



修士論文

K⁰TO 実験に用いる荷電粒子 Veto 検出器の開発

京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻
物理学第二教室 高エネルギー物理学研究室

内藤 大地

2010年1月28日

Abstract

K^0TO 実験は J-PARC に建設された陽子シンクロトロンを用いて、 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊分岐比を測定する実験である。この崩壊モードは標準模型では CKM 行列の CP 非保存を表すパラメータである η の 2 乗に比例し、さらに理論的不定性が小さい。従ってこの崩壊モードの分岐比を測定することは標準模型のよい検証になる。この標準模型における崩壊分岐比の予言値は 2.5×10^{-11} と非常に小さいため、いかにバックグラウンド事象を小さく抑えられるかが重要になってくる。

K^0TO 実験では崩壊領域で崩壊した $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ のうち π^0 からの 2γ のエネルギーと入射位置を CsI カロリメーターで測定する。次に π^0 の質量を仮定し検出された 2γ から π^0 の崩壊位置を再構成する。さらに様々な運動学的カットを加えることにより K_L^0 崩壊由来の π^0 であるかを判定する。崩壊領域は全立体角と γ と荷電粒子を veto するための検出器群で覆われており、これにより π^0 以外何の粒子も生成されていないことを保証し signal を同定する。

本研究では崩壊領域を覆う veto 検出器群のうち CsI カロリメーターの直前に置かれる荷電粒子検出器 (CV) について述べる。CV はプラスチックシンチレータで構成されており、その役割は荷電粒子を検出し veto することである。

CV の役割で重要なのは $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 崩壊から生じる π^+ と π^- の検出である。このバックグラウンド事象は CsI で 2 を検出した際にある一定時間の間に CV で信号を検出した場合に CsI での信号を Veto することで抑制する。本研究ではこの崩壊モードを十分な検出効率で検出し veto するために必要な光量の見積もりを行った。また veto するために必要な時間幅とそれによる accidental loss の評価を行い、その結果から CV に課せられる時間分解能の要求を明らかにした。そしてこれらを達成するための新たな CV のデザインを考案した。具体的には CV は厚さが 3mm のシンチレータストリップから構成されており、シンチレータに溝が切られ波長変換ファイバーが埋め込まれるデザインにした。さらにファイバーの両端を MPPC によって読み出すデザインにした。MPPC は小型、安価であり高い光子検出効率 (440nm で 50% 程度) を誇る。しかしながら MPPC は PMT に比べると出力が 1/10 程度と小さく、アンプが必要であるという欠点がある。加えて熱電子によるノイズが 1p.e. レベルで数百 kHz ~ 1MHz 程度あるという欠点があるがこのノイズは冷却することにより減少することが分かっている。本研究では CV プロトタイプとして CV を構成するシンチレータストリップのうち一番大きい部分である 1m × 7cm × 3mm の部分を制作した。その過程でシンチレータの素材選定、読み出し用アンプの開発、ファイバーと MPPC の接続方法、MPPC の冷却システムの開発を行った。そして完成したプロトタイプに対してビームテストを行い、その性能評価を行った。そしてその結果を用いて本番実機での性能を評価し、このデザインが CV に課せられた要求を満たすことを明らかにした。

Contents

1	$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索実験	1
1.1	理論的背景	1
1.1.1	CKM 行列	1
1.1.2	$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の物理	2
1.2	$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索実験	3
1.3	E391a 実験	3
2	$K^0 TO$ 実験	5
2.1	コンセプト	5
2.2	シグナル同定方法	6
2.3	検出器	7
2.3.1	CsI カロリメーター	7
2.3.2	Barrel Photon Veto	8
2.3.3	collar counters	9
2.3.4	荷電粒子 veto 検出器	9
2.3.5	Beam hole veto 検出器	10
2.4	バックグラウンド	10
2.5	ビームライン	11
3	荷電粒子 Veto 検出器 (CV)	14
3.0.1	CV に関するバックグラウンド	14
3.1	E391a 実験でのデザイン	17
3.2	$K^0 TO$ 実験でのデザイン	18
3.3	読み出し検出器に対する要求性能の決定	20
3.3.1	不感率の要請	20
3.3.2	CV での閾値の見積もり	21
3.3.3	timing window の決定	22
3.3.4	accidental loss の見積もり	25
3.4	CV の読み出しデザイン	28
3.5	まとめ	29
4	Multi Pixel Photon Counter(MPPC)	32
4.1	MPPC の動作原理	32
4.2	MPPC の特徴	33
4.2.1	出力波形	34
4.2.2	MPPC 起源ノイズ	35
4.3	CV 用 MPPC	36
4.3.1	ブレイクダウンボルテージの温度依存性	40
4.3.2	ダークカウントノイズの温度依存性	41
4.4	まとめ	44
5	プロトタイプ CV の開発	45
5.1	デザイン	45
5.2	シンチレータの決定	45
5.2.1	光量比較実験セのットアップ	47

5.2.2	実験結果	49
5.3	アンプの開発	51
5.4	アンプに要求される性能の概要	52
	増倍率の決定	53
5.5	アンプに対する要求性能の決定	53
	周波数帯域の決定	53
	ダイナミックレンジの決定	55
5.5.1	開発したアンプのデザイン	57
5.5.2	開発した AMP の性能評価	58
	インパルス応答	59
	電荷に対するダイナミックレンジ	60
	電圧に対するダイナミックレンジ	61
	オフセットのレンジ	62
5.6	MPPC-ファイバー接続システムの開発	62
5.6.1	デザインコンセプト	62
5.6.2	デザイン	67
5.7	冷却システムの開発	69
5.7.1	大気中におけるペルチェ冷却試験	69
5.8	プロトタイプ制作 (シンチレータ + ファイバーの接着)	75
5.9	まとめ	79
6	プロトタイプ CV の性能評価	80
6.1	セットアップ	80
6.2	ペルチェ冷却システムの評価	83
6.3	uniformity 測定	83
6.3.1	解析方法	87
6.4	まとめ	90
7	実機に対するプロトタイプ CV での性能評価	96
7.1	時間分解能の評価	96
7.2	実機における MPPC 起源ノイズによるロス	96
8	結論	99
	Appendix	101
	Appendix A シミュレーション方法	101
A.1	TOF シミュレーション	101
A.2	accidental rate の見積もり	101

1 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索実験

この章ではまず初めに $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索実験の物理的動機としての理論的背景について述べ、次にこれまでに行われたこの崩壊モードの探索 実験について述べる。

1.1 理論的背景

現在観測されている CP 対称性の破れは CKM matrix の複素位相によって説明されている [1]。しかし CKM matrix だけでは、宇宙の物質反物質比を定量的に説明できないこともまたわかっており、これ以上のことを説明するためにはおそらく現在の標準理論を 超える物理を知る必要がある。この節ではおもに CKM 行列と $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 分岐比を測ることの意義について説明する。

1.1.1 CKM 行列

CKM matrix は

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

と表され、この行列の Wolfenstein パラメータ表示 [2] は

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

となる。またこの行列のユニタリー条件より

$$V_{ub}^* V_{ud} + V_{cb}^* V_{cd} + V_{tb}^* V_{td} = 0 \quad (1.3)$$

が成り立つ。この式に (1.1)、(1.2) 式を代入し、さらに $\lambda \simeq 0.22$ とする実験結果から $V_{ud} = 1 - \lambda^2/2 \simeq 1$ と近似すると

$$(\rho + i\eta) - 1 + (1 - \rho - i\eta) = 0 \quad (1.4)$$

となり、ユニタリー条件を ρ と η の 2 成分のみで書き表すことが出来る。この条件を図で表したものが図 1.1 であり、ユニタリー三角形と呼ばれる。また CKM 行列で CP 対称性の破れ具合は複素パラメータの η に比例することが分かっている。よってユニタリー三角形の高さに相当する η を求めることによって CKM 行列における CP の破れ具合を決めることが出来る。

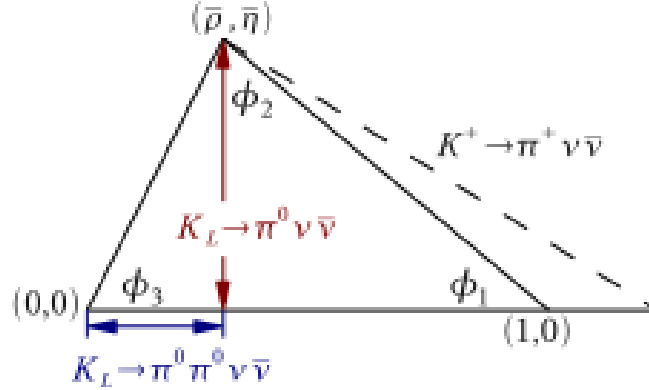


Fig. 1.1 ユニタリー三角形。 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 分岐比の測定は η を測ることに相当し、 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 分岐比測定は ρ の測定、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 分岐比測定は斜辺の測定に相当する。

1.1.2 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の物理

標準模型の枠組みでは $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ のダイアグラムは図 1.2 のように表される。この崩壊モードの分岐比は

$$\text{Br}(K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) = (2.20 \pm 0.07) \times 10^{-10} [\text{Im}(V_{ts}^* V_{td}) X(x_t)]^2 \quad (1.5)$$

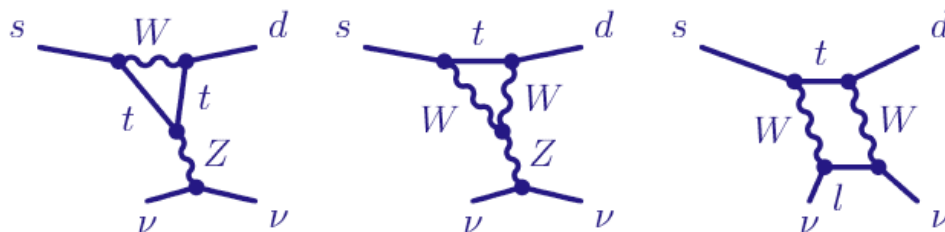
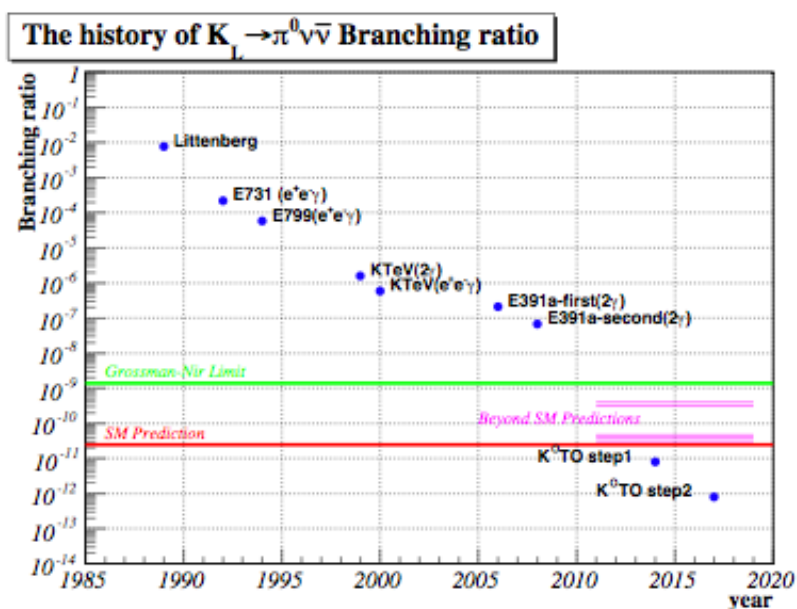
で表され、現在 $(2.49 \pm 0.39) \times 10^{-11}$ と予想されている [3]。ここで $X(x_t) = 1.464 \pm 0.041$ は Inami-Lim loop function の値 [4] であり、 x_t はトップクォークと W ボソンの質量の比の 2 乗である。また $\text{Im}(V_{ts}^* V_{td})$ は Wolfenstein パラメータによる記述で表すと、 $\text{Im}(V_{ts}^* V_{td}) = A^2 \lambda^5 \eta$ となり、この崩壊モードの分岐比が η^2 に比例することが分かる。つまり $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の分岐比を測定することにより CKM 行列における CP 対称性の破れの直接検証が出来る。

崩壊分岐比を予言する際にはハドロン間の相互作用による寄与が理論的不定性となることが多い。一方本崩壊モードのハドロン行列はよく測られている $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$ のハドロン行列とアイソスピン対称であることからその要素を正確に知ることが出来るため [5]、この理論的不定性が非常に小さく gold-plated mode と呼ばれている。またこの崩壊モードには Grossman と Nir によって $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ の分岐比から制限される、理論モデルによらない分岐比の上限值 (Grossman-Nir limit)

$$\text{Br}(K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 1.4 \times 10^{-9} \quad (1.6)$$

が示されている [6]。さらにこの崩壊はループダイアグラムを介して起こる物理過程であるため、中間状態に未知の粒子の寄与があればそれは分岐比の変化として観測出来ることが期待される。従って Grossman-Nir limit を超えた領域での標準模型からの分岐比のズレが新物理に対する有力な証拠となる。現在このモードの直接測定による分岐比の上限は $K^0 TO$ 実験のパイロット実験である E391a 実験により、

$$\text{Br}(K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 2.6 \times 10^{-8} \quad (1.7)$$

Fig. 1.2 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊のダイアグラム。Fig. 1.3 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索実験の歴史。2010 年以降は K^0TO 実験の予定。

という値がつけられている [7]。

1.2 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索実験

$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ は前節で説明した通り物理学的に魅力のあるモードだが、非常に小さい分岐比と始状態終状態ともに中性粒子しか含まない実験の困難さのため信号自身は未観測である。図 1.3 にこれまでの $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索実験の歴史を示す。この図にある通り K^0TO 実験では世界で初めて Grossman-Nir limit を超えた領域での崩壊探索を行い、崩壊事象の発見を目標としている。この過去に行われた探索実験のうち、 K^0TO 実験のパイロット実験である E391a 実験について記述する。

1.3 E391a 実験

E391a 実験は茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構の 12GeV 陽子シンクロトロン (KEK-PS) を用いて行われ、2004 年 2 月から 2005 年 12 月まで 3 度の物理ランを行った。この実

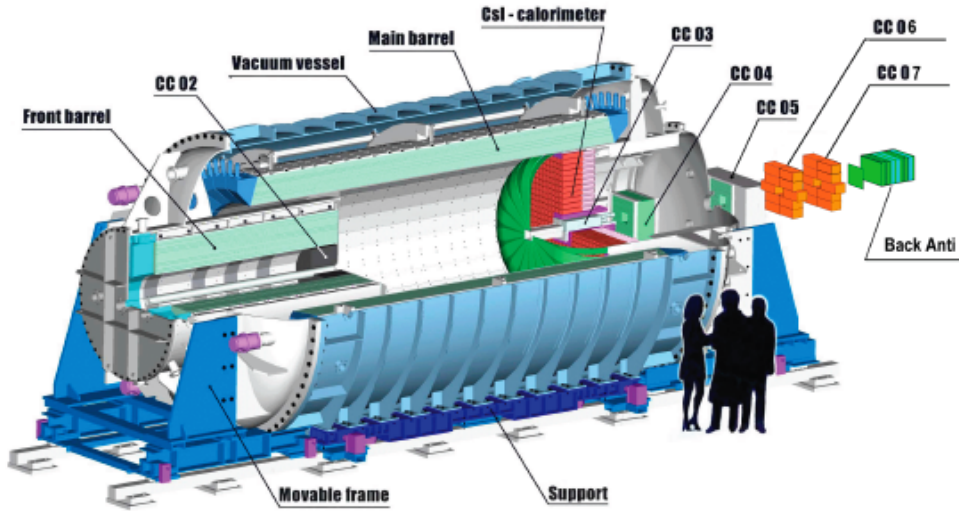


Fig. 1.4 E391a 実験の検出器群。

験は $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索に特化した世界初の探索実験であると同時に $K^0 TO$ 実験のパイロット実験でもあった。まず最初に K_L^0 ビームラインについて説明する。KEK-PS からの一次陽子ビームをプラチナターゲットに入射し、出てきた二次ビームを一次ビームに対して 4° で取り出すことで K_L^0 ビームを生成する。このビームをビームライン中に置かれたコリメーターによってコリメートすることでターゲットから見た立体角を $12.6 \mu\text{str}$ と非常に細いビームにして崩壊領域に導く。

つぎに E391a 実験の検出器群を図 1.4 に示す。まず $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊のうち π^0 からの二つの γ 線を CsI 電磁カロリメータで検出する。そして崩壊領域の全立体角を γ 線及び荷電粒子 veto 用検出器で囲う。これにより 1 つの π^0 以外の粒子が何も無かったことを確認し、崩壊事象の同定を行う。またビーム中に存在する中性子と検出器内の残留ガスが反応して π^0 が生成されることを防ぐため、崩壊領域は 10^{-5}Pa という高真空環境に置かれている。E391a 実験の $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊に対する解析はすでに終了し、前節で述べたように現在の分岐比の上限値をこの解析結果が決めている。

2 K^0TO 実験

K^0TO 実験は茨城県東海村に建設された大強度陽子加速器施設 (J-PARC) で 2011 年から行われる予定の $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索実験である。現在 J-PARC 陽子シンクロトロンは 30GeV で運転をしている。J-PARC は世界最大のビーム強度を目指しており、デザイン値の最大強度を達成した暁には spill あたりの陽子数は 2×10^{14} proton on target に達すると見込まれている。これは E391a 実験で用いられた KEK PS の約 100 倍の強度である。 K_L ビームは中性ビームラインであるので不可避免的に γ 線や中性子が存在する。特にビーム外周付近に分布する中性子はハロー中性子と呼ばれ、E391a 実験では最大のバックグラウンド源 (後述) であった。従ってビーム強度が上がる K^0TO 実験では如何にしてこのハロー中性子の数を減らせるかが重要となってくる。そこでこの目的を達成するために K^0TO 実験では新たにビームラインのデザインを考案し、建造した。2010 年 1 月現在この完成したビームラインの評価を行うため K^0TO 実験の検出器群の置かれる場所に検出器を置き、ビームラインの評価を行っている。このビームラインについては 2.1.2 節で説明する。次に K^0TO 実験の実験原理について説明する。 K^0TO 実験の実験原理も基本的に E391a 実験と同じである。この章では前章では少ししか触れなかった実験原理について 2.1 節の冒頭でもう少し詳しく述べる。また K^0TO 実験で置かれる検出器群は再利用できるものに関してはアップグレードを施し、E391a で問題が明らかになったものはデザインからやり直して建設する。

2.1 コンセプト

$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊では ν が検出困難なため終状態として観測できる事象は π^0 以外何も存在しないという事象である。 π^0 は平均寿命 $\sim 10^{-16} s$ で $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ に崩壊分岐比 98.8% で崩壊する。従って K^0TO 実験では K_L の生成位置と π^0 の崩壊位置は同一地点と見なして良い。 K^0TO 実験ではこの π^0 以外の粒子が存在しないこと保証し、検出した π^0 に対して運動力学的カットを施すことで $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊事象を同定する。そのために

- (1) CsI カロリメーターで γ 線の位置とエネルギーを測定する。
- (2) K_L の崩壊領域を全立体角にわたり Veto 検出器で覆い 2γ 以外の粒子が存在しないことを保証する。

このために考案された K^0TO 実験における全検出器群を図 2.1 に示す。 K^0TO 実験での崩壊領域は図中の FB と示された検出器の上流端を $Z=0$ とした時の $Z=3 \sim 5m$ である。本研究の題材である荷電粒子 veto 検出器 (CV) はこの図中の黄色い四角で囲まれた部分で CsI カロリメーターの直前に置かれ、荷電粒子を検出し、荷電粒子を含む K_L^0 崩壊事象を veto する。崩壊領域は E391a 実験と同様に $10^{-5} Pa$ という高真空環境に置かれる。これはビーム中に存在する中性子と検出器内の残留ガスが反応して π^0 が生成されることを防ぐためである。この関係で CV も $10^{-1} Pa$ の真空

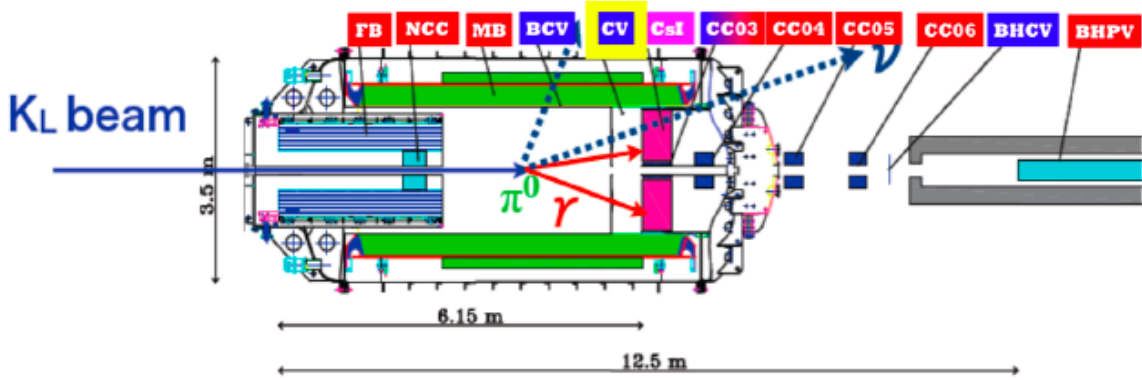


Fig. 2.1 K^0TO 実験の検出器群。赤が γ 線 veto、青が荷電粒子 veto、紫が CsI カロリメーターを示す。また、黄色の枠で囲まれた部分が本研究で題材となった CV である。

中に置かれることになる。(1) については 2.1.1 節で説明し、(2) については 2.1.3 節で説明する。

2.2 シグナル同定方法

ここでは CsI カロリメーターで 2 つの γ 線の位置とエネルギーを測定した後どのようにしてその γ 線が π^0 崩壊起源であるか判定する手法を説明する。判定には主に以下の二つのポイントがある。それは

1. 崩壊位置 (Z_{vtx}) の特定

K^0TO 実験では FB の上流端を $Z=0$ とし、 $3m < Z_{vtx} < 5m$ の範囲を崩壊領域として用いている。

2. π^0 の横方向運動量 (P_t) の計算

本崩壊モードで生成される π^0 は比較的高い P_t を持っており、この条件を信号判定に用いている。

である。図 2.2 のように崩壊位置から CsI 上の 2 つの γ までの距離をそれぞれ d_1 、 d_2 、CsI に落としたエネルギーをそれぞれ E_1 、 E_2 とし崩壊位置から CsI の z 方向の距離を d_z とおく。この時に崩壊位置が z 軸上にあると仮定すると幾何学的関係から

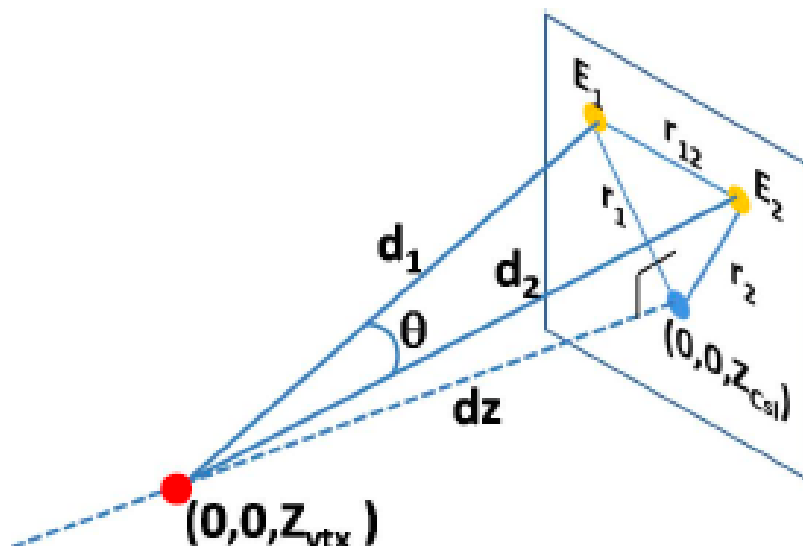
$$r_{12}^2 = d_1^2 + d_2^2 - 2d_1d_2 \cos \theta \quad (2.1)$$

$$d_1 = \sqrt{r_1^2 + d_z^2} \quad (2.2)$$

$$d_2 = \sqrt{r_2^2 + d_z^2} \quad (2.3)$$

が成り立つ。さらに 4 元運動量の保存より π^0 の質量を M_π とすると

$$M_\pi^2 = 2E_1E_2(1 - \cos \theta) \quad (2.4)$$

Fig. 2.2 2つの γ 線のCsI上での位置とエネルギー、崩壊位置の関係

が成り立つ。CsIではこれらのパラメータの内、位置測定で r_1 、 r_2 、 r_{12} を測定する。またエネルギー測定で E_1 、 E_2 を測定する。従って未知の変数は d_z と θ 、 d_1 、 d_2 だけとなる。測定した値を代入してこれらの式を解き d_z を求め、CsI表面のZ位置を Z_{CsI} とすると、 $Z_{CsI} - d_z = Z_{vtx}$ を求めることができる。これにより再構成された位置が崩壊領域 ($3m < Z_{vtx} < 5m$)にあるかどうかを見る。さらにここから2つの γ 線の運動量ベクトルが計算でき、そこから π^0 の横方向運動量(P_t)を計算することができる。 K^0TO 実験ではこの二つのパラメータを使い崩壊位置や P_t に対する制限を課し、さらに2つの入射 γ の相対位置やエネルギーの和などもcut条件に課して[8]、CsIにhitした 2γ が $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊起源かどうかを判定する。

2.3 検出器

ここでは本研究テーマであるCV以外の K^0TO 実験の検出器について説明する。

2.3.1 CsI カロリメーター

図 2.3 に K^0TO 実験で用いるCsIカロリメーターの正面図を示す。このカロリメーターはE391a実験では $7\text{cm} \times 7\text{cm} \times 30\text{cm}$ のCsI結晶を使用していたのに対して、 K^0TO では $2.5\text{cm} \times 2.5\text{cm} \times 50\text{cm}$ と、 $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 50\text{cm}$ の2種類のCsI結晶を使う。このCsIには、アメリカのフェルミ国立研究所(FNAL)で行われたKTeV実験で使用されたものを再利用する。CsIは中心部に $2.5\text{cm} \times 2.5\text{cm} \times 50\text{cm}$ の結晶を2240個、その外側に $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 50\text{cm}$ の結晶を476個並べて使用する。次にCsIの変更によりE391a実験より向上した点を述べる。

K^0TO 実験ではCsIをE391aの実験より細分化することにより位置分解能とクラスター分離能力が向上している。クラスター分離能力とは一つの入射粒子が作るシャワーが近接した複数の

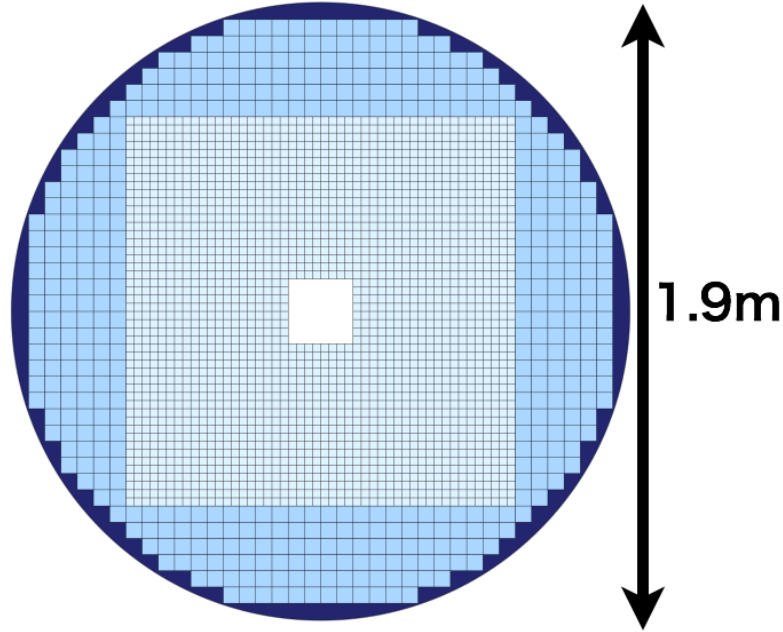


Fig. 2.3 K^0TO 実験に用いられる CsI カロリメーター。

CsI 結晶に作る集合をクラスターと定義すると、2つ又はそれ以上の粒子が作るクラスターを分離する能力である。これにより複数のクラスターを一つのクラスターと間違える事象を減らすことが出来る。また E391a よりも z 方向に長くなった事で、電磁シャワーの漏れによる γ 線のエネルギーの不定性が小さくなっている。これにより、CsI で検出された 2 つの γ 線から再構成される π^0 の Z_{vtx} の不定性を小さくすることが出来る。さらにこれにより γ 線の不感率も低下しており、CsI の Veto の能力も向上している。

2.3.2 Barrel Photon Veto

Barrel Photon Veto の役割は K_L^0 の崩壊により生成される γ 線を検出し、veto することである。Barrel Photon Veto は崩壊領域の前方にある Front Barrel(FB) と崩壊領域を覆う Main Barrel(MB) の総称である。FB の役割は崩壊領域よりも前で崩壊した K_L^0 からの γ 線及び崩壊領域で崩壊し上流に飛んできた γ 線を検出し veto することである。一方 MB の役割は崩壊領域で崩壊した K_L^0 からの γ 線を検出し veto することである。この検出器は鉛とシンチレーターによる sampling calorimeter で、読み出しに波長変換ファイバーを使用している。これらの検出器は E391a 実験で使用したものを K^0TO 実験でも使う予定であるが、MB については γ 線に対する

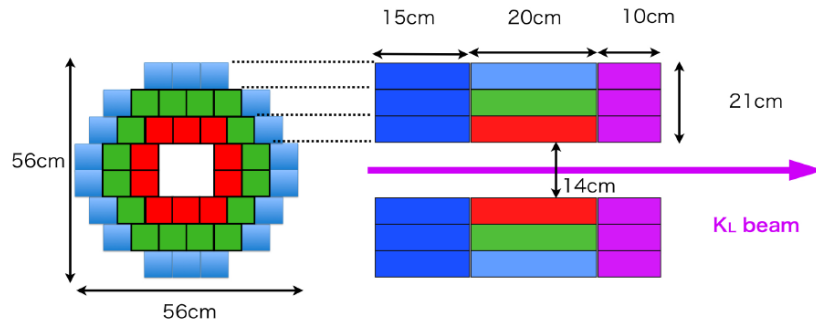


Fig. 2.4 NCC のデザイン。

検出効率を上げるため、MB の内側にさらに鉛とシンチレーターによる sampling calorimeter を追加する予定である。

2.3.3 collar counters

Collar Counter はビーム軸に沿って検出器の外へ逃げる粒子を捕まえるために、ビーム付近に設置された検出器の総称であり、NCC、CC03～CC06 のことを指す。まず NCC について説明する。NCC は崩壊領域から上流に行く γ 線を捕え、さらに上流で崩壊した K_L^0 崩壊から生じた γ 線を排除する役割を持つ。E391a 実験でも同様の目的で CC02 と呼ばれる検出器が設置されていた。この検出器は FB、MB と同じく鉛とシンチレータの sampling calorimeter で波長変換ファイバーによって読み出しを行った。E391a 実験ではこの検出器とビーム中の中性子の相互作用によって生成された π^0 が 1 番大きなバックグラウンド源となった。この原因は検出器中に鉛の不感領域が存在し、CC02 内で生成した π^0 を veto しきれなかったためである。これを受けて考案されたのが NCC である (図 2.4)。NCC は CsI 結晶で構成され、不感領域が極めて少ないデザインとなっている。結晶は 3 分割されており、読み出しは波長変換ファイバーによって行う。結晶が 3 分割されているのはビーム周辺に存在するハロー中性子のフラックスを K_L^0 崩壊事象起源の粒子と区別し測定するためである [9]。

次に CC03 について説明する。CC03 は CsI 結晶できており、ビームホール中から来る粒子を veto するために CsI カロリメーターの内側に設置される。 K^0TO 実験ではさらに下流に向かってビームホールを抜けてくる粒子の veto のために CC04～CC06 が設置される。

2.3.4 荷電粒子 veto 検出器

K^0TO 実験では荷電粒子 veto 検出器として Barrel Charged Veto(BCV) と Charged Veto(CV)、Liner Charged Veto(LCV) の 3 つがある。これらの検出器は崩壊領域で K_L^0 が荷電粒子を含む崩壊を起こした事象を検出するのが役割である。これらの検出器は全てプラスチックシンチレータで構成され、BCV は MB の内側に沿って、LCV は CC03 の内側に沿って置かれる。なお BCV に関しては E391a 実験で使用したものを再利用する予定である。本研究主題である CV については第 3 章で記述する。

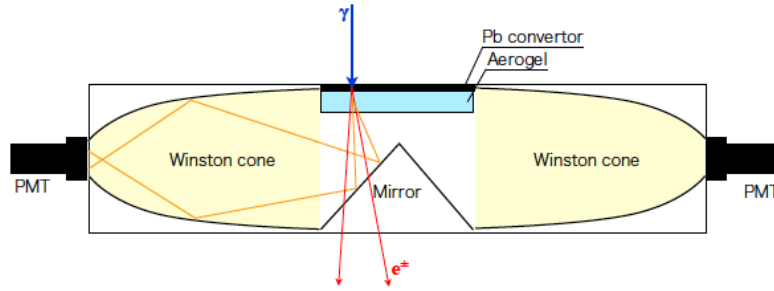


Fig. 2.5 BHPV のデザイン

2.3.5 Beam hole veto 検出器

K^0TO 実験ではビームホール中に逃げた K_L^0 崩壊起源の粒子を veto するための検出器が置かれる。 γ 線 veto 用の検出器として Beam Hole Photon Veto(BHPV)、荷電粒子 veto 用の検出器として Beam Hole Charged Veto(BHCV) が置かれる。両者に共通の要求としてはビーム中に大量に存在する中性子に不感であること、ビーム中という高レート環境でも動作することが求められる。BHPV は図 2.5 のモジュールがビーム方向に 25 個並ぶ。BHPV に入射した γ 線は鉛によって対生成を起こす。この対生成した電子と陽電子がエアロジェル中でチェレンコフ光を発生し、それを PMT で検出する。BHPV は各モジュール毎に鉛とエアロジェルの厚さを調整することによってレートを抑えつつ γ 線に対して高い検出効率を達成している。次に BHCV のデザインを図 2.6 に示す。BHCV ではビーム中の全ての中性粒子に対して不感である必要がある。この要求を満たすため BHCV はプラスチックシンチレーターまたはガス検出器の使用を検討している。ガス検出器を用いる場合はガスシンチレーション光を PMT で読み出す方式をとることによりガスゲインを低く抑えられ、高レート耐性を保証している [10]。

2.4 バックグラウンド

K^0TO 実験で問題となるバックグラウンド事象は大きく二つに分けることができる。1 つは K_L^0 崩壊によるもの、もう 1 つはハロー中性子によるものである。まず K_L^0 崩壊によるバックグラウンドについて説明する。表 2.1 に K_L^0 の主な崩壊モードと分岐比を示す。 K^0TO 実験では CsI に 2 つの γ 線が hit した時に崩壊事象を判定する。そのため K_L^0 の崩壊の内、 $K_L^0 \rightarrow 2\gamma$ は二つの γ 線しか存在しないため $K_L^0 \rightarrow 2\gamma$ と区別が付きにくいように見える。しかしこの崩壊事象は π^0 に横方向の運動量を要求するという運動力学的なカットを用いることにより排除でき、 K^0TO 実験では問題とならない。また 2 つ γ 線に崩壊する π^0 を含む崩壊モードではその他の粒子が不感となることでバックグラウンドとなる。我々の実験で問題となってくるモードは $K_L^0 \rightarrow 2\pi^0$ 、 $K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ 、 $K_L^0 \rightarrow \pi^-e^+\nu$ である。 $K_L^0 \rightarrow 2\pi^0$ は生成される 4 つの γ 線の内、二つの γ 線を見逃すとバックグラウンド事象となるので比較的バックグラウンド事象となりやすく、 K_L^0 崩壊由来のメインバックグラウンドである。 $K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ は π^+ 、 π^- が不感となることでバックグラウンドとなる。 $K_L^0 \rightarrow \pi^-e^+\nu$ に関しては第 3 章で詳述することにしてここでは記述しない。こ

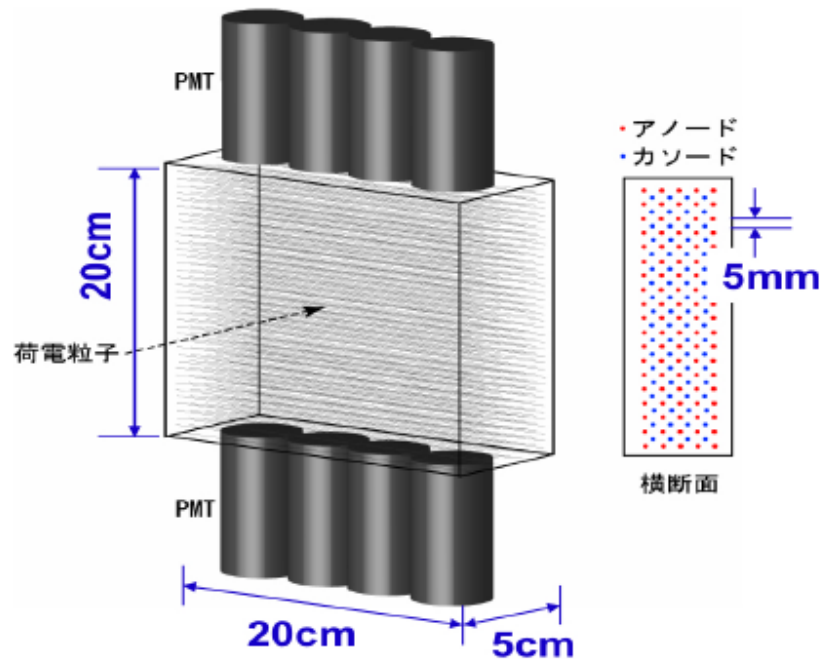


Fig. 2.6 BHCV のデザイン

の 3 つのバックグラウンドの内、 $K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ 、 $K_L^0 \rightarrow \pi^-e^+\nu$ によるバックグラウンドは CV に密接に関わってくるので 3 章でさらに詳述する。

次にハロー中性子バックグラウンドについて説明する。このバックグラウンドは 3 種類存在する。一つは CC02 バックグラウンドとよばれ、NCC と中性子が反応して出来るバックグラウンドである。これはビーム周辺に存在する中性子が NCC と反応し生成された π^0 からの 2γ が CsI に入射して 2hit を作ることで発生する。二つ目は CV とハロー中性子が反応して π^0 を生成し、その π^0 が二つの γ 線に崩壊することで発生するバックグラウンドであり、これを CV- π^0 と呼ぶ。三つ目は CV とハロー中性子が反応して η を生成し、その η が二つの γ 線に崩壊することで発生するバックグラウンドであり、これを CV- η と呼ぶ。またこの二つを合わせて CV バックグラウンドと呼ぶ。このバックグラウンドの詳細は第 3 章で記述する。

以上 K^0TO 実験では K_L^0 崩壊からの 3 つのモードによるバックグラウンド、中性子による 3 つのバックグラウンドの合計 6 つが重要なバックグラウンド源になる。

2.5 ビームライン

ビームラインを建設する上で重要になったのは

1. K_L の収量を確保しつつ出来るだけビームを細くする
2. 出来るだけハロー中性子を減らす

崩壊モード	分岐比
$K_L^0 \rightarrow \pi^\pm e^\mp \nu$	0.4053 ± 0.0015
$K_L^0 \rightarrow \pi^\pm \mu^\mp \nu$	0.2702 ± 0.0007
$K_L^0 \rightarrow 3\pi^0$	0.1956 ± 0.0014
$K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	0.1256 ± 0.0005
$K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$(1.97 \pm 0.008) \times 10^{-3}$
$K_L^0 \rightarrow 2\pi^0$	$(8.69 \pm 0.04) \times 10^{-4}$
$K_L^0 \rightarrow 2\gamma$	$(5.48 \pm 0.05) \times 10^{-4}$
$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$	$(2.49 \pm 0.39) \times 10^{-11}$

Table. 2.1 K_L^0 の主な崩壊モード

の二点である。まず 1 番目はビームホールを小さくすることで signal 同定の際に π^0 の再構成時の不定性を減らす、 K_L^0 崩壊で生じた粒子のうちビームホール中に逃げる粒子を減らし、ビームホール veto 検出器の負担を減らすという 2 点からの要請である。2 番目はハロー中性子と検出器との反応により生じるバックグラウンドを減少させるためである。 K^0TO 実験におけるビームラインの概略を図 2.7 に示す。実験に使用する K_L^0 ビームは、J-PARC 30GeV 陽子シンクロトロンより取り出したプロトンビームを Ni ターゲット (Fig. 2.8) に入射し、出てきた二次ビームを用いる。二次ビームは水平面上で 16° の方向にコリメートされた後まず photon absorber に入射しここで γ 線を減らす。その後 2 つのコリメーターを通過させることで細くてハロー中性子の少ないビームにする。またコリメーターの間には sweeping magnet を配置し、これにより荷電粒子を除去する。二次ビームラインは全長 21m、ビームの時間構成は 3.3 秒サイクルで 0.7 秒のビーム取り出し (1spill)、検出器に対する立体角は $8\mu\text{str}$ となっている。

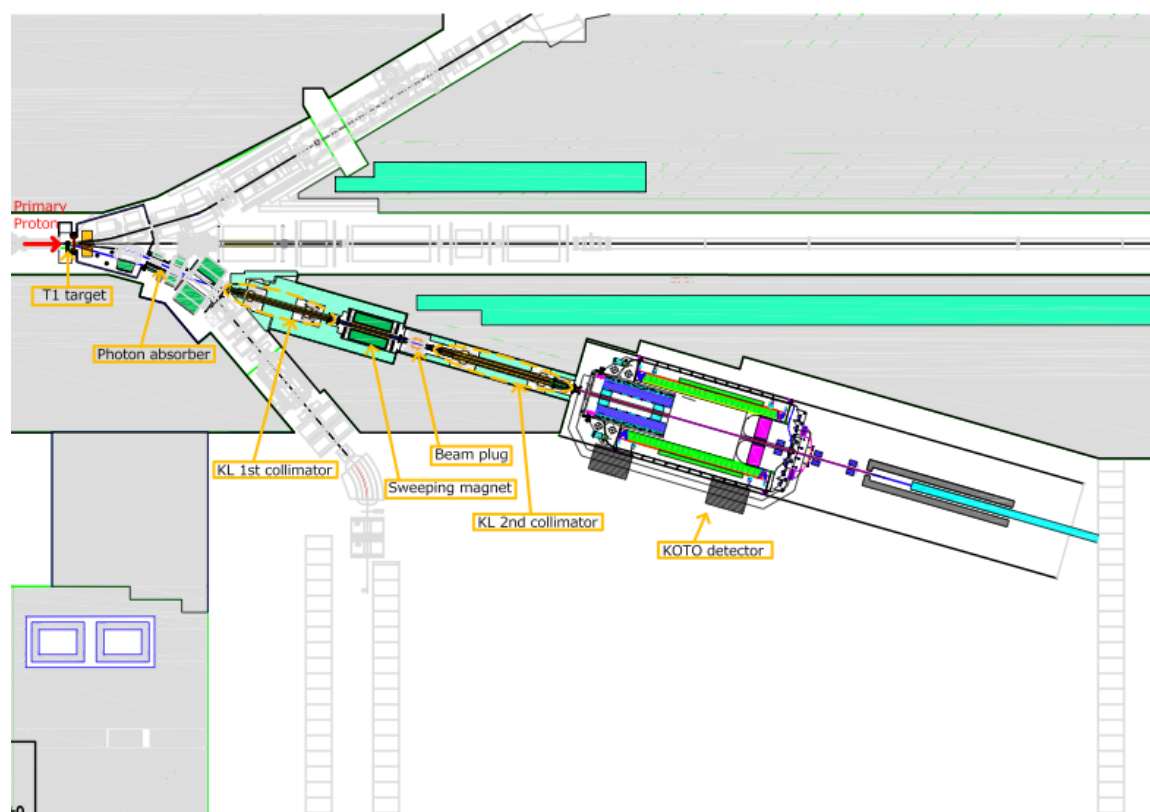


Fig. 2.7 K_L^0 ビームライン概略図。一次陽子ビームが図の左側より入射し、 16° の方向に取り出している。

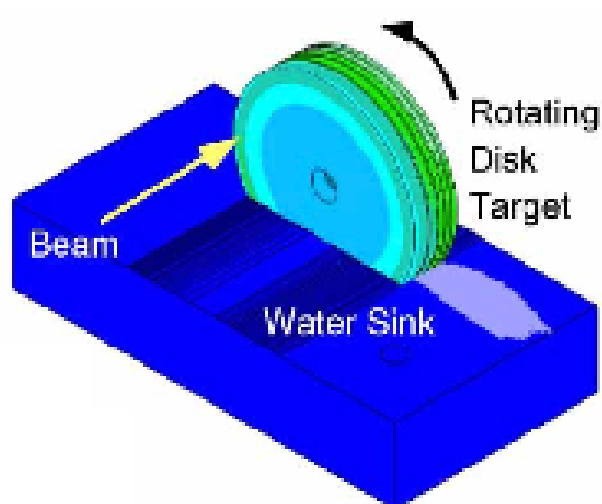


Fig. 2.8 T1 ターゲット。Ni 円盤 5 枚からなり、Ni の厚みは全体で 53.9mm となる。円盤は一部水に浸かっており、回転させることで冷却を行う。

3 荷電粒子 Veto 検出器 (CV)

これまでも述べてきたように CV はプラスチックシンチレータで構成され、CsI カロリメータの直前に置かれる。CV の役割は荷電粒子を検出し、荷電粒子を含む K_L^0 崩壊事象を veto することである。第 2 章でも説明した様に K^0TO 実験で重要な K_L^0 崩壊からやってくるバックグラウンド事象は 3 つ存在する。この 3 つのうち主に $K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ 、 $K_L^0 \rightarrow \pi^-e^+\nu$ の 2 つの崩壊事象から来る荷電粒子の veto が CV にとって重要な役割となってくる。また CV バックグラウンドと呼ばれる、CV とハロー中性子との反応に起因するバックグラウンドが存在する。この章ではまず、これらのバックグラウンドについて詳細を述べる。次に K^0TO 実験のパイロット実験として KEK で行われた E391a での CV デザインを説明し、この実験によって明らかになった CV の問題点を説明する。そして E391a での問題点と先に説明したバックグラウンド事象を削減するために決められた CV のデザイン (シンチレータのデザイン、置かれる位置、ビームホール大きさ) を説明する。最後に CV に課せられた要求 (不感率等) を達成するために実際の検出器が満たすべき要求をシミュレーションにより見積もった。そして実際にそれを満たす読み出しデザインを考案した。

3.0.1 CV に関するバックグラウンド

まずは K_L 崩壊由来の $K_L^0 \rightarrow \pi^-e^+\nu$ 、 $K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ バックグラウンドについて説明する。これらの崩壊過程は π^- が荷電交換反応 ($\pi^-p \rightarrow \pi^0n$) を、 e^+ が対消滅をすることで検出器に対して不感となる場合がありバックグラウンドとなりやすい。まずは π^- の例を取って不感になるメカニズムを説明する (図 3.1)。この図のように π^- がシンチレータ中をある一定以上の距離を走り、検出可能なエネルギー以上を落とした場合は CV で検出できるためバックグラウンド事象とはならない。しかし十分にエネルギーを落とす前に荷電交換反応を起こした場合は生成される粒子が全て中性なので CV では何の信号も検出できない。 e^+ も同様のメカニズムで不感となる。このようなことが起こらないためには、低い energy deposit に対して検出器が検出可能である必要がある。この要請に対して CV では検出器として 100keV のエネルギーを検出できるという要求が課されている。これについてはさらに後述する。

次に具体的に個々のバックグラウンドのメカニズムを説明する。まず $K_L^0 \rightarrow \pi^-e^+\nu$ の場合には主に 2 つのメカニズムが存在する。一つ目は 3 つの γ 線が CsI 上で 1hit とみなされ、一方で単体の γ 線が CsI 上で先ほどの hit から離れた位置に hit し、2hit となる事象である。具体的には図 3.2 左図のように CV 中で e^+ が対消滅してできた 2γ と π^- が荷電交換反応してできた π^0 からの 2γ のうちのひとつが 1hit とみなされ、 π^0 からのもう一つの γ が 1hit となり 2hit に見える事象である。もう一つは 2 つの γ 線が CsI 上で 1hit とみなされ、一方で単体の γ 線が CsI 上で先ほどの hit から離れた位置に hit し、2hit となる事象である。具体的には図 3.2 右図のように CV 中で e^+ が対消滅してできた 2γ のうちのひとつと π^- が荷電交換反応してできた π^0 からの 2γ のうちのひとつが 1hit とみなされ、 π^0 からのもう一つの γ が CsI に hit し二つの hit に見える事象である。この時 e^+ が対消滅してできた 2γ のうち CsI に入射しなかった γ 線が γ 線 veto 検出器群で検出で

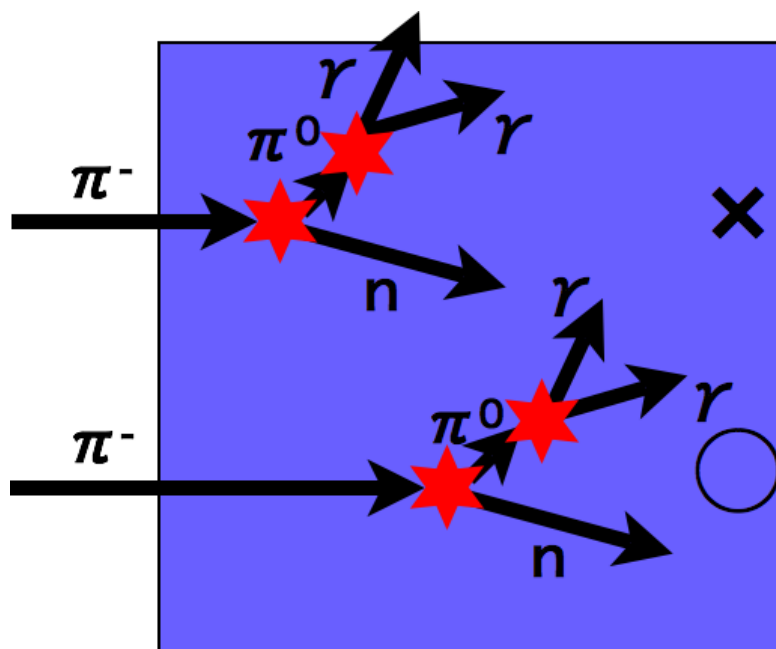


Fig. 3.1 荷電交換反応の模式図。紫色の部分はシンチレータを示す。シンチレータをある程度進んで検出可能な energy を落とすと荷電交換反応を起こしても不感とはならない。

きなかった場合にバックグラウンド事象となる。これらが $K_L^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu$ による主なバックグラウンドのメカニズムである。しかしながら $K_L^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu$ は分岐比が約 20%、崩壊領域で崩壊した $K_L^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu$ 事象のうち π^- と e^+ がともに CV に入射する確率が 3.8% と小さい。加えて CV で 100keV のエネルギーが検出可能という仮定を置くと CV で π^- と e^+ が不感になる確率がそれぞれ 10^{-4} と非常に小さくなるため、バックグラウンドとしては signal 期待値 1.41 に対して 0.05 とほとんど無視できるように設計されている [12]。また $K_L^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu$ 崩壊では CV の位置を CsI カロリメーターに近づけていくと増加するバックグラウンドが存在する。以下にそのメカニズムを説明する。まず $K_L^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu$ 崩壊において e^+ が対消滅を起こして出来た 2γ のお互いの位置が十分離れる前に CsI に入射して 1 つのクラスターを作る。一方同時に π^- が荷電交換反応を起こして出来た π^0 からの 2γ のお互い位置が十分離れる前に CsI に入射して 1 つのクラスターを作る。この時 CV が完全に不感となり、この 2 クラスターにより崩壊位置がたまたま上流側に再構成されバックグラウンド事象となる。これは K^0TO 実験における CV の置かれる位置を決める際に重要になったバックグラウンドである。

次に $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 事象によるバックグラウンドのメカニズムを説明する。このバックグラウンドは π^+ と π^- を CV で検出できなかった場合にバックグラウンド事象となる。このバックグラウンドは CV に対して 100keV が検出可能であるという仮定を置くと signal 期待値 1.41 に対して 0.15 であり、CV が Veto すべき崩壊事象としては最大のバックグラウンド事象となる [12]。従って K^0TO 実験における CV の役割は $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 起源の π^0 による 2γ が CsI に hit した際に高い検出効率で π^+ および π^- を検出し、veto することにある。

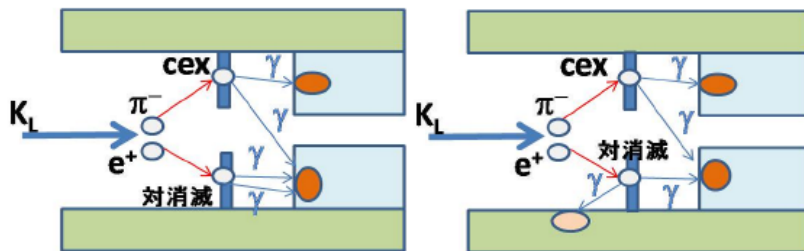


Fig. 3.2 $K_L^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu$ によるバックグラウンドのメカニズム。cex とは荷電交換反応の略である。

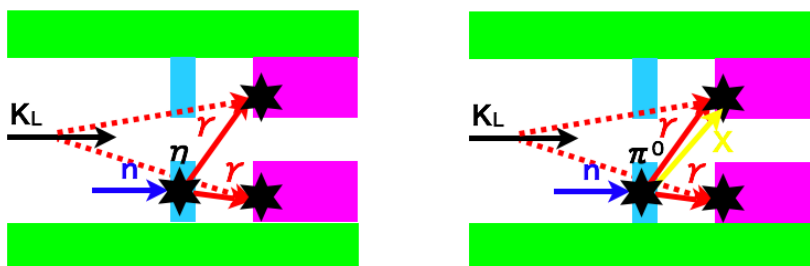


Fig. 3.3 CVバックグラウンドのメカニズム。左がCV- η 、右がCV- π^0 を示す。赤の実線の交点が実際の崩壊点、破線の交点が間違えてしまった崩壊点を示す。

次に CV バックグラウンドについて説明する。具体的には CV を構成するシンチレータとビーム周辺に存在するハロー中性子が相互作用すると生み出される 2 次粒子によるバックグラウンドであり、生じる 2 次粒子が η のものを CV- η 、 π^0 のものを CV- π^0 と呼ぶ(図 3.3)。ここではまず CV- η について説明する。E391a 実験や K^0TO 実験では、CsI で同時に検出した 2 つの粒子に対して π^0 の質量を仮定し、生成位置と運動量を再構成する。一方 η は π^0 の約 4 倍の質量を持ち、40% の分岐比で 2γ に崩壊する。このため π^0 の質量を仮定して崩壊位置を再構成すると実際の崩壊位置よりも上流側に構成されてしまい、崩壊領域に入る。これが CV- η のメカニズムである。次に CV- π^0 について説明する。普通ならば CV とハロー中性子が相互作用して出来た π^0 からの二つの γ 線が CsI に入射した場合は正しく位置が再構成され、バックグラウンドになることはない。しかしながら CV とハロー中性子が相互作用し π^0 を生成した際の余剰粒子が π^0 から生じた 2γ のうちのどちらか一方の γ と CsI で近い位置に入射して 1 つのクラスターを作る場合は異なる。この場合には、本来よりもエネルギーが足され、崩壊位置を上流側に間違えてしまうことになる。これが CV- π^0 と呼ばれるものである。これらの CV バックグラウンドは E391a 実験での解析により明らかになった問題である。 K^0TO 実験における CV のデザインでは本来の役割である K_L^0 崩壊起源のバックグラウンドは言うまでもなく、CV バックグラウンドの抑制が重要な点となってくる。そこでまず次の章では E319a 実験でのデザインを述べ、そのデザイン上の問題を説明する。

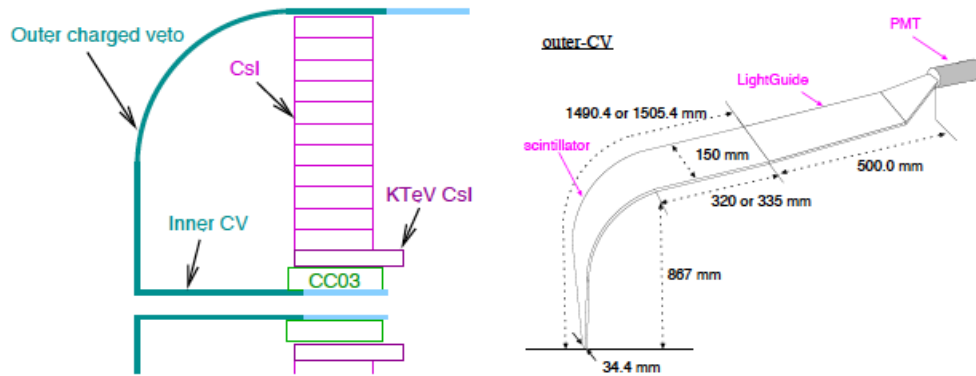


Fig. 3.4 E391a での CV デザイン。左側が外観、右側が 1 モジュールの図。



Fig. 3.5 実際の写真。中央の四角形がビームパイプ、奥が CsI、手前の銀色の部分が CV となっている。写真では後ろにある CsI が見えるように CV の下 1/4 が取り外されている。

3.1 E391a 実験でのデザイン

E391a 実験での CV デザインを図 3.4、図 3.5 に示す。この検出器は前節で説明した役割を果たすために CsI カロリメーターから 50cm 上流に置かれた。検出器自身は outer CV と inner CV という二つの部分から構成されている。outer CV は 1 モジュールが図 3.4 右図のような形で厚さ 6mm のシンチレータにより構成されており、総数は 32 モジュールとなっている。また読み出しには浜松ホトニクス社製の R329 という PMT を用いた。この部分は上流部で崩壊した K_L から生じた荷電粒子を veto する役割を果たす。一方 inner CV は厚さ 6mm のシンチレータから構成されており、図 3.4 左図のようにビームホールを囲む形で 4 枚置かれる。この部分は CsI 直近で崩壊した

K_L による荷電粒子を veto するために存在する。E391a 実験ではこれら荷電粒子を含む K_L の崩壊モードによるバックグラウンドは signal 期待値 1.35×10^{-3} に対して $O(10^{-4})$ であり、この検出器でバックグラウンドを十分小さく押さえられることが証明できた [7]。しかし E391a 実験での実験結果より CV 自身が生み出すバックグラウンドが存在することが明らかになった [11]。これが前章節でも述べた CV- π^0 、CV- η である。この π^0 を生成する中性子の運動量閾値は約 $0.8 \text{ GeV}/c$ 、 η に対しては約 $2 \text{ GeV}/c$ と高いが、このような高エネルギーの中性子はビームホール中心付近に多く分布する。そのため inner-CV とハロー中性子との相互作用によるバックグラウンドが問題になった。E391a で明らかになったこれらのバックグラウンドを減らすために大きな改良点として

1. inner CV を取り除き、2 層構造にすることで CV- η を減らす
2. 間違っって位置を再構成した粒子が崩壊領域に入らないようにするために CV をより CsI に近づける
3. η や π^0 の生成確率を減らすために CV のシンチレータ部をより薄くする

という 3 つの改良を加えることにした。またこれに伴い CV のビームホールの大きさと設置位置の最適化も行った。

3.2 K^0TO 実験でのデザイン

この節では E391a 実験を受けて K^0TO 実験用に改良された CV デザインの概要について説明する。まず最初に K^0TO 実験で考案された CV のデザインを図 3.6、図 3.17 に示す。CV は図 3.6 のように 2 つの層から構成されており、上流側を front-CV、下流側を rear-CV と呼ぶ。front-CV は CsI から上流に 25cm の場所に、rear-CV は CsI の直近に置かれる。次にシンチレータの厚みについて述べる。CV バックグラウンドを減らすにはシンチレータを出来るだけ薄くして中性子の反応確率を小さくする必要がある。しかしながら製作上の観点では厚い方が取り扱いが容易である。そこでシミュレーションを行い、十分に CV バックグラウンドを削減出来る厚みを見積もり 6mm から 3mm の厚さに変更した [12]。またシンチレータの大きさは CsI 結晶を全部覆える大きさにした。次に CV デザインとして 2 層構造になった理由とその位置がどう決められたかについて説明する。まず 2 層構造になった理由だが、これは CV- η バックグラウンドを削減するために inner CV を排除する必要があったからである。しかし単純に inner CV を排除しただけではビームホール付近での荷電粒子を含む K_L^0 崩壊事象を veto することができない。このため CV は 2 層構造とした。次に front-CV が置かれる位置について説明する。これは次の二つの相反する要請を最適化することで決定された。まず一つ目は CV をなるべく崩壊領域から離さなければならないという要請である。これは CV が CsI に近いほど CV で生成した η や π^0 が前述の CV バックグラウンドのメカニズムにより Z_{vtx} を間違えて再構成して崩壊領域に入る確率が減るためである。二

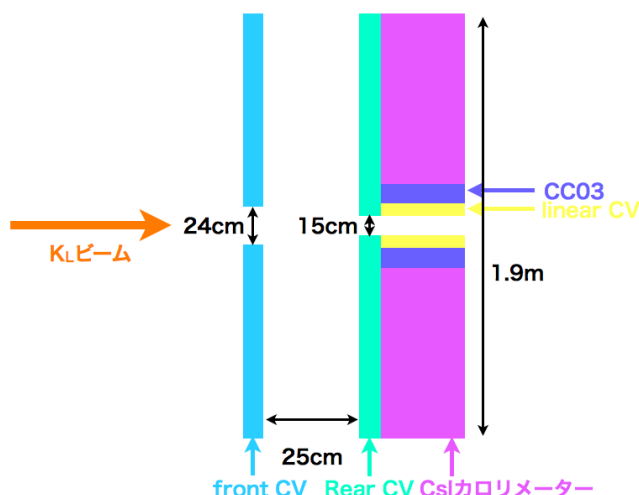


Fig. 3.6 CVの置かれる位置の概念図。

つ目の理由は CV を CsI カロリメーターに近づけすぎてはいけないという要請である。CV が CsI カロリメーターに近すぎると 3.0.1 節で説明した CsI を近づけた場合に増える $K_L^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu$ 崩壊によるバックグラウンドが増加する。この二つの相反する目的を達成できるようにモンテカルロシミュレーションを行って位置を調整し、front-CV を CsI から 25cm 上流に、rear-CV を CsI の直近に置くこととした [12]。

次に CV のビームホールの大きさの決定について述べる。ビームホールの大きさは front-CV は $24\text{cm} \times 24\text{cm}$ 、rear-CV は $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ とした。rear-CV のビームホールの大きさは図 3.6 のように後ろにある CsI、CC03、LCV を覆える大きさにした。次に front-CV のビームホールの大きさがどう決められたかを説明する。ビームの周辺には高エネルギーの中性子が分布しており、この中性子が主たる CV バックグラウンド源となる。これを削減するにはビームホールの大きさをなるべく大きくしなければならない。しかし front-CV でのビームホールの大きさを大きくしすぎると $K_L^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu$ 崩壊で生じた e^+ と π^- が rear-CV に入射する確率が増加してしまう。すると rear-CV で veto しなければいけない $K_L^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu$ 崩壊事象の数が増加する。rear-CV は CsI と接しているので 3.0.1 節で説明した CsI を近づけた場合に増える $K_L^0 \rightarrow \pi^- e^+ \nu$ 崩壊によるバックグラウンドが増えてしまう。front-CV のビームホールの大きさはモンテカルロシミュレーションによりこの 2 つバックグラウンドを最小限に抑えられる大きさにした [12]。

CV が 100keV のエネルギーを検出できるという仮定の下でこの CV デザインを用いた K^0TO 実験のバックグラウンドの見積もりと E391a 実験での解析結果を表 3.1 に示す。この表からも分かるように新しいデザインによってバックグラウンドを十分小さく押さえられることが確認できた [12]。

ただしこの際の見積もりでは検出器に対して 100keV 閾値で信号を検出可能であるという前提の上に成り立っている。この章の以降の節ではこの 100keV 閾値も含め、モンテカルロシミュレーションを用いて見積もった検出器に対する要求について述べる。さらにその要求を満たすために考

	E391a 実験での解析結果	K^0TO 実験での見積もり
signal	0(sensitivity 1.84×10^{-8})	1.41(sensitivity 2×10^{-11})
charged BG	negligible($O(10^{-4})$)	0.21
CV- π^0 BG	0.19 ± 0.13	0.16
CV- η BG	< 0.36	0.07

Table. 3.1 E391a 実験にくらべて K^0TO 実験では signal の期待値に対してバックグラウンド事象を十分小さく押さえられる。

案したデザインを説明する。

3.3 読み出し検出器に対する要求性能の決定

まず CV の veto システムについて説明する。CsI に 2γ hit がある場合にその前後のある一定時間 (timing window と呼ぶ) をみて CV にある閾値以上の energy deposit をした hit があった場合はその事象を veto する。CV で重要なのは 3.0.1 節で記述したように $K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ 起源のバックグラウンドを抑えることである。そのため π^\pm を良い検出効率で検出しなければならない。この時 3.0.1 節で説明したように検出器としては π^- が荷電交換を起こす前に十分な光量を得る必要がある。この要請を 3.3.1 節、3.3.2 節でまとめる。一方、timing window はこの崩壊事象から来る π^\pm の到達時間と検出器の時間分解能を考慮し、これらの粒子を漏らさず検出できる時間幅にしなければならない。しかしながらこの timing window を長く取りすぎると accidental な hit が timing window 内に入り、本来の signal を veto してしまう (accidental loss) 確率が増えてしまう。そこでシミュレーションを行い、timing window をいくらの幅にすれば良いかを見積もり、3.3.2、3.3.3 にまとめた。

3.3.1 不感率の要請

前述したように、不感率は荷電交換反応により決まる。この荷電交換反応の際生成された、 π^0 起源の γ 線を下流のカロリメータで検出することが出来れば、不感率を改善する事が出来る。 K^0TO 実験では CV 直後に CsI カロリメータが存在し、これを用いる。まずこの効果を含め、 K^0TO 実験での CV の inefficiency がシミュレーションを用いてどのように見積もられたかを説明する。図 3.7 にシミュレーションのセットアップを示す。このシミュレーションではまず CV の前に dead material としてポリスチレンの膜を置いた。これは本実験で高真空に保たれた崩壊領域と CV 等の検出器が設置される場所を区切るために設置される膜である。そしてその後ろに 6mm 厚のシンチレータを置き、最後にバックアップカロリメータを設置した。シミュレーションは GEANT4 で行い、 π^- をエネルギーを変えてシンチレータに打ち込んだ。そしてカロリメータに 3MeV 以上の Energy deposit がある、または CV である一定の energy deposit がある場合は event が veto できたとみなした。シミュレーション結果のうち、CV の閾値を 100keV と仮定した時の結果が図 3.8 の赤い点であり、それをもとに作られたのが黒の実線の inefficiency function である。一方この荷電粒子の不感率に対しては過去にスイス・PSI で測定が行われており、その結果を図中の丸印で示す。黒線の結果はバックアップカロリメータの寄与を含んでおり、シミュレーションによ

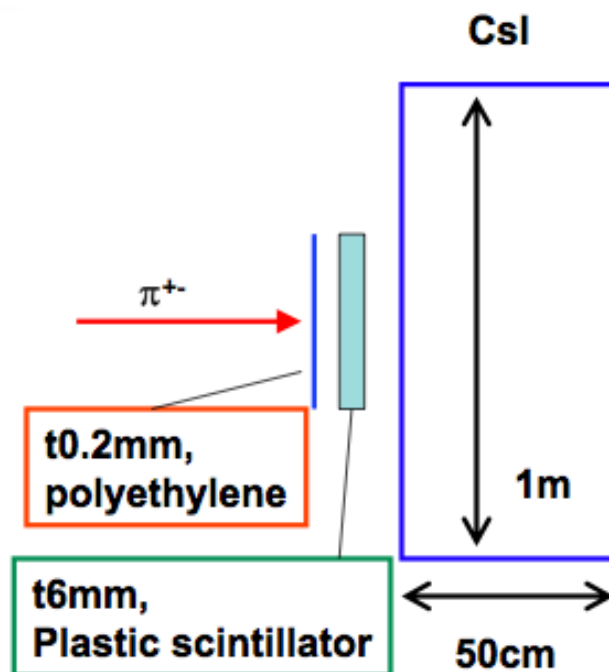


Fig. 3.7 $K^0 TO$ 実験で CV の inefficiency function を見積もるために行われたシミュレーションのセットアップ。

て CV の不感率を良い方向に見積もり過ぎている可能性がある。そこでこの実験結果をもとに 15 倍スケールリングを施している [8] *¹。 $K^0 TO$ 実験では色々な閾値で inefficiency function を見積もった結果、CV が veto すべきバックグラウンド事象を十分小さく抑えるには 100keV 閾値が必要であるという結果になった [8]。

しかし現実的な検出器では光子の光統計の影響によりエネルギーの分布がなまってしまうため、100keV 閾値を検出可能であるという条件だけでは inefficiency の要求を満たせない可能性がある。従ってこの効果を見積もり、検出器としていくら以上の光量があれば 100keV 閾値で要求性能を満たせるかを見積もる為にシミュレーションを行ったのでそれについて説明する。

3.3.2 CV での閾値の見積もり

このシミュレーションは前述の不感率の要求を決定し、後述する timing window の幅を決定するために行った。シミュレーションは全て GEANT4 により行った。なおシミュレーション方法は Appendix A に記述する。シミュレーションによりまず $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 崩壊において CsI に 2 つの γ 線の hit があつた時の CV 上での π^- のエネルギー分布を求めた。次に 100keV に相当する光量を仮定し、ポアソン分布でもとの分布をなまらせた (図 3.9)。その後もとの分布で 100keV 以下の閾値の event の数と、なまらせた分布で 100keV 以下に相当する光量の event の数を比べ、

*¹ この差の主な原因は PSI 実験で使用されたバックアップカロリメータのサイズはおよそ 30cm×30cm と、今回のシミュレーションに比べ小さいことである。

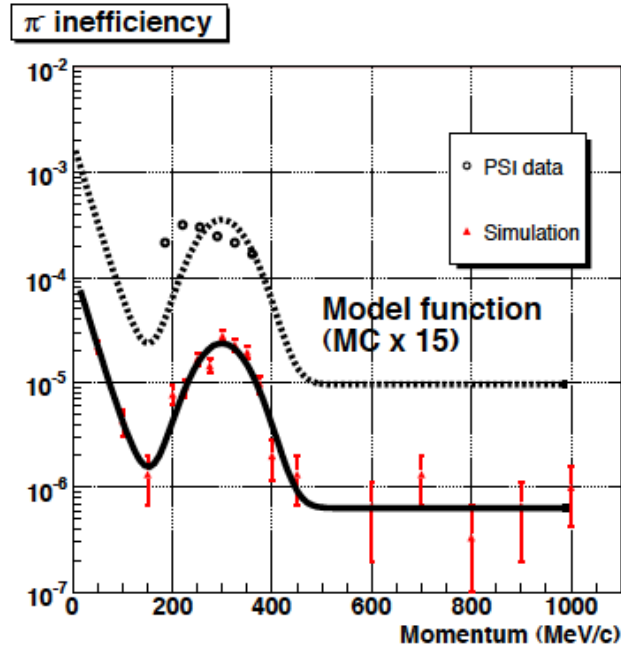


Fig. 3.8 CV の π^- に対する不感率の応答関数。横軸が入射させた π^- の運動量、縦軸が検出できなかった event (CV または CsI で閾値以下のエネルギーしか落とさなかった event) を打ち込んだ π^- の数で割ったものである。赤が CV の閾値を 100keV とした時のシミュレーション結果、実線がそれをもとに作られた inefficiency function である。次に丸が PSI データ、破線が実験データをもとに実線の応答関数をスケールしたものである。図中のピークは荷電交換反応の反応断面積が最大になることで inefficiency が悪くなっている。また低エネルギー側で悪くなっているのは π^- が dead material 中で止まって不感になる確率が増えるせいである。

何 photo electron 以上になると統計の影響を無視できるかを見た (図 3.10)。この結果、CV には 100keV energy deposit に対して 3photo electron 以上の光量であれば統計によりなまる効果は無視できることが分かった。

3.3.3 timing window の決定

3.3.2 と同様にシミュレーションにより timing window の幅の決定を行った。まず $K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ 崩壊起源の π^0 からの 2γ が CsI に入射した際の π^\pm の時間分布 (time of flight) を見積もった。これにより veto すべき粒子がどのような時間分布でやってくるかを見る。この時実際の検出器では検出器の持つ時間分解能によって本来の時間分布がなまってしまう。この効果を考慮するために得られた分布に対して検出器の持つ時間分解能を仮定し、この分布をスミアする (時間分解能を σ として gaussian で分布をなまらせる) ことにより、より現実に即した分布を作った。timing window の幅は CV が veto すべき粒子に対して図 3.8 の不感率を持っているので ($\sim 10^{-4}$)、粒子が timing window からはみ出る確率はそれと比較して小さい必要がある。従って粒子が timing window をはみ出してしまふ確率が 10^{-5} 以下になるように幅を決定することにする。

見積もった理想的な時間分布とそれを時間分解能 1ns でスミアした時間分布を図 3.12 に示す。左と右の分布のピークの差は CV プレーンの位置が違うことに起因しており、CsI から遠い方の

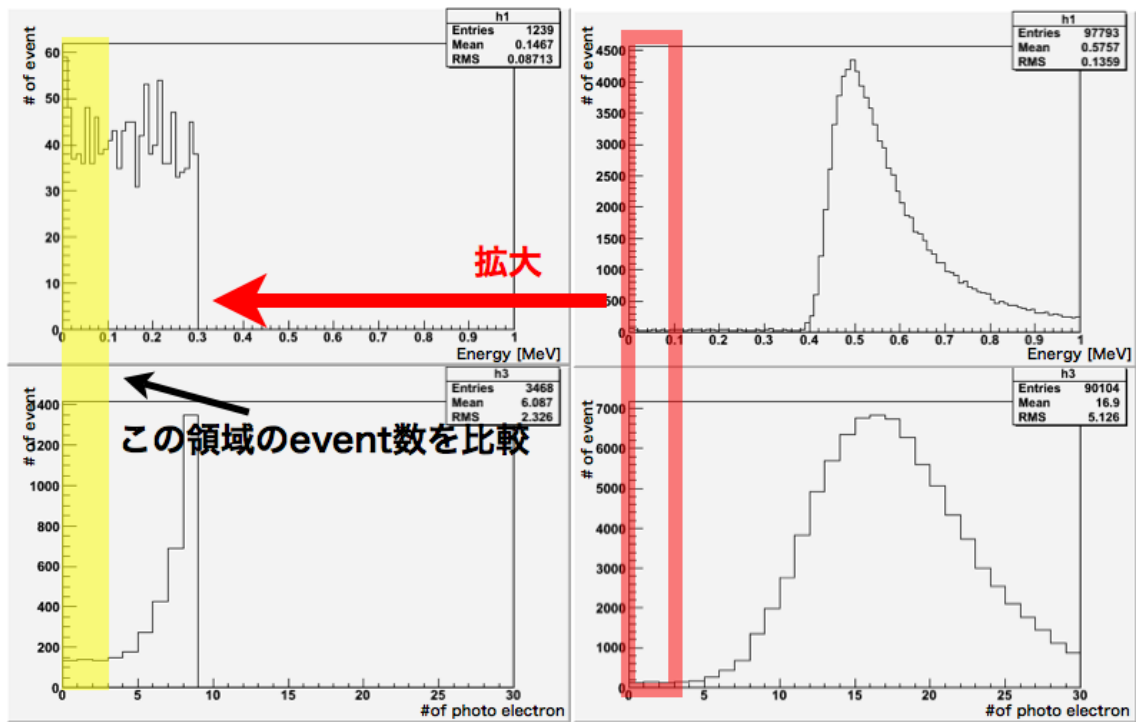


Fig. 3.9 上図はもとの CV 上での π^- のエネルギー分布。右図は全体図、左図は見やすいように 300keV 以上の event を省いて表示させた 100keV 付近の拡大図。下図は 100keV で 3photo electron 相当の光量があると仮定してポアソンでなませた分布。

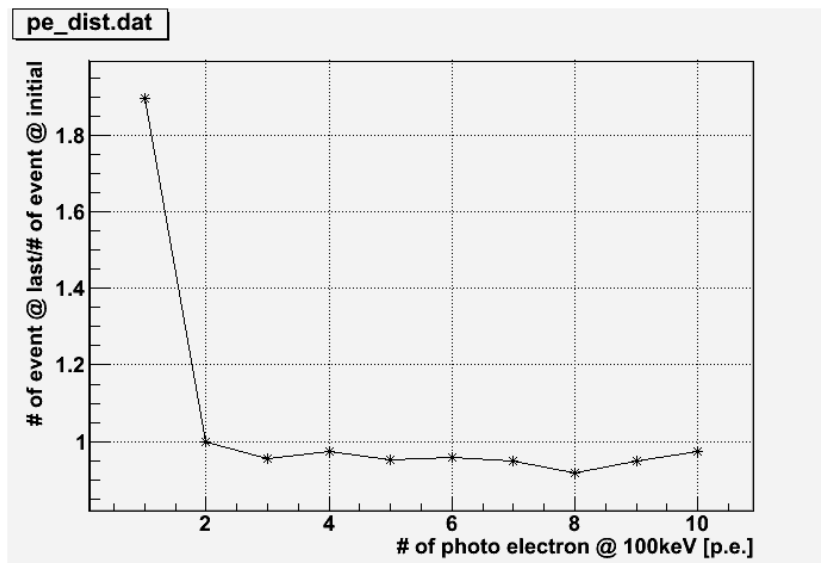


Fig. 3.10 横軸に 100keV に対して仮定した photo electron、縦軸が分布をなませた時の 100keV 以下の event の数をもとの分布で 100keV 以下の event の数で割ったもの。

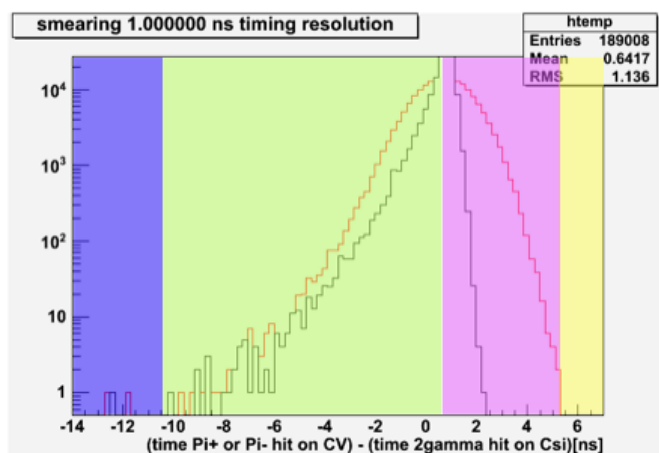


Fig. 3.11 timing window の決定方法。まず最初にピークで分布を 2 分割する。次にピーク的位置から右側を紫と黄色の領域に分ける。徐々に紫の領域を増やしていき、紫色の領域と黄色の領域の event の和に対して黄色の領域の event の数が 10^{-5} 以下になった時の紫の領域の幅を T1 とする。同様に緑色の領域と青色の領域の event の和に対して青色の領域の event の数が 10^{-5} 以下になった時の緑の領域の幅を T2 とする。timing window はこの二つの幅を足し算した幅とする。

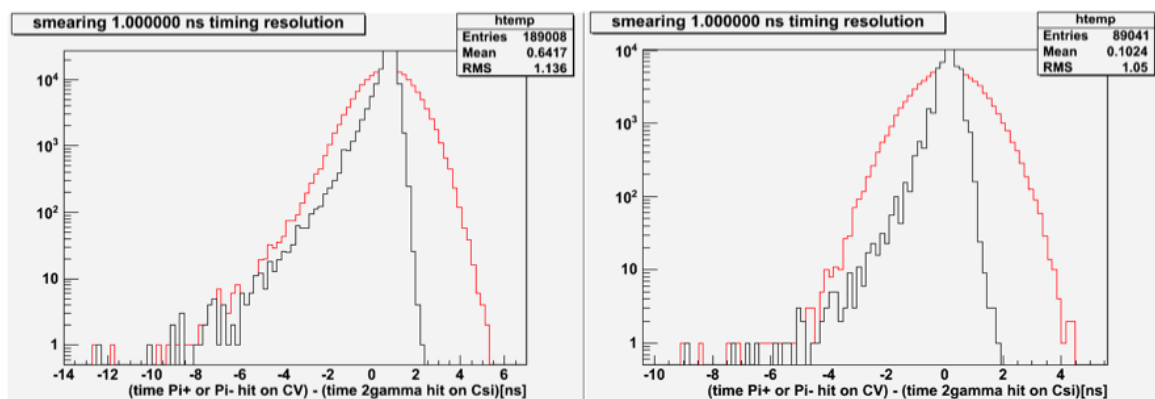


Fig. 3.12 左図は front-CV、右図は rear-CV を示す。横軸には CsI に 2 つの γ 線が入射した時を原点に取っている。黒線図はもとの時間分布、赤線は黒線の分布を検出器の時間分解能を 1ns と仮定してスミアしたもの。

front-CV の方が時間差も大きく、分布が広がっているのが分かる。この結果を用いてスミアした分布のピークを中心に分布を左右に分割しそれぞれの領域で徐々に積分範囲を拡大していき、積分に含まれる event の数と含まれない数の比が 10^{-5} 以下になるような領域を timing window とした (図 3.11)。この解析結果を図 3.13 に示す。

次にこの結果を受けて、どのようにして timing window の幅、つまり検出器に対していくら以下の時間分解能が必要になってくるかについて考察する。

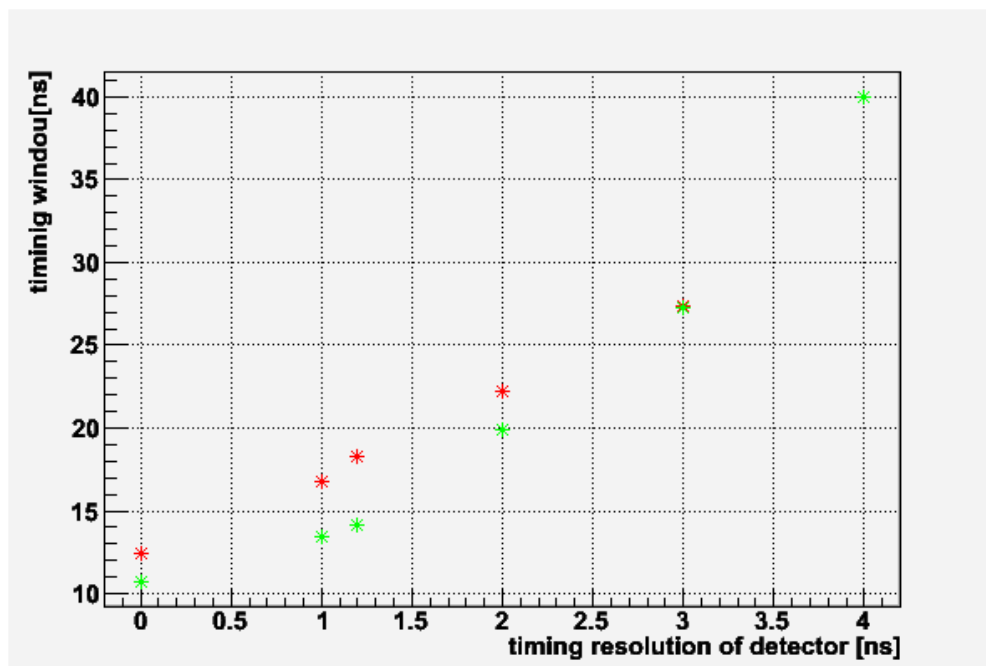


Fig. 3.13 横軸に仮定した検出器の時間分解能、縦軸にその際の timing window の大きさを示す。赤色の点が front-CV、緑色の点が rear-CV に対応する。検出器の時間分解能が悪くなるに従ってもとの分布が検出器の時間分布に埋もれて行く。検出器の時間分解能が 3ns 以上になると時間分布の幅は元の時間分布に依らず、ほぼ検出器の時間分解能が veto の timing window を決める事になる。

3.3.4 accidental loss の見積もり

前述したとおり timing window が長すぎる場合には accidental な hit が timing window 内に入り、信号を loss する可能性が大きくなる。次の節では accidental hit rate を見積もり、そこから signal の loss を計算することで CV の timing window としてどの程度の長さが許されるかを見積もる。accidental loss を見積もる前に accidental hit rate を見積もった。accidental rate は一度に複数のチャンネルに hit した場合も一つの hit として見積もった。accidental rate の計算式は N_{hit} をシミュレーションにおいて CV で accidental hit を起こした event の数、 N_{pot} をシミュレーションで入射した粒子の数に相当する proton on target 数、 N_{spill} を本実験での 1 spill に相当する proton on target 数、 T_{spill} を 1 spill に対応する取り出し時間とすると

$$accidental\ rate = \frac{N_{hit}}{\frac{N_{pot}}{N_{spill}} \cdot T_{spill}}$$

によって計算した。ここにおいてシミュレーションで入射させた粒子の数は 10^6 個、それに対応する proton on target は 3.99×10^{11} 、1spill 当たりの proton on target は 2.04×10^{14} 、1spill の取り出し時間は 0.7s とした。結果を図 3.14、3.15、表 3.2 に示す。図 3.14 は上図が accidental hit rate と閾値の相関を示す。下図の分布は CV でのエネルギー分布を示す。この分布を見て分かる

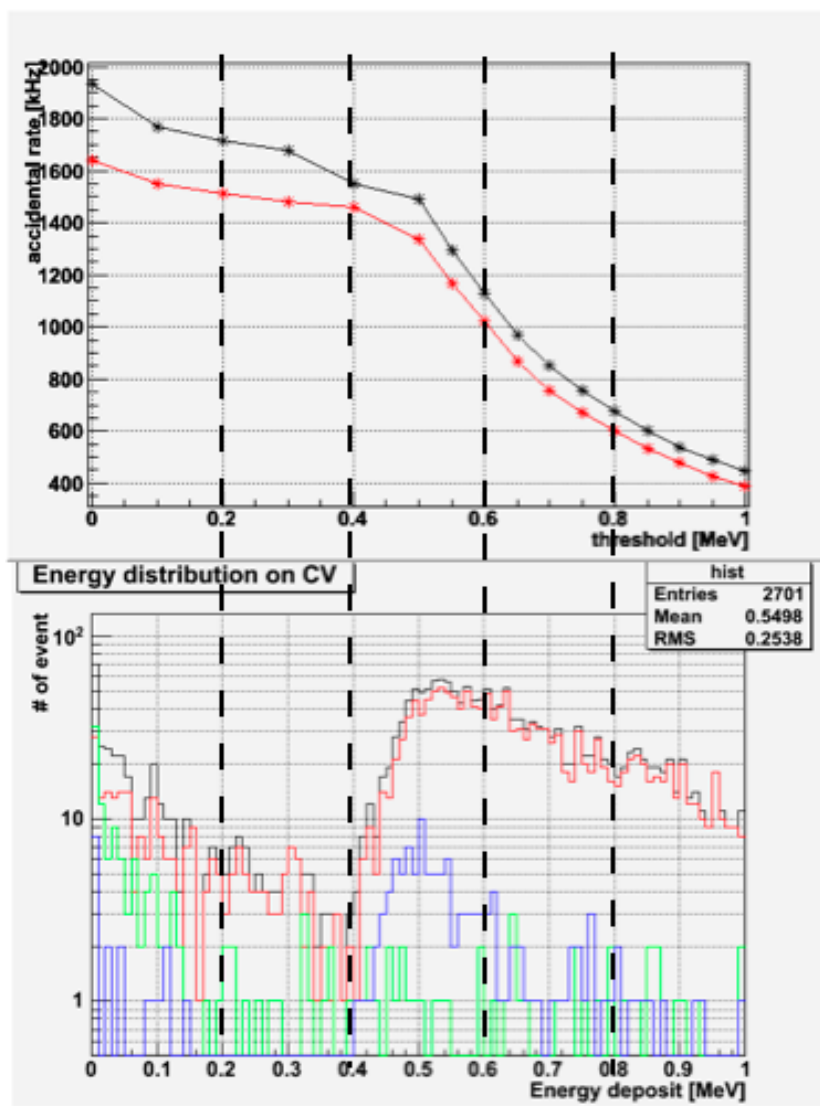


Fig. 3.14 上図は横軸に CV での energy の閾値、縦軸にその閾値での accidental hit rate を取ったもの。黒線は全粒子による accidental hit rate、赤線は K_L^0 由来の accidental hit rate を表す。下図は accidental hit による CV での energy deposit の分布。黒線は全粒子、赤は K_L^0 、緑は中性子、青は荷電粒子による energy deposit を示す。低エネルギー側の hit は殆どが中性子由来となっている。下の図のピークは π^\pm の mip ピークを示しており、ここで accidental hit が急激に増えている。

ように CV での accidental hit は K_L^0 崩壊によってやってくる粒子である。図 3.15 は accidental な hit が CV のどこにあったかを示す。これを見るとビームホール周辺が多く、外に行くに従って減る。また表 3.2 より、CV での energy deposit の閾値を 100keV に設定した場合には accidental rate が CV 全体で 1.768MHz になることがわかった。

次にこの値を利用して accidental loss を見積もる。accidental loss は

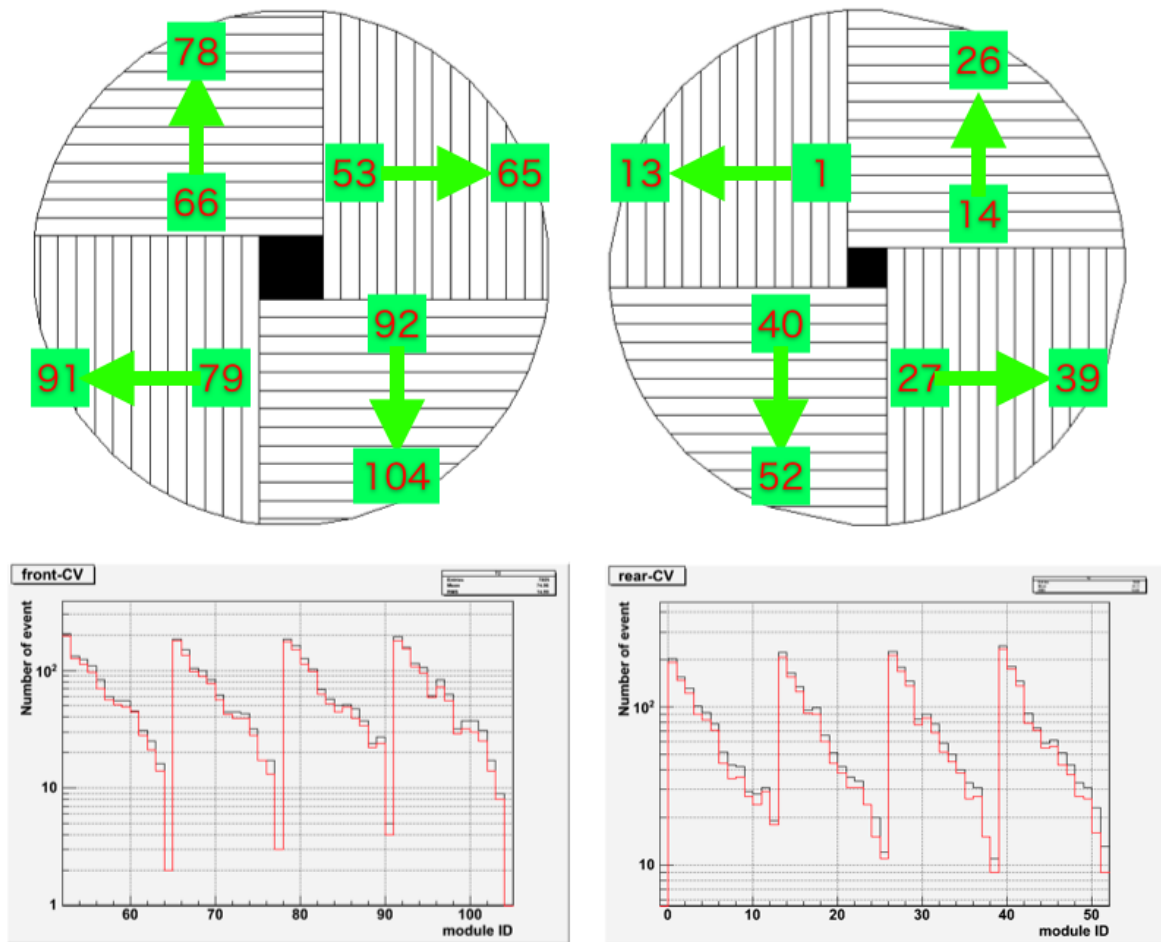


Fig. 3.15 上図はシミュレーションに用いた CV の configuration である。左が front-CV、右が rear-CV である。図中の番号は各シンチレータストリップのモジュール ID を示す。下図は横軸にモジュール ID、縦軸に各モジュールでの hit 数を plot したものである。黒が全 hit 数、赤が k_L^0 による hit 数である。

	accidental rate[MHz]
中性子	0.091
γ	0.024
K_L^0	1.551
charged particle	0.102
合計	1.768

Table. 3.2 コリメーター出口で tag した各粒子による CV の accidental rate。CV での accidental rate はその殆どが K_L^0 崩壊由来の荷電粒子である。

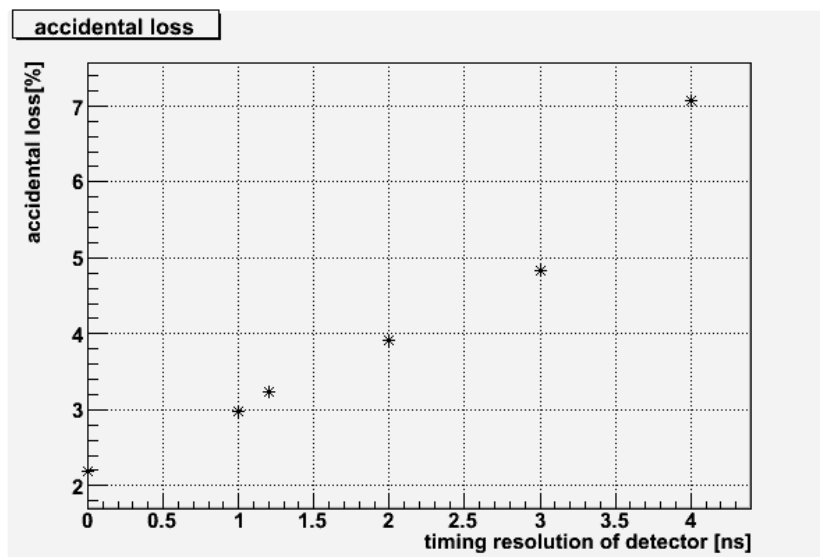


Fig. 3.16 横軸に仮定した検出器の時間分解能、縦軸にその際の accidental loss を plot した図

検出器が満たすべき要求	要求される値
閾値	100keV
光量	100keV 当たり 3p.e. 以上
時間分解能	3ns 以下

Table. 3.3 CV に用いられる検出器に対する要請

$$(\text{accidental loss}) = \text{accidental rate} \times \text{timing window}$$

により見積もった。ここで用いた timing window の長さは front CV のものを使用した。この理由を説明する。3.12 の右図と左図を比べると rear-CV の時間分布は front-CV の時間分布よりも広がりが少ないことが分かる。rear-CV の timing window は front-CV の timing window の中に収まる。従って timing window としては front-CV のものを用いる^{*2}。この結果を図 3.16 に示す。この結果より CV での accidental loss を十分小さく (5% 以下) 抑えるには検出器の時間分解能が 3ns 以下にしなければならないことが分かった。

3.4 CV の読み出しデザイン

本節では実際の CV デザインについて説明する。CV 全体は図 3.17 左上図のように CsI 結晶を覆えるように直径 1.9m の円の中に厚み 3mm、幅 7cm のシンチレータストリップを敷き詰めた形をしている。シンチレータストリップは 1 プレーン 48 枚、CV 全体で 96 枚となる。図 3.4 のよ

^{*2} 実際の実験では rear と front に対しては今回見積もった個々の timing window を用いるので若干 over estimate になる。

うに E391a 実験での outer CV ではシンチレータを曲げライトガイドを使って PMT で読み出す方法が取られていた。しかしこのデザインではシンチレータの片側からしか読み出さないため CV での hit 時間の不定性が大きくなる。この hit 時間の不定性をなくすために K^0TO 実験の CV ではシンチレータを両側から読み出すデザインが求められた。また K^0TO の CV は CV バックグラウンドを減らすためにシンチレータの厚みを 6mm から 3mm した。これにより直接読み出しでは光量が大幅に減少するおそれがあった。この問題を解決するために、シンチレータに溝を切り波長変換ファイバーを埋め込んで両側から読み出す方式を採用した。具体的には図 3.17 のようにシンチレータを配置し、ビームから見て下流側の平面に幅、深さともに 1.1mm の溝を 1cm おきに掘り、直径 1mm の波長変換ファイバーを埋め込んでビームホールをさけて全部のシンチレータストリップが両側から読み出せるデザインにした。さらに波長変換ファイバーを 7 本ずつ束にし、その両端を MPPC で読み出して光量を出来るだけ多く稼げるように設計した。図 3.18 に E391a で用いられていた PMT と MPPC の光子検出効率の比較を示す。この図を見て分かるように MPPC は従来の PMT に比べて高い検出効率を持っている。加えて MPPC の採用には二つの利点がある。一つ目は従来の光検出器に比べて MPPC のサイズが非常に小さいことである。これにより検出器をシンチレータの直近に置く事ができ、ファイバーによる光量のロスを最小限にすることが出来る。二つ目の理由は従来の PMT に比べて非常に安価であるということである。MPPC については 4 章に譲りここでは詳述しないことにする。次に予想される光量について述べる。過去のファイバー読み出しの研究結果 [13] では 3mm 厚のシンチレータを波長変換ファイバーで読み出した際 (図 3.19) に mip ピーク換算で 25photo electron/3mm 程度の光量が得られていた。その際に使用されていたものと同じシンチレータ (EJ212) と波長変換ファイバー (直径 1mm の Y11、発光波長 470nm ~ 520nm) を使用した場合、この研究で使用された PMT(H7422P-40) は受光面が GaAsP で作られており、波長 580nm で 40% 程度の光子検出効率を持つ。一方 MPPC は 500nm で 40% 程度の光子検出効率を持つ。従って MPPC を使った読み出しでも同程度の光量を達成できると予想される。また信号の読み出しには現在二つの方法が検討されている。一つ目の方法は gaussian-filter(10pole のローパスフィルター) を用いて信号を gaussian like な波形に変えた後に 125MHz flash ADC で読み出す方法である。もう一つは信号をそのまま 500MHz flash ADC で読み出す方法である。

3.5 まとめ

この節ではこれまで E391a における CV デザインとその問題点、それを改善するために考案された K^0TO 実験での CV のデザインについて述べてきた。さらにこれをもとに検出器が満たすべき光量と時間分解能の要求を明らかにした。表 3.3 に検出器が満たすべき要求をまとめた。さらにこれらの要求を満たすような読み出しのデザインを考案した。本論文ではこの読み出しデザインのプロトタイプの開発及びプロトタイプの性能評価について議論を進めて行く。

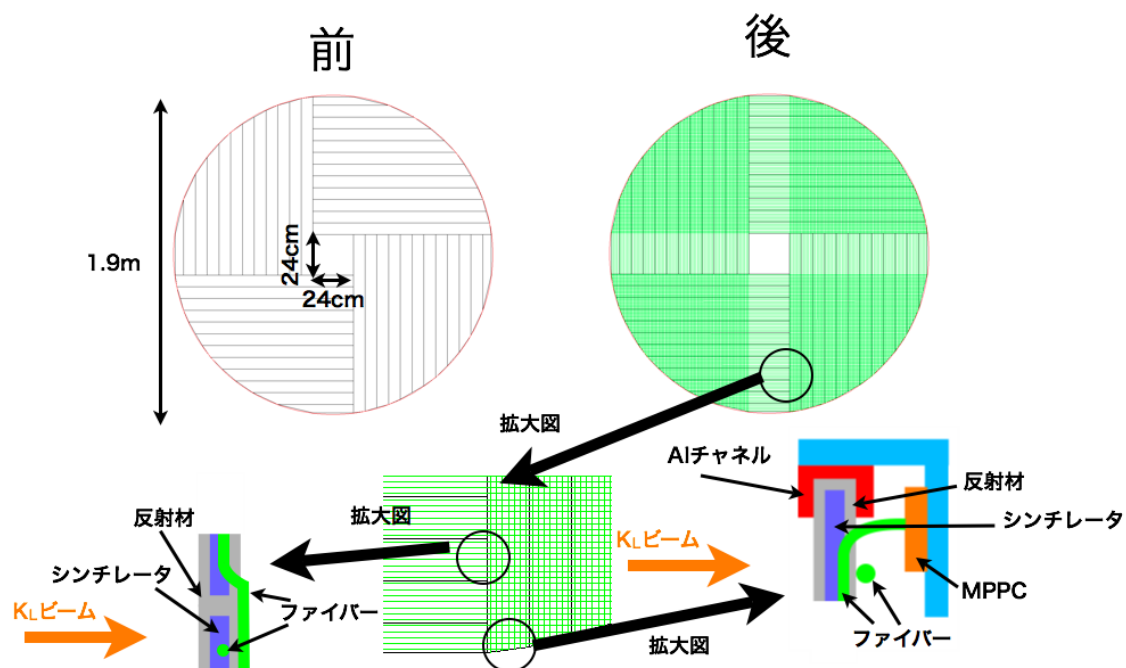


Fig. 3.17 front-CV の設計図。rear-CV との違いはビームホールの大きさのみである。CV は厚さ 3mm 幅 7cm で様々な長さのシンチレータストリップで構成される。シンチレータは左上図のように一つの端を赤い円で示された U チャンネルに固定し、側面は反射材を巻くもしくは蒸着したのち互いに接着される。シンチレータにはビームから見て下流側の平面に深さ 1mm の溝が 1cm 間隔で掘られ、シンチレータ 1 ストリップ当たり波長変換ファイバー 7 本が埋め込まれる。左上図はビーム上流側から見た様子、右上図は下流側から見た図である。右下図はシンチレータの読み出し部分の拡大図、左下図はシンチレータの継ぎ目の部分の拡大図である。

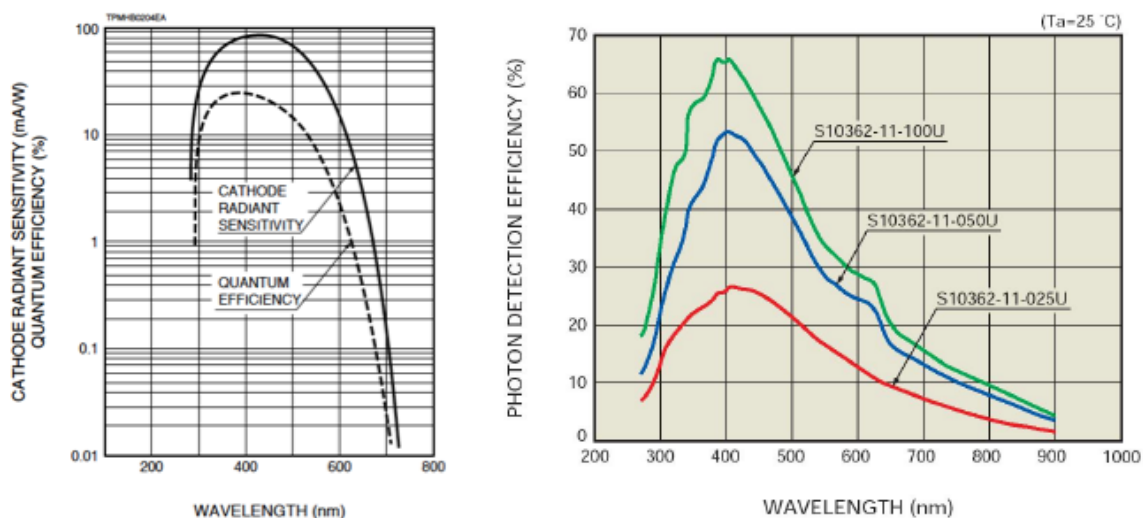


Fig. 3.18 E391a で使用されていた PMT(左図) と MPPC(右図) の光子検出効率。右図には種類の違う 3 つの MPPC の検出効率が示されている。我々の実験で使うものは青線に対応する MPPC である。

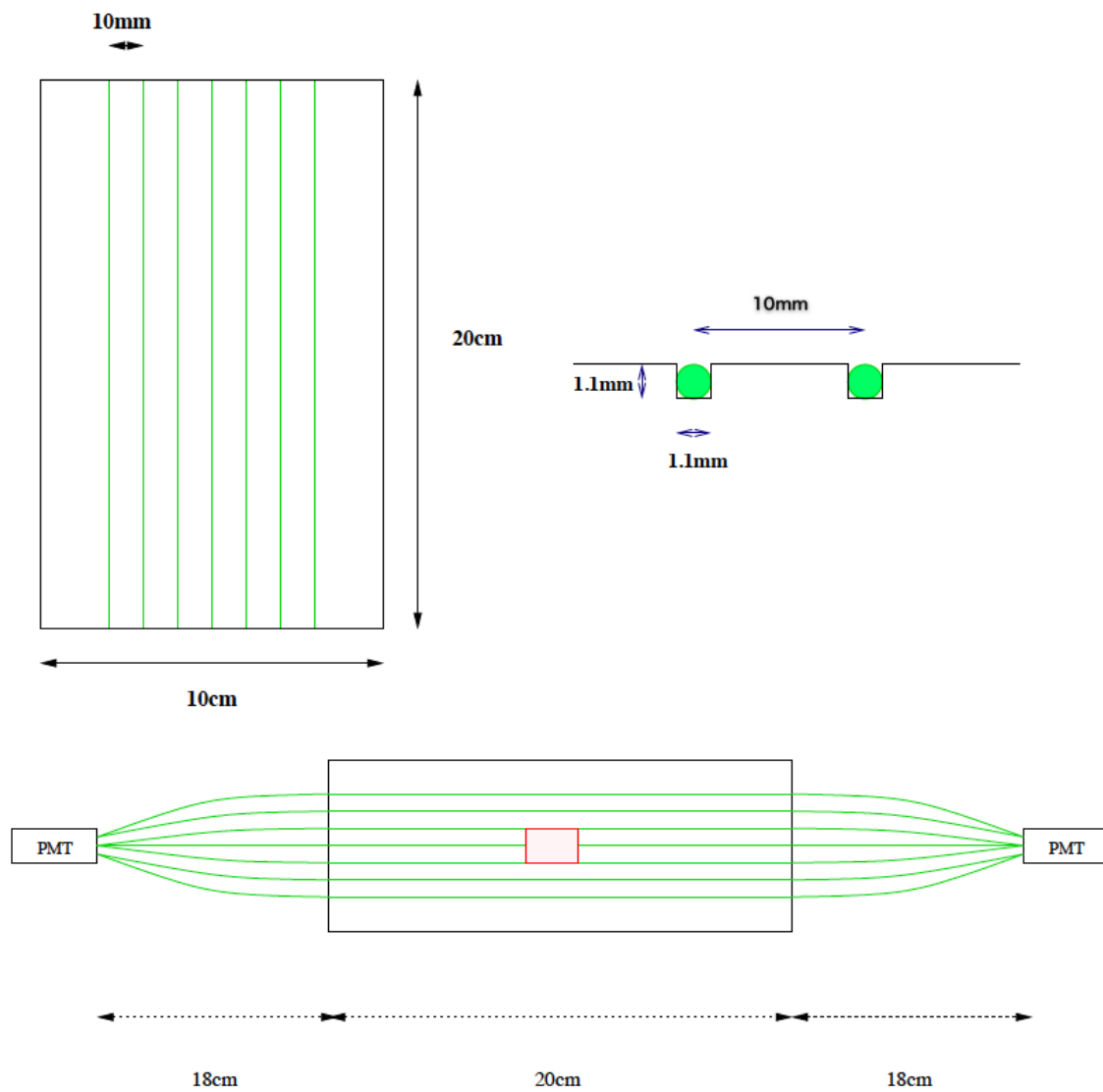


Fig. 3.19 上の図がシンチレータの configuration。厚み 3mm のシンチレータに深さ 1.1mm の溝が 1cm おきに掘られ、7 本のファイバーが埋め込まれている。下は実際のセットアップ図。赤い四角はトリガーカウンターを表す。

4 Multi Pixel Photon Counter(MPPC)

Multi Pixel Photon Counter(MPPC)とは浜松ホトニクスが開発した Pixelated Photon Detector(PPD)の総称である。PPDは多数の Avalanche Photo Diode(APD)ピクセルから構成された半導体光検出器である。浜松フォトニクスでは APD ピクセルサイズやピクセル数の違う様々な MPPC が開発されている。MPPC の特徴は小型、安価、high gain、高い photon counting 能力、高い量子効率、高い磁場耐性であり医療器機等への応用が期待されている。その反面ダークカウントノイズと呼ばれる熱電子由来のノイズが 1p.e. レベルの閾値で数百 kHz ~ 1MHz 程度あるという弱点も持っている。この章ではまず MPPC の種々の特性について触れた後、我々の実験で使用を決めた MPPC について述べる。

4.1 MPPC の動作原理

図 4.1 に MPPC に使われている APD の模式図を示す。この図にある通り MPPC は P on N 型の半導体検出器であり、逆バイアスを印加させることにより PN 接合部に高電場を生成し、高電場領域の上下に空乏層を形成する。光子が入射するとこの空乏層内で内部光電効果を起こし電子-ホール対を生成する。この対生成に必要なエネルギーは 1 ~ 2eV 程度であり、光電面によって外部光電効果 (閾値 2 ~ 6eV 程度) を起こす通常の PMT に比べて高い量子効率を得る事が可能となっている。次に信号検出原理を説明する。電子-ホール対が P 側の空乏層で生成した場合は電子が、N 側の空乏層で生成した場合はホールがキャリアとなって高電場領域に向かってドリフトする^{*3}。その後高電場領域において衝突電離を繰り返しアヴァランシェ増幅を起こすことにより信号を検出する。また衝突電離の確率は電場の強さと温度に依っており^{*4}、電子とホールでもその確率が異なる [14]。この特性により APD には二つの動作過程が存在する。それは

1. ノーマルモード

低バイアスでの動作モードであり、その出力は入射光子の数に比例する。

2. ガイガーモード

素子への印加電圧を上げていくことでノーマルモードから移行する高バイアスでの動作モード。このモードでは入射光子の数に依存せず印加電圧のみに依存する出力を得ることができる。

ここで 1 光電子に対する増幅率を gain と定義すると

$$gain = Q_{(1\text{photo electron 相当する出力電荷})} / \text{素電荷}$$

^{*3} APD には十分な電場がかかけられているため両者のドリフト速度はおよそ 10^7 cm/s で電圧、温度によらず一定になっている

^{*4} 温度が上昇した場合には格子振動が大きくなり、キャリアとフォノンとの衝突確率が増えることでキャリアのエネルギーが減り、同じ電場に対しても衝突電離が起こる確率が減少する

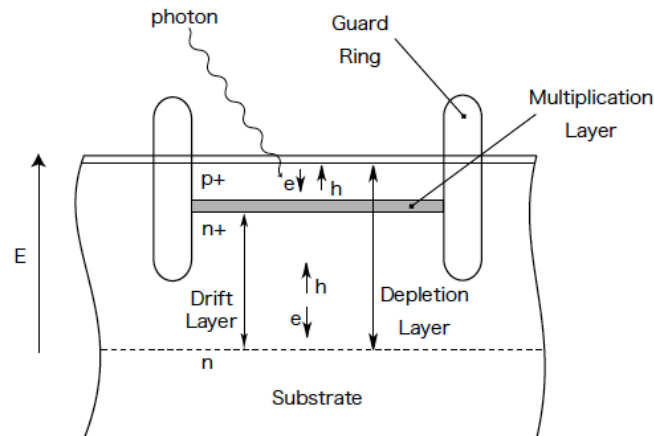


Fig. 4.1 MPPC に使用されている APD の模式図

となりノーマルモードでは $10 \sim 100$ 程度、ガイガーモードでは $10^5 \sim 10^6$ 程度となる。また APD では印加電圧を上げて行くとノーマルモードからガイガーモードに移行する電圧があり、これをブレイクダウンボルテージと呼ぶ。MPPC ではこのガイガーモードと呼ばれる動作過程を利用して増幅を行う。次に MPPC の動作原理について説明する。図 4.2 に APD の等価回路を示す。図 4.2 に示す通り APD にはクエンチング抵抗と呼ばれる、ガイガーモードを強制収束させるための抵抗がついている。APD に光子が入射しアヴァランシェ増幅が起こると回路に瞬間的に電流が流れ、クエンチング抵抗により電圧降下が起こり、ダイオードにかかる電圧がブレイクダウンボルテージまで下がる。その結果アヴァランシェ増幅が収束する。アヴァランシェ増幅が収束すると内部の電圧が回復していき、またアヴァランシェ増幅を起こせる状態になる。MPPC はこのサイクルを用いて信号を検出する。また MPPC での動作の留意点としては

1. ブレイクダウンボルテージが温度に依存する

衝突電離の確率が温度に依存する事から温度によってブレイクダウン出来る電圧が変化する。

2. 光子検出効率が電圧に依存する

ガイガーモードでは電子がアヴァランシェ増幅を起こす確率はほぼ飽和しているがホールがアヴァランシェを起こす確率は飽和していないため [14]

が挙げられる。

4.2 MPPC の特徴

前節では MPPC に使われている APD ピクセルの動作原理について説明した。この節では MPPC そのものの持つ特性について説明していく。

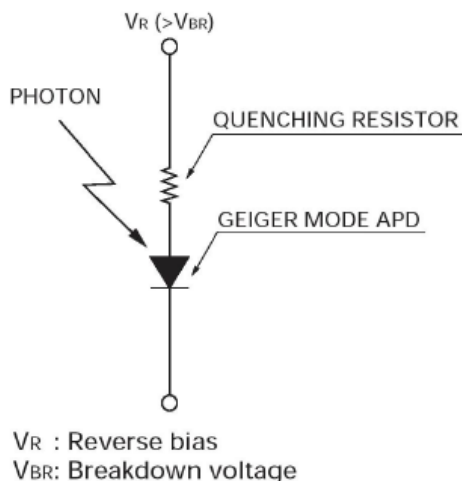


Fig. 4.2 MPPC の 1APD pixel の等価回路

4.2.1 出力波形

図 4.3、図 4.4 に MPPC の等価回路を示す。これらの図のとおり MPPC は前節で説明した APD ピクセルが並列に並んだ形をしている。図 4.3 は定常状態、図 4.4 はアヴァランシェ増幅時の等価回路を示す。図 4.4 において光子が入射しアヴァランシェ増幅が起きるとスイッチが on になる。すると APD ピクセルに貯まっていた電荷が瞬間的に消費され、アヴァランシェ増幅部の電圧が下降する。その際にはこれを補うべく R に瞬間的に電流が流れる。そしてブレイクダウンボルテージに達するとアヴァランシェ増幅が収束しスイッチが off になる。するとアヴァランシェ増幅によって消費した電荷が充電され、回路に電流が流れる電流は減少していく。これにより信号を検出することができる。この時出力される電荷は印加電圧を V_{op} 、ブレイクダウンボルテージを V_b 、その差を ΔV 、APD ピクセルの持つ静電容量を C、アヴァランシェを起こしたピクセルの数を n とすると

$$\begin{aligned}
 Q_{(\text{出力電荷})} &= n \times C \times (V_{op} - V_b) \\
 &= n \times C \times \Delta V
 \end{aligned}$$

となり光子が入射したピクセルの数に比例することになる。これが MPPC が高い photon counting 能力を有する理由である。また MPPC の gain は素電荷を e とすると

$$\text{gain} = \frac{C}{e} \times \Delta V \quad (4.1)$$

となる。この関係を利用して各電圧での gain を測定することによりブレイクダウンボルテージを求めることが出来る。さらに図 4.4 の等価回路は解析的に解くことができ出力電荷の立ち下がりの時定数は

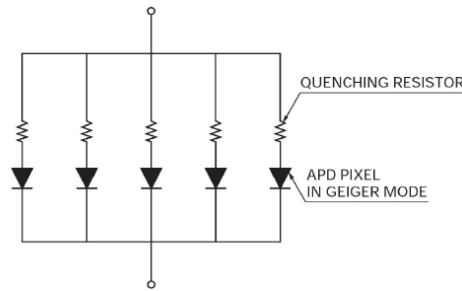


Fig. 4.3 MPPC の等価回路

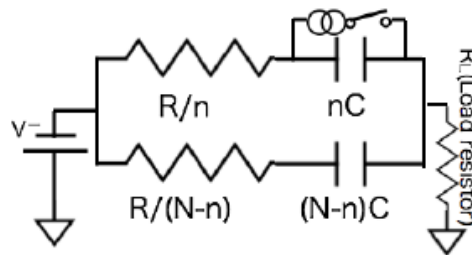


Fig. 4.4 アヴァランシェ増幅時の MPPC の等価回路。n がアヴァランシェを起こしているピクセルの数、N が全ピクセル数、R が 1APD ピクセルの持つクエンチング抵抗、C が 1APD ピクセルが持つダイオード起源の静電容量を表す。

$$T_{decay} = (N - n) \times C \times R_L + ((N - n) \times C) \times (R/(N - n)) + n \times C \times R_L \quad (4.2)$$

$$= N \times C \times R_L + C \times R \quad (4.3)$$

となり、MPPC の信号の立ち下がりには $\exp(-t/T_{decay})$ に従う。ここで R は 1APD ピクセルの持つクエンチング抵抗の値、N は全 APD ピクセル数、 R_L は読み出し側のロード抵抗を表す。第 1 項及び第 2 項はアヴァランシェ増幅を起こしていないピクセルの寄与、最後の項はアヴァランシェ増幅を起こしているピクセルによる寄与である。ここから分かるように MPPC の信号の幅は MPPC の全 APD ピクセル数と APD ピクセルの持つ静電容量とクエンチング抵抗および読み出し側のロード抵抗に依存することが分かる。例えば CV で使用が検討されている MPPC では N が 3600、C が $\sim 110\text{fF}$ 、R が $\sim 160\text{k}$ 程度であるので、50 インピーダンスで波形を測定する場合には立ち下がりの時定数が $\sim 36\text{ns}$ となる (図 4.5)。

4.2.2 MPPC 起源ノイズ

MPPC には以下に示す 3 つの特徴的なノイズが存在する。

1. ダークカウントノイズ

空乏層内で熱電子により電子-ホール対が生成され、これがアヴァランシェ増幅を起こすことにより信号として検出される。電子-ホール対は主に n 側の空乏層で生成され、ホールがキャリアーとなる。このためダークカウントノイズレートは電圧と温度に依存する。

2. アフターパルス

アフターパルスはアヴァランシェ増幅時にキャリアが格子欠陥に一旦とらわれた後、脱出して再びアヴァランシェ増幅を起こすことにより発生する。そのため本来の信号から少し遅れて検出される。このノイズレートはアヴァランシェ増幅起源なので ΔV のみに依存する。

3. クロストーク

クロストークはアヴァランシェ増幅時に 2 次的光子が生成され、その光子が異なるピクセルに入射し再びアヴァランシェ増幅を起こすことにより発生する。この過程は瞬時に起こるので出力される波形は元の波形と重なる。またこのノイズレートもアヴァランシェ増幅起源なので ΔV のみに依存する。

図 4.5 にこれらのノイズの出力波形を示す。次にこれらのノイズが CV に対してどのような影響があるかを説明する。CV では CsI での信号を veto するかどうかを判定するには出力波形を積分してその電荷量が 100keV 以上あるかどうかで判定する。従ってアフターパルス、クロストークの影響を加味すると本来得られるべき電荷よりも大きくなってしまふ。この効果により veto 閾値近くの出力波形に対しては、timing window 内に入ってしまった over veto が発生してしまう可能性がある。しかし 3 章で示した図 3.14 にあるとおり本来 50keV である波形を全て over veto したとしてもせいぜい accidental loss が十数 % 増えるだけであり、accidental loss の観点ではこの効果は問題ないことがわかる。次にリニアリティーの観点で考察する。 K^0TO 実験の解析ではバックグラウンドの理解のために CV での粒子のエネルギー分布をモンテカルロシミュレーションと比較する必要がある。3.4 節で述べたように mip ピークでは 25photo electron/3mm 程度の光量が得られると予想されるのである程度 mip の裾野の方まで見ようと思うと 100photo electron 程度までリニアリティーが必要となってくる。一方でアフターパルス、クロストークの影響下でも MPPC ではリニアリティーが入射光子の数が全ピクセル数の約 25% 程度になるまでの領域で確保されている [15]。CV で使用する MPPC は 3600 個のピクセルを持っているのでリニアリティーの観点でも十分である。しかしながらダークカウントノイズに関してはアフターパルス、クロストークによって本来よりも出力波形が大きくなり、閾値を超えたノイズによる over veto が起こる確率が増える。よってこれ以降本論でダークカウントノイズと呼ぶ時はこのアフターパルス、クロストークの影響を含んだ状態でのダークカウントノイズとし、このノイズによる loss を見積もる場合はその値を用いることにする。

4.3 CV 用 MPPC

現在市販されている MPPC は APD ピクセルの大きさの違いで 3 種類に分類される。また受光面サイズとしては 1mm×1mm と 3mm×3mm が存在する。表 4.1、表 4.2 にこれらの主なパラメーターを記す。このパラメーターは温度が 25 °C、 ΔV が約 -1.3V の時のものである。これを見ると APD ピクセルが大きくなるとメリットとデメリットが存在することが分かる。メリットは

1. 光子検出効率の向上

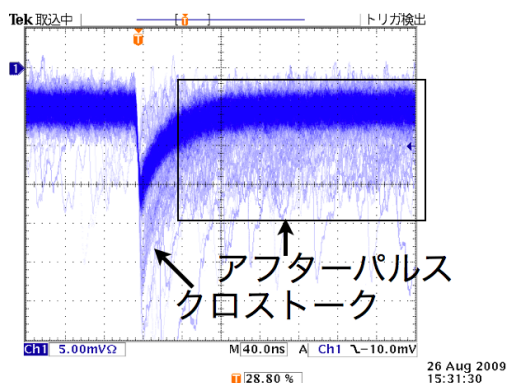


Fig. 4.5 1p.e. ピークに閾値を設定した時オシロスコープで観測される波形。この時 MPPC は遮光されており、見えている信号は全てダークカウントノイズ起源である。この時の信号の立ち下りの時定数 (ピークから波高が $1/e$ になる時間) は 34.67ns であった。

受光面内で APD ピクセルの占める割合 (アクティブエリア) が増加することで光子検出効率が増加する。

2. gain の増加

APD ピクセルが大きくなると APD のもつ静電容量も増加する。これにより検出される信号が大きくなる。

デメリットは

1. ダークカウントノイズの増加

APD ピクセルが大きくなると空乏層の領域も増加するのでダークカウントノイズの発生確率が上昇する。

2. 波形が伸びる

APD ピクセルの持つ静電容量が増加すると (4.3) 式より信号の立ち下がりが伸びてしまう。

3. 電氣的ノイズの増加

APD ピクセルの持つ静電容量が増加すると、電圧印加時に静電容量が生み出すノイズ (直列ノイズ) が増加する。

4. パイルアップの確率の増加 (グランドシフト)

波形が伸びる効果とダークカウントノイズの増加によってパイルアップする確率 (信号が出力された後、グランドに落ちきるまでに次の信号が来てしまってグランドがずれる効果) が大きくなる。

同様にピクセル数が増加することによっても APD ピクセルを大きくした時と同様のデメリットがある。

CV では光子検出効率と gain の観点から $25\mu\text{m}$ 角を除外した。次に光子検出効率の観点で受光面 1mm 角 MPPC を除外した。詳しくは第 5 章で記述するがファイバーからの光を検出する場合はファイバーからの光の広がりを見なければならず、CV では直径 1mm のファイバーを使用

	25×25 μm	50×50 μm	100×100 μm
ピクセル数	1600	400	100
アクティブエリア [%]	30.8	61.5	78.5
最大感度波長 [nm]	440	440	440
光子検出効率 [%]	25	50	65
ダークカウントノイズ [kHz]	300	400	600
gain	2.75×10^5	7.5×10^5	2.4×10^6

Table. 4.1 1mm×1mm MPPC の性能まとめ。(25 時、ダークカウントノイズは個体差があり最大でこの値の 2 倍になる。)

	25×25 μm	50×50 μm	100×100 μm
ピクセル数	14400	3600	900
アクティブエリア [%]	30.8	61.5	78.5
最大感度波長 [nm]	440	440	440
光子検出効率 [%]	25	50	65
ダークカウントノイズ [MHz]	4	6	8
gain	2.75×10^5	7.5×10^5	2.4×10^6

Table. 4.2 3mm×3mm MPPC の性能まとめ。(25 時、ダークカウントノイズは個体差があり最大でこの値の 2 倍になる。)

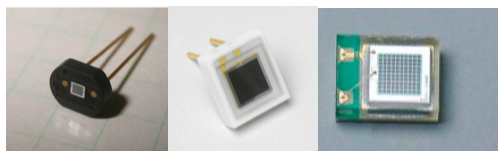


Fig. 4.6 今回使用を検討した MPPC の写真。左が 1.3mm 角 MPPC、中央がダークカウントノイズ評価に用いた 3mm 角、右端が本番及びプロトタイプに用いた表面実装型 3mm 角 MPPC。

するので受光面 1mm 角で読み出す場合は光のロスが問題となる。その結果選択として残るのは受光面 3mm 角でピクセルサイズが 50 μm と 100 μm の 2 種類となる。また光の広がりによるロスを減らすために 50 μm 角の MPPC では T2K 用に開発された受光面 1.3mm 角の MPPC が存在する (図 4.6)。従って CV で使用できる MPPC の候補はこれら 3 つとなる。本研究ではこのうちピクセルサイズが 50 μm で受光面の大きさが 1.3mm 角と 3mm 角の MPPC の使用について検討した。

CV では位置分解能を必要としないのでファイバーを個別に読み出す必要がない。そこで読み出しのチャンネル数を減らすために 1.3mm 角を使用する場合は 8 本のファイバーを個別に MPPC で読み出した後信号を束ねて読むこと (以下 ganging と呼ぶ) を検討した (図 4.7)。また 3mm 角の場合は 7 本ずつを束ねて一つの MPPC で読み出すことを検討した。

この 2 種類は APD ピクセルの大きさが等しいので光子検出効率、gain は同じになる。この 2 つのうち、以下の理由により受光面 3mm 角 MPPC の使用を決定した。

1.3mm 角 MPPC 8 個の信号を合成した時には個々の gain がばらついていると photon counting 能力が低下し、1photo electron をモニターすることができなくなる。従って同一の電圧を掛けた

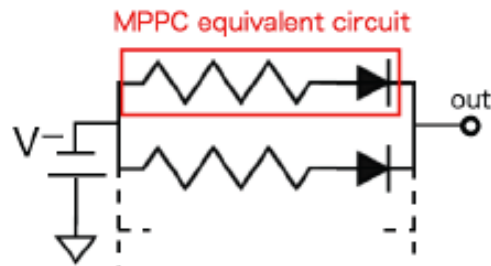


Fig. 4.7 ganging 時の configuration。MPPC を並列に並べ同じ電源から電圧を供給する。MPPC は電流源なのでそのまま信号を合成することができる。

時に同じ gain になる MPPC を選定して選ばなければならない。例えば $\pm 5\%$ で gain が一致するものを実験で必要な数を揃えようと思うと必要な数より 20% 余計に用意しなければならない*⁵。一方で印加する電圧を gain が揃うように各 MPPC に電圧を供給するという方法もあるが、回路が複雑になるというデメリットが存在する。また基板をデザインする際にも 1.3mm 角 MPPC 8 個を使用する場合は 3mm 角 MPPC を使用する場合より必要となるスペースも大きくなってしまふ。これらは 1.3mm 角 MPPC を使用する際の大きな弊害となる。さらにコストの面でも 3mm 角を使用する場合、1.3mm 角を使用する場合の約半分で済むという利点がある。この理由により CV では 1.3mm 角 MPPC ではなく、3mm 角 MPPC の使用を決定した。この章ではこの 3mm 角 MPPC の特性について以降の章に関係してくる二つの性質について議論していく。その二つとは

1. ブレイクダウンボルテージの温度依存性
2. ダークカウントノイズの温度依存性

である。この二つを測定するために図 4.8、図 4.9 のようなセットアップを組んだ。voltage supply には KIKUSUI の PAN110-15A という直流電源を用いた。この電源は設定電圧が 0 ~ 110V、設定電圧分解能は 20mV、電圧変動は 0.005%+1mV となっている [16]。この電源は電圧の表示が 100mV までしかないので YOKOGAWA の 7562 というマルチメータで電圧をモニターした [17]。このマルチメータは 0.1mV の分解能で電圧を測定する事が出来る。この電源からの電圧を図 4.9 のようにインダクタとコンデンサで組んだローパスフィルター*⁶によってノイズを落とした後に MPPC に供給する。また MPPC の信号は NIM モジュールの AMP によって信号を増幅する。この AMP は富士ダイヤモンドの TKY-0351 である (表 4.3)。この AMP を用いてまず MPPC の信号を 10 倍した後、divider で出力を半分にしさらに同じ AMP で 10 倍し、出力が 50 倍になるように調整した。その後出力された信号の電荷を豊伸の 12bit 電荷有感型 ADC を用いて取得した。MPPC 自体は恒温槽 (ETAC の HIFLEX FL211C) を用いて温度コントロールを行った。この恒

*⁵ T2K 実験用に生産された MPPC の個体別のバラツキからの類推

*⁶ 抵抗とコンデンサでローパスフィルタを作った場合はダークカウントノイズによって定常的に回路に流れる電流によって抵抗で電圧降下が起きてしまうので抵抗は使うべきではない。

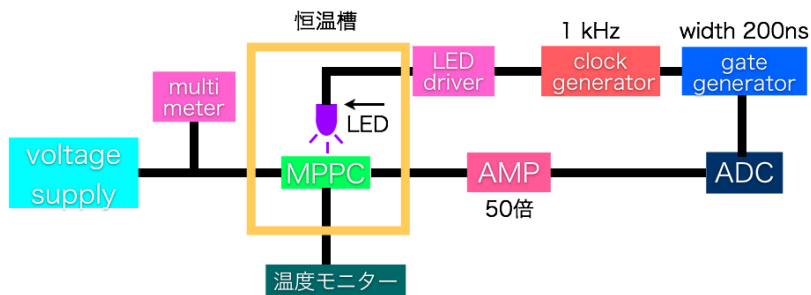


Fig. 4.8 実験のセットアップ。

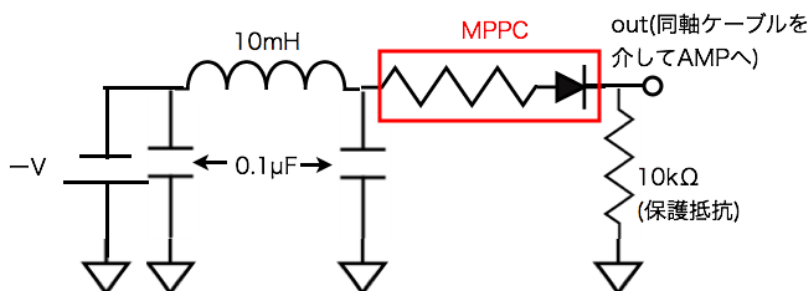


Fig. 4.9 MPPC 周りのセットアップ。

増幅率	10
band width	200MHz
dynamic range	0 ~ 1.5V
rise time	2.5ns 以下
delay	2.5ns 以下

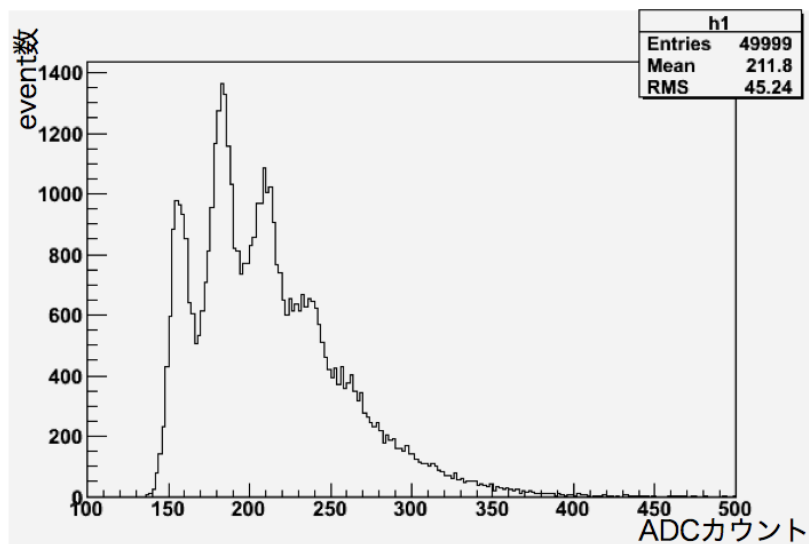
Table. 4.3 NIM アンプモジュール TKY-0351 の性能

温槽は-20 ~ 100 までの温度を 0.1 の分解能で設定でき、その温度安定性は ± 0.3 である。また MPPC 付近の温度を温度計 (TSURUGA ELECTRIC の 4258-A-23) で温度モニターし、恒温槽で温度を設定した後、この温度計で温度が安定に保たれたことを確認してから測定を行った。この温度計の確度は $\pm(0.2\% + 0.3)$ である。

4.3.1 ブレイクダウンボルテージの温度依存性

ブレイクダウンボルテージの測定では clock generator から LED driver と gate generator に同時に信号を送り LED が光ると同時に ADC 用のゲートが開くように設定した。LED の発光量が 1 photo electron level 程度になるように設定しておき 1 photo electron の電荷量を測定した (図 4.10)。具体的にはペDESTAL と 1 photo electron をそれぞれ gaussian で fit し、1 photo electron 分の電荷量を計算した。式で表すと

$$Q = (\text{ADC count of 1photo electron peak} - \text{ADC count of pedestal peak}) \\ \times 1 \text{ カウント当たりの電荷量} \div \text{AMP の増倍率}$$

Fig. 4.10 20、 $\Delta V=1.3V$ の時のADCスペクトラム。

となる。こうすることにより (4.2) 式から横軸に印加電圧、縦軸に電荷量をプロットすることで直線の傾きがMPPCのAPDピクセルの持つ静電容量に、切片がブレイクダウンボルテージとなるグラフを得ることが出来る。測定はMPPCに対して20、15、10、5、0の温度5点に対して行った。各温度に対しては0.1V刻みに7点の電圧に対して測定を行った。結果を図4.11、4.12、4.13に示す。まず図4.11よりMPPCの印加電圧と出力電荷が非常にきれいに直線にのり、MPPCの出力電荷の原理の説明が正しいことが分かる。次に図4.12は印加電圧と1APDピクセル当たりの静電容量の関係である。これを見ると静電容量は測定した温度の範囲では平均値の $\pm 2.5\%$ 以内に収まっている。しかし若干温度が上がると小さくなるようにも見え、一定とも言えず、これを確かめるにはさらに精度の良い測定が必要である。最後の図4.13は温度とブレイクダウンボルテージの関係である。これを見ると両者は互いに比例関係にあり、 $55\text{mV}/^\circ\text{C}$ の関係であることが分かる。またこの関係からMPPC周辺の外気温が分からない場合でもMPPC自身が精度よい温度計となることが分かる。

4.3.2 ダークカウントノイズの温度依存性

次にダークカウントノイズの測定について議論する。まず前節と同じようにLEDを光らせてMPPCの1photo electronピークのADCカウントをもとめる。次にLEDをoffにしてダークカウントノイズしか存在しない状態にしてADCのデータを取る(図4.14)。これによりダークカウントノイズを測定する。具体的にはADC分布の中である閾値を超えたeventの数を数え上げ、測定時間をgate widthと取得データ数の積で定義し割り算することで求めた。n photo electronピーク以上のダークカウントノイズのレートを $R(n)$ 、その閾値以上のeventの数を $N(n)$ とすると、

$$R(n) = \frac{N(n)}{\text{gate width} \times \text{取得データ数}}$$

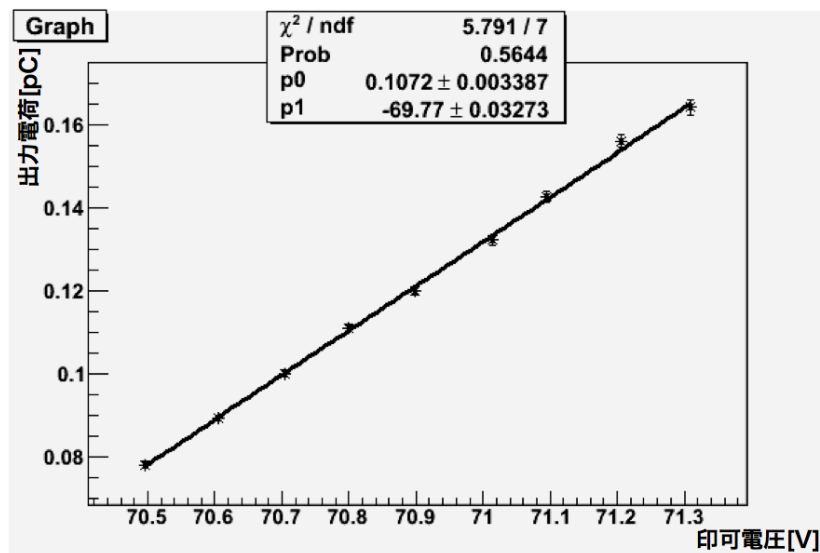


Fig. 4.11 20 の時の印加電圧と出力電荷の関係。fit パラメーターのうち p0 が APD ピクセルの持つ静電容量 [pF]、p1 が $-1 \times$ ブレイクダウンボルテージ [V] となっている。

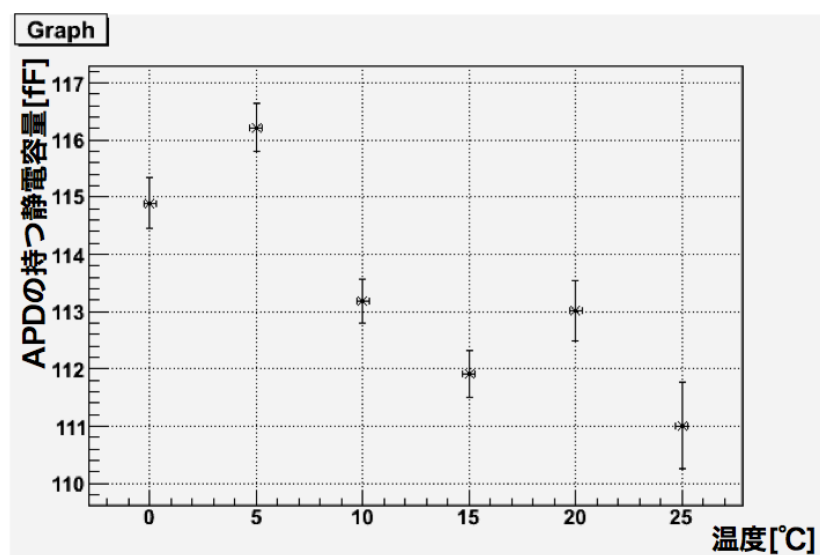


Fig. 4.12 APD ピクセルの持つ静電容量と温度の関係。

となる。測定は 20、15、10、5、0 の温度 5 点に対して行った。また MPPC にかかる電圧を $\Delta V = 1.3V$ で測定した。今回使用した 3mm 角 MPPC は出荷時検査におけるダークカウントノイズ測定で表 4.2 に示される値とほぼ同じ値であったことから典型的な大きさのノイズレートを有する個体だと推測される。

次に図 4.15 にダークカウントノイズの測定結果を示す。この図を見ると 20、0.5 photo electron threshold だと 4MHz もあることがわかる。さらに MPPC の個体差を考えるとこの 2 倍程度にノイズレートが達する恐れもある。このため CV では 3mm 角受光面の MPPC を使用する

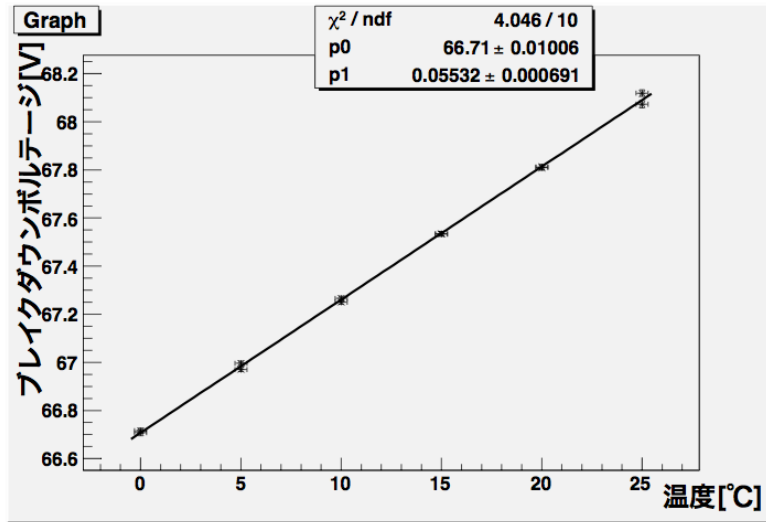


Fig. 4.13 ブレイクダウンボルテージと温度の関係。p1 が直線の傾きを示す。

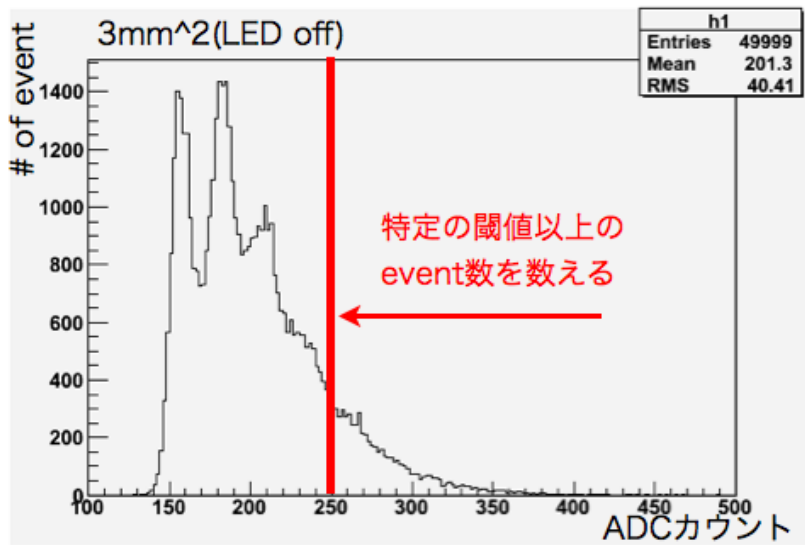


Fig. 4.14 LED off 時の ADC スペクトラム。

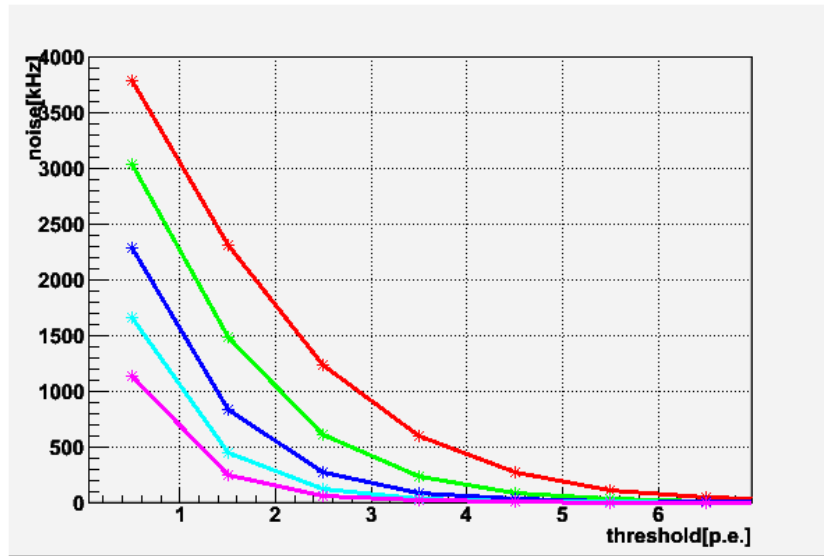


Fig. 4.15 横軸は閾値の値、縦軸はノイズレート [kHz] になっている。上の赤から順に 20 、 15 、 10 、 5 、 0 での測定結果となっている。

際には冷却することを前提に使用することにした。

4.4 まとめ

K^0TO 実験における CV では光検出器として MPPC を採用することに決定した。その中で数ある MPPC の内、APD ピクセルサイズが $50\mu\text{m}\times 50\mu\text{m}$ 、受光面サイズが $3\text{mm}\times 3\text{mm}$ のものの使用を決定した。またこの MPPC は非常にノイズレートが大きいため CV では冷却する必要がある。これ以降の章ではこの冷却システムも含めたプロトタイプ CV について議論していく。

5 プロトタイプ CV の開発

本研究では CV 制作のためにシンチレータ 1 ストリップ分の試作機を開発し、その性能評価をおこなった。プロトタイプを制作するにあたって

1. プロトタイプ CV のデザインの決定
2. 使用するシンチレータ素材の決定
3. アンプの開発
4. MPPC とファイバーの接続方法の確立
5. MPPC 冷却機構の開発
6. プロトタイプ制作 (シンチレータ + ファイバーの接着)

を行った。この章ではこれらの項目について順を追って議論していく。

5.1 デザイン

front-CV 及び rear-CV それぞれは幅 7cm、厚さが 3mm、長手方向に対して様々な長さのシンチレータストリップ 48 枚によって構成されている。CV での要求性能は 3ns 以下の時間分解能と 100keV 当たり 3photo electron 以上の光量が CV の全領域で達成されなければならない。CV のシンチレータストリップの中でこの要求が 1 番厳しいのは CV プレーンの内、真中のシンチレータストリップである (図 5.1)。この部分は大きさが約 1000mm×70mm×3mm である。シンチレータには深さ 1.1mm、幅 1.1mm の溝が 1cm 間隔で 7 本掘られ、ファイバーが埋め込まれる。ファイバーは片側は 25cm 伸ばした後 MPPC で読み出され、もう片方は 1m 引き延ばされた後に MPPC で読み出される。このストリップはファイバー部分が長いことファイバーによる減衰の影響が大きく、シンチレータの端に粒子が当たる場合はシンチレータの中で 1 番光量が少ない場所となり、要求を満たせない可能性が 1 番高い部分となる。従って本研究ではまずこの 1 ストリップ分のプロトタイプを制作し、そのプロトタイプの全域で CV が満たすべき要求を満たすことを証明する。これによりこのデザインで CV を制作することで $K^O TO$ 実験での要求を満たす CV を制作できることを証明する。

5.2 シンチレータの決定

$K^O TO$ 実験では波長変換ファイバーとしてクラレのファイバー径が 1mm の Y11 の使用を検討している。この Y11 には曲げに強い Non-Style と弱い Style、シンチレーション材の濃度の違い

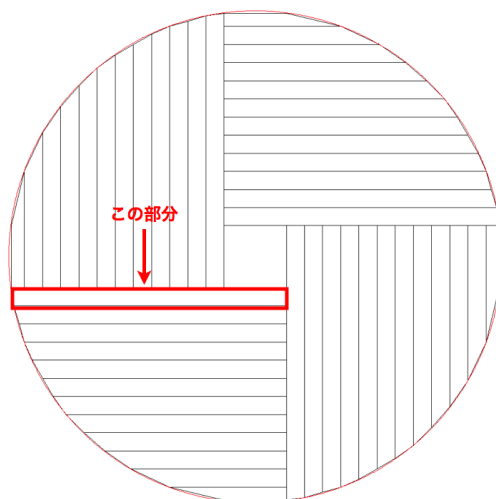


Fig. 5.1 赤の枠で括った部分が CV のシンチレータストリップで一番大きい部分。

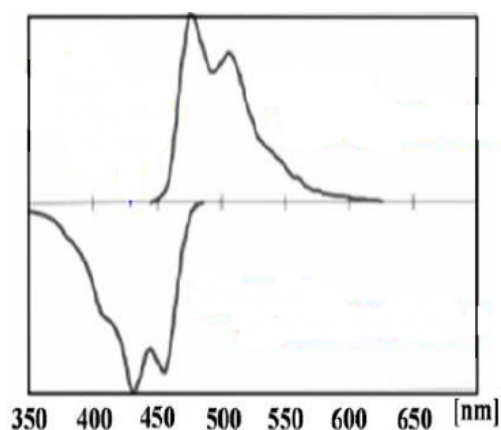


Fig. 5.2 Y11 の吸収発光波長。下部が吸収波長を、上部が発光波長を表す。

などで様々な種類が存在する。このうち曲げに強い弱いの違いはファイバーを曲げた時の光の損失によって定義される。例えば曲げに弱いタイプは推奨最小曲げ半径 (loss が無視できる最小の曲げ半径) が 10cm、強いタイプは 5cm である。CV では曲げに強いタイプを用いる。図 5.2 に Y11 の吸収発光波長を示す。このファイバーは青色波長の光を吸収し緑色の光を出すのでシンチレータをファイバーで読み出す場合相性が良いとされている。CV ではこの波長変換ファイバーと 2 種類のシンチレータの組み合わせによる MPPC 読み出しでの光量を比較し、使用するシンチレータを決定することにする。シンチレータの候補として ELJEN の EJ204 と EJ212 との比較を行った。

図 5.3 に EJ204 の主なパラメーター及び発光波長を、図 5.4 に EJ212 の主なパラメーター及び発光波長を示す。これを見ると EJ212 よりも EJ204 の方が発光量が大きく、EJ212 よりも短波長側に発光波長の分布が伸びており、一般的に Y11 との相性も良いとされている。しかしながら現実的な問題として EJ204 の方が EJ212 よりもコストがかかるので、制作上の観点では EJ212 で十分な光量が得られることが望ましい。このシンチレーターの光量の比較のためにビームテス

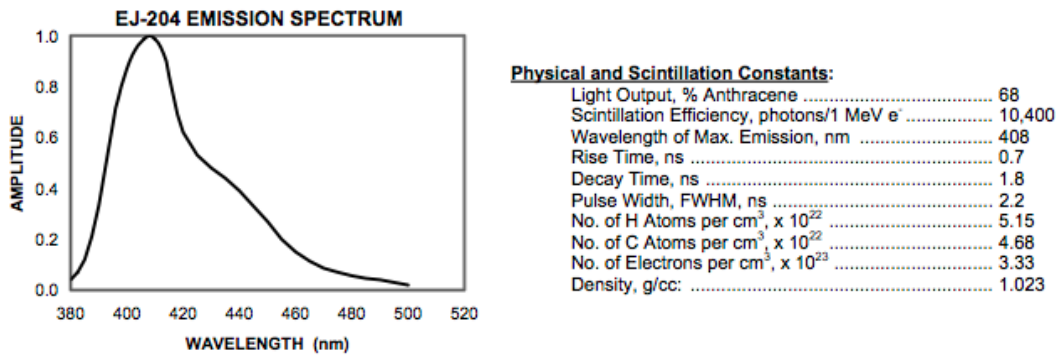


Fig. 5.3 右図が EJ204 の主なパラメーター、左図が EJ204 の発光スペクトラム。380nm ~ 500nm の発光波長を持つ。EJ212 よりも短波長側にスペクトラムが伸びており、Y11 との相性が良いとされている。

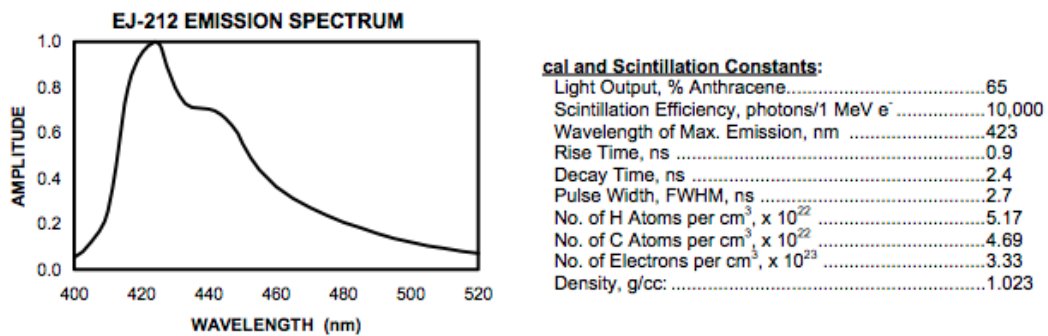


Fig. 5.4 右図が EJ212 の主なパラメーター、左図が EJ212 の発光スペクトラム。400nm ~ 520nm の発光波長を持つ。

トを行った。以下の節では実験のセットアップ及び光量比較の結果について議論する。

5.2.1 光量比較実験のセットアップ

シンチレータの光量比較を行うために東北大学電子光物理学研究センターの陽電子ビームを用いた (図 5.5)。以下に今回使用した陽電子ビームの仕組みを簡単に説明する。まず電子が図 5.5 の線形加速器、次いで STB リング (ストレッチャー・ブースターリング) によって、1.2GeV まで加速される。電子は STB リング中の炭素ファイバーで制動放射を起こし、放射された γ 線が GeV γ 照射室に入る。GeV γ 照射室に入った γ は金箔ターゲットで電子・陽電子対を生成する。最後に電子・陽電子対は双極子電磁石で運動量を選択され、コリメーターによってコリメートされた後にビームラインに照射される。この陽電子ビームは 200 ~ 840MeV/c の運動量を選択することができ、今回のビームテストではビーム収量が最大となる 600MeV/c の陽電子ビームを用いた。次に実験で用いたシンチレータ及び読み出しについて説明する。

図 5.6 に実験で用いたシンチレータのセットアップを示す。シンチレータの大きさは 200mm×100mm×3mm で、深さ 1.1mm、幅 1.1mm の溝が 8 本掘られている。溝には Y11 が埋

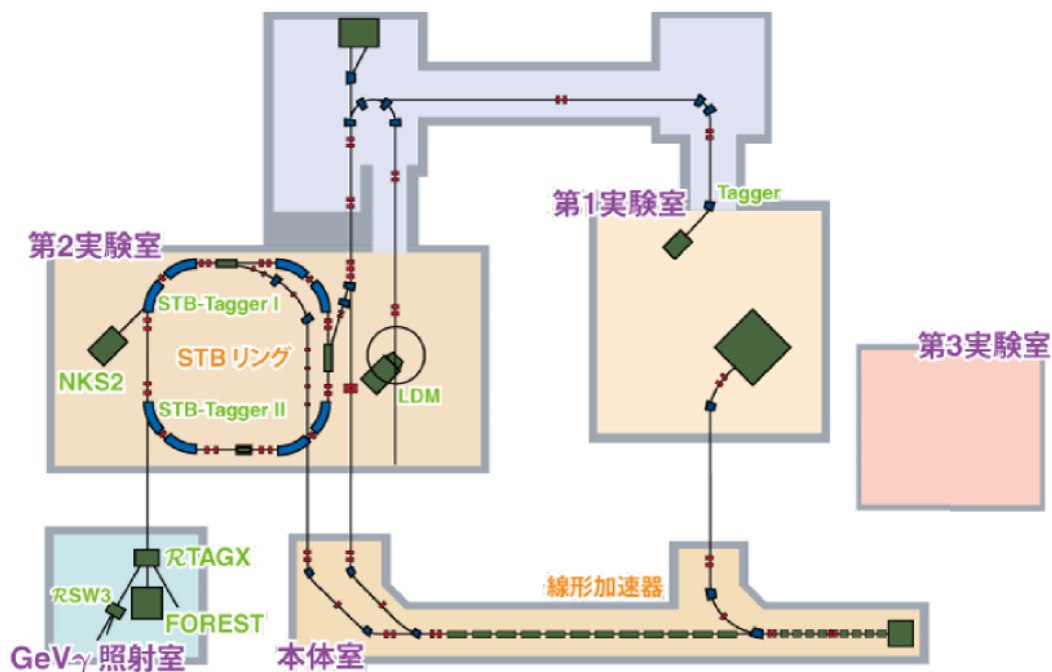


Fig. 5.5 電子光学研究センターの加速器全体図。実験は左下の GeV γ 照射室で行った。

め込まれ、その両側は受光面 1.3mm 角 MPPC によって読み出す^{*7}。ファイバーと MPPC の間は GOMI コネクター^{*8}[19] で固定し、その間には GE 東芝シリコンの TSF451 というシリコングリースを充填した。またシンチレータ自身は厚み 50 μm のアルミナイズドマイラを反射材として巻いた (図 5.7)。MPPC は片側は ganging により読みだし、もう一方はそのまま個別に読み出されるようにした^{*9}。ここで言う ganging とは 4 章の図 4.7 で示したように MPPC を並列に並べて電圧を供給し、信号を合成して読み出すことである。また MPPC の電圧供給には KIKUSUI の PAN110-1.5A を使用し、MPPC の印加電圧を $\Delta V=1.3\text{V}$ で使用した^{*10}。

MPPC からの信号は前章の測定で使用した NIM のアンプモジュール TKY-0351 で 100 倍に増幅した。実験室自体は 20 に保たれ、MPPC が取り付けられたシンチレータは厚さ 3mm のアルミでできた暗箱に入れ、遮光されるようにした。

次に実験全体のセットアップ概念図を図 5.8 に示す。この実験ではシンチレータの光量測定の他に 3 つの検出器の性能テストが行われた。実際にはトリガーカウンターの間には他の検出器用のトリガーカウンターや検出器自身が置かれているが今回はシンチレータの光量測定に使用したのみを示すことにする。図の 1~5 の黒四角はトリガー用のカウンターを示しており、1 と 2 は厚さ

*7 このビームテストは 2008 年に 12 月に行われたのだがこの当時はまだ 3mm 角は市販されておらず、1.3mm 角の使用を前提に考えていたため。

*8 この GOMI コネクターはファイバーと MPPC を固定するために T2K 実験で開発された樹脂製のコネクターである。

*9 この個別読み出しはシンチレータ中の光の広がり、シンチレータに対するビーム入射位置の変化による光量の変化を測定するために用いた。

*10 ΔV = 印加電圧 - ブレイクダウンボルテージ

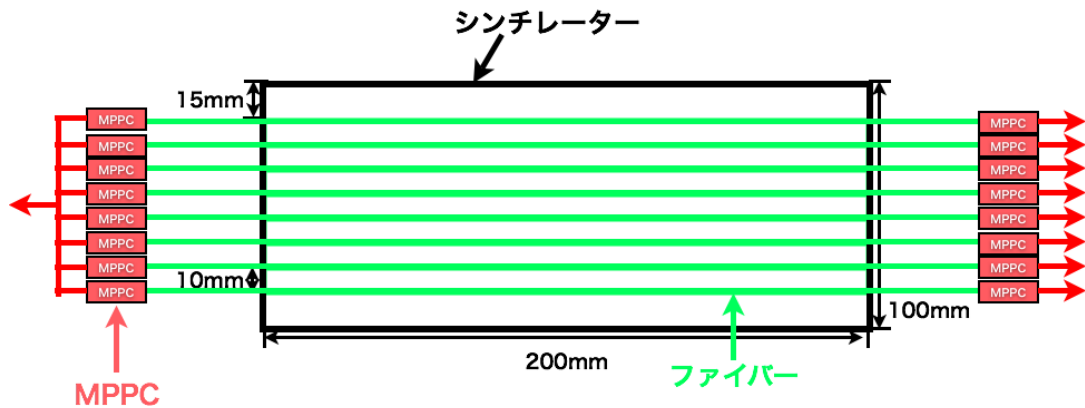


Fig. 5.6 ビームテストで用いたシンチレーター

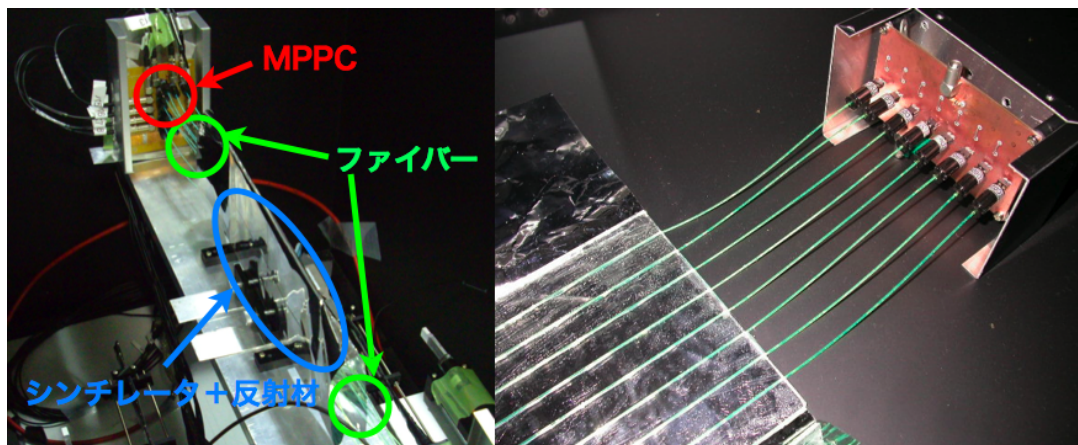


Fig. 5.7 左はビームテストの実際の写真、右はビームテストで使用したシンチレータの拡大図。

5mm 大きさ $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ のシンチレータを PMT で両読みしており、3~4 は同じ大きさのシンチレータを PMT で片読みしている。今度は Daq のロジックを図 5.9 に示す。トリガーはまずコモントリガーとしてトリガー 1、2、3、4 の coincidence をとったものを作る。次にコモントリガーと clock generator からのパルスと同じスイッチモジュールに入力し、スイッチを切り替えることでビームデータ取得用のコモントリガーモードと clock generator からのパルスだけのランダムトリガーモードに出来るようにした。このランダムトリガーモードは MPPC のダークカウントノイズの ADC スペクトラムを取得し、MPPC の gain をモニターするために使った。

5.2.2 実験結果

実験の解析方法は

1. photo electron 変換係数 (1photo electron 当たりの ADC チャンネル) の計算
2. ビーム event での光量測定およびシミュレーションによる energy deposit の見積もり

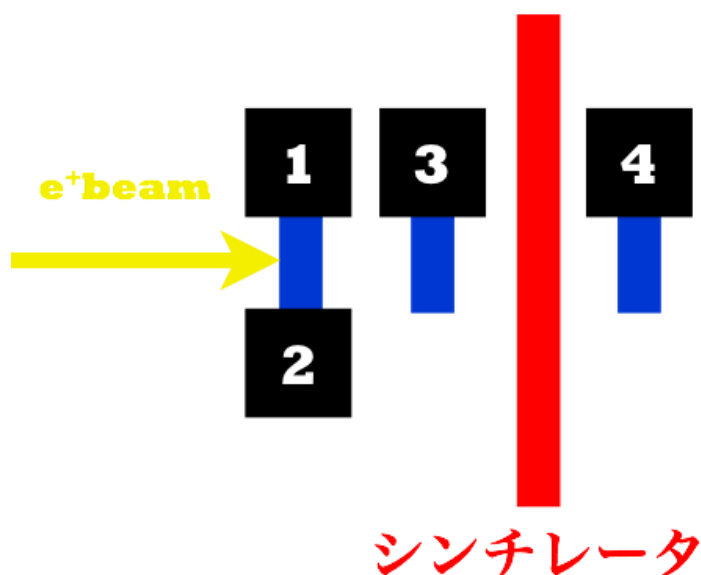


Fig. 5.8 ビームテストのセットアップ概念図。黒い四角で囲まれた部分はトリガー用のカウンターを示す。

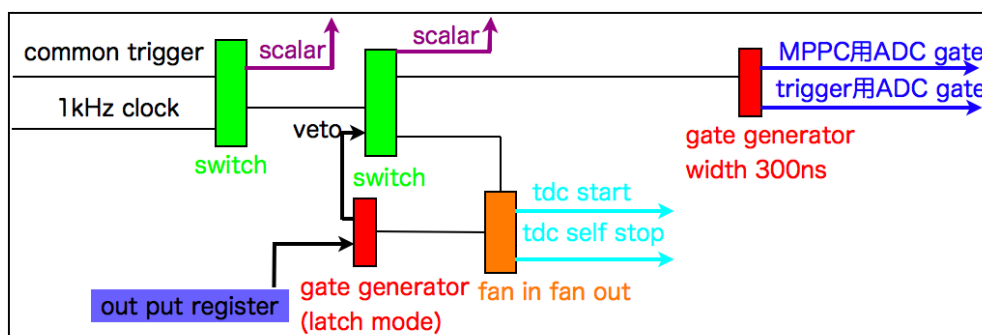


Fig. 5.9 ビームテストに使用した Daq のロジック

3. 100keV energy deposit 当たりの光量の計算

によって行う。まず 1 番目はランダムゲートモードでダークカウントノイズの ADC 分布を取得し、1photo electron と pedestal をそれぞれ gaussian で fit し、そのピーク位置の差から photo electron 変換係数を求める (図 5.10)。次にビームを当てた event のピークを gaussian で fit し (図 5.11)、photo electron 変換係数を用いて photo electron 数を求める。これを式で表すと、

$$\text{光量} = (\text{mip peak} - \text{pedestal}) / \text{photo electron 変換係数}$$

となる。表 5.1 に解析結果を示す。次に mip ピーク相当での energy deposit を見積もるためモンテカルロシミュレーションにより、厚さ 3mm のシンチレータに運動量 600MeV/c の陽電子ビー

ムを打ち込んだ際の energy deposit を見積もった (図 5.12)。この結果シンチレータには mip ピークで 470keV の energy deposit があることが分かった。表 5.1 においてはこの値を用いて 100keV 当たりの光量を算出した。この結果から EJ212 を使用した場合には 3mm 厚で 25photo electron を達成できており、3.4 節での見積もり通りの光量が得られていることが分かる。また 3.3.2 節で考察したように 100keV energy deposit 当たり、3photo electron 以上の光量があれば必要な不感率を満たすことができ、この結果から不感率の観点ではどちらも十分な光量を得ることが分かる。しかし MPPC のダークカウントによるロス、ファイバーによる光の減衰を考えた場合はより多くの光量があることが望ましい。そこで CV ではシンチレータの素材として EJ204 の使用を決定した。

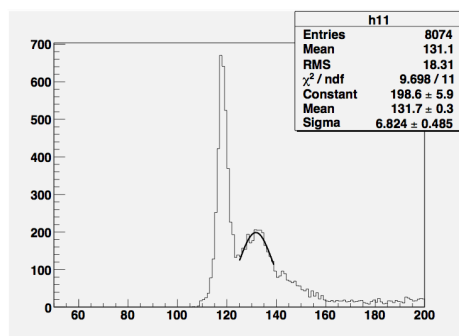


Fig. 5.10 ビームテストでのランダムトリガー時の ADC スペクトラム。横軸は ADC カウント、縦軸は event 数を示す。左のピークがペDESTAL、右のピークは 1photo electron peak である。

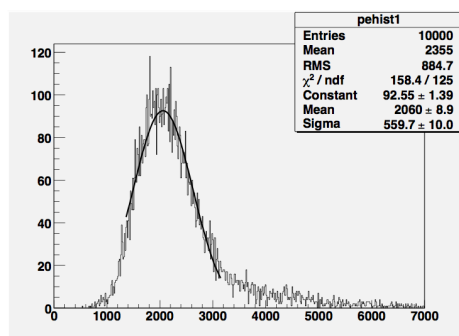


Fig. 5.11 ビームテストでのビームトリガー時の ADC スペクトラム (mip ピーク)。横軸は ADC カウント、縦軸は event 数を示す。

5.3 アンプの開発

本実験では MPPC の gain のモニターができるように MPPC の信号を AMP で増幅しなければならない。増幅する際には外部的なノイズを排除するために出来るだけ MPPC の直近で増幅する

シンチレータの素材	光量 [p.e./mm]	100keV 当たりの光量 [p.e./100keV]
EJ212	8.37 ± 0.15	5.34 ± 0.096
EJ204	10.08 ± 0.11	6.43 ± 0.07

Table. 5.1 実験結果。100keV 当たりの光量はシミュレーションにより mip peak での energy deposit を見積もり、その値で割った。

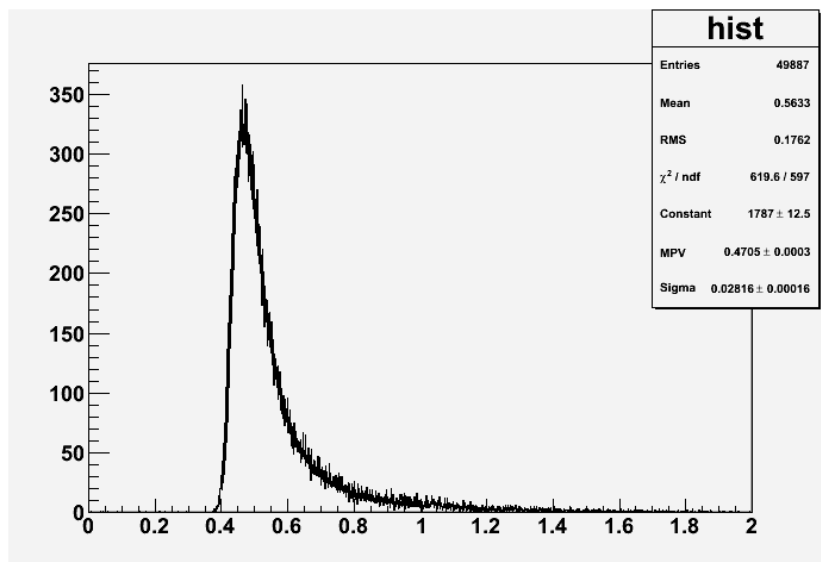


Fig. 5.12 シミュレーション上で厚さ 3mm のシンチレータに運動量 300MeV/c の陽電子ビームを打ち込んだ際の energy deposit。横軸がエネルギー [MeV]、縦軸が event 数を示す。

必要がある。これはプロトタイプにおいても同じである。本研究では実機の CV で AMP が満たさねばならない要求を明らかにするとともに、プロトタイプ用の AMP の開発を行った。

5.4 アンプに要求される性能の概要

AMP を作る際に決めなければならないことは

1. 増幅率の決定
2. 必要な周波数帯域幅の決定
3. 必要なダイナミックレンジの決定

がある。この節では 1. の増倍率の決定について述べる。

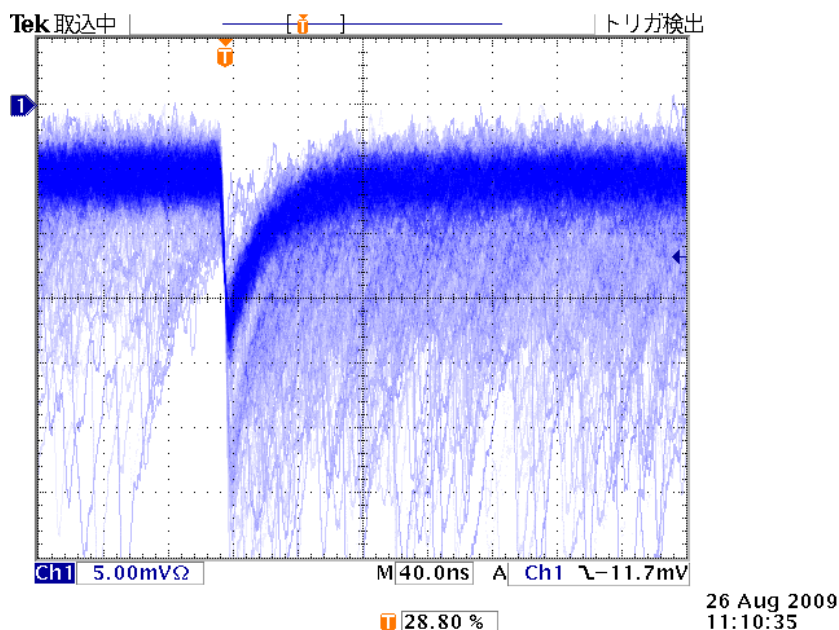


Fig. 5.13 温度 20 $\Delta V=1.3V$ の時、NIM モジュールアンプ TKY0351 で MPPC の 1photo electron を 50 倍した図。縦軸は 1 目盛り 5mV、横軸は 1 目盛り 40ns になっている。

増倍率の決定 プロトタイプテストでは 12bit 電荷有感型 ADC を用いて信号を読み出すことを前提としている。従ってこの ADC で十分精度よく photo electron 変換係数^{*11}を測定できる必要がある。そのためには pedestal と 1photo electron のピーク間の ADC カウントが 20 程度必要になる。12bit の場合は 1 カウント 0.25pC となるので、20 カウントは 5pC となる。一方前章の測定から APD ピクセルの持つ静電容量は 0.1pF 程度であることが分かる。MPPC ではキャリアブレーションによってブレイクダウンボルテージを求めなければならないので使用したい電圧 ($\Delta V=1.3V$) よりもある程度低い部分でも gain が見れる必要がある。従ってプロトタイプ作成に当たっては $\Delta V=1V$ で gain が 5pC となるように増幅率を 50 倍に決定した。次に図 5.13 に NIM モジュール TKY0351 で 50 倍にした 1photo electron の波形を示す。この時 1photo electron の波高は約 15mV あり、十分グラウンドのベースラインから分離されている。従って本実験においても信号を 50 倍することが出来れば十分に gain をモニターすることができる。この理由により本実験での AMP に対しても 50 倍の増倍率を課すことにする。

その他の要求はビームテストによりその要求を明らかにした。以降の節ではそれを説明する。

5.5 アンプに対する要求性能の決定

周波数帯域の決定 CV は第 3 章で説明したとおり時間分解能に対して 3ns 以下という要求がある。MPPC のダークカウントノイズ信号の立ち上がり時間は 3ns 程度である。従って MPPC に入射する光子の時間的広がり十分に小さければこの信号と同じ速さで信号が立ち上がることにな

*11 1photo electron ピークの ADC カウント

る。その場合には時間分解能をよくするにはこの速い立ち上がりの信号をそのままの形で増幅できる速い(周波数特性のよい)アンプが必要となってくる。シンチレータを直接読み出す場合はシンチレータの発光の時間分布が1~2ns程度なので出力波形に殆ど影響を及ぼさず、先ほど述べた速いAMPが必要となってくる。しかしCVのように波長変換ファイバーを用いて読み出す場合は事情が異なってくる。

Y11の発光時間の分布は立ち下がりが6.8nsある[20]。シンチレータからの光はファイバーに吸収され再発光する。ここでY11の発光の時定数を T_{Y11} 、MPPCの立ち下がりの時定数を T_{MPPC} と定義し、また計算の簡略化のために両者の立ち上がりが理想的(瞬間的)に立ち上がると仮定すると、両者の時定数によって立ち上がり(T_{rise})は

$$T_{rise} = \exp(-t/T_{Y11}) - \exp(t/T_{MPPC}) \quad (5.1)$$

となる(図5.14)。ここで受光面1.3mm角MPPC8個をgangingして使用した時の時定数を50nsとすると*¹²この図を見ると本来3ns以下であるMPPCの立ち上がりが12ns程度まで広がっていることが分かる。これを確かめるために再び東北大学電子光理学研究センターの陽電子ビームを用いて評価を行い、AMPに必要な周波数特性を決定することにした。

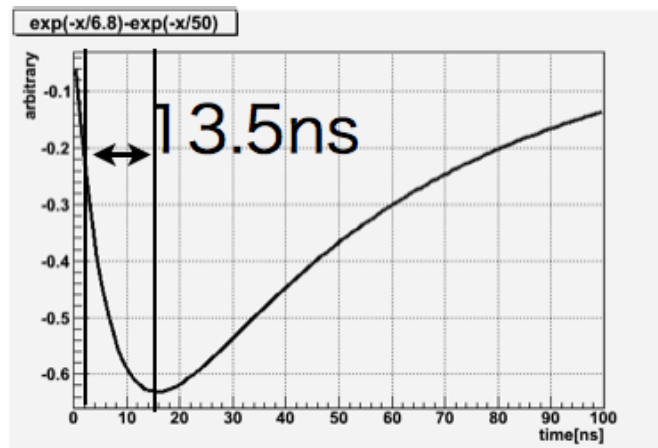


Fig. 5.14 ファイバーの時間分布とMPPCの波形のconvolution。立ち上がりはどちらも δ function的に立ち上がると仮定している。立ち下がりにはexponentialを仮定し、立ち下がり時定数をMPPCが50ns、ファイバーが6.8nsとした。また立ち上がり時定数はピークの高さから1/eとなる地点までの時間とした。

この実験では前回の実験と同様なセットアップで行ったので詳細は省く。このビームテストではトリガーカウンターのcoincidenceをオシロスコープのトリガーとして入力しMPPCからの出力波形をオシロスコープで測定した。オシロスコープはLANケーブルを介してPCにつなぎ、1Hz(1波形データ/s)で自動的に波形データを取得できるようにした。オシロスコープは周波数帯域1GHzのものを使用した。またこの時波形データは時間のサンプリングレート5GHzでデータ

*¹² 50 インピーダンスで読み出すことを考えると4章の(4.3)式よりMPPCの時定数は~48ns程度(今回使用したものは $N = 667 \times 8$, $C \sim 120$ fF, $R \sim 160$ k Ω)となる。

Table. 5.2 1photo electron と mip ピークの比較。1photo electron の非増幅時の波高が?となっているのは小さすぎて測定できないためである。

	電荷量 [pC]	50 倍時の電荷量 [pC]	波高 [mv]	50 倍時の波高 [mv]
1photo electron	0.1	5pC	?	15
mip(30photo electron)	30	150pC	5	250

を取得した。使用したシンチレータは前述のビームテストで使用した EJ204 のシンチレータを使用した。なお、今回読み出しは両側とも 1.3mm 角 MPPC を 8 個 ganging して読み出した。さらに MPPC 信号は何も増幅せずそのままオシロスコープに入力した。実験環境は前回と同じく 20、MPPC は $\Delta V = 1.3V$ で使用した。データは全部で 110event 取得した

次に解析方法について説明する。図 5.15 のように波形のピークの地点の時間とピークから高さが $1/e$ になる点の時間差を立ち上がり時間として各波形について計算した。こうして得られた立ち上がり時間の分布を図 5.16 に示す。これにより MPPC + 波長変換ファイバー読み出しでは mip 貫通時の波形の立ち上がりは 15.5ns 程度になることが分かる^{*13}。この時、信号の立ち上がりを単なる exponential で近似すると AMP が増幅しなければならない周波数帯域の上限は $1/15.5ns=64.5MHz$ となる。従って CV 用の AMP としてはこれに安全ファクターを掛けて帯域幅として 100MHz まで増幅できることを課すことにした。

ダイナミックレンジの決定 次にダイナミックレンジについて議論する。前節のビームテストの結果より mip peak では 30photo electron 程度の光量がある。また 3 章より 1photo electron は 0.1pC 程度である。さらに次に図 5.17 に各取得波形におけるピーク電圧の分布を示す。これを見ると mip peak で 5mV 程度の波高になることが分かる。従って 50 倍に増幅するとその波高は 250mV になる。一方図 5.13 より 50 倍に増幅すると 1photo electron の高さは 15mV 程度になる。これらを表にまとめると表 5.2 のようになる。

この表で 1photo electron の波高と mip の波高の対応と電荷量は対応していないように見えるが、これは 1photo electron が convolution の効果を受けず、波形がなまらなためである^{*14}。CV では off-line 解析時にバックグラウンド事象を理解するためになるべくピークよりも高い所のデータも取得したい。そのために mip peak の裾野の方まで見るためにダイナミックレンジとしては mip peak の 3 倍程度の値を上限値とする。よって電荷に対するダイナミックレンジとして 0~10pC を課すことにする。さらに電圧に対するダイナミックレンジとして 0~800mV を課すことにする。最後に AMP に対する要求を表 5.3 に示す。

*13 ファイバーと MPPC の convolution は MPPC の立ち下がりの時定数の長さによって変わる。受光面 1.3mm 角 MPPC8 個 ganging と受光面 3mm 角 MPPC では後者の方が波形が短いため convolution の効果が少しだけ小さくなる。

*14 convolution は MPPC に入射してくる光子がファイバーの発光の時間分布に従ってやって来るために起こる。よって入射光子が一つの場合はなまらない

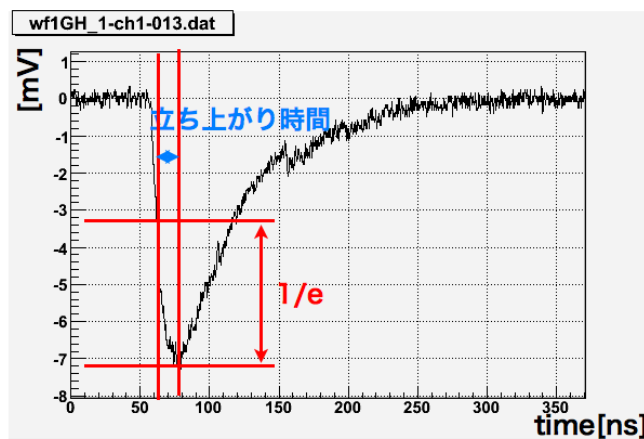


Fig. 5.15 オシロスコープで取得した波形データ。

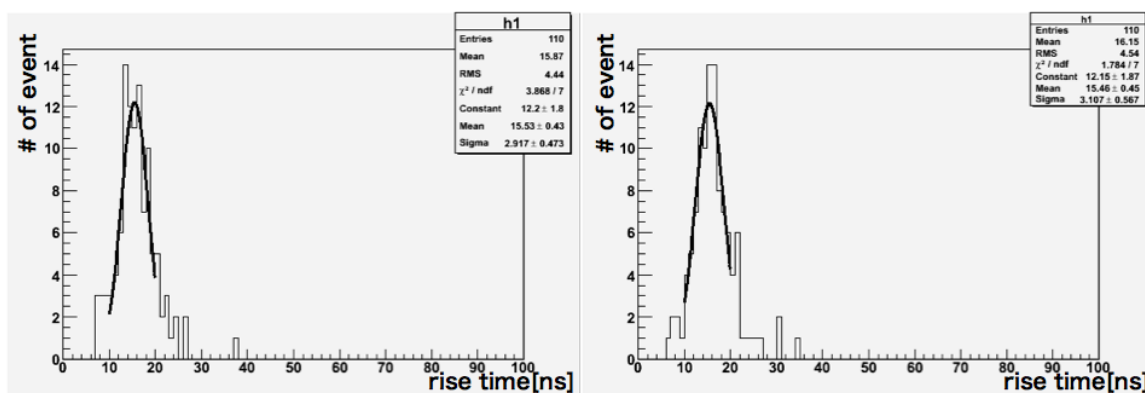


Fig. 5.16 立ち上がり時間の分布。左図が左側読み出しの、右図が右側読み出しの結果。

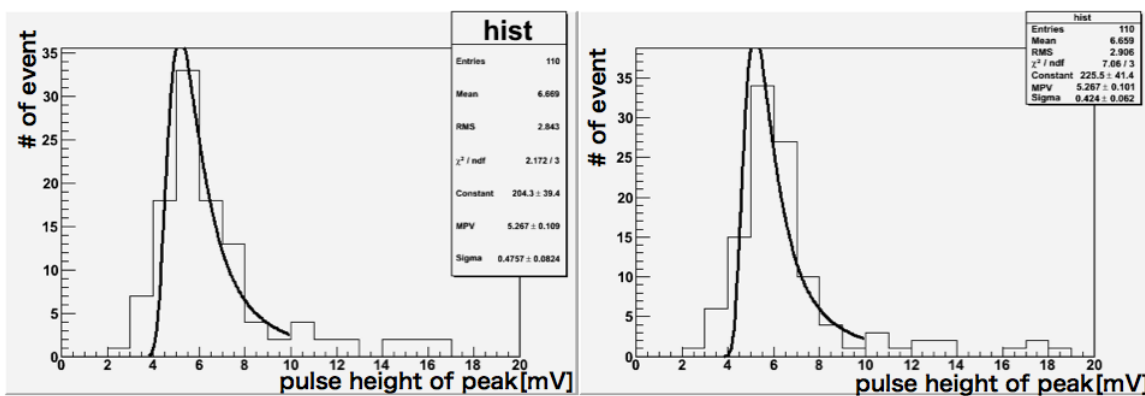


Fig. 5.17 各波形でのピーク電圧の分布。左図が左側読み出しの、右図が右側読み出しの結果。

増倍率	50
周波数特性 (bandwidth)	100MHz
ダイナミックレンジ (電荷)	0 ~ 500pC
ダイナミックレンジ (電圧)	0V ~ 800mV

Table. 5.3 アンプに対する性能要求。

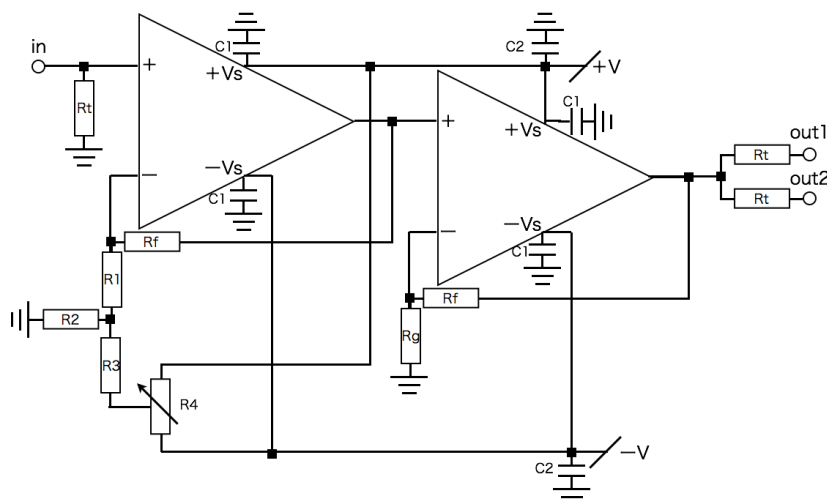


Fig. 5.18 開発したアンプの回路図を示す。AMP は非反転増幅を 2 段する仕組みとなっている。

5.5.1 開発したアンプのデザイン

前節で明らかにした要求性能を満たすためにアンプを開発した (図 5.18)。またアンプに使った各素子のパラメーターを表 5.4 に示す。さらにこのアンプに使用したオペアンプ (AD8001) の特性を表 5.5 に示す。この opamp の特色は広い帯域幅と高速のスルーレート、大きい出力電流と低ノイズであり、これらの特色によりこの opamp を採用した。この特色により非反転増幅 2 段という単純な回路によって要求性能を満たすことが出来た。しかしこの opamp は入力オフセットが 2mV もあるという欠点がある。今回のように増幅率が 50 倍の場合、初段の入力オフセットがそのまま 50 倍に増幅されるので出力には 100mV ものオフセットが出力されてしまう。この問題を解決するためにこの AMP には初段にオフセット調節回路を取り付けた。

図 5.19 に図 5.18、初段部分の拡大図を示す。また各素子に流れる電流を図のように置く。さらに可変抵抗 R_4 により R_3 の下側の電圧が $V(V_2 < V < V_1)$ になっているとすると

$$i = i_1 + i_2 \tag{5.2}$$

$$R_2 i_1 = R_3 i_2 + V \tag{5.3}$$

$$V_i = R_1 i + R_2 i_1 \tag{5.4}$$

$$V_o = V_i + R_f i \tag{5.5}$$

が成り立つ。ここで $R_3 \gg R_2$ としてこの 4 元連立方程式を解くと

$$V_o = \frac{R_1 + R_2 + R_f}{R_1 + R_2} V_i - \frac{R_f}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_2}{R_3} V \tag{5.6}$$

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

Table. 5.4 アンプに用いた素子のパラメーター。

Gain flatness 0.1 dB	100MHz
最大定格	55mW(\pm 5V, 5.5mA)
-3dB 帯域幅	880MHz (G=+1)
スルーレート	1200V/ μ sec
0.1% Settling Time	10 nsec
出力電流	70mA
Input Offset Voltage	2mV
Input Voltage noise	2nV/ \sqrt{Hz}
Input Current noise	2pA/ \sqrt{Hz}

Table. 5.5 AD8001 基本特性

となり、(5.6) 式の右辺の第二項の値分 V_0 にオフセットを乗せられる。また (5.6) 式の右辺の第一項から入力電圧が $\frac{R_1+R_2+R_f}{R_1+R_2}=10.4$ 倍される。二段目に入力された電圧は通常非反転増幅機構によって $\frac{R_g+R_f}{R_g}=10.2$ 倍される。最後に出力部分にはインピーダンス整合用の 51 が付けられる。従って 51 インピーダンスで受けた場合は $10.4 \times 10.2 \div 2 = 53$ 倍となる。今回制作する amp には $\pm 5V$ かけるので (5.5) 式右辺の第二項の V に $5V$ を代入して計算すると、 $\pm 94mV \times 5 \times 10 \div 2 = 2.35V$ までオフセットを調節できる。しかしながら AD8001 の出力電流が $70mA$ であること、今回作成した AMP の出力が二つあることより、一つの出力に供給できる電流は最大で $35mA$ となる。従って 50 インピーダンスで受けた場合は $\pm 1.2V$ 程度で調節が可能となる。

5.5.2 開発した AMP の性能評価

AMP の性能評価として

1. impulse 応答
2. ダイナミックレンジ (電荷)
3. ダイナミックレンジ (電圧)

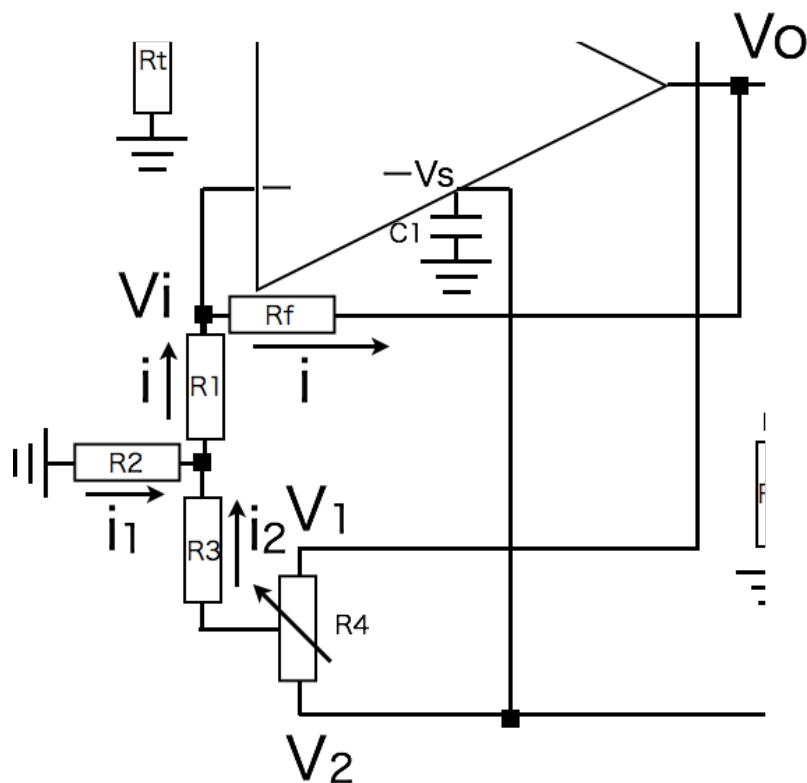


Fig. 5.19 図 5.18、初段部分の拡大図。

4. オフセットのレンジ

の 4 項目を行った。図 5.20 に測定のセットアップを示す。Function generator には Agilent 33250A 80MHz Function Generator を AMP 用の電源は KIKUSUI の PMM 18-2.5DU を使用した。この Function generator は立ち上がり 5ns で矩形波を出すことができる。

インパルス応答 まずアンプが必要な周波数帯域を持つことを確認するため、impulse 応答を測定した。Function generator に矩形波を出力しその信号を 1pF のコンデンサに入力して impulse に変換する。この信号をオシロスコープで測定し、立ち上がり時間を計測した (図 5.21)。この function generator の立ち上がりが 5ns であること、またコンデンサーには素子固有の高周波特性を持ち、かつ今回使用したオシロスコープは帯域幅が 300MHz という制限がある。そのためオシロスコープで観測される波形の立ち上がりはこれらの効果の重ね合わせとなり単純な関数では fit できない。従って今回は 5.3.1 節と同じように立ち上がり時間を定義して評価した。そして立ち上がり時間はオシロスコープの帯域制限機能を用いて測定波形に対して 300MHz、150MHz、

制限帯域 [MHz]	立ち上がり (入力)[ns]
300	3.0
150	3.4
20	6

Table. 5.6 各帯域制限時の立ち上がり時間。AMP の出力波形の立ち上がりは 3.4ns であった。

20MHz と制限を強めていき、どこで function generator からの波形と amp からの波形の立ち上がりが一致するかを見た。結果を図 5.6 に示す。これより amp の帯域幅が ~150MHz 程度で、要求の 100MHz 以上を満たすことが分かる。今回は帯域幅に対しては要求を満たすかどうかの判定のみを行ったが、今後は実験環境を整え具体的に何百 Hz の周波数帯域を持つかを測定する予定である。

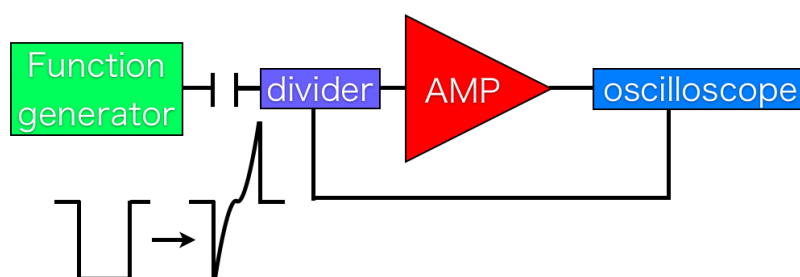


Fig. 5.20 評価試験のセットアップ。

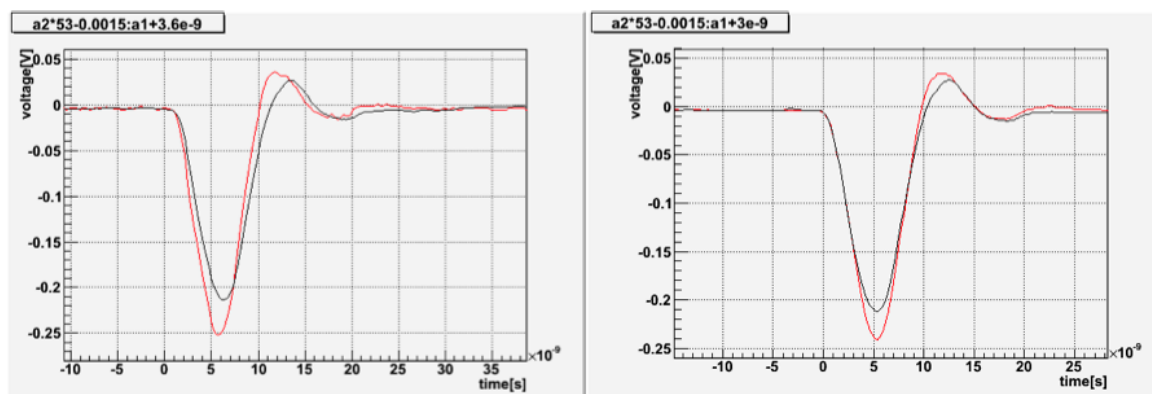


Fig. 5.21 左図は黒が AMP の出力、赤色が入力波形を 53 倍したものを重ね書きした図。右図は黒が AMP の出力、赤が入力波形をオシロで 150MHz 帯域制限を課した波形。150MHz で入力と出力の立ち上がりが重なる。インパルス応答の後にある小さな山はコンデンサを使って矩形波をインパルスに変換する際にコンデンサによって生じたオーバーシュートである。

電荷に対するダイナミックレンジ 次に電荷のダイナミックレンジを測定するために先ほどは 1pF であったコンデンサーを 100pF にし、矩形波の波高を変えて掃き出される電荷を変えながら入力波形と出力波形を測定し、それを積分して電荷に直した (図 5.22、左図)。そしてここから入力電荷に対する出力電荷の増倍率を見た。fit から求めた増倍率からのずれは

$$\text{ズレ} = \frac{(\text{出力電荷})/(\text{入力電荷}) - \text{fit から求めた増倍率}}{(\text{fit から求めた増倍率})} \quad (5.7)$$

と表すことが出来る。図 5.22 右図に結果を示す。入力が 10pC までの領域でずれの値は中心から $\pm 1\%$ に収まっており、この領域で 1% 以内のリニアリティを持つことが分かる。これは出力に換算すると 500pC 程度まで増幅できることになる。また増倍率は 48.52 倍であることが分かる。

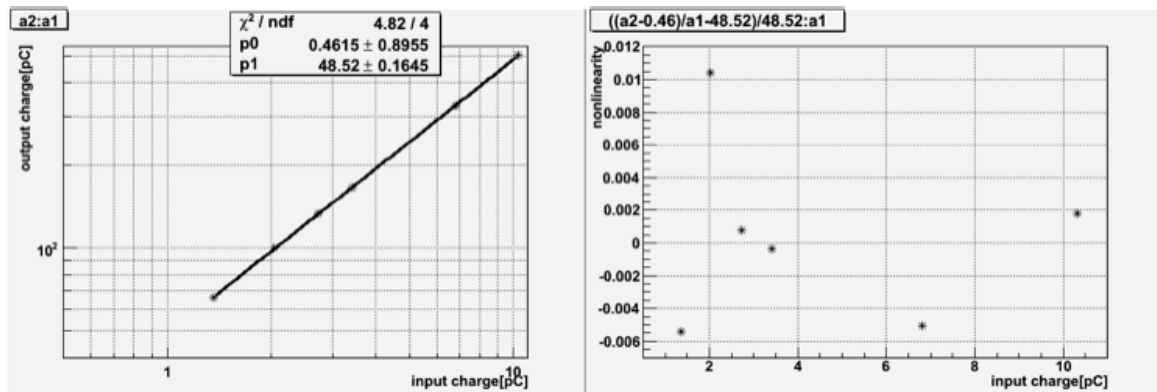


Fig. 5.22 解析結果。左の図が横軸に入力電荷、縦軸に出力電荷をプロットした図。右図は横軸に入力電荷、縦軸に fit から求めた増倍率からのずれをプロットした図。

電圧に対するダイナミックレンジ 次に同様にして今度は入力波形の波高と出力波形の波高の比を見た (図 5.23、左図)。さらにこの時の fit から求めた増倍率からのずれも先ほどと同様にして

$$\text{ズレ} = \frac{(\text{出力波高})/(\text{入力波高}) - \text{fit から求めた増倍率}}{(\text{fit から求めた増倍率})} \quad (5.8)$$

とした。

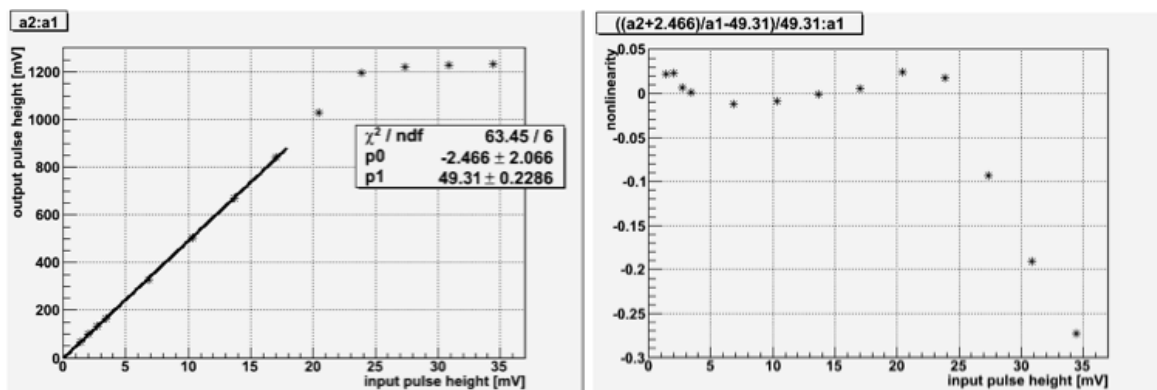


Fig. 5.23 解析結果。左の図が横軸に入力波形の波高、縦軸に出力波形の波高をプロットした図。右の図は横軸に入力波形の波高、縦軸にデザイン上の増倍率からのズレを plot した図。

増倍率 (電荷)	48.52
増倍率 (電圧)	49.31
帯域幅	~ 150MHz
ダイナミックレンジ (電荷)	0 ~ 500pC
ダイナミックレンジ (電圧)	0 ~ 1000mV
オフセット調整幅	-1.35V ~ 1.25V

Table. 5.7 性能評価のまとめ

その結果入力波高が 15mV 程度までで $\pm 1\%$ のリニアリティに収まっている。これは出力で言うと 1000mV 程度まで増幅できる事になる。また電圧で見た時の増倍率は 49.31 であった。

オフセットのレンジ 最後に入力に何も信号を入れず R_4 の抵抗値を変えていき計算通りのオフセット調節能力があるかを測定した。その結果 -1.35 ~ 1.25V の範囲で調節可能であった。これらの性能評価の結果を表 5.7 にまとめる。この結果より当初の要求を満たすものが開発できたことを確認した。

5.6 MPPC-ファイバー接続システムの開発

5.6.1 デザインコンセプト

CV ではシンチレータに波長変換ファイバーを埋め込み、MPPC で読み出す。この際にファイバーと MPPC を接着してしまうと MPPC が故障した場合には MPPC を取り替えられず、dead channel になってしまう。そのため CV では MPPC が破損した場合には取り替えられるようにメカニカルにファイバーと MPPC を固定する必要がある。またプロトタイプでは取り外せることは研究を進めて行く上で非常に有益である。プロトタイプで使用する MPPC のメカニカルデザインを図 5.24 に示す。この MPPC とファイバーの固定を考える場合には、この MPPC には受光面を保護する為に 0.3mm 厚の樹脂が $\pm 0.1\text{mm}$ の精度でコーティングされている^{*15} こと、さらに固定具制作する際にも 0.05 ~ 0.1mm 程度の誤差が生じることを考慮しなければならない。従って必然的にファイバーと MPPC 樹脂面を最低 0.2mm 程度は離さなければならない。しかしその場合にはファイバーの光の広がりが問題になってくる。

ファイバーに入射した光は図 5.25 のようにファイバーの中に吸収され再発光する。ファイバーは光が吸収再発光されて伝播するコアの部分とその外側のクラッドの部分から成る^{*16}。再発光した光は一定の角度以下の光はクラッド部分で全反射してファイバー中を伝播し、それ以上の角度の光はファイバーの外に逃げて行く。その後ファイバーの端から出た光は他媒質中を進む。この他媒質中を進む場合の光の広がりは numerical aperture(NA) という指標で表され、光が進む媒質中の屈折率を n 、図 5.25 のようにファイバーが伸びている方向と平行な軸と光が進む方向の成す角を θ とすると

*15 シミュレーションで比較した受光面 1mm 角 MPPC には 0.4mm の樹脂がコーティングされている。

*16 CV で使う予定の Y11 はマルチクラッドタイプを使う予定である。これはクラッドを 2 層構造にすることで光の trapping efficiency を上げている。

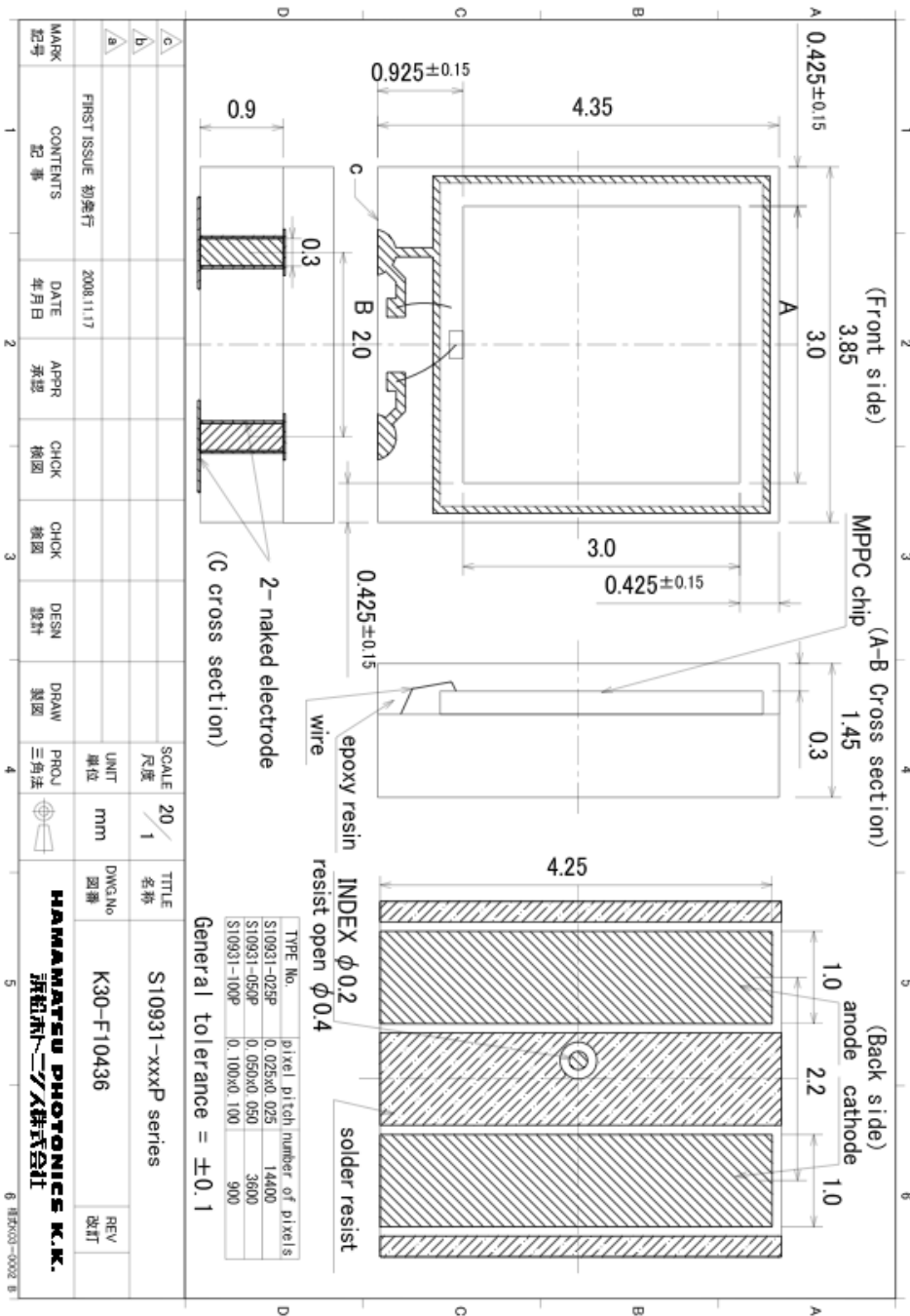


Fig. 5.24 表面実装型 MPPC の図面

$$NA = n \times \sin\theta \quad (5.9)$$

の関係がある。媒質中を進む光はこの式で決まる θ を臨界角としてライトコーンを形成する。CV で使用を決定している Y11 ではこの NA の値は 0.72 となっており、空気中では 46° の広がりを持って光は進む。図 5.26 のように 3mm 角でファイバー 7 本を読み出す場合は左右の端のある二カ所のファイバーで光量のロスが発生する可能性がある^{*17}。これらの光のロスを見積もるためにモンテカルロシミュレーションを行った。まず樹脂の透過率だがこれは浜松ホトニクスでの MPPC 樹脂透過率測定より樹脂厚 0.4mm の場合で 400~1000nm の波長の光に対して 94% であることとランベルト・ベールの法則^{*18}から樹脂中での吸収係数を 0.155 とした。また空気の透過率は 1 とした。次に屈折率だが MPPC 樹脂は 1.5、空気は 1 とした。さらにファイバーの configuration については直径 1mm のファイバーの場合、マルチクラッド部分が 0.12mm あるが今回は簡単のため全部コアの部分だとして直径 1mm のコアの部分から光が散乱されるものとした。この簡略化によりシミュレーションでは光のロスを大きく見積もってしまうが、これは安全ファクターだと捉えることにする。またファイバーの端面と MPPC 受光面は平行であるとする。図 5.27 にシミュレーション結果を示す。このシミュレーションではファイバーと MPPC の受光面の中心を一致させた状態でファイバーを樹脂面から離していった時どれくらい光がもれていくかを見積もった。これより樹脂面からの距離 0.5mm で 10% 程度光量が減ることがわかる。さらに今度は MPPC とファイバーの距離を固定し、上下左右にファイバーと MPPC の受光面の中心からずらしていった (図 5.28)。このシミュレーション結果よりズレの許容は x 方向に $\pm 0.2\text{mm}$ 、y 方向に $\pm 0.3\text{mm}$ とすることにした。ここで x 軸、y 軸は図 5.26 に示す方向である。これらの結果を元に

1. MPPC の樹脂面からファイバーの距離を 0.3mm(受光面から 0.6mm) となるようにファイバーと MPPC を固定する。
2. x 方向に $\pm 0.2\text{mm}$ 、y 方向に $\pm 0.3\text{mm}$ の範囲でファイバーと MPPC の受光面の中心が一致するようにする。

の 2 点からデザインを考案した。

^{*17} 1 つの MPPC で読み出すファイバーの数を減らすという手段もある。その場合はシンチレータのストリップ幅を短くするか、1 ストリップ当たりのファイバーの本数を減らす方法が取られることになる。しかし前者では読み出しチャンネルが増加する、後者では 100keV 当たりで得られる光量が減少するというデメリットがあるため読み出せる最大の本数を束ねることにした。

^{*18} 透過率を I 、吸収係数を α 、経路長を x とすると $I = e^{-\alpha x}$ が成り立つ。

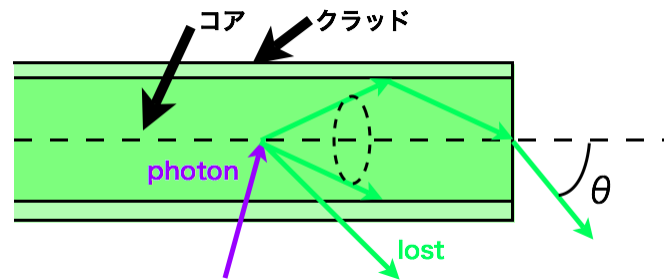


Fig. 5.25 ファイバーに入射した光子がファイバーで吸収発光される様子

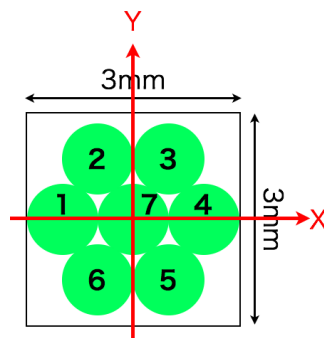


Fig. 5.26 ファイバー 7 本を束ねる場合のファイバーの位置。四角は 3mm 角の正方形。

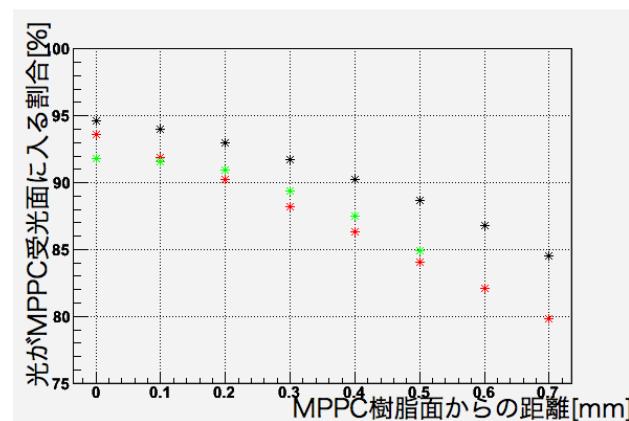


Fig. 5.27 MPPC 樹脂面からファイバーを離していった時の受光面に入る光の割合の変化。緑が受光面 1.3mm 角 MPPC に一本のファイバーを入射する場合、黒が受光面 3mm 角 MPPC での全ファイバー合計の入射確率、赤が一番光量をロスするファイバーへの入射確率を表す。受光面から樹脂面までの距離 (樹脂の厚みは 1.3mm 角が 0.4mm、3mm 角が 0.3mm となる。)

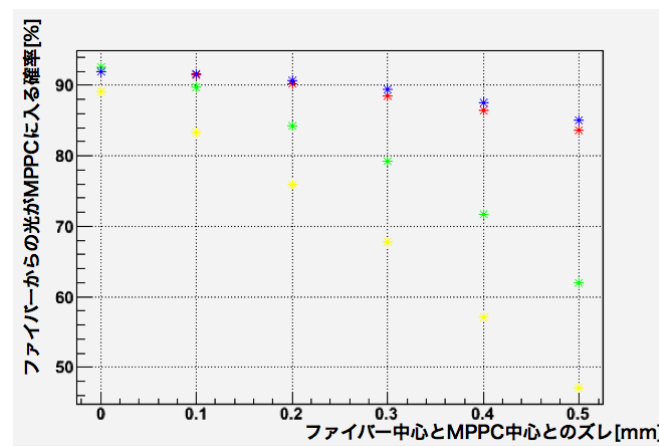


Fig. 5.28 MPPC 受光面の中心からファイバーの中心を離していった時の受光面に入る光の割合の変化。ファイバーと受光面との距離は 0.6mm に固定されている。赤が x 方向にずらした時の全体の変化、黄色が x 方向にずらした時の一番光量が小さいファイバーの変化 (番号 1)。一方青が y 方向にずらした時の全体の変化、緑色が y 方向にずらした時の一番光量が小さいファイバーの変化 (番号 6 と 5)。

シリアル番号	1160
高さ (平均値)	1.519mm
最大高低差	0.049mm
シリアル番号	1161
高さ (平均値)	1.511mm
最大高低差	0.016mm
シリアル番号	1162
高さ (平均値)	1.511mm
最大高低差	0.029mm
シリアル番号	1163
高さ (平均値)	1.514mm
最大高低差	0.002mm

Table. 5.8 各 MPPC の基板表面から MPPC 樹脂面までの高さ。平均値は MPPC の 4 隅の高さの平均値。

5.6.2 デザイン

MPPC とファイバーの接続を考えた時、ファイバーはシンチレータに接着されているので MPPC とファイバーをアラインメントすることは難しい。そこで機械的に精度よく作った固定具で固定することで簡単に位置の精度がでるデザインを考案した。その概念図を図 5.29 に示す。パーツは 3 つで構成されている。一つは MPPC が実装された基板である。その上にジグとよばれる (図 5.32) パーツを MPPC の乗った基板上に皿ネジで精度よくネジ止めする。この二つは予め CCD カメラを用いて精度よく互いが固定されているかどうか確認しておく。最後にファイバーが接着されたクッキー (図 5.33) をジグの頭についたピンをガイドにネジ止めすることで簡単に精度よく接続できるデザインを考案した。ジグの部分は冷却の際に対流からの熱流入により冷却効率を下がるのを防ぐために ABS 樹脂で作る事にした。さらにファイバーを接着するクッキーは工作精度を重視してアルミで制作することにした。

アルミや樹脂の加工は 0.1mm ~ 0.05mm の精度で作ることができる。このデザインで一番精度が出ない恐れがあったのは MPPC の表面実装 (半田付け位置) であった。そのためこの MPPC の表面実装はボードをデザインした後、ジーエヌディーに基板の制作及び MPPC の表面実装を依頼した。図 5.30 に実際の写真を示す。この基板は上側が signal ライン、下側が電源ラインとなっている^{*19}。また信号及び電圧は上下についている lemo コネクターから入力および出力される。基板は両面の銅張積層板で出来ており基板の両面に酸化防止のための金メッキが施されている。MPPC は基板の裏側からペルチェ素子で冷却する。基板の裏側はグランドプレーンになっておりこれがペルチェ素子から出るノイズを低減する役割を果たしている。MPPC はこの基板上に縦方向、横方向に $\pm 0.1\text{mm}$ の誤差で半田付けされている。さらに高さ方向の誤差 (MPPC 受光面が基板に対して傾いていないか) をジーエヌディーに測定を依頼した。

^{*19} この基板がこのようなデザインになっているのは当初予定では電源及びシグナルラインのうち、表面積の多い部分をペルチェ素子から腕を伸ばして冷却する予定だったためである。実際にはこの部分を冷却しても大気中での熱流により温度勾配が生じ、中心付近に位置する MPPC を冷却できなかった。

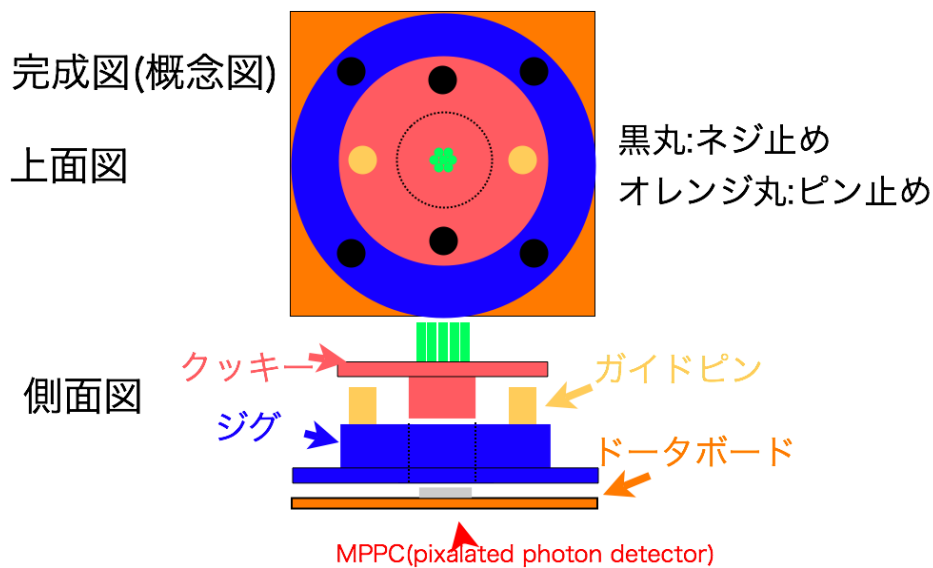


Fig. 5.29 固定具の概念図。固定は3つのパーツによって行う。一番下のパーツはMPPCののるボードである。その上にファイバーを固定するためのガイド(ジグ)を乗せ、下から皿ネジで止める。ファイバーはクッキーに接着固定されており、そのクッキーをピンをガイドにジグにネジ止めする。

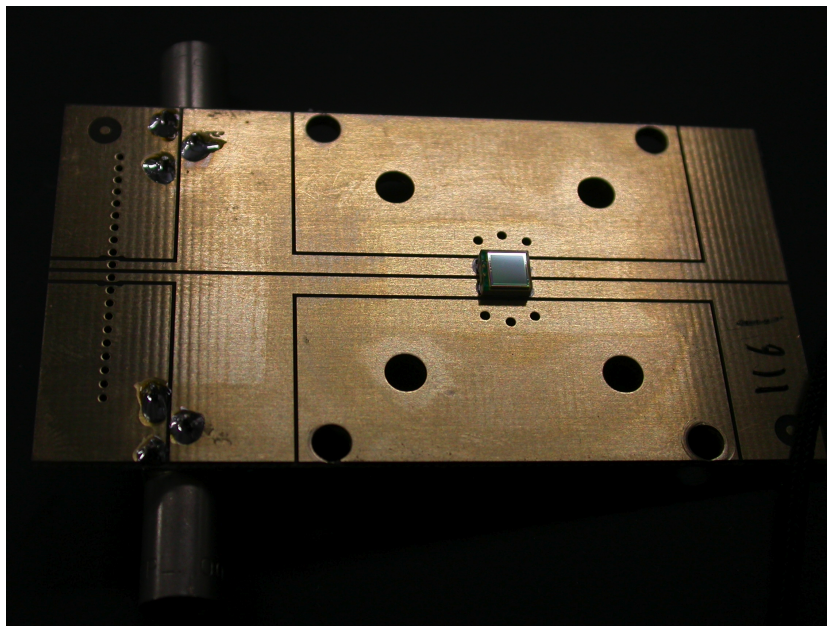


Fig. 5.30 MPPCボードの写真。中央に位置するのが表面実装型MPPCである。

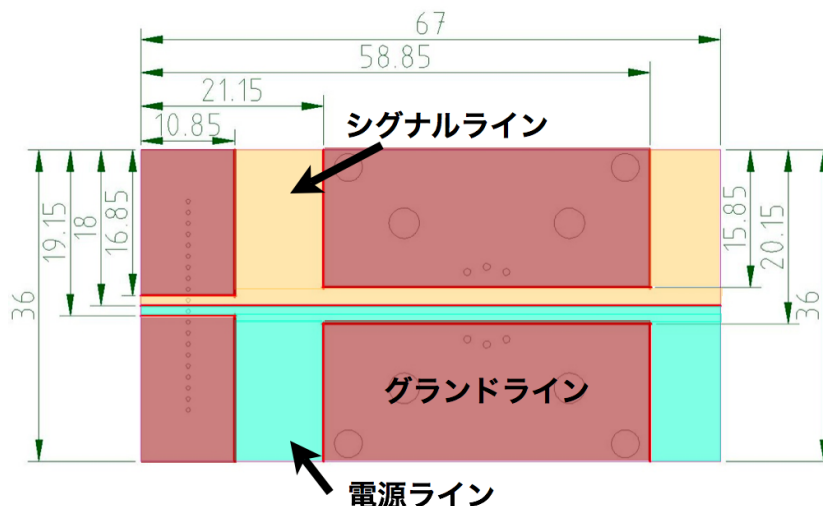


Fig. 5.31 MPPC ボードの設計図。裏面は全面グラウンドラインとなっている。

この結果を表 5.8 に示す。ここから基板表面から MPPC の樹脂表面までの距離が $\sim 1.51\text{mm}$ であること、最大でも高低差が 0.049mm と非常に平行に MPPC が半田付けされていることが分かる。次にクッキーとジグのデザインを図 5.32、図 5.33 に示す。このデザインにより、クッキーは基板表面から 1.8mm の高さに固定されることになる。この時クッキーとジグの高さの工作精度はそれぞれ $\pm 0.05\text{mm}$ 、基板表面から MPPC の樹脂面までの距離が 1.51mm より MPPC 樹脂面とファイバーとの距離は 0.3 ± 0.07 となる。さらに MPPC の樹脂面は厚み 0.3mm 、誤差 0.1mm より MPPC 受光面からのファイバーの距離は 0.6 ± 0.12 となることがわかる。

次にこのようにして制作した MPPC 用のボードとジグを皿ネジで止め、アライメントがどれほどずれているかを CCD カメラを用いて確認した。CCD カメラは KEYENCE の CV-c1(2/3 型 CCD、受光面サイズ 8.8×6.6)、コントローラは CV100 を使用した。さらにレンズには CV-L50(焦点距離 50mm) を使用した。図 5.34 にアライメントのセットアップを示す。

このセットアップを使い、ジグと MPPC ボードがどの程度の精度で固定されているかを確認した。またこの時のカメラによる位置検出の分解能は $\sim 0.1\text{mm}$ であった。測定の様子を図 5.35 に、結果を表 5.9 に示す。この結果から、シリアル番号 1162 以外の 3 つでは要求性能を満たすことがわかった。またプロトタイプ CV の読み出しにはアライメントの合っているシリアル番号 1160 と 1163 を用いることにした。

5.7 冷却システムの開発

5.7.1 大気中におけるペルチェ冷却試験

3 章で述べたように受光面 3mm 角 MPPC はダークカウントノイズが非常に多いので、これを低減する為に MPPC を冷却する。MPPC の冷却にはペルチェ素子を用いる。以下に簡単にペルチェ素子のメカニズムを説明する。図 5.36 にペルチェ素子の仕組みを示す。ペルチェ素子は pn 接

合のエネルギー準位の違いを利用して冷却を行う。電子が n から p へ移動する場合はエネルギー準位の高い所から低い所に移動するのでエネルギーを放出する (発熱)。逆の場合はエネルギーを吸収してエネルギー準位を乗り越える (吸熱)。ここでゼーベック係数を $S[V/K]$ 、吸熱側の温度を $T_C[K]$ 、発熱側の温度を $T_h[K]$ 、ペルチェ素子の抵抗を $R[\]$ 、流れる電流を $I[I]$ 、熱抵抗を $\theta[K/W]$ とすると吸熱側が吸熱できる最大熱量 Q_C は

$$Q_C = SIT_C - \frac{I^2 R}{2} - (T_H - T_C)/\theta \quad (5.10)$$

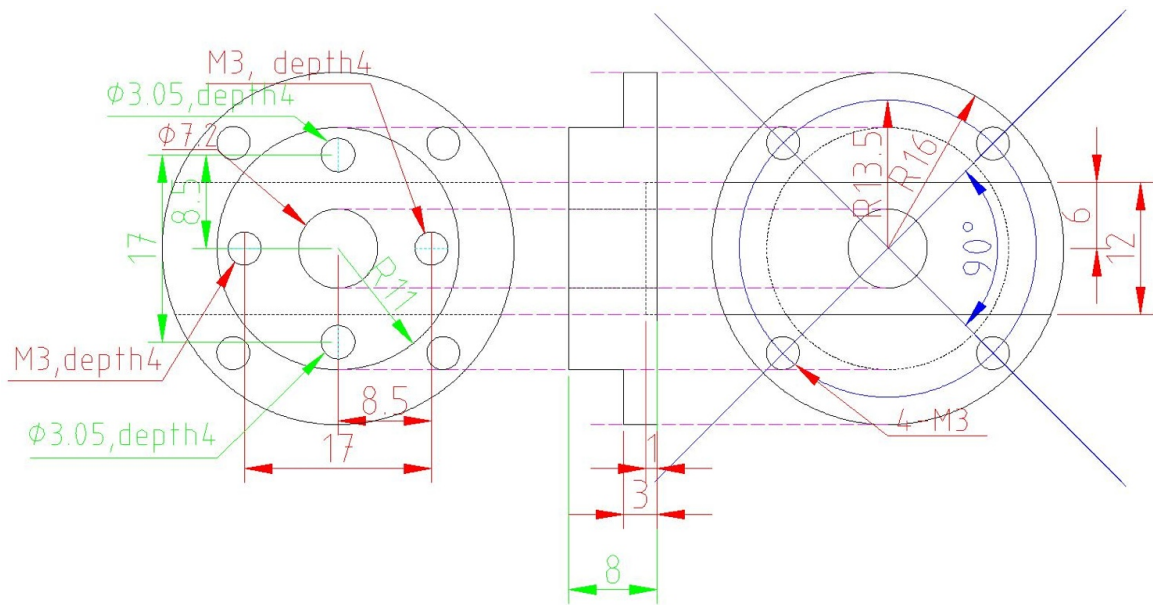


Fig. 5.32 ジグの設計図。赤の部分が $\pm 0.1\text{mm}$ の精度で、緑の部分が 0.05mm の精度で作られる。

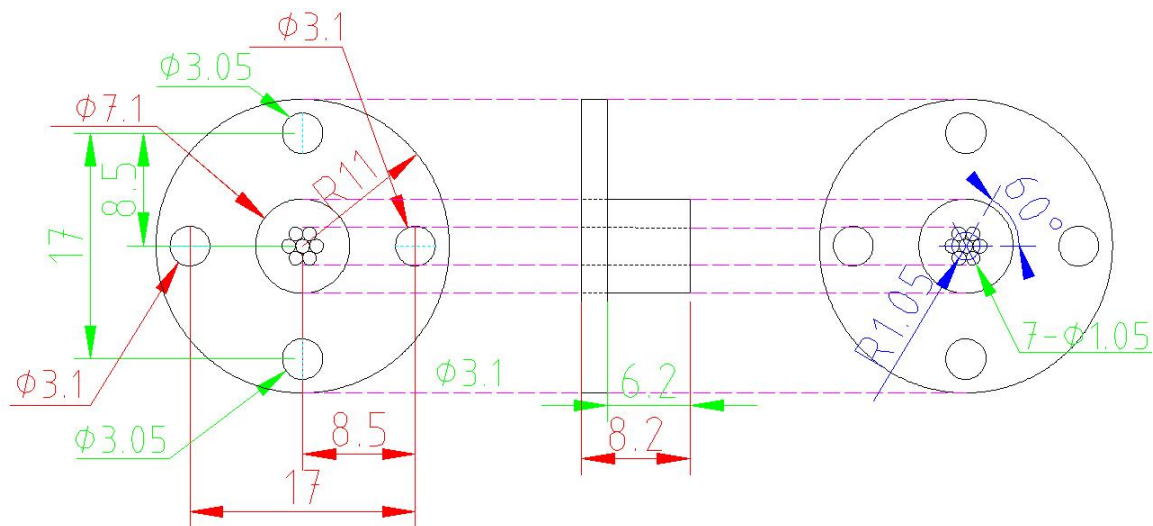


Fig. 5.33 クッキーの設計図。赤の部分が $\pm 0.1\text{mm}$ の精度で、緑の部分が 0.05mm の精度で作られる。

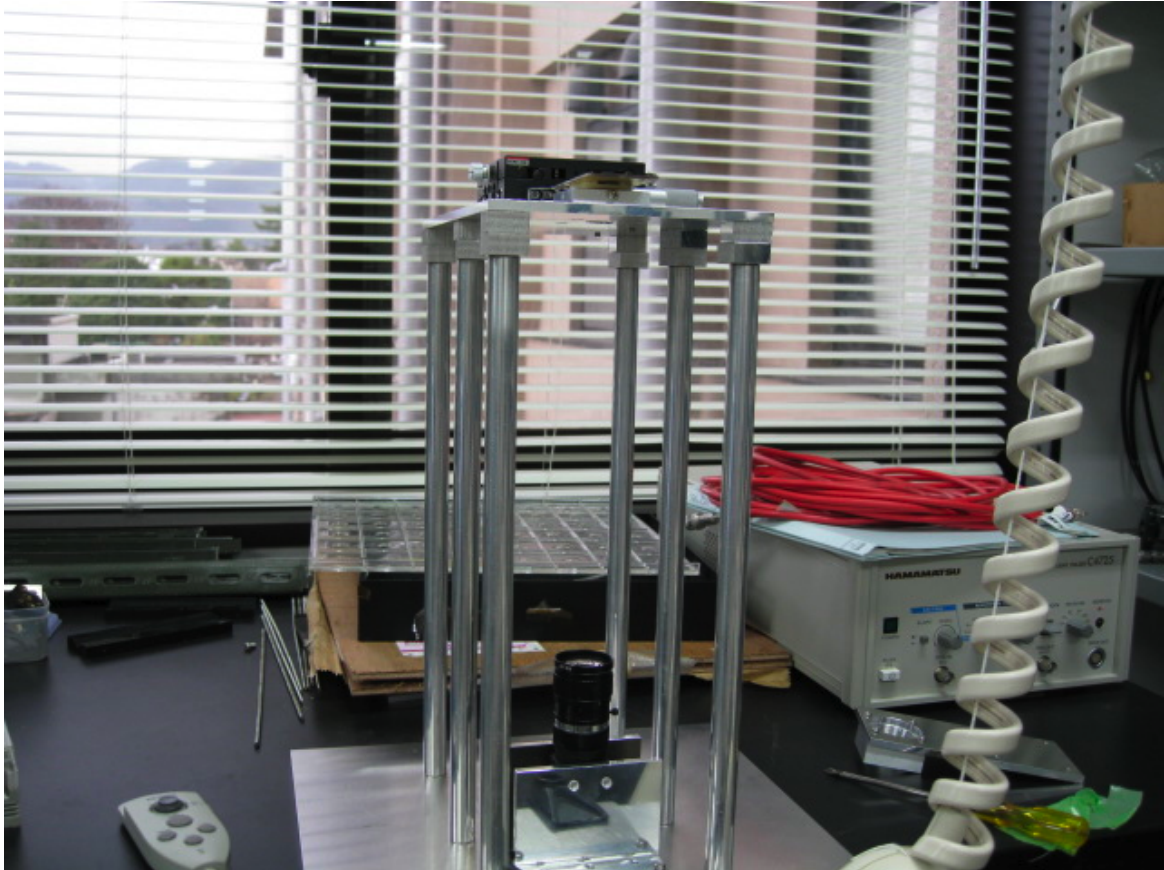


Fig. 5.34 アライメントのセットアップ。セットアップの上部に MPPC が固定され、下にある CCD カメラで下から覗く形になっている。また CCD カメラのレンズと MPPC 受光面の距離は 25cm となっている。これは CCD カメラの焦点距離を稼ぐためである。

シリアル番号	1160		
ズレ (x)	0.075mm	ズレ (xmax)	0.162mm
ズレ (y)	0mm	ズレ (ymax)	0.087mm
シリアル番号	1161		
ズレ (x)	0.075mm	ズレ (xmax)	0.162mm
ズレ (y)	-0.175mm	ズレ (ymax)	-0.262mm
シリアル番号	1162		
ズレ (x)	0.1mm	ズレ (xmax)	0.187mm
ズレ (y)	-0.3mm	ズレ (ymax)	-0.387mm
シリアル番号	1163		
ズレ (x)	0mm	ズレ (xmax)	0.087mm
ズレ (y)	0.15mm	ズレ (ymax)	0.237mm

Table. 5.9 MPPC 受光面中心とジグ中心のズレ。ズレの値は MPPC 受光面を基準としている。左側が測定値、右側がジグとクッキーの固定を考えた時に生じるズレの最大値を表している。クッキー、ジグ、クッキーとジグ固定用のピンはそれぞれ $\pm 0.05\text{mm}$ 精度でできている。よってそれを組み合わせた時に生じる誤差を $\sqrt{(0.05)^2 \times 3} = 0.087\text{mm}$ とした。

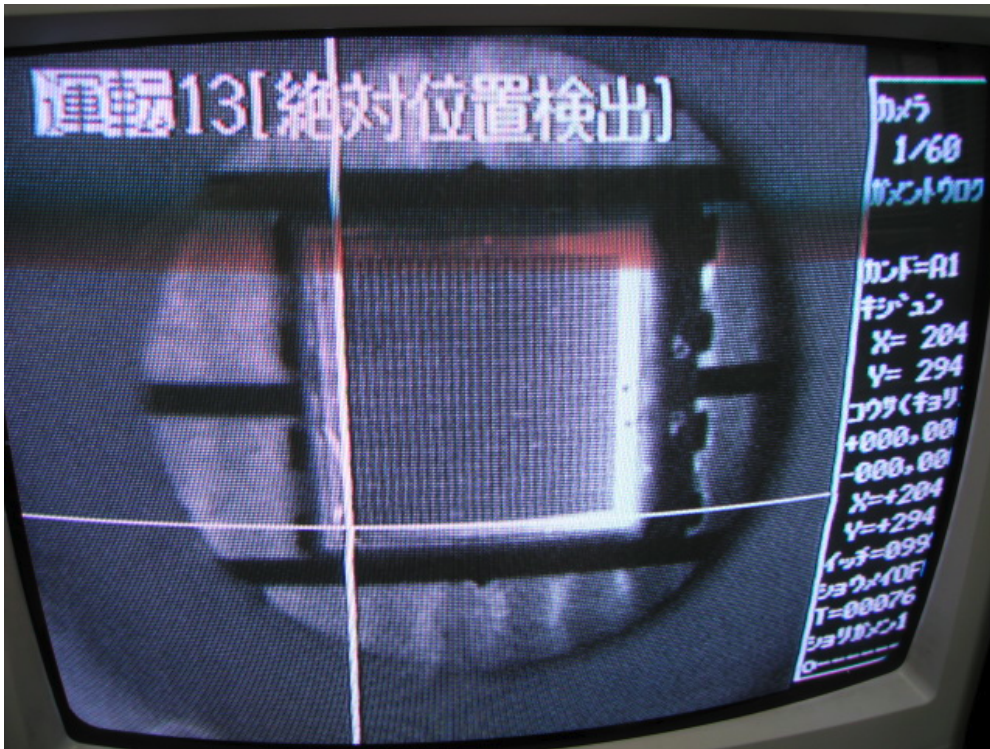


Fig. 5.35 アラインメント確認風景。真ん中の四角が MPPC、平行に走っている黒い線が MPPC ボード上のパターン、丸い穴がジグのホールである。MPPC 受光面の隅を CCD の位置検出機能を使って fit し、隅の位置を求める。図は左下の受光面の隅を fit して位置を割り出している図。このように隅の位置を出し、受光面の中心を計算した。次にジグの穴を fit し、穴の位置を求めた。最後にその値から穴の中心と受光面の中心がどれくらいずれているかを見た。

第一項はペルチェ効果によって奪い去られる熱量、第二項は回路に流れる電流による発熱、第三項は発熱側から吸熱側への熱流入を意味している。同様に発熱側の最大発熱量 Q_H は

$$Q_H = SIT_C + \frac{I^2 R}{2} - (T_H - T_C)/\theta \quad (5.11)$$

となる。本番の CV は真空中に置かれるがプロトタイプ CV の性能評価は空気中で行うため、空気からの熱流入が問題となる恐れがあった。そこでプロトタイプ CV では発熱を気にせず MPPC を十分冷やせる性能を持つ素子を用いることにした。ペルチェ素子にはフェローテック社の大きさが 40mm 角、厚さが約 4mm の 7000/127/060B を使用した。図 5.37 に使用したペルチェ素子のスペックシートを示す。この表において COP とは成績係数のことであり、冷却能力/消費電力で定義される。これはペルチェ素子の冷却効率の指標として用いられる。次にペルチェ素子による冷却効果を測定するためのセットアップを図 5.38 を示す。放熱側はサンハヤトの放熱用シリコーン (SCH-20) を充填し、ヒートシンクの上に乗せた。ヒートシンクは ABL Components の 520AB1000MB を使用した。このヒートシンクは 88×100mm で高さが 35mm、熱抵抗は 1.4 /W である。さらに冷却側にもシリコーンを塗り、前節で説明した MPPC ボードを上に乗せた。MPPC の直近には熱電対を配置し、MPPC 周辺の温度を測定した。熱電対の電圧はマルチメータ

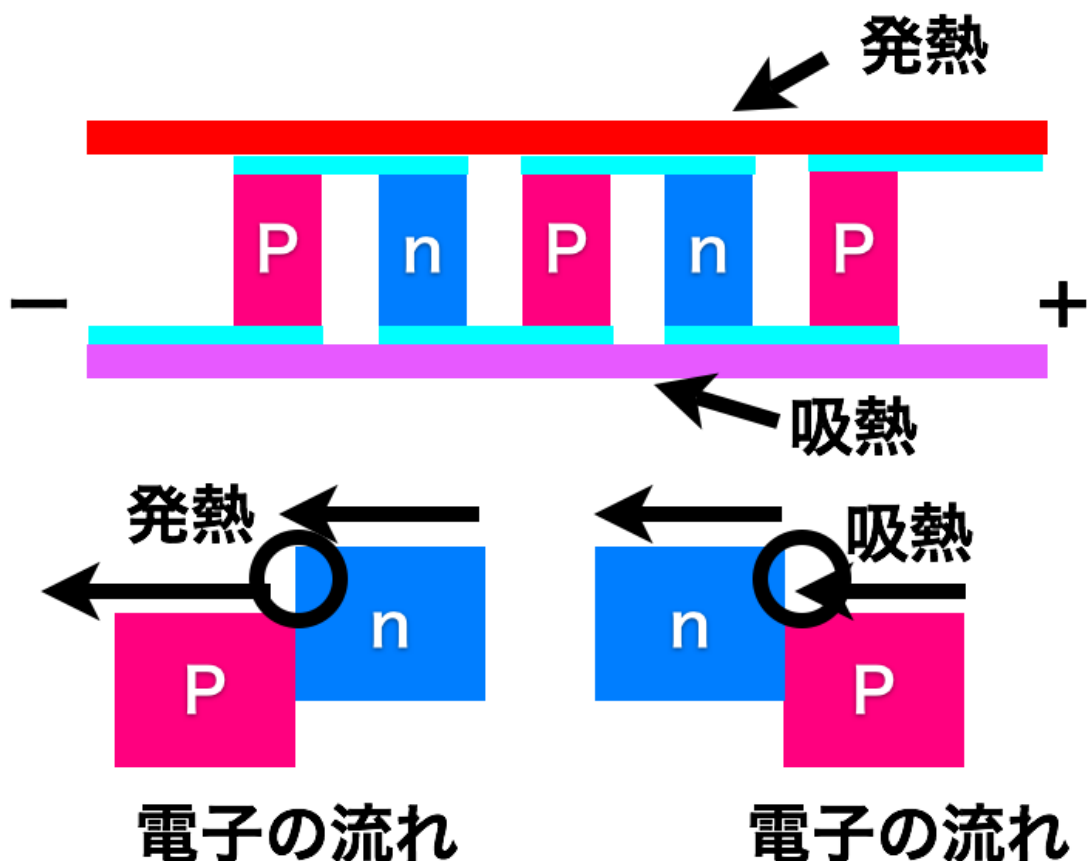


Fig. 5.36 ペルチェ素子の仕組み。ペルチェ素子は pn が直列に交互に並ぶ。上図は素子の構造を、下図は接合部のエネルギー準位を表す。

(SANWA、PC510) で測定した。この時の温度分解能は 1 である。冷却システムは恒温槽中に置き、恒温槽の温度を一度 0 に下げ、その後温度を 20 に上げその温度で実験した。これは空气中で冷却する場合には結露が問題となるためである。そのため一度 0 にして絶対湿度を下げたのち 20 に戻す事でペルチェ付近の結露を防ぐようにした。ペルチェ素子には DC 電源 (KIKUSI の PMC18-5) を電流源として電流を流していった。電流は 0.5A から 1.55A まで 0.05A 毎に測定し、その時の MPPC 周辺の温度を測定した。ペルチェ素子に流す電流と測定された温度の相関を図 5.39 に示す。この結果と図 5.37 の COP vs I からペルチェ素子に掛ける電流を 1.5A にすることにした。

次に実際に MPPC に電圧をかけてキャリブレーションしてブレイクダウンボルテージを計算することで MPPC が何 に冷却されているかを測定した。そのために第三章で測定したのと同じセットアップで、まず表面実装型 MPPC のブレイクダウンボルテージの温度依存性を測定した。次に実際にペルチェ素子で MPPC を冷却した状態で MPPC をキャリブレーションして MPPC が何 になっているかを測定した。テストはシリアル番号 1163 のものを使用した。図 5.40 に結

7000/127/060B

Th=50°C

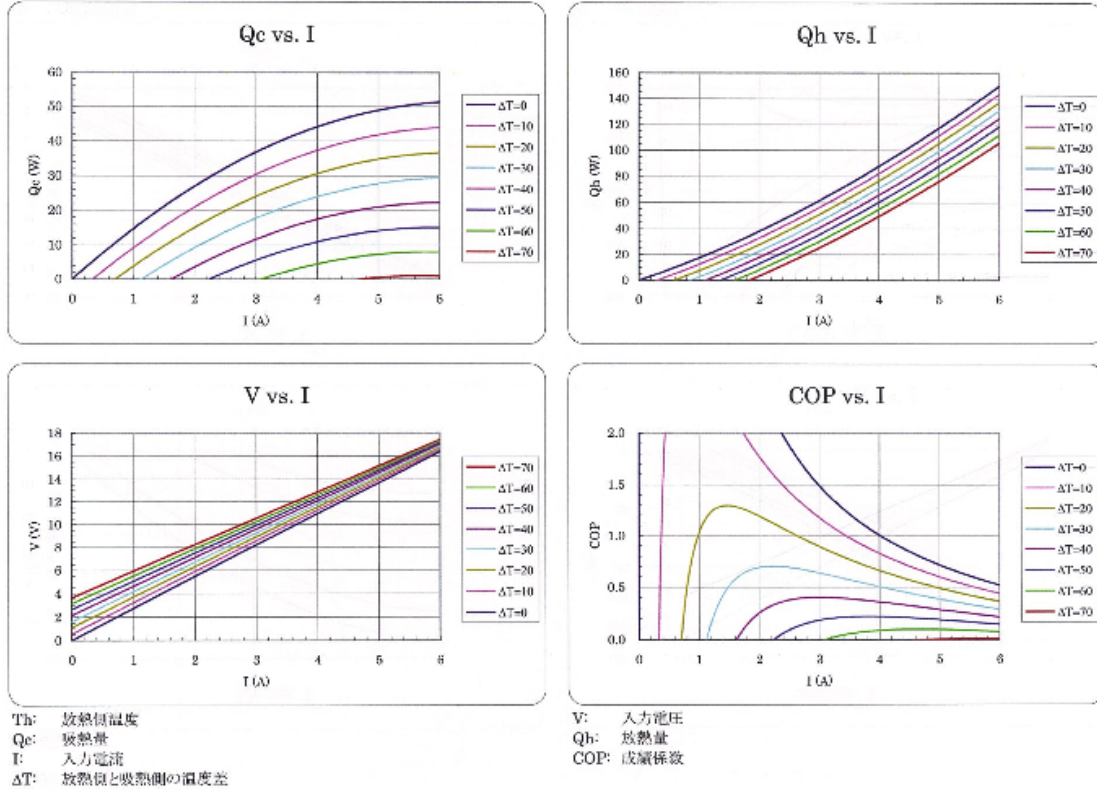


Fig. 5.37 使用したペルチェ素子のスペックシート。左上図は最大吸熱量と電流の関係、右上図は発熱量と電流の関係、左下図はペルチェ素子に流れる電流と電圧の関係を、右下図は電流と成績係数の関係をそれぞれ示す。

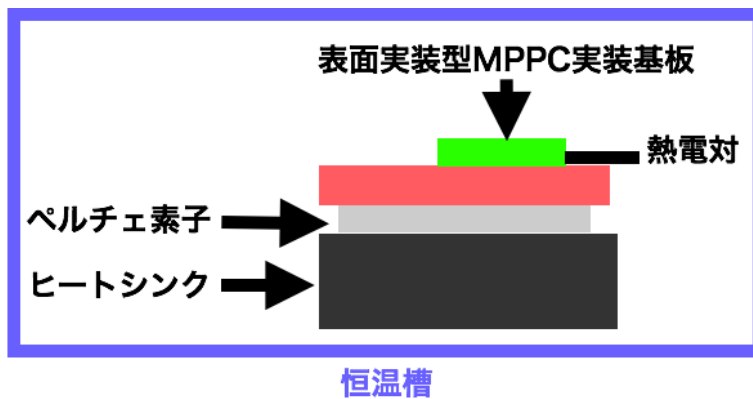


Fig. 5.38 ペルチェ冷却テストのセットアップ

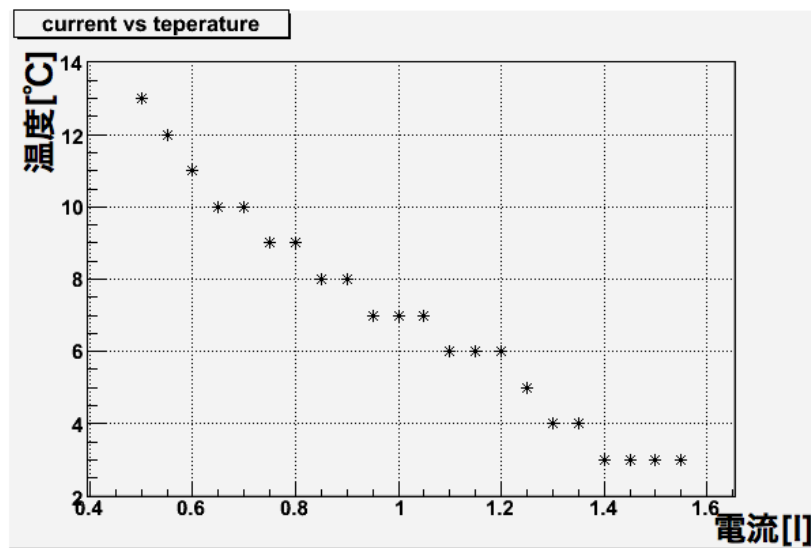


Fig. 5.39 ペルチェ冷却テスト測定結果。

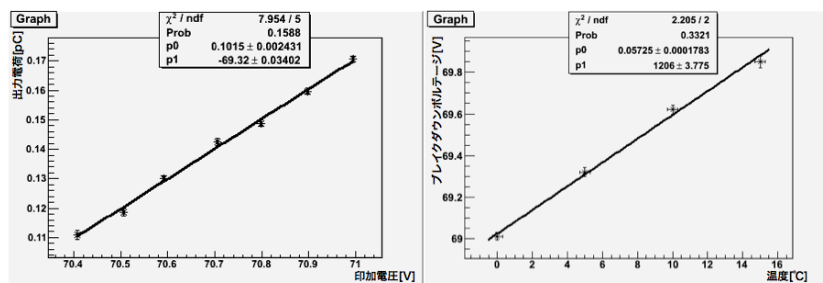


Fig. 5.40 MPPC 冷却テスト測定結果。左図はペルチェで冷却時の MPPC のキャリアレーション結果、右図がブレイクダウンボルテージの温度依存性を示す。

果を示す。左図の fit の x 切片 (p1) からブレイクダウンボルテージは 69.3V であることがわかる。これを右図に当てはめると、測定時の MPPC の温度は 4.8 となる。この結果と 3 章でのダークカウントノイズ測定の結果から、MPPC のノイズを 0.5photo electron 閾値で常温 (20) の半分程度 (1photo electron 相当で 1.6MHz) までノイズを減らすことが可能であることが分かった。また図 5.41 に湿り空気線図を示す。これを見ると室温 20 の環境で 5 に冷却する場合は 20 の相対湿度を 30% 以下にしなければならないことがわかる。よってプロトタイプ CV では周りに乾燥空気を流すことで相対湿度が 30% 以下になるようにすることにした。

5.8 プロトタイプ制作 (シンチレータ + ファイバーの接着)

今回 1m の EJ204 の制作を ELJEN に依頼した。シンチレータはガラスの型に溶剤を流し込み、加熱硬化させて作られる。そのため型が大きい場合は加熱の際にはガラスの型が歪み、シンチレータの厚みが均一にならなくなる。1m のシンチレータはシンチレータとしては非常に大きく、厚みに対して制限をかけて製作することはかなり難しい。そこで今回は複数枚の内から厚みができる

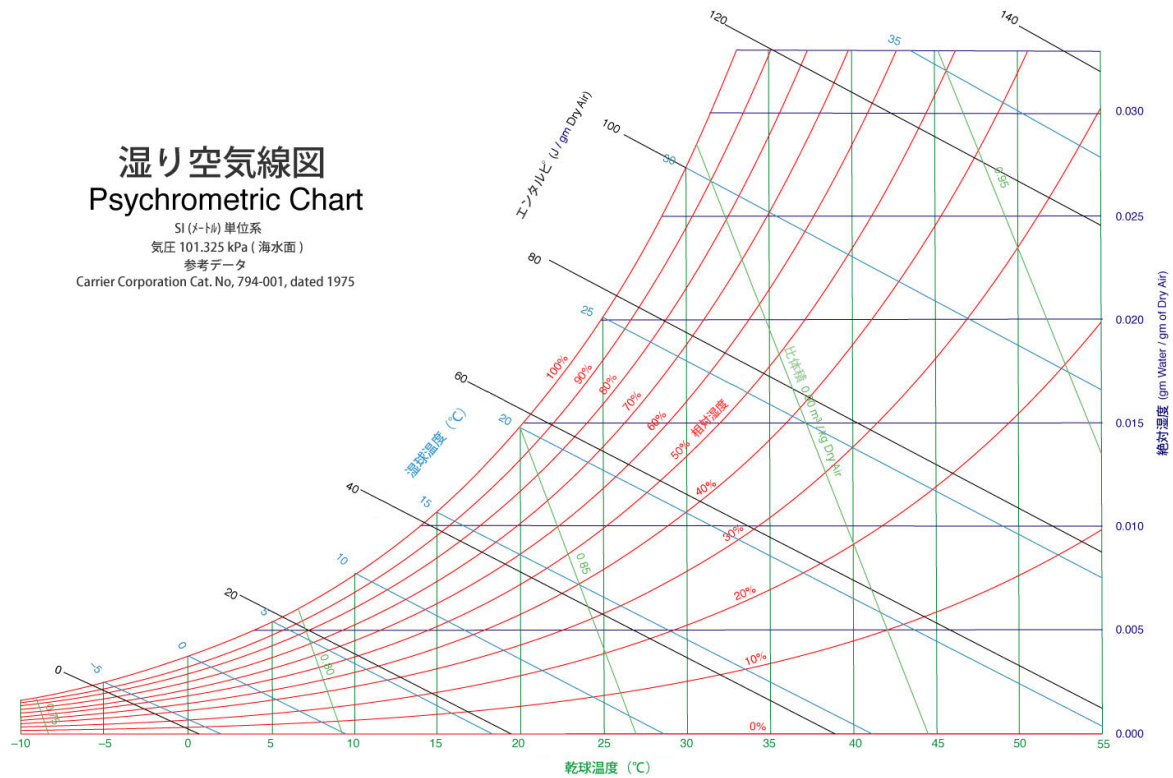


Fig. 5.41 湿り空気線図。縦軸が絶対湿度、横軸が乾球温度を示す。さらに斜めに走っている青線が湿球温度、斜めに伸びた黒線が比エンタルピー、斜めに伸びた緑線が比体積 (空気 1kg の体積) を示す。結露する湿度は冷却したい温度で相対湿度が 100% となる絶対湿度を読み取り、その時の周辺温度で先ほど読み取った絶対湿度に相当する相対湿度を読み取れば良い。

だけ均一なものを選定して加工してもらった。シンチレータを光学台の上に乗せ、ノギスでシンチレータの側面 41 カ所の厚みを測定した結果を図 5.42 に示す。その結果 3mm 厚での製作依頼に対して厚みの平均値が 2.58mm、最大高低差は約 1mm もあった。傾向としては外側が厚く、内側が薄いという結果になった。この問題は CV 制作の観点では大きな問題となる。この問題についてはまとめの章で少し議論することにする。次にファイバーの接着について議論する。ファイバーは前述の通り直径 1mm の Y11 を使用する。型番としては Y11(200)MS を使用した。これはシンチレーション材の濃度が 200ppm で曲げに強いタイプの Y11 である。ファイバーはシンチレータを光学台の上に置いた状態でオプティカルセメント (自然硬化型) である EJ500 を使用して接着した。図 5.43 に EJ500 の透過率を示す。これを用いることでシンチレータからの光をロスが少なく伝播させることが出来る。

次に実際の制作手順について説明する。ファイバーは注射器を用いてセメントをシンチレータの溝に流しこみ、その後ファイバーを溝に埋めこんだ。次にファイバーの両端を光学台に固定されたファイバー固定具にネジ止めし、両側からテンションをかけることでファイバーがシンチレータの溝から浮くことを防いで接着した。その後ファイバーの先を Fiber Fin(先端にダイヤモンドの

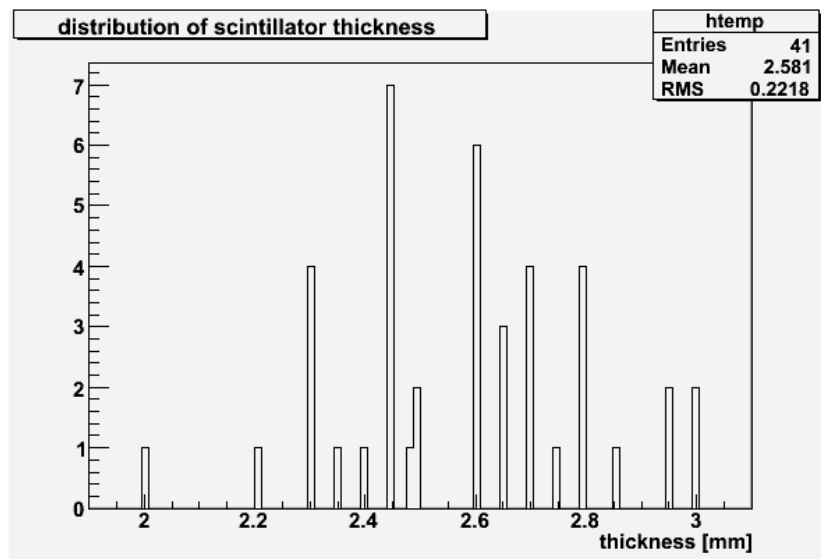


Fig. 5.42 シンチレータの厚みのばらつき

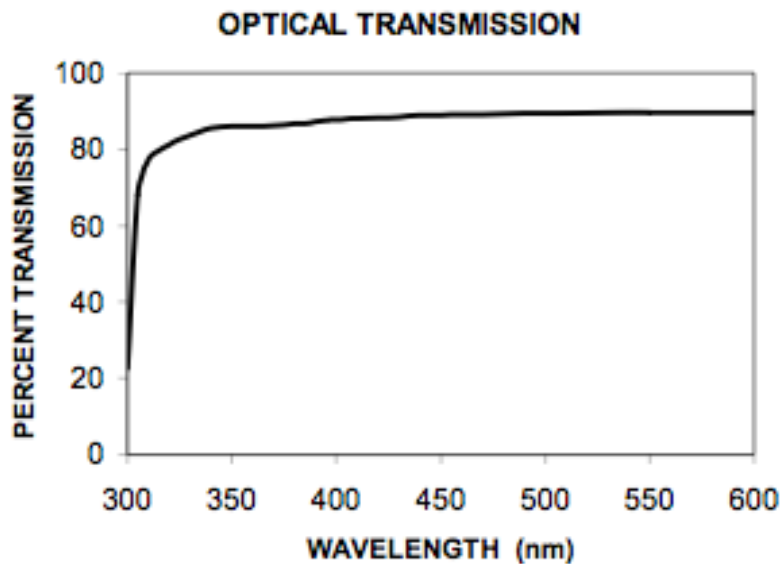


Fig. 5.43 EJ500 の透過率。

歯がついた研磨機)で研磨した。最後にファイバーをクッキーに EJ500 で接着した (図 5.44)。図 5.45 に実際に制作したプロトタイプの写真をのせる。

次にファイバー接着行程ででてきた問題について述べる。シンチレータの厚みが不均一なためにシンチレータに切られたファイバーを埋め込む溝の深さもまちまちとなってしまった。この結果シンチレータの中心付近 30cm 程度にわたってファイバーがシンチレータに半分程度しか埋まらない領域ができてしまった。この結果中心付近で本来よりも光量が落ちる、またシンチレータの薄い場所と厚い場所では光のシンチレーター中での伝播長が変化するのでその違いによっても光のバラツ

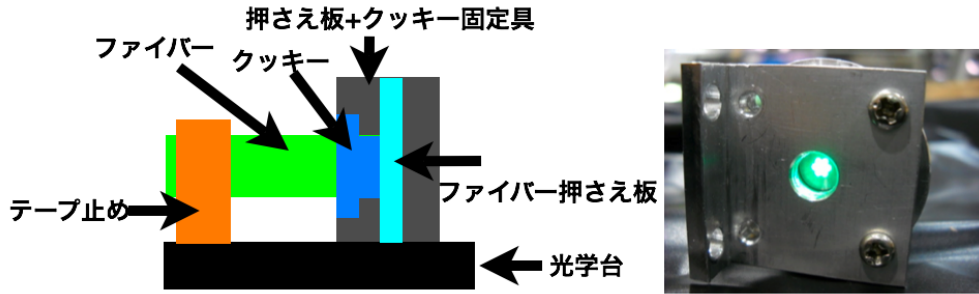


Fig. 5.44 左図はクッキー接着時のセットアップ。ファイバーを光学台にテープ止めした後、ファイバーの入ったクッキーを押しさえ板に押しつけた状態で固定具を光学台にネジ止めした。ファイバーは 1mm 径で柔らかいので少しのテンションでちゃんと固定出来る。右図は接着後、間の押しさえ板を外した写真。真ん中の緑の部分ファイバーである。



Fig. 5.45 制作したシンチレータの写真。緑の部分ファイバーを示している。ファイバーの先にはクッキーと輸送の際にクッキーを固定するジグがついている。

キが存在する恐れがある。従って今回作成したシンチレータではファイバーの減衰長を考慮した場合以上に光量の uniformity が悪化する可能性がある。CV は veto 検出器であり、hit 時間を正しく見積もることが出来るかが重要となってくる。そこで今回のプロトタイプ性能評価はこの時間分解能と hit 時間の再構成が正しくできるかという点に重きを置く事にする。光量に対しては光量が一番低い場所で十分な光量が出ていれば π^- に対する不感率と言う観点では問題ない。以上の理由から今回のプロトタイプ性能評価では CV プロトタイプの時間分解能及び時間の uniformity と最低光量の場所の光量の測定に重点をおくことにする。

5.9 まとめ

プロトタイプ CV の開発のため

1. プロトタイプ CV のデザインの決定
2. 使用するシンチレータ素材の決定
3. AMP の開発
4. MPPC とファイバーの接続方法の決定
5. MPPC 冷却機構の開発
6. プロトタイプ制作 (シンチレータ + ファイバーの接着)

を行った。デザインは幅 7cm 長さ 1m、厚さ 3mm のシンチレータに溝を切り、波長変換ファイバーで読み出すことにした。ファイバーは片側を 25cm 伸ばした後 MPPC で読み出し、もう一方は 1m 伸ばしてから MPPC で読み出す。プロトタイプに使用するシンチレータは光量測定の結果から EJ204 を使用することにした。AMP は要求性能を見積もり、オペアンプによる非反転増幅 2 段で要求性能を満たすものを開発できた。MPPC とファイバーの接続方法はシミュレーションによりファイバーからの光量の loss を見積もり、それを満たすデザインにした。MPPC の冷却機構は MPPC の乗った基板を裏側から冷却することにして冷却温度 5 を達成できた。シンチレータは厚みの誤差を小さいものを作ることが出来ず、これは CV 製作の面で問題となってくるのが分かった。次の章ではこの CV プロトタイプ性能テストの結果について議論する。

6 プロトタイプ CV の性能評価

プロトタイプの性能評価を行うため再び電子光物理学研究センターの 600Mev/c の陽電子ビームを用いて実験を行った。

6.1 セットアップ

まず実験のセットアップを図 6.1、6.2 に示す。event のトリガーはタイミングカウンター (T0L、T0R) とトリガー T1、T2、とトリガー T3、T4 の 6 つのトリガーの coincidence を使用した。タイミングカウンターの T0L と T0R は $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 1\text{cm}$ のシンチレータを、T3、T4 は $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{mm}$ のシンチレータを浜松ホトニクス製の H7415 を使用して両読みしている。トリガー T1 と T2 は $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 5\text{mm}$ のシンチレータを同じく浜松製の R7400U で片読みしている。今回はプロトタイプの時間分解能を測定するため、event トリガーの時間分解能が測定すべきものの時間分解能に影響を及ぼしてはいけない。そこでタイミングカウンターの時間分解能を本実験の前に測定した。実験は event トリガーと T0R の時間差の分布を見た。event トリガーの時間分解能は T0L によって決まっているので T0R で観測される時間分布の広がり $\sigma = \sqrt{\sigma_{T0R}^2 + \sigma_{T0L}^2}$ となっている。今 T0L と T0R は同じ型番の PMT を gain を揃えて使用しているので分解能が同じだと仮定すると、 $\sigma_{T0L} = \sigma/\sqrt{2}$ となる。この測定結果を図 6.3 に示す。このグラフを fit した結果、 $\sigma = 0.198\text{ns}$ なのでタイミングカウンターの時間分解能は $0.198\text{ns}/\sqrt{2} = 0.14\text{ns}$ であることがわかる。

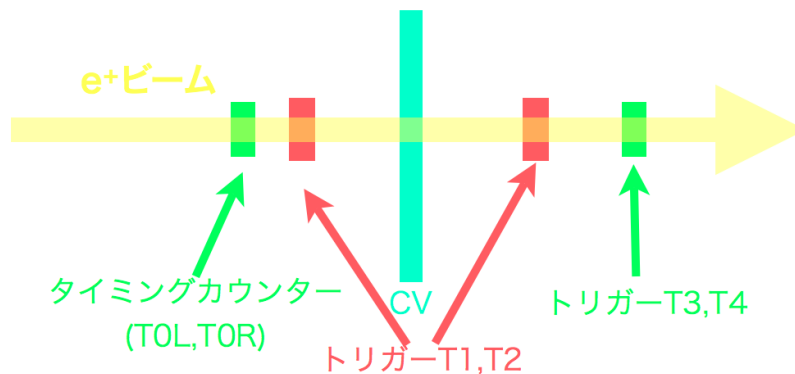


Fig. 6.1 実験のセットアップ。

次に MPPC 周りのセットアップを図 6.4、6.5 に示す。MPPC の電圧供給はこれまでの測定と同じ KIKUSUI の直流電源 PAN110-1.5A を使用した。discriminator の閾値は 1photo electron に設定した。

今度はシンチレータ部の説明をする。図 6.6 にシンチレータ部の写真を乗せる。シンチレータには厚さ $25\mu\text{m}$ のアルミナイズドマイラを巻いた。その後シンチレータを図 6.6 のように固定用のフレームに固定した。さらにフレーム内に MPPC キャリブレーション用の LED と湿度計を設置

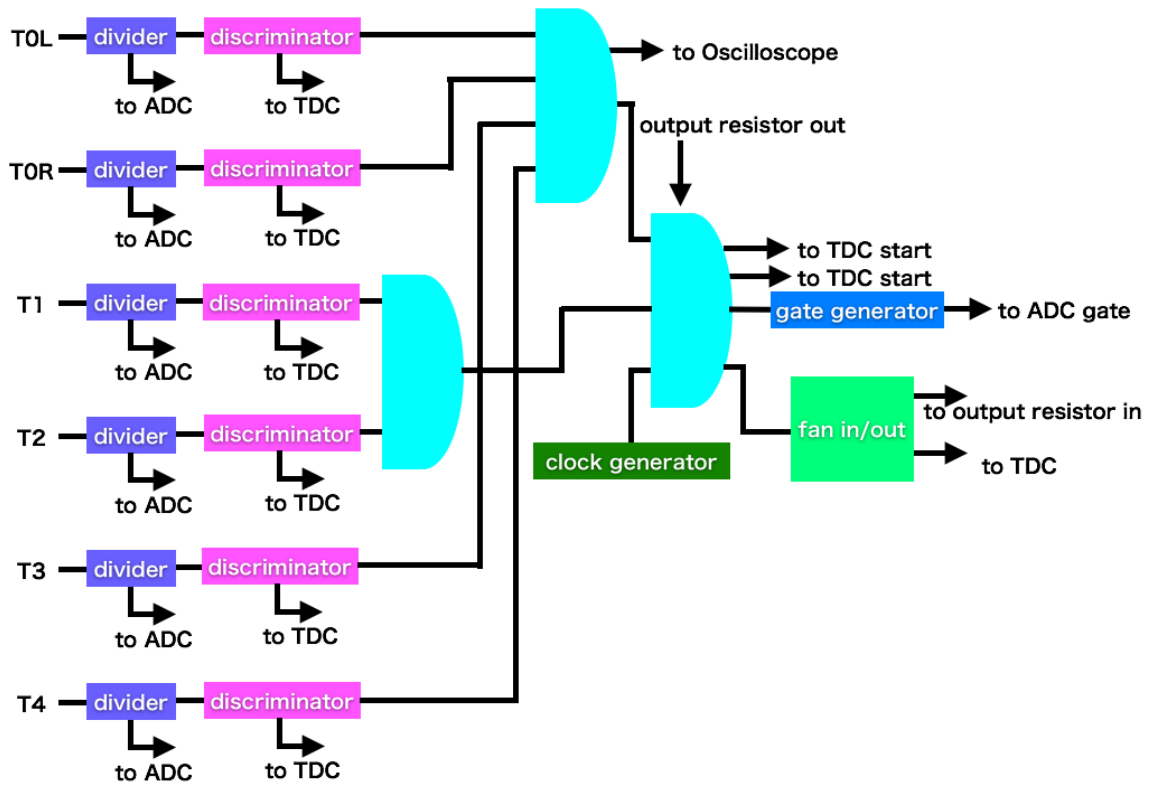


Fig. 6.2 実験の daq。水色は coincidence gate を示す。

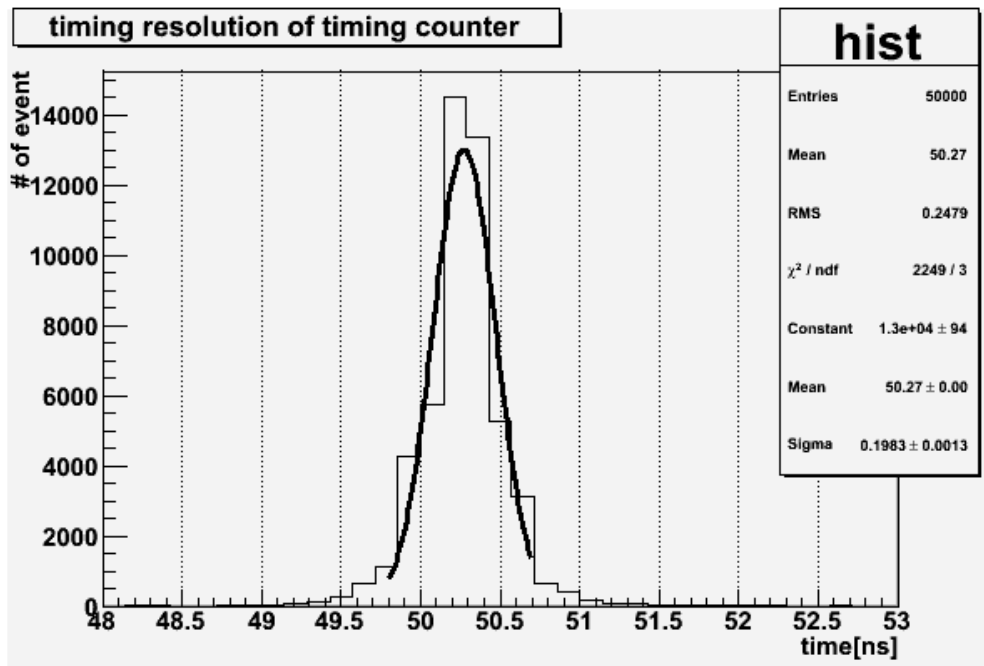


Fig. 6.3 T0R の TDC 分布を TDC キャリブレーションの結果を用いて時間に直した分布。

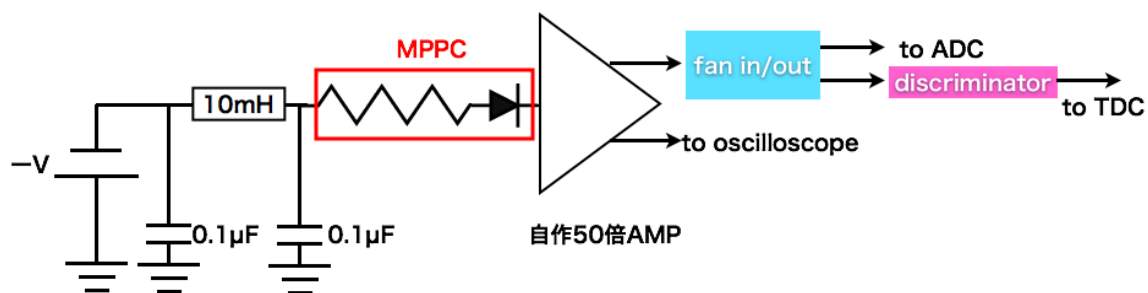


Fig. 6.4 MPPC 周りの回路図。

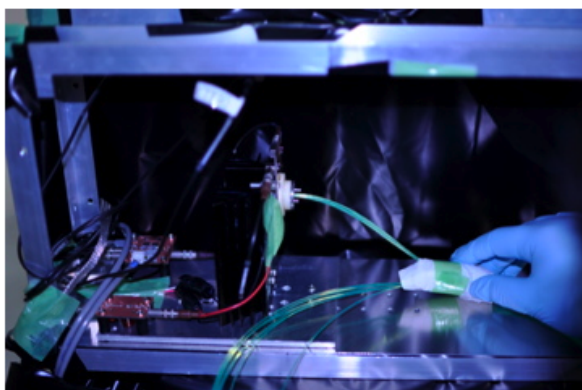
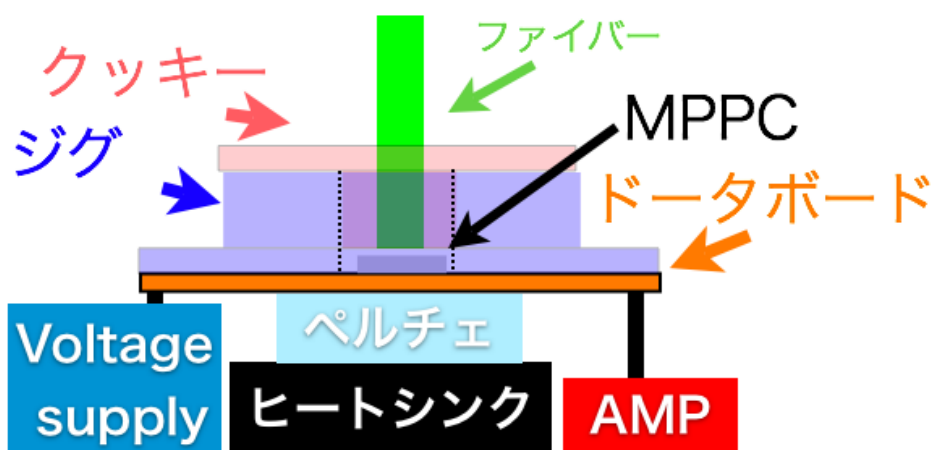


Fig. 6.5 上図が MPPC 周りのセットアップの概念図。下図が実際の写真。クッキーの付いたファイバーが MPPC ボードに固定されたジグにネジ止めされている。写真中央の黒い四角形がヒートシンクである。

した。湿度計には TDK の CHS-UGS を使用した。全ての部品を固定した後遮光のために固定フレームを暗幕で密閉し、固定フレームの中に乾燥空気を流し込んだ。そしてこの固定フレームをガイドレールの上に置いた。プロトタイプ CV の configuration は図 6.7 のようになっており、固定フレームがガイドレールの上を動くことにより x 方向に対してスキャンを行う。またレールの上 4 か所にスペーサーを置くことで高さを稼いで y 方向へのスキャンを行った。

6.2 ペルチェ冷却システムの評価

最初に固定フレーム内の湿度の変化を図 6.8 に示す。これを見ると湿度は最大でも 12% であり、実験エリアが 20 に保たれていることからペルチェ素子を結露させることなく稼働させられたことが分かる。

次にペルチェ素子による冷却について述べる。ペルチェ素子には冷却テストに使用した電源を用いてそれぞれ 1.5A ずつ電流を流した。今回冷却システムを組み込むに当たって MPPC の周辺温度を測定することはしなかった。これは MPPC の乗った基板が大きいため温度勾配が大きく MPPC 近傍しか冷却できないため近傍以外の温度をモニターしても余り意味がない、MPPC 近傍にはスペースが無く手近にある温度センサーを配置できないという理由による。そこで MPPC の温度が一定に保たれているということを以下の方法で保証することにした。まず実験での run と run の間 (約 30 分) ごとに LED を用いて第三章で記述した方法で MPPC の gain を測定して gain が変化していないことを確認した。次に実験の前と後で MPPC のキャリブレーションを行い、ブレイクダウンボルテージが変化していないことを確認した。この二つの測定の結果を図 6.9、6.10 に示す。さらに図 6.11 に第三章で記述した方法を用いて求めたブレイクダウンボルテージと温度の相関図を示す。図 6.9 の結果より MPPC の gain は実験中に $\pm 6\%$ 程度変動していることが分かる。これを図 6.10 と図 6.11 を用いて温度の変動に焼き直すと、 ± 1.5 の範囲で温度管理が行われていることになる。また図 6.10 からブレイクダウンボルテージを読み取り、図 6.11 でその電圧での温度を読み取ることで上流側から見て左側の MPPC が 7.6 、右側が 5.6 に冷却されていることが分かる。

6.3 uniformity 測定

測定項目を説明する前に改めて上流側から見たプロトタイプ CV の configuration を図 6.7 に示す。シンチレータの大きさは $1\text{m} \times 7\text{cm}$ 、厚さ約 2.6mm である。シンチレータには 1cm おきに深さ、幅共に 1.1mm の溝が合計 7 本掘られている。そこには直径 1mm の Y11(200)MS がオプティカルセメントを用いて埋め込まれる。ファイバーの左側は 25cm 伸ばした後で MPPC で読み出される。右側は 125cm 伸ばした後 MPPC で読み出される。座標軸は図 6.7 中にあるように設定する。uniformity 測定は $y=0$ の地点で x 方向に対して 11 点、 $y=3\text{cm}$ の地点で x 方向に対して 13 点行った。なお今回トリガーシンチレータの大きさが $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ であるのでファイバー直

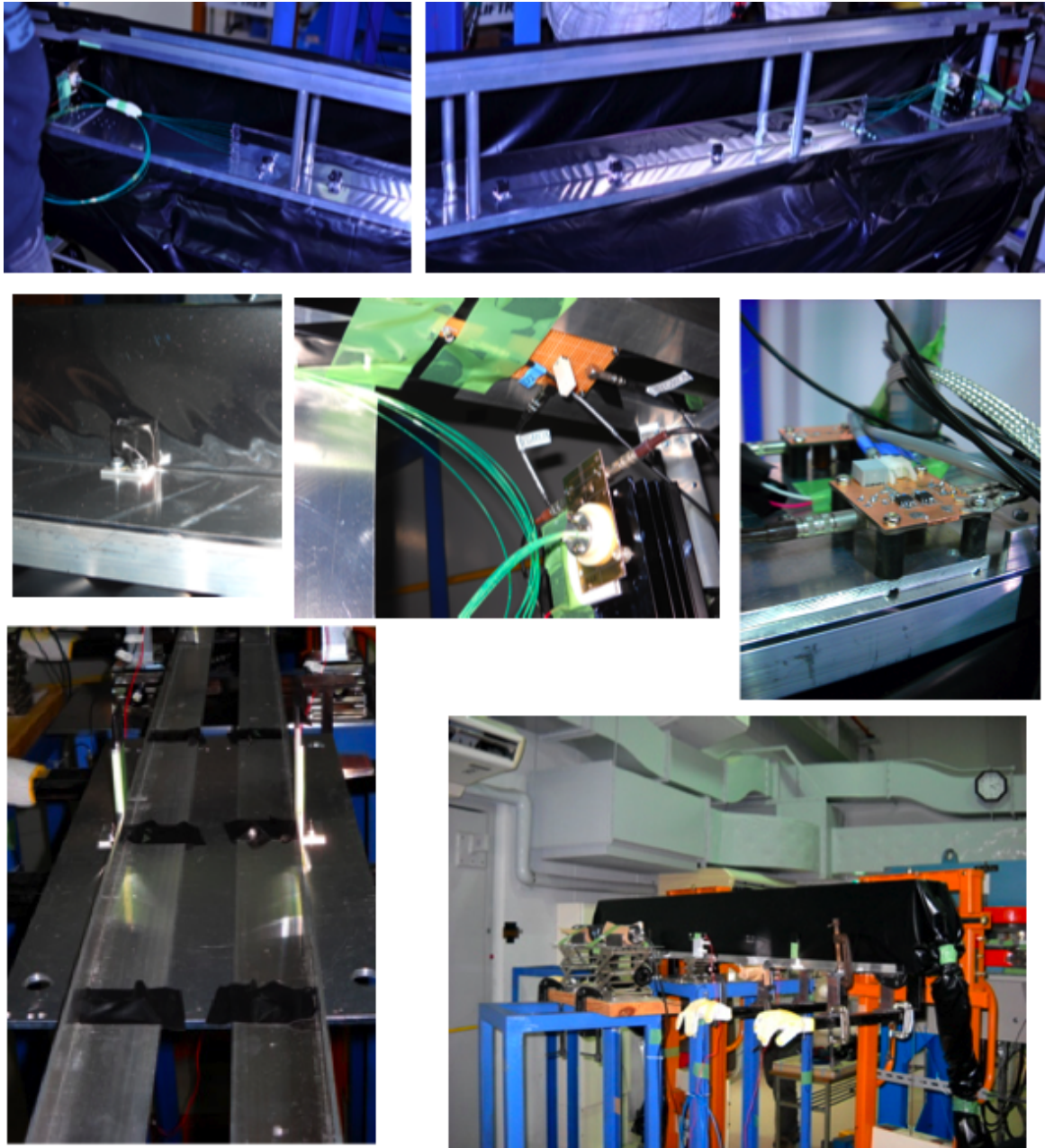


Fig. 6.6 プロトタイプ CV の設置風景。一番上の図はプロトタイプ固定フレームの全体図、二段目左はシンチレータ固定部の拡大図。フレーム部分、固定具は全て固定フレームを動かして uniformity を計る際にビーム (5cm×5cm) に当たらないようになっている。二段目の中央は LED 及び湿度計の設置風景、一番右は AMP の設置図。一番下左図は固定フレームを置くガイドレール。固定フレームがこのレールの上を動くことで uniformity を測定する。一番右図は固定フレームを遮光の為に暗幕で包んだ後、レールに置いた写真。

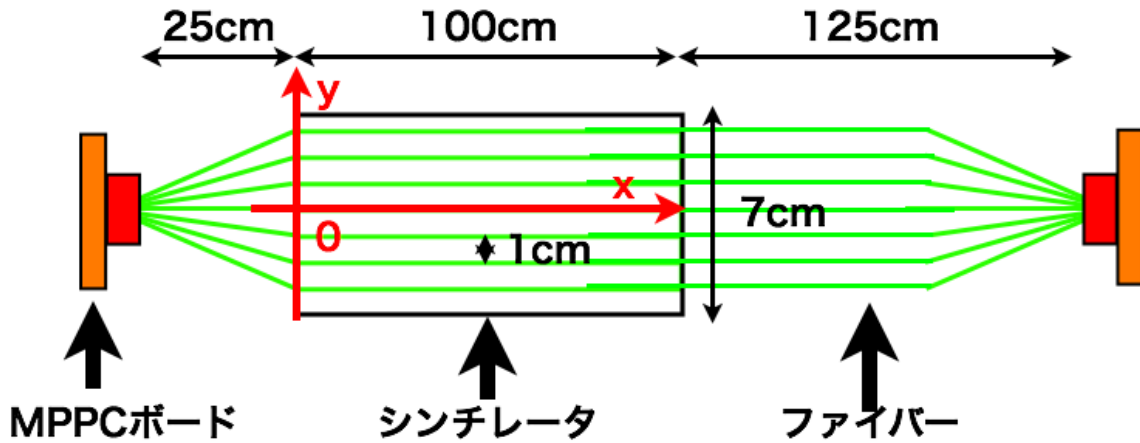


Fig. 6.7 上流側から見たプロトタイプ CV の configuration.

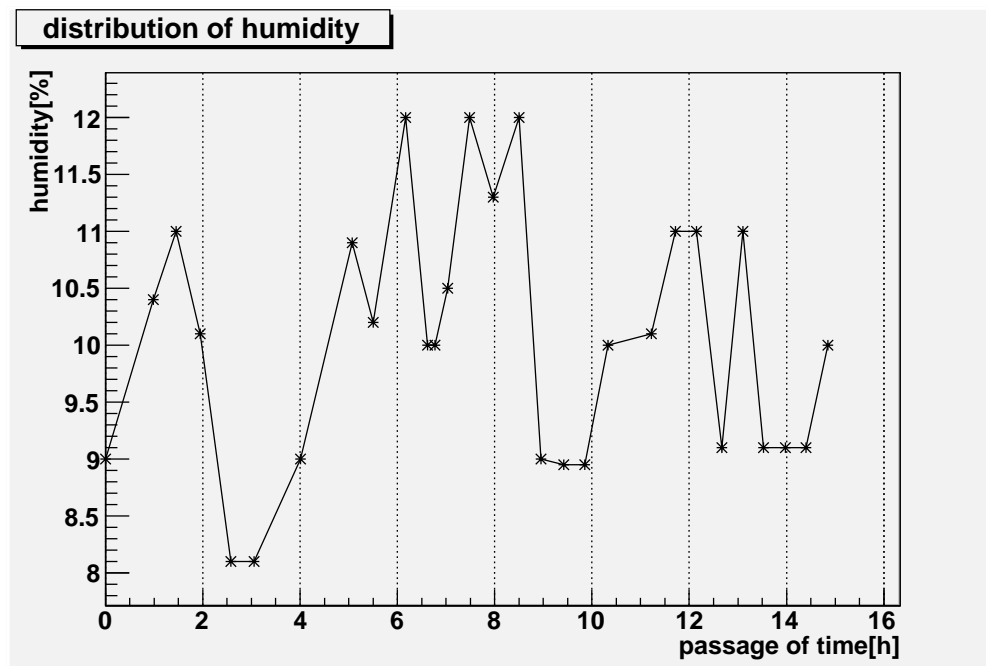


Fig. 6.8 固定用フレーム内の湿度の時間変化。

上にビームが入射した場合に光量が減少する効果は無視した^{*20}。データは出力電荷を電荷有感型 12bitADC で、時間情報を 250ns レンジ TDC で、波形情報をオシロスコープで取得した。

^{*20} $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ の領域においてファイバーが通る領域は 1mm と小さい。シンチレータの厚みは 3mm なので、 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ で間にファイバーが一本通っている場合は全部がシンチレータの時に対して平均光量が $(9 \times 3 + 2/3 \times 3) / (10 \times 3) = 0.97$ となる。

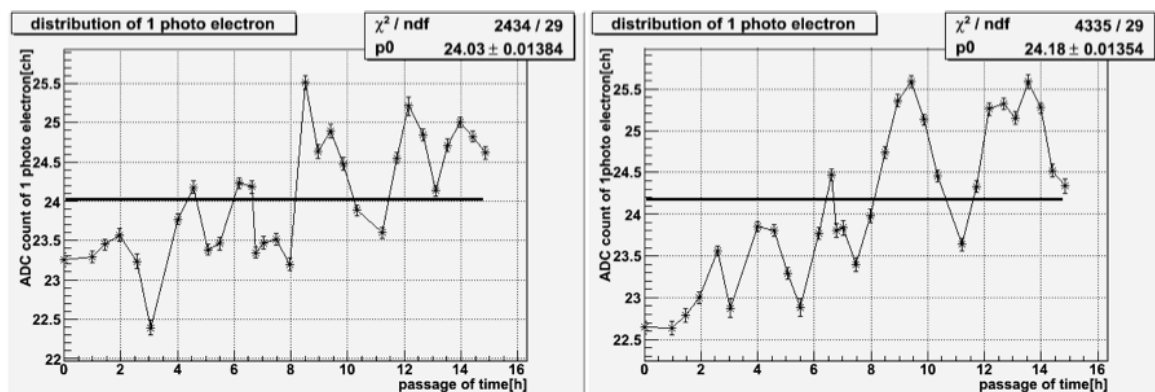


Fig. 6.9 MPPC の gain の時間変化。左図がビーム上流側から見て左側の MPPC、右図が右側の MPPC の結果。

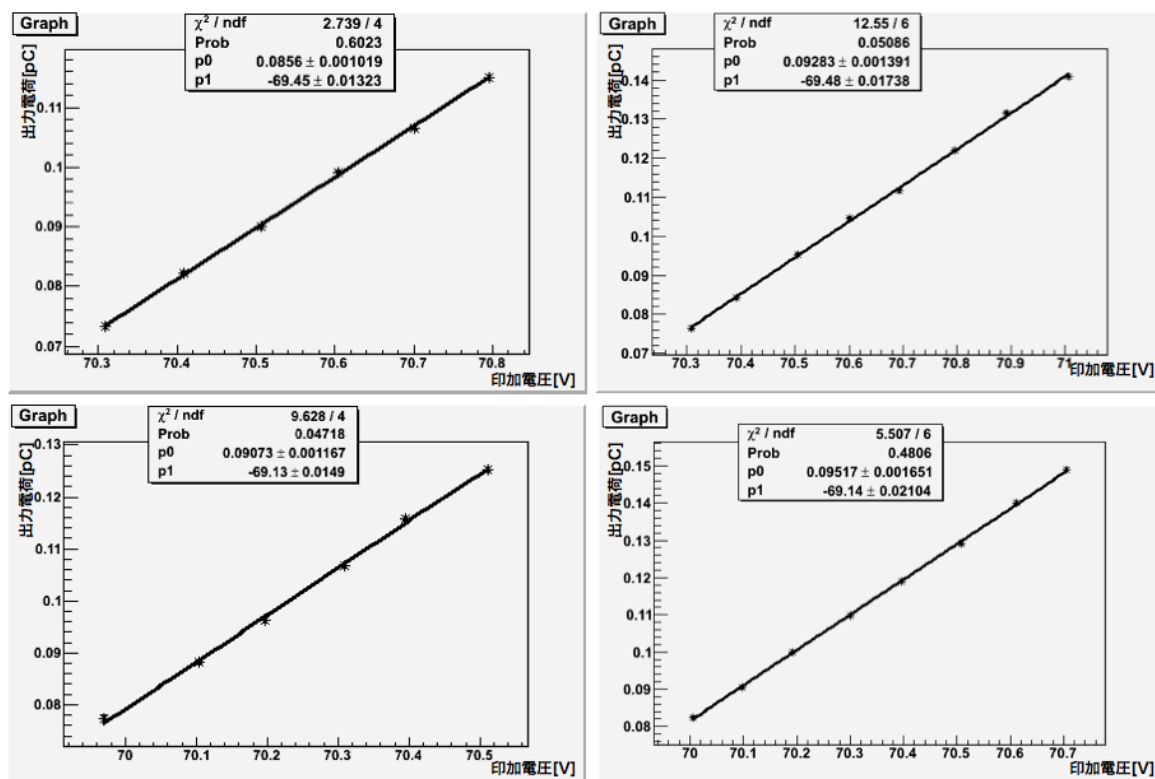


Fig. 6.10 MPPC のブレイクダウンボルテージの実験前後での変化。上図が上流から見て左側、下図が右側の MPPC の測定結果。左が実験前、右が実験後の測定結果。fit 関数は $p_0 + p_1 \times x$ 。

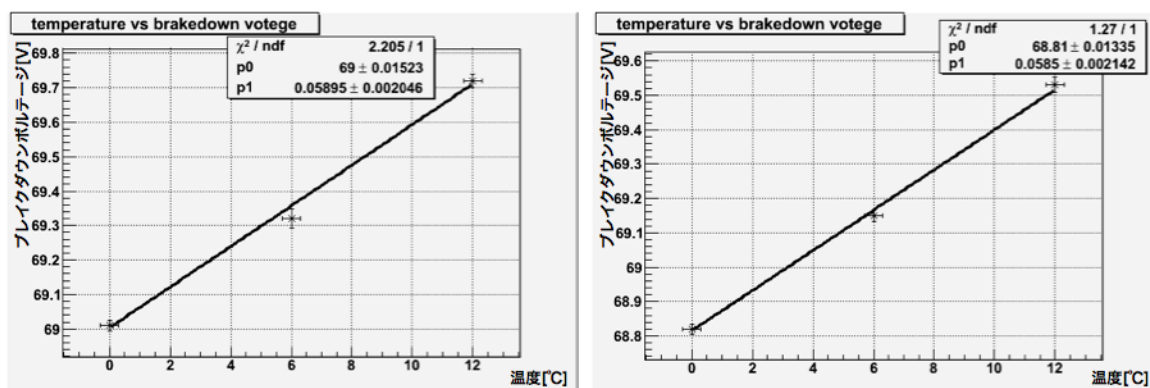


Fig. 6.11 研究室で測定したブレイクダウンボルテージと温度の関係。左図が上流から見て左側、右図が右側の MPPC を示す。fit 関数は $p_0(x+p_1)$ 。

6.3.1 解析方法

図 6.12、図 6.13 に各トリガーの energy 分布と時間分布を示す。これらの分布を見るとペDESTAL に立つ event や TDC でオーバーフローしている event はほぼ無く、coincidence が十分働いていることが分かる。従って今回解析にはこれらのトリガーの情報を cut に使用しないことにした。

次に図 6.14 に MPPC のエネルギー分布と時間分布を示す。一番下の分布を見ると ADC と TDC には t_q -補正が必需なことが分かる。そこで時間分解能は t_q -補正を行った分布を gaussian で fit して求めた (図 6.15)。また光量は ADC 分布を gaussian で fit し、photo electron 変換係数測定で求めた gain と pedestal ピークの位置を使って

$$mip \text{ ピークに相当する光量} = (MIP \text{ ピーク} - pedestal \text{ ピーク}) / photoelectron \text{ 変換係数}$$

としてもとめた。解析結果を図 6.17、6.17 に示す。この結果からファイバーが短い方の読み出しは $y=0$ の時平均光量が $6.44 \pm 0.15 \text{ p.e./100keV}$ 、一番低い所は $x=700\text{mm}$ で $5.64 \pm 0.48 \text{ p.e./100keV}$ であった。一方ファイバーを引き延ばした方は平均で $4.23 \pm 0.1 \text{ p.e./100keV}$ 、一番低い所は $x=58\text{mm}$ で $3.67 \pm 0.31 \text{ p.e./100keV}$ であった。同様に $y=30$ の時、短い方は平均 $6.58 \pm 0.16 \text{ p.e./100keV}$ で一番低い所は $x=995\text{mm}$ の $5.21 \pm 0.45 \text{ p.e./100keV}$ 、長い方は平均 $4.45 \pm 0.11 \text{ p.e./100keV}$ で一番低い所は $x=58\text{mm}$ の $3.85 \pm 0.33 \text{ p.e./100keV}$ であった。この結果より CV での 100keV 閾値で 3photo electron 以上の光量が必要だという要求をプロトタイプ的全領域で達成できていることがわかった。また時間分解能に関しては一番悪い場所は同様に右側読み出しの $y=0, x=50$ の所であり、ここでは 1.2ns の時間分解能を持つことが分かる。

CV では最終的にはファイバーの両端の MPPC での hit 時間を利用して真の hit 時間を計算することになる。ここで真の hit 時間を T_h 、左側の MPPC での hit 時間を T_1 、右側を T_2 、hit 位置から左側の MPPC までの距離を l_1 、右側までの距離を l_2 、左側の MPPC から右側の MPPC までの距離を l 、ファイバーの伝達時間を $T_{tran}[\text{ns/m}]$ とすると

$$T_i = T_h + l_i \times T_{tran} \quad i = 1, 2$$

$$l = l_1 + l_2$$

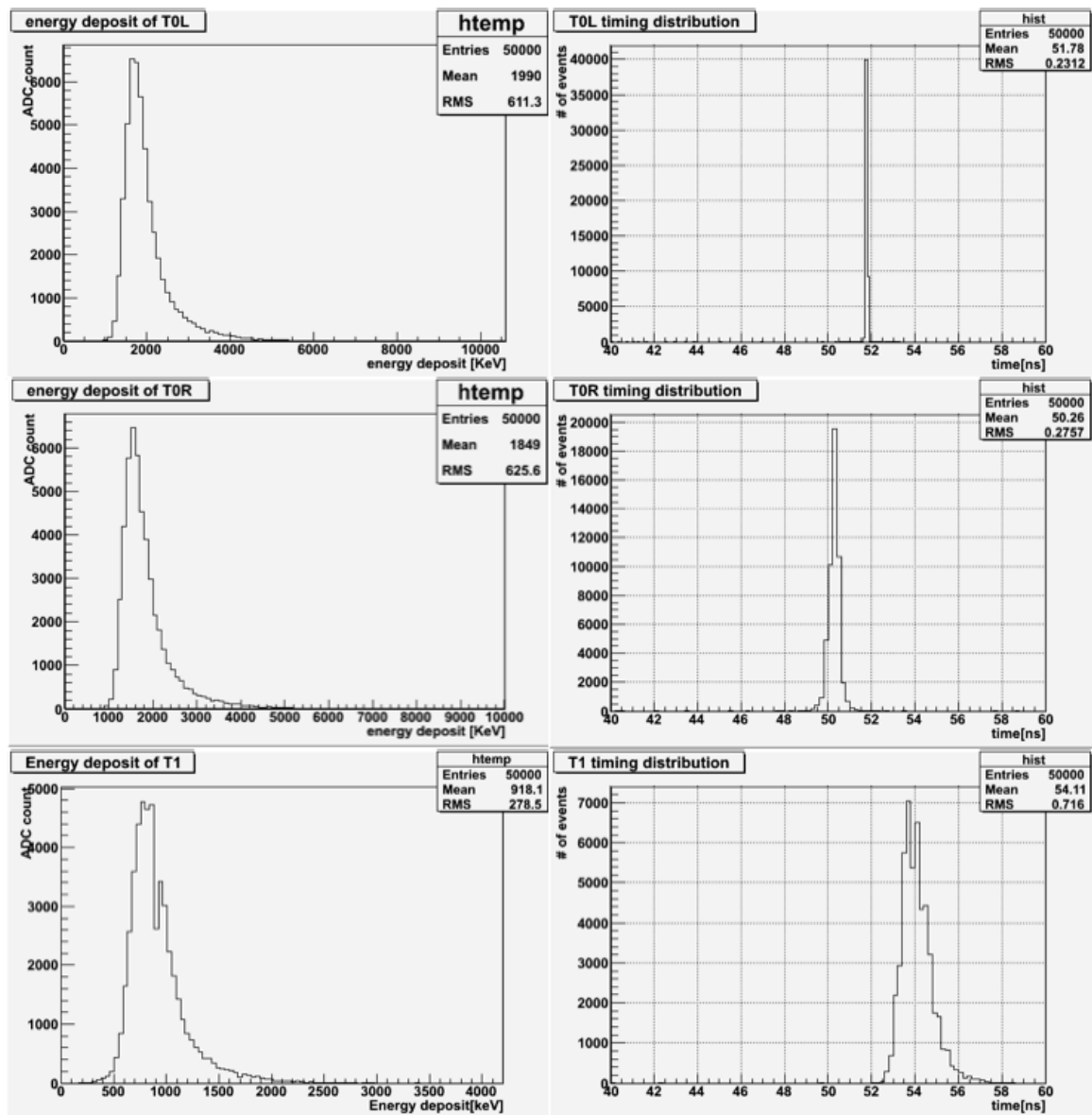


Fig. 6.12 各トリガーの energy 分布と時間分布その 1。x=50cm、y=0 にビームを入射した時の分布である。energy 分布は Geant4 を用いて行ったシミュレーションと ADC spectrum での pedestal run の結果より ADC spectrum を energy 分布に直している。時間分布は TDC キャリブレーションを行い TDC spectrum を時間分布に直している。

が成り立つ。ここから

$$T_2 - T_1 = T_{tran}(l_2 - l_1) = T_{tran}(l - 2l_1) = T_{tran}(2l - l_2)$$

$$T_h = \frac{T_1 + T_2}{2} - \frac{l \times T_{tran}}{2}$$

を導ける。従って hit 時間の差はビームの入射位置に比例し hit 時間の平均は常に一定になることが分かる。hit 時間の差を図 6.19 に示す。この結果から hit 時間の差はビームの入射位置に依存し、ファイバー中の光の伝播速度は $\sim 5\text{ns/m}$ であることが分かる。次に図 6.20 に x=500mm、

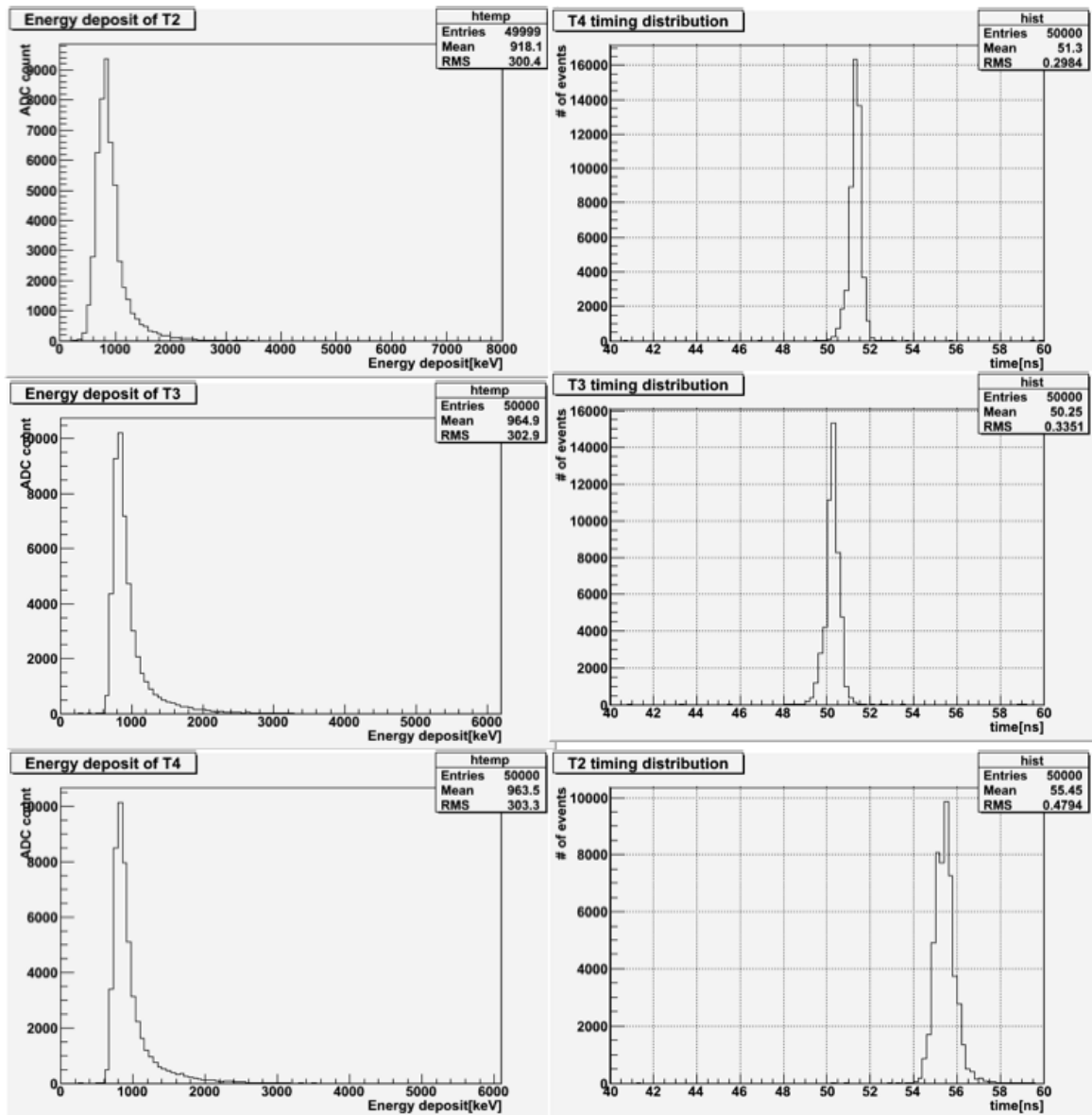


Fig. 6.13 各トリガーの energy 分布と時間分布その 2。x=50cm、y=0 にビームを入射した時の分布である。

y=0 の位置にビームを入射させた時の平均時間の時間分布をしめす。この図からこの時の時間分解能が 0.8ns であることが分かる。さらに平均時間のビーム入射位置依存性を示したのが図 6.21 であり、平均時間の時間分解能の位置依存性を示したのが図 6.22 である。これを見ると各入射位置にて見ると時間分解能は 0.74ns ~ 0.84ns まで分布していることが分かる。最後に 6.23 に全測定点の平均時間の時間分布を event weight を付けて足し合わせたものを示す。この結果より CV では平均時間で見ると 0.8ns の時間分解能を達成出来ることが分かる。

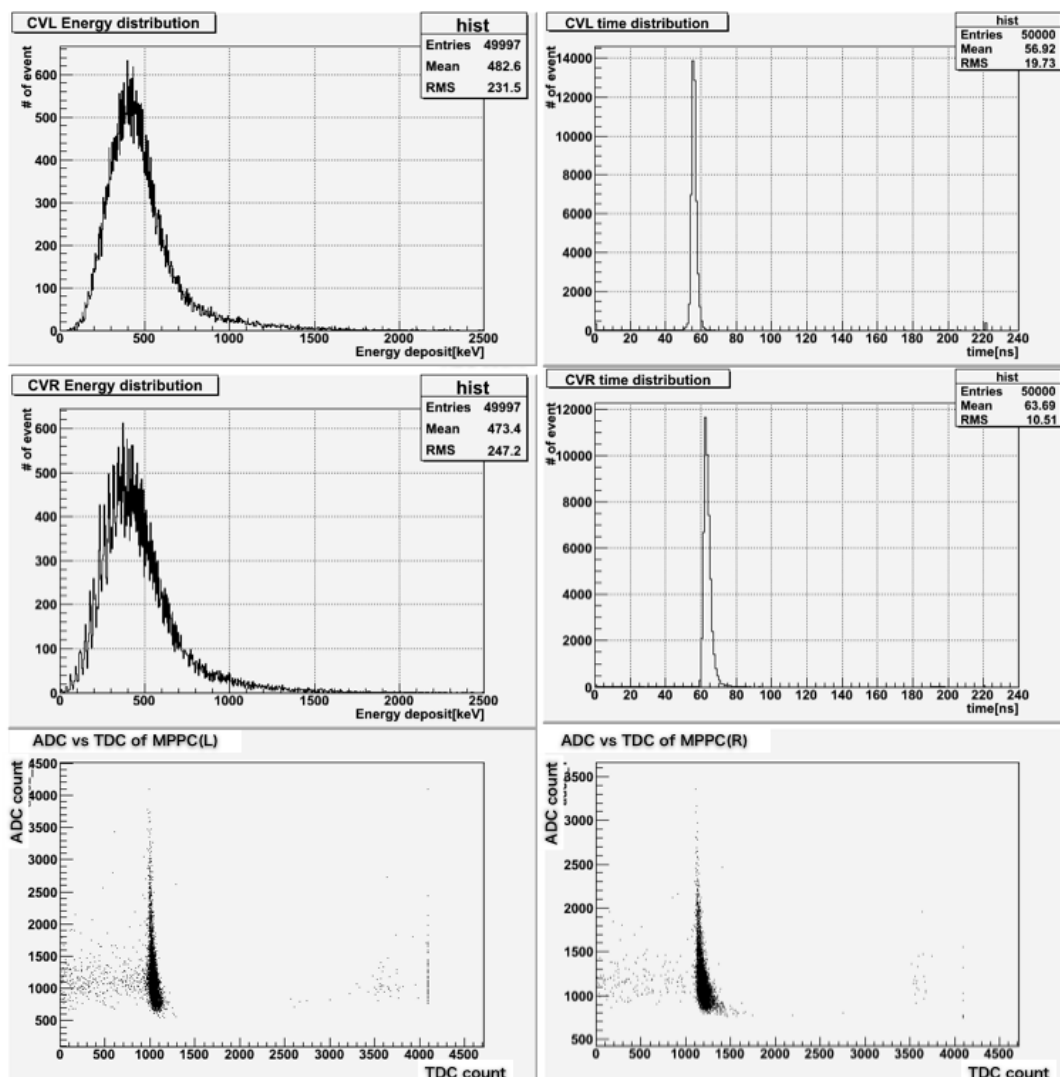


Fig. 6.14 各 MPPC のエネルギー分布及び時間分布。y=0、x=50cm にビームを入射した時の分布。CVL が上流側から見て左側の MPPC を、CVR が上流側から見て右側の MPPC を示す。

6.4 まとめ

この章では実際に制作したプロトタイプ CV の性能評価を行った。具体的には x scan、y scan を行い、時間分解能としては $\sim 0.8\text{ns}$ を満たすことが分かった。また光量に関しては一番低い所でも $3.7\text{photo electron}/100\text{keV}$ を達成することが出来た。次の章では性能評価で求めた時間分解能に対して timing window の決定と accidental hit による accidental loss の見積もりとダークカウントノイズによるロスの見積もりを行った。

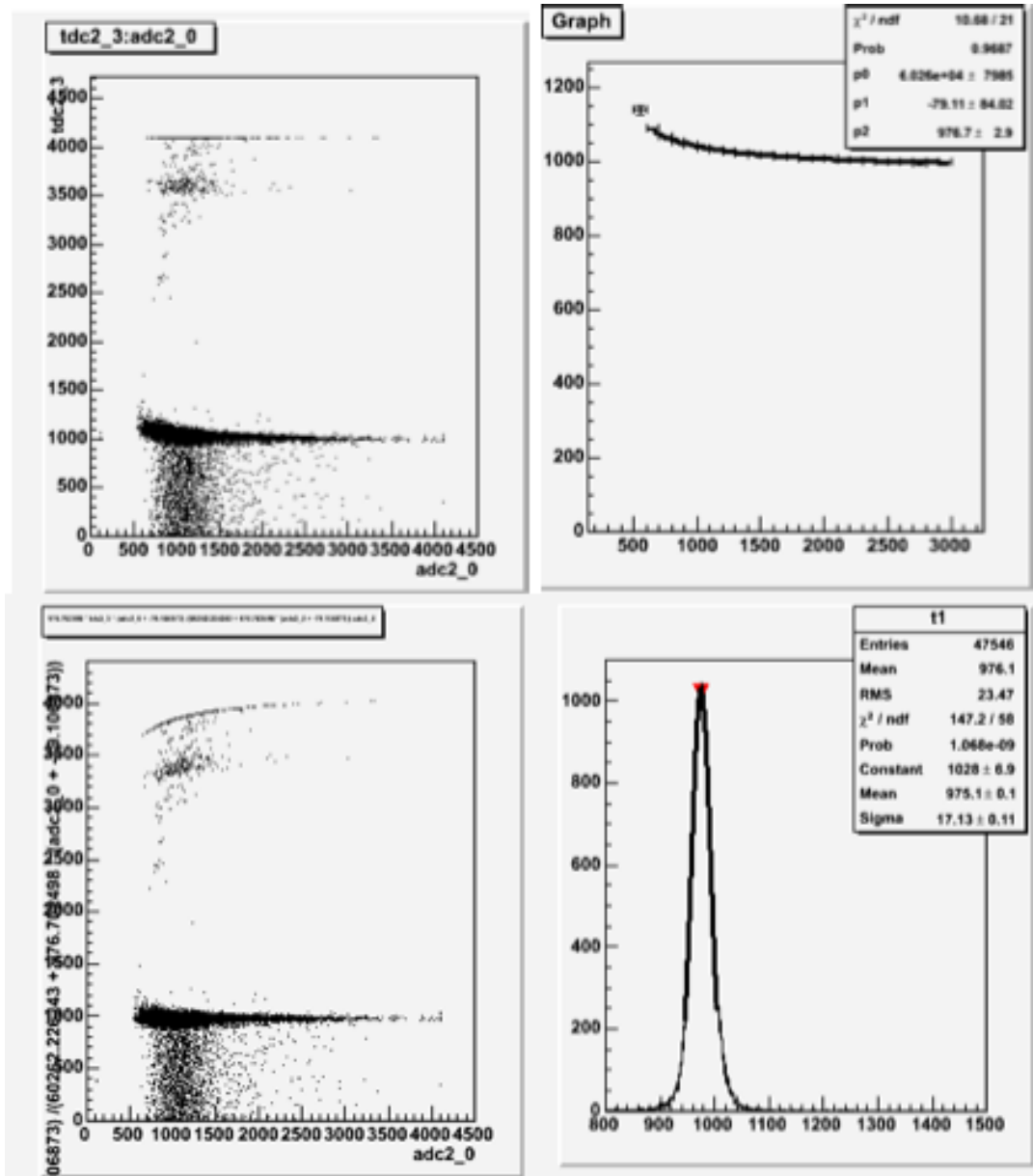


Fig. 6.15 左上図が tQ 補正を加える前の横軸 ADC 分布、縦軸 TDC 分布のプロット。右図が tQ 補正 fit。fit 関数は $y=p0/(x+p1)p2$ とした。左下図は tQ 補正後の TDC、ADC 分布。右下図は補正後に TDC を gaussian で fit している。

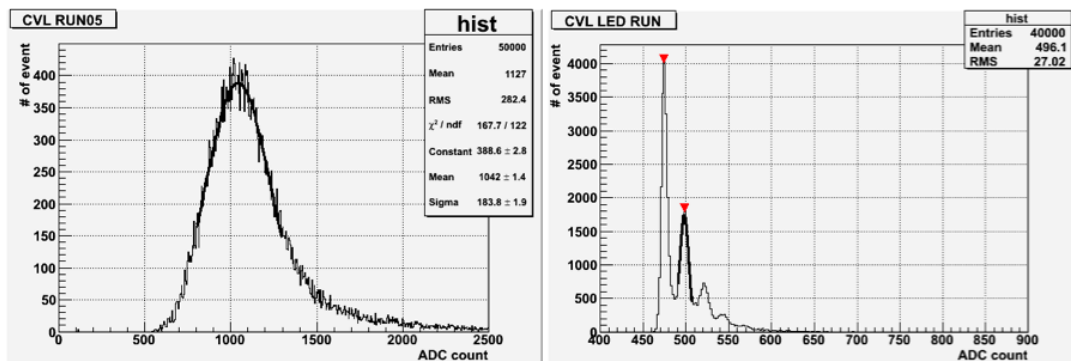


Fig. 6.16 左図は ADC 分布の mip ピークの gaussian fit、右図は LED Run の ADC 分布で pedestal ピークと 1photo electron ピークをそれぞれ gaussian で fit する。

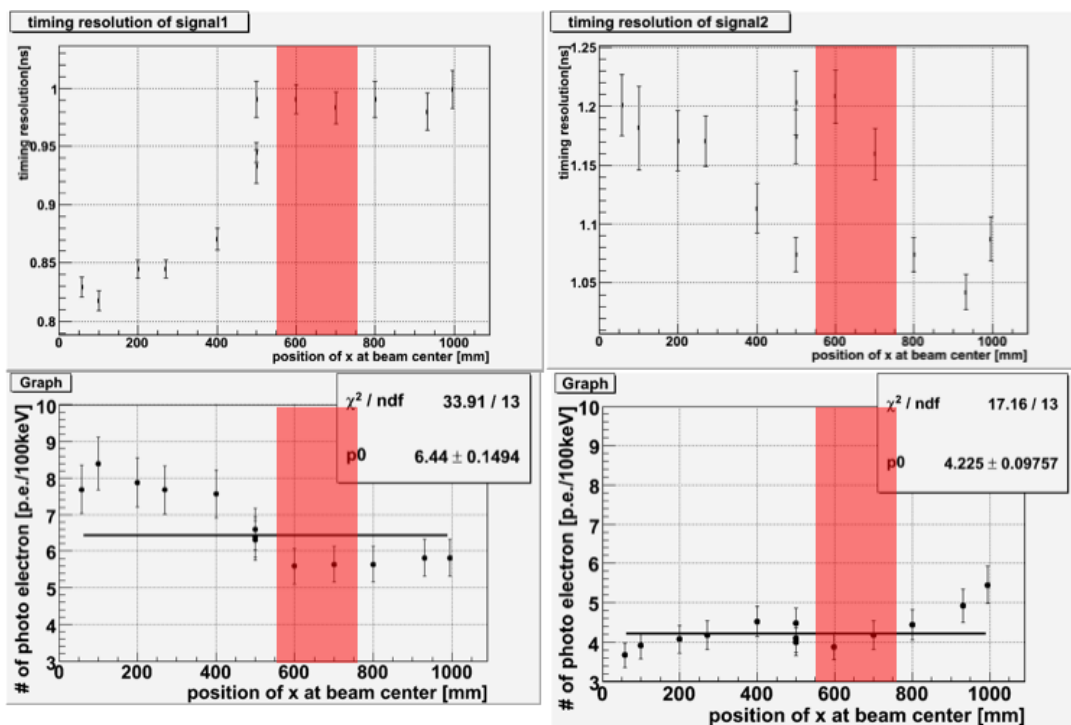


Fig. 6.17 $y=0$ で x 方向に scan した結果。上が時間分解能の変化、下が光量分布。また左側が上流から見て左側の読み出し、右側が右側の読み出しとなっている。光量分布の規格化は 100keV 当たりの光量で規格化した。シミュレーションの際にはシンチレータの厚みとして平均値の 2.581mm を使った。赤い領域で示された部分がファイバーが完全に埋まっていない領域である。光量のエラーが大きいのは厚みのバラツキをエラーに含むせいである。

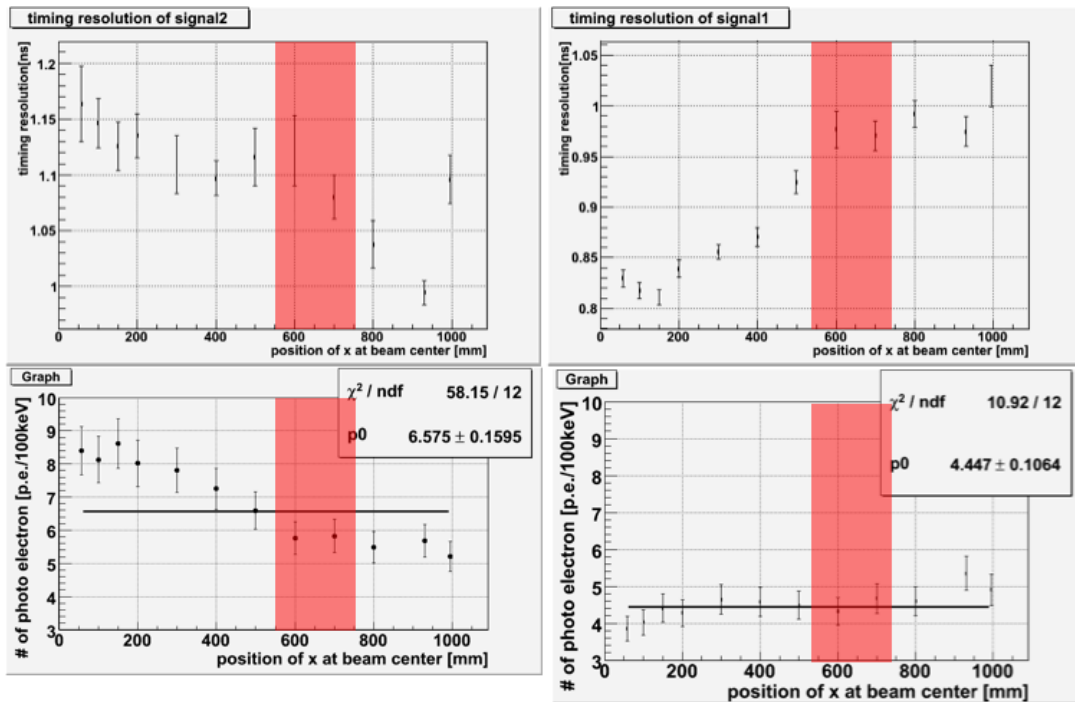


Fig. 6.18 $y=3\text{cm}$ で x 方向に scan した結果。上が時間分解能の変化、下が光量分布。また左側が上流から見て左側の読み出し、右側が右側の読み出しとなっている。光量分布の規格化は 100keV 当たりの光量で規格化した。シミュレーションの際にはシンチレータの厚みとして平均値の 2.581mm を使った。赤い領域で示された部分がファイバーが完全に埋まっていない領域である。

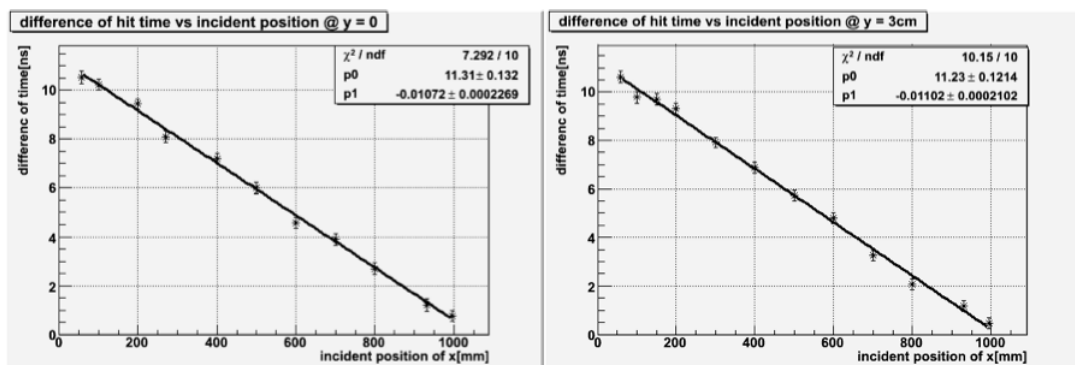


Fig. 6.19 左図が $y=0$ で x 方向に scan した際の時間差、右図が $y=3\text{cm}$ で x 方向に scan した結果。fit 関数は $y = p_0 + p_1 \times x$ 。

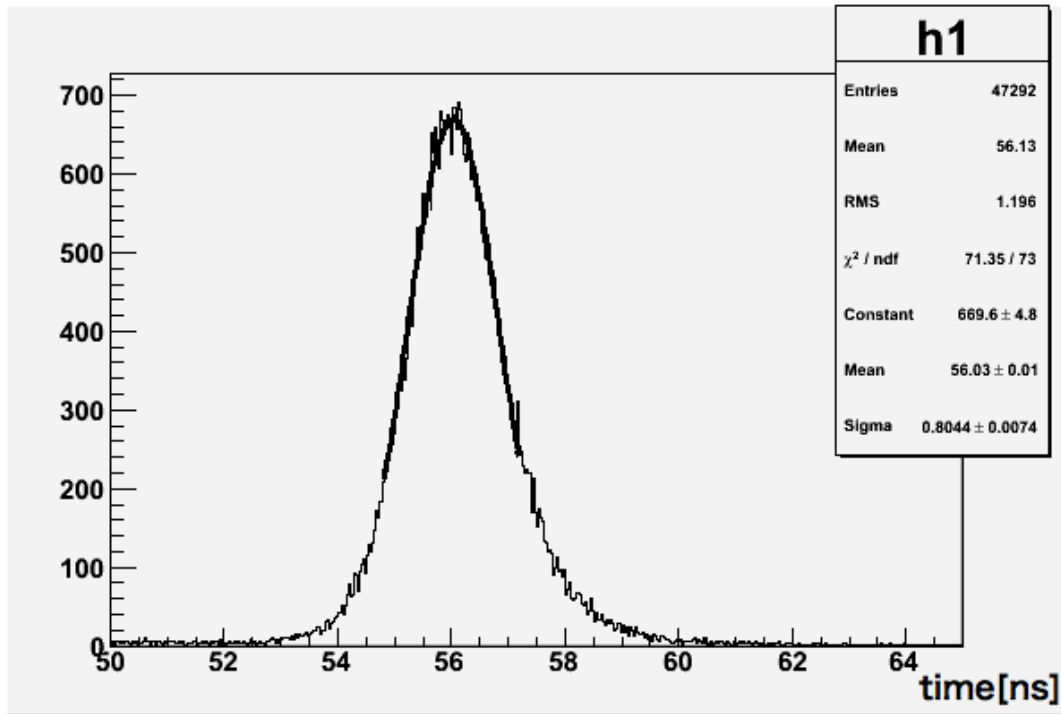


Fig. 6.20 $y=0$, $x=500$ の地点にビームを打ち込んだ際の平均時間の時間分布。

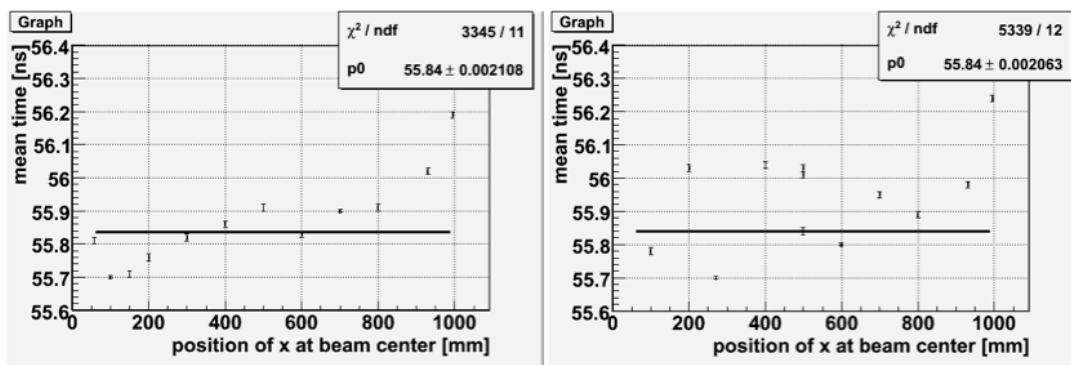


Fig. 6.21 左図が $y=0$ で x 方向に scan した際の平均時間、右図が $y=3\text{cm}$ で x 方向に scan した結果。

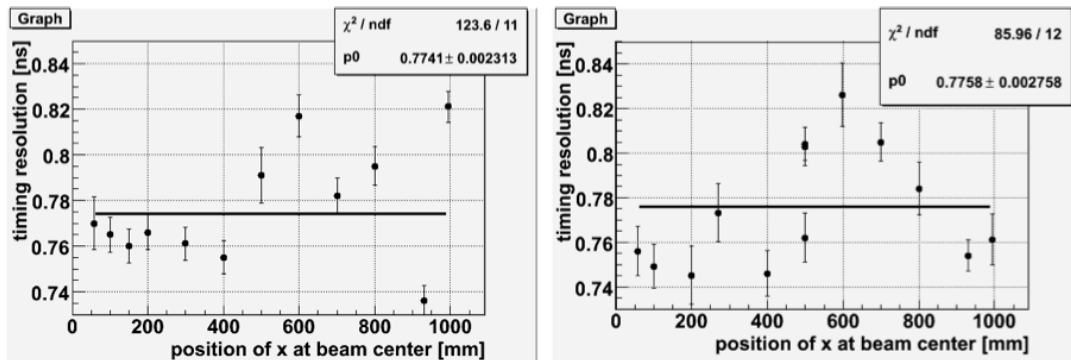


Fig. 6.22 左図が $y=0$ で x 方向に scan した際の平均時間の時間分解能、右図が $y=3\text{cm}$ で x 方向に scan した時の結果。

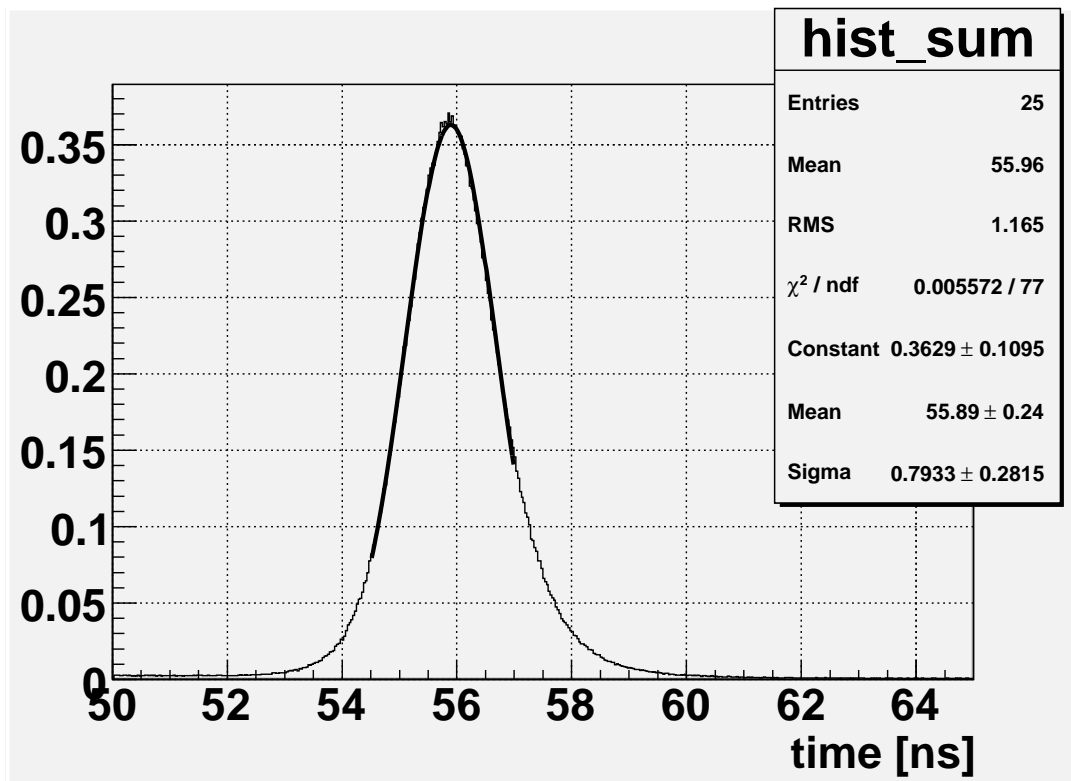


Fig. 6.23 全ての測定における平均時間を足し合わせた分布。

timing window	15.3ns
accidental loss	2.7%

Table. 7.1 時間分解能 0.8ns の場合の timing window と accidental loss のまとめ

7 実機に対するプロトタイプ CV での性能評価

ここでは実機に対する性能評価として

1. 時間分解能の評価
2. 実機における MPPC 起源ノイズによるロス

を行う。まず性能評価テストで求めた時間分解能を用いてこの時実機で必要となる timing window の幅とその時の accidental な hit による loss を見積もる。そして最後に MPPC のダークカウントノイズによる信号のロスを見積もる。

7.1 時間分解能の評価

6 章の性能評価試験の結果から、CV では $\sim 0.8\text{ns}$ の時間分解能を達成できた。この時間分解能での timing window の幅及びその時の accidental loss を表 7.1 にまとめる。

この結果よりプロトタイプでは CV の時間分解能に対する要求を満たし、accidental な hit による accidental loss を十分小さく抑えられることが分かった。

7.2 実機における MPPC 起源ノイズによるロス

第 6 章の性能評価試験では実験中に MPPC のダークカウントノイズも測定した。このノイズによる実機での accidental なロスについての見積もりをする。CV では両読みをしており、常にファイバーの伝播長の間で coincidence hit が存在するかどうか check され、存在する場合はその平均時間を再構成している。そして CsI に 2 つの γ 線が CV に入射するのに同期して timing window が開かれた時にその中に coincidence hit が存在する場合は CsI の信号を veto する。そしてその間に MPPC の信号が入射すると信号を veto する。従って n photo electron に閾値を設定した時のダークカウントノイズによる loss は n photo electron 閾値でのダークカウントノイズを $N_d(n)$ 、timing window の幅を T_w 、ファイバー中の光が 2.5m 伝播する時間を T_f 、CV の全チャンネル数を N_{CV} とすると timing window 内に n photo electron 相当のダークカウントノイズが入る確率は (これを P_1 とする)

$$P_1 = N_d(n) \times T_w \quad (7.1)$$

である。例えば $n=3$ の時、 $N_d(n)$ は 200kHz 程度、timing window の長さは先ほどと同じ 14.6ns とすると $P_1 \simeq 3 \times 10^{-3}$ となる。さらにダークカウントノイズ同士が coincidence する確率は (こ

れを P_2 とする)

$$P_2 = N_d(n) \times T_f \quad (7.2)$$

となる。伝播長の時間は 6 章で求めた値のエラーの 5σ 分の大きさの 24ns^{*21} とすることにした。すると $P_2 \simeq 5 \times 10^{-3}$ となる。 P_1 、 P_2 よりダークカウントノイズによってトリガーがかかる確率は (これを P_3 とする)

$$P_3 = P_1 \times P_2 \quad (7.3)$$

となる。CV のどこか 1 カ所でもトリガーがかかると信号をロスするのでロスする割合は 1 から CV のどこにもトリガーがかからない確率を引いたものになる。

$$loss = 1 - (1 - P_3)^{\frac{N_{CV}}{2}} \quad (7.4)$$

$$\simeq \{(N_d(n) \times T_w) \times (N_d(n) \times T_f)\} \times \frac{N_{CV}}{2} \quad (7.5)$$

となる。ビームテスト時に測定したダークカウントノイズを図 7.1 に示す。ダークカウントノイズはこれらの値の平均値を使用することとする。すると accidental loss は図 7.2 となる。この図からも両読みによる coincidence によってダークカウントノイズのロスが十分小さく抑えられていることがわかる。今回使用した MPPC は生産時に測定されたダークカウントノイズがスペックシート上での典型的な値である、 $\sim 6\text{MHz}$ 程度であった。MPPC のノイズは個体差によりこの値の 2 倍になる事もあるので全体に 4 倍をかけた時に loss が無視できる程度の 2photo electron が 100keV 閾値で達成できればよいことになる。プロトタイプ CV は 100keV 閾値で 3.8photo electron 以上の光量を持つのでこの要求も満たすことができている。

*21 $(11.31+0.132 \times 5) \times 2$

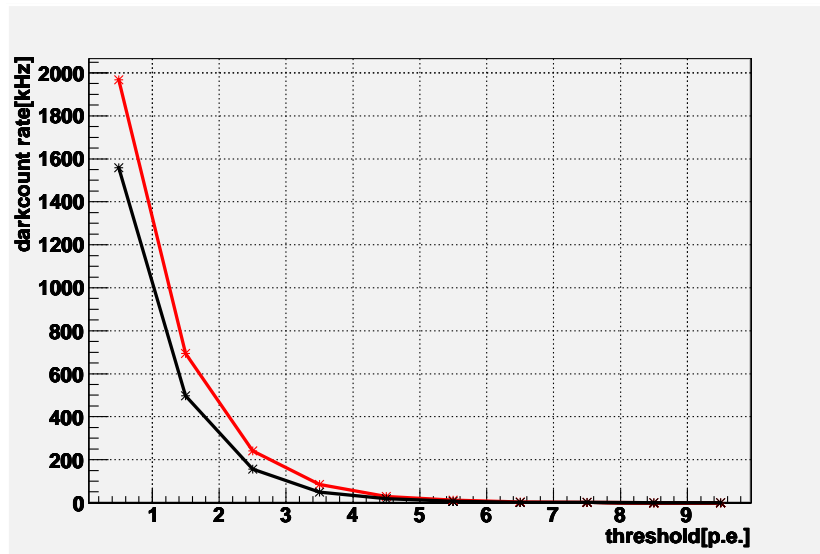


Fig. 7.1 各閾値でのダークカウントノイズレート。赤が上流側から見て左、黒が右の MPPC のダークカウントノイズレートを示す。

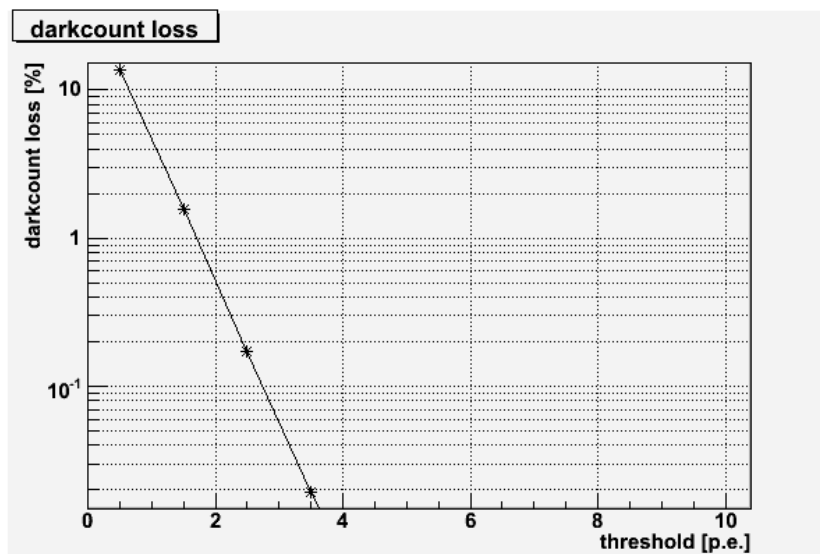


Fig. 7.2 各閾値でのダークカウントノイズレートによる accidental なロス。

8 結論

本研究では $K^O TO$ 実験における CV の開発を行った。第 3 章ではこれまでに研究がなされてきた CV のデザインからシミュレーションを行い、検出器に課される要求を明らかにし、それを満たす読み出しデザインを考案した。具体的には検出器に対して 100keV のエネルギーが検出可能でなければならない、100keV energy deposit で 3photo electron 以上の光量が必要であること、3ns 以下の時間分解能が必要であることが分かった。第 4 章ではこの読み出しデザインの要である MPPC について説明し、我々の実験で使用する MPPC の特性を述べた。第 5 章ではプロトタイプ CV の開発を行った。具体的にはシンチレータ素材の選定、読み出し AMP の開発、MPPC とファイバーの接続方式、ペルチェ素子による冷却システムの開発を行った。そして第 6 章でこのプロトタイプの性能評価を行い、光量はシンチレータの全領域で 3.7photo electron/100keV 以上が得られ、 $K^O TO$ 実験での要求を満たすことが分かった。次に時間分解能だがこれも全領域で ~ 0.8 ns の時間分解能が達成でき、これも要求を満たすことが分かった。さらに第 7 章では CV が 0.8ns の時間分解能を持つ時の accidental な hit とダークカウントノイズによる loss を計算し、どちらも小さく抑えられることがわかった。以上の結果からこのデザインのシンチレータストリップを並べることで $K^O TO$ 実験での要求を満たす CV を作成できることを証明できた。しかしながら本研究の中で明らかになった問題、積み残されている問題も存在する。それは

1. シンチレータの厚み問題
2. ペルチェ冷却システム
3. self kill の見積もり

である。今回使用したシンチレータは平均の厚みが 2.6mm 程度、一番薄い場所では 1mm しか厚みがなかった。ここにファイバーを埋め込む溝を掘ると残りの厚みは 1mm 程度となってしまう、構造的に不安が残る。また厚みが均一でない場合はそれを補正するため一つのシンチレータストリップに対して何カ所もキャリブレーションする必要がある。現在の所この厚みの問題を解決するために

1. 性能が同じで厚みの精度の良い (± 0.38 mm の誤差で制作) 他社のシンチレータの使用
2. フライス加工により平面度を出す

の 2 種類を考えている。特にフライス加工は、CV のようにシンチレータを波長変換ファイバーで読み出す場合にはシンチレータの表面が鏡面加工されていなくとも十分な光量を得られる可能性が

あり、今後研究を進める。次にペルチェ素子の問題に移る。今回のプロトタイプでは大気中からの熱流入の恐れから冷却効率の良いものを選んできた。しかしこのペルチェ素子は発熱量が大きく、本番の実験では使用できない。従ってより小さいペルチェ素子の選定と MPPC 用基板の小型が必要となってくる。最後に self kill の問題について触れる。これは主に CsI に hit した γ 線が作り出すシャワーが上流側に漏れ、Main Barrel および CV で hit を残すことで veto が起こり、信号を loss する事象である。この事象による loss は非常に大きい (30% 程度、CV の寄与は 1/3 程度) とされており、現在の CV のデザインと時間分解能と光量ではどれくらいの割合生じるかを見積もる必要がある。今後はこれらの課題を解決し、2011 年の 10 月にプロトタイプをインストールしてエンジニアリング run を行う。その後翌年 2011 年秋から始まる物理ランでフルインストールを行い、物理データを取得する予定である。

	コリメータ出口での rate [MHz]
中性子	621
γ	72.9
K_L^0	21.5
other particle	1.2

Table. Appendix A.1 コリメータ出口の各粒子の rate。一見中性子や γ が非常に多いように見えるがほとんどの粒子が各検出器の位置でビームホール中に収まっており我々の実験では問題にならない。例えば CsI カリメータの位置では K_L^0 とビームホールの外に存在する中性子 (halo n) との比は 7×10^{-4} と非常に小さいことがわかっている。

Appendix A シミュレーション方法

A.1 TOF シミュレーション

π^\pm の時間分布および π^- のエネルギー分布を求めるため、まず K^0TO 実験の全ての検出器を置き、 $K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ 崩壊事象に対する fast シミュレーションを行った^{*22}。全ての K_L 崩壊には event tag がついており、CV 表面に粒子が入射した event に対しては一度 CV の表面で止める。次にその位置から full シミュレーションを行い、各 event に対して CV での入射粒子の種類と持っている energy、CV での energy deposit と hit 時間及びどのシンチレータストリップに入射したかの位置情報を取り出した。一方で γ 線に対しては CV を全て貫通すると仮定して CV を排除し CV 表面で止めた event をもう一度その場所から振り、CsI に入射させた。これにより各 event で CsI にいくつの γ が入射したかとその入射時間を取り出した。この情報を元にまず CsI に二つの γ が入射した event を集めた。次にその event のうち CV に π^- が入射した event の energy 分布を見積もった。

A.2 accidental rate の見積もり

シミュレーションは K^0TO 実験の全ての検出器群を設置しコリメーターの出口から粒子を撃って行った。ここでの入射粒子はターゲット及びコリメーターシミュレーションを行い、コリメーター出口での粒子の種類やエネルギー及び運動方向の分布を求め、その情報をもとに検出器群に入射させた。この時の各粒子の rate を表 Appendix A.1 に示す。次に CV で 100keV 以上の energy deposit があつた event の数を数え (多重散乱を起こした場合、途中の物質と相互作用して 2 次粒子を生み出す場合、途中で崩壊して複数の粒子になった場合、二つのプレーンを貫通した場合に CV の複数のチャンネルを鳴らしても 1hit として数える)、これを accidental hit 数とした。

^{*22} fast とは粒子が検出器に入射した場合に粒子を検出器表面で止めてしまう。full は全ての反応を含めたシミュレーションであり、検出器に入射した粒子はエネルギーが大きければ検出器を突き抜けて行く。

謝辞

この2年間の研究開発、さらに本論文の執筆にあたって、大変多くの皆様にお世話になりました。

指導教官である笹尾登教授にはこの研究の機会を与えて頂いたことに感謝しています。特にトランジスタを用いたアンプの開発の機会を与えていただき、これによりアナログ回路に対する色々な知識を学べたことに感謝しています。この春からは京都大学から完全に離れ岡山大学に移られますが、これからも普通の weekly meeting 等に参加していただきご指導いただけたらと思います。

今は高エネルギー加速器研究機構におられる野村准教授には、学部生の卒業研究の折から指導していただき、些細な質問から研究全般の進め方など、多くのことを学べたことに感謝しています。特にビームテストの折にベルトが切れた際に「これ巻けばいいじゃん。」と荷造り用のひもで縛られたのが印象に残っています。

日頃直接指導していただいた南條助教には日常的な些細なことから研究に関する問題までこの2年間の研究生活で多くの事を教えていただいたことを感謝しています。特に修士1回生の誕生日に「つらい時はこれを飲めばいいんだよ。」と渡された某栄養剤が印象に残っています。

森井さんには研究中に日常的に起こる様々な問題に対してアドバイスをしていただきありがとうございます。また常日頃、研究生活での愚痴をよく聞いていただき非常に感謝しています。この論文の執筆に際してはご自身も博士論文の執筆があるにも関わらず、熱心にご指導いただき非常に助かりました。

塩見さんにはいつもするどい指摘や質問をしていただき研究を進める上での助けとなりました。増田さんにはアンプの開発の際に色々なアドバイスをいただき、非常にたくさんの事を教えていただきました。また河崎さんにはシミュレーションをする際には色々指導していただき非常に助かりました。さらに臼杵さん、前田君、剛様(?)といった京都 Kaon Group の学生やニュートリノグループのスタッフや学生の皆様には普段からいろいろな面でお世話になりました。ありがとうございました。

プロトタイプ CV の性能評価試験では山形大学の田島准教授、吉田准教授、黒田さん、佐々木さん、高橋君、松田くん、大阪大学の Lee Jong-won さんに手伝っていただきありがとうございました。特に田島さんには毎回のビームテストで色々な物事の調整や大事な大事なご飯の調達、ホテルと研究所の移動などで非常にお世話になりました。また Lee さんにはご自身の研究が忙しいにも関わらず参加していただき、非常に助かりました。さらに防衛大学の松村助教には7月のビームテストやプロトタイプ CV 用のファイバーの手配などで、ご指導ご尽力していただきありがとうございました。

また、月一で集まる JUMMER の会では、他大学のスタッフや学生の皆様、KEK のスタッフの皆様にご貴重な意見を頂きました。本当に感謝しています。

これからは研究者として皆様の力になれるようよりいっそう精進し、 K^O TO 実験の成功に向けて研究を重ねて行こうと思います。最後に、もう一度この2年間の研究生活でお世話になった方々にお礼を申し上げます。本当にありがとうございました。

References

- [1] M.Kobayashi and T.Maskawa, “ CP Violation In The Renormalizable Theory Of Weak Interaction ”, Prog. Theor. Phys. 49, 652 (1973)
- [2] Lincoln Wolfenstein. Parametrization of the kobayashi-maskawa matrix. Phys. Rev. Lett., Vol. 51, No. 21, pp. 1945-1947, Nov (1983)
- [3] A.J.Buras, M.Gorbahn, U.Haisch and U.Nierste, “ The rare decay $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ at the Next-to-Next-to-Leading Order in QCD ”, Phys. Rev. Lett. 95, 261805 (2005)
- [4] T.Inami and C.S.Lim, “ Effects Of Superheavy Quarks And Leptons In Low-Energy Weak Processes $K_L \rightarrow \mu \bar{\mu}$, $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ and $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ ”, Prog. Theor. Phys. 65, 297 (1981). [Erratum-ibid. 65, 1772 (1981)].
- [5] W.J.Marciano and Z.Parsa, “ Rare kaon decays with ‘ missing energy ’ ”, Phys. Rev. D 53, 1 (1996)
- [6] Y. Grossman and Y. Nir, “ $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ Beyond the Standard Model ”, Phys. Rev. B398, 163 (1997)
- [7] arXiv:0911.4789v1 [hep-ex] 25 Nov (2009)
- [8] J. Comfort et al., “ Proposal for $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ Experiment at J-PARC ”, (2006)
- [9] 河崎直樹、修士論文、京都大学 (2009)
- [10] 白杵亨、修士論文、京都大学 (2009)
- [11] 隅田土詞、博士論文、京都大学 (2008)
- [12] 塩見公志、修士論文、京都大学 (2008)
- [13] 谷口七重、修士論文、京都大学 (2005)
- [14] 生出秀行、修士論文、東京大学 (2009)
- [15] 田口誠、修士論文、京都大学 (2006)
- [16] Kikusui PAN-A シリーズ 取扱説明書
- [17] YOKOGAWA デジタルマルチメータ 7561/7562 仕様書
- [18] 永井直樹、修士論文、京都大学 (2009)
- [19] 五味 慎一、修士論文、京都大学 (2008)
- [20] Y. Tajima, J.K. Ahn, Y. Akune, Y. Aruga, M. Doroshenko, Y.B. Hsiung, A. Iijima, Y. Ikemoto, T. Inagaki, S. Ishibashi, N. Ishihara, H. Ishii, M. Itaya, M. Iwai, T. Iwata, S. Kobayashi, S. Komatsu, T.K. Komatsubara, A.S. Kurilin, H.S. Lee, et al ”Barrel photon detector of the KEK $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ experiment” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 592, Issue 3, 21 July 2008, Pages 261-272