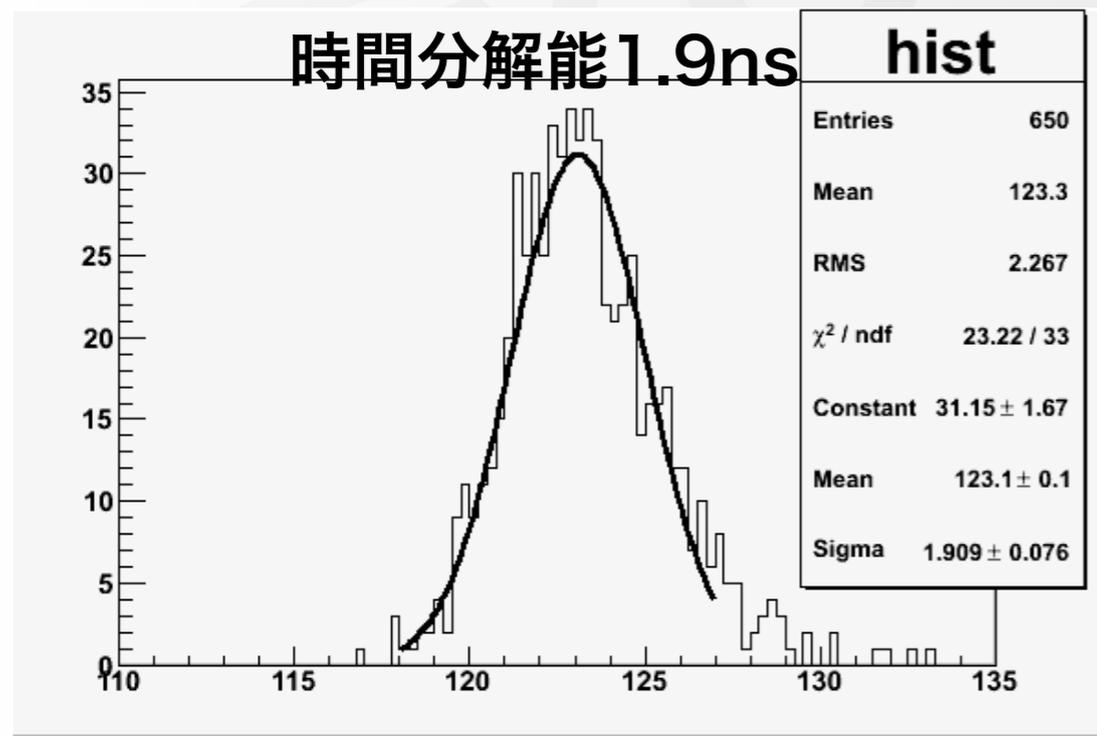
x-yにスキャン

# 実機プロトタイプテスト4



- 両読みでの合計光量
- 光量の観点で $\pi^-$ に対する不感率 $10^{-4}$ 以下を保証

黒:MPPCからの信号(シンチをファイバーで読み出し)  
赤:filterを通した波形(スパイスシミュレーション)



← スパイスシミュレーションを用い、gaussian filterを通して125MHz ADCで読み出した場合の両読みでの時間分解能をもとめた