

K⁰TO実験における荷電粒子検出器 (Charged Veto)の読み出しシステム

京大理、岡山大^A、KEK^B、山形大理^C

内藤大地、笹尾登^A、野村正^B、田島靖久^C、南條創、

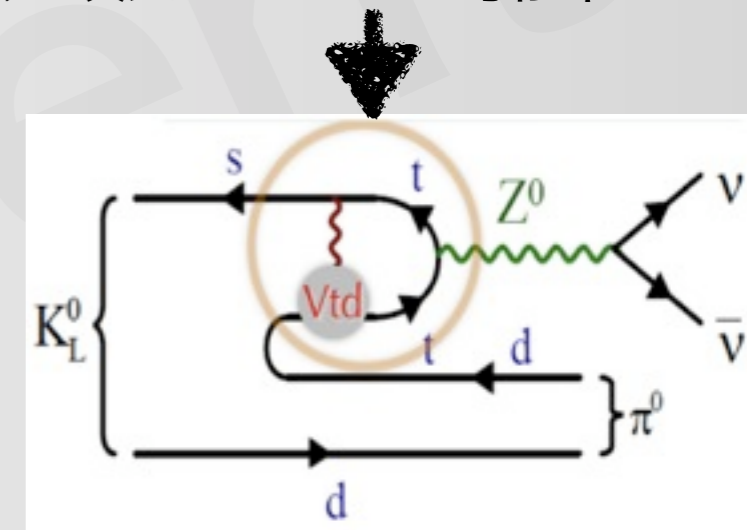
塩見公志、河崎直樹、増田孝彦、前田陽祐、

他 K⁰TO Collaboration

- Introduction
 - KOTO実験
 - Charged Veto(CV)
 - CVの読み出しシステム
- CV信号読み出し用AMPの開発
 - AMPへの要請
 - AMPのデザイン
 - AMPの性能評価テスト
- summary

- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊探索実験
- 実験目的
 - 小林益川理論(CKM)の精密検証
 - $Br(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \propto \eta^2$ (η はCKMの複素位相)
 - 新物理の探索
- $Br \doteq 2.4 \times 10^{-11}$, 反応に関わる粒子が中性粒子
 - 実験的困難から未観測
- J-PARCで2012年秋物理ラン開始
 - full detectorのエンジニアリングラン
 - 先行実験(E391a実験)での上限値(2.6×10^{-8})を更新

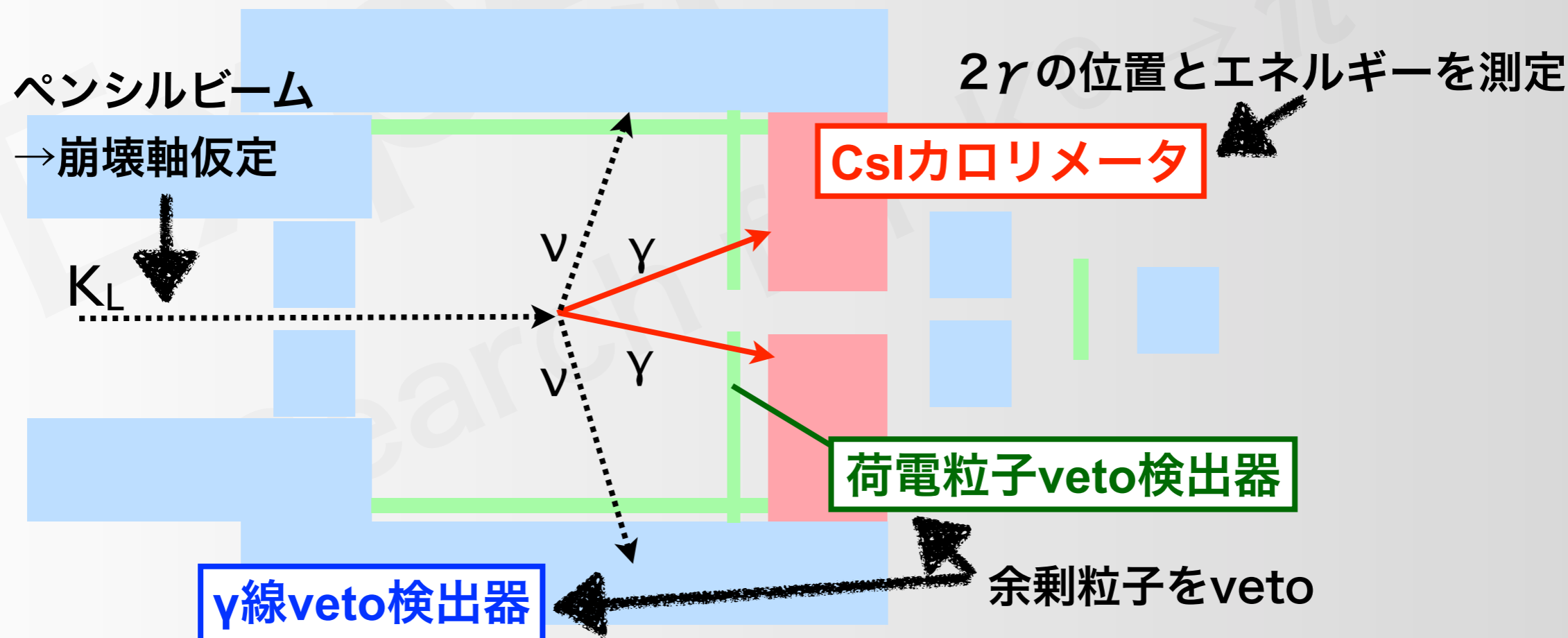
未知の粒子(ex.SUSY)の寄与により
分岐比がズれる可能性

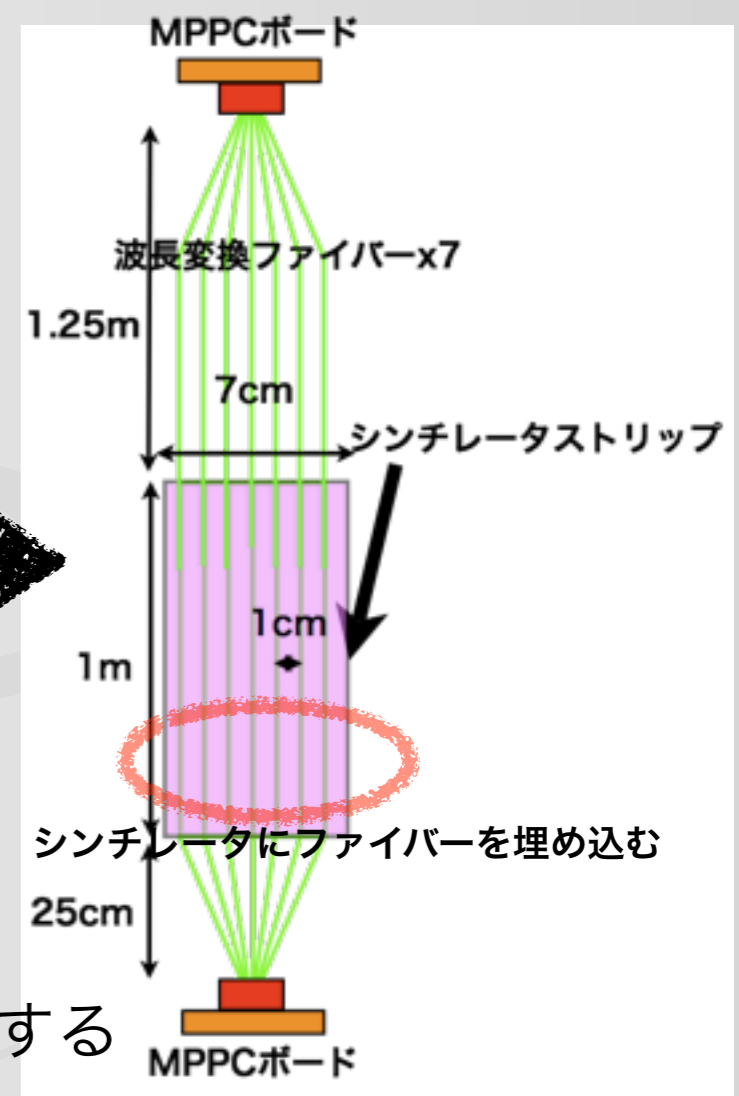
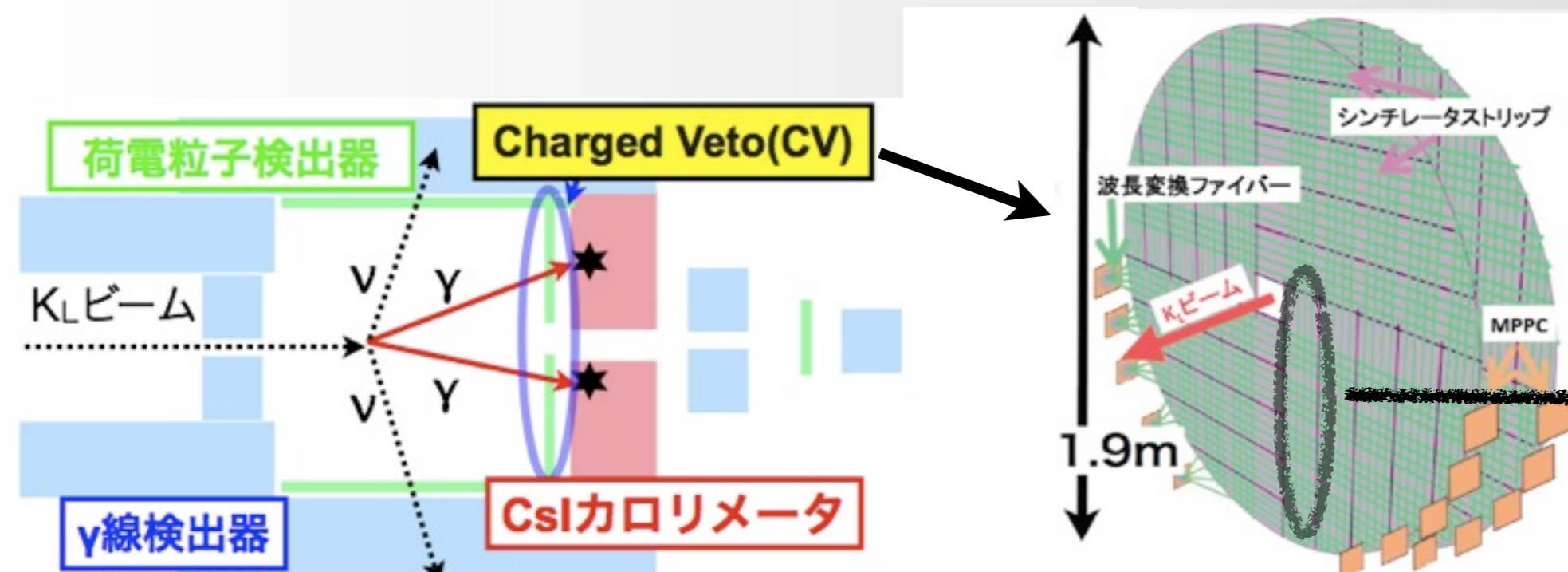


崩壊のダイアグラム

- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ のうち π^0 は生成した瞬間、 2γ に崩壊
→終状態は 2γ 以外何も無い状態(ν は観測不可)
- 2γ の位置とエネルギーをCslカロリメータで測定
→ π^0 の崩壊位置と横方向運動量を再構成してsignal判定
- 崩壊領域を全立体角Vetoで覆う
→ π^0 以外の粒子が存在しないことを保証

→ これらにより $\pi^0 \nu \bar{\nu}$ を同定



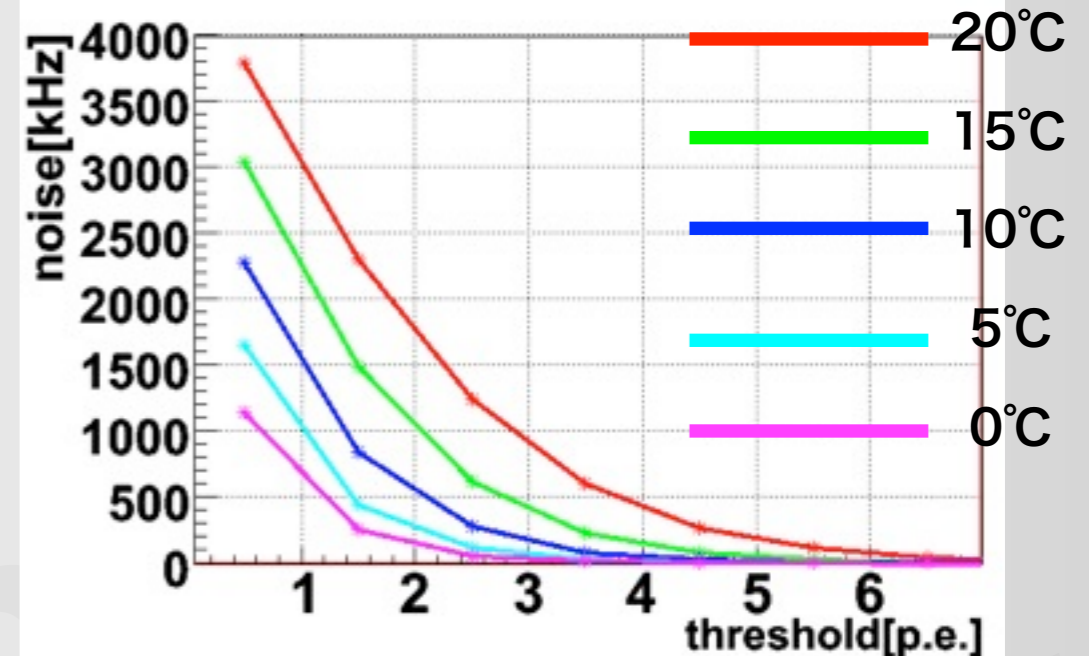


- CsIカロリメータの直近と25cm上流に2層置かれる
- 役割：荷電粒子をvetoし、荷電粒子を含むKL崩壊由来のBGを排除する
 - とりわけCVでは π^- を99.99%でVetoする事が重要
 - π^- が荷電交換反応を起こす前にシンチ表層で落とす低エネルギーの検出が必要
 - **高い光量(3p.e./100keV)が必要**

デザイン：

- 厚さ3mm、幅7cmのプラスチックシンチレータ約100本で構成
- 全域で高い光量確保
 - **シンチレータ+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)**
- チャンネル数184

KOTO ver. MPPC scheme



ダークカウントノイズの温度依存性

MPPC

サーミスタ

- MPPCはダークカウントノイズ(熱電子由来)が大きい(1 p.e.相当、20°Cで~4MHz)
 - 荷電粒子検出と誤認する確率大
 - パイルアップの確率大
 - KOTOで使うには冷却(5°Cに)が必要
- MPPCのゲインとQEは温度に対して敏感(温度が1°C変化すると5%変化する)
 - MPPC温度のコントロールが必要

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

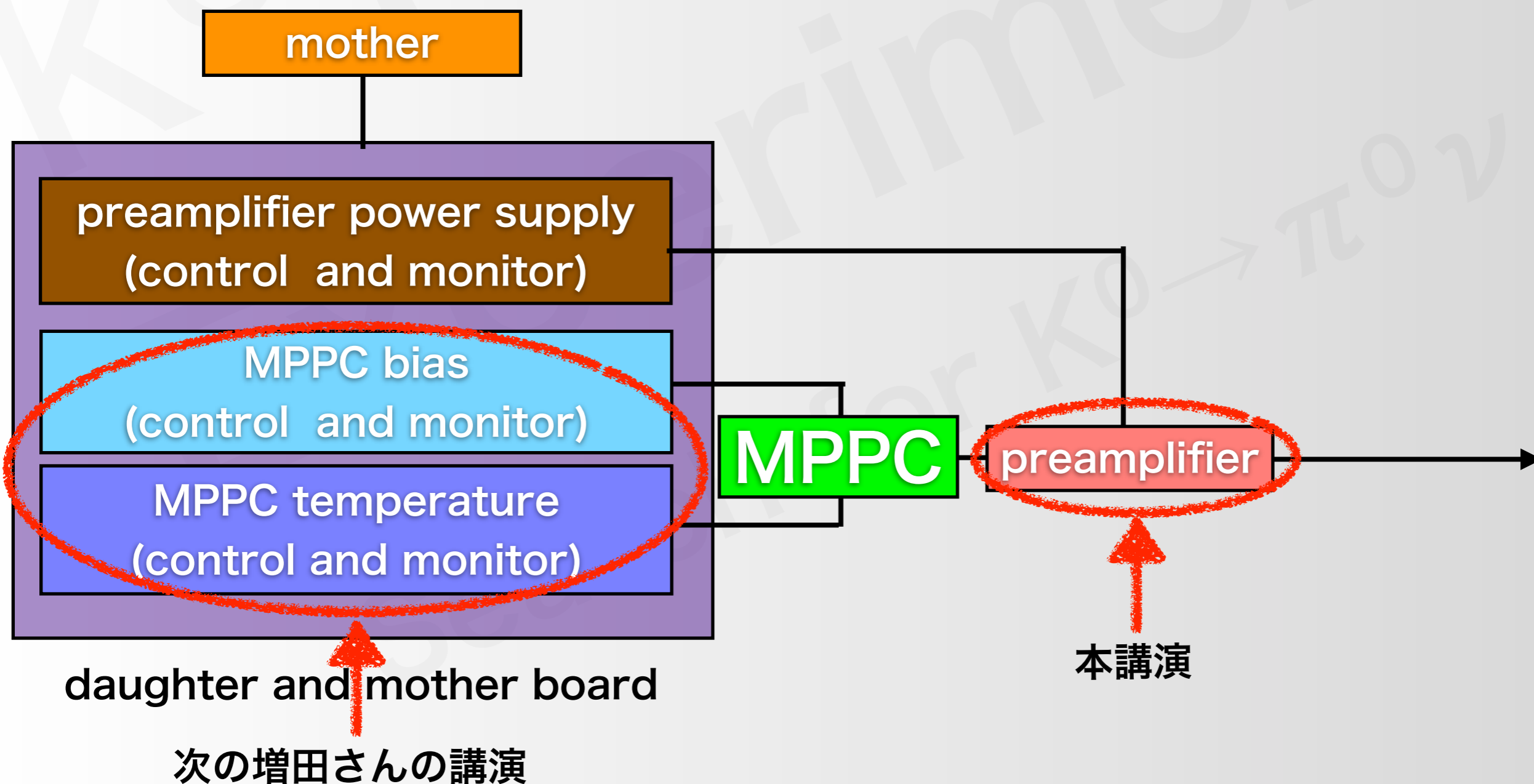
電子冷却型MPPCを浜松ホトニクスと共同開発

- 詳細は第66回年次大会(28aGF-9)で発表。現在は210個の大量生産中。



CVの読み出しに必要なもの

- MPPCは増倍率が小さい($\sim 10^5$) \rightarrow 読み出しにpre-amplifier
- 電子冷却素子(ペルチェ素子)での冷却をコントロールするシステム
- MPPC、pre-amplifierのvoltage supply control and monitor



CV用preamplifierの開発

～概要～

- ・ CV読み出し用に50倍増幅、高速、低ノイズ、低消費電力のAMPの開発を行った
 - ・ 要求される性能
 - ・ 実際のデザイン
 - ・ 性能評価

増倍率	50
band width	100MHz以上
readout	differential+RJ45
消費電力	200mW以下

増倍率：MPPCの1p.e.を観測できる十分な倍率を稼ぐ

- ・本実験でMPPCのゲインをモニター
- ・モニターにより本実験での安定動作を保証

増倍率	50
band width	100MHz以上
readout	differential+RJ45
消費電力	200mW以下

band width : MPPC信号の立ち上がりを鈍らせずに伝送するため

- ・ 時間分解能が悪いと信号のveto時間が長くなる
 - 信号lossの増加(CVでは3ns以下の時間分解能が必要)
- ・ 立ち上がりを鈍らせずに伝送できれば0.8nsの時間分解能が得られる
(詳細は第65回年次大会(21aBE13)で発表。)



増倍率	50
band width	100MHz以上
readout	differential+RJ45
消費電力	200mW以下

- readout :
- ・ 信号伝送中でのノイズの拾い込みを減らす
 - differential出力、LANケーブルで伝送
 - AMP outはdifferential+RJ45コネクタ
 - ・ 2チャンネルを1つのLANケーブルで伝送(読み出しケーブルの削減)
 - 2ch のamplifier が同じ基板に載る



増倍率	50
band width	100MHz以上
readout	differential+RJ45
消費電力	200mW以下

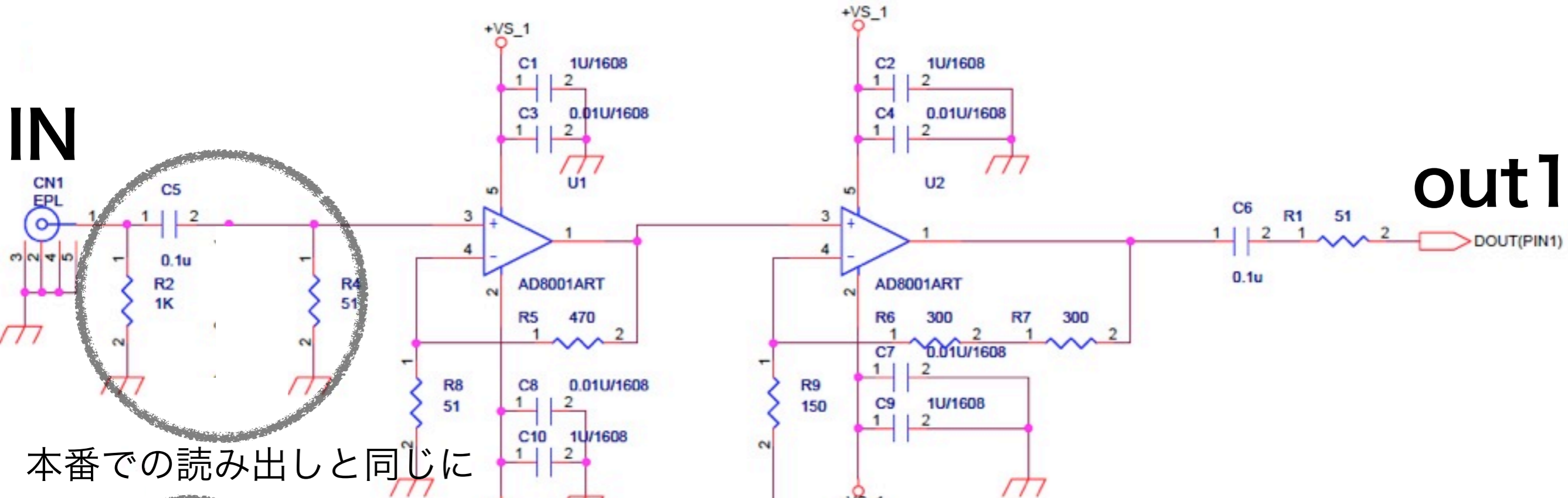
消費電力：CVは真空中に置かれるのでAMPの発熱が問題になるため

cf：全体で200mW x 200 = 40W程度になる



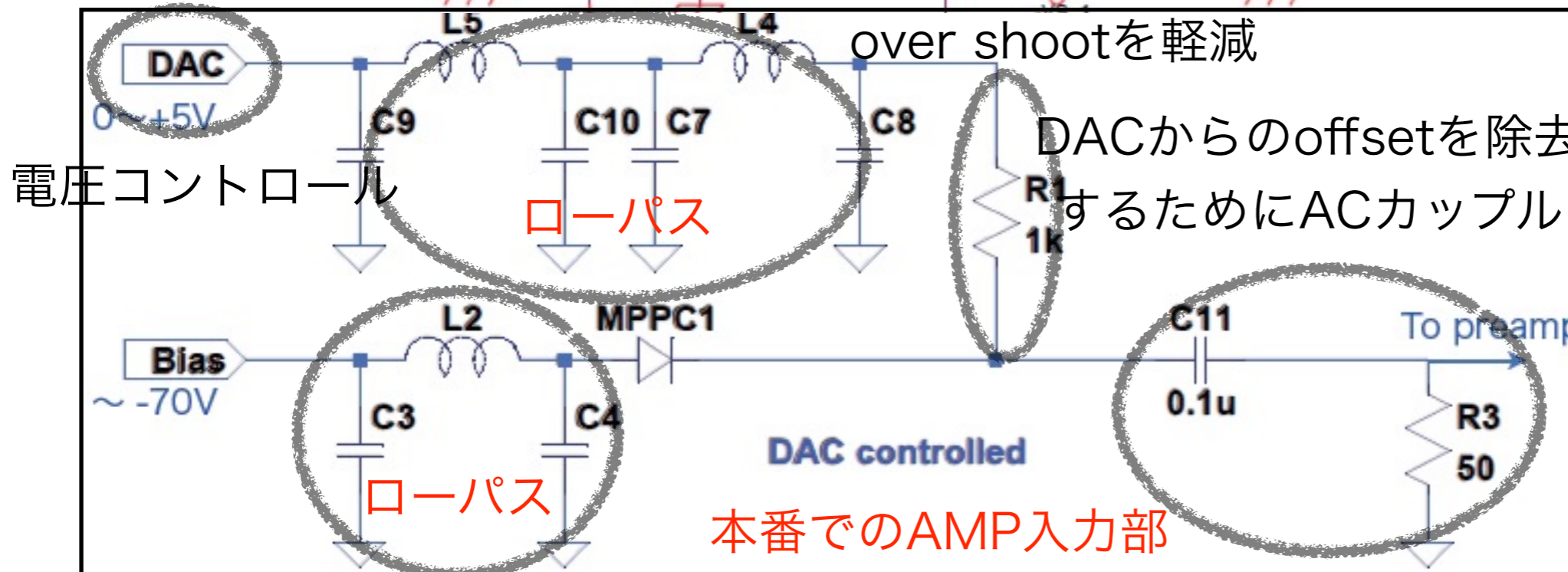
プロトタイプの回路図

IN



out1

本番での読み出しと同じに



over shootを軽減

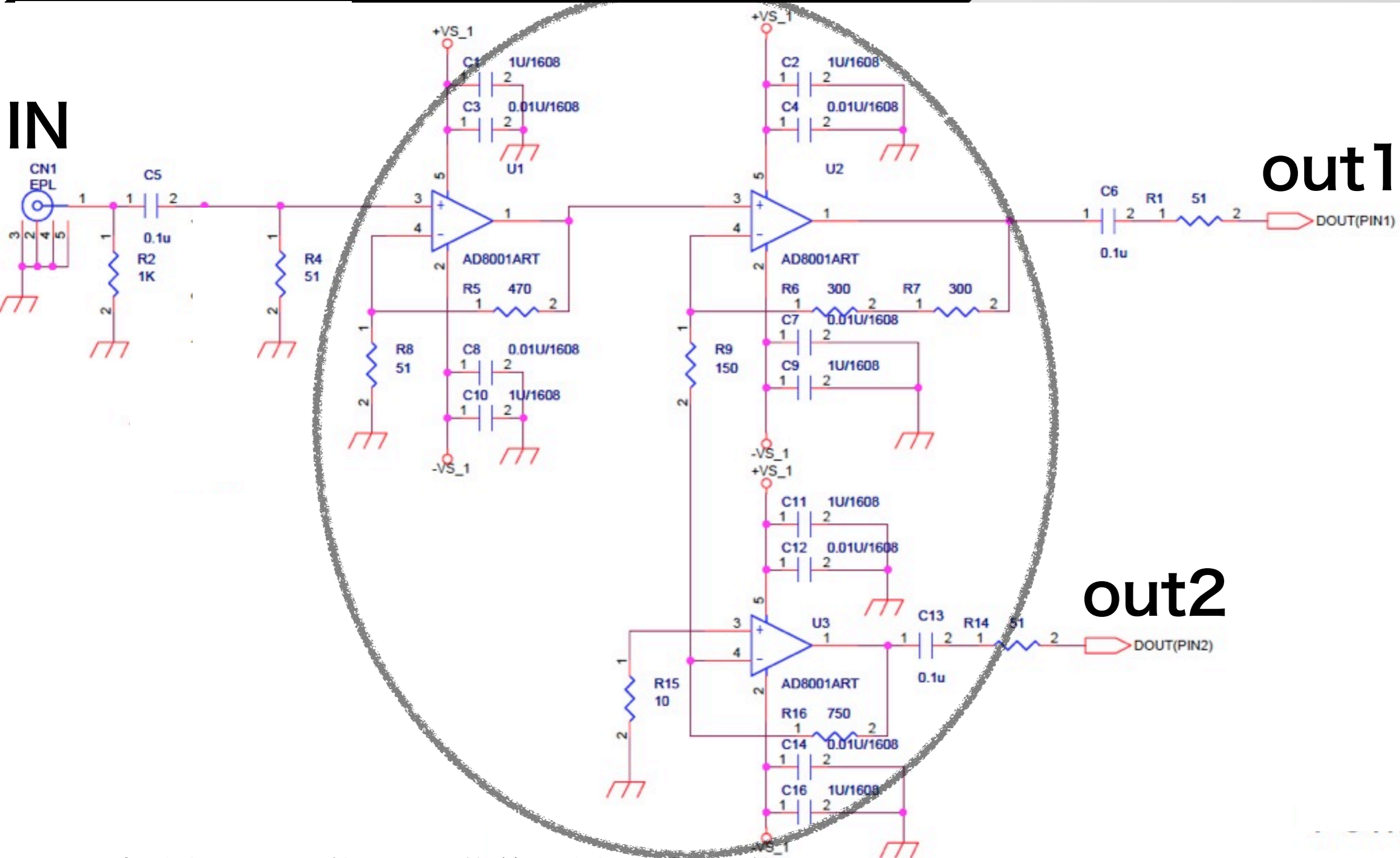
DACからのoffsetを除去するためにACカップル

ut2

本番でのAMP入力部

DOUT(PIN2)

IN



out1

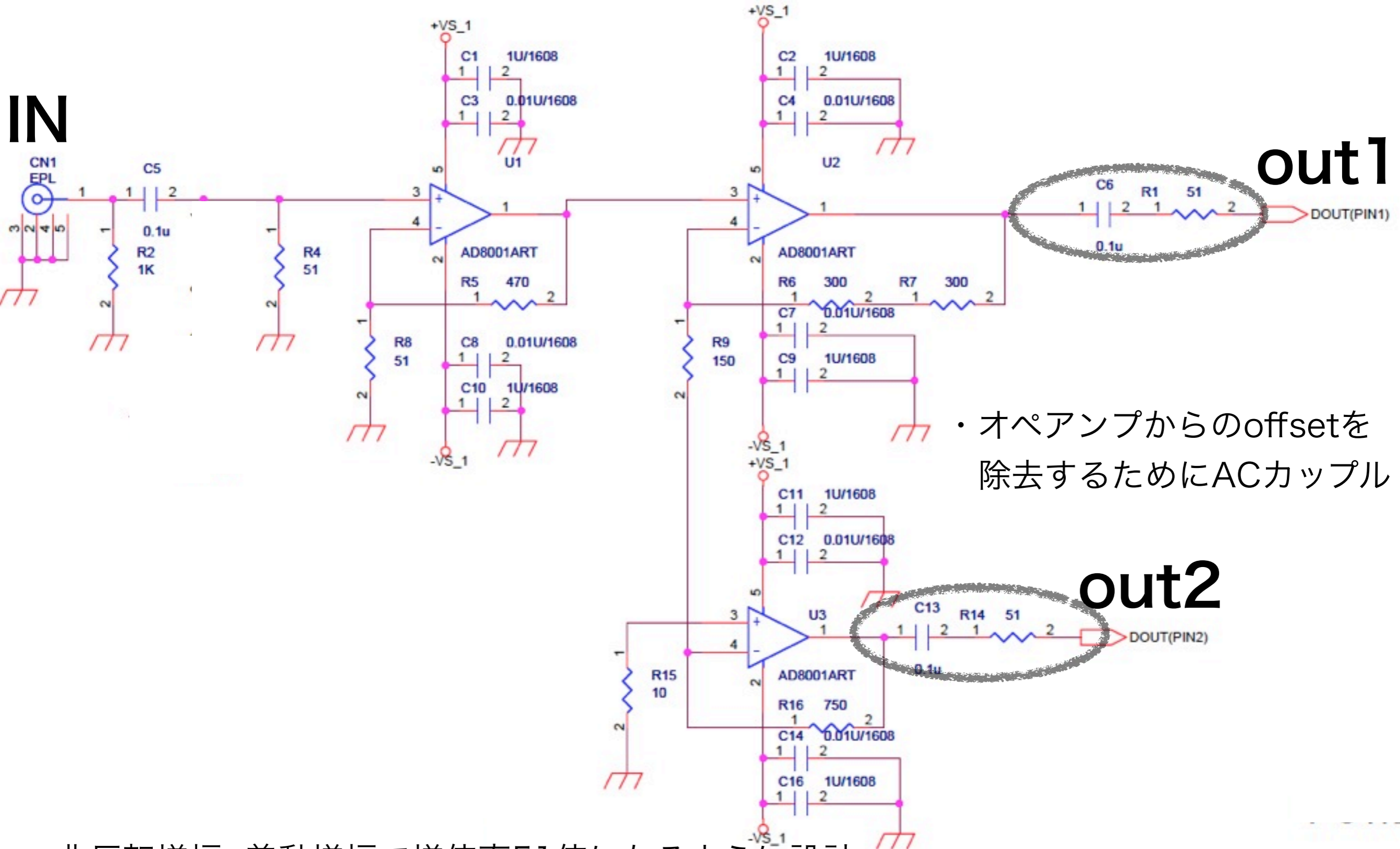
out2

- 非反転増幅で10.2倍、その後差動増幅で各2.5倍
- 低ノイズ、低消費電力、高速応答を実現するため、オペアンプにAD8001を使用



プロトタイプの回路図

IN



out1

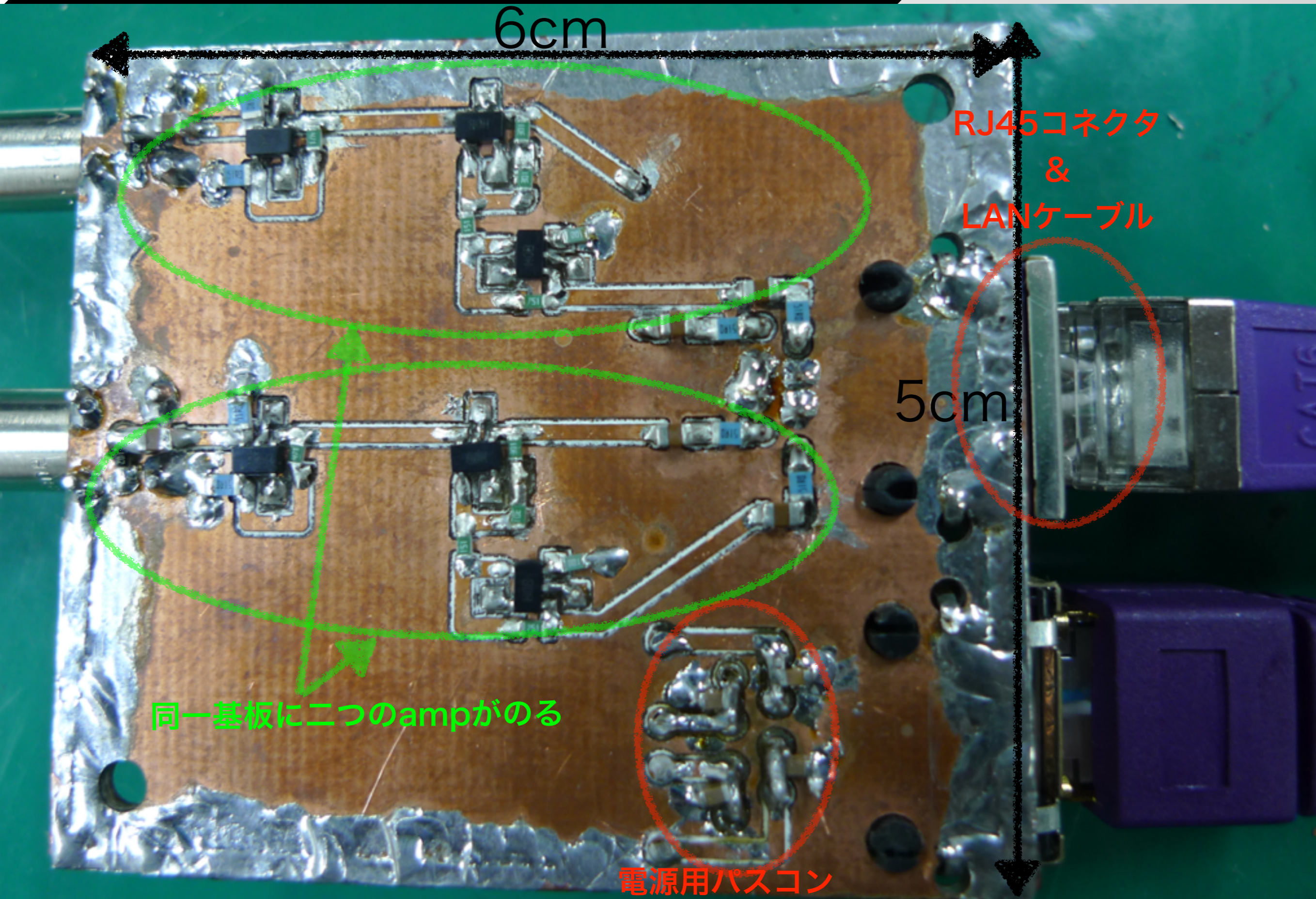
・ オペアンプからのoffsetを除去するためにACカップル

out2

- ・ 非反転増幅+差動増幅で増倍率51倍になるように設計
- ・ AD8001を使用する事により設計上消費電力をmax165mWに抑えた
- ・ このAMPが2つ、同一基板の上に載る



プロトタイプの写真



6cm

RJ45コネクタ
&
LANケーブル

5cm

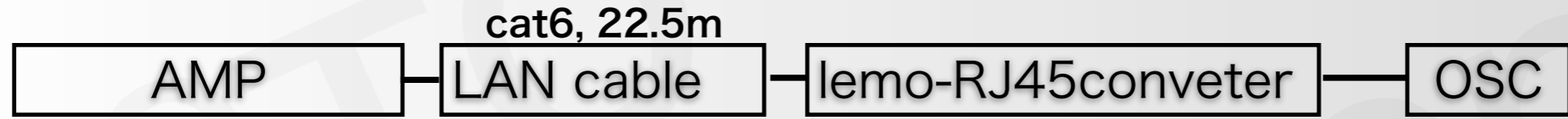
同一基板に二つのampがのる

電源用パスコン

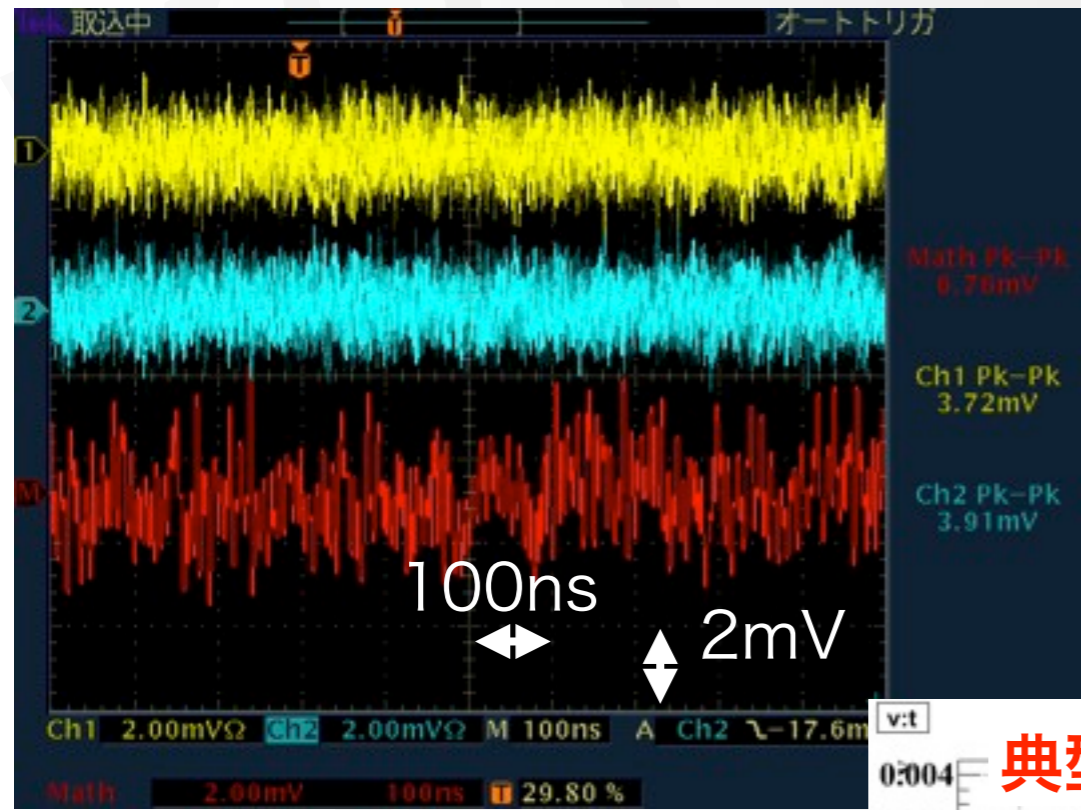
- ノイズ、消費電力の評価
- ダイナミックレンジの評価
- bandwidthの評価

pre-ampの性能評価(ノイズ、消費電力)

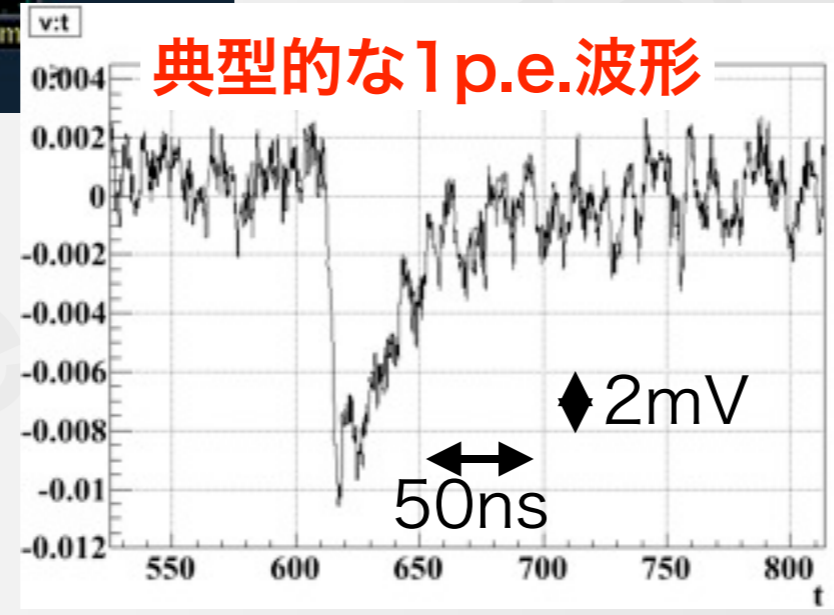
- 入力を51Ωターミネーション
- AMPに±5Vを印可、この時回路に流れる電流と出力波形を測定
- 出力からのケーブル長を本実験での長さ(22.5m)にして測定



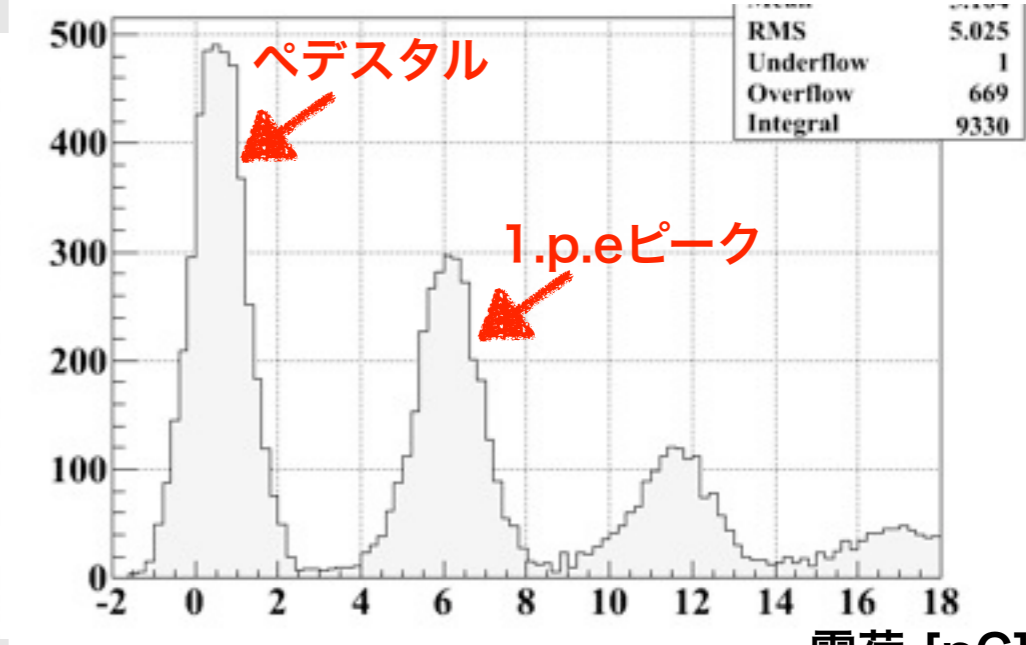
- この時回路に流れる電流は31mAだった
→ $10V \times 31mA = 310mW$
→ 1チャンネル当り155mWと十分小さい
- ノイズレベルはpk-pkで~7mV
→ ノイズは小さく、1p.e.の測定が十分可能



黄色：差動出力の非反転側
水色：差動出力の反転側
赤色：黄色－水色

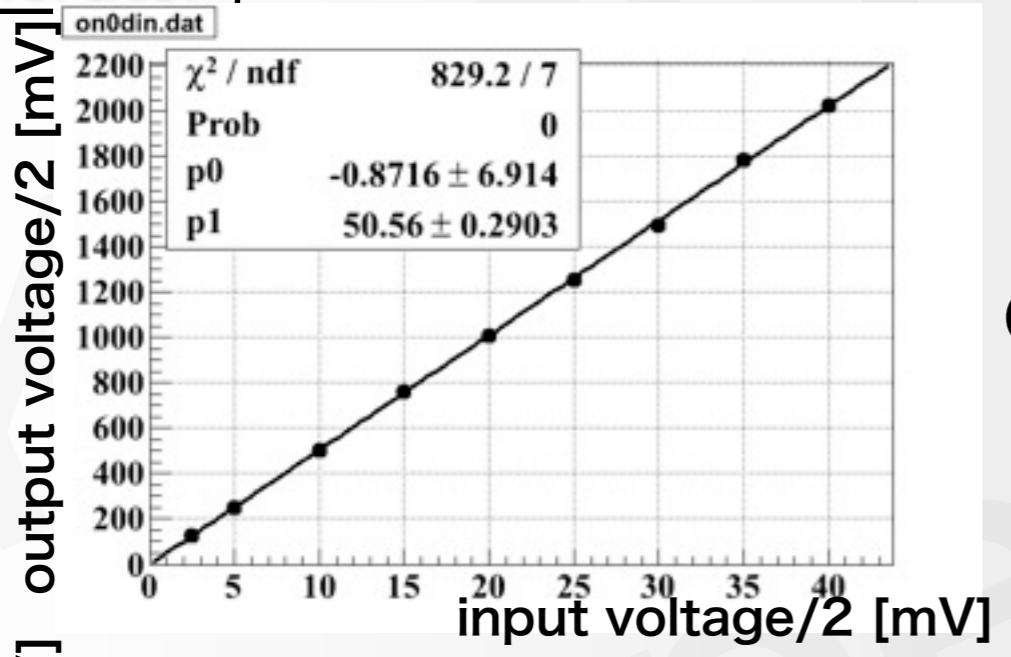
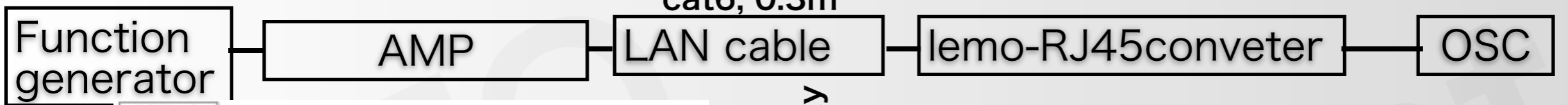


取得した波形を積分(200ns)して得た電荷分布

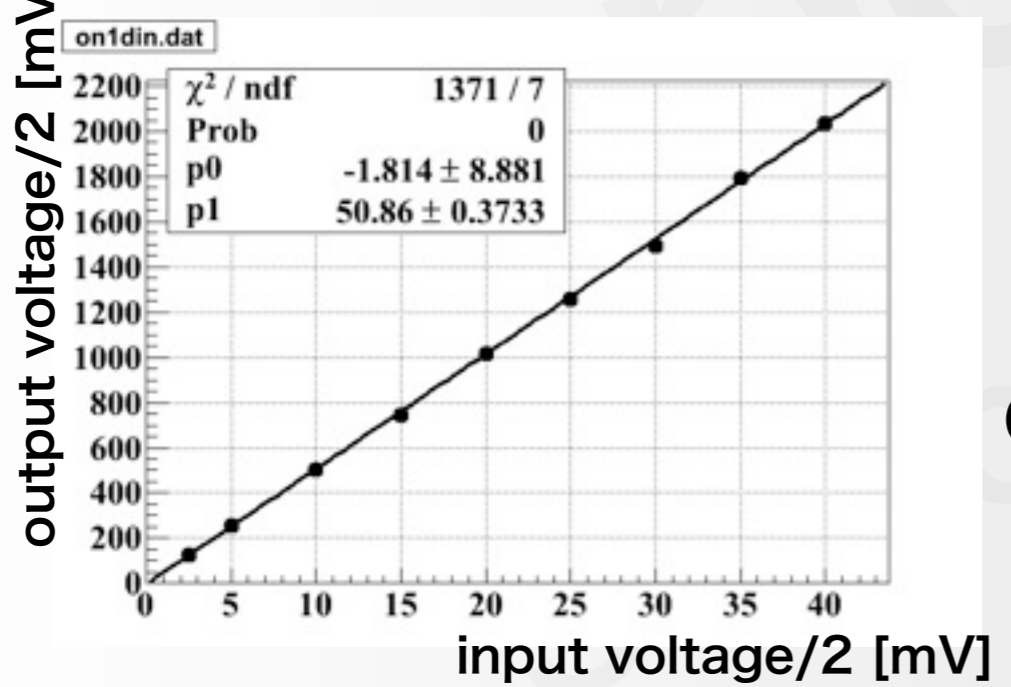
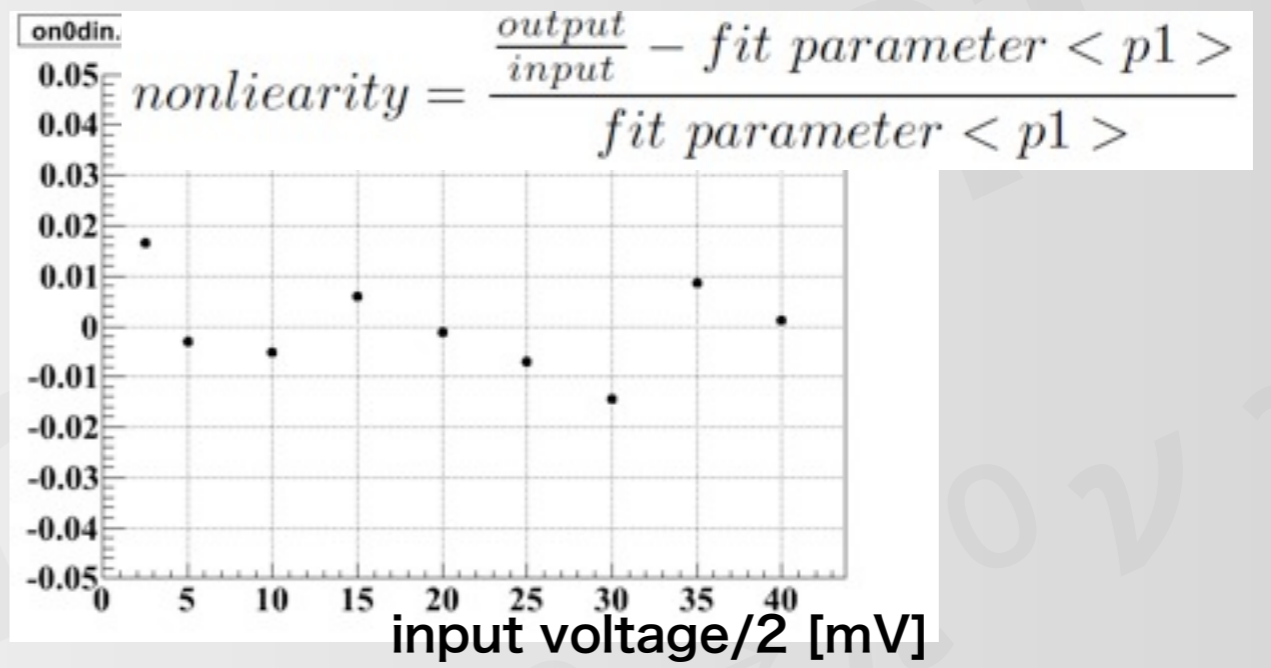


pre-ampの性能評価(ダイナミックレンジ)

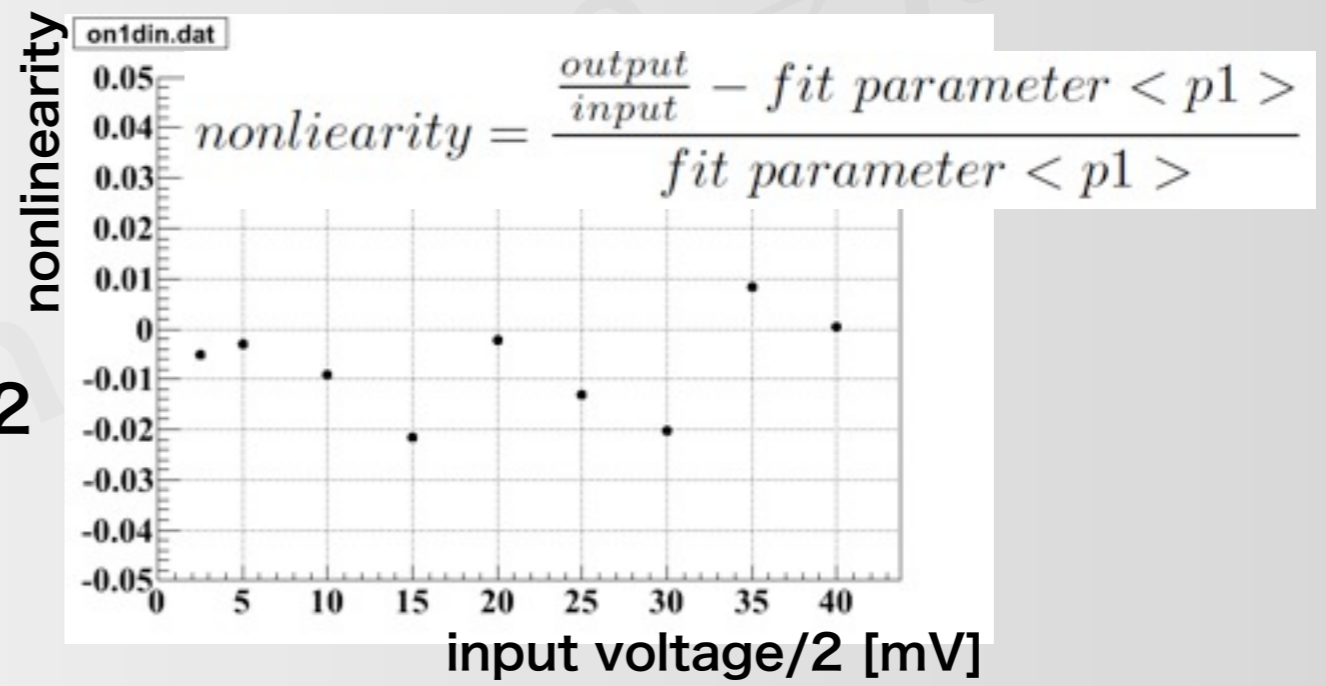
- 10MHzのsin波を入力し、出力波をオシロスコープ(OSC)で観測
- differential outputのsumで評価



CH1 nonlinearity

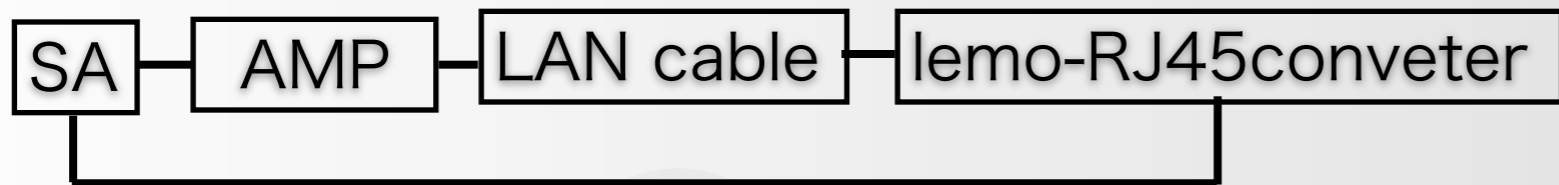


CH2

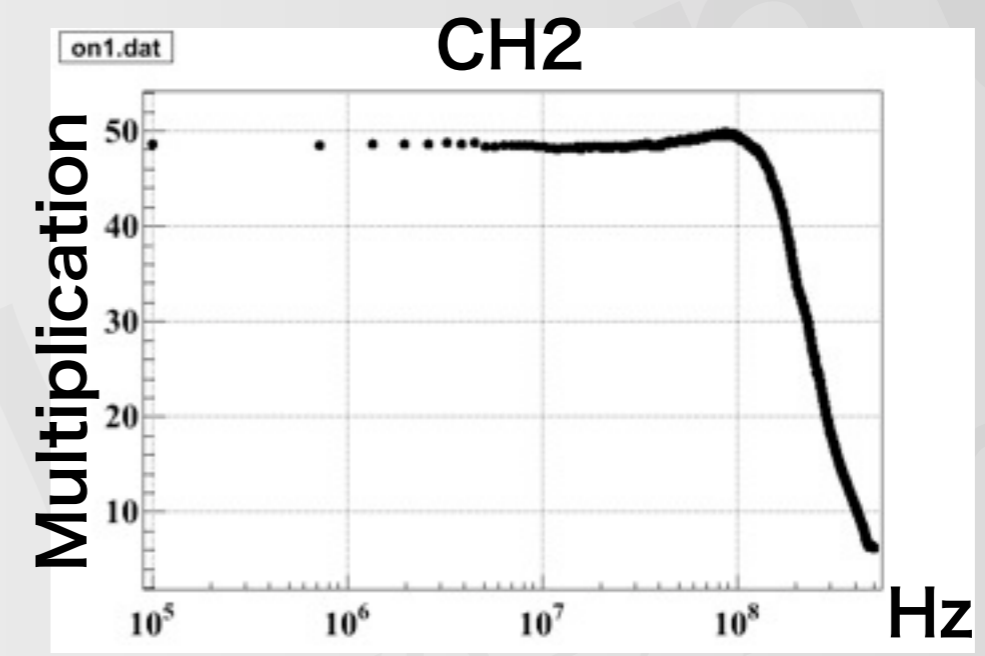
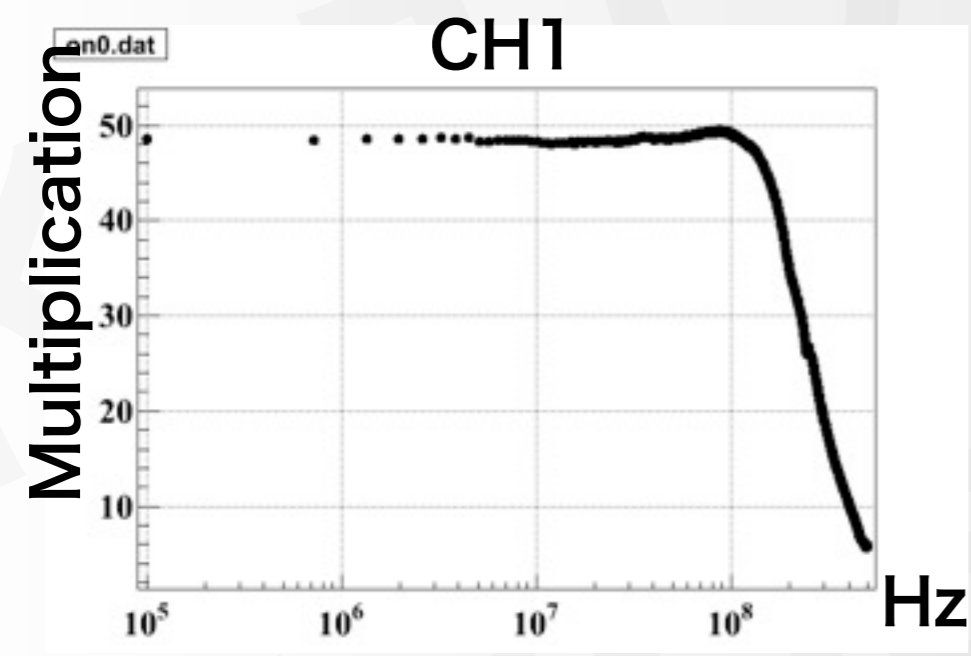


- 増倍率は~50.5倍、 dynamic rangeは2V以上、 nonlinearity~±2%
- CVでの要求(増倍率50倍)を満たし8MIPs相当の波形まで測定可能(cf 1MIPは250mV)

pre-ampの性能評価(Band width)



• RF signal を入力し、Spectrum Analyzer(SA)で周波数解析



- amplifier の Band widthは $\sim 200\text{MHz}$ (until -3dB)
→CVでの要求(100MHz以上を十分満たす)

	requirement	result
増倍率	50	~50.5
band width	100MHz 以上	~200MHz
消費電力	200mW以下	~155mW

- ・ 開発した amplifierはCVでの要求を十分満たした

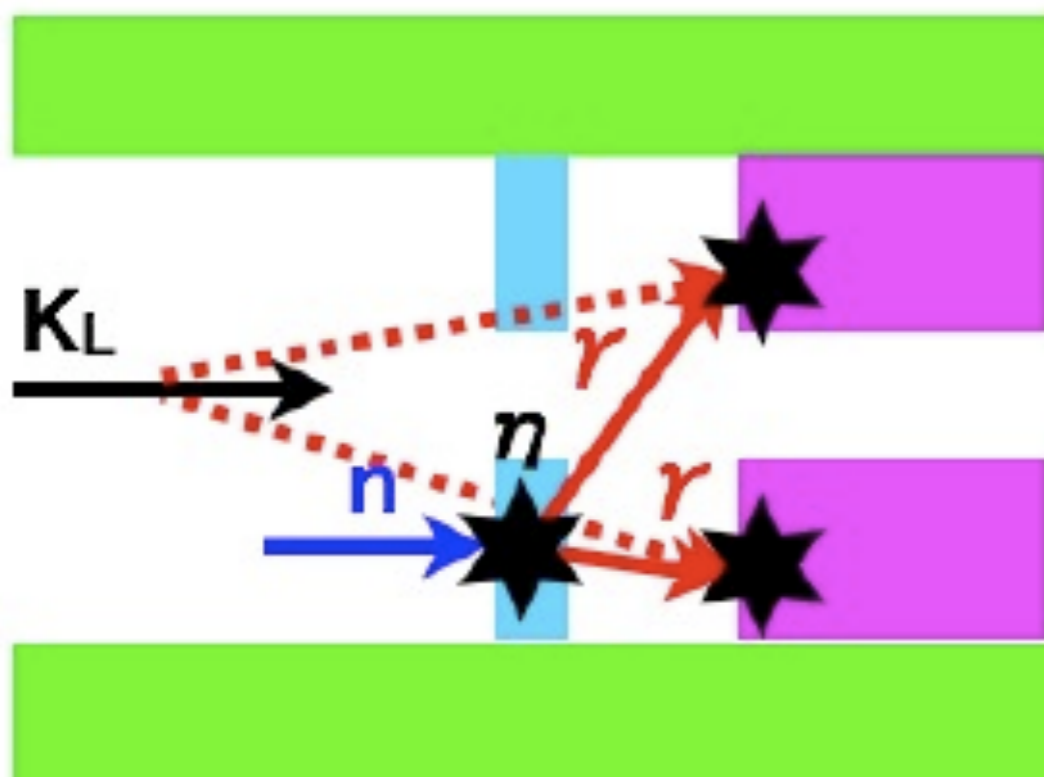


- CV用pre-amplifierの開発を行った。
 - • 非反転+差動増幅をデザイン
 - 低消費電力、高速応答を実現するデザイン
 - 性能評価を行い、要求を満たすことを確認した
- 今後
 - 最終版のampの性能評価
 - CVの製作準備を進める
 - CV control システムのfirmware, software の開発を行う

CVが2層の理由1

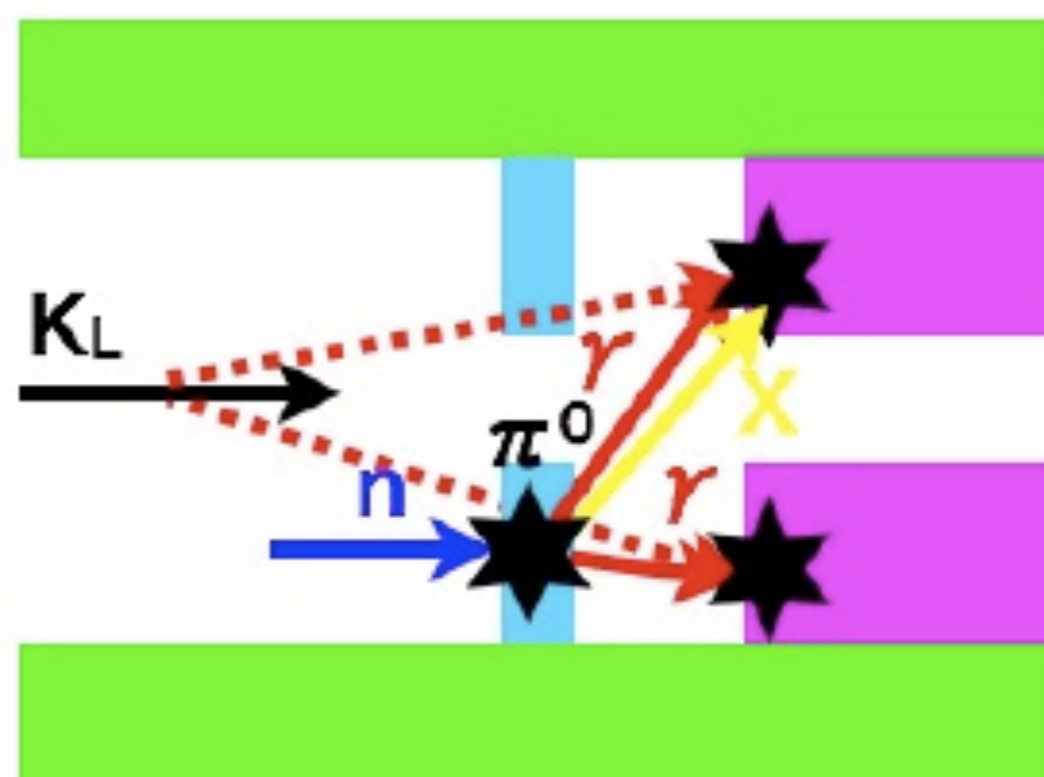


CV- η

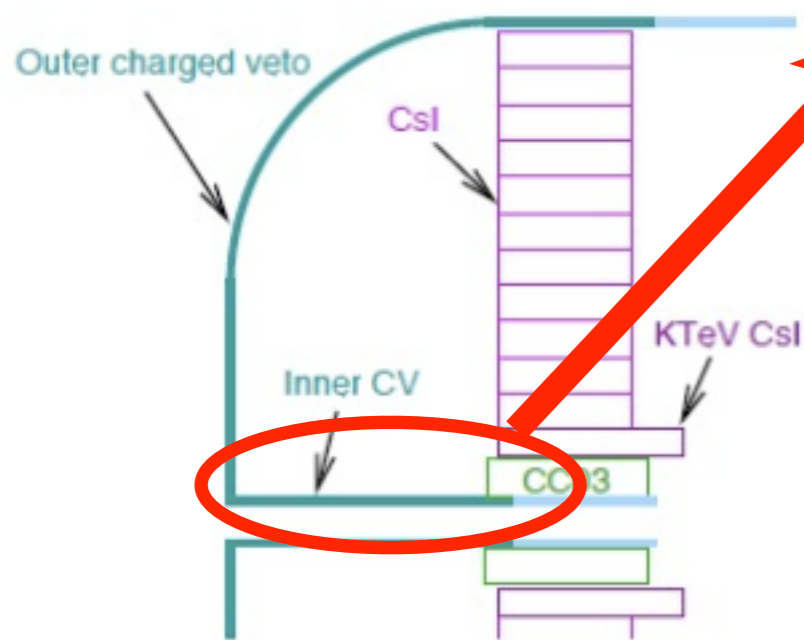


閾値2GeV/c

CV- π^0



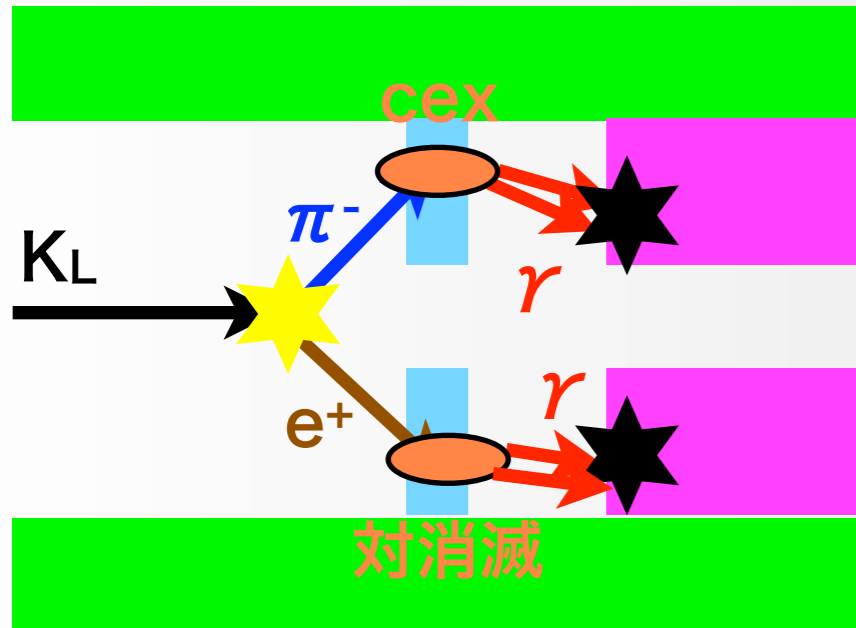
閾値0.8GeV/c



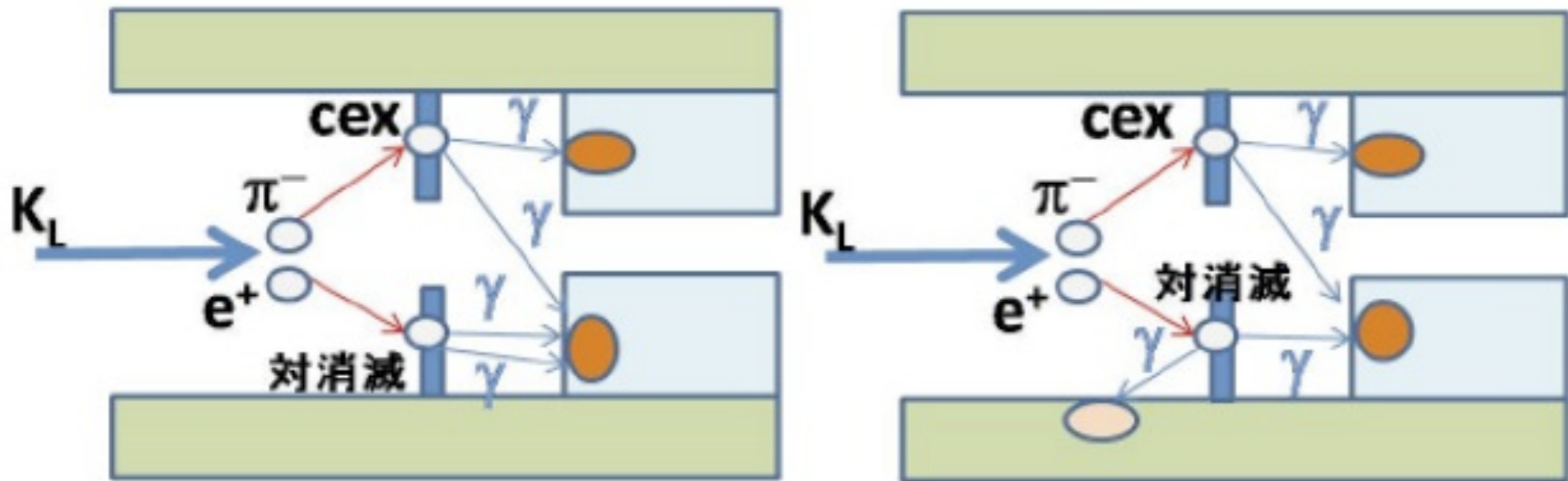
- ここがCV- η のバックグラウンド源
→inner CVを排除して2層に
- シンチレータを薄くして反応を抑える
6mm→3mm
- CVをCslに近づける

CVが2層の理由2

$K_L \rightarrow \pi^- e^+ \nu$ バックグラウンドのメカニズム



- CVを近づけすぎると左のバックグラウンドが増加
→ front CVの位置をCsl上流25cmに決定



CVへの要請～光量1～



- CVでは主に $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ のvetoが重要

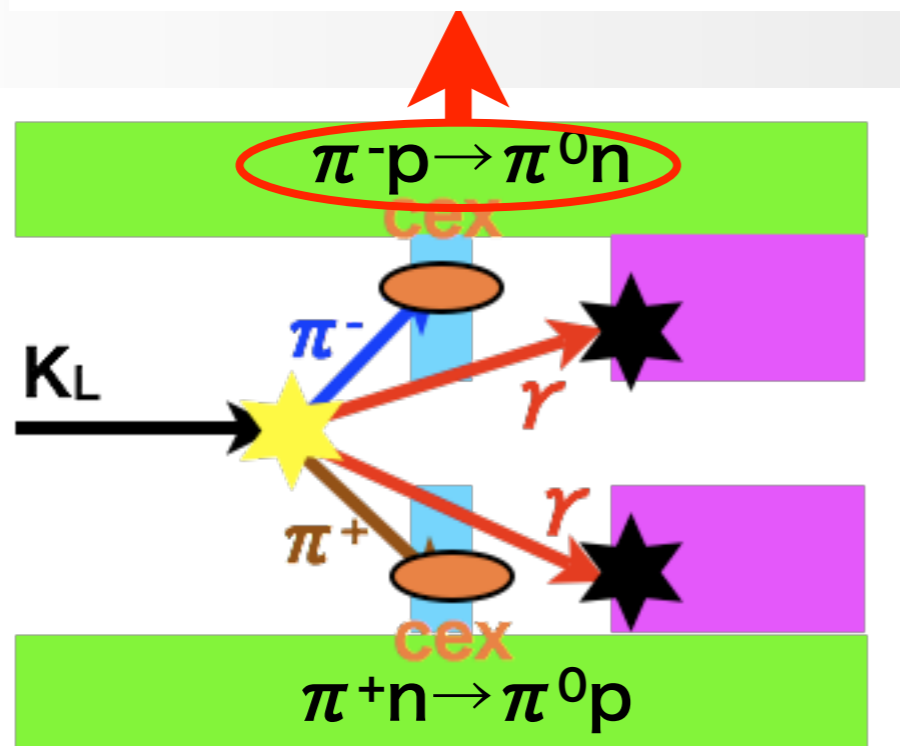
- バックグラウンドを十分小さくしたい(目標はSMでのsignal 期待値1.41に対して0.15)

- π^- 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 $\sim 10^{-4}$)。

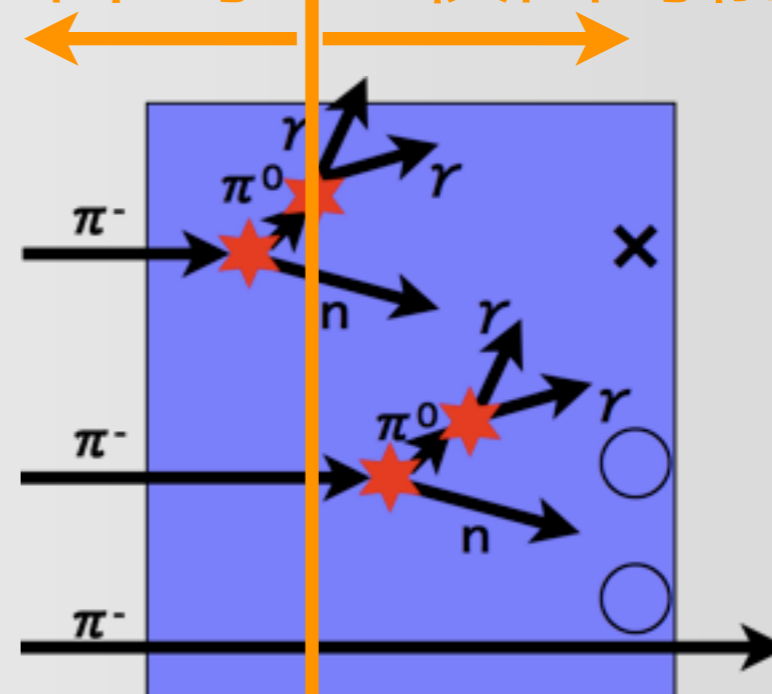
(point!)実際の検出器が検出する光はpoisson分布に従う

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

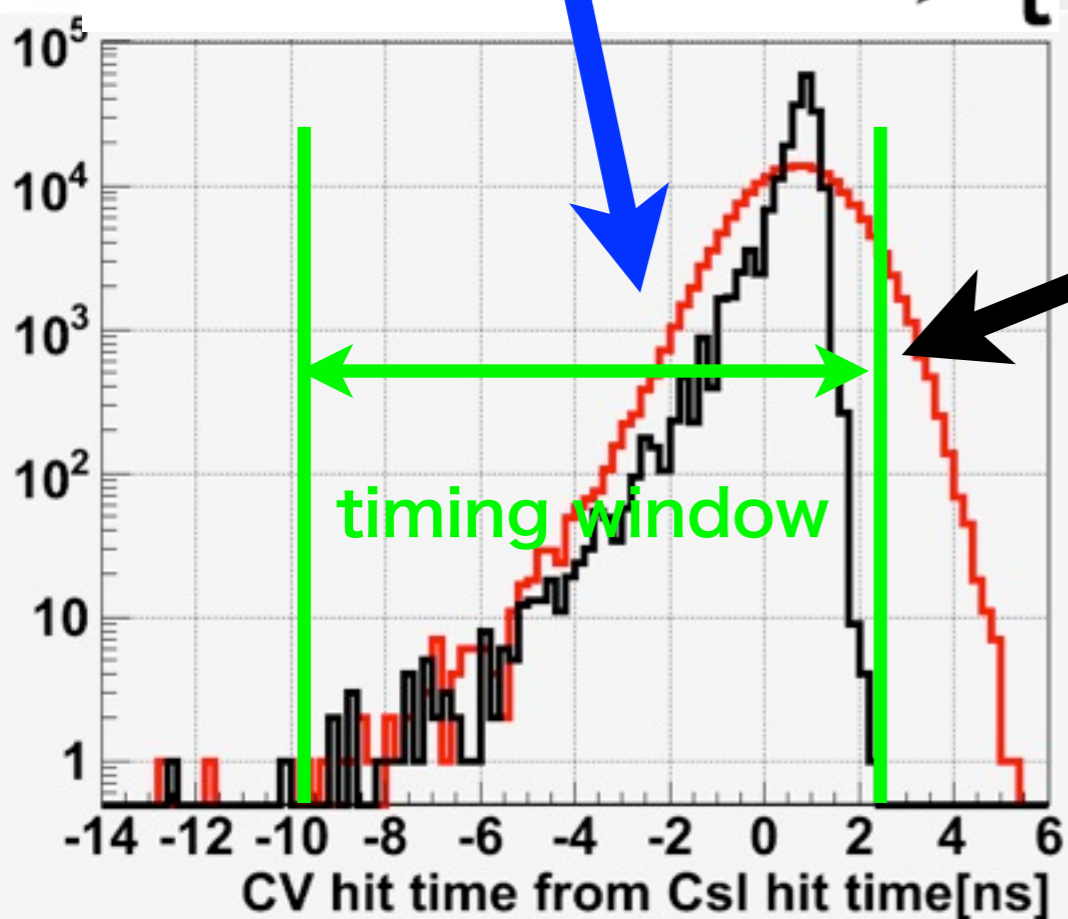
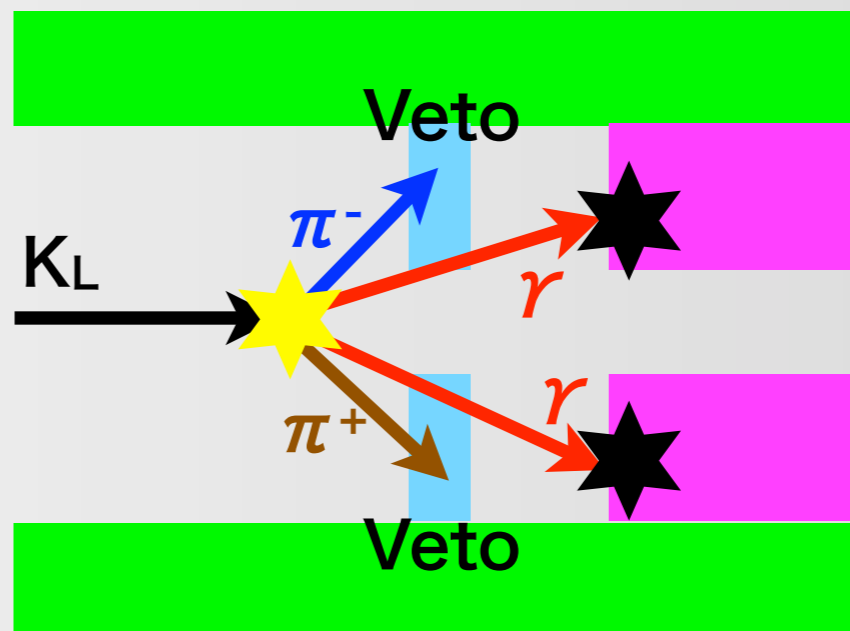
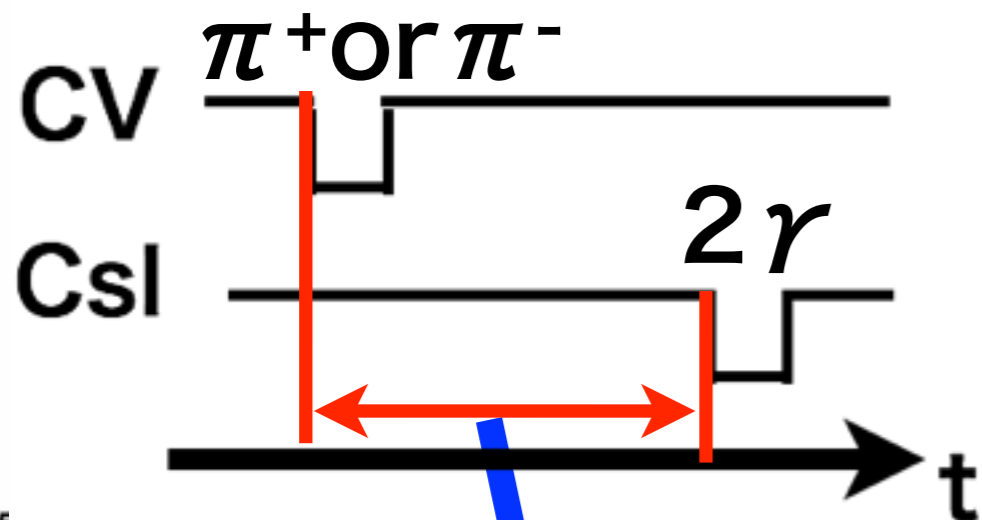


CVで π^- が不感になるメカニズム

CVへの要請～時間分解能1～

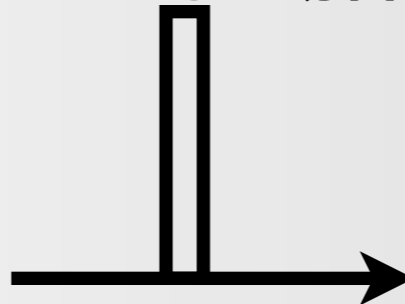


$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ イベントのVeto方法

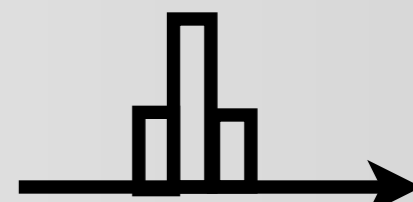


取りこぼしが 10^{-5} 以下にしたい

理想的な場合



時間分解能を持つ場合



黒:理想的な分布

赤:検出器の時間分解能(1ns)でなませた分布

CVへの要請～時間分解能?～



$K_L \rightarrow \pi^0$

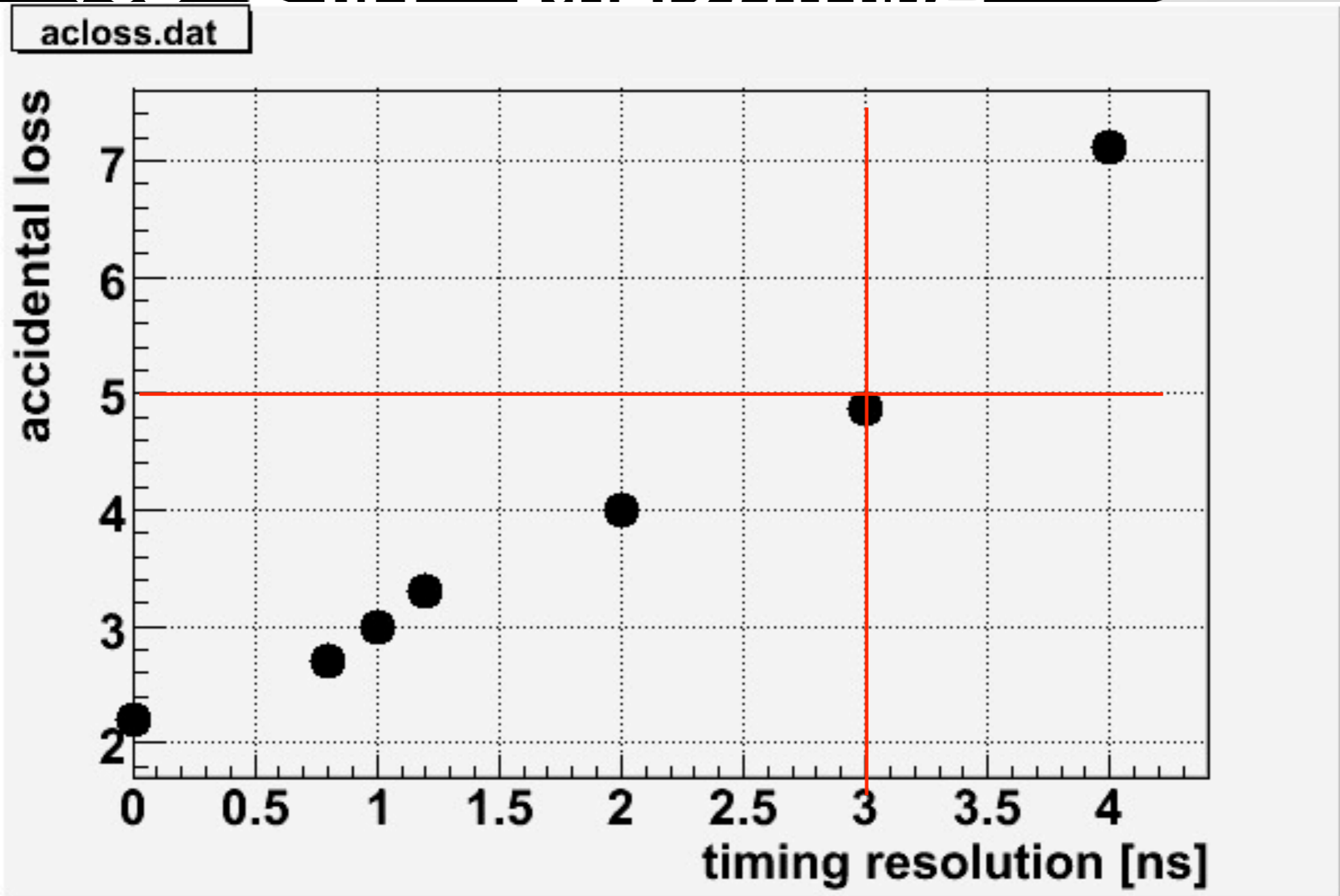
ビーム中粒

CV

Csl

timing wi

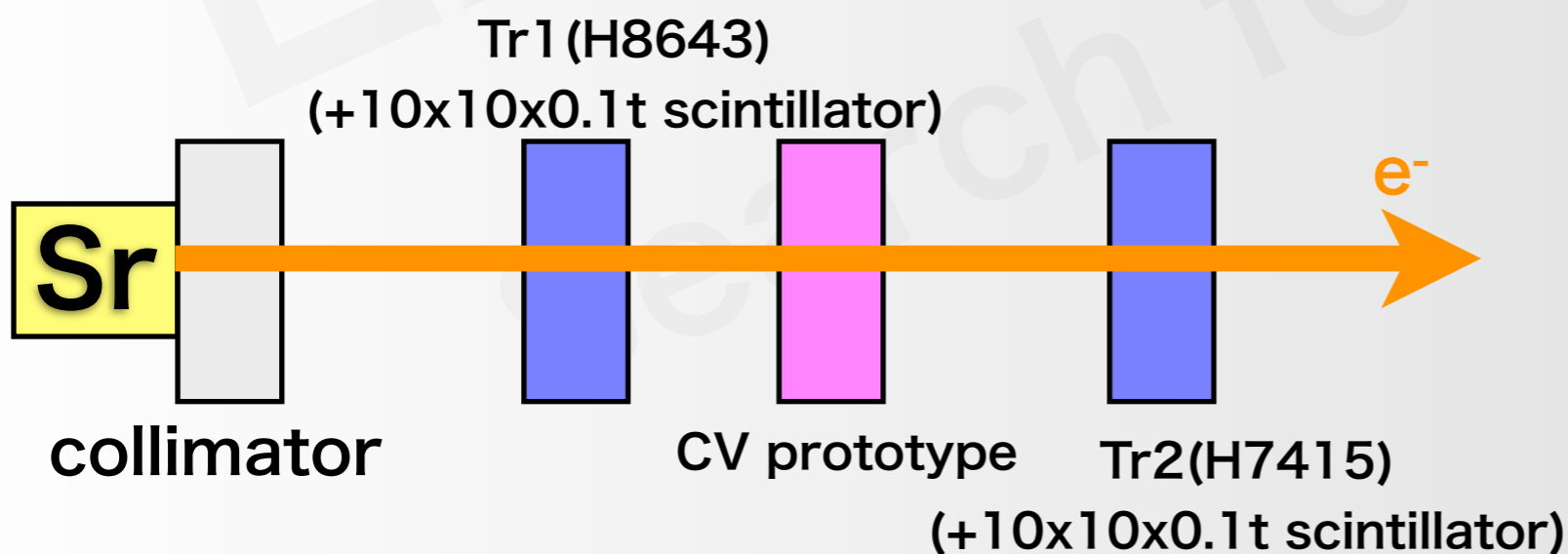
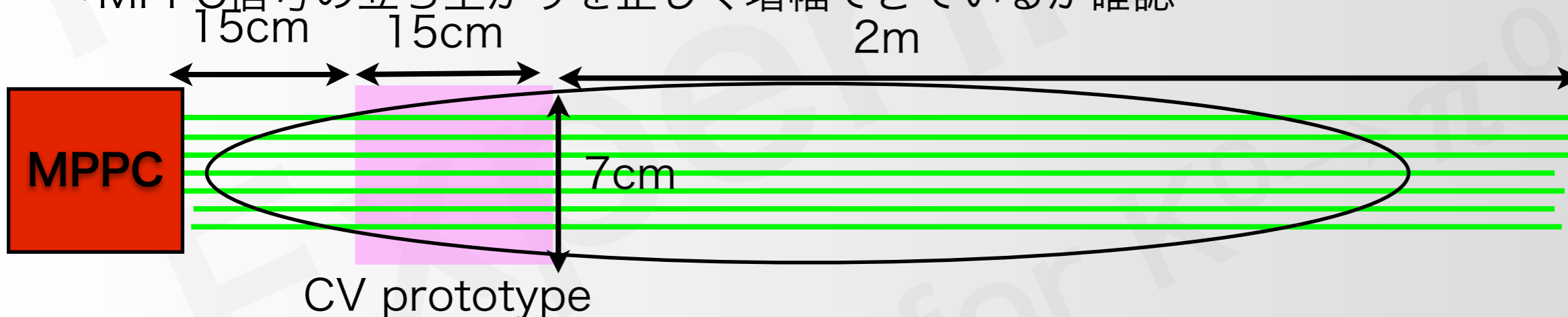
accid



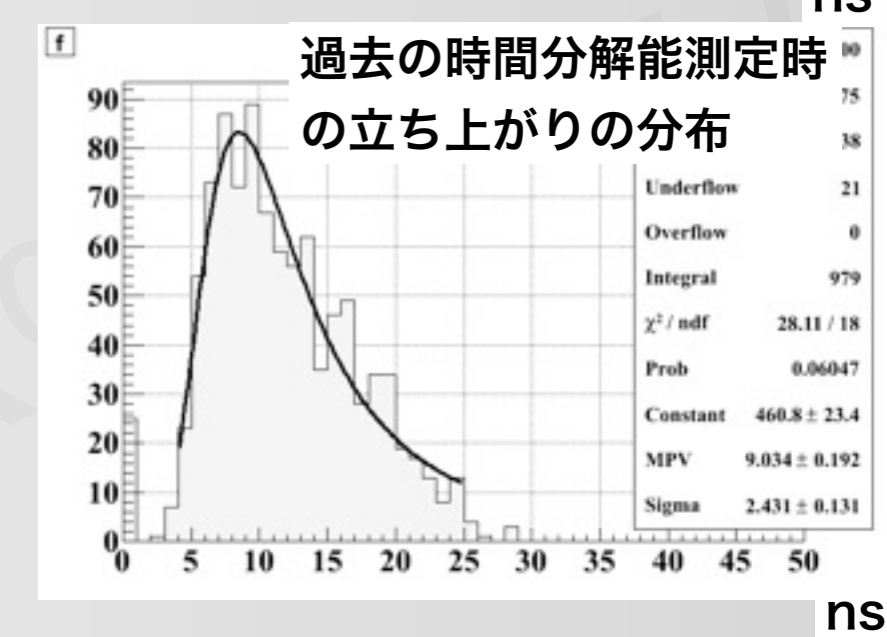
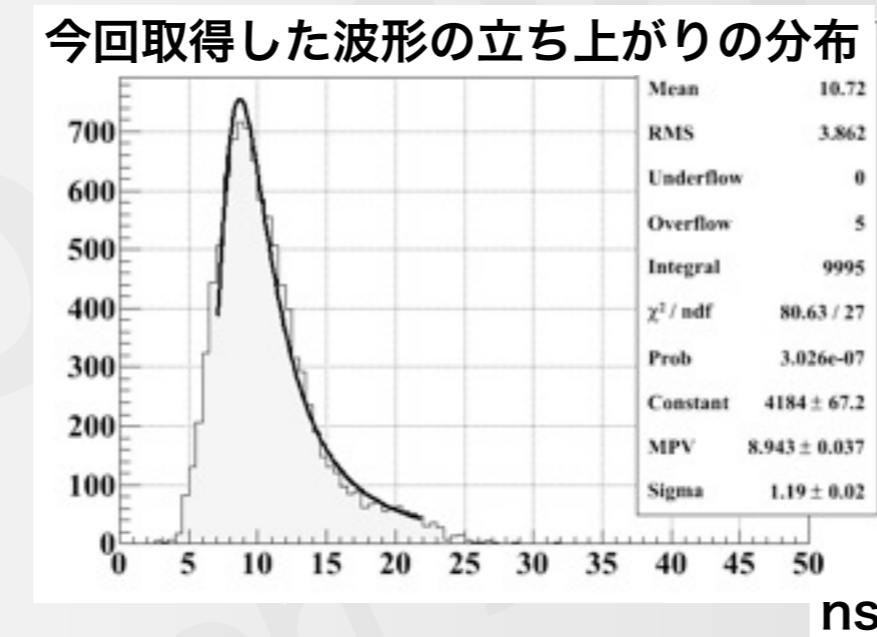
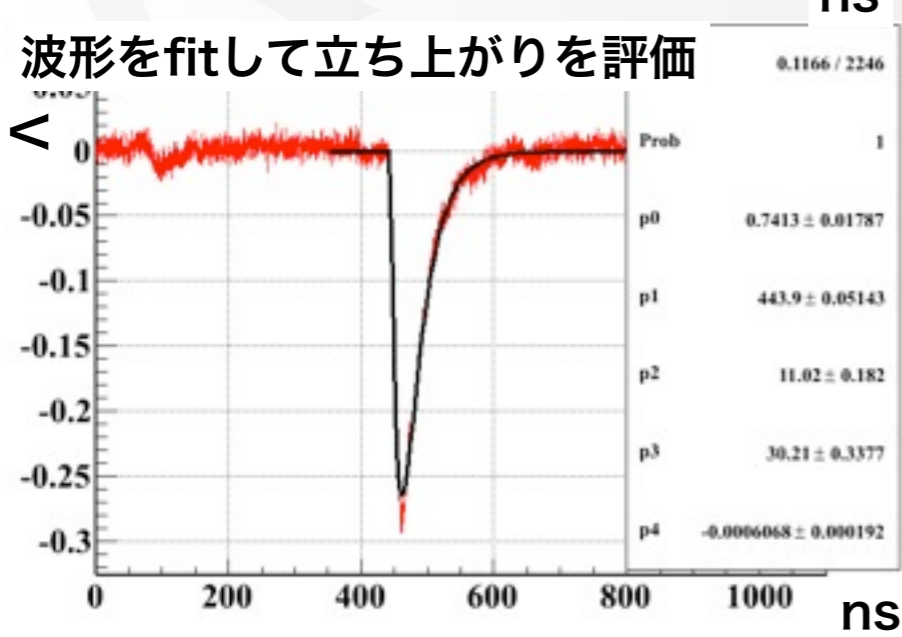
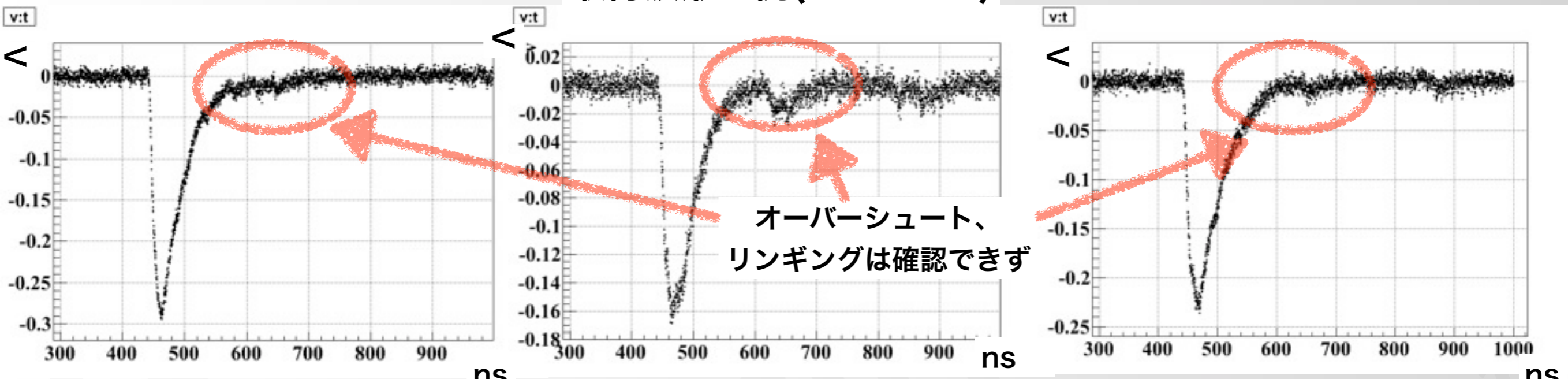
accidental lossを5%以下にするには
3ns以下の時間分解能が必要。



- 本実験で用いるのと同じ長さのlanケーブル(22.5m)を使用
- PMT二つで貫通電子をトリガー
- オシロスコープで波形を取得した
 - MIPシグナルに対してリングング、オーバーシュートがないか確認
 - AMPの入力や出力のACカップルが波形に悪さをしていないかどうか
 - 過去のCVプロトタイプの時分解能測定時の波形と今回取得した波形の立ち上がりを比較
 - MPPC信号の立ち上がりを正しく増幅できているか確認



取得波形の例(3サンプル)

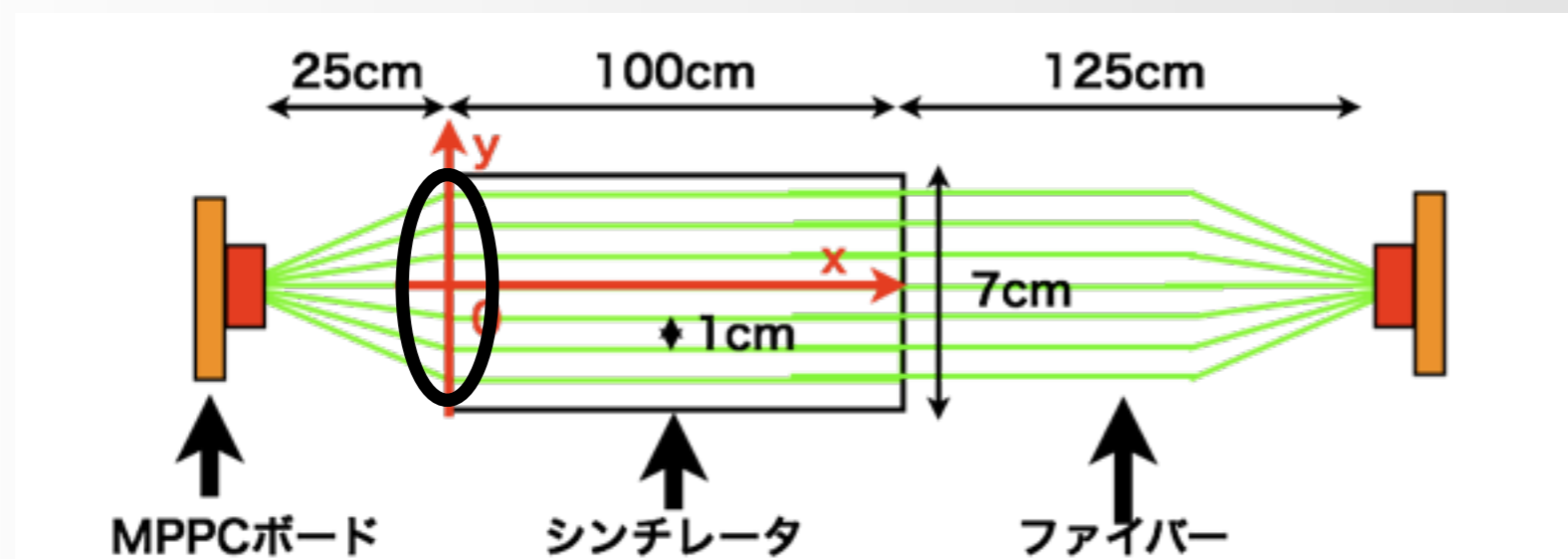


- ・ オーバーシュート、リングングは観測されず
- ・ 立ち上がりの分布も変化なし

実験目的



- CVの中で一番大きいシンチレータストリップの性能評価
→ 光量が一番落ちる場所があるのがこの部分

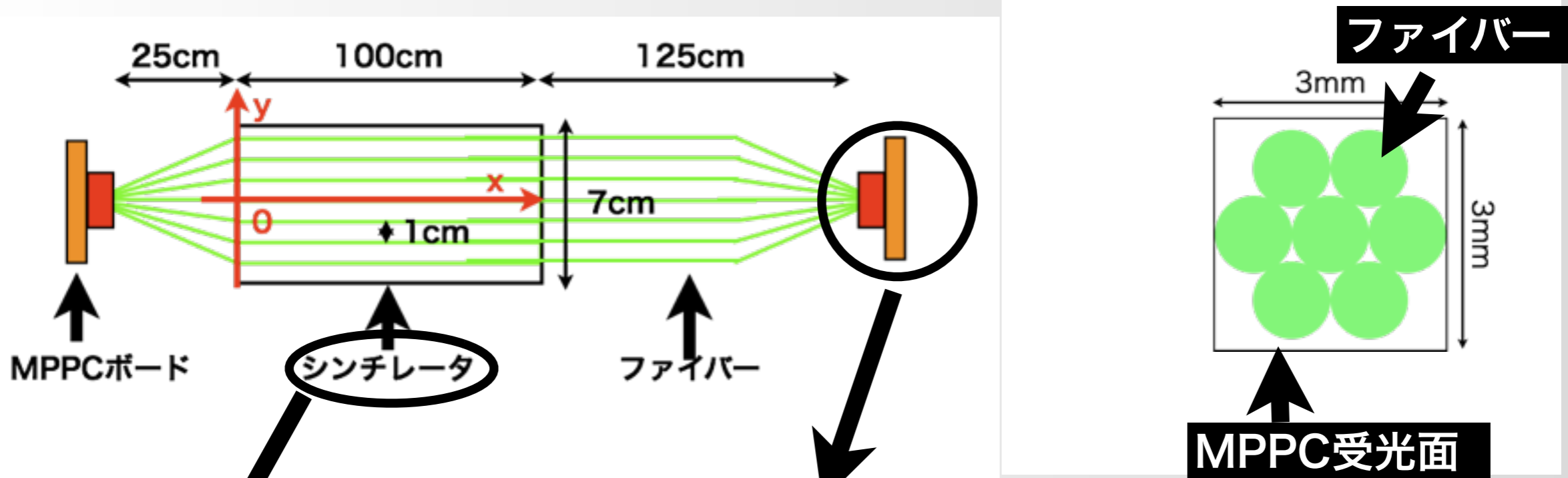


- 時間分解能3ns以下、光量3p.e./100keV以上が出るか
check

実験セットアップ1

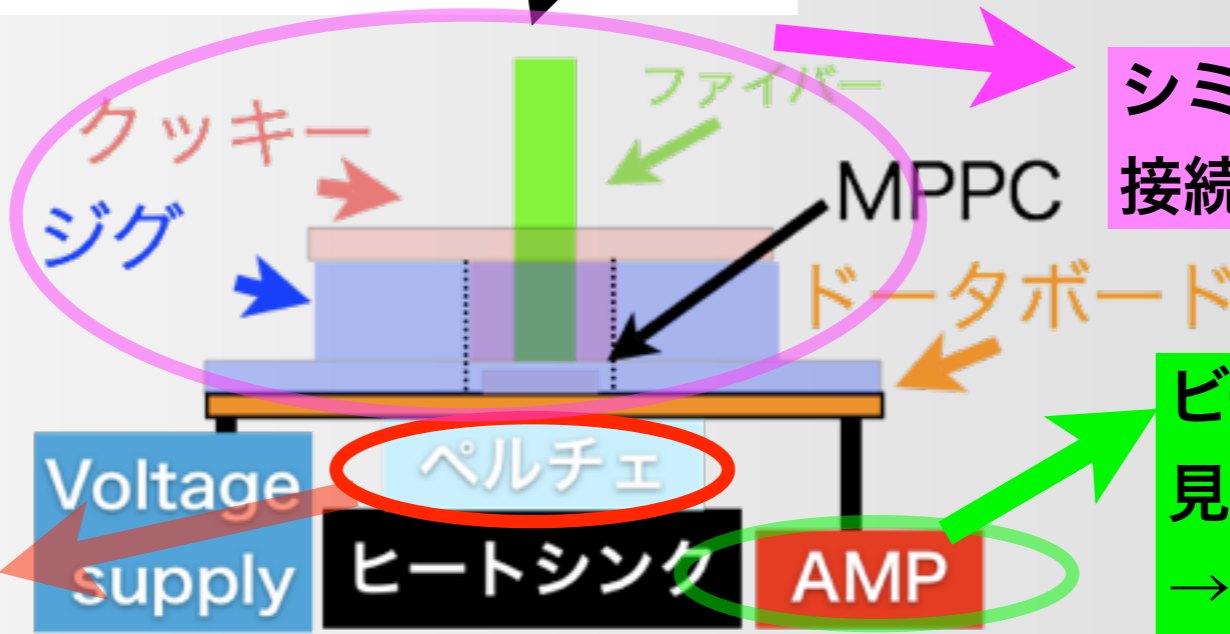


プロトタイプCVの概念図



ビームテストでの光量比較
→EJ204(ELJEN)に決定

冷却テスト
→MPPCを $\sim 5^{\circ}\text{C}$ まで冷却



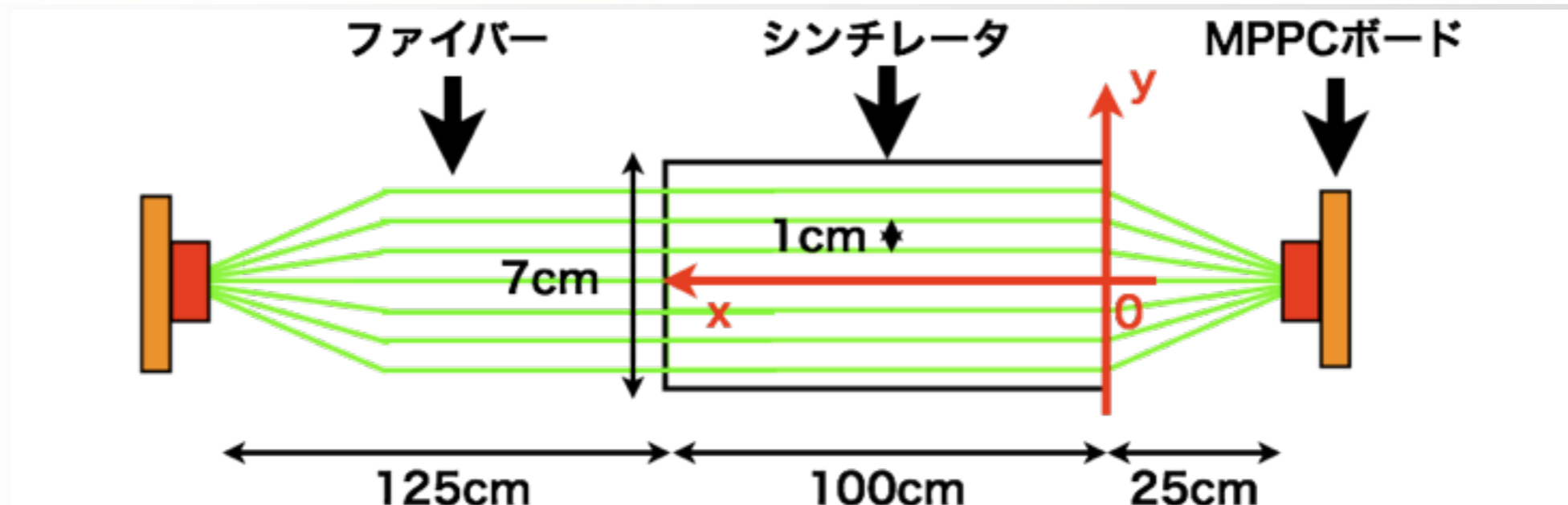
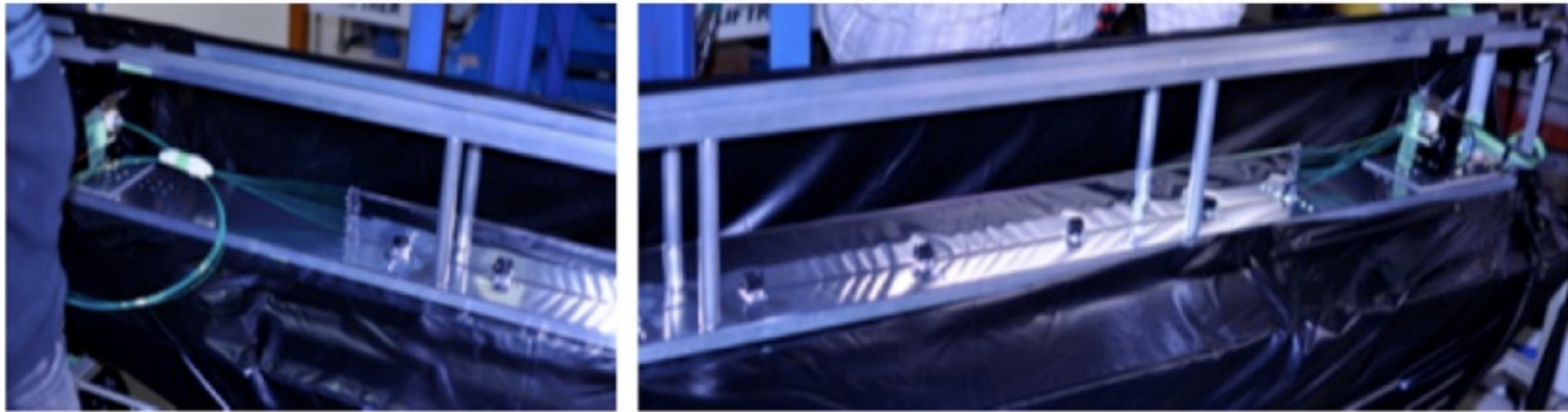
シミュレーションをして
接続方法考案

ビームテストで要求性能
見積もり
→50倍非反転高速
アンプ自作

実験セットアップ2

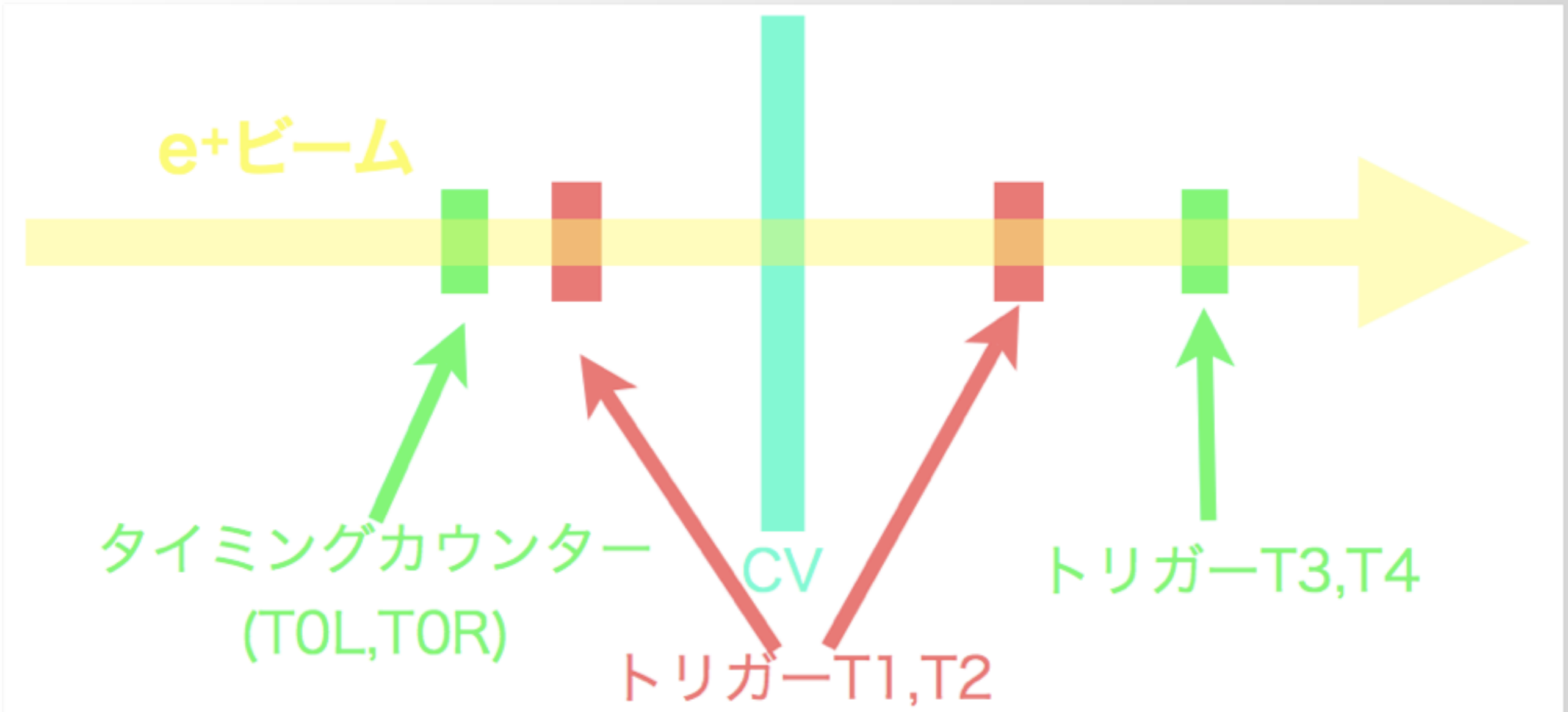


- 東北大学電子光物理学研究センターの600MeV/cの陽電子ビームを使用



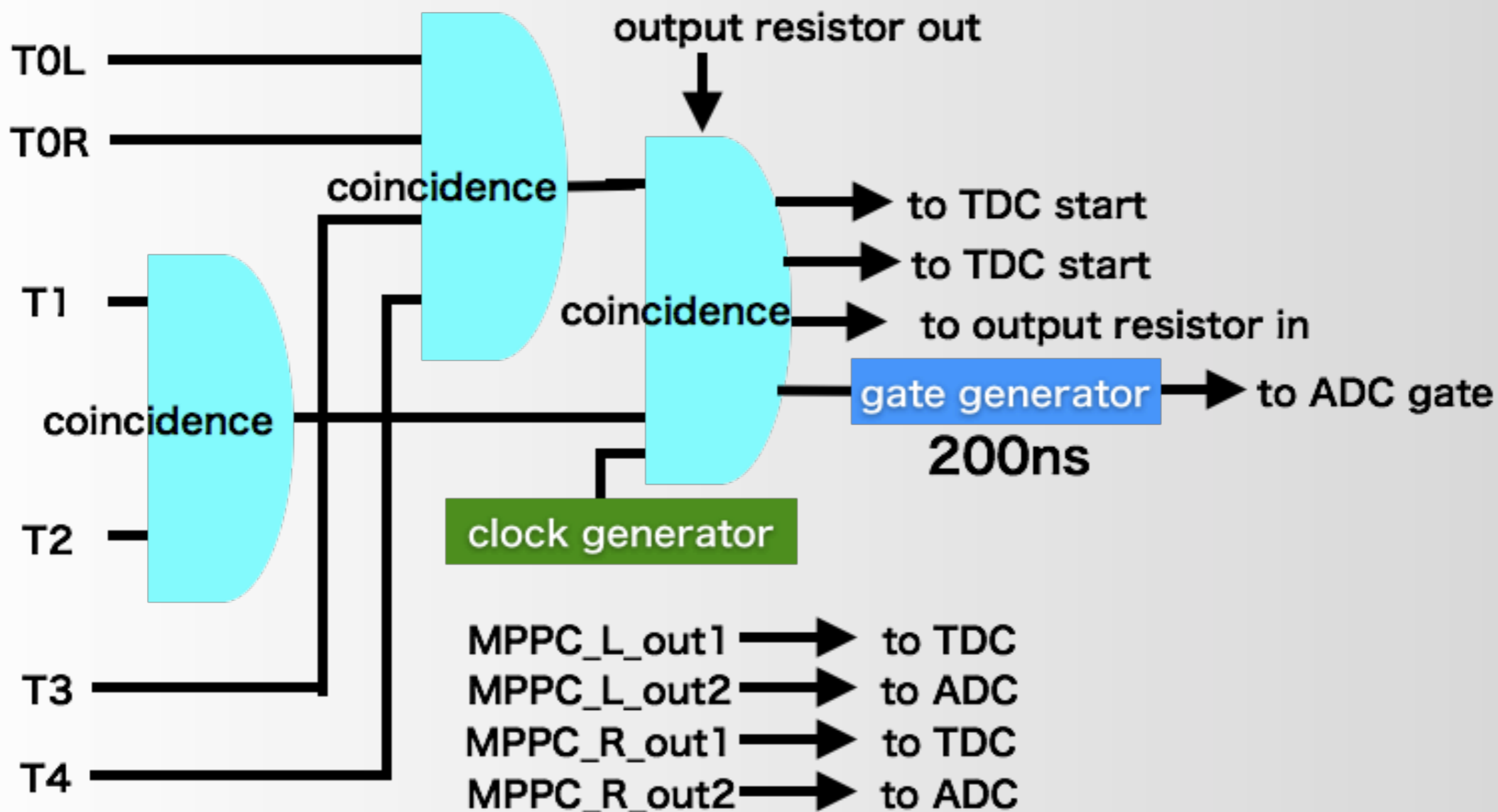
シンチはx方向、y方向にscanして測定

実験セットアップ3



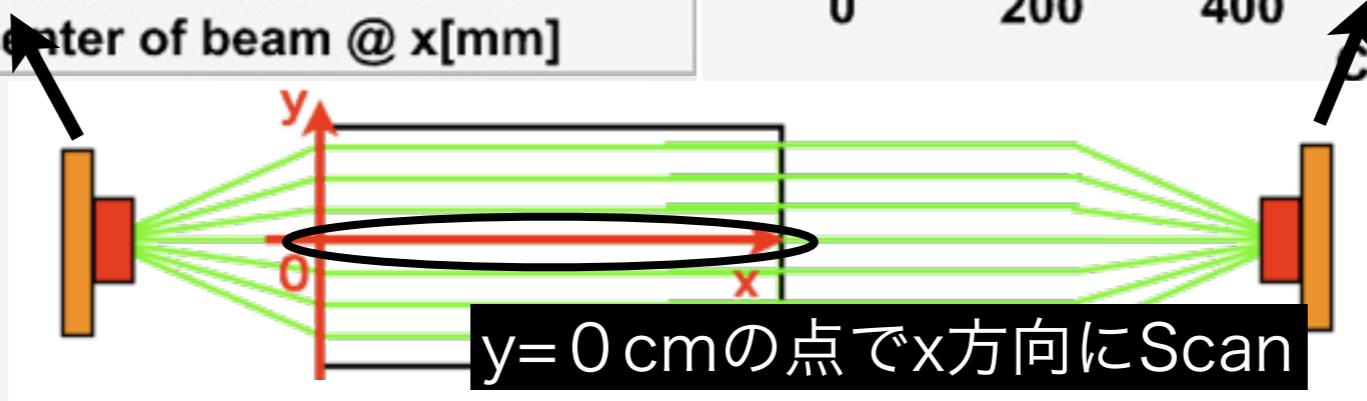
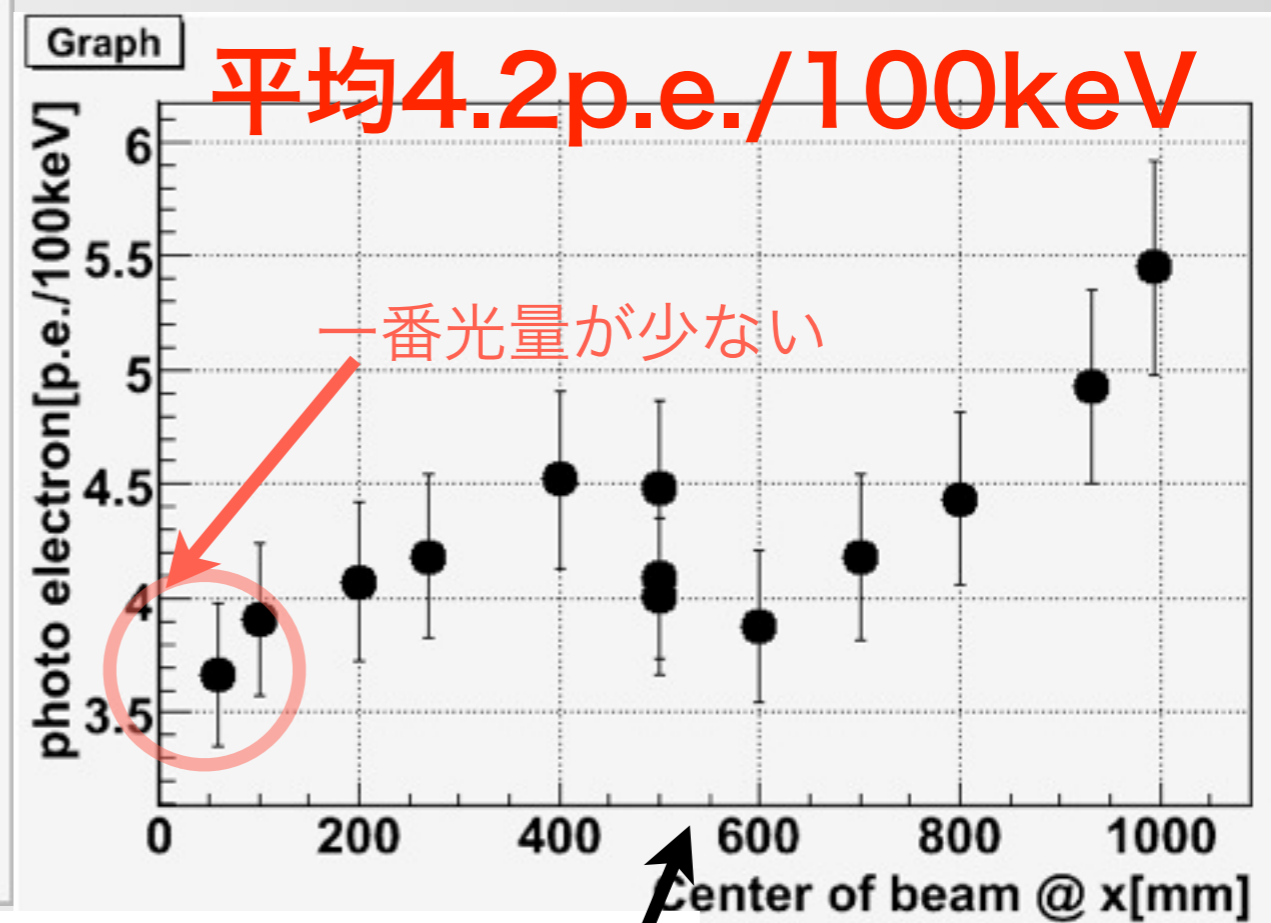
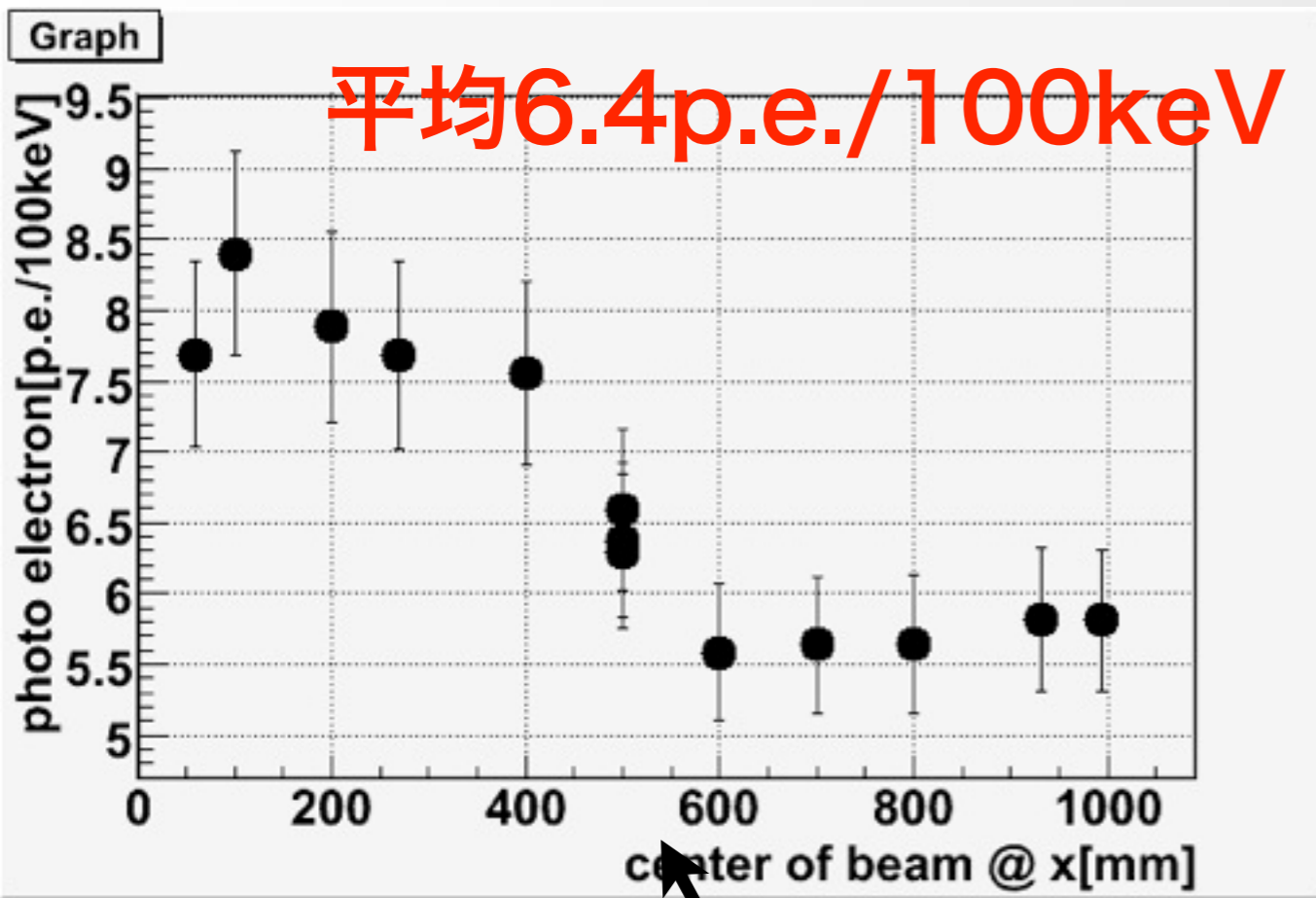
- タイミングカウンター: $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 1\text{cm}$ シンチ
- トリガー-T1、T2: $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 5\text{mm}$ シンチ
- トリガー-T3、T4: $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{mm}$ シンチ

実験セットアップ4



- 6つのトリガーのcoincidence
- TDCで時間情報、電荷有感型ADCで出力電荷を測定

実験結果～光量測定～



- 光量はシミュレーションを用いて100keV当たりで規格化
- 一番光量が低いのは図のx=58

→3.7p.e./100keV

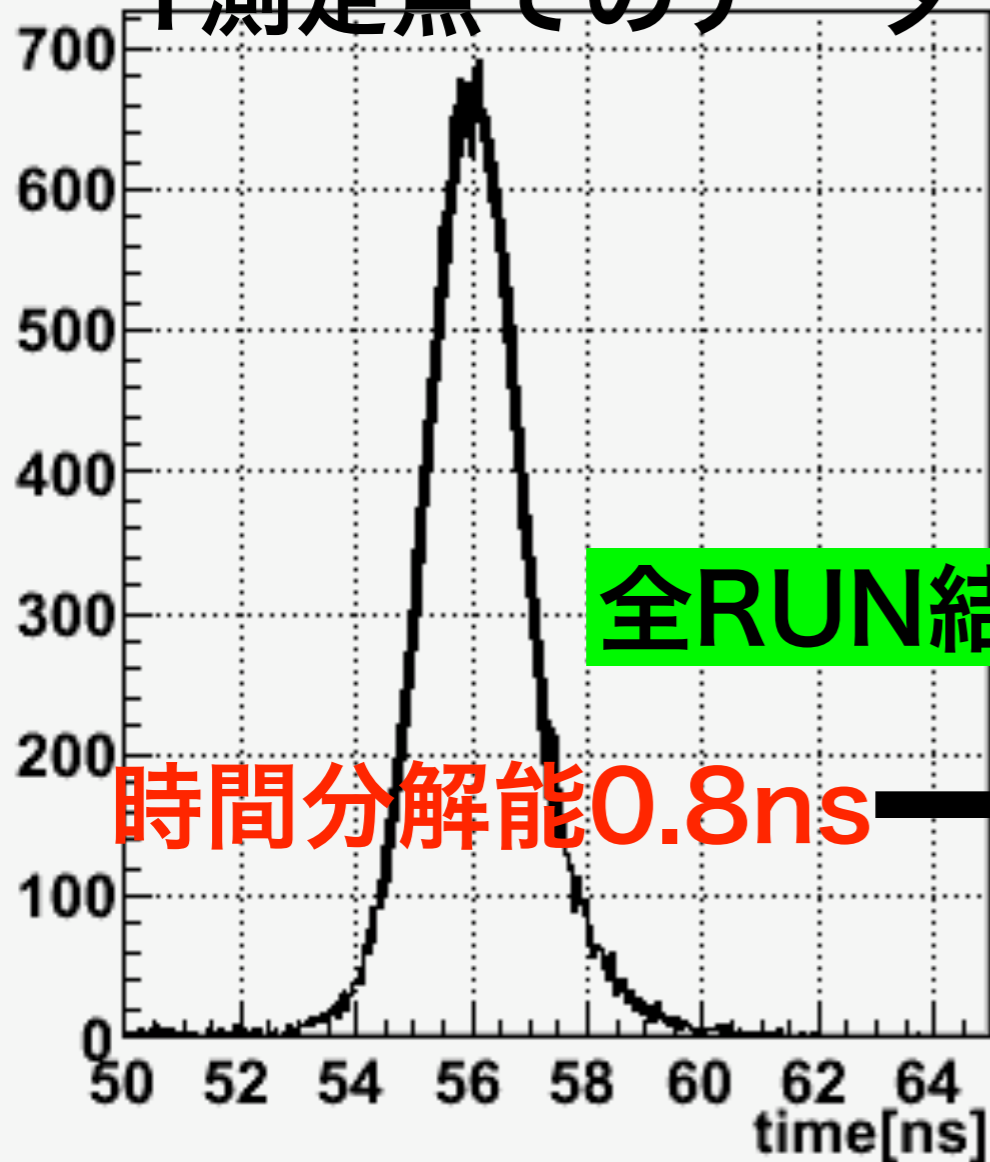
※要求は3p.e./100keV以上

実験結果～時間分解能測定～

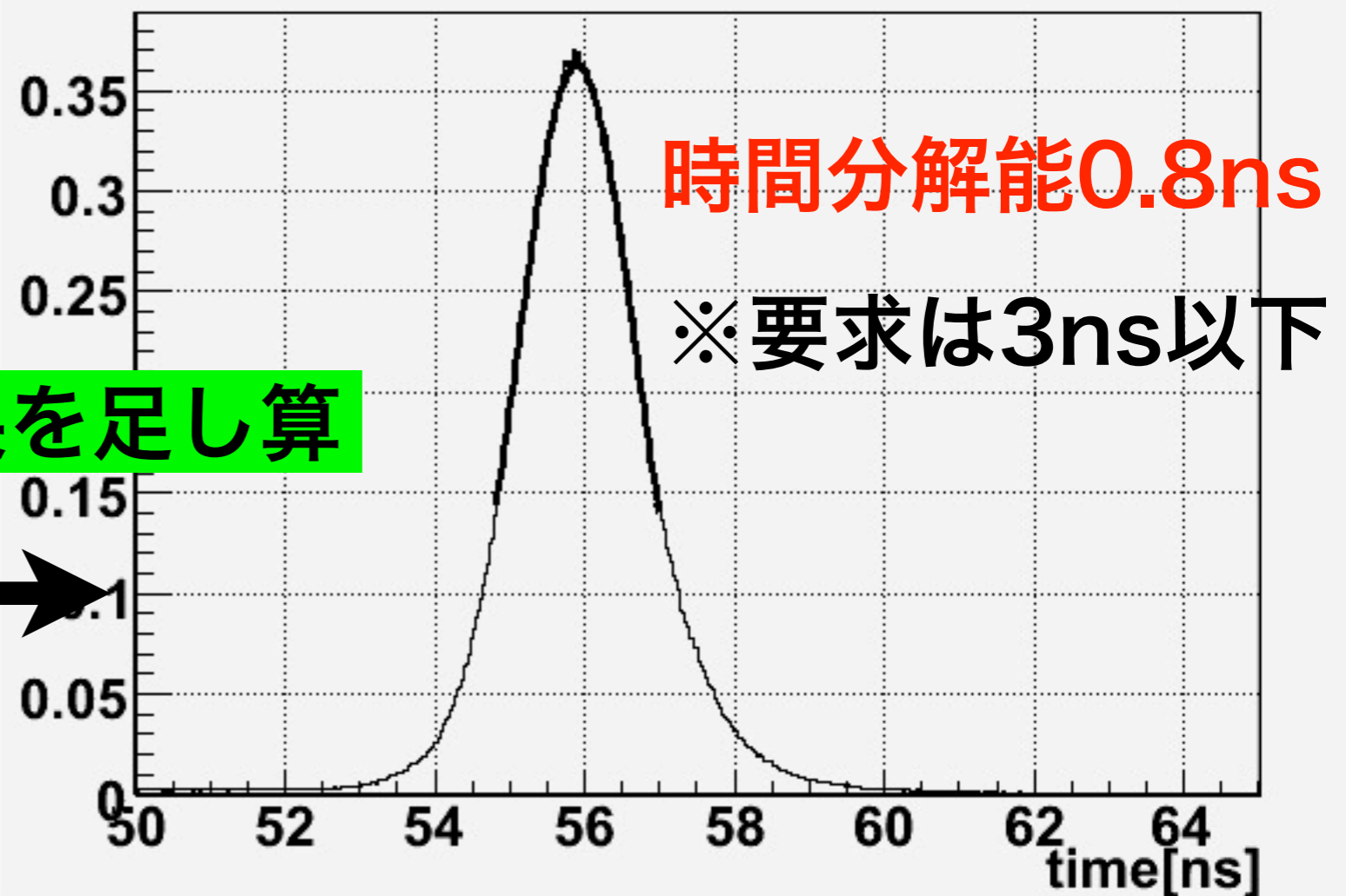


- tdcはtq補正を加える
- 両読みの平均時間を使って時間分解能を評価

1測定点でのデータ



全測定点データの合計



平均時間@x=50cm, Y=0

まとめ



• プロトタイプCVの性能評価

	要求性能	測定値
光量	3p.e./100keV	3.7p.e./100keV
時間分解能	3ns以下	0.8ns

accidental loss	2.7%
darkcount loss	negligible

このデザインで

- π^- に対するinefficiency 10^{-4} レベルを保証
- signalのlossが少ないことを保証

MPPC性能評価

測定に使用したMPPPC

- マスプロバージョンのペルチェ素子付き受光面3mm角MPPPC
- 個数:20個

測定項目

1.ペルチェ素子オフの状態

- MPPPCのゲイン測定
- ダークカウントノイズ測定
- モニター(サーミスタ)のチェック

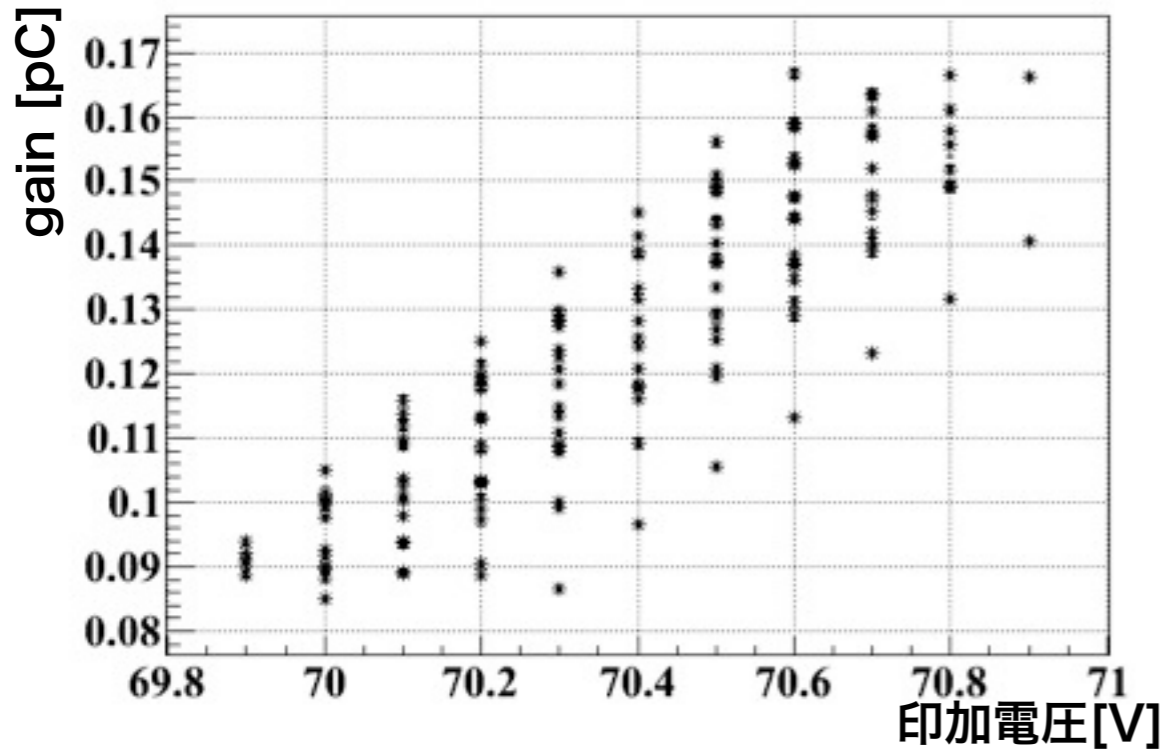
2.ペルチェ素子オンの状態

- ペルチェ素子の冷却特性
- MPPPCのゲイン測定

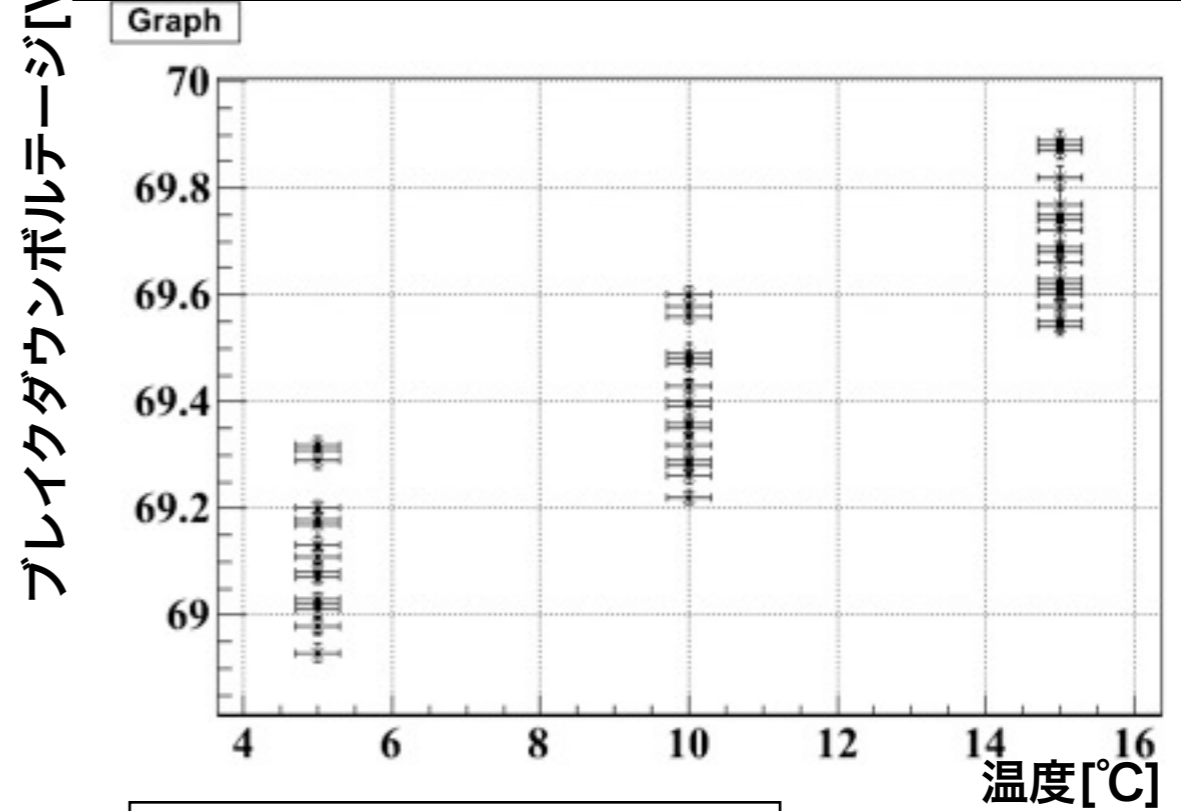
→サーミスタの温度と実際のMPPPCの冷却温度が一致しているかどうかをチェック

MPPCのゲイン測定

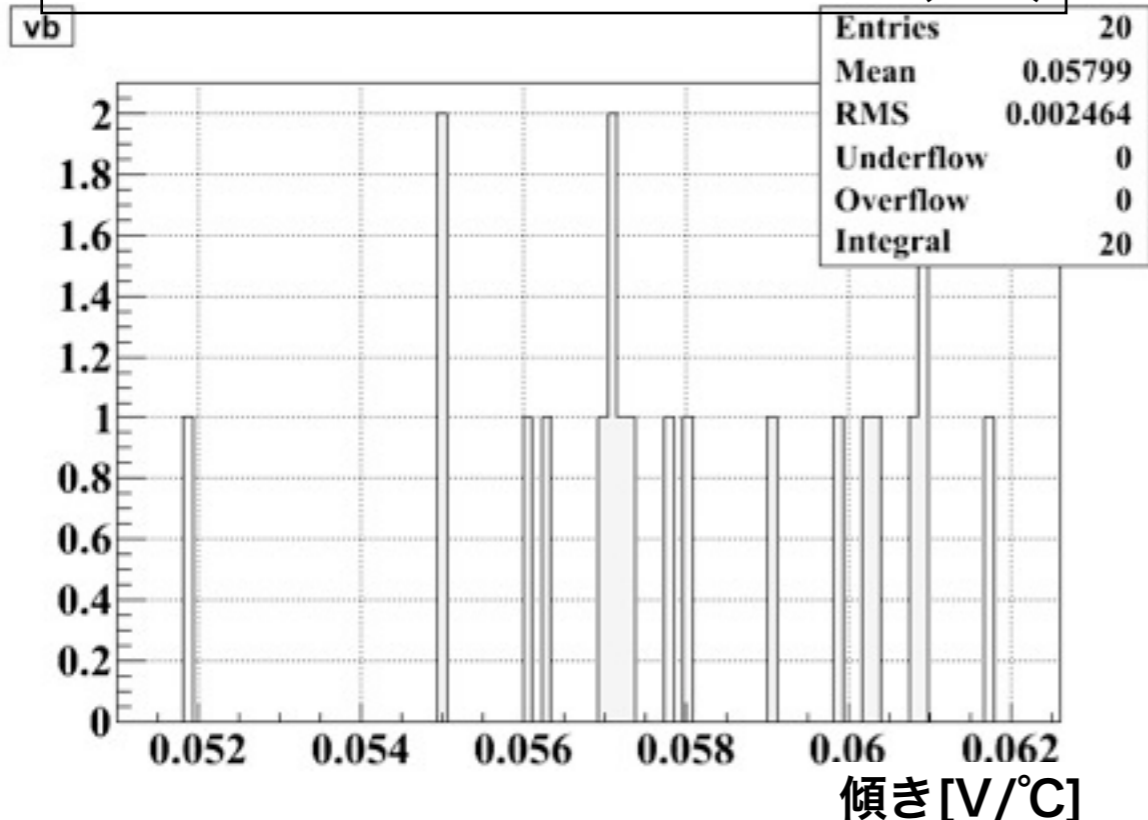
[ゲインカーブ(MPPC温度5°Cの時の例、20個重ね書き)]



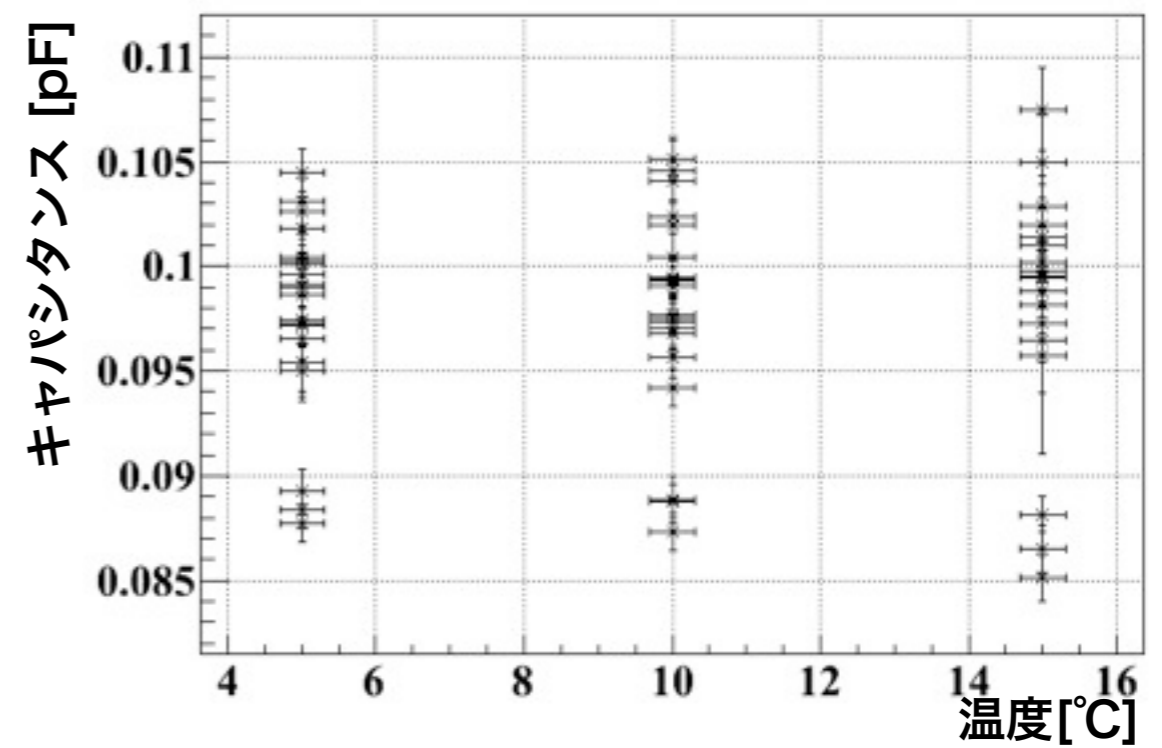
ブレイクダウンボルテージの温度依存性(20個重ね書き)



ブレイクダウンボルテージの温度依存性(傾き)



キャパシタンスの温度依存性

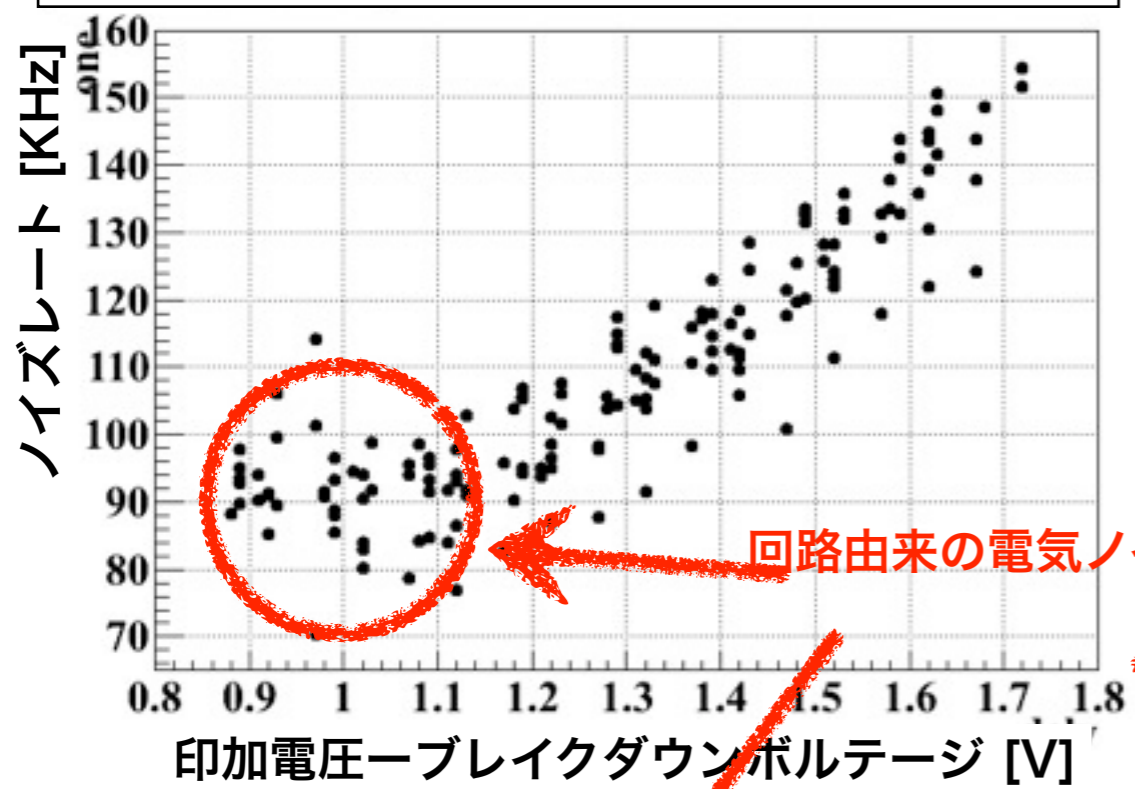


• 傾きの温度依存性は 0.05799 ± 0.002464 [V/°C]

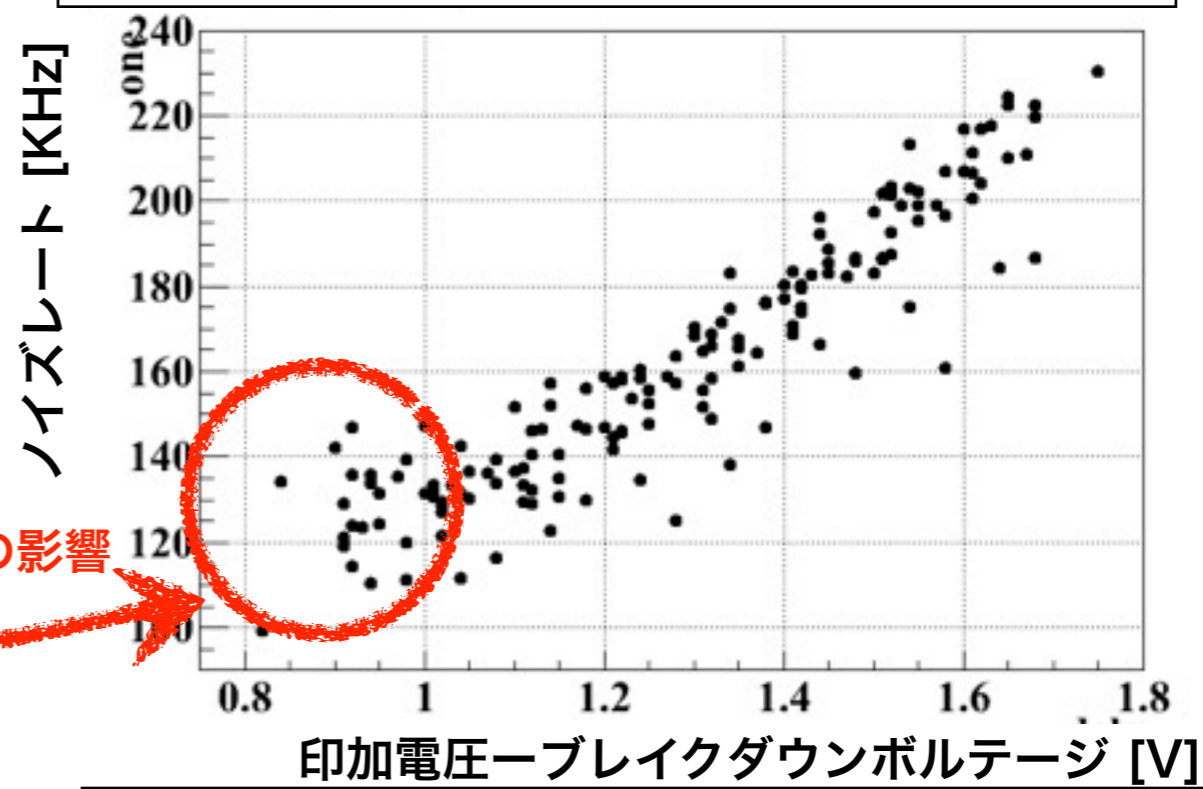
• キャパシタンスに温度依存性はなさそう。

ダークカウントノイズ測定-1p.e.相当ノイズ-

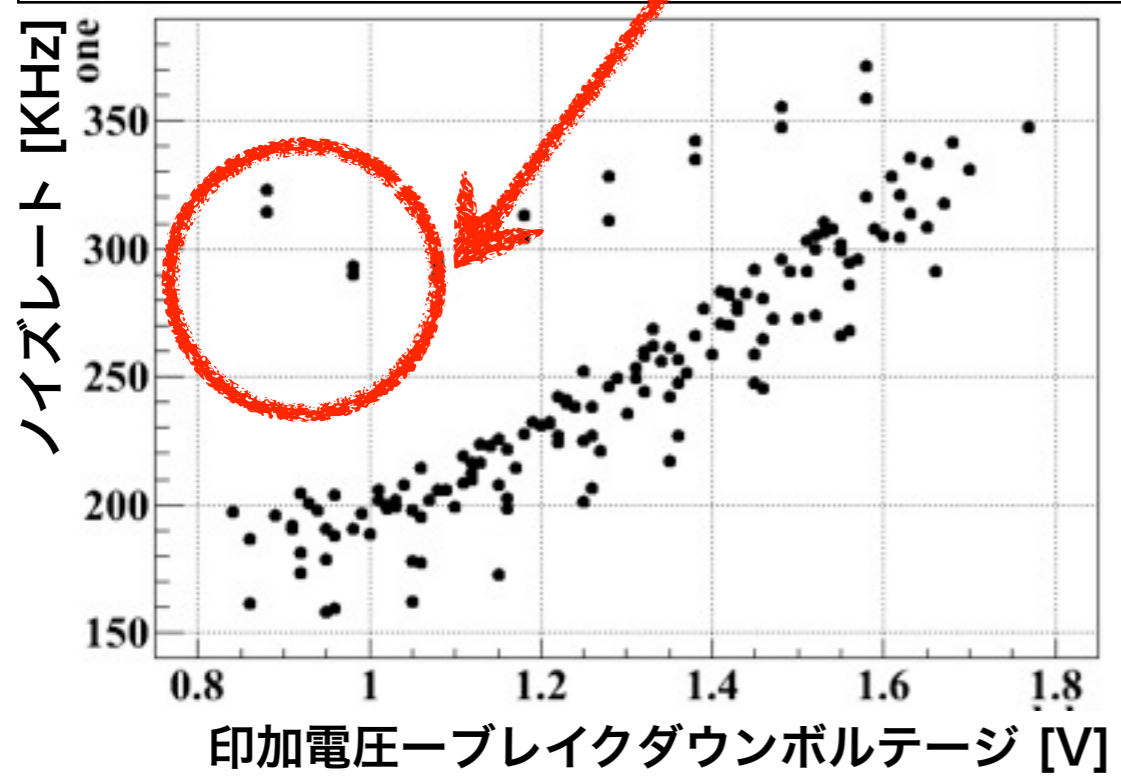
5°Cの時のダークカウントノイズ(20個重ね書き)



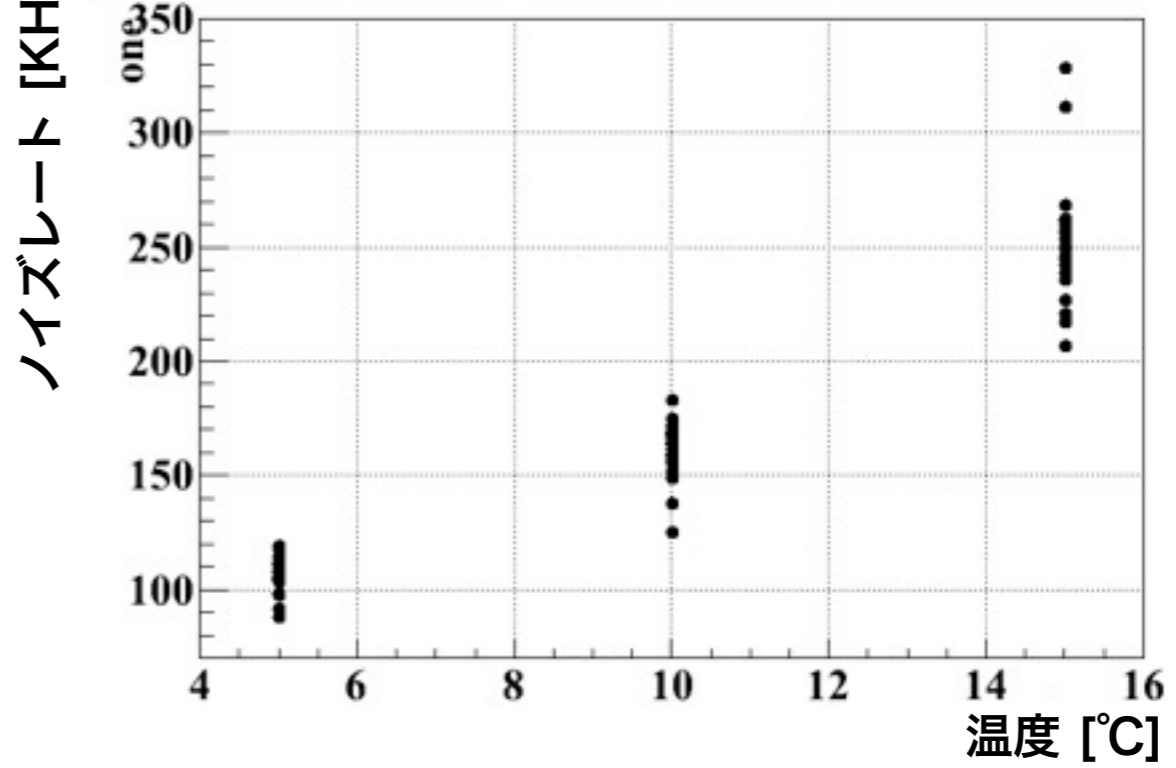
10°Cの時のダークカウントノイズ(20個重ね書き)



15°Cの時のダークカウントノイズ(20個重ね書き)

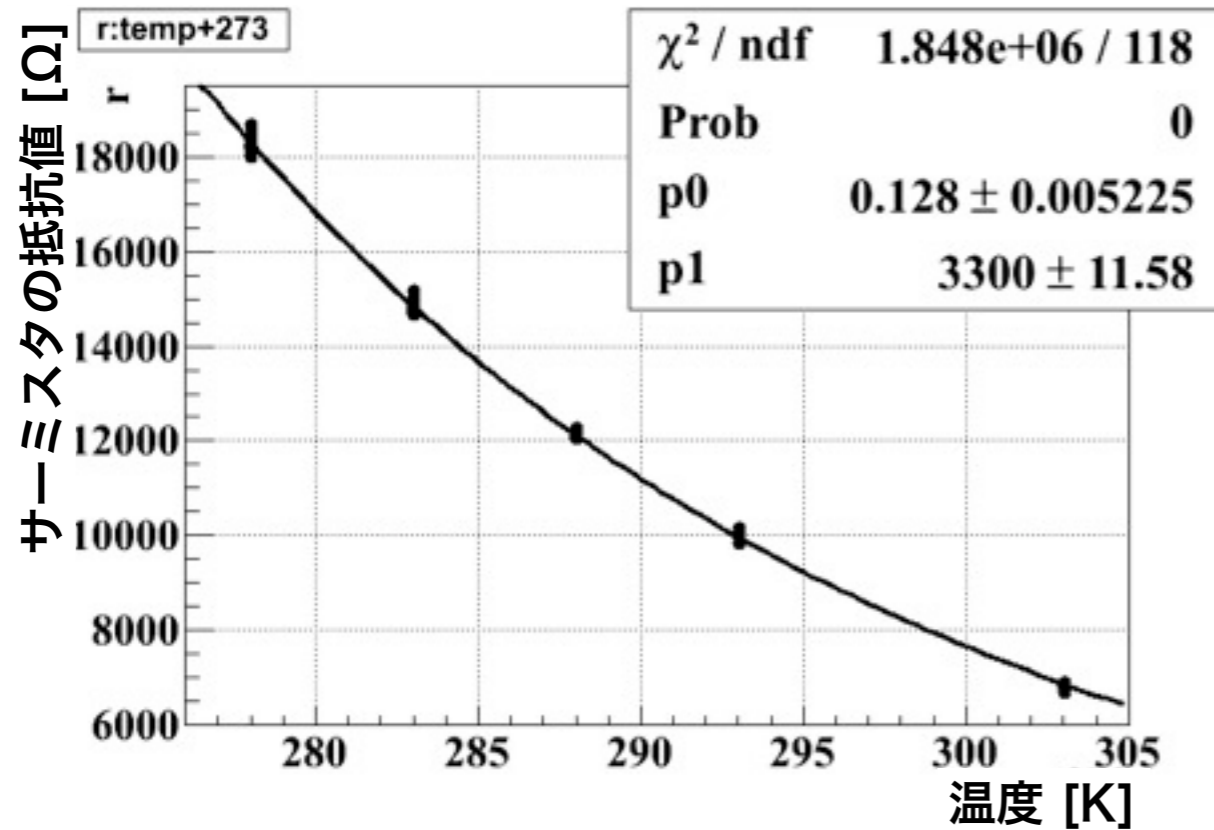


$\Delta V=1.3V$ の時のノイズ温度依存性(20個重ね書き)

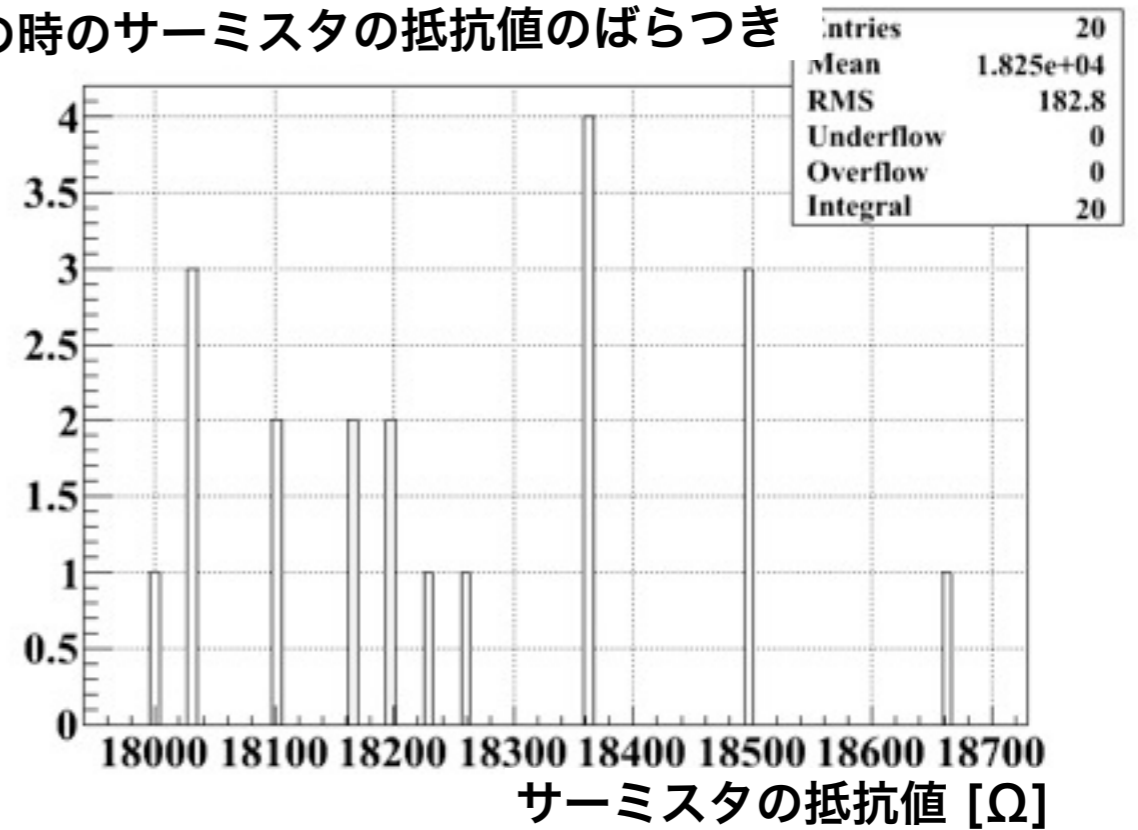


- ノイズレベルは前回のバージョンと同等
- 我々が使用する $\Delta V=1.3V$ 、5°Cでは~100KHzと小さく、実験での要求を充分満たす
- 2p.e.、3p.e.はAppendix参照

サーミスタのチェック



5°Cの時のサーミスタの抵抗値のばらつき

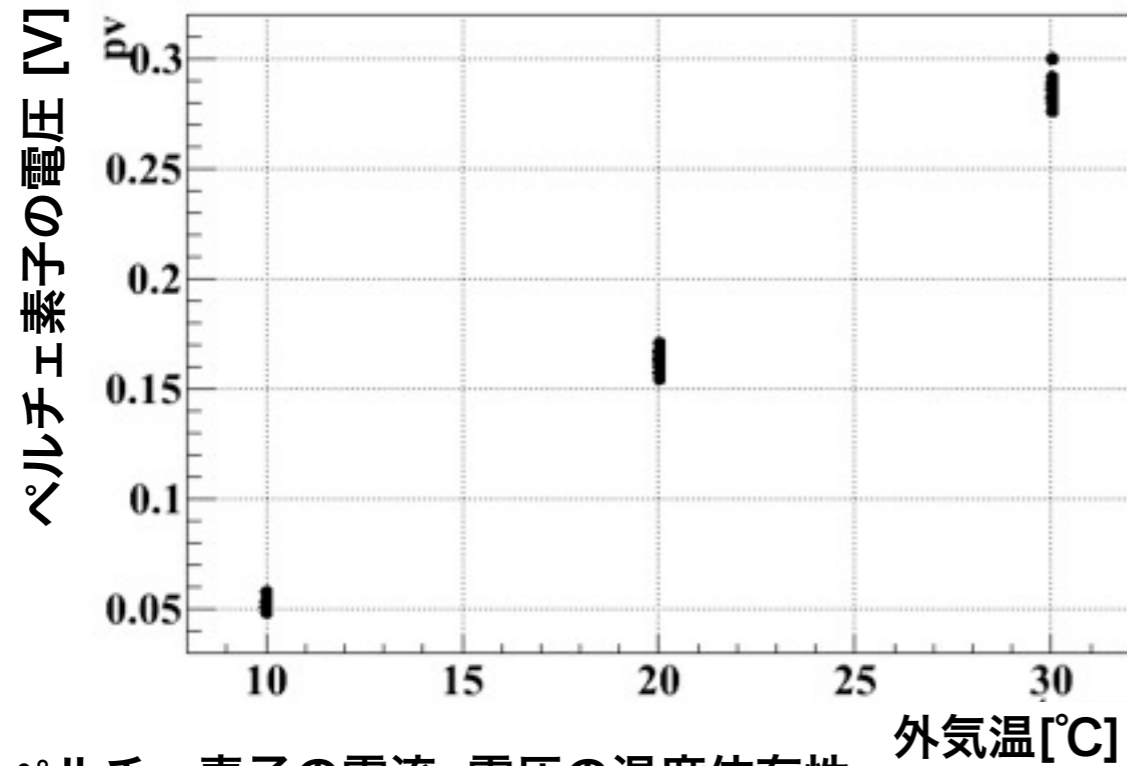


$$y = p0 * \exp(p1 / x) \text{ で fit}$$

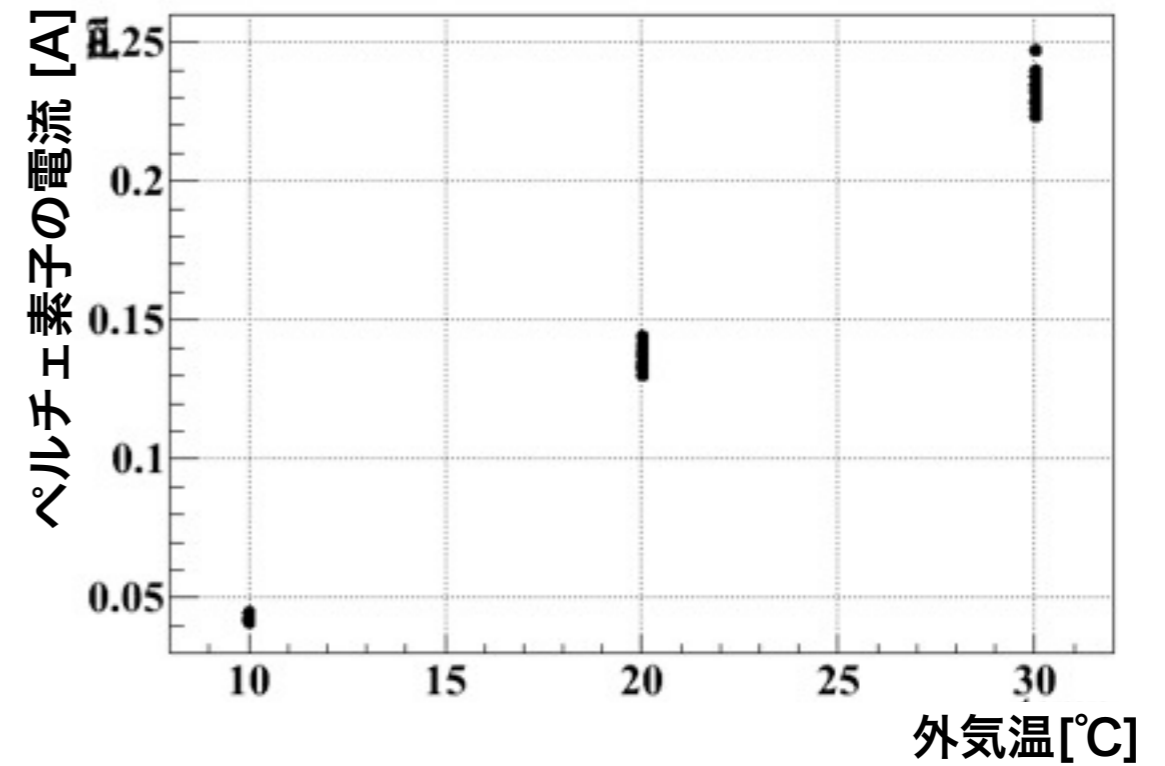
- 抵抗値は理論式に綺麗に乗る
- 5°Cの時の抵抗値のばらつきは $\sim \pm 2\%$ 程度

ペルチェ素子の冷却特性 (5°Cに冷却)

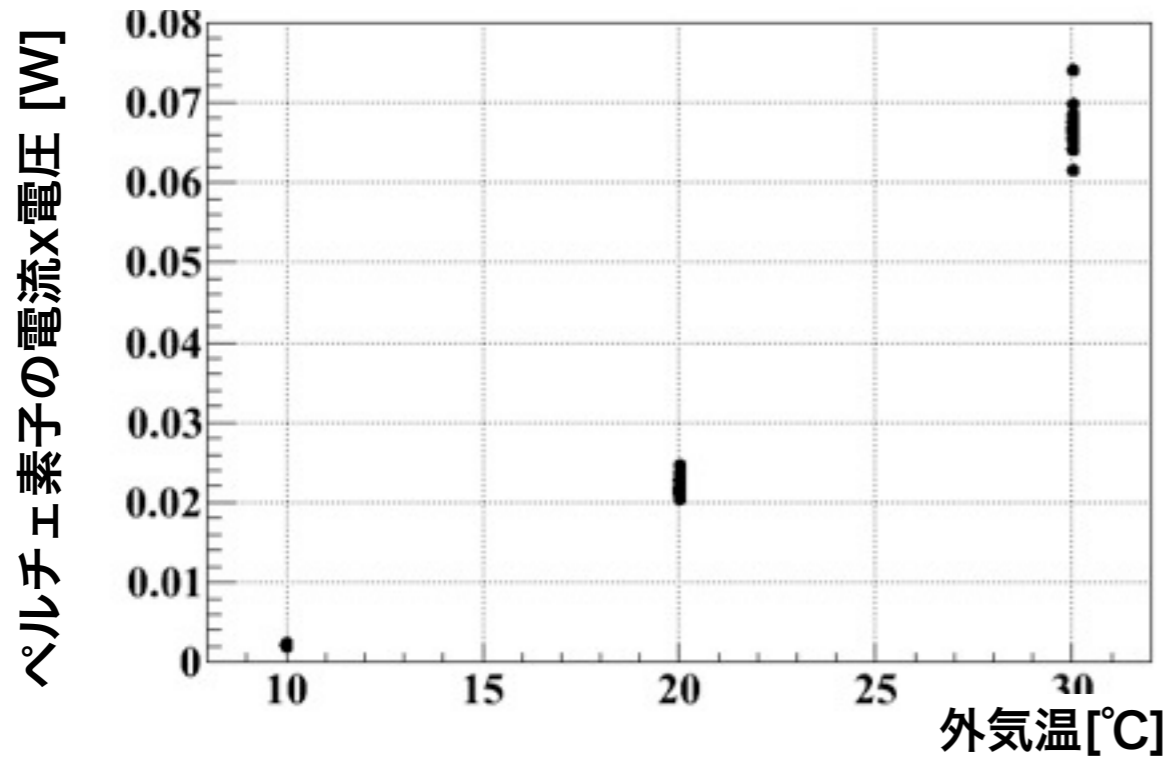
ペルチェ素子の電圧の温度依存性



ペルチェ素子の電流の温度依存性



ペルチェ素子の電流x電圧の温度依存性



- 冷却特性自体は以前のものとは変化なし
- 外気温が大きいほど個体差が大きくなる

MPPCの温度とサーミスタの温度(外気温30°C)

- ・恒温槽で外気温を30°Cにし、ペルチェ素子で5°C(サーミスタの読みで)に冷却

	MPPCの温度 ブレイクダウンボルテージ から計算(p3の結果を利用)	サーミスタからの温度 (p5の結果を利用)	差
サンプル1	7.09±0.47°C	5°C	2.09±0.47°C
サンプル2	5.87±0.40°C	5°C	0.87±0.40°C
サンプル3	5.53±0.60°C	5°C	0.53±0.60°C
サンプル4	7.15±0.35°C	5°C	2.15±0.35°C
サンプル5	5.98±0.31°C	5°C	0.98±0.31°C
サンプル6	1.66±0.37°C	5°C	0.66±0.37°C

- ・外気温が高いとサーミスタの温度とMPPCの温度が違って見える(外気温が10°Cでは差が見えない、2サンプルで確認)
- ・基板とMPPCとの熱コンタクトに個体差がある?

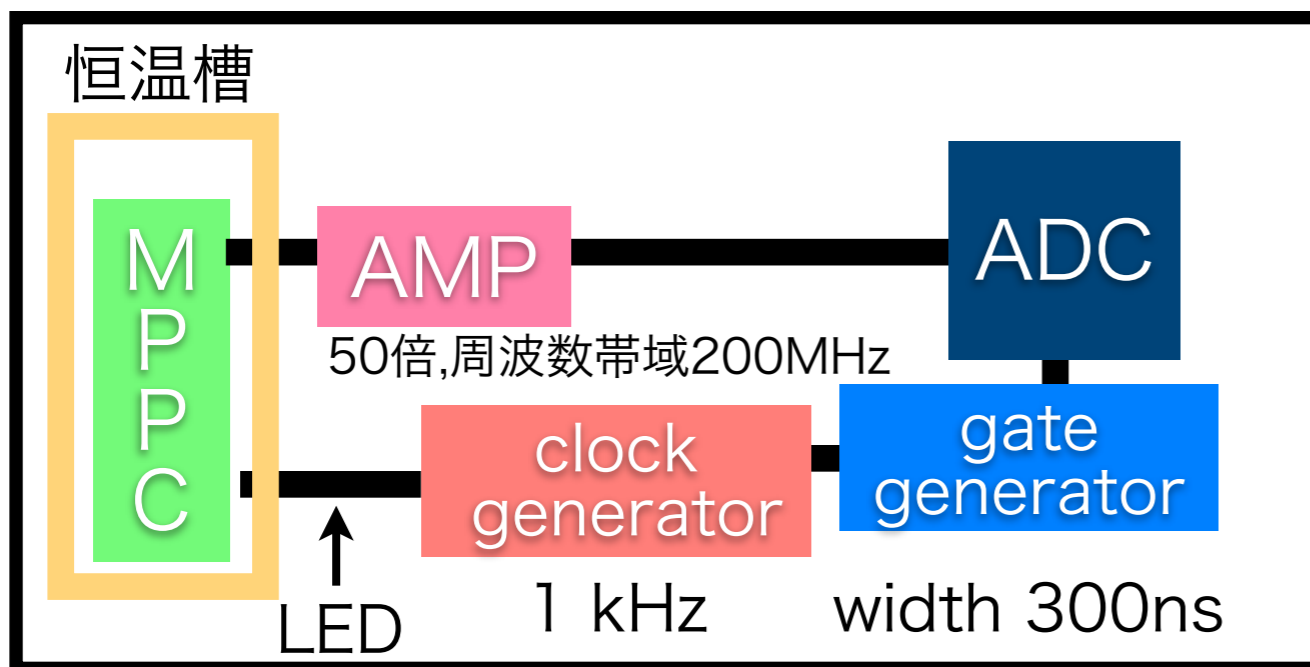
まとめ

- ゲインカーブ、ダークカウントノイズについては問題なし
- サーミスタも問題なし
- ペルチェの冷却特性は前バージョンと変化なし
- MPPCの冷却について
 - MPPC温度がサーミスタ温度より 2°C くらい高いものがある。
→MPPCと基板の熱コンタクトが悪い可能性
 - この程度の温度差ならば我々の使用では問題とならない

Appendix

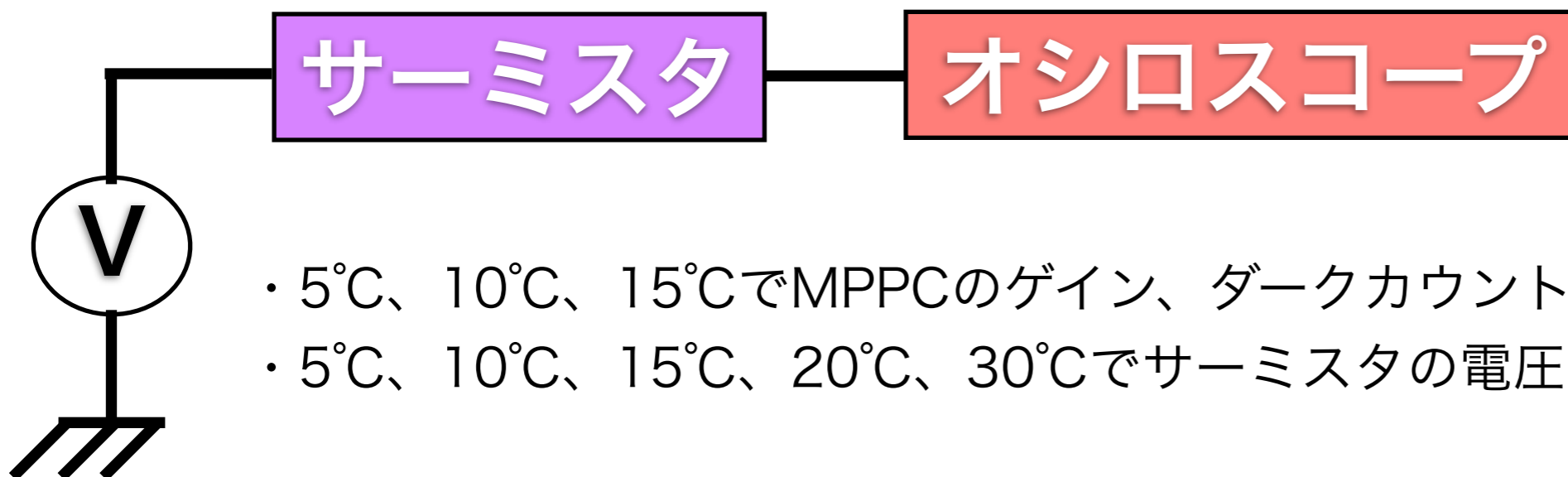
ペルチェoff時測定セットアップ

全体(MPPPC周りは後述)



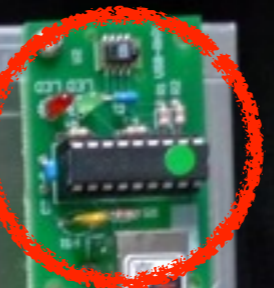
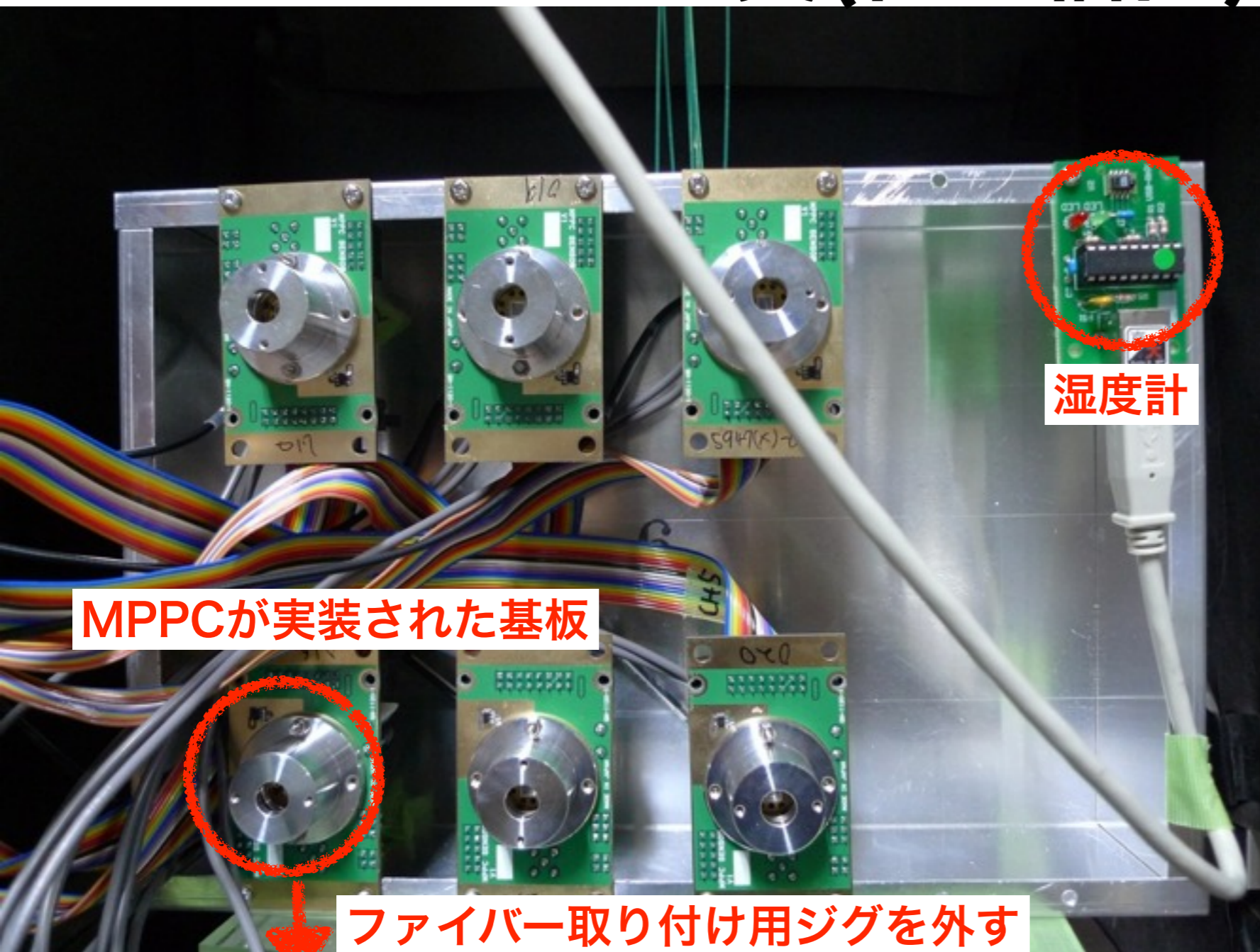
サーミスタ周り

(サーミスタは定電圧源で2V印加)



- 5°C、10°C、15°CでMPPPCのゲイン、ダークカウントノイズを測定
- 5°C、10°C、15°C、20°C、30°Cでサーミスタの電圧を測定

セットアップの写真(恒温槽内)

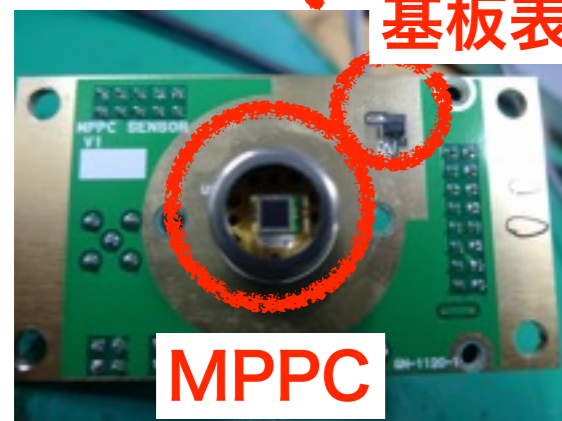


湿度計

MPPCが実装された基板



ファイバー取り付け用ジグを外す
基板表面温度モニター



MPPC

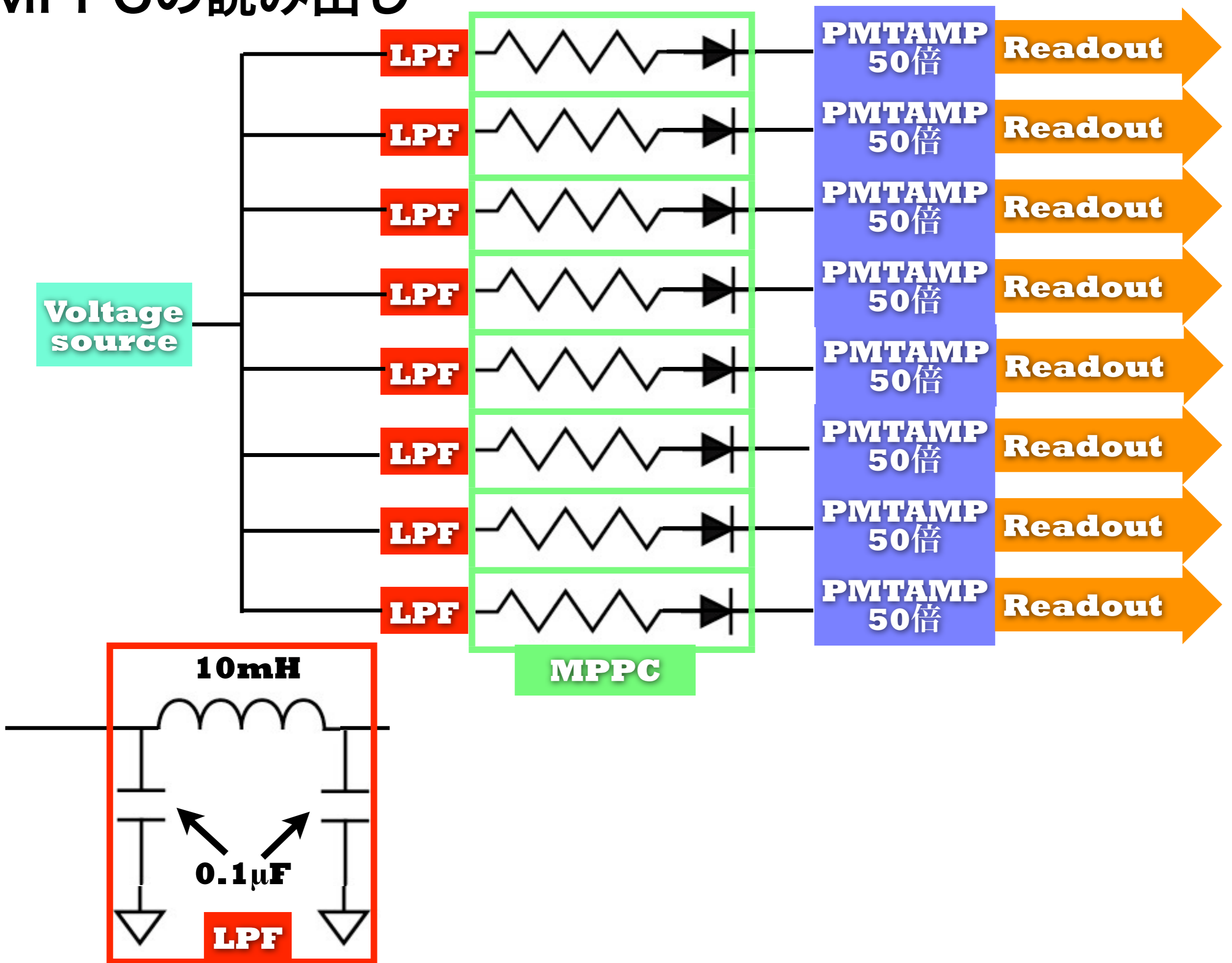
表



裏

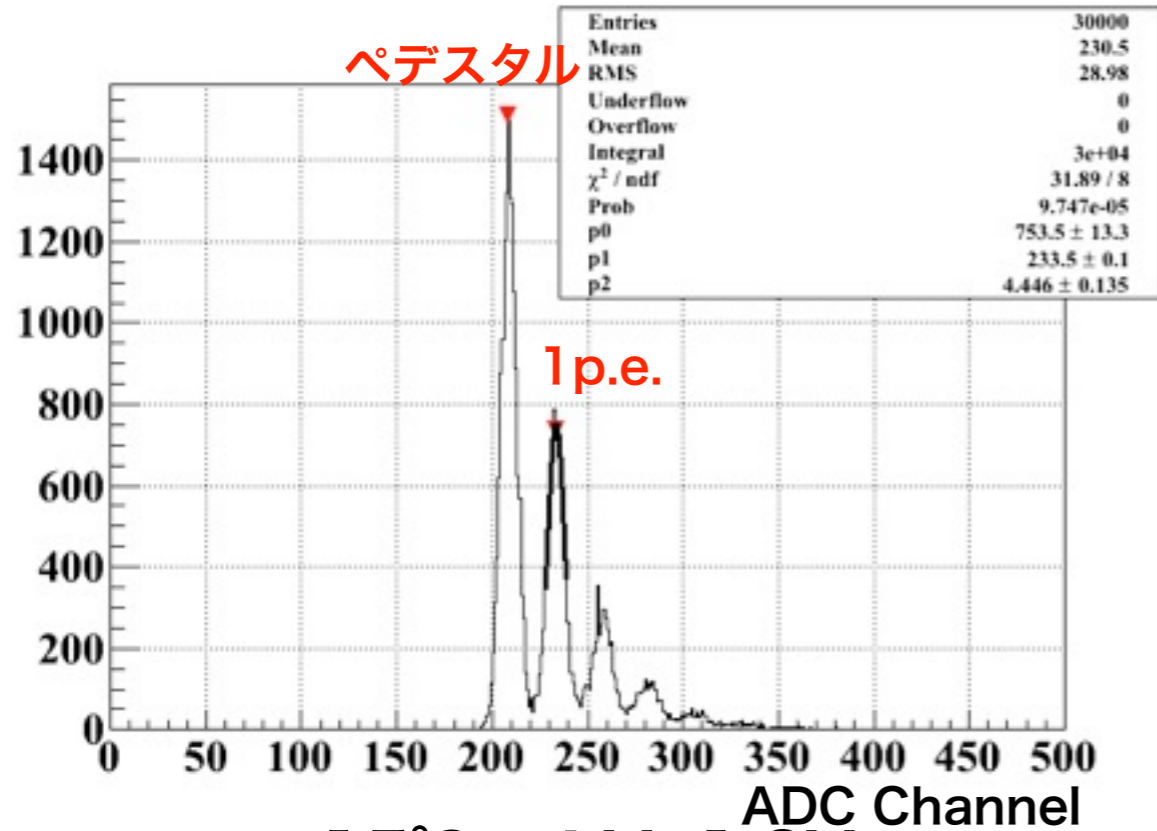
- 一度に6個～7個を同時測定
- MPPCを実装した基板を製作
- 定電圧源を用い、MPPCを並列に並べて測定
(次ページ回路図参照)

MPPCの読み出し

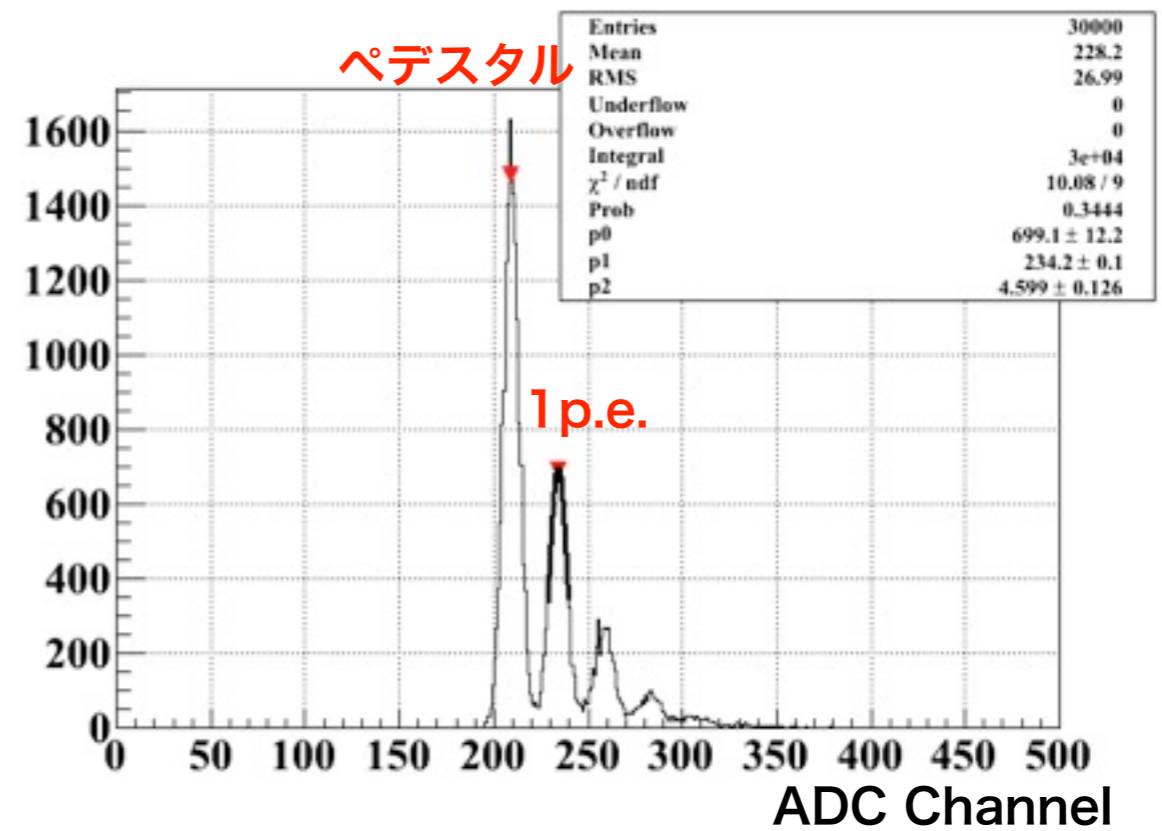


MPPPCのゲイン測定-ADCスペクトラムの例-

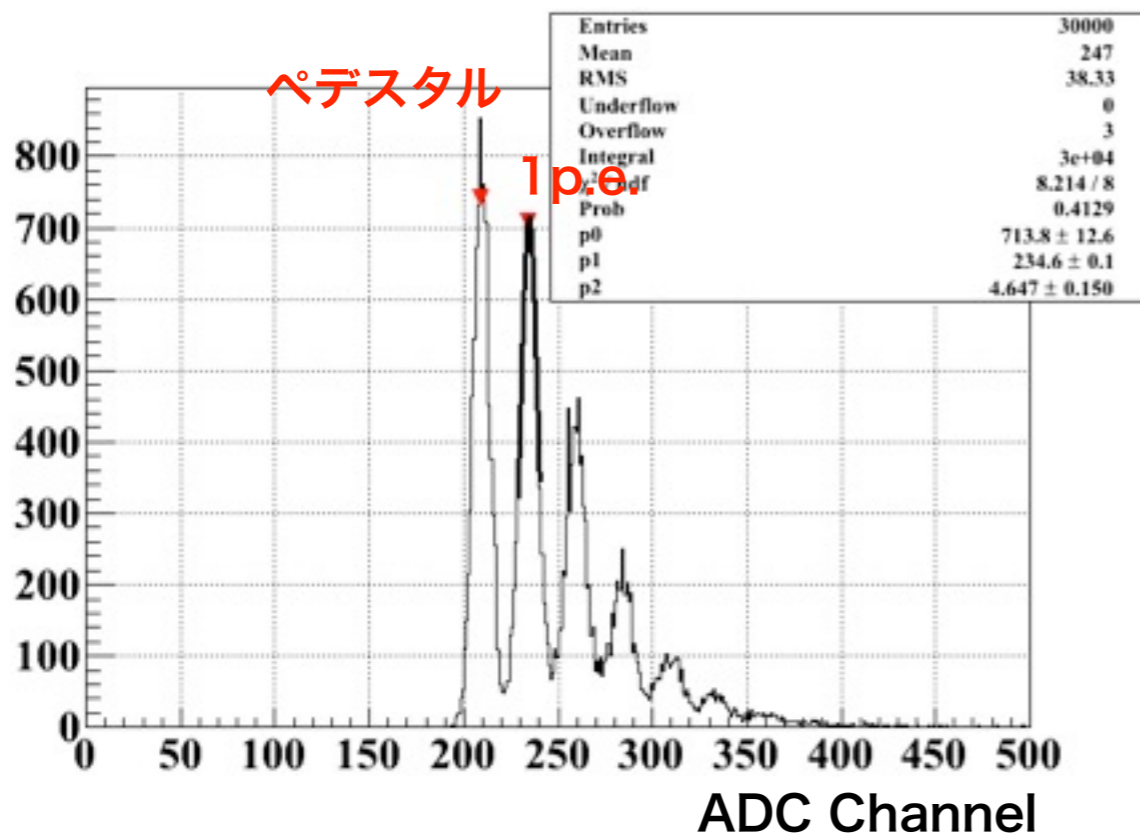
5°C、 $\Delta V=1.3V$



10°C、 $\Delta V=1.3V$



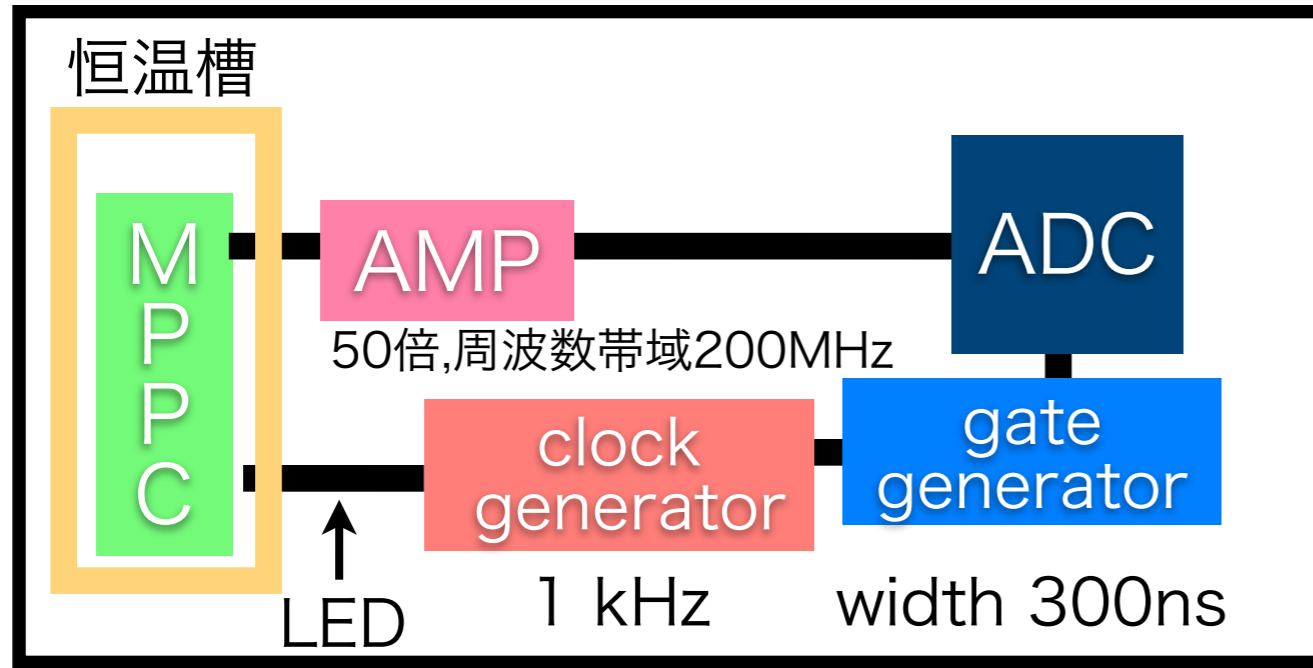
15°C、 $\Delta V=1.3V$



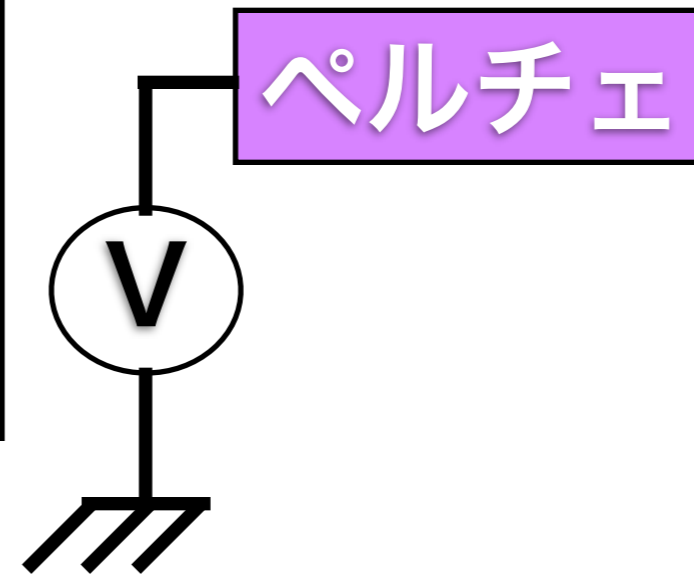
- どの温度でも綺麗ピークが見え、ゲイン測定ができた

ペルチェon時測定セットアップ

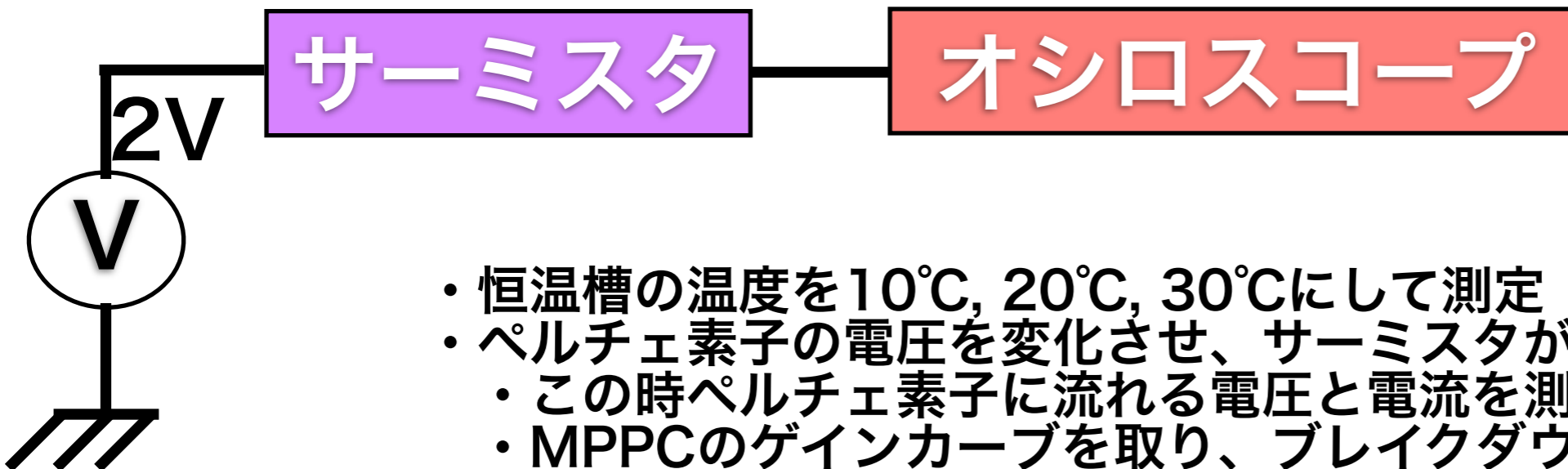
MPPC側



ペルチェ側



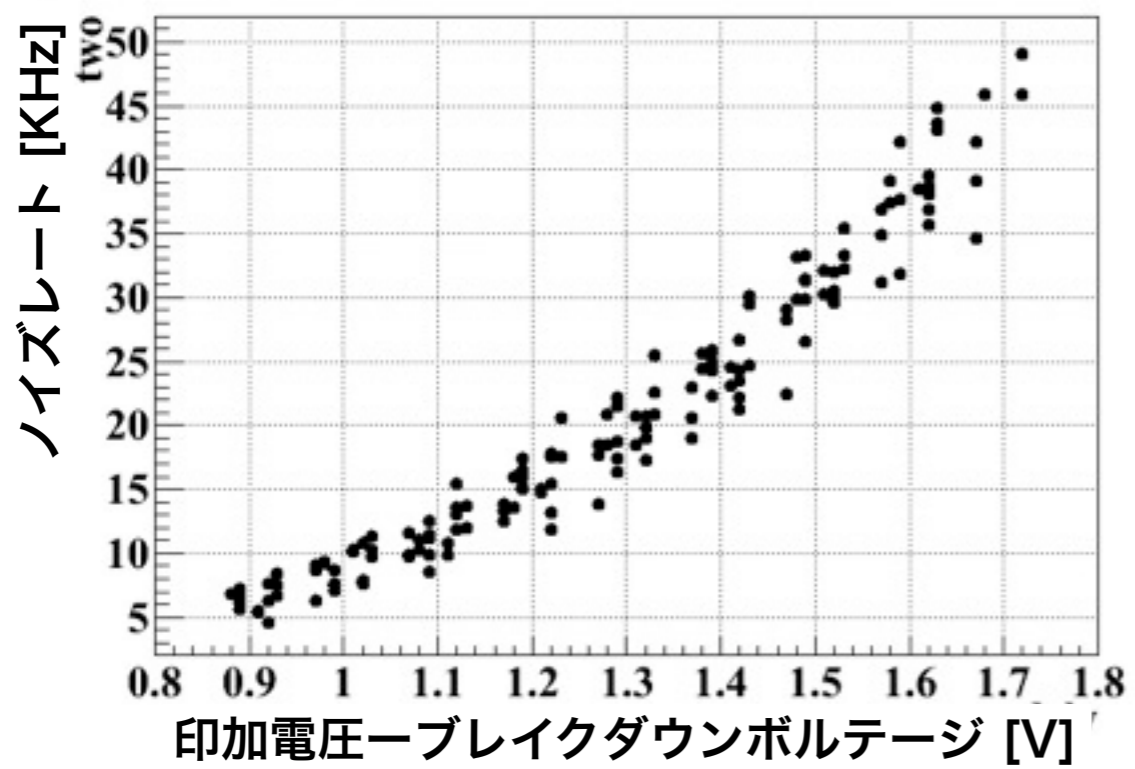
サーミスタ側



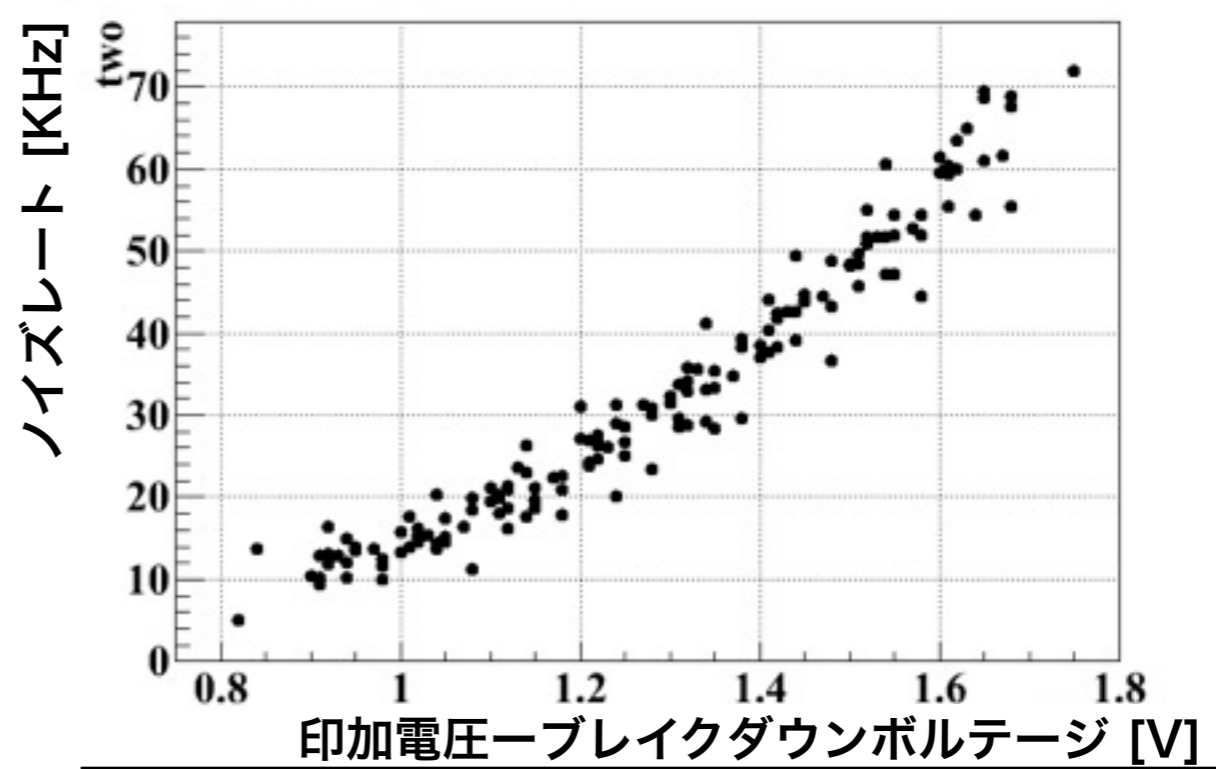
- 恒温槽の温度を10°C, 20°C, 30°Cにして測定
- ペルチェ素子の電圧を変化させ、サーミスタが5°Cを示す状態に保つ
 - この時ペルチェ素子に流れる電圧と電流を測定
 - MPPCのゲインカーブを取り、ブレイクダウンボルテージを測定

ダークカウントノイズ測定-2p.e.相当ノイズ-

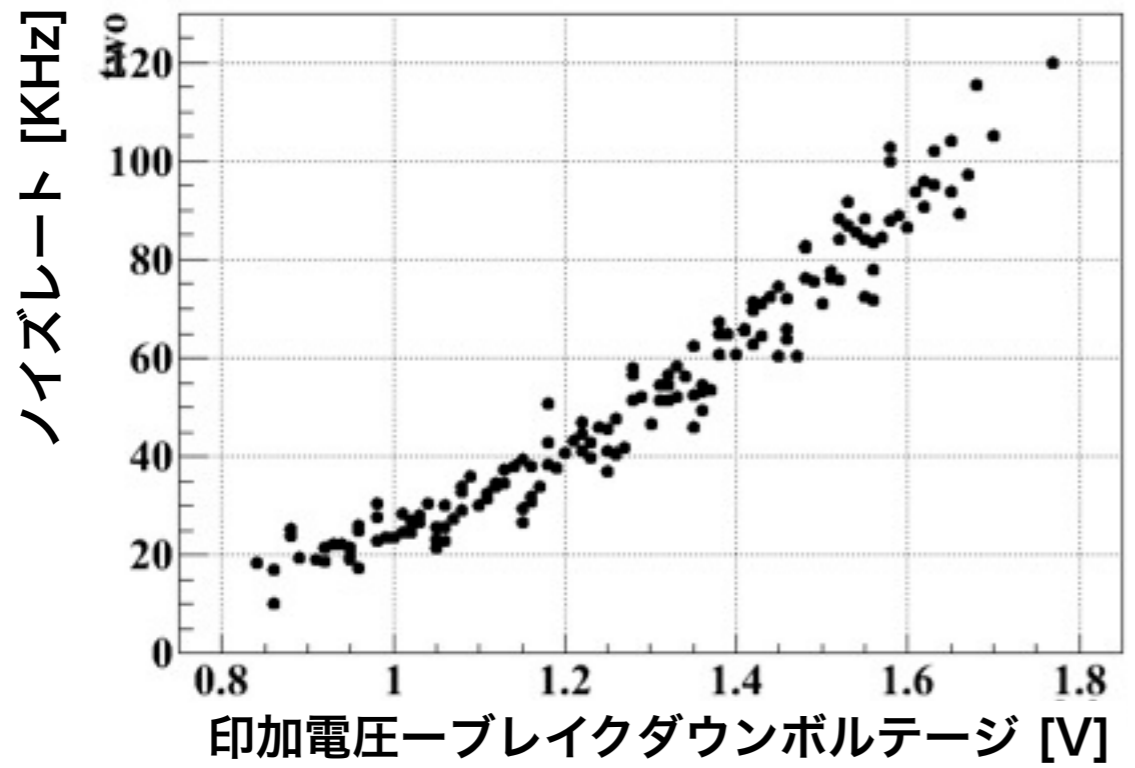
5°Cの時のダークカウントノイズ(20個重ね書き)



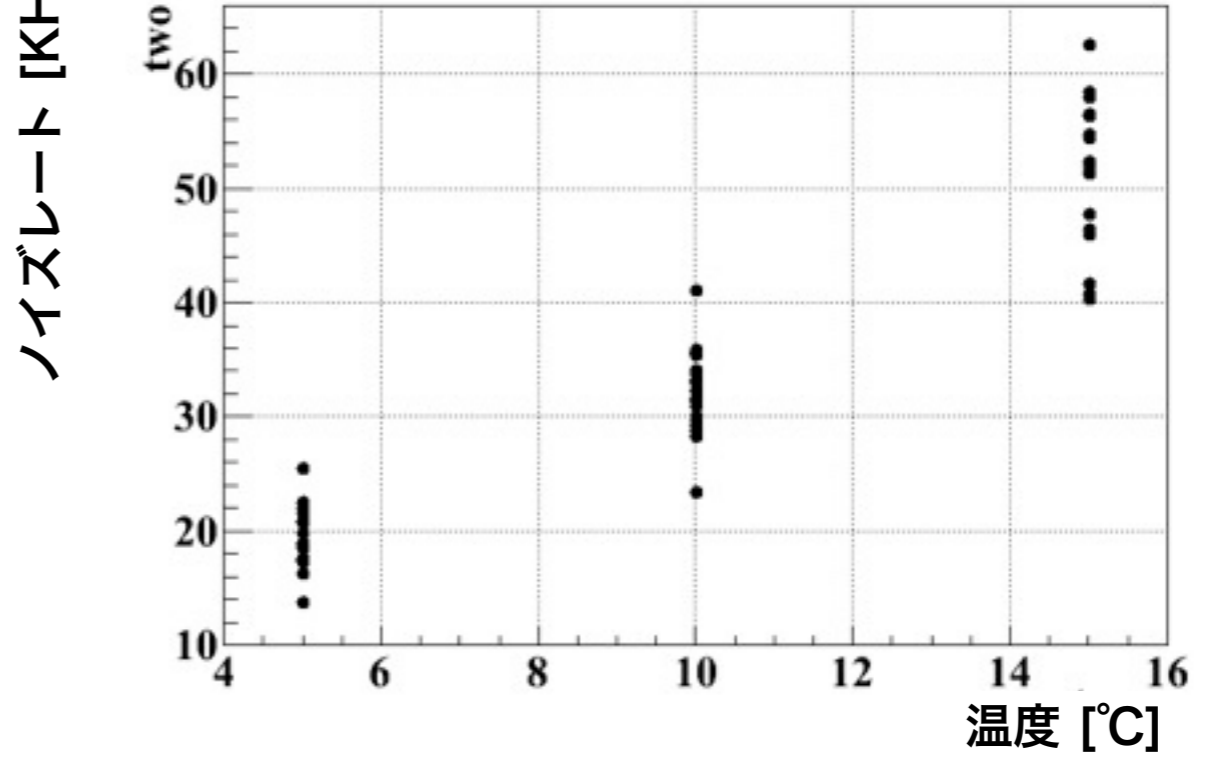
10°Cの時のダークカウントノイズ(20個重ね書き)



15°Cの時のダークカウントノイズ(20個重ね書き)

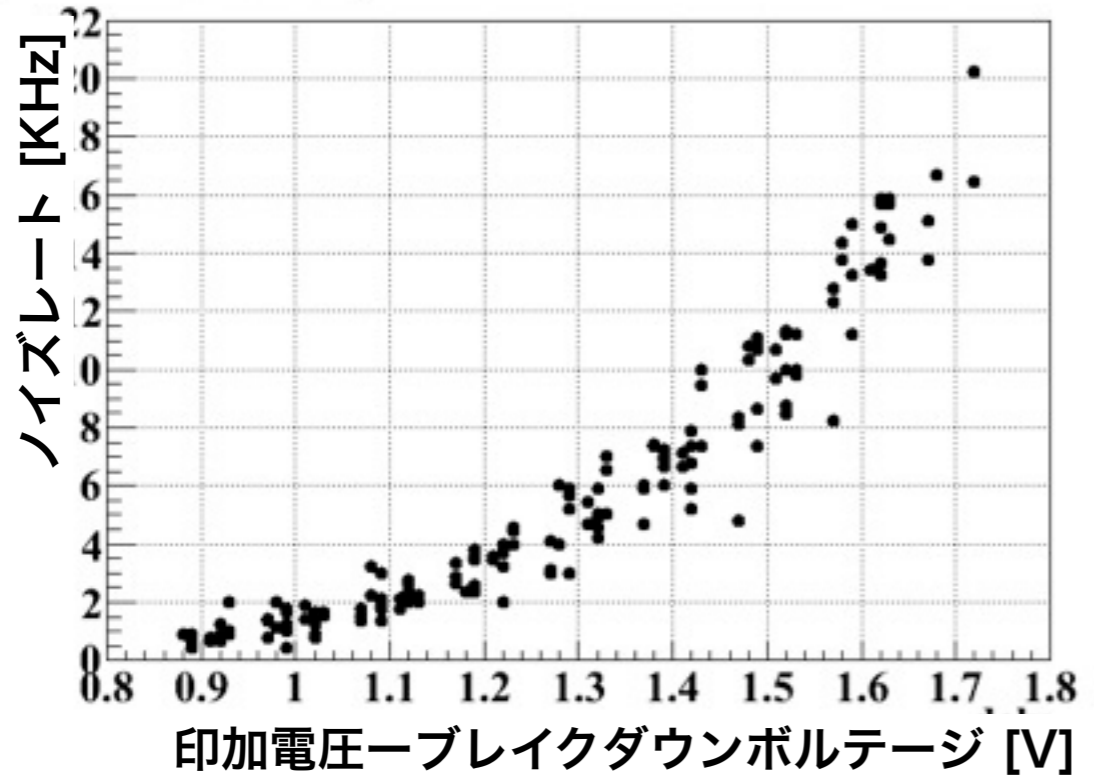


$\Delta V=1.3V$ の時のノイズ温度依存性(20個重ね書き)

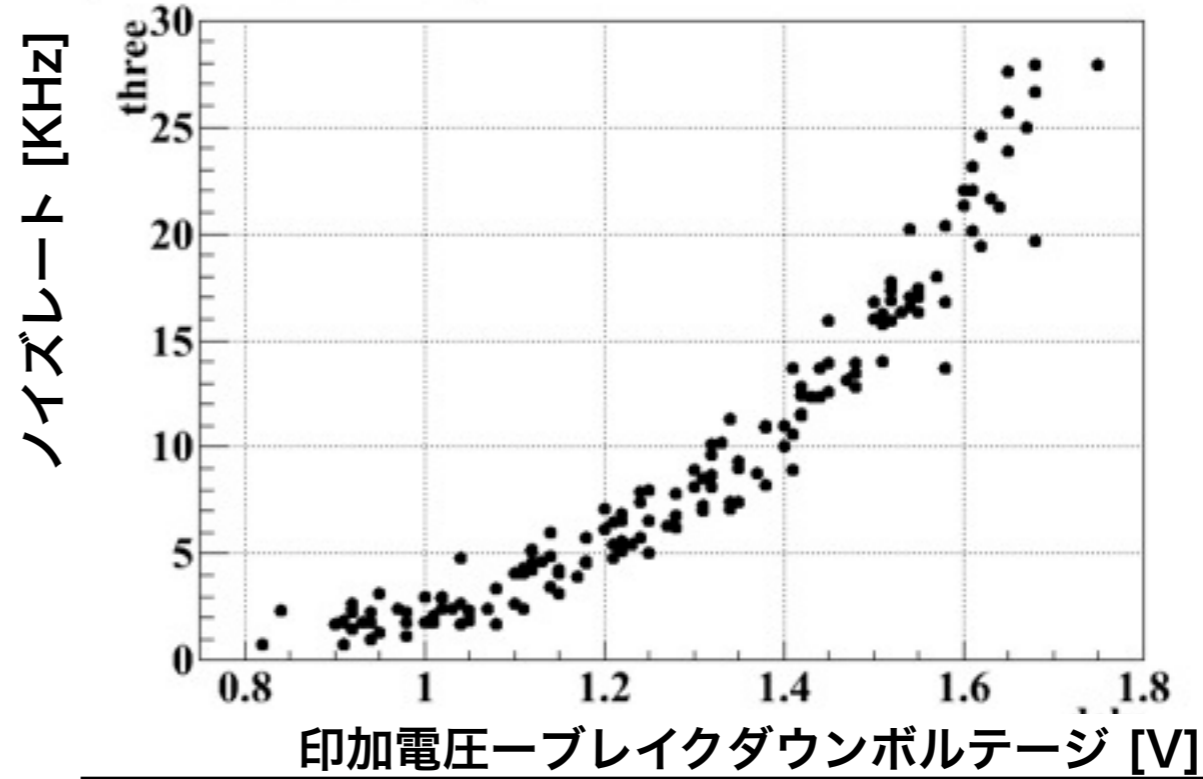


ダークカウントノイズ測定-3p.e.相当ノイズ-

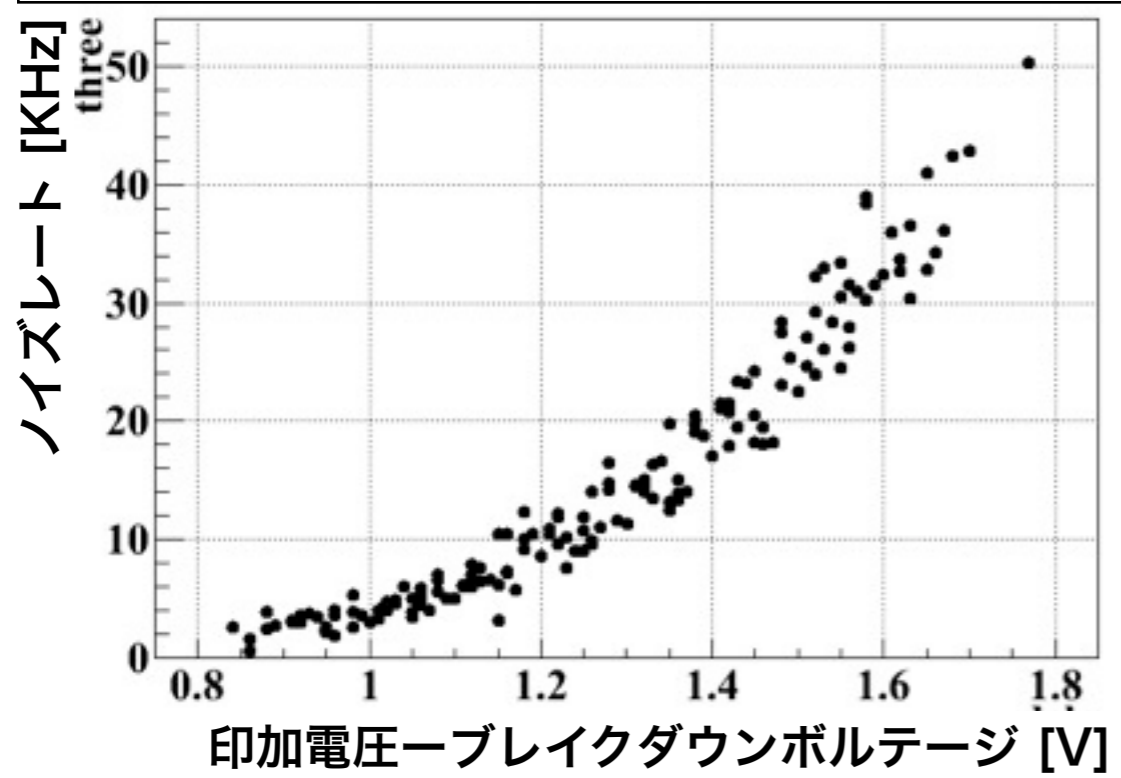
5°Cの時のダークカウントノイズ(20個重ね書き)



10°Cの時のダークカウントノイズ(20個重ね書き)



15°Cの時のダークカウントノイズ(20個重ね書き)



$\Delta V=1.3V$ の時のノイズ温度依存性(20個重ね書き)

