

J-PARC KOTO 実験における中性子背景事象削減のための MPPC 読出し用回路の開発

佐藤友太

大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻  
山中卓研究室 博士前期課程 2年

平成 30 年 2 月 14 日

## 概要

J-PARC KOTO 実験の目的は、 $K$  中間子の稀な崩壊  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  を通して標準理論を超える新物理の探索を行うことである。この崩壊の分岐比は、標準理論で予想されている値が  $3 \times 10^{-11}$  と極めて小さいため、KOTO 実験では背景事象の排除が重要な点となっている。

本研究では、KOTO 実験における中性子背景事象を削減するために新しく導入する検出器の、信号読み出し用回路を開発した。まず、CsI 結晶の端面に新しく接着する光半導体検出器から同軸ケーブルを用いてアンプ回路に信号を伝達するまでの回路を設計した。同軸ケーブルとしてはヒロセ電機株式会社の U.FL シリーズを候補として耐性試験を行い、ケーブルの耐性に問題が無いことを確かめた。さらに、MPPC からの信号を処理して差動信号に変換し、ADC へ信号を送るためのアンプ回路を開発した。本研究で開発した新しい検出機構の時間分解能は 28 MeV の信号に対しては  $(1.45 \pm 0.03)$  ns であり、KOTO 実験の感度が  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  を観測できる感度まで達成するための要求を満たしている。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>10</b>
1.1	$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$	10
1.2	KOTO 実験	10
1.2.1	ビームライン	10
1.2.2	$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の検出	12
1.2.3	CsI カロリメーター	14
1.2.4	2013 年のランで見つかった背景事象	14
1.2.5	CsI 結晶の両端からの信号読み出し	16
1.3	両読み機構の全体像	17
1.3.1	CsI 結晶の両読み機構への要求	18
<b>第2章</b>	<b>MPPC からの信号の読み出し</b>	<b>20</b>
2.1	要求	20
2.2	MPPC	20
2.2.1	ガイガーモード APD	20
2.2.2	等価回路	22
2.2.3	MPPC の暗電流	24
2.3	MPPC 間の接続方法の候補	25
2.3.1	直列接続	25
2.3.2	並列接続	26
2.3.3	ハイブリッド接続	27
2.4	各接続方法の評価	27
2.4.1	放射線損傷	27
2.4.2	時間分解能	29
2.4.3	波形のピルアップ	32
2.5	結論	36
2.6	時間分解能に寄与する要素	36
2.6.1	光量による寄与	36
2.6.2	MPPC への印加電圧による寄与	38
<b>第3章</b>	<b>信号読出用ケーブルの選定と耐性試験</b>	<b>39</b>
3.1	ケーブルの選定	39

3.2	ケーブルの耐性試験 . . . . .	40
3.2.1	ケーブルの劣化の再現 . . . . .	40
3.2.2	劣化させたケーブルの試験 . . . . .	44
3.3	結論 . . . . .	47
<b>第4章</b>	<b>信号読み出し用アンプ回路の開発</b>	<b>48</b>
4.1	信号読み出しのために必要な帯域 . . . . .	48
4.1.1	セットアップ . . . . .	48
4.1.2	測定結果 . . . . .	49
4.2	オペアンプの選定 . . . . .	51
4.3	アンプ回路 . . . . .	53
4.3.1	回路の設計 . . . . .	53
4.3.2	サムアンプのゲイン . . . . .	55
4.3.3	テストパルス入力用回路 . . . . .	56
4.3.4	基礎特性の測定 . . . . .	58
4.3.5	S/N . . . . .	60
4.3.6	チャンネル間のクロストーク . . . . .	60
4.3.7	サムアンプとしての線形性 . . . . .	61
4.4	結論 . . . . .	64
<b>第5章</b>	<b>陽電子ビームを用いた両読み機構の性能評価</b>	<b>65</b>
5.1	ビームテストのセットアップ . . . . .	65
5.2	回路の動作確認 . . . . .	67
5.3	時間分解能のエネルギー依存性 . . . . .	68
5.4	課題点 . . . . .	71
5.4.1	テストパルス入力用回路での反射 . . . . .	71
5.4.2	サムアンプの発振 . . . . .	72
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>74</b>
<b>付録</b>		<b>77</b>
A	CP 対称性の破れ . . . . .	77
B	中性 $K$ 中間子 . . . . .	77
C	並列接続の時定数 . . . . .	78
D	同軸ケーブルが絶縁破壊に至るまでの時間を観測する場合の困難 . . . . .	82
E	MPPC からの信号の関数形 . . . . .	83
F	MPPC が検出する光子数 . . . . .	84
G	テストパルスからの波形を見る際の事象選別 . . . . .	86
H	ADC で記録される波形のタイミング . . . . .	86

# 表 目 次

2.1	各接続方法の比較 . . . . .	36
3.1	同軸ケーブルの仕様 . . . . .	39
4.1	一段目のオペアンプの候補の性能 . . . . .	52
4.2	二段目のオペアンプの候補の性能 . . . . .	52

# 目次

1.1	$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ のダイアグラム [1] . . . . .	10
1.2	J-PARC の全体図 [6]。KOTO 実験はこの施設のハドロン実験施設で行っている実験である。 . . . . .	11
1.3	ハドロン実験施設内の $K_L$ ビームライン [7] . . . . .	12
1.4	KOTO 実験の検出器 . . . . .	12
1.5	$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊のシミュレーションで得られた $\pi^0$ の崩壊位置 $Z_{REC}$ と横方向運動量 $P_T$ の分布 (西宮隼人氏によるシミュレーション)。Z の基準は KOTO 検出器の上流の端である。中央の領域 ( $150 \text{ MeV}/c < P_t < 250 \text{ MeV}/c$ , $3000 \text{ mm} < Z_{REC} < 4700 \text{ mm}$ ) をシグナルボックスと定義する。 . . . . .	13
1.6	(左) KOTO 実験で用いている CsI 結晶のイメージ。どちらも長さは 50 cm で、端面の大きさが 5 cm 角と 2.5 cm 角のものがある。(右) CsI カロリーメーターをビーム軸方向から見た図。直径約 2 m の円柱状に結晶が積まれており、ビーム軸に近い場所には 2.5 cm 角の結晶が、遠い場所には 5 cm 角の結晶が配置されている。 . . . . .	14
1.7	2013 年のランの解析結果 [4]。横軸は再構成された $\pi^0$ の崩壊位置 $Z_{REC}$ 、縦軸は横方向運動量 $P_T$ 。中央の領域 ( $150 \text{ MeV}/c < P_t < 250 \text{ MeV}/c$ , $3000 \text{ mm} < Z_{REC} < 4700 \text{ mm}$ ) がシグナルボックスである [4]。 . . . . .	15
1.8	離れた二箇所にある CsI 結晶に中性子がエネルギーを落としてシャワーを作る事象が $2\gamma$ による事象と見分けがつかない場合がある。左が観測したい事象 ( $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ )、右が本研究で着目する背景事象。 . . . . .	16
1.9	CsI 結晶の両端から信号を読み出してシャワー位置を特定し、結晶にエネルギーを落とした粒子が光子と中性子のどちらであったかを弁別する。 . . . . .	17
1.10	5 cm 角と 2.5 cm 角の CsI 結晶どちらについても 5 cm 角の領域に MPPC を 4 つ設置し、まとめて信号を読み出す。 . . . . .	17
1.11	MPPC16 個からの信号を 1 つのアンプ回路に送り、全て足しあげた信号を読み出す。 . . . . .	18
1.12	CsI 両読み機構のうち、本研究では MPPC 側の読み出し回路を開発する。 . . . . .	18

2.1	半導体中の空乏層内に光子が入射して電子-正孔対を生成し（左）、それらがカソードとアノードに向かってドリフトしていく（中央）。逆バイアス電圧が充分高い場合はイオン化が連鎖的に発生し（右）、さらに電圧が高い場合はイオン化によってカソード-アノード間が短絡する。eは電子、hは正孔を表す。 . . . . .	21
2.2	ガイガーモード APD からの出力波形の模式図 . . . . .	22
2.3	本研究で用いる MPPC (S13360-6050CS) [10] . . . . .	23
2.4	MPPC の等価回路 . . . . .	23
2.5	MPPC が放射線損傷を受けると半導体内に格子欠陥が生じ、暗電流が増加する。 . . . . .	24
2.6	直列接続の回路図。以降、回路図中のダイオードは MPPC を表すものとする。 . . . . .	25
2.7	MPPC 単体で読み出した時の時定数は $nC(R/n+R_L)$ である（左）のに対し、MPPC を 4 つ直列に接続した時の時定数は $\frac{nC}{4}(4R/n+R_L)$ となり（右）、時定数は $3R_L/4$ 短くなる。 . . . . .	26
2.8	並列接続の回路図 . . . . .	26
2.9	ハイブリッド接続の回路図。MEG II 実験で用いられている [11]。 . . . . .	27
2.10	100 kW のビームパワーで 3 年間データ取得を行った場合の、放射線損傷のビーム軸からの距離依存性（南條創氏によるシミュレーション）。 . . . . .	28
2.11	初めは 4 つ直列に繋がった MPPC のゲインは揃っているが、放射線損傷がこれらの中で異なると MPPC ごとの I-V 特性に差異が生じ、ゲインが不揃いになる。 $V_{all}$ は 4 つの MPPC 全体に印加する電圧、 $I_d$ は MPPC に流れる暗電流。 . . . . .	29
2.12	宇宙線測定の設定アップ . . . . .	30
2.13	ADC で記録された MPPC からの出力波形の例（左）と PMT からの信号の波高分布（右）。 . . . . .	30
2.14	PMT からの信号の CFTime を MPPC からの信号の CFTime から引いた時間差のヒストグラム。このヒストグラムを正規分布でフィットした結果の標準偏差を時間分解能と定義する。 . . . . .	31
2.15	各接続方法を用いた時の時間分解能の比較 . . . . .	31
2.16	ADC で記録した波形のパイルアップの例 . . . . .	32
2.17	ハイブリッド接続（左）と並列接続（右）について MPPC の出力波形を ADC で記録し、波高で規格化した波形の平均を取り、式 (2.2) でフィットした。 . . . . .	33
2.18	ハイブリッド接続（左）と並列接続（右）についてのテンプレート波形 . . . . .	34

2.19	例として、ハイブリッド接続のテンプレート波形を用いてランダムなタイミングで信号が来た時に基準となる波形の CFTime をシミュレーションした結果の例。基準となる波形の CFTime の真の値は 100.27 ns であるが、直前に大きな波形がある場合は CFTime を早く見積もってしまう。	35
2.20	ハイブリッド接続（黒）と並列接続（赤）についての波形のピルアップ確率	35
2.21	クッキーと CsI 結晶の間に空気の層がある場合（下）と無い場合（上）では CsI 端面での臨界角が異なるため、MPPC に届く光量が異なる。 $\theta_c$ は臨界角、 $n$ は屈折率である。	37
2.22	クッキーと CsI 結晶の間に空気の層がある場合と無い場合での出力電荷の比較（左）と時間分解能の比較（右）。本測定では MPPC 同士の接続方法として直列接続を用いた。	37
2.23	MPPC に 53.9 V、55.0 V、56.9 V を印加して時間分解能を測定した結果。本測定で用いた MPPC のブレークダウン電圧は 50.9 V である。本測定では MPPC 同士の接続方法として並列接続を用いた。	38
3.1	電流測定用回路	41
3.2	電流値のケーブル長依存性	41
3.3	U.FL シリーズのケーブルの絶縁体を流れる電流値の温度依存性	42
3.4	H.FL シリーズのケーブルの絶縁体を流れる電流値の温度依存性	43
3.5	U.FL シリーズの放電開始電圧の気圧依存性。各気圧について複数回測定を行った。	45
3.6	ケーブルの寿命が 3 年間である場合の V-t 特性の傾きよりも 3 年間分劣化させたケーブルについての傾きが緩やかであればケーブルの寿命は 3 年以上である。	46
3.7	（左） $V_0$ を印加した時に絶縁破壊が起こる時間は 1 秒よりも短い、その場合は設計寿命が 3 年以上であることを示すための制約が緩くなるため、この時の放電時間を 1 秒とすれば、より厳しい条件で評価できる。（右）ケーブルの劣化に伴う V-t 特性の変化。3 年分の劣化を与えられたケーブルについて V-t 特性を測定すれば、より厳しい条件で評価できる。	46
4.1	宇宙線測定のセットアップ	49
4.2	MPPC の出力波形（平均化してフィット）	50
4.3	MPPC の出力波形の周波数成分	50
4.4	サムアンプ回路のうち一段目のオペアンプの部分。MPPC4 つからの組 4 組からの電流を足し上げ、一段目のオペアンプのフィードバック抵抗に流して電圧情報への変換を行う。その後、二段目のオペアンプで信号の増幅及び差動信号への変換を行う。	51

4.5	サムアンプの回路図。実際には、一段目のオペアンプ以前の部分と同じものが4つあり、全て一段目のオペアンプの入力端子に接続されている。 . . . . .	54
4.6	RJ45 コネクタ [16] . . . . .	55
4.7	$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ からの $\gamma$ がCsI カロリーメーター中で反応し、ビーム軸に垂直な平面上で10 cm 角の領域に落とすエネルギーのシミュレーション結果。1st cluster は $2\gamma$ のうち落としたエネルギーが大きかった方、2nd cluster は落としたエネルギーが小さかった方についての分布である（南條創氏によるシミュレーション）。 . . . . .	55
4.8	KOTO 実験で用いている個々のCsI 結晶の光量の分布。光量は平均が1になるように規格化されている。各結晶について長手方向に複数点で測定した結果全てについてのヒストグラムであるため、データ数は結晶数よりも多い。 . . . . .	56
4.9	赤く囲った部分がテストパルス入力用回路である。 . . . . .	57
4.10	テストパルスを入力した際のサムアンプの出力波形 . . . . .	57
4.11	サムアンプのテスト基板。大きさは縦170 mm、横110 mm である。 . . . . .	58
4.12	サムアンプの周波数特性。基板一枚に4チャンネル実装しており、図4.11の上から順にch1、ch2、ch3、ch4である。 . . . . .	59
4.13	テンプレート波形をサムアンプに入力した時の出力波形。水色がサムアンプへ入力したテンプレート波形、青と桃色がそれぞれサムアンプから出力された差動信号の片方ずつである。 . . . . .	60
4.14	チャンネル間のクロストーク。青がサムアンプのチャンネル1の出力波形（差動信号のうち片方）、桃色と緑がチャンネル2の出力波形（差動信号のうち片方ずつ）、赤がチャンネル2の出力波形の差動の差をとった波形。 . . . . .	61
4.15	サムアンプの線形性評価のために作製した暗箱。LEDの光を4つに分割し、光ファイバーを通してMPPCまで届ける。各ファイバーの途中に穴の空いた板（左下）を置き、それを上下させることでファイバーごとに光のON/OFFを切り替えられるようにした。 . . . . .	62
4.16	MPPC1チャンネルごとに光を当て、出力波形の高さを測定した。ファイバーの先端とMPPCの間の距離を調整し、各組に届く光量をほぼ同程度に揃えた。 . . . . .	63
4.17	LEDの光を当てるMPPCの組の数を変えた時のサムアンプの出力波高。横軸は各チャンネルについての光量測定で得られた出力電圧を足し上げた値、縦軸は実測値である。 . . . . .	64
5.1	ELPHでのビームテストのセットアップ . . . . .	66
5.2	ビームテストで用いたトリガー用シンチレーターの配置図。上は図5.1のセットアップ、下は5.3節のセットアップにおける位置関係。 . . . . .	66

5.3	サムアンプにテストパルスを入れた際のサムアンプの各チャンネルの出力波形	67
5.4	サムアンプにテストパルスを入力した際の、サムアンプの出力波形の CFTime の分布。MPPC からサムアンプ、サムアンプから ADC までのケーブル長は全て同じだが、ADC 内の処理で数 ns タイミングがずれている。(付録 H)	68
5.5	CsI 結晶を 90° 回転させ、結晶の側面からビームを入射させた時のセットアップ。赤で示した結晶について解析を行った。	69
5.6	結晶側面から見たビーム入射位置。これは宇宙線測定の際のトリガー用プラスチックシンチレーターの位置と対応する。	69
5.7	CsI 結晶の側面に陽電子ビームを当てた時に結晶に落とされるエネルギーの分布(清水信宏氏によるシミュレーション)。左側が 200 MeV のビーム、右側が 800 MeV のビームを入射させた時の結果。	70
5.8	CsI 結晶の側面に陽電子ビームを当てた際の MPPC 側の出力波形(左)とそのエネルギー分布(右)。	71
5.9	CsI 結晶の側面にビームを当て、結晶に落とされる平均のエネルギーを変えた時の時間分解能を測定した。左の図の黒は 28 MeV (宇宙線)、赤は 77 MeV、緑は 155 MeV の平均エネルギーが落とされた時の結果である。	71
5.10	テストパルス入力用回路で反射が起こる仕組み。サムアンプ基板が 1 枚の場合(上)は反射はサムアンプの出力に現れないが、基板が複数枚の場合(下)は反射が出力に現れる。図中の矢印のうち、黒はファンクションジェネレータからテストパルス入力用回路に入力する矩形波、緑はサムアンプへ入力されるテストパルス、赤はインピーダンスの不整合による反射を表す。	72
5.11	銅を片面に積層したガラスエポキシ基板(左)では発振が見られなかったが、両面にパターンを作成し、レジストを追加した基板(右)ではサムアンプの出力が 50 Ω で終端されていない時に発振が見られた。	73
C.1	並列接続から MPPC1 個あたりの部分を取り出した回路。R2 と C2 が MPPC と読出しの 50 Ω を合わせた部分、R1 と C1 が時定数を短くするために加える部分である。	79
C.2	$\tau_+$ を短くするために $R = 1 \Omega$ 、 $C = 10 \text{ pF}$ を選択した場合に読み出される波形の立ち下がりの時間スケールを計算した結果。	80
C.3	速い成分の寄与を大きくするために $R = 2.2 \text{ k}\Omega$ 、 $C = 1 \text{ nF}$ を選択した場合に読み出される波形の立ち下がりの時間スケールを計算した結果。	81

D.1	印加電圧を広い範囲で変えて測定する場合（左）よりも印加電圧を狭い範囲でしか変えられない場合（右）は寿命を決めるためには各測定電圧での誤差を小さくする必要がある。 . . . . .	82
D.2	同軸ケーブル複数本について V-t 特性を同時に測定するためのセットアップ。各ケーブルからの出力をオシロスコープでモニターし続け、放電が起きた場合にオシロスコープのトリガーがかかるようにしておく。トリガーがかかった時のオシロスコープのモニターの情報 は PC 内に保存されるため、後に画像とファイル作成時間を確認することで、放電が起きた時刻とチャンネルを判断する。 . . . . .	83
E.1	MPPC からの出力波形は MPPC のピクセルの時定数と CsI 結晶の発光の時定数が合わさった形となる。 . . . . .	84
F.1	MPPC が検出する光子数を測定するためのセットアップ . . . . .	85
F.2	MPPC が光子 1 個を検出した時の出力波形（左）と、宇宙線が CsI 結晶を貫通して 28 MeV のエネルギーを落とした時の出力波形（右）。 . . . .	85
G.1	テストパルスをサムアンプに入力した際のサムアンプの出力波形の波高分布（左）および CFTime の分布（右）。 . . . . .	86
H.1	ADC 内のダイアグラム . . . . .	87
H.2	ADC 内で各チャンネルのクロックが異なる場合はアナログ信号のうちどの部分をサンプリングするかが異なるため（上、中）、ADC で記録される波形のタイミングがずれる（下）。 . . . . .	87

# 第1章 序論

## 1.1 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

J-PARC KOTO 実験では、中性  $K$  中間子（付録 B）の稀崩壊  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  を通して標準理論を超える物理の探索を行っている。この崩壊の標準理論のダイアグラムを図 1.1 に示す。

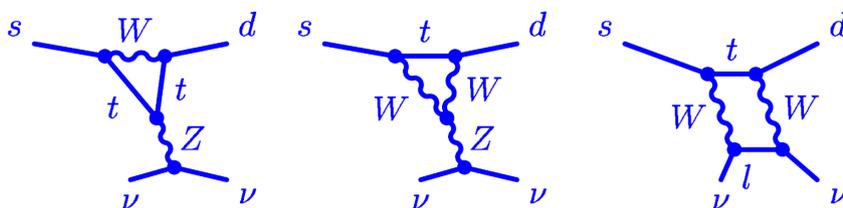


図 1.1:  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  のダイアグラム [1]

この崩壊は CP 対称性（付録 A）を破る崩壊であり、標準理論では分岐比は  $3 \times 10^{-11}$  と予想されている [2]。この分岐比は極めて小さいため未だ観測されておらず、現在実験で求められている分岐比の上限値は、KEK E391a 実験で得られた結果

$$BR(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 2.6 \times 10^{-8} (90\% CL) \quad (1.1)$$

である [3]。

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊はダイアグラムにループを含み、ループ内に新粒子による寄与が入った場合は崩壊の分岐比が標準理論による予想値からずれる可能性がある。この分岐比の標準理論による理論的不確定性は約 10 % であり [2]、実験で理論値からの有意なずれを観測できた場合、それは新粒子による寄与である可能性が高い。

## 1.2 KOTO 実験

### 1.2.1 ビームライン

KOTO 実験は、茨城県東海村にある大強度陽子加速施設 J-PARC 内のハドロン実験施設で行っている実験である。J-PARC では大強度の陽子ビームを利用でき

るため、大量の  $K_L$  を生成出来る。



図 1.2: J-PARC の全体図 [6]。KOTO 実験はこの施設のハドロン実験施設で行っている実験である。

KOTO 実験で用いているビームラインを図 1.3 に示す。シンクロトロンで 30 GeV まで加速された陽子はハドロン実験施設まで導かれ、金の標的 (T1 Target) に当たり様々な粒子を生成する。金の標的から生じた粒子の中の光子の多くは 70 mm 厚の円柱状の鉛 (Photon Absorber) で  $\gamma \rightarrow e^+e^-$  変換によって吸収される。その後、ビームは 2 つのコリメーターで  $9 \mu\text{sr}$  に絞られて KOTO 実験の検出器に到達する。2 つのコリメーターの間には電磁石が置かれており、荷電粒子はこれによって 2 つ目のコリメーターの穴の外へ弾かれる。金の標的から KOTO 実験の検出器までは約 20 m あるため、 $K_S$  等の短寿命の粒子は検出器に届く前にほとんど崩壊する。その結果、検出器まで到達する粒子は  $K_L$ 、Photon Absorber で吸収されなかった光子、ターゲットからの中性子、ビームがコリメーターに当たって生じた中性子 (これはビーム周りに広がるため、以降ビームハローの中性子と呼ぶ) となる。

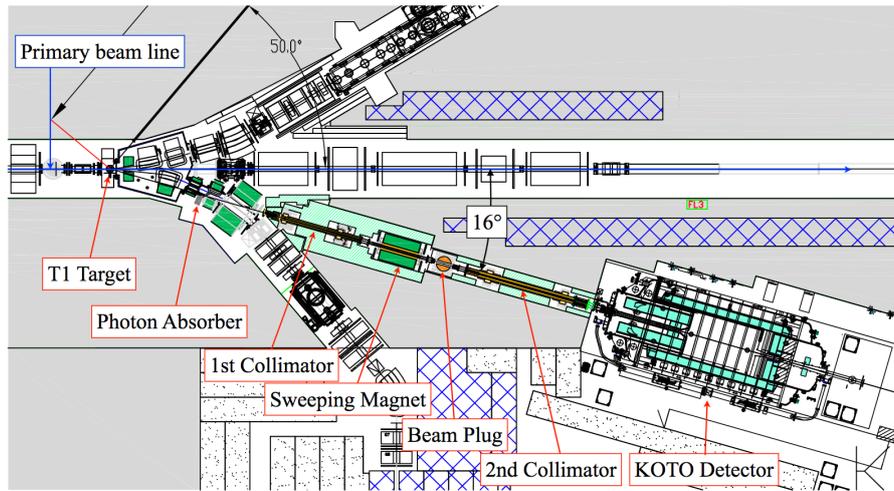


図 1.3: ハドロン実験施設内の  $K_L$  ビームライン [7]

### 1.2.2 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の検出

KOTO 実験の検出器の配置を図 1.4 に示す。ほとんどの検出器は真空中に置かれており、本研究で開発する新しい検出器も真空中に配置される。

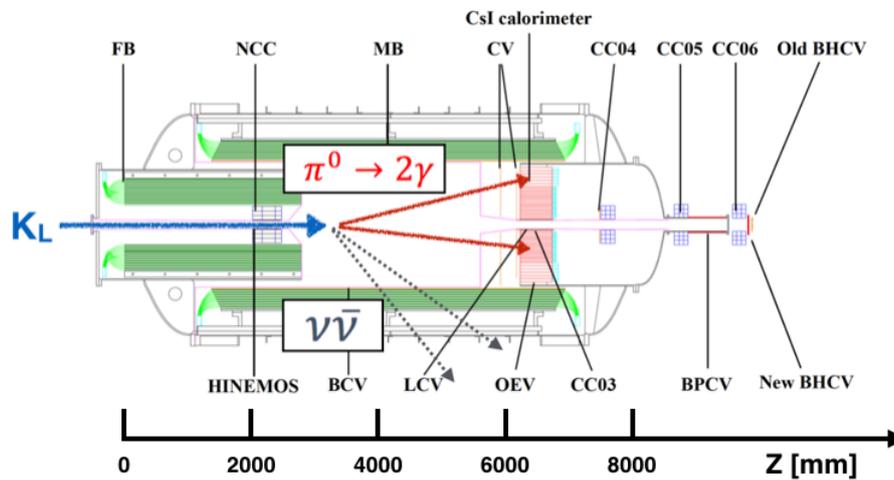


図 1.4: KOTO 実験の検出器

図 1.4 の左側から  $K_L$  が KOTO 実験の検出器に入射する。検出器内で  $K_L$  が崩壊してできた  $\pi^0 \nu \bar{\nu}$  のうち、ニュートリノは検出されずに検出器外に逃げ、残りの  $\pi^0$  が崩壊してできた  $2\gamma$  のうちビーム前方の CsI カロリーメーターにエネルギーを

落としたものが検出される。崩壊で生じたニュートリノがビームに垂直な方向の運動量（以降、横方向運動量と呼ぶ）を持つ場合、 $\pi^0$  も横方向運動量を持つ。

ここで、カロリメーターで検出された  $2\gamma$  から  $\pi^0$  を再構成する方法を説明する。CsIカロリメーターで検出された2つの  $\gamma$  のエネルギーをそれぞれ  $E_1$ 、 $E_2$  とすると、2つの  $\gamma$  の運動量ベクトルがなす角度  $\theta$  は、

$$\cos\theta = 1 - \frac{m_{\pi^0}^2}{2E_1E_2} \quad (1.2)$$

と表される。ここで、 $m_{\pi^0}$  は  $\pi^0$  の静止質量である。 $\pi^0$  は  $K_L$  の崩壊で生じた後すぐに  $2\gamma$  へと崩壊するため、 $\pi^0$  は CsI カロリメーターよりも上流側のビーム軸上で崩壊したと仮定し、 $\pi^0$  の崩壊位置  $Z_{REC}$  を求める。さらに、 $Z_{REC}$  と  $2\gamma$  の運動量ベクトルから  $\pi^0$  の横方向運動量  $P_T$  を求める。検出された粒子が  $2\gamma$  のみであり、かつ  $2\gamma$  から再構成した  $\pi^0$  が  $P_T$  を持つような事象がある場合、その中から  $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$  による事象を選別する。

$K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$  崩壊で生じる  $\pi^0$  の  $Z_{REC}$  と  $P_T$  の分布のシミュレーション結果を図 1.5 に示す。中央の領域 ( $150 \text{ MeV}/c < P_t < 250 \text{ MeV}/c$ ,  $3000 \text{ mm} < Z_{REC} < 4700 \text{ mm}$ ) をシグナルボックスと定義し、この領域内にある  $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$  について探索を行う。

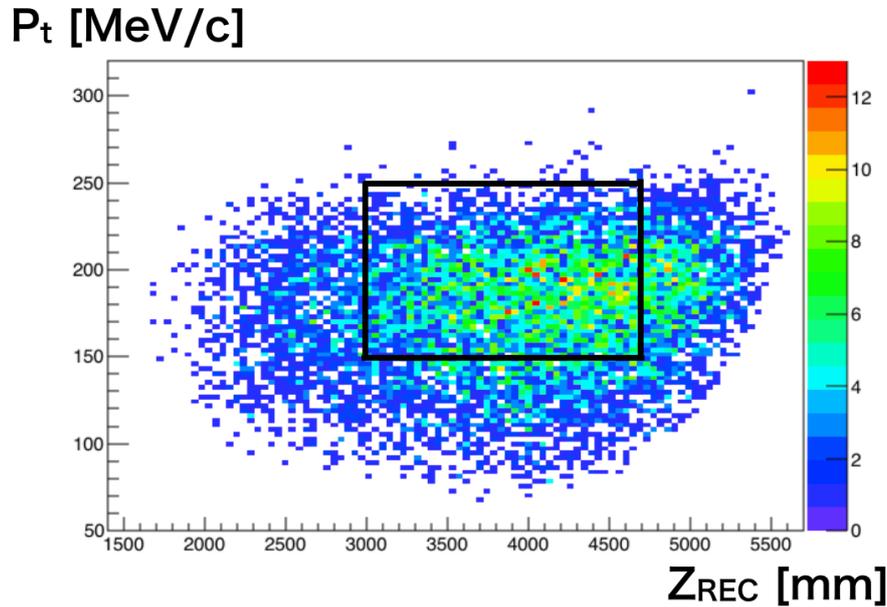


図 1.5:  $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$  崩壊のシミュレーションで得られた  $\pi^0$  の崩壊位置  $Z_{REC}$  と横方向運動量  $P_T$  の分布（西宮隼人氏によるシミュレーション）。 $Z$  の基準は KOTO 検出器の上流の端である。中央の領域 ( $150 \text{ MeV}/c < P_t < 250 \text{ MeV}/c$ ,  $3000 \text{ mm} < Z_{REC} < 4700 \text{ mm}$ ) をシグナルボックスと定義する。

### 1.2.3 CsI カロリメーター

ここでは、KOTO 実験の検出器の中でも本研究に一番関わりのある CsI カロリメーターについて述べる。

KOTO 実験で用いている CsI 結晶の長さは全て 50cm であり、断面の大きさは 2.5cm 角と 5cm 角の二種類のものがある (図 1.6 左)。KOTO 実験の CsI カロリメーター全体は 2.5cm 角の結晶 2240 本と 5cm 角の結晶 476 本から構成され、ビーム軸から見て直径約 2 m の円柱状に積まれている (図 1.6 右)。

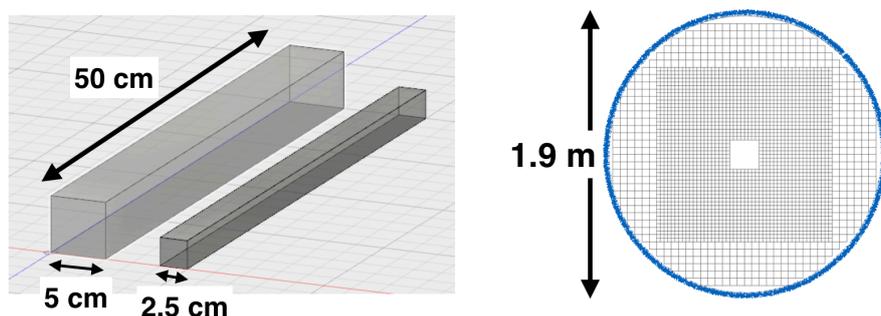


図 1.6: (左) KOTO 実験で用いている CsI 結晶のイメージ。どちらも長さは 50 cm で、端面の大きさが 5 cm 角と 2.5 cm 角のものがある。(右) CsI カロリメーターをビーム軸方向から見た図。直径約 2 m の円柱状に結晶が積まれており、ビーム軸に近い場所には 2.5 cm 角の結晶が、遠い場所には 5 cm 角の結晶が配置されている。

### 1.2.4 2013 年のランで見つかった背景事象

KOTO 実験は 2013 年に物理ランを行い、約 100 時間分のデータを取得した。このランの解析結果を図 1.7 に示す [4]。シグナルボックス内に 1 事象観測されているが、これはビームハローの中性子による事象であると考えられている。図 1.8 右のようにビームハローの中性子が CsI 結晶にエネルギーを落とし、そこからまた中性子が飛び、他の場所にある結晶にエネルギーを落とす。このような事象は、CsI 結晶上で中性子と光子が作るシャワーの形状が異なることから、多くの場合は中性子であると判断できる。しかし、2013 年のランで見つかった 1 事象は  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  からの  $2\gamma$  と区別がつかないものであった。

2013 年のランの時点では、実験感度は  $1.29 \times 10^{-8}$  (S.E.S.<sup>1</sup>) まで達成している [4]。背景事象数を削減すると統計量を多くした場合にも分岐比が小さい崩壊を観測できるようになり、実験感度が向上する。2013 年のランの時点では上で述べたビー

<sup>1</sup>Single Event Sensitivity の略。この値以上の分岐比を持つ崩壊を 1 事象以上観測できる、という感度。

ムハローの中性子による背景事象が支配的であったが、その後導入された新しい解析手法によってこの背景事象を二桁削減することが可能となった [5]。本研究で開発する機構を用いてこの背景事象をさらに一桁削減することにより、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊の標準理論による予測感度に迫り、新物理による寄与を探索できる。

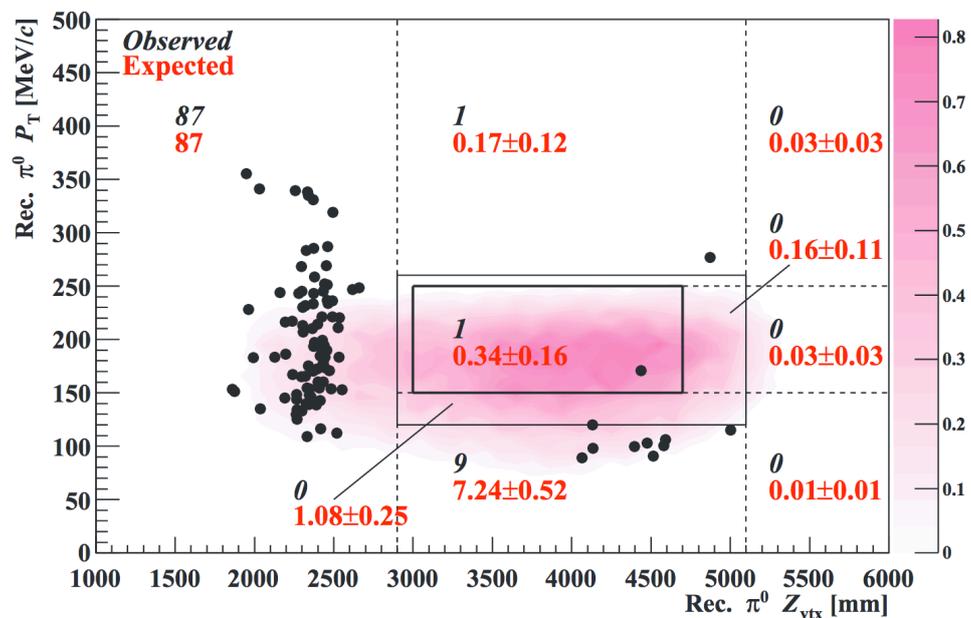


図 1.7: 2013 年のランの解析結果 [4]。横軸は再構成された  $\pi^0$  の崩壊位置  $Z_{REC}$ 、縦軸は横方向運動量  $P_T$ 。中央の領域 ( $150 \text{ MeV}/c < P_t < 250 \text{ MeV}/c$ ,  $3000 \text{ mm} < Z_{REC} < 4700 \text{ mm}$ ) がシグナルボックスである [4]。

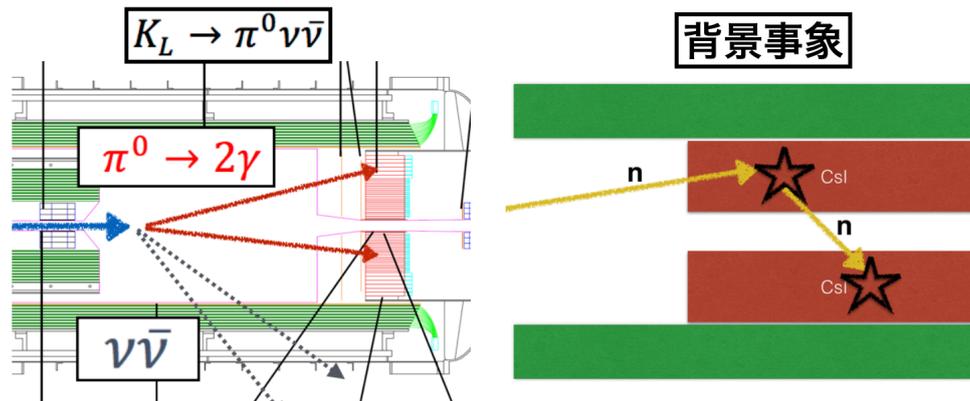


図 1.8: 離れた二箇所にある CsI 結晶に中性子がエネルギーを落としてシャワーを作る事象が  $2\gamma$  による事象と見分けがつかない場合がある。左が観測したい事象 ( $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ )、右が本研究で着目する背景事象。

### 1.2.5 CsI 結晶の両端からの信号読み出し

本研究の目的は、この中性子背景事象を排除するための読み出し機構を開発することである。この機構の概要を図 1.9 に示す。

ここで、中性子背景事象を排除するための方針を述べる。現在は CsI 結晶のビーム下流側に PMT を付けてシンチレーション光の読み出しを行っているが、結晶のビーム上流側の端面にも光検出器を取り付ける。CsI 結晶中のシャワーの深さに応じて、シャワーの位置から両端の検出器にシンチレーション光が届くのにかかる時間が異なる。そのため、CsI 結晶の両端の検出器にシンチレーション光が到達する時間の差を用い、シャワー位置を特定する。ここで、光子は 1.9 cm の放射長に従って CsI 結晶のビーム上流側にシャワーを作り、中性子は 38 cm の相互作用長に従って結晶の全部分にほぼ等確率でシャワーを作る。そのため、シャワー位置が結晶上流部であればエネルギーを落とした粒子が光子である確率が高く、それ以外の場所であれば中性子である確率が高いため、粒子識別が可能となる。新しく結晶上流側の端面に取り付ける光検出器としては半導体光検出器である MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) を用いるが、これについては第二章で詳しく述べる。以降、この新しい検出機構を CsI 結晶の両読み機構と呼ぶ。

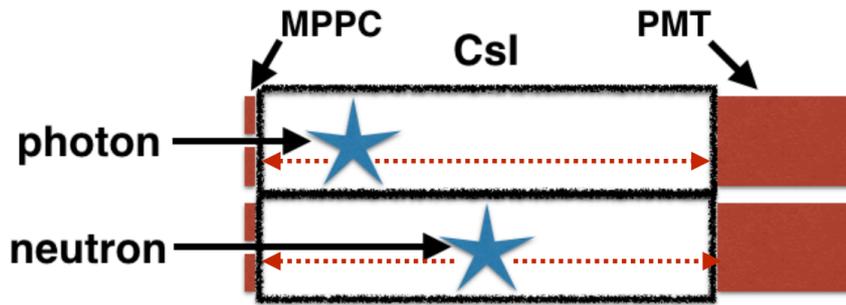


図 1.9: CsI 結晶の両端から信号を読み出してシャワー位置を特定し、結晶にエネルギーを落とした粒子が光子と中性子のどちらであったかを弁別する。

### 1.3 両読み機構の全体像

本研究では、5 cm 角と 2.5 cm 角の CsI 結晶（図 1.6 を参照）のどちらについても図 1.10 に示すように 5 cm 角の領域に MPPC を 4 つ配置する。それらの間を約 40 mm の同軸ケーブルもしくは基板上的パターンで接続してひとまとまりの組にする。その組から同軸ケーブル 1 本を約 3 m 伸ばし、CsI を囲んでいる直径約 2 m のステンレスの円筒の外周に配置されるアンプ基板に信号を送って信号を読み出す。MPPC 4 つをひとまとめにして読み出すことにより、4096 個の MPPC からアンプ基板に伸びるケーブルの本数を 1024 本に抑えることができる。

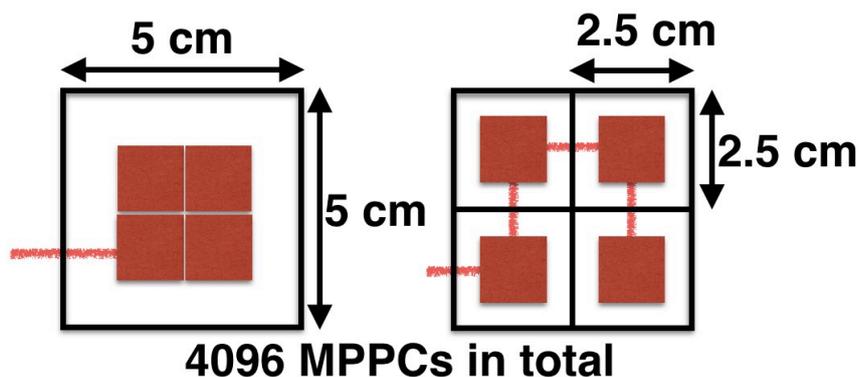


図 1.10: 5 cm 角と 2.5 cm 角の CsI 結晶どちらについても 5 cm 角の領域に MPPC を 4 つ設置し、まとめて信号を読み出す。

さらに、図 1.11 に示すように MPPC 4 つからの信号をひとまとめにしたものを 4 組集め、1 つのアンプ回路に送って信号を足し上げる。このように計 16 個の MPPC を 1 つのアンプ回路で読み出すことにより、1024 組の MPPC からの信号の読み出

しチャンネル数を最終的に 256 ch に抑え、読み出し機構を単純化できる。以降、このアンプ回路をサムアンプと呼ぶ。

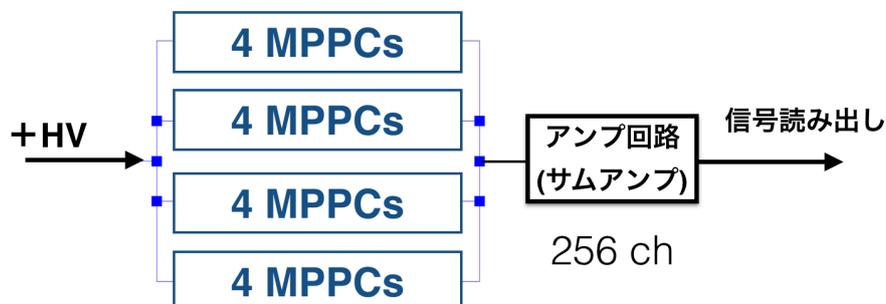


図 1.11: MPPC16 個からの信号を 1 つのアンプ回路に送り、全て足しあげた信号を読み出す。

### 1.3.1 CsI 結晶の両読み機構への要求

本研究の目的は、CsI 結晶の両読み機構のうち、MPPC から同軸ケーブルを用いて信号を読み出し、サムアンプで信号を処理し、波形取得 ADC<sup>2</sup>に信号を送るまでの部分を開発することである。この部分を図 1.12 中に赤で示す。

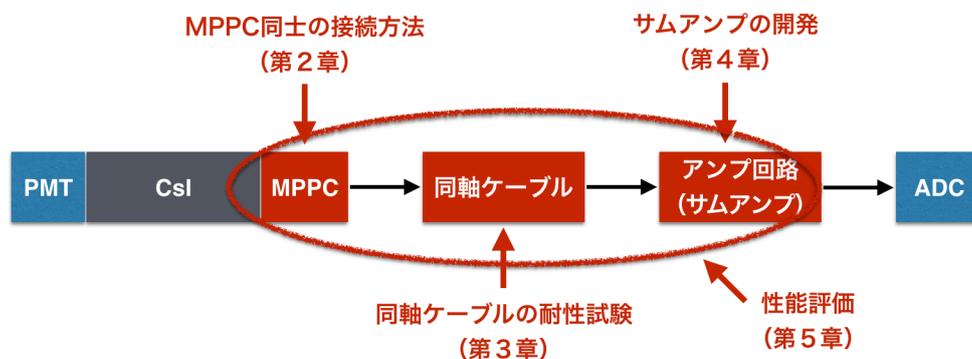


図 1.12: CsI 両読み機構のうち、本研究では MPPC 側の読み出し回路を開発する。

本研究で開発する部分において特に重要な点は以下の通りである。これらの要求の詳細は後の各章の冒頭で述べる。

<sup>2</sup>125 MHz のサンプリングレートで入力信号をデジタル化し、波形を記録する ADC。KOTO 実験のデータ収集システムではこの ADC を用いている。以降、この波形取得 ADC を単に ADC と呼ぶ。

- CsI 中のシャワーの位置を特定し、中性子背景事象を一桁削減できる時間分解能を持つ。
- KOTO 実験で 100 kW のビームパワーで 3 年間データ取得を行う間に、CsI 結晶に当たるビームハローの中性子によって放射線損傷を受けても正常に信号を読み出せる。
- 使用中に信号読み出し用のケーブルが損傷しない。
- MPPC からの信号をサムアンプで読み出して処理し、ADC へ信号を送る。

第 2 章では MPPC からの信号を 1 本の同軸ケーブルで読み出すための回路の設計と性能評価を行う。第 3 章では MPPC からサムアンプまで信号を伝えるために用いる同軸ケーブルの選定と耐性評価を行う。第 4 章では MPPC からの信号を処理し、ADC に信号を送るためのサムアンプを開発する。第 5 章ではこれら全てを統合した CsI 両読み機構の性能を、陽電子ビームを用いて評価する。

## 第2章 MPPCからの信号の読み出し

この章では、CsI両読み機構のうちMPPCを搭載する基板に実装する回路の開発について述べる。MPPCを4つまとめてサムアンプで信号を処理する際の波形を研究するのに先立ち、まずはMPPCの動作原理について説明する。その後、MPPCを4つまとめるための接続方法として3つの候補について性能の比較を行い、どの接続方法を用いるかを決定する。

### 2.1 要求

回路に対する要求は以下の通りである。定量的な議論は各節で行う。

- KOTO実験で100 kWのビームパワーで3年間データ取得を行う間に、CsI結晶に当たるビームハローの中性子によって放射線損傷を受けても正常に信号を読み出せる。
- CsI中のシャワーの位置を特定し、中性子背景事象を一桁削減できる時間分解能を持つ（第4章で開発するサムアンプも含めた回路に対する要求）。
- MPPC4つをまとめて1組とした時、回路の出力信号はCsIからのシンチレーション光を検出するMPPCの組の数に応じた線形性がある。
- 波形のピルアップ確率が低い。

### 2.2 MPPC

#### 2.2.1 ガイガーモードAPD

本研究で用いるMPPCは半導体内のキャリアの雪崩的増幅を用いた光検出器ガイガーモードAPD (Avalanche PhotoDiode) が複数個並列に実装されたものであるため、本節ではまずガイガーモードAPDについて説明する。

半導体のPN接合に逆バイアスを印加すると空乏層ができる。空乏層に半導体部のバンドギャップ以上のエネルギーをもつ光子が入射してエネルギーを落とすと、電子-正孔対が生じる（図2.1左）。電子と正孔は空乏層内の電場によってそれぞれカソードとアノードに向かってドリフトしていく（図2.1中央）。逆バイアス

の電圧が高いほどドリフト速度は速くなり、速度が一定以上になるとキャリアが結晶格子と衝突して電子-正孔対を生成し、イオン化が連鎖的に発生ようになる（図 2.1 右）。このようなイオン化の連鎖反応をアバランシェと呼ぶ。アバランシェによってキャリアが増幅されるため、微弱な光を検出できるようになる。さらに印加電圧を上げていくとアバランシェを起こしているキャリアによってカソード-アノード間が短絡するようになる。この短絡が起き始める印加電圧をブレークダウン電圧と呼ぶ。ガイガーモード APD は、ブレークダウン電圧より高い電圧を印加して使用する。

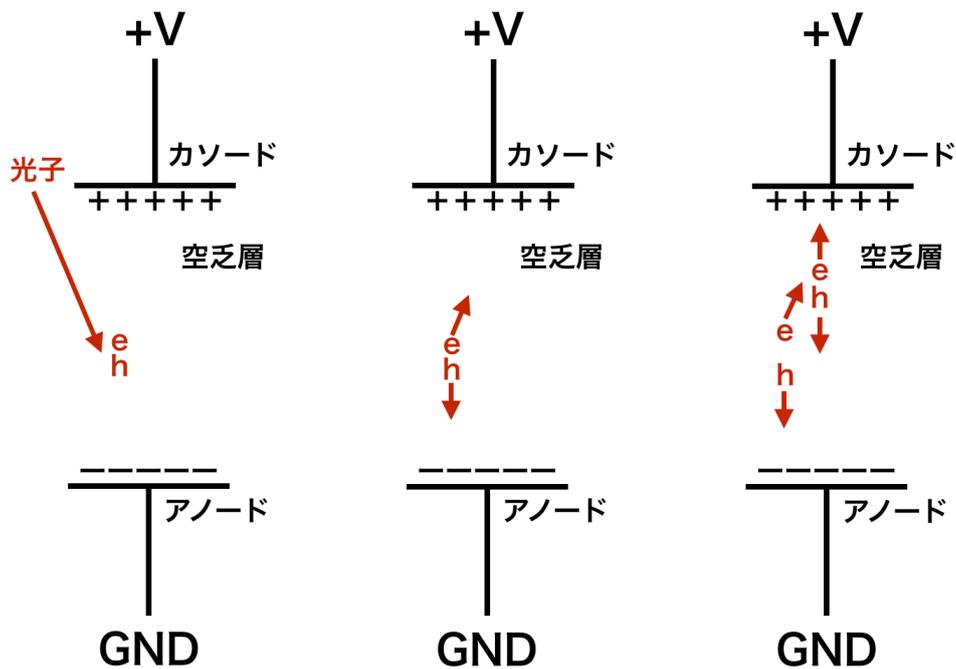


図 2.1: 半導体中の空乏層内に光子が入射して電子-正孔対を生成し（左）、それらがカソードとアノードに向かってドリフトしていく（中央）。逆バイアス電圧が充分高い場合はイオン化が連鎖的に発生し（右）、さらに電圧が高い場合はイオン化によってカソード-アノード間が短絡する。e は電子、h は正孔を表す。

ガイガーモード APD からの信号をオシロスコープ等で観測した時の波形の模式図を図 2.2 に示す。まず、信号の立ち上がりはこのブレークダウンによって生じたキャリアからの寄与であるため急峻である。ガイガーモード APD の半導体部の後段には抵抗（これをクエンチング抵抗と呼ぶ）が半導体プロセスにより形成されている。ブレークダウンによって半導体部から流れ出た電流がクエンチング抵抗を通るとそこで電圧降下が生じ、ガイガーモード APD のカソード-アノード間にかかる電圧が低くなる。カソード-アノード間の電圧がブレークダウン電圧まで下がるとアバランシェによるカソード-アノード間の短絡はなくなり、その後、電源

からカソード-アノード間に電荷が供給される。この充電の際は、ガイガーモード APD の半導体部分はコンデンサのように振る舞うため、充電の時定数はセンサー部を含めた読み出し回路全体の時定数で決まる。また、ブレークダウン時に放出される電荷量  $Q$  は、半導体部の静電容量  $C$  と、印加電圧とブレークダウン電圧の差  $\Delta V$  を用いて  $Q = C\Delta V$  と表される。そのため、1つのピクセルが光子を検出した時の出力電荷量はブレークダウン電圧からどのくらい高い電圧を印加するかによって決まり、ガイガーモード APD 全体からの出力電荷量は光子を検出したピクセル数に比例する。以降、 $\Delta V$  をオーバー電圧と呼び、 $V_{over}$  と表す。

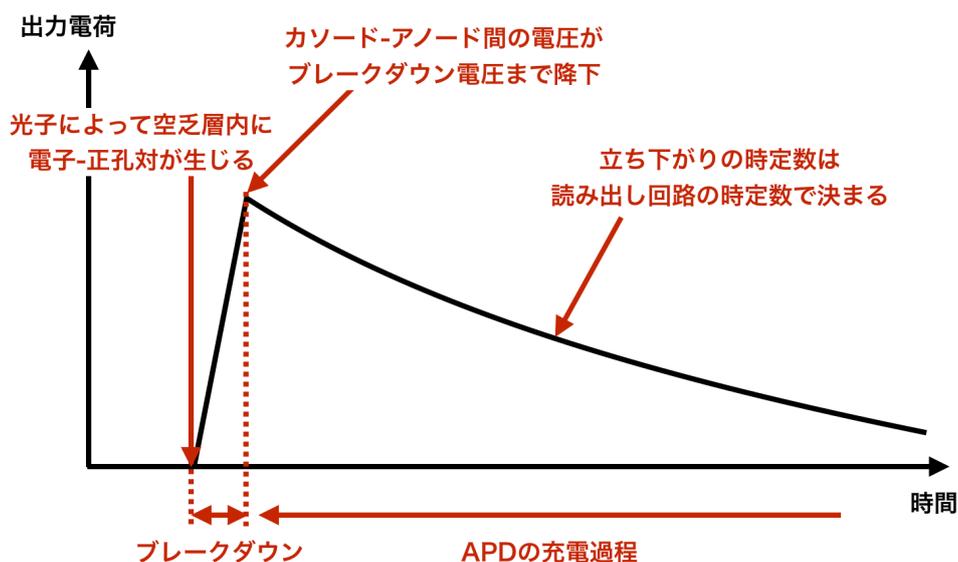


図 2.2: ガイガーモード APD からの出力波形の模式図

### 2.2.2 等価回路

MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) とは浜松ホトニクス株式会社の製品であり、ガイガーモード APD を複数個並列に実装した半導体光検出器である。本研究で用いる MPPC は受光面サイズが 6 mm 角、ピクセル数 (ガイガーモード APD の数) が 14400、ピクセルピッチが 50  $\mu\text{m}$  の製品 S13360-6050CS である (図 2.3)。本研究では特に断りがない限り、MPPC にはブレークダウン電圧から 3 V 高い電圧を印加して使用する。この場合のゲインは約  $1.7 \times 10^6$  である [9]。



図 2.3: 本研究で用いる MPPC (S13360-6050CS) [10]

MPPC の等価回路を図 2.4 に示す。図 2.4 左に示すように、ピクセルごとにセンサー部  $C$  とクエンチング抵抗  $R$  からなり、それらが並列に接続されている。そのため、全体としての等価回路は図 2.4 右に示す回路で表される。回路定数は  $C = 89$  fF、 $R \sim 100$  k $\Omega$ 、 $n$  はピクセル数 14400 である。

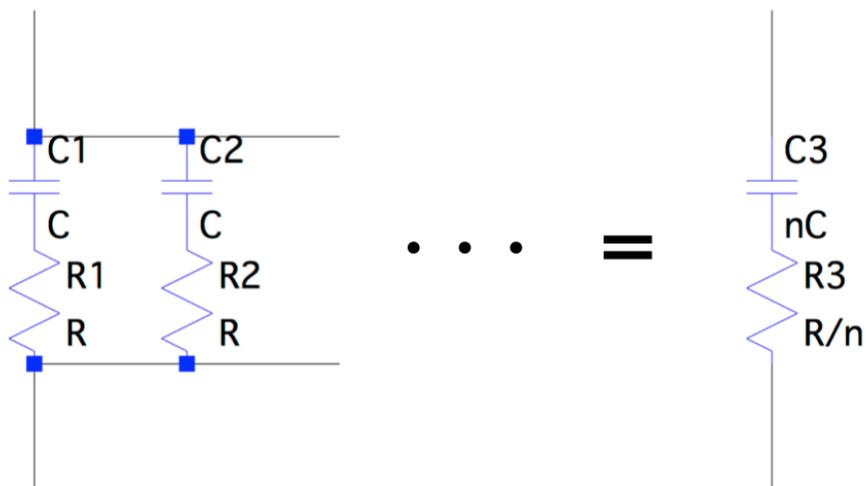


図 2.4: MPPC の等価回路

この回路からの信号を  $50 \Omega$  受けて読み出すと、回路定数から計算される時定数  $\tau$  は式 (2.1) より  $73$  ns となる。MPPC の各ピクセルのクエンチング抵抗は約  $100$  k $\Omega$  であり、約  $10^4$  個のピクセルが並列に接続されていることから、 $R_3 \sim 10 \Omega$  であるため、読み出しの抵抗値  $50 \Omega$  は出力信号の時定数に大きく影響する。

$$\begin{aligned}
\tau &= C3(R3 + 50) \\
&= nC(R/n + 50) \\
&= 14400 \times 89 \text{ fF} \times (100 \text{ k}\Omega/14400 + 50 \text{ }\Omega)
\end{aligned}
\tag{2.1}$$

### 2.2.3 MPPCの暗電流

MPPCの等価回路は図2.4に示した通りであるため、各ピクセルが理想的なコンデンサである場合、MPPCに光が当たっていない時は電流が流れない。しかし、実際は各ピクセルは半導体であるため、空乏層内で熱励起による電子-正孔対が生じる。MPPCにブレークダウン電圧以上の逆バイアス電圧を印加した状態下でこの電子-正孔対が生じるとそれらが種となってブレークダウンを引き起こし、1つのピクセルに光が入った場合と同じ信号を出す。本研究で用いたMPPCではこの熱励起によるブレークダウンが約2 MHzで起こっているため[9]、MPPCに光が当たっていない状態でも回路全体としては常に電流が流れている。以降、この電流を暗電流と呼ぶ。

MPPCが放射線損傷を受けると半導体内に格子欠陥が生じ、この格子欠陥によるエネルギー準位を介した電子-正孔対の生成確率が増え、暗電流が増加する。そのため、MPPCのI-V特性は図2.5に示す通りに変化する。

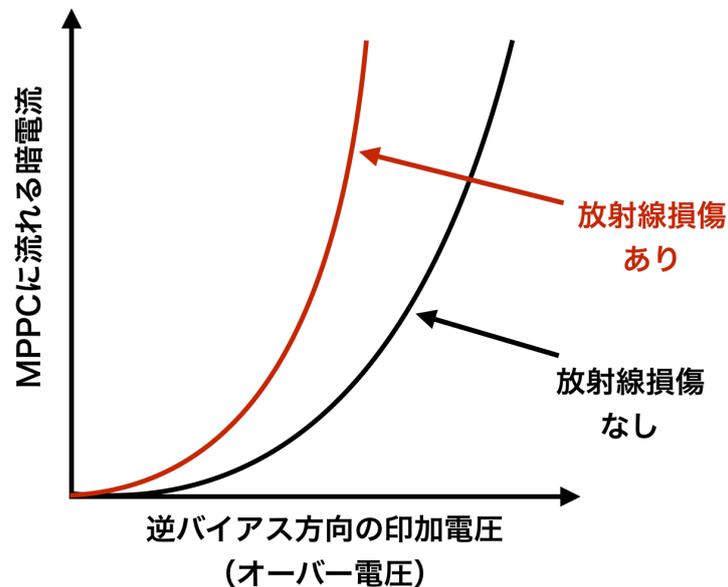


図 2.5: MPPCが放射線損傷を受けると半導体内に格子欠陥が生じ、暗電流が増加する。

## 2.3 MPPC間の接続方法の候補

MPPC4つをまとめて一本の信号線で読み出す方法の候補として直列接続、並列接続、ハイブリッド接続の三種類（それぞれの詳細については後述）を検討した。この節ではそれぞれの候補について比較し、両読み機構で用いる読み出し方法を決定する。

### 2.3.1 直列接続

直列接続の回路図を図2.6に示す。これは後に述べるハイブリッド接続と同様にMEG II実験で用いられている接続方法である[11]。この回路では暗電流は全てのMPPCで共有しているため、I-V特性から各MPPCにかかる電圧が一意に定まる。そのため、4つひとまとまりにするMPPCのI-V特性を揃えれば個々のMPPCのゲインが揃う。直列接続ではMPPCにかける電圧は4つのMPPCの動作電圧の和、約220 Vをかける必要がある。この場合、図2.7に示すように、MPPC単体で読み出すよりも信号の時定数が短くなる。 $R_L$ を読み出しの抵抗値50  $\Omega$ とすると、MPPC単体で読み出した時の時定数は $nC(R/n + R_L) = 73$  nsであるのに対し、MPPCを4つ直列に接続した時の時定数は $\frac{nC}{4}(4R/n + R_L) = 35$  nsとなり、時定数は $3R_L/4 = 38$  ns短くなる。

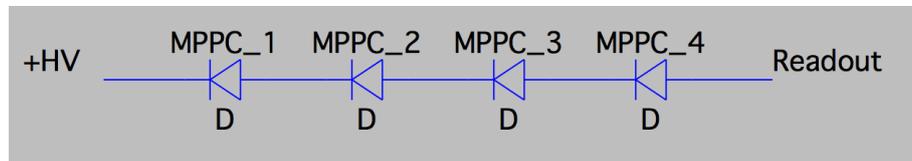


図 2.6: 直列接続の回路図。以降、回路図中のダイオードはMPPCを表すものとする。

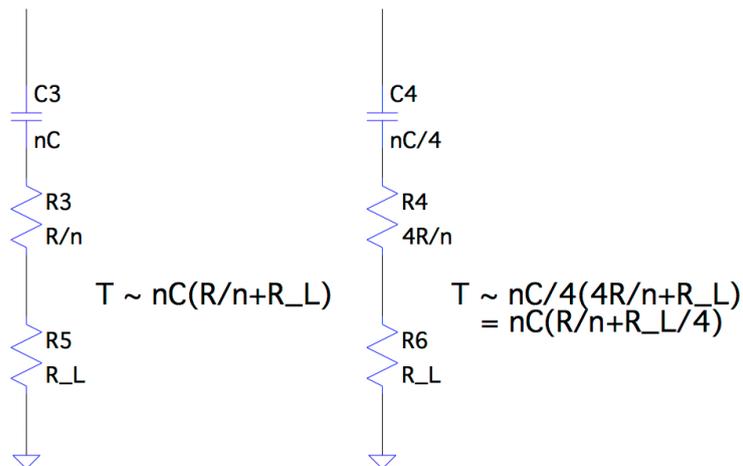


図 2.7: MPPC 単体で読み出した時の時定数は  $nC(R/n + R_L)$  である (左) のに対し、MPPC を 4 つ直列に接続した時の時定数は  $\frac{nC}{4}(4R/n + R_L)$  となり (右)、時定数は  $3R_L/4$  短くなる。

### 2.3.2 並列接続

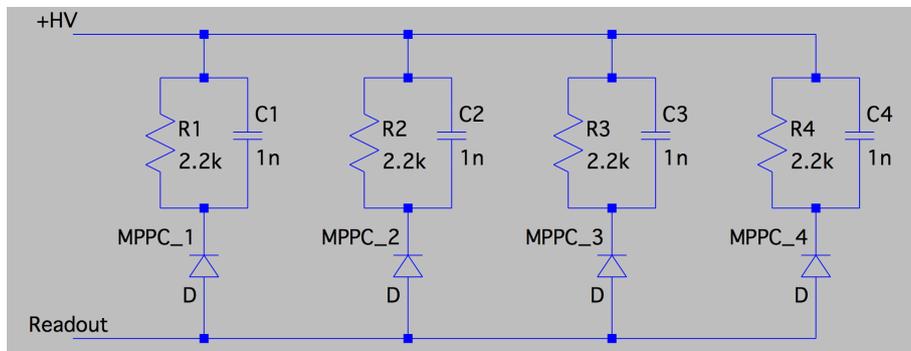


図 2.8: 並列接続の回路図

並列接続の回路図を図 2.8 に示す。これは我々が開発した接続方法であり、MPPC を単純に並列接続するのではなく R と C を加えて時定数を短くしている (付録 C)。MPPC が光を検出した時の信号は高い周波数成分を持ち、電流はコンデンサを流れる。このときはコンデンサと MPPC の静電容量の合成が MPPC のみの場合よりも小さくなるため、MPPC のみを並列に接続した場合よりも時定数が短くなる。R1 から R4 は電源から MPPC に電荷を充電するための経路を確保するために用いた。

### 2.3.3 ハイブリッド接続

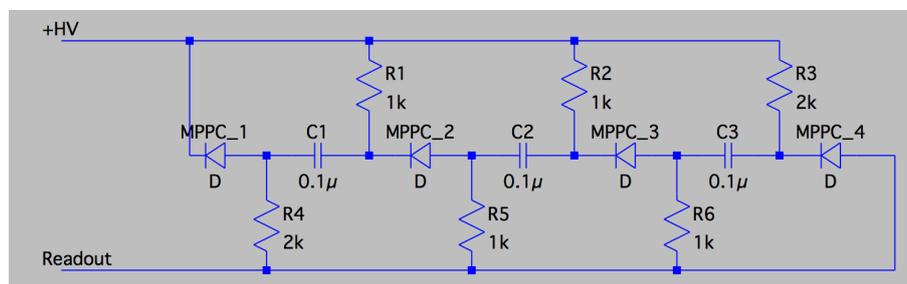


図 2.9: ハイブリッド接続の回路図。MEG II 実験で用いられている [11]。

ハイブリッド接続 [11] の回路図を図 2.9 に示す。この接続方法も MEG II 実験で用いられている方法であり、両読み機構で用いる接続方法の候補として検討した。この回路は低周波成分に対しては C1, C2, C3 のインピーダンスが R1 から R6 のそれに比べて高いため、MPPC の暗電流のような直流成分は 4 つの MPPC に対して並列に流れる。高周波成分に対しては R1 から R6 までのインピーダンスが C1 から C3 のそれに対して高いため、MPPC が光子を検出した時に流れる信号は 4 つの MPPC に対して直列に流れる。そのため、直列接続と同様に出力信号の時定数は MPPC 単体の回路よりも短くなり、かつ MPPC にかける電圧は 60 V 以下 (MPPC 単体の場合とほぼ同じ値) に抑えられる。

## 2.4 各接続方法の評価

### 2.4.1 放射線損傷

MPPC は KOTO 実験での使用中に放射線損傷を受ける。現在想定している、100 kW のビームパワーで 3 年間データ取得を行った場合に CsI 結晶のビーム上流側の端面に当たる放射線量を図 2.10 に示す。放射線量は最大で  $1 \times 10^9 n_{eq}/cm^2$  程度<sup>1</sup>であり、その量はビーム軸からの距離に応じて異なる。

<sup>1</sup>KOTO 実験では数百 MeV の中性子が寄与するが、1 MeV の中性子による損傷に換算した中性子の個数が  $n_{eq}$  である。

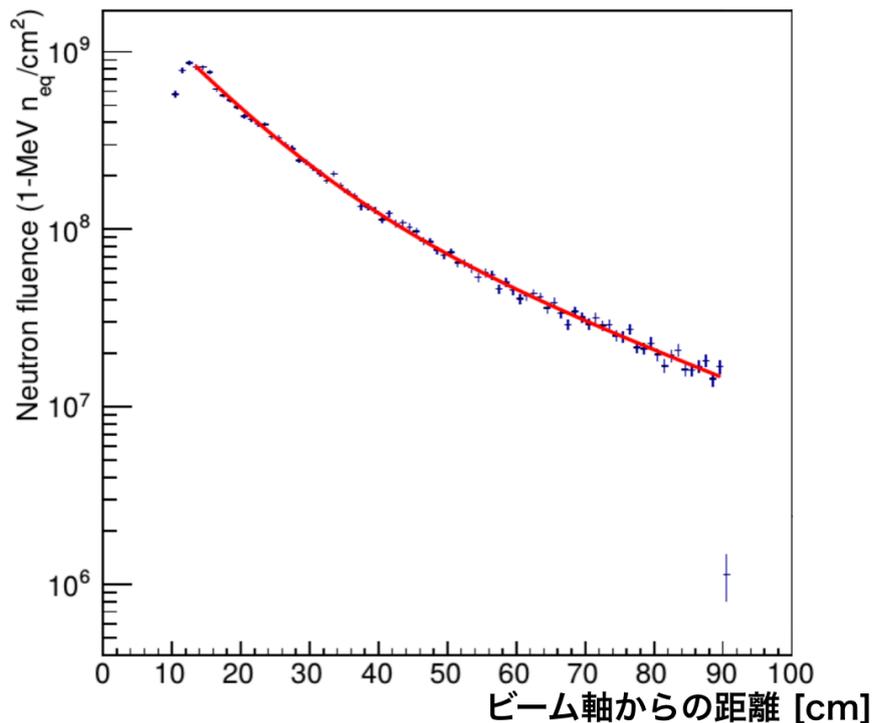


図 2.10: 100 kW のビームパワーで3年間データ取得を行った場合の、放射線損傷のビーム軸からの距離依存性（南條創氏によるシミュレーション）。

放射線損傷が4つ繋がっている MPPC の間で異なると、4つの MPPC の I-V 特性が不揃いになる。例として図 2.11 のように特定の MPPC (No.2) のみが放射線損傷により I-V 特性が変化した場合を考える。直列接続では4つ繋がった MPPC は全て同じ大きさの暗電流を共有しているため、4つの MPPC 全体に印加する電圧を固定すると、I-V 特性により個々の MPPC に印加される電圧は一意に定まる。インストール時に I-V 特性の揃った MPPC を4つ直列に繋がれば、個々の MPPC にかかる電圧をコントロールでき、全ての MPPC に同じゲインを持たせることができる。しかし、MPPC No.2 が他よりも大きな放射線損傷を受けると、この MPPC は半導体内の格子欠陥を介したキャリアによる暗電流が他の MPPC よりも多くなる。4つの MPPC を流れる電流が共通であることから MPPC No.2 にかかる電圧が下がる。4つの MPPC にかかる電圧の合計は MPPC No.2 が放射線損傷を受ける前と変わらないため、MPPC No.2 にかかる電圧が下がった分、他の MPPC にかかる電圧が上がり、その分暗電流も増え、ある状態に落ち着く。そのため、個々の MPPC にかかる電圧は不揃いになり、MPPC ごとのゲインに差異が生じる。

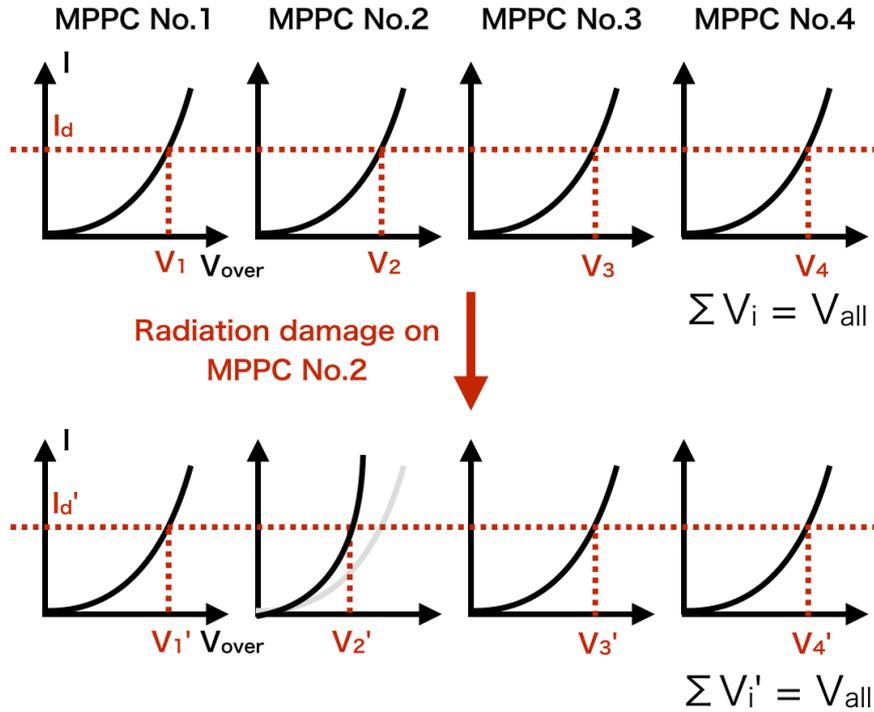


図 2.11: 初めは4つ直列に繋がった MPPC のゲインは揃っているが、放射線損傷がこれらの中で異なると MPPC ごとの I-V 特性に差異が生じ、ゲインが揃いなくなる。 $V_{all}$  は4つの MPPC 全体に印加する電圧、 $I_d$  は MPPC に流れる暗電流。

これによって、4つ直列に繋いでいる MPPC の中でのゲインはビーム軸付近では 10 % 以上の差異が生じるため、直列接続は今回の CsI の両読みには採用しないことに決定した。以降、並列接続とハイブリッド接続について比較を行う。

## 2.4.2 時間分解能

CsI の両読み機構によって中性子背景事象を一桁削減するためには、時間分解能が 1.7 ns 以下であればよい [8]。この節では、各接続方法を用いて時間分解能を測定した結果を述べ、この要求を満たすかを確認する。

時間分解能の測定は宇宙線を用いて行った。宇宙線測定のセットアップは図 2.12 の通りである。アンプとしては本研究で開発した回路を用いた。このアンプ回路の詳細は 4 章で述べる。

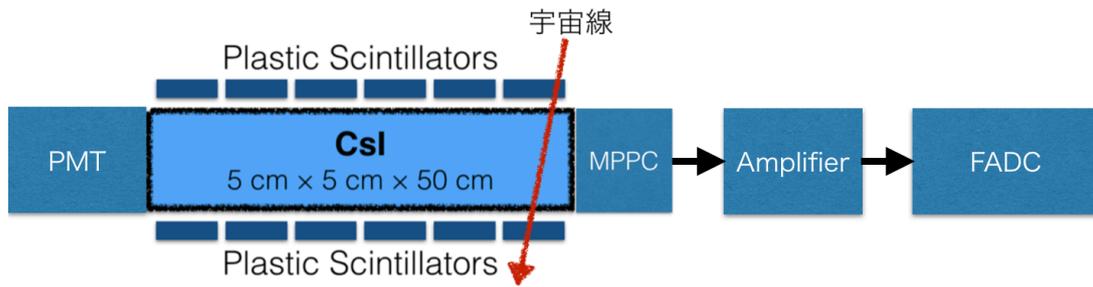


図 2.12: 宇宙線測定の設定アップ

図 2.12 で CsI の上下にある 6 組のトリガーシンチレータのうち一組に宇宙線が通った事象についてトリガーを作り、CsI の長手方向の両端に接続された PMT と MPPC からの出力波形を ADC で記録した。PMT としては受光面の直径が 34 mm の R5330[12] を使い、PMT と CsI 結晶は 5 mm 厚のシリコンクッキー、MPPC と CsI 結晶は 1 mm 厚のシリコンクッキーで接続した。MPPC からの出力波形を ADC で記録した例を図 2.13 左に、PMT からの信号の波高の分布を図 2.13 右に示す。ADC に入った波形はベッセルフィルターで処理され、正規分布と重畳された形で記録される。本研究では、波形の頂点を二次関数でフィットし、信号の高さがフィット結果の頂点の高さの半分となった時刻を信号が到達した時刻であると定義する。以降、この時刻を CFTime (Constant Fraction Time) と呼ぶ。

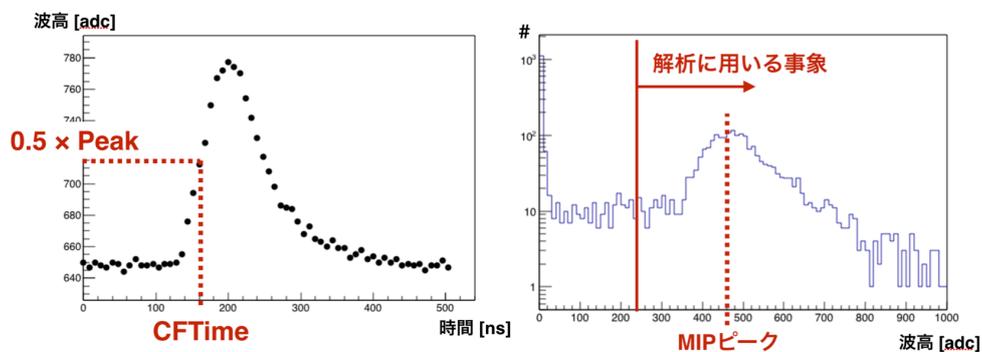


図 2.13: ADC で記録された MPPC からの出力波形の例 (左) と PMT からの信号の波高分布 (右)。

PMT からの信号の高さが MIP ピークの半分以上である事象のみを選別し、以降の解析に用いる。MPPC と PMT からの信号の CFTime の差のヒストグラムの例を図 2.14 に示す。このヒストグラムを正規分布でフィットした結果の標準偏差を時間分解能と定義する。

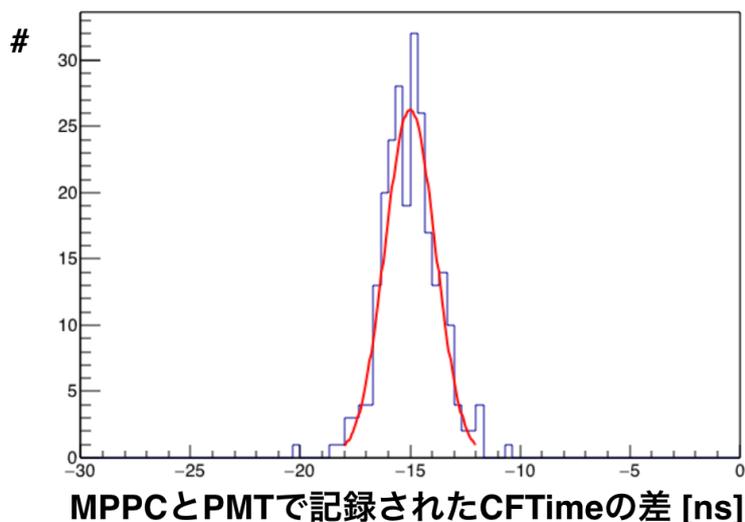


図 2.14: PMT からの信号の CFTime を MPPC からの信号の CFTime から引いた時間差のヒストグラム。このヒストグラムを正規分布でフィットした結果の標準偏差を時間分解能と定義する。

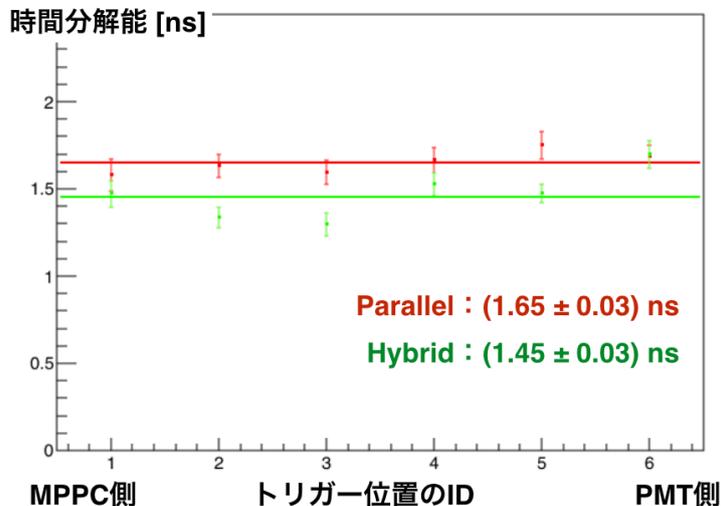


図 2.15: 各接続方法を用いた時の時間分解能の比較

各接続方法について時間分解能を測定した結果を図 2.15 に示す。縦軸は時間分解能、横軸は CsI 結晶中の宇宙線が貫通した位置で、左側が結晶のうち MPPC を取り付けた端面である。結晶のうち 6 点を宇宙線が通った事象について測定し、それらを定数でフィットした結果を各接続方法における時間分解能であるとする。並

列接続、ハイブリッド接続ともに時間分解能に対する要求は満たしているが、ハイブリッド接続の方が並列接続よりも時間分解能が良いため、中性子背景事象の削減能力が高いことが見込まれる。

### 2.4.3 波形のピルアップ

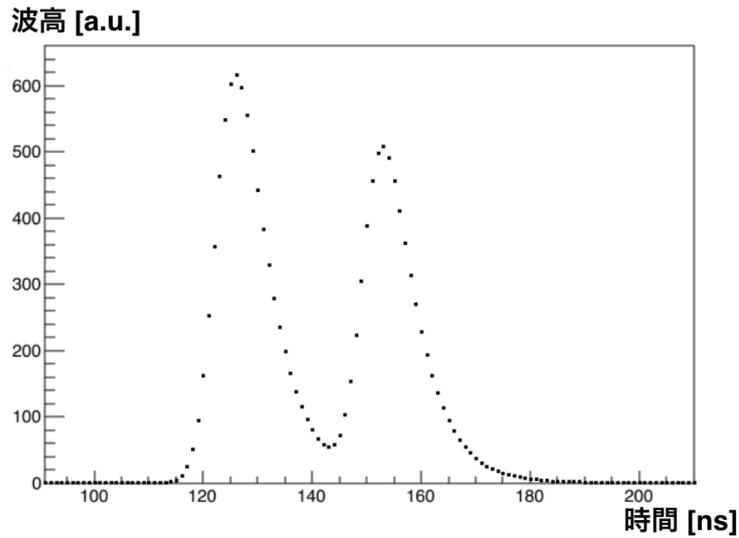


図 2.16: ADC で記録した波形のピルアップの例

2つの信号がほぼ同時刻にサムアンプから出力された事象の例を図 2.16 に示す。この場合、2つ目の信号の立ち上がりは前の波形と重なっているため実際の波高よりも高い方にシフトし、CFTime を見誤る。そのため、本節では KOTO 実験の検出器に CsI 結晶の両読み機構をインストールした場合に波形がピルアップする確率を見積もる。まず宇宙線測定で得られた波形からテンプレート波形を作成し、それがランダムな時刻に検出された際に波形のピルアップによってどの程度 CFTime を見誤るかをシミュレーションした。

#### 2.4.3.1 テンプレート波形の作成

まず、波形のピルアップのシミュレーションに用いるテンプレート波形を作成した。

5 cm 角の CsI 結晶の両端に PMT と MPPC を付け、CsI 結晶を宇宙線が貫通した事象について MPPC 側の信号を読み出した。用いたセットアップは図 2.12 と同様である。MPPC 側の ADC で記録された波形を規格化し、その平均を式 (2.2) でフィットした結果を図 2.17 に示す。宇宙線測定において MPPC から出力される信

号は CsI の発光の時定数と MPPC 内の回路による時定数に依存するため、指数関数の差の形で表される（付録 E）。また、ADC 内では信号はベッセルフィルターによって正規分布で鈍らされるため、ADC で記録される波形の関数形は指数関数と正規分布を重畳した式 (2.2) となる。

$$V(t) = A + C \left\{ \exp \left( -\frac{t - t_0 - \frac{\sigma^2}{2\tau_1}}{\tau_1} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{t - t_0 - \frac{\sigma^2}{\tau_1}}{\sqrt{2}\sigma} \right) - \exp \left( -\frac{t - t_0 - \frac{\sigma^2}{2\tau_2}}{\tau_2} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{t - t_0 - \frac{\sigma^2}{\tau_2}}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right\} \quad (2.2)$$

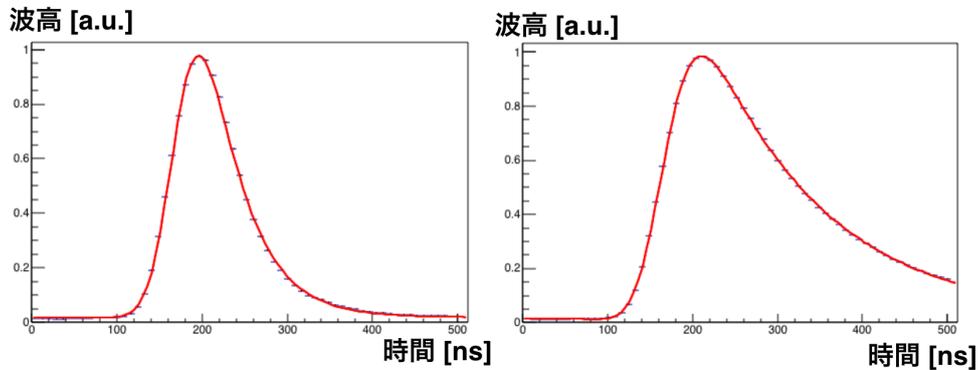


図 2.17: ハイブリッド接続（左）と並列接続（右）について MPPC の出力波形を ADC で記録し、波高で規格化した波形の平均を取り、式 (2.2) でフィットした。

図 2.17 より、ハイブリッド接続よりも並列接続の方が回路の時定数は長い。CsI の時定数は両方の接続方法で共通であるため、この差は回路の時定数の差から生じている。図 2.17 では ADC のウィンドウ内の約 100 ns の点から波形が立ち上がっており、ハイブリッド接続はウィンドウ内の残りの 400 ns でほぼ波形が立ち下がりきっているのに対し、並列接続では 400 ns 経過した後も波形の頂点に対して 90% 程度しか立ち下がっていない。そのため、波形がパイルアップする確率は並列接続のほうが高いと推測できる。ADC の 512 ns のウィンドウ内では、特に並列接続については波形の立ち下がり部分が途切れているため、どちらの接続方法についてもフィット結果を ADC のウィンドウの 2 倍まで外挿したものをテンプレート波形とする。これを図 2.18 に示す。

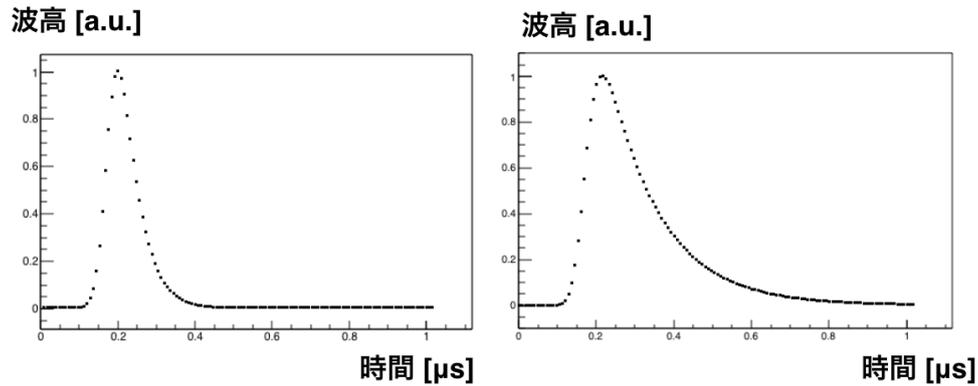


図 2.18: ハイブリッド接続（左）と並列接続（右）についてのテンプレート波形

#### 2.4.3.2 波形のパイルアップのシミュレーション

基準となるテンプレート波形をある決まった時刻に配置し、その波形の周りのランダムな時刻に別の波形を配置した。基準となる波形の周りに配置する波形の高さとレートは、実際に KOTO 実験で  $K_L$  が検出器に入ってきているランで得られたデータのうち、CsI カロリーメーターに落とされたエネルギーの分布と信号のレートをを用いて作成した。このデータには、 $K_L \rightarrow 3\pi^0$ 、 $K_L \rightarrow 2\pi^0$ 、 $K_L \rightarrow 2\gamma$  崩壊等の偶発的事象が含まれている。このデータを取得した際のビームパワーは 42 kW であったが、両読み機構のインストール後にビームパワーが上がることを考慮し、信号のレートは 100 kW 相当の値に変換してシミュレーションを行った。また、 $\mu$  の貫通事象と  $\gamma$  のシャワーによる事象とで MPPC から出力される波形が同じであることを仮定した。このようにして波形のパイルアップをシミュレーションし、基準となる波形について CFTIME を計算した結果の例を図 2.19 に示す。

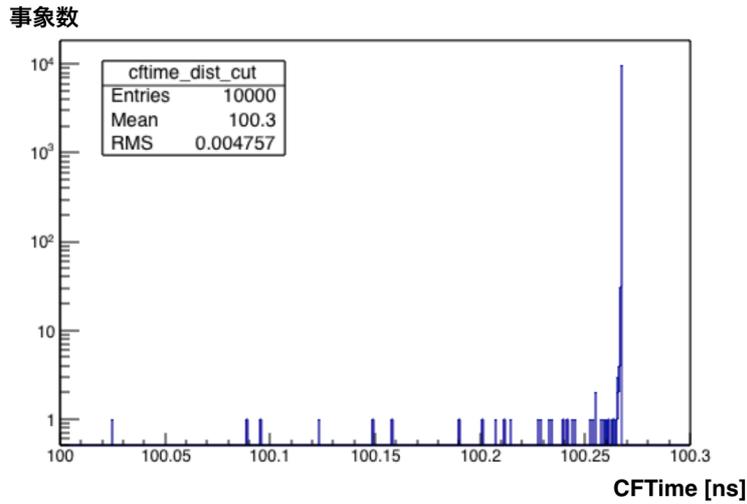


図 2.19: 例として、ハイブリッド接続のテンプレート波形を用いてランダムなタイミングで信号が来た時に基準となる波形の CFTIME をシミュレーションした結果の例。基準となる波形の CFTIME の真の値は 100.27 ns であるが、直前に大きな波形がある場合は CFTIME を早く見積もってしまう。

CFTIME の真の値からの差異が 1 ns より大きい事象を、パイルアップした事象と定義する。基準となる波形のエネルギーを変えた時のパイルアップ確率をハイブリッド接続と並列接続について求めた結果を図 2.20 に示す。

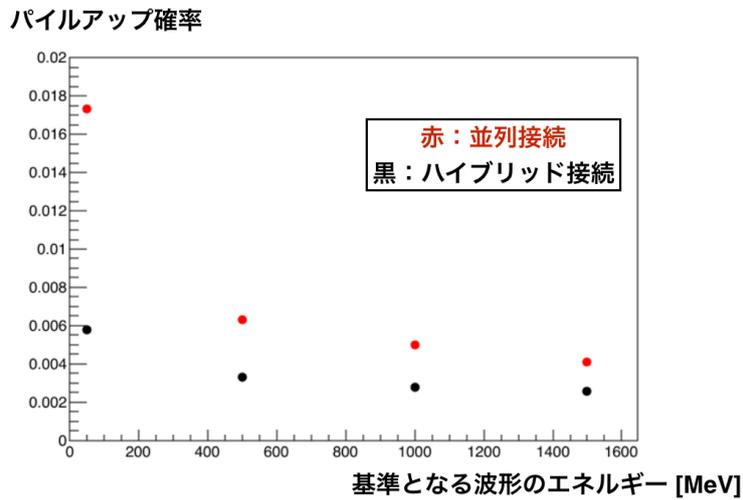


図 2.20: ハイブリッド接続（黒）と並列接続（赤）についての波形のパイルアップ確率

低エネルギーの事象ほど直前に来る波形の立ち下がり部分によって CFTIME を

見誤りやすい。本研究で着目しているエネルギーの最小値 50 MeV の事象についてもパイルアップ確率はハイブリッド接続については 0.58 %、並列接続については 1.7 %であり、ハイブリッド接続のほうが並列接続よりも時定数が短い分パイルアップしにくい。

## 2.5 結論

直列接続とハイブリッド接続と並列接続を比較した結果を表 2.1 に示す。この結果から、CsI 結晶の両読み機構では、今回比較した 3 つの項目全てにおいて他よりも優れているハイブリッド接続を採用する。

表 2.1: 各接続方法の比較

項目	直列接続	ハイブリッド接続	並列接続
放射線損傷によるゲイン変動がない	×	○	○
パイルアップ確率が低い	—	○	△
時間分解能が良い	—	○	△

## 2.6 時間分解能に寄与する要素

本研究では MPPC からの信号の時間を CFTime で定義しているため、時間分解能は波形の立ち上がりの部分のゆらぎに依存する。本節では、時間分解能への寄与があると考えられる要因について考察する。

### 2.6.1 光量による寄与

MPPC が検出する光子の数が多くなるほど統計的なゆらぎは小さくなるため、出力波形の高さのゆらぎは小さくなる。そのため、光量が多くなるほど時間分解能は良くなると推測し、これを確かめるための実験を行った。

本研究では、CsI 結晶と MPPC の間には柔らかいシリコンクッキーを挟むことによって空気の層が入ることを防いでいる。空気、クッキー、CsI の屈折率はそれぞれ 1.0、1.4、1.7 であり、このクッキーは空気と比べて屈折率が CsI と近い値をとる。そのため、CsI と MPPC の間に空気がある時はクッキーのみのときに比べて CsI 端面で全反射を起こすための臨界角が小さくなり、MPPC まで届く光量が少なくなる (図 2.21)。

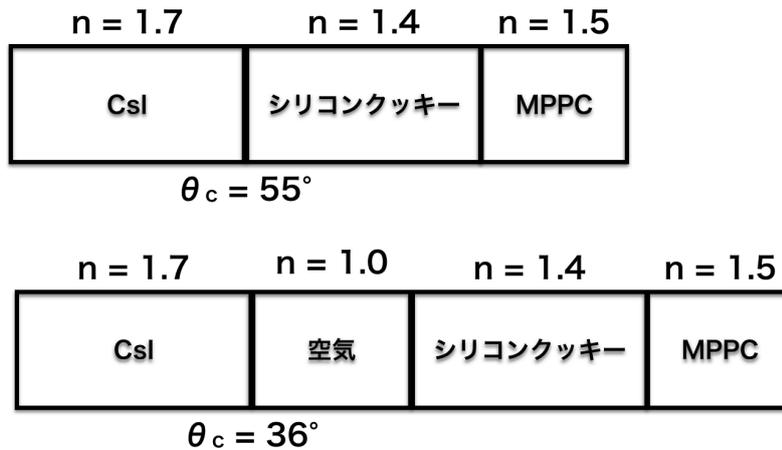


図 2.21: クッキーと CsI 結晶の間に空気の層がある場合（下）と無い場合（上）では CsI 端面での臨界角が異なるため、MPPC に届く光量が異なる。 $\theta_c$  は臨界角、 $n$  は屈折率である。

そこで、クッキーと CsI 結晶の間に約 1 mm の空気の層がある場合と無い場合で時間分解能を比較した。図 2.12 と同様のセットアップを組み、宇宙線測定で時間分解能を求めた結果を図 2.22 に示す。図 2.22 左に示すように、クッキーと CsI の間に空気の層があると MPPC が検出する光量は約 0.6 倍に減少した。それぞれの測定について MIP ピークの半分以上の電荷量があった事象を用いて時間分解能を求めた。空気の層がある場合の時間分解能は無い場合に比べて 0.26 ns 悪くなっていることから、光量は時間分解能に寄与していると判断できる。

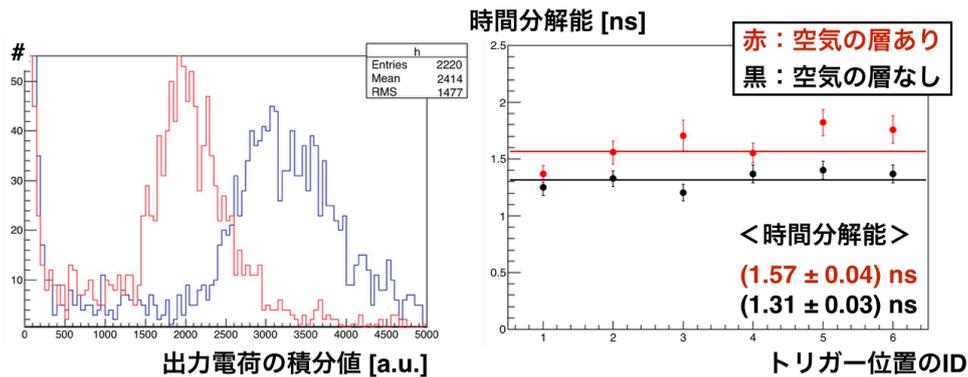


図 2.22: クッキーと CsI 結晶の間に空気の層がある場合と無い場合での出力電荷の比較（左）と時間分解能の比較（右）。本測定では MPPC 同士の接続方法として直列接続を用いた。

## 2.6.2 MPPC への印加電圧による寄与

MPPC への印加電圧を変えるとゲインが高くなりノイズによる波形のゆらぎは小さくなるため、時間分解能が良くなるはずである。そこで、図 2.12 と同様のセットアップで印加電圧を変え、時間分解能の変化を測定した。その結果を図 2.23 に示す。MPPC のゲインを上げると S/N は向上し、時間分解能は良くなる。しかし MPPC に印加する電圧を変えると、ゲインが上がるだけでなくピクセル間でのクロストークの増加、光子の検出効率の向上等様々な変化が起こるため、この測定によって純粋に S/N だけによる時間分解能への寄与を議論することは出来ないが、通常の動作電圧よりも高い電圧を印加することにより時間分解能が良くなる事はこの結果から推測できる。

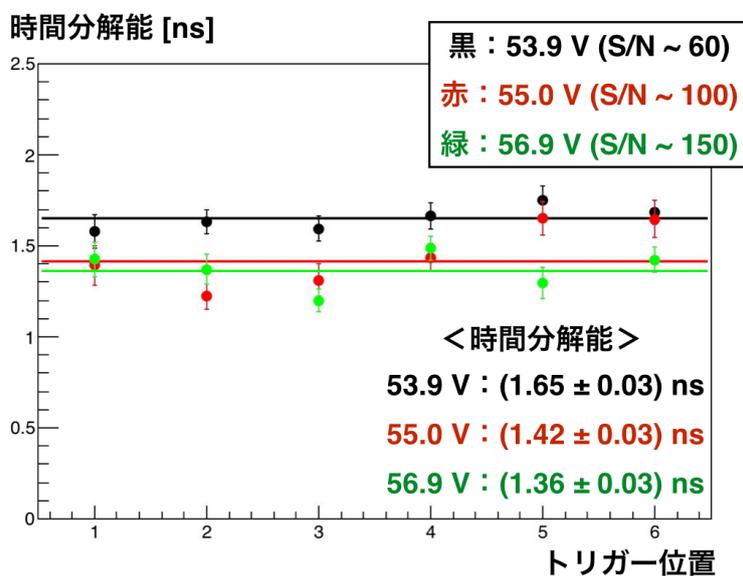


図 2.23: MPPC に 53.9 V、55.0 V、56.9 V を印加して時間分解能を測定した結果。本測定で用いた MPPC のブレークダウン電圧は 50.9 V である。本測定では MPPC 同士の接続方法として並列接続を用いた。

## 第3章 信号読出用ケーブルの選定と耐性試験

この章では、MPPCからの信号をアンプ基板まで送るためのケーブルの選定とその耐性試験について述べる。第2章でMPPC同士の接続方法はハイブリッド接続に決定したため、ケーブルに印加する電圧は60 V以下である。しかし、同軸ケーブルの耐性試験を行った段階ではケーブルに約220 Vの電圧を印加する直列接続を採用する可能性があったため、この章では最大250 Vでの使用が問題とならないかの評価を行う。

### 3.1 ケーブルの選定

今回用いるケーブルは、信号をMPPCからアンプ基板まで約3 mの距離を伝えるため、ノイズに強い必要がある。また、このケーブルはCsI結晶のビーム上流側を通るため、物質量はできるだけ少ない必要がある。

これらの条件から、ヒロセ電機株式会社から販売されている同軸ケーブルであるU.FLシリーズ(U.FL-2LP-068N3T)とH.FLシリーズ(H.FL-2LP(A)-FH5B-A)を候補として選んだ。それぞれの仕様を表3.1に示す。U.FLシリーズのほうが直径が小さく物質量が少ないが、200 Vの耐圧は直列接続で想定している電圧よりも低い。そのため、U.FLシリーズについて耐性試験を行い、これが使用に耐えられないと判断した場合はH.FLシリーズを候補とする。

表 3.1: 同軸ケーブルの仕様

項目	U.FLシリーズ	H.FLシリーズ
耐電圧	AC 200 V を 1 分間	AC 300 V を 1 分間
ケーブルの直径	1.13 mm	1.48 mm
インピーダンス	50 $\Omega$	50 $\Omega$
定格周波数	DC ~ 6 GHz	DC ~ 3 GHz
質量	3.0 g/m	5.2 g/m

## 3.2 ケーブルの耐性試験

この同軸ケーブルには外部導体に高電圧、芯線に信号を通すため、この間で放電が起きると後段にあるアンプ回路が破損し、その結果 MPPC 16 個からの信号が読み出せなくなる。そのため、選定した同軸ケーブルを KOTO 実験で 3 年間使用した場合、その間に放電が起きる確率の上限値を見積もる。

### 3.2.1 ケーブルの劣化の再現

本研究では、ケーブルを 3 年間使用した後の劣化状態を再現するために加速試験を行った。同軸ケーブルの芯線と外部導体との間の絶縁体が劣化し絶縁性能が低下する原因として、以下のものに着目した。

- 熱による化学変化
- 電流が流れる事によって起こる電気分解
- 絶縁体中のボイド等で生じる部分放電

本研究では熱と電氣的な劣化について評価を行った。部分放電については今後長期的な測定を行って評価していく必要がある。

#### 3.2.1.1 熱的な劣化

ここでは、熱による化学変化によるケーブルの劣化を再現することを考える。化学変化の速度の温度依存性は式 (3.1) に示すアレニウスの式で表される。ここで  $k$  は反応速度定数、 $A$  は定数、 $E$  は活性化エネルギー、 $k_B$  はボルツマン定数、 $T$  は温度である。従って、温度  $T$  を高くすれば 3 年間使用した場合と同等の化学変化を短時間で起こす試験（以降、加速試験と呼ぶ）を行える。

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right) \quad (3.1)$$

化学反応による生成物  $X$  の量は反応速度定数  $k$  に比例するため、 $X$  についての式

$$\ln\left(\frac{X}{A}\right) = \ln(t) - \frac{E}{k_B T} \quad (3.2)$$

が導かれる。そのため、温度  $T_1$  [K] で時間  $t_1$  [min.] 経過した状態と温度  $T_2$  [K] で時間  $t_2$  [min.] 経過した状態が同等である時、

$$\alpha \equiv \frac{t_2}{t_1} = \exp\left(\frac{E}{k_B} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right) \quad (3.3)$$

の関係が成り立つ。活性化エネルギーとボルツマン定数の比  $E/k_B$  を求めるためには、ケーブルの絶縁体を流れる電流と絶縁体の活性化エネルギーの関係式 (3.4) を用いる。

$$I \propto \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right) \quad (3.4)$$

そのため、ケーブルの外部導体と芯線の間を流れる電流と温度の関係を測定すれば  $E/k_B$  が求まり、加速試験における加熱温度と加熱時間を決定できる。

ケーブルの外部導体と芯線の間を流れる電流を図 3.1 に示す回路で測定した。絶縁体の電気抵抗はカタログ値で 500 M $\Omega$  以上であるため、微量の電流値を測定するために 100 k $\Omega$  の抵抗で電流を受け、オペアンプで 100 k $\Omega$  の抵抗の両端にかかる電位差を増幅した。オペアンプの出力端子の後段には環境ノイズを除去するためにローパスフィルターを配置した。

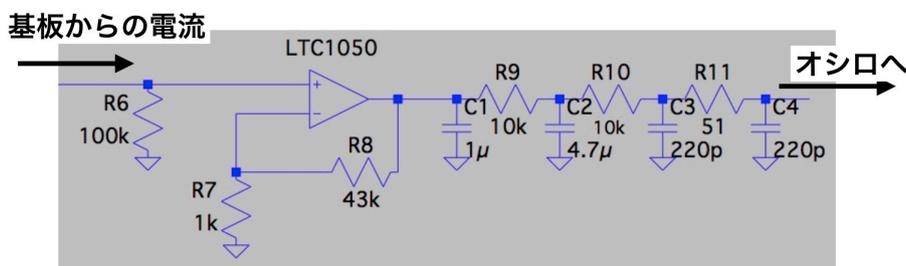


図 3.1: 電流測定用回路

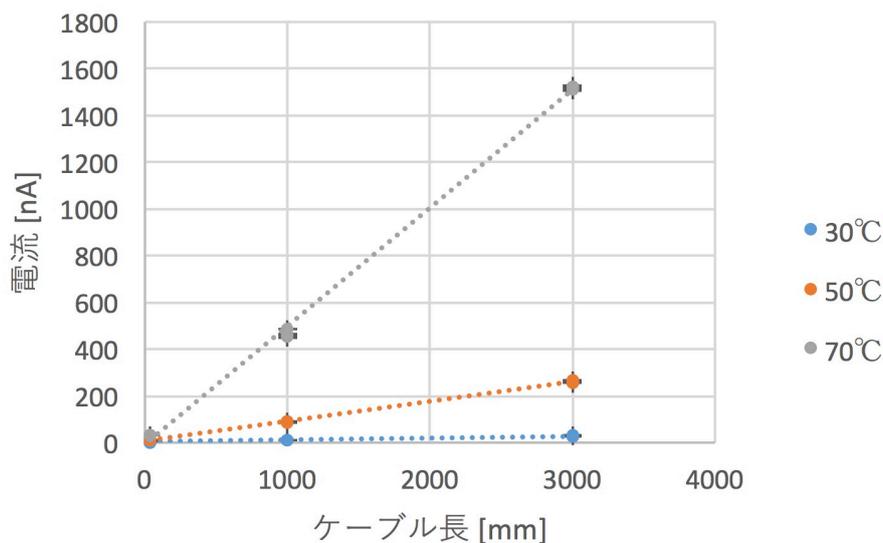


図 3.2: 電流値のケーブル長依存性

まず、絶縁体を流れる電流が見えているかを確認した。異なる長さのケーブルについて電流を測定した結果を図 3.2 に示す。電流測定用回路に入る電流値はケーブル長に対して線形に変化していることから、ケーブルの絶縁体を流れる電流を検出できていることが分かる。この電流は絶縁体以外を流れる成分も含むため、異なる長さのケーブルについて測定した電流値の差をとってケーブルの絶縁体を流れる成分だけを取り出し、絶縁体の活性化エネルギーを求められる形に変形する。

$$I(L_1) = C_0 + AL_1 \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right) \quad (3.5)$$

$$I(L_2) = C_0 + AL_2 \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right) \quad (3.6)$$

$$\Delta I \equiv I(L_2) - I(L_1) = A(L_2 - L_1) \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right) \quad (3.7)$$

ここで、 $L_1$  と  $L_2$  はケーブルの長さである。同軸ケーブルを恒温槽に入れ、3000 mm のケーブルで測定した電流値から 35 mm のケーブルで測定した電流値を引き、 $\Delta I$  の温度依存性を測定した結果を図 3.3 と図 3.4 に示す。温度のエラーバーの大きさは、恒温槽の温度の表示値の分解能  $1^\circ\text{C}$  である。

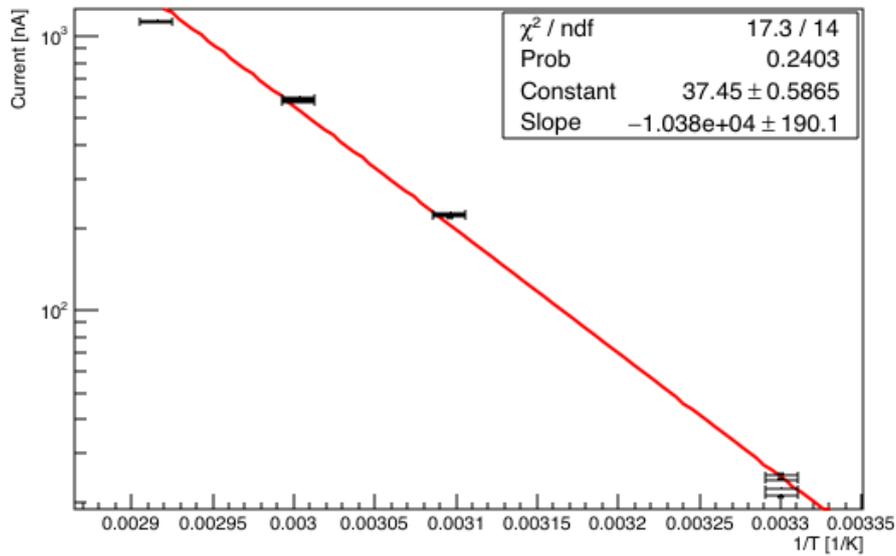


図 3.3: U.FL シリーズのケーブルの絶縁体を流れる電流値の温度依存性

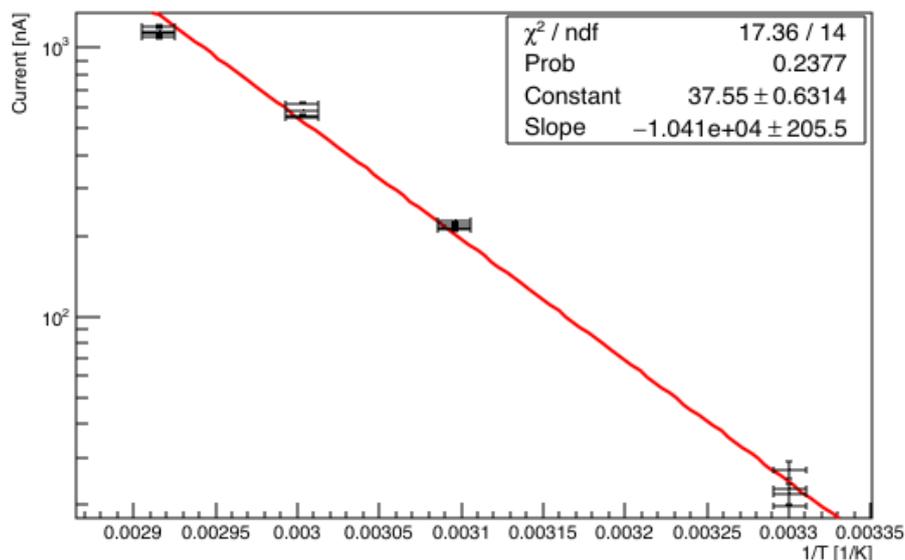


図 3.4: H.FL シリーズのケーブルの絶縁体を流れる電流値の温度依存性

これらの結果を式 (3.7) でフィットした結果、ケーブルの絶縁体の  $E/k_B$  は以下のように求まった。

$$U.FL \text{ シリーズ} : \frac{E}{k_B} = (1.04 \pm 0.02) \times 10^4 [K] \quad (3.8)$$

$$H.FL \text{ シリーズ} : \frac{E}{k_B} = (1.04 \pm 0.02) \times 10^4 [K] \quad (3.9)$$

U.FL シリーズと H.FL シリーズの活性化エネルギーの値が同じであるのは絶縁体と同じ素材であるためである。この結果を式 (3.3) に代入すると、30℃の環境で3年間使用した場合と同程度の熱的劣化を与えるために必要な加熱時間は90℃で90時間と求まる。

### 3.2.1.2 電気的な劣化

同軸ケーブルの外部導体と芯線の間絶縁体に電流が流れると電気分解が起こり、その物性が変化する可能性がある。電気分解を記述するファラデーの第一法則は、

$$X = KQ = \frac{KVt}{R} = Kit \quad (3.10)$$

と表される。 $X$  は電気分解による生成物の量、 $K$  は比例定数、 $Q$  は流れた電荷の総量、 $V$  は絶縁体に印加する電圧、 $t$  は電流を流す時間、 $R$  は絶縁体の電気抵抗、 $I$  は流れる電流である。電気分解による反応量は  $Q$  に比例することと式 (3.4) よ

り、異なる温度  $T_1$ 、 $T_2$  で一定時間電圧を印加し続けた時の電気分解による反応量の比  $\beta$  は

$$\beta = \frac{\exp\left(-\frac{E}{k_B T_2}\right)}{\exp\left(-\frac{E}{k_B T_1}\right)} \quad (3.11)$$

と表される。式 (3.10) と式 (3.11) より、30 °C で 3 年間使用した場合と同程度の電気分解反応を与えるためには、インストール後の環境と同じ 250V の電圧を印加した状態で、90 °C で 90 時間加熱すれば良いことが求まる。

### 3.2.2 劣化させたケーブルの試験

ここまでの議論から、90 °C で 90 時間、250V の電圧をかけながら加熱すれば 30 °C の環境で 3 年間使用した場合と同等以上の劣化をケーブルに与えることができる。この節では、劣化させたケーブルの耐性が著しく低下し、絶縁破壊が起こる状態まで劣化していないかを確認する。以降、図 3.1 と同様の回路を用いて同軸ケーブルに電圧を印加し、電源に 3  $\mu$ A 以上の電流が流れた場合に絶縁破壊が起きたとする。

#### 3.2.2.1 耐性試験を行う環境

U.FL シリーズを真空チェンバー内に置いて高電圧を印加し、ケーブルの放電開始電圧の気圧依存性を測定した結果を図 3.5 に示す。KOTO 検出器内の CsI カロリメーター周りの圧力は約 0.1 Pa であるため、大気圧下の方がインストール後の環境よりも放電開始電圧が低い。そのため、大気圧下で耐性試験を行うことで、より厳しい条件下での試験を行える。

### 放電開始電圧 [V]

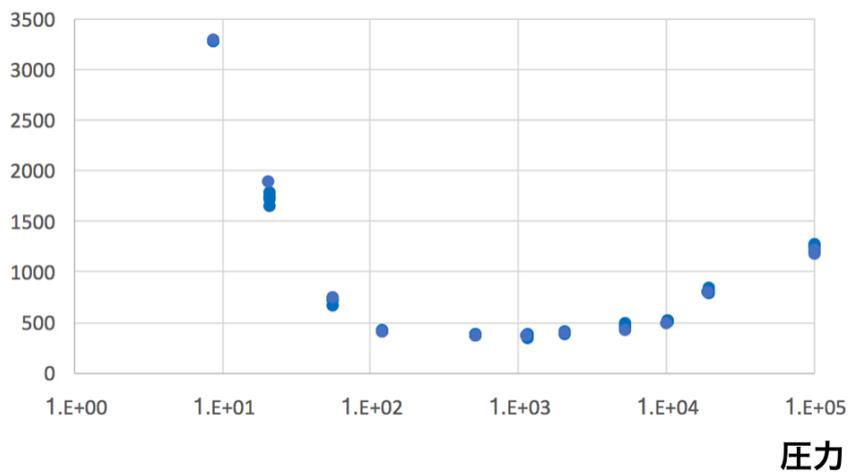


図 3.5: U.FL シリーズの放電開始電圧の気圧依存性。各気圧について複数回測定を行った。

#### 3.2.2.2 V-t 特性

絶縁体に一定の電圧  $V$  をかけ続ける時、絶縁破壊に至るまでの時間  $t$  は  $t = KV^{-n}$  に従うことがよく知られている（これは V-t 特性と呼ばれる）[13, 14]。  $K$  は定数で、  $n$  は劣化の度合いを表すパラメータである。通常はこの V-t 特性は印加電圧  $V$  を変化させた時に絶縁破壊に至るまでの時間  $t$  がどう変化するかを測定することで求められるが、本研究ではそれが困難であったため（付録 D）、絶縁体に電圧を印加し続けて絶縁破壊に至らなかった時間から、ケーブルが 3 年間の使用のうち絶縁破壊に至る確率の上限値を求めた。

まず、1 秒以内に絶縁破壊が起こる電圧  $V_0$  を測定し、3 年使用した際に 250 V で絶縁破壊が起きた場合の点との間に両対数グラフ上で直線を引く（図 3.6 黒線）。この直線はケーブルの寿命が 3 年である時の V-t 特性であるため、寿命が 3 年以上であることを示すためには、この直線よりも実際の測定点の方が図 3.6 中で右側にあることを示せば良い。

$V_0$  を印加した場合の実際の放電時間は 1 秒よりも短いため図 3.6 上ではさらに左側にあるが、その場合は、ある電圧を印加した場合に絶縁破壊に至るまでの時間への制限が緩くなるため、この時の放電時間を 1 秒とすれば、より厳しい条件で評価できる（図 3.7 左）。また、この傾きの絶対値は絶縁体の劣化が進むにつれて大きくなっていき（直線の傾きが劣化の度合いを表すパラメータの逆数、つまり  $-1/n$  である）、それに伴って寿命が短くなっていくため（図 3.7 右）、3 年分の劣化を与えたケーブルについての  $-1/n$  から V-t 特性を見れば、より厳しい条件で評価できる。

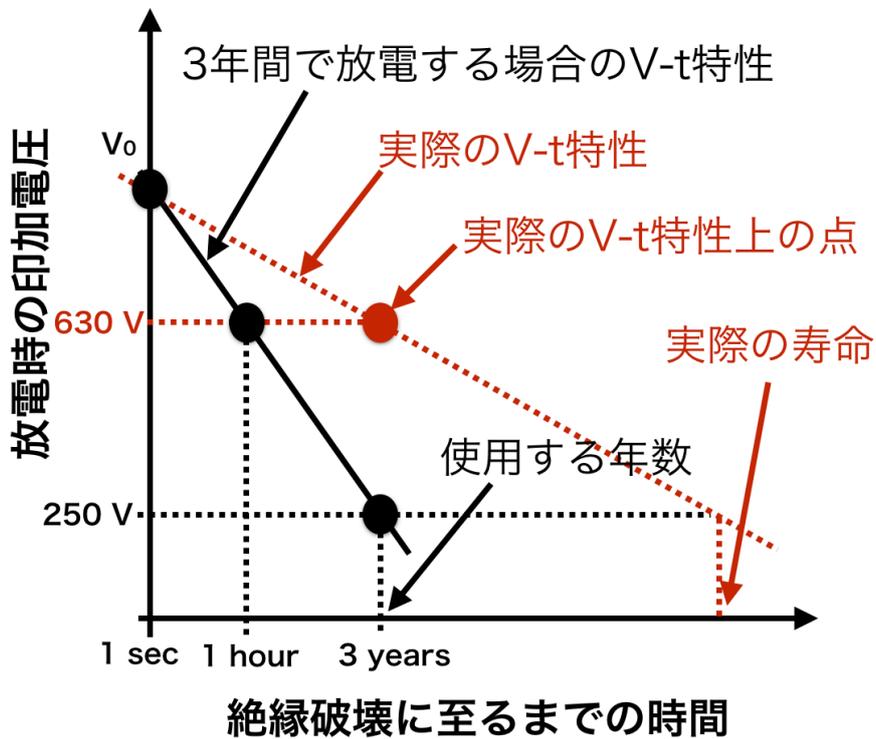


図 3.6: ケーブルの寿命が3年間である場合の V-t 特性の傾きよりも3年間分劣化させたケーブルについての傾きが緩やかであればケーブルの寿命は3年以上である。

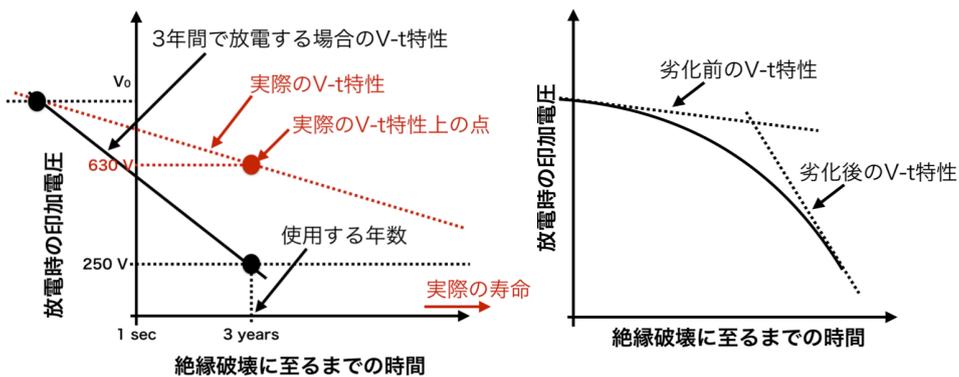


図 3.7: (左)  $V_0$  を印加した時に絶縁破壊が起こる時間は1秒よりも短いですが、その場合は設計寿命が3年以上であることを示すための制約が緩くなるため、この時の放電時間を1秒とすれば、より厳しい条件で評価できる。(右) ケーブルの劣化に伴う V-t 特性の変化。3年分の劣化を与えられたケーブルについて V-t 特性を測定すれば、より厳しい条件で評価できる。

### 3.2.2.3 試験結果

本研究で使用した8本の同軸ケーブルについては1秒以内に絶縁破壊に至る電圧の平均値は1250 Vであったため、この同軸ケーブルが630 Vで1時間放電しなければ250 Vを印加した状態で3年間使用したとしても絶縁破壊には至らない(図3.6)。

同軸ケーブル8本に631 Vを印加して長時間放置した結果、750時間の間に放電したケーブルは0本であった。ここで、ケーブルが絶縁破壊に至る確率分布は式(3.12)で表されるワイブル分布で記述される[15]。 $m$ はワイブルパラメータと呼ばれ、絶縁破壊のような偶発的事象については $m = 1$ となり、確率分布はポアソン分布となる。そのため、ケーブル8本が750時間放電しなかったことは6000本のケーブルが1時間放電を起こさなかったことと同義である。すなわち、KOTO実験の検出器にインストールされる1024本のうち3年以内に絶縁破壊に至るケーブルの本数の期待値は $1024 \times 1/6000 = 0.17$ 本未満である。ハイブリッド接続もしくは並列接続を用いる場合は、ケーブルに印加される電圧は60 V以下であるため、同様にV-t特性からの計算により、3年以内に絶縁破壊に至るケーブルの本数の期待値は $3.0 \times 10^{-3}$ 本未満である。

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{m-1} \exp \left( - \left( \frac{t}{\eta} \right)^m \right) \quad (3.12)$$

## 3.3 結論

U.FLシリーズを60 Vで3年間30℃の環境で使用した場合に熱・電氣的な劣化によりケーブル内の絶縁体の絶縁抵抗が著しく低下し、絶縁破壊に至るケーブルの本数は1024本のうち $3.0 \times 10^{-3}$ 本未満である。そのため、U.FLシリーズをCsIの両読み機構に用いる同軸ケーブルとして採用する。しかし、長期間電圧を印加し続けた際の部分放電による劣化は今後長期的な試験によって評価していく必要がある。また、3.2.2.1節で述べた通りこの章の測定は全て大気圧下で行ったため、真空中で本当に絶縁破壊が起こらないかを確認する必要がある。

## 第4章 信号読み出し用アンプ回路の開発

MPPCからの信号を読み出すためのアンプ回路への要求は以下の通りである。定量的な要求値は各節で述べる。

- 真空中に置くために低消費電力である必要がある（全数で数十W）（4.2節）。
- MPPCからの波形を読み出せる帯域を持つ（4.1節）。
- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 事象による信号を読み出せるダイナミックレンジを持つ（4.3節）。
- KOTO実験で100 kWのビームパワーで3年間データ取得を行う間に、CsI結晶に当たるビームハローの中性子によって放射線損傷を受けても正常に信号を読み出せる（4.3節）。

この章では、これらの要求を満たすアンプ回路の開発を行う。

### 4.1 信号読み出しのために必要な帯域

#### 4.1.1 セットアップ

まずはMPPCからの信号の帯域を知るために、宇宙線測定を行った。図4.1に示すセットアップで、5 cm角のCsIの一端にMPPCを装着し、宇宙線がCsIを貫通する事象を観測した。PMTとしては浜松ホトニクス株式会社製のH6410を用い、PMTとCsI結晶の間およびMPPCとCsI結晶の間は5 mm厚のシリコンクッキーを用いて接続した。

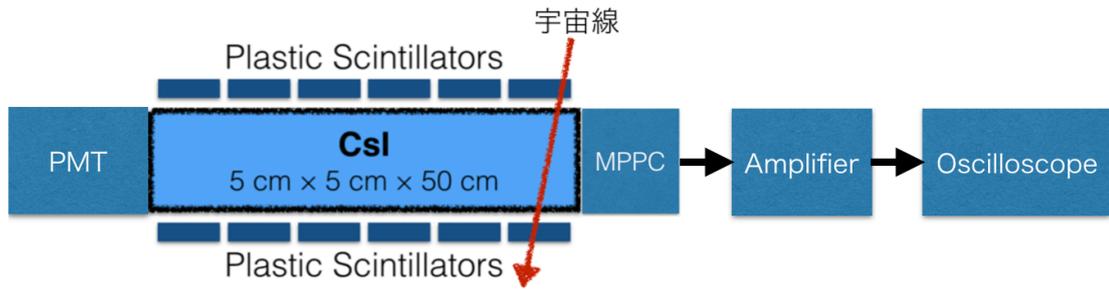


図 4.1: 宇宙線測定の設定アップ

今回の測定に使用したアンプは Phillips Scientific 776 (帯域 275 MHz、ゲイン 10 倍) である。

#### 4.1.2 測定結果

図 4.1 で CsI の上下にある 6 組のトリガーシンチレータに接続された MPPC のうち一組が同時に MIP による信号の半分以上の大きさの信号を出した事象についてトリガーを作り、CsI の長手方向の両端に接続された PMT と MPPC からの出力波形をオシロスコープで記録した。得られた 1000 波形について各時刻における電圧の平均値をとって平均の波形を求め、それを関数

$$V = p_0 \left( \exp \left( -\frac{t - p_1}{p_2} \right) - \exp \left( -\frac{t - p_1}{p_3} \right) \right) + p_4 \quad (4.1)$$

でフィットした。V は電圧、t は時間である。結果を図 4.2 に示す。以降、このフィットの結果得られた関数を MPPC からの出力波形のテンプレート波形と呼ぶことにする。

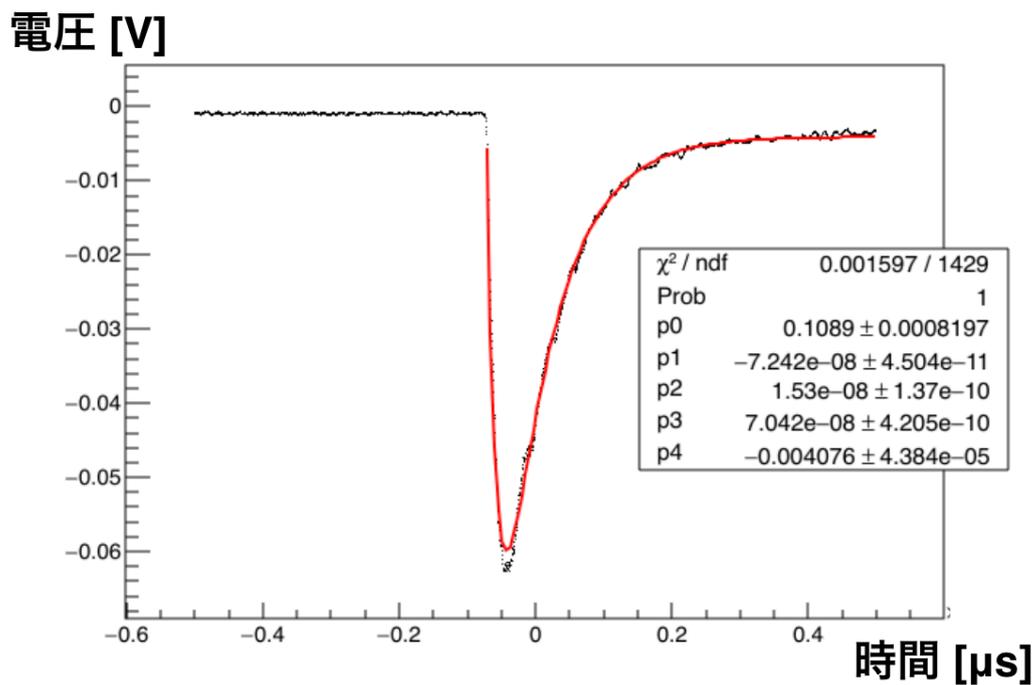


図 4.2: MPPC の出力波形 (平均化してフィット)

このテンプレート波形をフーリエ変換し、周波数成分を求めた結果を図 4.3 に示す。アンプ回路で 30 MHz 以下の周波数成分を読み出すことが出来れば、MPPC からの波形を充分読み出せる。

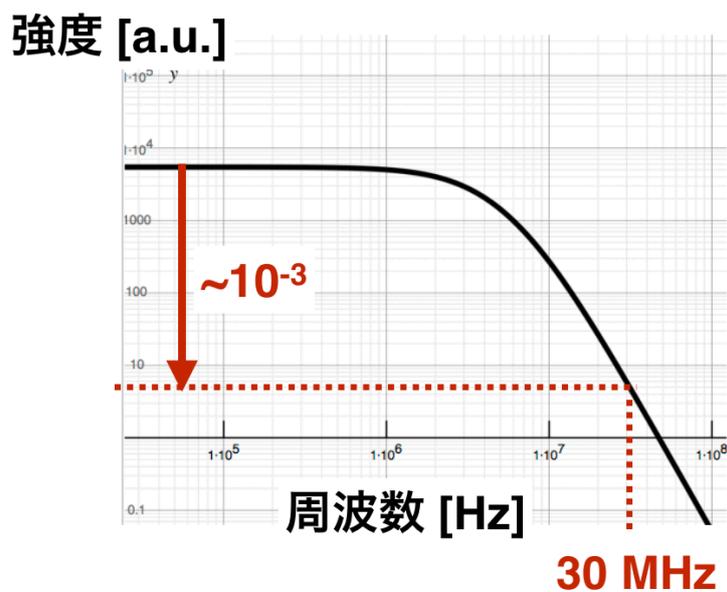


図 4.3: MPPC の出力波形の周波数成分

## 4.2 オペアンプの選定

ここでは、サムアンプ回路の概要を踏まえた上でオペアンプの選定を行う。サムアンプ回路のうち一段目のオペアンプの部分の概要を図 4.4 に示す。MPPC からの信号は電流の形でアンプ基板に届き、この電流がオペアンプのフィードバック抵抗に流れることにより電流情報が電圧情報となる。そのため、一段目のオペアンプの入力段にこの電流の一部が流入して出力電圧が低く見えてしまわないように設計する必要がある。このために、MPPC からの信号はまず入力バイアス電流が小さい FET 入力<sup>1</sup>のオペアンプ<sup>1</sup>で受け、電圧情報にしてから後段のオペアンプに信号を送る。FET 入力<sup>1</sup>のオペアンプは電圧帰還型オペアンプであり、ゲインを上げた際に帯域の上限がゲインに反比例して低くなるため、一段目のオペアンプではゲインを 1 に抑え、回路の帯域の上限を極力高く保つようにする。

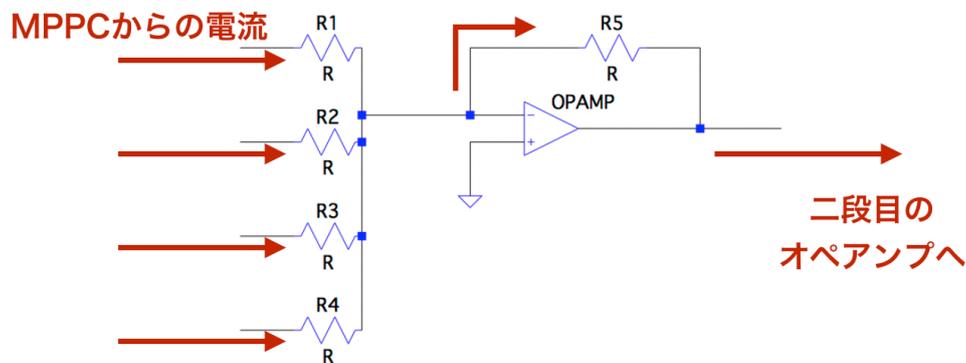


図 4.4: サムアンプ回路のうち一段目のオペアンプの部分。MPPC4つからの組4組からの電流を足し上げ、一段目のオペアンプのフィードバック抵抗に流して電圧情報への変換を行う。その後、二段目のオペアンプで信号の増幅及び差動信号への変換を行う。

以上から、一段目のオペアンプの選定に際しては以下の項目に留意する必要がある。

- FET 入力である。
- ゲイン 1 で帯域の上限値が 30 MHz 以上ある。
- 低消費電力である。

<sup>1</sup> オペアンプの初段を FET で構成したもの。この種類のオペアンプは入力インピーダンスが高く、入力段への電流の流入量が少ない。

- ペDESTALの電圧値が正負どちらに振れるかはオペアンプの個体差によるため、ペDESTAL部分を正しく出力するために正負両方の極性を持つ出力信号を作れる必要がある。
- 低価格（～ 1000 円以内）である。

これらの条件を満たすオペアンプの候補を表 4.2 に示す。消費電力は  $\pm 5$  V で動作させた時の値である。

表 4.1: 一段目のオペアンプの候補の性能

オペアンプ	入力バイアス電流	ゲインバンド積	消費電力
AD8033	1 pA	80 MHz	33 mW
ADA4891	2 pA	220 MHz	44 mW
AD8065	1 pA	145 MHz	64 mW

これらを比較した結果、最も消費電力が少ない AD8033 を一段目のオペアンプとして採用した。なお、回路を実装する際は AD8033 が 2 チャンネル分入ったオペアンプ AD8034 を用いる。

一段目のオペアンプを通過した信号はその後段のオペアンプで増幅及び差動信号へ変換される。この二段目のオペアンプの選定に際しては以下の項目に留意する必要がある。ただし、オペアンプを選定する段階ではアンプ回路のゲインが未決定であったため、帯域に余裕を持たせてゲイン 10 で 30 MHz 以上の帯域があるものを選定した。

- ゲイン 10 で帯域の上限値が 30 MHz 以上ある。
- 低消費電力である。
- 差動信号を作るために正負両方の極性を持つ出力信号を出せる必要がある。
- 低価格（～ 1000 円以内）である。

これらの条件を満たすオペアンプの候補を表 4.2 に示す。

表 4.2: 二段目のオペアンプの候補の性能

オペアンプ	帯域（ゲイン 1 の時の値）	消費電力
AD8011	300 MHz	10 mW
AD8014	400 MHz	11.5 mW

これらを比較した結果、最も消費電力が少ない AD8011 を二段目のオペアンプとして採用した。

## 4.3 アンプ回路

### 4.3.1 回路の設計

二章で述べたように、MPPCを4つひとまとめでした組を4組集め、全ての信号を1つのアンプ回路に入力して信号を処理する。本節ではこの回路の設計を行う。まず、設計した回路を図4.5に示す。

MPPCからサムアンプまでは約3 mあるため、一段目のオペアンプの前では同軸ケーブルのインピーダンス50 Ωと同程度の51 Ω（50 Ω丁度の抵抗は高価である）で信号を受け、信号の反射が起こらないようにした（図4.5中のR3）。MPPCは放射線損傷を受けると暗電流が増える性質を持つため、MPPCからの信号をそのままオペアンプの入力段に入れるとベースラインが時間変動してしまう。そのため、MPPCとオペアンプの間をコンデンサC3で切り、暗電流をその前で逃がすように設計した。

その後、MPPCからの電流は一段目のオペアンプのフィードバック抵抗R4に流れ、電圧情報を作る。二段目のオペアンプで信号にゲインをもたせた上で差動信号を作り、図4.6に示すようなRJ45コネクタからEthernetケーブルを通して差動信号をADCに送る。二段目のオペアンプのフィードバック抵抗R6とR8の値はサムアンプのゲインを決定した後に決める。信号をADCまで送るためのEthernetケーブルにはツイストペアが4組あり、RJ45コネクタのピンの外側二組に信号を通して他の組はGNDとして使用する。図4.5中のR9とR10は信号線とインピーダンスを揃えるための抵抗である。

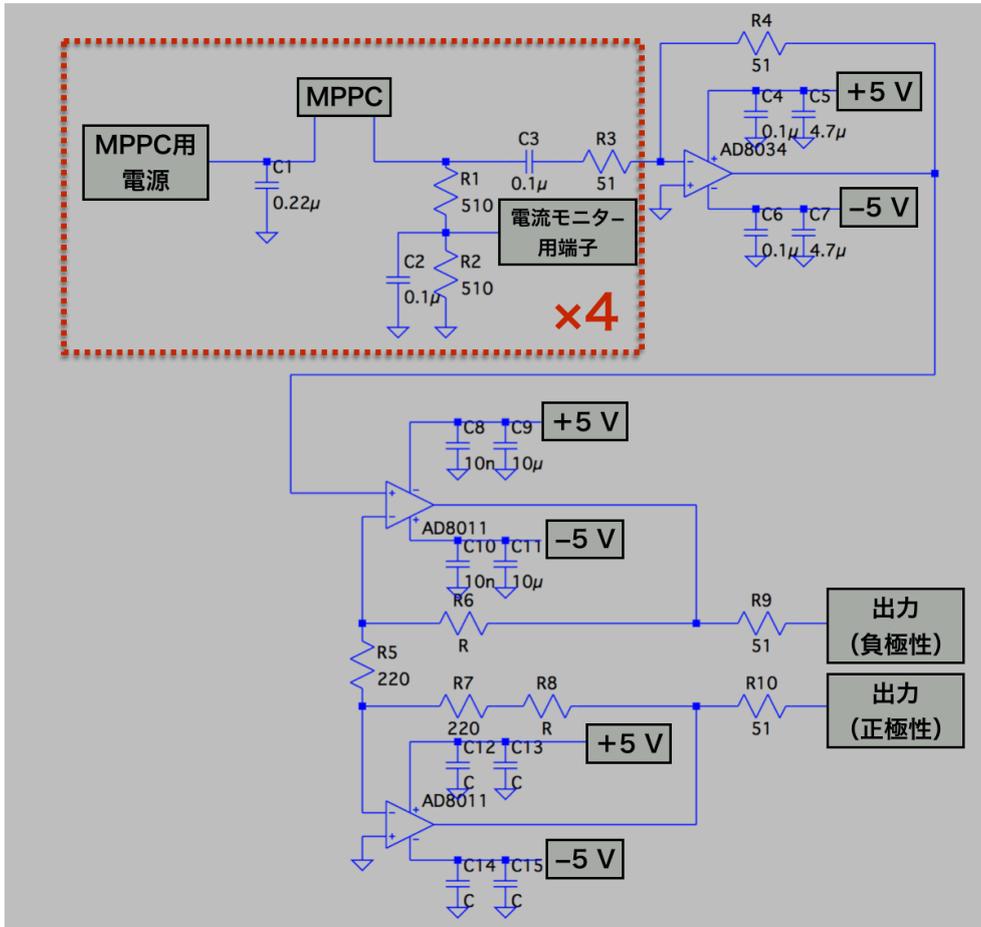


図 4.5: サムアンプの回路図。実際には、一段目のオペアンプ以前の部分と同じものが4つあり、全て一段目のオペアンプの入力端子に接続されている。



図 4.6: RJ45 コネクタ [16]

### 4.3.2 サムアンプのゲイン

本節では、ここまで回路設計を行ってきたサムアンプのゲインの決定方法について述べる。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  からの  $2\gamma$  が CsI カロリーメーターにエネルギーを落とした時、10 cm 角の領域（サムアンプ1チャンネル分に相当する範囲）に落とすエネルギーをシミュレーションした結果を図 4.7 に示す。

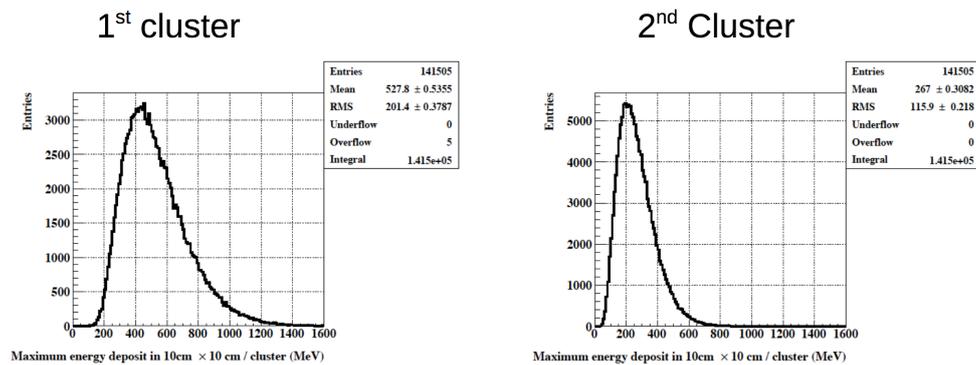


図 4.7:  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  からの  $\gamma$  が CsI カロリーメーター中で反応し、ビーム軸に垂直な平面上で 10 cm 角の領域に落とすエネルギーのシミュレーション結果。1st cluster は  $2\gamma$  のうち落としたエネルギーが大きかった方、2nd cluster は落としたエネルギーが小さかった方についての分布である（南條創氏によるシミュレーション）。

このシミュレーションの結果から、50 MeV から 1.5 GeV の範囲のエネルギーが

落とされた時の信号を読み出せるゲインを選べば  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  からの  $2\gamma$  を検出できることが分かる。

しかし、KOTO 実験で用いている CsI 結晶の光量は図 4.8 に示すように、結晶ごと、結晶の長手方向の位置ごとにはばらついている。そのため、サムアンプのゲインをその場で変更できるようにしておき、両読み機構のインストール時に適宜ゲインを選定する必要がある、本研究の段階でゲインの決定は行えない。

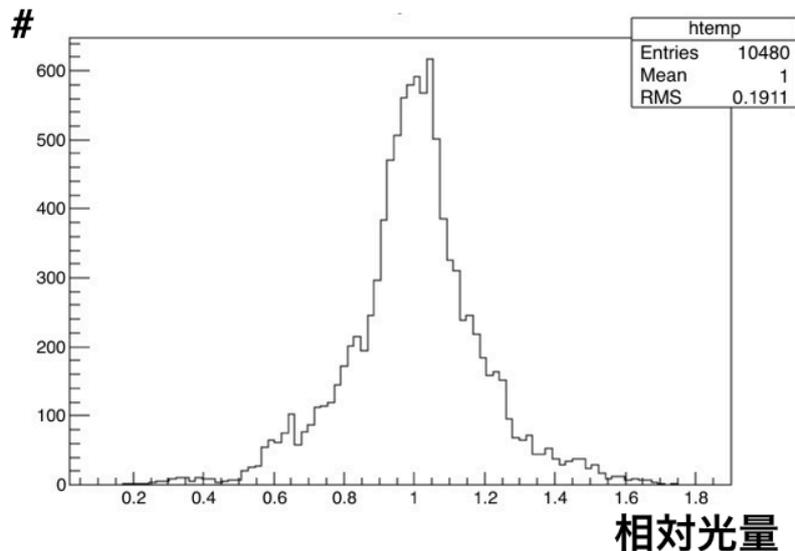


図 4.8: KOTO 実験で用いている個々の CsI 結晶の光量の分布。光量は平均が 1 になるように規格化されている。各結晶について長手方向に複数点で測定した結果全てについてのヒストグラムであるため、データ数は結晶数よりも多い。

### 4.3.3 テストパルス入力用回路

最終的にサムアンプを KOTO 実験の検出器内に組み込んだ後は基板にアクセスできないため、外部からタイミングキャリブレーションおよび回路の動作確認を行える必要がある。ここでは、そのためのテストパルス入力用回路の実装について述べる。

抵抗とコンデンサからなる回路を、図 4.9 のように一段目のオペアンプの入力段に接続した。ファンクションジェネレータからこの回路を通してサムアンプにパルスを送ることによってオペアンプに指数関数的なパルスとして電荷を入力する。その後、指数関数的な波形の差動信号がサムアンプの回路で作られ、ADC へ送られる。この回路ではサムアンプが MPPC からの信号を正しく処理できるかどうかの確認も行うため、MPPC からの信号と同程度の周波数領域にある波形を出力するように回路の定数を選んだ。

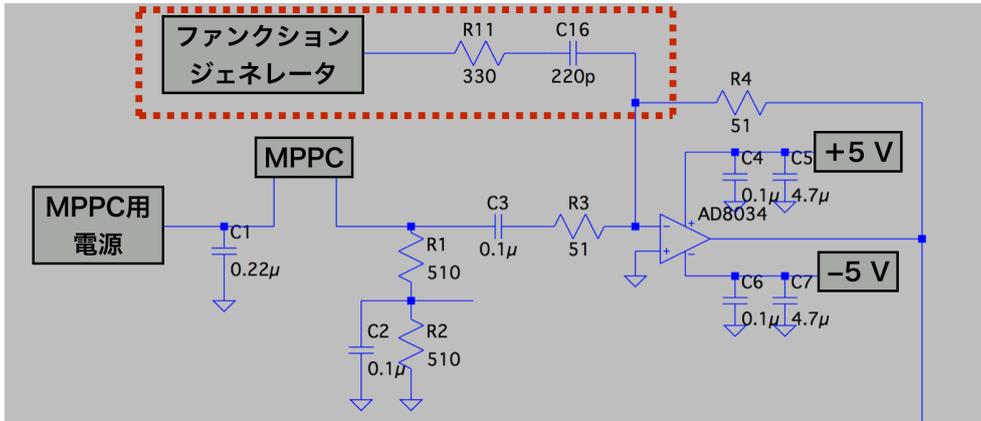


図 4.9: 赤く囲った部分がテストパルス入力用回路である。

この回路を用いて実際にサムアンプにテストパルスを入力し、その出力信号をオシロスコープで観測したものが図 4.10 である。ファンクションジェネレータから送るパルスの振幅を変えることにより、出力信号の波高を調整できる。

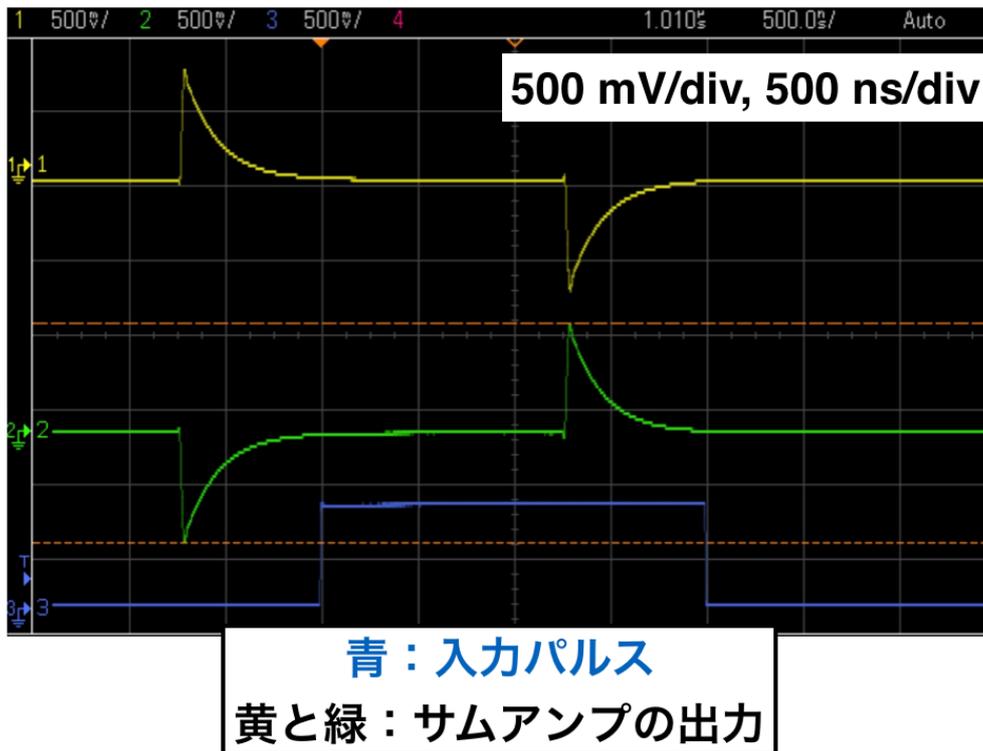


図 4.10: テストパルスを入力した際のサムアンプの出力波形

#### 4.3.4 基礎特性の測定

ここまでで設計してきたサムアンプ回路を4ch分実装したテスト基板を作製した。その写真を図4.11に示す。最終的には256ch分、すなわちこのテスト基板64枚分のサムアンプ回路をインストールする。

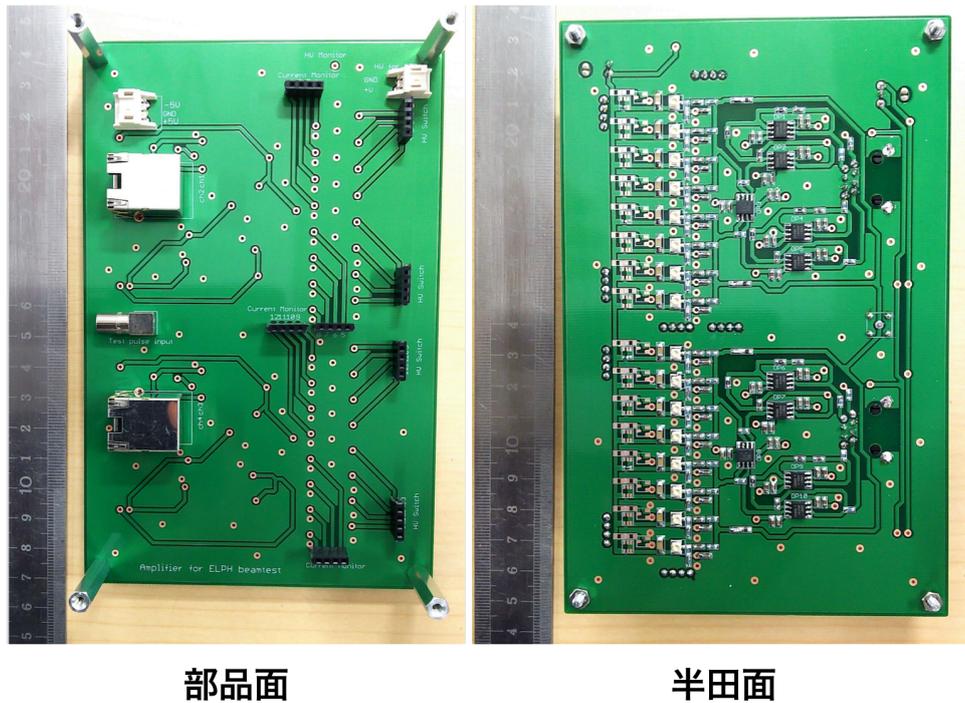


図 4.11: サムアンプのテスト基板。大きさは縦 170 mm、横 110 mm である。

このサムアンプに正弦波を入力して周波数特性を測定した結果を図4.12に示す。このサムアンプの帯域はおよそ 20 kHz から 40 MHz の間である。

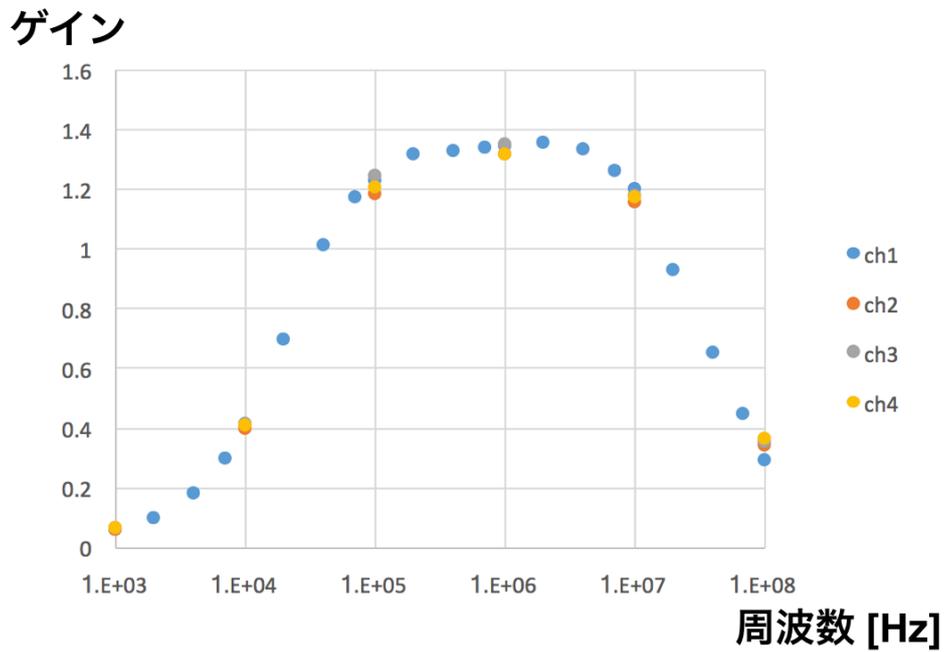


図 4.12: サムアンプの周波数特性。基板一枚に 4 チャンネル実装してあり、図 4.11 の上から順に ch1、ch2、ch3、ch4 である。

また、ファンクションジェネレータから 4.1 節で作製したテンプレート波形を入力し、サムアンプ基板上の MPPC からの信号を入力するコネクタにこの波形を入力した際の、サムアンプからの出力波形を図 4.13 に示す。図 4.12 に示す周波数特性で MPPC からの信号を正常に読み出せる。

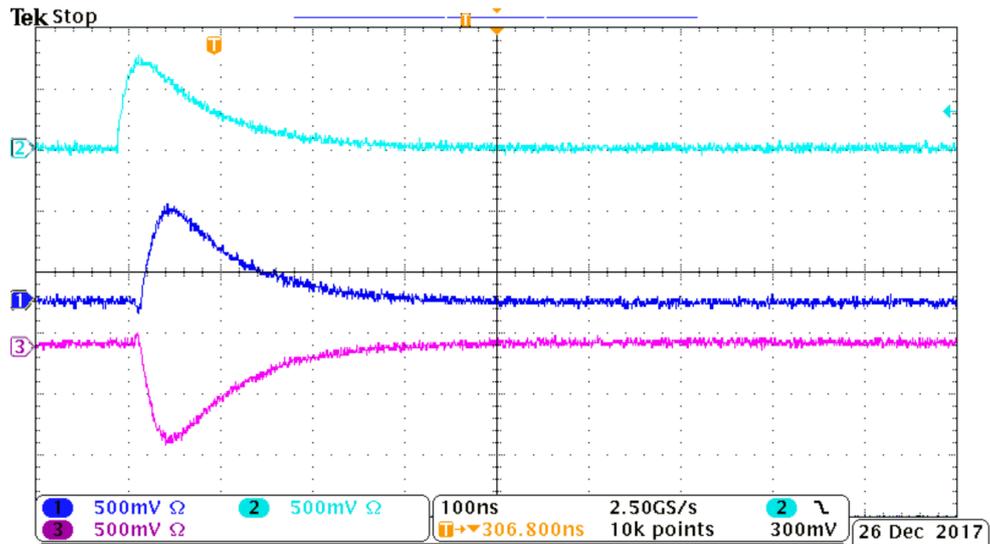


図 4.13: テンプレート波形をサムアンプに入力した時の出力波形。水色がサムアンプへ入力したテンプレート波形、青と桃色がそれぞれサムアンプから出力された差動信号の片方ずつである。

さらに、サムアンプ基板上的オペアンプに動作電圧を供給している電源から流れる電流値から消費電力を計算すると、最終的に KOTO 実験の検出器内にインストールする全数 (64 チャンネル) での消費電力は 14 W となる。これは十分冷却可能な熱量であり、この回路で発生する熱は問題とならない。

### 4.3.5 S/N

サムアンプと MPPC を 3 m の同軸ケーブルで接続し、MPPC に光が当たっていない時のサムアンプの出力をオシロスコープを用いて測定した。サムアンプの出力信号を  $1 \mu\text{s}$  のウィンドウ内で電荷量を積分した値は  $1.5 \text{ pC}$  であった。一方、サムアンプで検出するエネルギーの下限である  $50 \text{ MeV}$  の信号を入力し、同様に出力信号を  $1 \mu\text{s}$  のウィンドウ内で積分した値は  $1.5 \text{ nC}$  であったため、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  からの光子に対する S/N は  $10^3$  以上ある。

### 4.3.6 チャンネル間のクロストーク

ここでは、今回作製したサムアンプで起こるチャンネル間のクロストークが問題とならないかを評価する。クロストークの原因は主に以下の二つである。

- 基板上で隣接するパターンに電磁波が飛ぶ

- テストパルス回路を介して隣のチャンネルに信号が出る

4.1 節で得られたテンプレート波形の波高を 1.5 GeV 相当にしたものをサムアンプのチャンネル 1 に入力し、その隣のチャンネル 2 の出力波形をオシロスコープで記録した例を図 4.14 に示す。

既に述べたように、KOTO 実験で探索している  $K_L \rightarrow \pi^0 l \bar{\nu}$  崩壊からの光子が CsI カロリメーターに落とすエネルギーは 50 MeV から 1.5 GeV の間である。1.5 GeV に相当する信号をサムアンプのあるチャンネルに入力した際の隣のチャンネルへのクロストーク波形（赤）の電荷量を 1  $\mu$ s のウィンドウ内で積分した値は 2.4 pC であった。50 MeV に対応する信号について同様に積分した値は 1.5 nC であったため、このクロストークは 80 keV に相当する大きさであり、問題とならない。

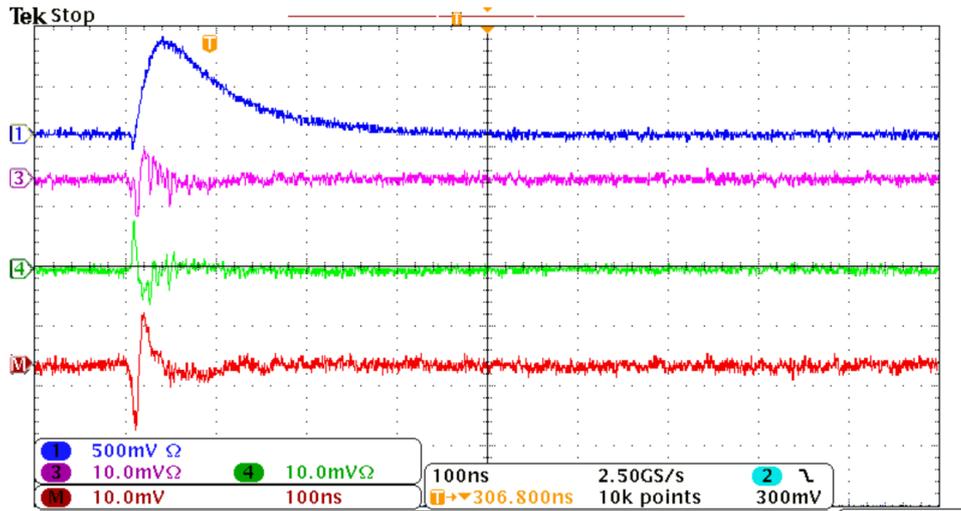


図 4.14: チャンネル間のクロストーク。青がサムアンプのチャンネル 1 の出力波形（差動信号のうち片方）、桃色と緑がチャンネル 2 の出力波形（差動信号のうち片方ずつ）、赤がチャンネル 2 の出力波形の差動の差をとった波形。

### 4.3.7 サムアンプとしての線形性

サムアンプが MPPC からの信号を線形に足し上げているかを評価する。この評価のために作製したセットアップを図 4.15 に示す。ファンクションジェネレータから LED にパルスを送って LED を光らせ、その光を 4 本のファイバーに分けてそれぞれを MPPC 4 個の組に届ける。LED からの光の ON/OFF は各組ごとにスイッチ出来るようになっている。また、ファイバーの先と MPPC の間の距離は可変であるため、MPPC が 4 つからなる組（以降チャンネルと呼ぶこととする）ごとに光量の調整を行える。MPPC からの信号は同軸ケーブル（U.FL シリーズ）を通してサムアンプに送った。

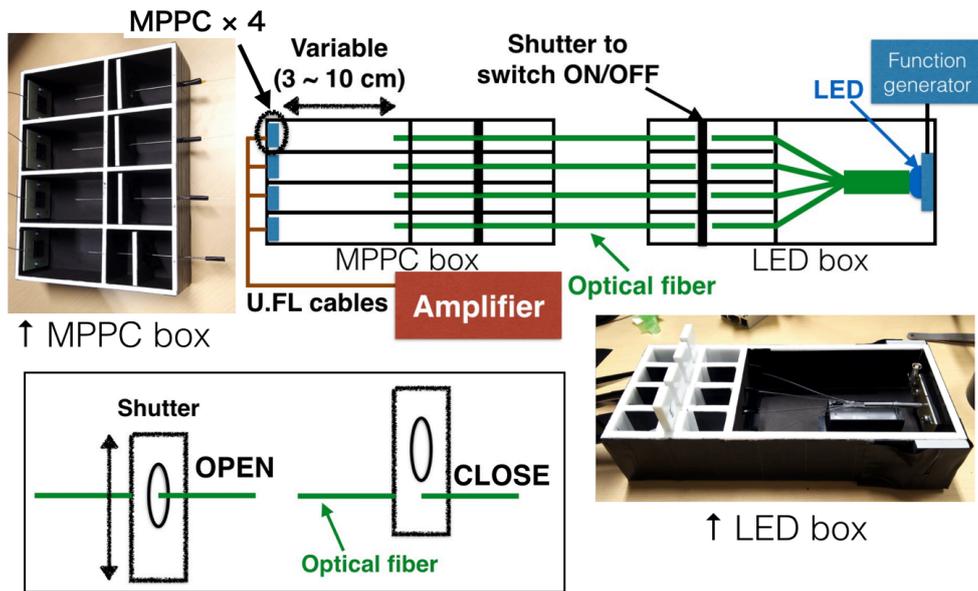


図 4.15: サムアンプの線形性評価のために作製した暗箱。LED の光を 4 つに分割し、光ファイバーを通して MPPC まで届ける。各ファイバーの途中で穴の空いた板（左下）を置き、それを上下させることでファイバーごとに光の ON/OFF を切り替えられるようにした。

まず、チャンネルごとに LED の光を当てた時のサムアンプの出力波高を測定した結果を図 4.16 に示す。あらかじめファイバーの先端と MPPC の間の距離をチャンネルごとに調整し、各組に届く光量を同程度にした。

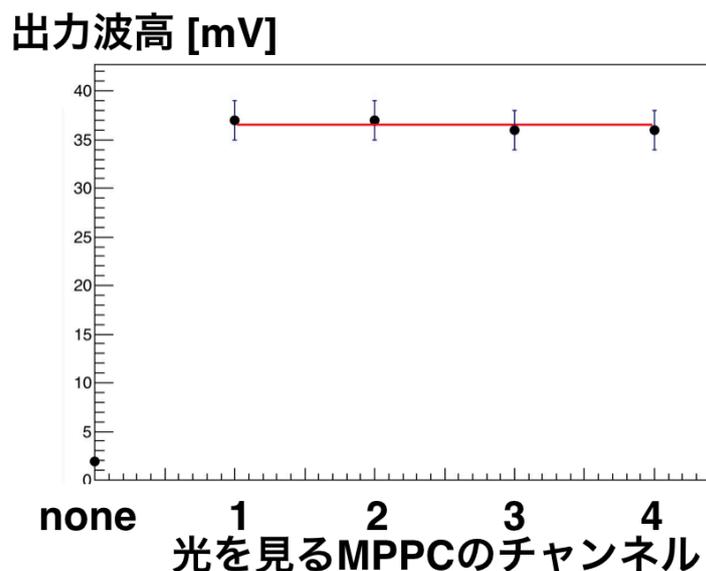


図 4.16: MPPC1 チャンネルごとに光を当て、出力波形の高さを測定した。ファイバーの先端と MPPC の間の距離を調整し、各組に届く光量をほぼ同程度に揃えた。

次に、LED の光を ON/OFF するシャッターを用いて LED の光を当てる MPPC の組の数を変え、サムアンプの出力波高を測定した結果を図 4.17 に示す。エラーバーは、出力波高の分布を正規分布でフィットした際の、正規分布のピーク値のエラーである。サムアンプが信号を線形に足し上げている場合、このプロットの傾きは 1 になる。図 4.17 より、プロットの傾きは  $1.02 \pm 0.04$  であるため、エラーの範囲でサムアンプは線形に信号を足し上げられており、その線形性は 6 %以内である。

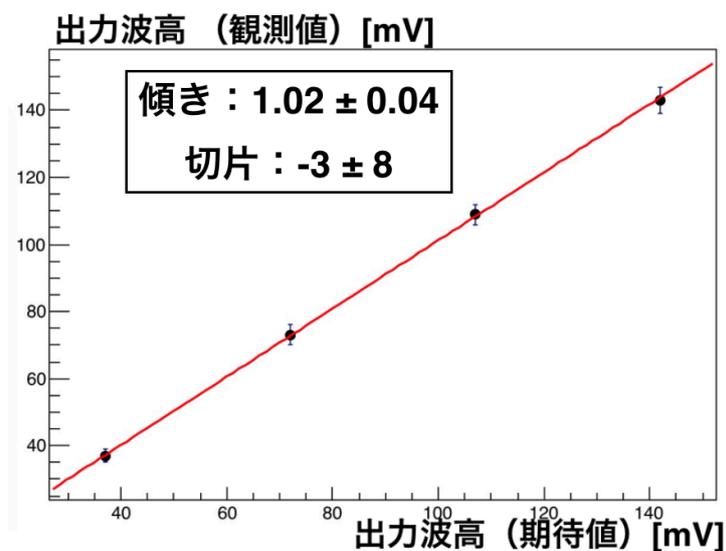


図 4.17: LED の光を当てる MPPC の組の数を変えた時のサムアンプの出力波高。横軸は各チャンネルについての光量測定で得られた出力電圧を足し上げた値、縦軸は実測値である。

## 4.4 結論

MPPC からの信号を差動信号に変換し、Ethernet ケーブルを通して ADC に送るための回路を作製した。消費電力は全数 (256 ch) で 14 W であり、これは真空中で冷却可能な熱量である。また、サムアンプの帯域、ノイズレベル、チャンネル間のクロストーク、線形性はどれも問題ない。

## 第5章 陽電子ビームを用いた両読み 機構の性能評価

東北大学の電子光理学研究センター（ELPH）で陽電子ビームを CsI 結晶に当て、これまで開発や評価を行ってきた MPPC 同士の接続、同軸ケーブル、アンプ回路の全てを組み上げた機構の動作確認及び性能評価を行った。

### 5.1 ビームテストのセットアップ

今回のビームテストで用いたセットアップを図 5.1 に示す。2.5 cm 角の CsI 結晶 4 本のまわりに 5 cm 角の結晶 8 本を積み上げ、結晶の上下に宇宙線測定のトリガー作成に用いるプラスチックシンチレーターを置いた。陽電子ビームは結晶の長手方向に水平に入射した。また、本ビームテストにおけるトリガー用シンチレーターのセットアップを図 5.2 に示す。3 枚のプラスチックシンチレーターのコインシデンスをトリガーとし、データ取得を行った。ビームの入射位置の精度はトリガー用プラスチックシンチレーターの大きさによって定まり、後に 5.3 節で結晶を回転した後では、その精度は 2 cm 以内である。

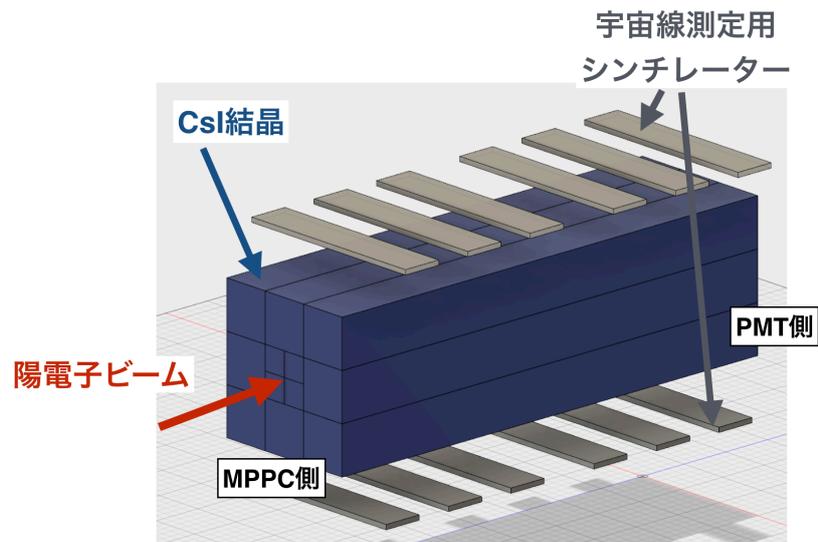


図 5.1: ELPHでのビームテストのセットアップ

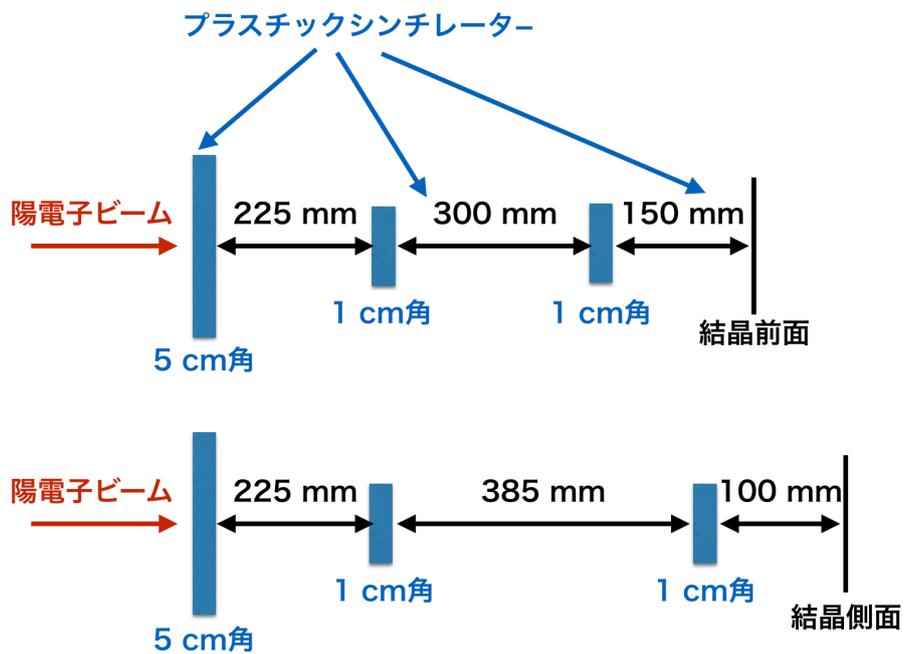


図 5.2: ビームテストで用いたトリガー用シンチレーターの配置図。上は図 5.1 のセットアップ、下は 5.3 節のセットアップにおける位置関係。

## 5.2 回路の動作確認

サムアンプのテストパルス入力用回路に矩形波を入れ、サムアンプの動作確認を行った。この時のサムアンプの出力波形を重ね書きしたものを図 5.3 に示す。この時のカットの条件は付録 G で述べる。サムアンプの出力波形は正常であり、テストパルス入力用回路を通してサムアンプが正常に動作していることを確認できた。

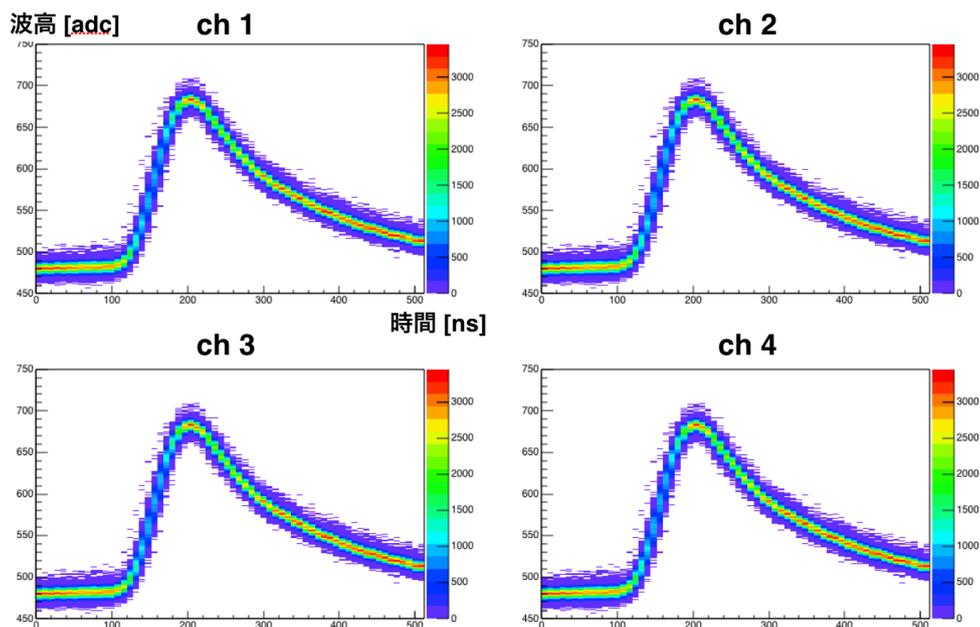


図 5.3: サムアンプにテストパルスを入れた際のサムアンプの各チャンネルの出力波形

また、サムアンプのチャンネル 1 から 4 の出力波形を ADC に入れて CFTime の分布を確認した。この結果を図 5.4 に示す。このように、信号が通るケーブルの長さが同じでも記録される波形のタイミングは ADC 内の処理で数 ns ずれる場合がある (付録 H)。このように、チャンネルごとにタイミングがずれた場合でもテストパルス入力用回路でそのずれを観測できるため、これを補正できる。本測定では、約 30000 事象のテストパルスについてデータを取得し、CFTime の分布を正規分布でフィットした際のピーク値の誤差は約 20 ps であった。そのため、各チャンネルについて少なくともこの精度では補正を行える。

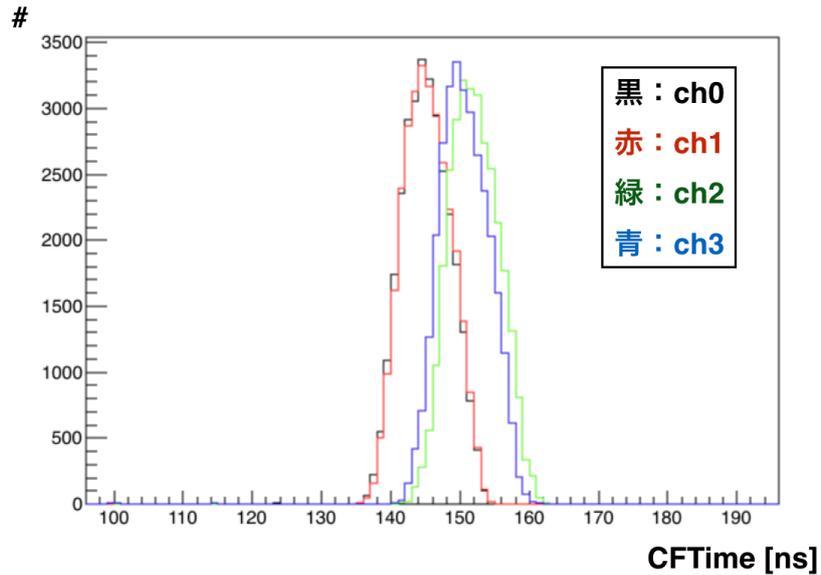


図 5.4: サムアンプにテストパルスを入力した際の、サムアンプの出力波形の CF-Time の分布。MPPC からサムアンプ、サムアンプから ADC までのケーブル長は全て同じだが、ADC 内の処理で数 ns タイミングがずれている。(付録 H)

### 5.3 時間分解能のエネルギー依存性

2.6.1 節で述べたように、MPPC が検出する光子の数が多くなると光子数の統計的ゆらぎは小さくなるため、時間分解能は良くなると推測できる。この推測を確かめるため、結晶に落とされるエネルギーを変えて時間分解能の測定を行った。

CsI 結晶を、図 5.1 の状態から積み上げた結晶の重心を軸として  $90^\circ$  回転させ、結晶の側面からビームを入射し、結晶に落とされるエネルギーが異なる場合の時間分解能を測定した。この時のセットアップを図 5.5 に、ビームの入射位置を図 5.6 に示す。

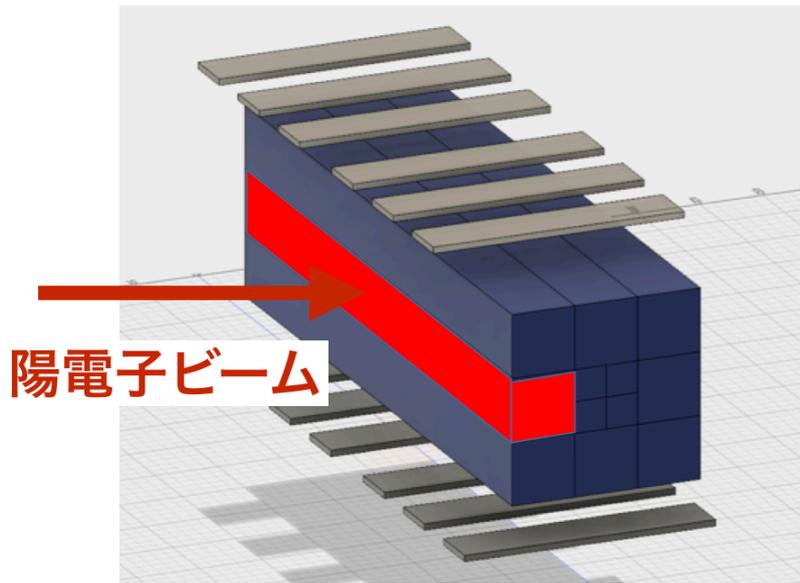


図 5.5: CsI 結晶を 90° 回転させ、結晶の側面からビームを入射させた時のセットアップ。赤で示した結晶について解析を行った。

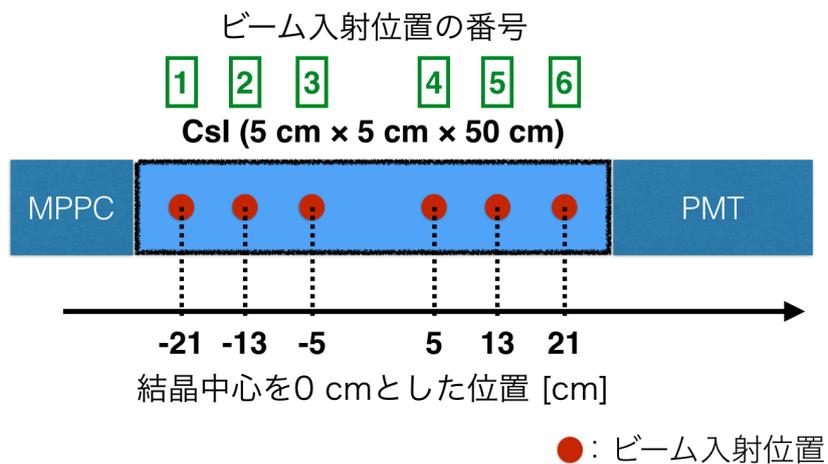


図 5.6: 結晶側面から見たビーム入射位置。これは宇宙線測定の際のトリガー用プラスチックシンチレーターの位置と対応する。

宇宙線測定から 28 MeV のエネルギーが落とされた時の時間分解能のデータが得られるため、今回利用できるビームエネルギーのうち一番大きいエネルギーを結晶に落とす 800 MeV のビームと、それらの中間のエネルギーを結晶落とす 200 MeV のビームを CsI 結晶に当てた。

ビームが当たっている CsI 結晶に落とされるエネルギーをシミュレーションした結果を図 5.7 に示す。この結果から、200 MeV と 800 MeV の陽電子ビームが CsI 結晶の側面に入射した場合に結晶に落とされる平均のエネルギーはそれぞれ 77 MeV、155 MeV である。

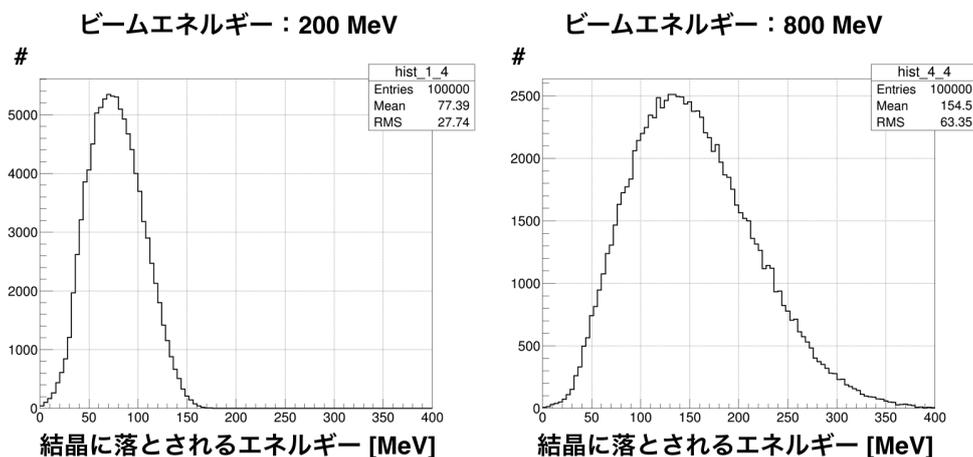


図 5.7: CsI 結晶の側面に陽電子ビームを当てた時に結晶に落とされるエネルギーの分布 (清水信宏氏によるシミュレーション)。左側が 200 MeV のビーム、右側が 800 MeV のビームを入射させた時の結果。

CsI 結晶にビームを当てた際の MPPC からの出力波形を規格化して平均化したものを図 5.8 左に、MPPC 側で観測したエネルギー分布を図 5.8 右に示す。MPPC からの出力波形は 200 MeV、800 MeV の陽電子ビームに対してほぼ同じであり、結晶に落とすエネルギーは 800 MeV のビームの方が大きい。これらの事象について、ビーム照射位置ごとに時間分解能のエネルギー依存性を測定した結果を図 5.9 に示す。結晶に落とされるエネルギーの平均が 28 MeV の時の時間分解能は  $(1.45 \pm 0.03)$  ns であり、これは中性子背景事象を 1 桁削減するための要求を満たしている。結晶に落とされるエネルギーが高くなるほど時間分解能が良くなることから図 5.9 から分かるため、KOTO 実験でシグナルとして観測する 50 MeV 以上の  $\gamma$  による事象についても背景事象削減のための要求を満たすと判断できる。

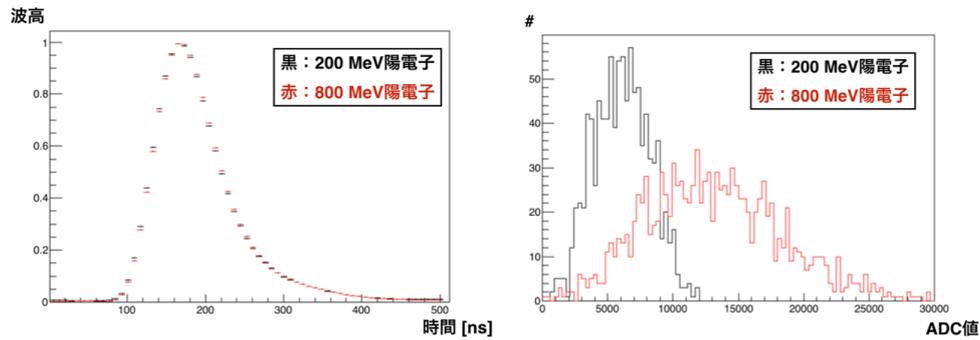


図 5.8: CsI 結晶の側面に陽電子ビームを当てた際の MPPC 側の出力波形 (左) とそのエネルギー分布 (右)。

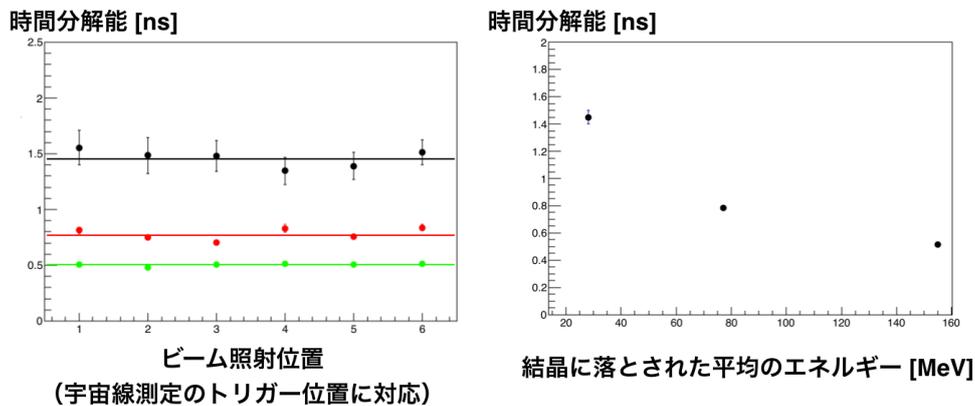


図 5.9: CsI 結晶の側面にビームを当て、結晶に落とされる平均のエネルギーを変えた時の時間分解能を測定した。左の図の黒は 28 MeV (宇宙線)、赤は 77 MeV、緑は 155 MeV の平均エネルギーが落とされた時の結果である。

## 5.4 課題点

本節では、今回のビームテストを通して見つかった課題点について述べる。

### 5.4.1 テストパルス入力用回路での反射

サムアンプ基板を複数接続すると、テストパルス入力用回路で反射が起きた。これはインピーダンスの整合が取れていないためであると考えた。インピーダンスの不整合による反射のモード図を図 5.10 に示す。この反射を防ぐために、テストパルス入力用回路の抵抗値を変更する。

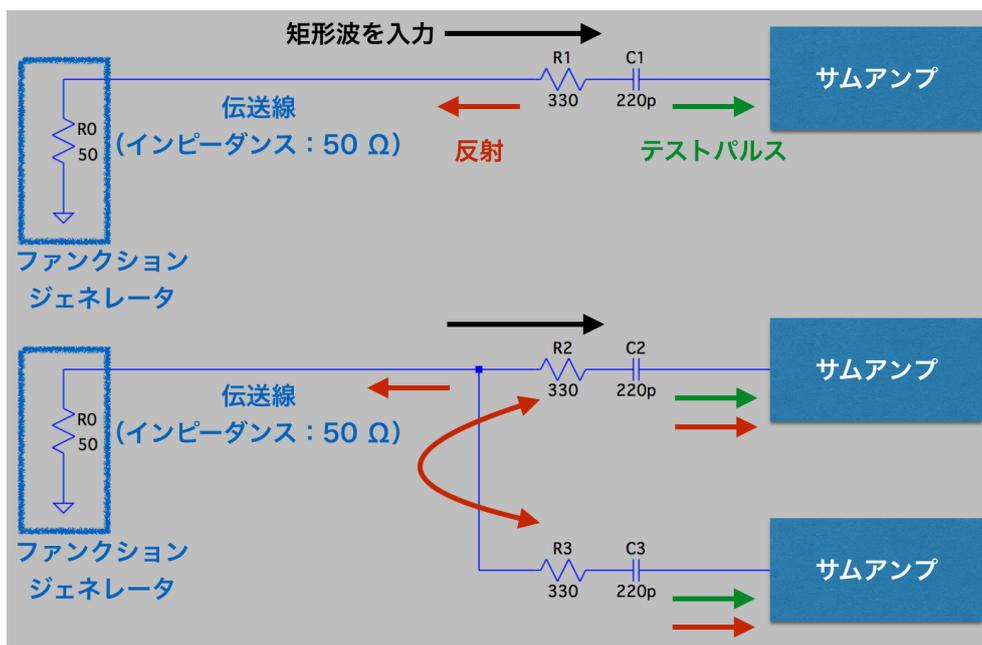


図 5.10: テストパルス入力用回路で反射が起こる仕組み。サムアンプ基板が1枚の場合（上）は反射はサムアンプの出力に現れないが、基板が複数枚の場合（下）は反射が出力に現れる。図中の矢印のうち、黒はファンクションジェネレータからテストパルス入力用回路に入力する矩形波、緑はサムアンプへ入力されるテストパルス、赤はインピーダンスの不整合による反射を表す。

#### 5.4.2 サムアンプの発振

サムアンプ基板の素材の変更により、サムアンプの出力端子が50Ωで終端されていない時に発振するようになった。新旧のサムアンプ基板の写真を図5.11に示す。この問題はサムアンプのゲインを大きくすると解決することが分かっているため、インストール時にはサムアンプのゲインを大きくし、その分アッテネーターで信号を減衰させる必要がある。

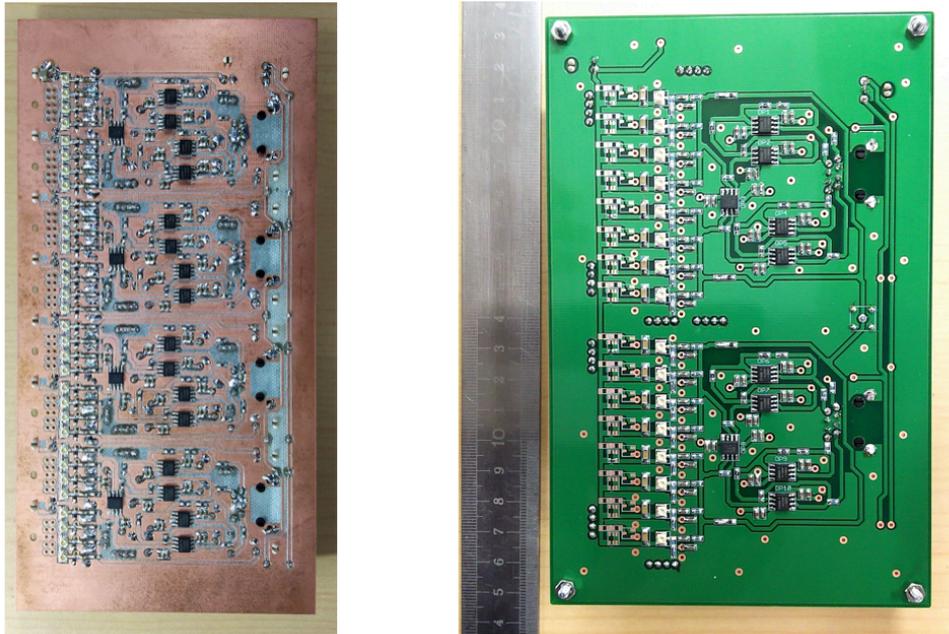


図 5.11: 銅を片面に積層したガラスエポキシ基板（左）では発振が見られなかったが、両面にパターンを作成し、レジストを追加した基板（右）ではサムアンプの出力が  $50 \Omega$  で終端されていない時に発振が見られた。

## 第6章 結論

本研究では、J-PARC KOTO 実験における中性子背景事象を削減するための CsI 両読み機構のうち MPPC 側の読出し回路を開発した。

MPPC4つをひとまとまりの組にし、その組から同軸ケーブルを用いてサムアンプまで信号を伝達する。MPPC 同士を接続する方法として直列接続、並列接続、ハイブリッド接続の三種類について検討し、ハイブリッド接続を採用することに決定した。

MPPC からの信号をサムアンプまで伝送するために用いる同軸ケーブルとしてはヒロセ電機株式会社の U.FL シリーズを候補とし、耐性試験を行った。その結果、KOTO 実験で 1024 本のケーブルを 3 年間使用しても絶縁破壊を起こすケーブルの本数の期待値は  $3.0 \times 10^{-3}$  未満であり、これを採用することに決定した。

同軸ケーブルを伝わって MPPC から送られてきた信号は本研究で開発したサムアンプで処理される。サムアンプとしては、MPPC4つからなる組 4 組からの信号を足し上げ、差動信号として RJ45 コネクタから Ethernet ケーブルを通して信号を ADC に送るものを開発した。

本研究で開発した CsI 両読み機構の時間分解能は 28 MeV の信号に対しては  $(1.45 \pm 0.03)$  ns であった。この時間分解能は、着目しているビームハローの中性子による背景事象を 1 桁削減し、KOTO 実験の感度が  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  を観測できる感度まで達成するための要求を満たしている。

# 謝辞

大学院での研究生生活を通してお世話になった方々に、この場をお借りしてお礼申し上げたいと思います。

山中卓教授には学部4年生の頃から3年間お世話になりました。研究だけではなく日常生活においても常に物事を根本から考える姿勢は、とても参考になりました。また、分からない事があると順を追って分かりやすく説明して下さい、助かりました。ありがとうございました。

南條創准教授には、研究の根本に関わる電子回路や物理だけではなく、様々な事を教えて頂きました。大学院に入学した頃は電子回路に触ったことが殆どなかった私ですが、おかげで電子回路設計、作製の楽しさに気付くことができました。また、常に物事を論理的に考える姿勢は私も見習いたいと思いました。

外川学元助教には、特に修士1年の時にお世話になりました。研究が難航して辛い時も、外川さんの人間味溢れる感じに助けられていました。修士2年になってからも、ADC関連でうまく行かなかった時には丁寧に対応して下さい、ありがとうございました。

先輩の原口弘さんには、私が修士1年の時にお世話になりました。分からないことがある時は一緒に考えて下さり、ありがとうございました。研究以外においても、原口さんの面白いエピソードをたくさん聞くことができ、楽しかったです。

私と同じ大阪のKOTOグループのメンバーの小寺克茂さん、清水信宏さん、西宮隼人くん、原宜広くん、真利共生くんにも感謝申し上げます。小寺さんと清水さんは、スタッフであると同時に我々学生とかなり近い目線で話をしてくださり、とても癒やされました。西宮くんとは、いろいろと議論しながら常に一緒に実験をしてきました。担当する研究箇所は違えど、お互いの研究について意見を言うことができ、良かったです。後輩の原くんと真利くんはとても優秀で、常に容赦なく意見をぶつけてきてくれたので、それで色々気付くこともあり、助かりました。

同期の澤田恭範くん、山元大生くんとは、実験グループは違うけれども、研究以外の面で話をしたり気晴らしに飲みに行ったりでき、とても楽しかったです。ありがとうございました。

京都大学のKOTOコラボレーションの上路市訓さん、中桐洸太さん、篠原智史さんは、KOTOのミーティングの際はいつも研究のアドバイスを下さり、とても助かりました。

全員は書ききれませんが、塩見公志さん、田島靖久さん、他KOTOコラボレーションの方々、KEKの方々には、ビームテストやJ-PARC滞在においてお世話に

なりました。皆様の支えがあったからこそビームテスト等の研究を行うことができました。ありがとうございました。

秘書の藤阪千衣さんには、主に手続き関係でお世話になりました。私は研究の特性上、大量の電子部品の発注をお願いしていましたが、毎回すぐに対応して下さり、とても助かりました。また、発注以外の手続きに関しても複雑な手順を分かりやすい形で丁寧に説明して下さり、ありがとうございました。

大西裕二くん、TEOH Jia Jianさん、廣瀬穰さんとは研究以外の部分で話をし、そこから学ぶことも多かったです。廣瀬さんは重要な点を突く質問をを多く下さり、それによって、自分の研究についてより深く考えることができました。また、学部4年の大杉真優さん、堀孝之くん、山家谷昌平くんの研究に対する力強さは励みになりました。

最後に、大学に入ってから6年間を含め、常に私の生活を支え、話を聞いてくれた両親に感謝の意を述べたいと思います。

# 付録

## A CP 対称性の破れ

CP 対称性とは粒子と反粒子を交換しても物理法則が不変であるという対称性であるが、この対称性は破れていることが実験的に確かめられている。現在、宇宙には粒子が多く存在する一方で反粒子はほとんど存在しない。これは粒子のほうが反粒子よりもわずかに多かったためであるとされており、CP 対称性の破れと深く関わっていると考えられている。歴史的には、まず 1964 年に James Cronin、Val Fitch らが中性  $K$  中間子が 2 つの  $\pi$  中間子に崩壊する現象から CP 対称性の破れを発見し [17]、1973 年に小林誠、益川敏英がこの破れを説明する理論として小林・益川理論を提唱し [18]、後に様々な実験によってこの理論が正しいことが確かめられた。

小林・益川理論によると、Wolfenstein のパラメータを用いるとクォークの世代間混合を表す CKM 行列  $V_{CKM}$  は式 (A.1) の通りに表される。 $V_{CKM}$  の複素成分  $\eta$  が CP 対称性の破れの大きさを表すパラメータである。

$$\begin{aligned} V_{CKM} &= \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

## B 中性 $K$ 中間子

中性  $K$  中間子の固有状態は  $K^0(\bar{s}d)$  および  $\bar{K}^0(s\bar{d})$  の混合状態として表される。CP 対称性の破れがない場合、粒子と反粒子を入れ替える変換 CP に対して

$$\begin{aligned} CP |K_{\text{even}}\rangle &= + |K_{\text{even}}\rangle \\ CP |K_{\text{odd}}\rangle &= - |K_{\text{odd}}\rangle \end{aligned} \quad (\text{B.1})$$

となる状態  $|K_{even}\rangle$  および  $|K_{odd}\rangle$  は

$$\begin{aligned} |K_{even}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |K^0\rangle + |\overline{K^0}\rangle \right) \\ |K_{odd}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |K^0\rangle - |\overline{K^0}\rangle \right) \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

と表される。これらはほとんどの場合  $2\pi$  に崩壊するが、

$$CP |\pi\pi\rangle = + |\pi\pi\rangle \quad (\text{B.3})$$

であるため、 $|K_{odd}\rangle \rightarrow |\pi\pi\rangle$  は CP 対称性を破る崩壊であり、抑制される。そのため、 $|K_{odd}\rangle$  は  $|K_{even}\rangle$  に比べて長い寿命を持つ。そこで、Long と Short の頭文字を取り、 $K_{odd} \equiv K_L$ 、 $K_{even} \equiv K_S$  と呼ぶことにする。付録 A で述べたように  $K_L \rightarrow \pi\pi$  は観測されたため実際は  $K_{even}$  と  $K_{odd}$  は混合状態にあり、定数  $\epsilon$  を用いて

$$\begin{aligned} |K_L\rangle &\sim |K_{odd}\rangle + \epsilon |K_{even}\rangle \\ &= \frac{1+\epsilon}{\sqrt{2}} |K^0\rangle - \frac{1-\epsilon}{\sqrt{2}} |\overline{K^0}\rangle \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

と表される。

## C 並列接続の時定数

ここでは、第二章で述べた MPPC 同士接続方法のうち並列接続の回路の定数の選定について説明する。簡単のために並列接続の回路から MPPC1 個あたりの部分を取り出した回路図を図 C.1 に示す。

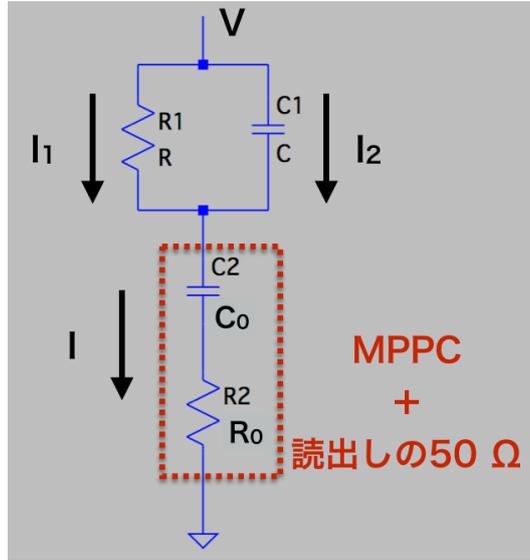


図 C.1: 並列接続から MPPC1 個あたりの部分を取り出した回路。R2 と C2 が MPPC と読出しの 50 Ω を合わせた部分、R1 と C1 が時定数を短くするために加える部分である。

この回路の方程式を式 (C.1) から式 (C.3) に示す。

$$V = RI_1 + \frac{1}{C_0} \int Idt + R_0I \quad (C.1)$$

$$R \frac{dI_1}{dt} = \frac{1}{C} I_2 \quad (C.2)$$

$$I = I_1 + I_2 \quad (C.3)$$

これを解くと、 $I_2$  についての解が得られる。

$$I_2 = Ae^{\lambda_+ t} + Be^{\lambda_- t}$$

$$\lambda_{\pm} = \frac{1}{2} \left\{ - \left( \frac{1}{R_0 C} + \frac{1}{R_0 C_0} + \frac{1}{RC} \right) \pm \sqrt{\left( \frac{1}{R_0 C} + \frac{1}{R_0 C_0} + \frac{1}{RC} \right)^2 - \frac{4}{R_0 R C_0 C}} \right\} \quad (C.4)$$

よって、 $I_1$  は

$$I_1 = \frac{1}{RC} \int I_2 dt + D$$

$$= \frac{A}{RC\lambda_+} e^{\lambda_+ t} + \frac{B}{RC\lambda_-} e^{\lambda_- t} - \frac{1}{RC} \left( \frac{A}{\lambda_+} + \frac{B}{\lambda_-} \right) + D \quad (C.5)$$

と表される。MPPC内のピクセルが光を検出して半導体で電子雪崩が起こり、半導体両端の電圧がブレークダウン電圧まで落ちて電子雪崩が止まるまでの時間スケールはnsよりも充分短いため、この時のR1のインピーダンスはC1のそれよりもはるかに大きい。そのため、初期条件として $I_1 = 0$ 、すなわち $D = 0$ と置ける。以上の結果と $\lim_{t \rightarrow \infty} I \rightarrow 0$ を用いると、オシロスコープ等の測定器で読み出される電流 $I$ は式C.6のように求まる。

$$I = \frac{A}{RC\lambda_+ + 1} \left( e^{\lambda_+ t} - \frac{1 + RC\lambda_-}{1 + RC\lambda_+} e^{\lambda_- t} \right) \quad (C.6)$$

ここで、

$$\tau_+ \equiv \lambda_+^{-1} \quad (C.7)$$

$$\tau_- \equiv \lambda_-^{-1} \quad (C.8)$$

と置くと、 $\tau_+$ と $\tau_-$ はそれぞれ速い成分と遅い成分の時定数を表す。そのため、式(C.6)中の各項の係数および $\lambda_{\pm}$ を調整することで読み出される波形の時定数を調整できる。

まず、遅い成分の時定数 $\tau_+$ を短くすることを考えた。そのためには、式(C.4)より、 $R$ と $C$ の値を小さくすればよい。例として $R = 1 \Omega$ 、 $C = 10 \text{ pF}$ を選択した場合に読み出される波形の立ち下がりの様子を計算した結果を図C.2に示す。

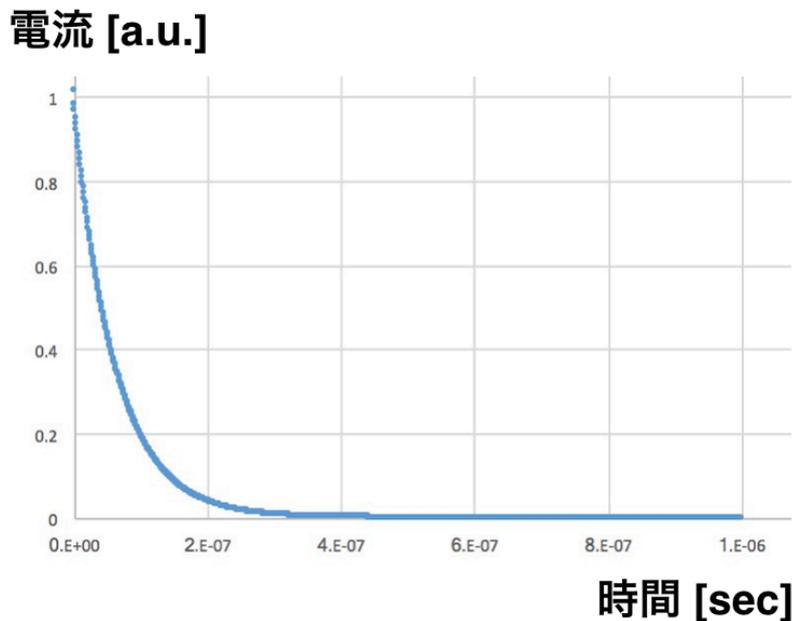


図 C.2:  $\tau_+$ を短くするために $R = 1 \Omega$ 、 $C = 10 \text{ pF}$ を選択した場合に読み出される波形の立ち下がりの時間スケールを計算した結果。

この時の各成分の時定数はそれぞれ  $\tau_+ = 62 \text{ ns}$ 、 $\tau_- = 9.8 \text{ ps}$  である。時定数は短くなったが、速い成分に比べて遅い成分の寄与が多くなったため、波形全体ではほぼ遅い成分の時定数が見えている。

そこで次に、遅い成分の寄与を小さくすることを考えた。このためには速い成分の項の係数、すなわち  $|(1 + RC\lambda_-)/(1 + RC\lambda_+)|$  を大きくすればよい。そのためには  $R$  と  $C$  の値を大きくすればよいが、 $R$  の値が大きすぎると  $R$  に MPPC の暗電流の量が変化した場合の電圧降下量の変化による MPPC のゲインの変化量が大きくなってしまう。MPPC のゲインに影響が無い最適な値として  $R = 2.2 \text{ k}\Omega$ 、 $C = 1 \text{ nF}$  を選択した場合に読み出される波形の立ち下がりの様子を計算した結果を図 C.3 に示す。

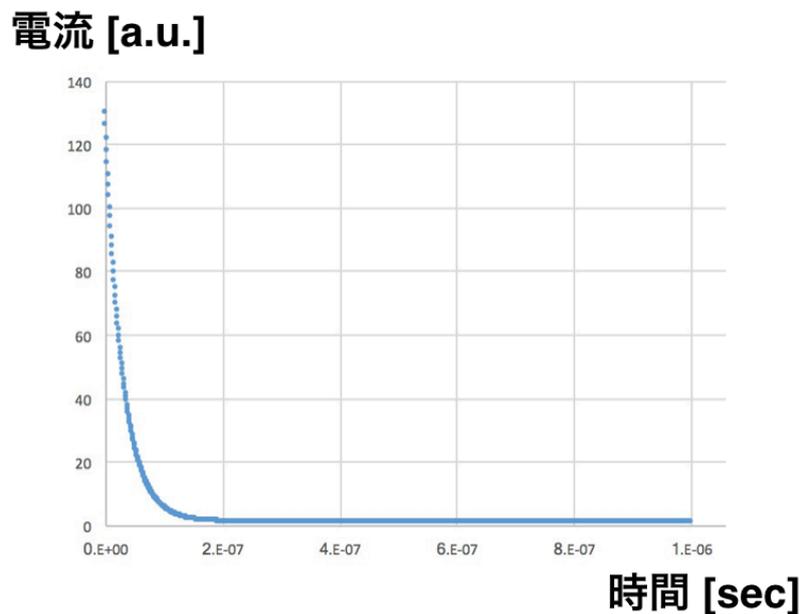


図 C.3: 速い成分の寄与を大きくするために  $R = 2.2 \text{ k}\Omega$ 、 $C = 1 \text{ nF}$  を選択した場合に読み出される波形の立ち下がりの時間スケールを計算した結果。

この時の各成分の時定数はそれぞれ  $\tau_+ = 4 \mu\text{s}$ 、 $\tau_- = 30 \text{ ns}$  と先ほどよりも遅くなったが、速い成分の寄与が遅い成分の寄与に比べて約 130 倍となっているため、速い成分の時定数で波形がほとんど落ちきる。

以上のことから、並列接続の回路の定数としては  $R = 2.2 \text{ k}\Omega$ 、 $C = 1 \text{ nF}$  を採用する。

## D 同軸ケーブルが絶縁破壊に至るまでの時間を観測する場合の困難

第三章で同軸ケーブルの耐性試験を行う際は、ケーブルに電圧を印加し続けて絶縁破壊に至るまでの時間を直接測るのが困難であるため、絶縁破壊に至らなかった時間を測定した。ここでは、絶縁破壊に至るまでの時間を測定しようとした際に直面した困難について述べる。

まず、同軸ケーブルの絶縁体に電圧を印加した時に1秒以内に放電が起こる電圧は1250 Vであったが、印加電圧を1150 Vに落としたところ、3桁以上長い間電圧を印加し続けても絶縁破壊は起こらなかった。絶縁破壊に至るまでの時間からV-t特性を測定してケーブルの寿命を推定するためには極力広い範囲で印加電圧を変えて測定する必要があるが、100 Vの違いで絶縁破壊に至るまでの時間が3桁異なることから、実質的にはこの100 Vの間で測定せざるを得ず、この場合は統計量を多く集める必要がある(図D.1)。

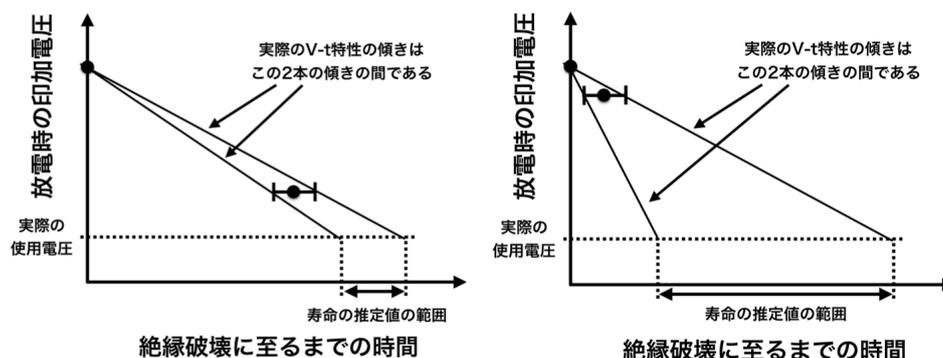


図 D.1: 印加電圧を広い範囲で変えて測定する場合(左)よりも印加電圧を狭い範囲でしか変えられない場合(右)は寿命を決めるためには各測定電圧での誤差を小さくする必要がある。

そこで各測定に長時間かかることを考慮して、統計量を多く集めるためにケーブル複数本について同時にV-t特性を測定することにした。複数本同時測定のためのセットアップを図D.2に示す。

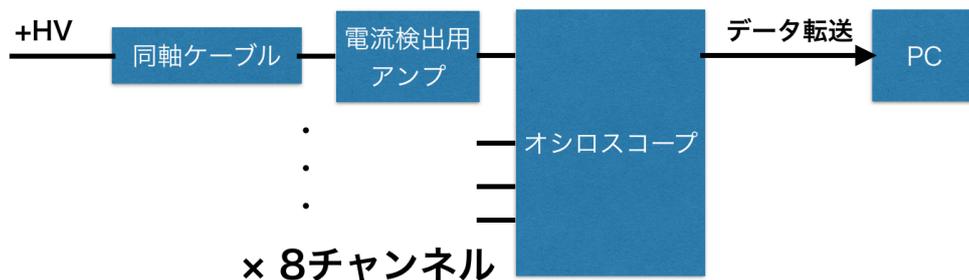


図 D.2: 同軸ケーブル複数本について V-t 特性を同時に測定するためのセットアップ。各ケーブルからの出力をオシロスコープでモニターし続け、放電が起きた場合にオシロスコープのトリガーがかかるようにしておく。トリガーがかかった時のオシロスコープのモニターの情報は PC 内に保存されるため、後に画像とファイル作成時間を確認することで、放電が起きた時刻とチャンネルを判断する。

しかし、このセットアップである一本のケーブルについて放電が起きた場合、放電で発生する電磁波によるクロストークで他のケーブルも放電を起こすことが観測され、アルミの箱等で電磁波を遮蔽してもこのクロストークは防げなかった。そのため、この測定方法は困難であると判断し、第三章にあるような方法でケーブルの耐性評価を行った。

## E MPPC からの信号の関数形

CsI 結晶の端面に MPPC を付けて信号を読み出した場合、信号の関数形は MPPC のピクセルの時定数  $\tau_2$  と CsI 結晶の発光の時定数  $\tau_1$  が合わさった形となる。各時刻での CsI の発光で生じる光子ごとに MPPC のピクセルが検出し、その度に MPPC が時定数  $\tau_2$  の信号を出す。この様子を図 E.1 に示す。

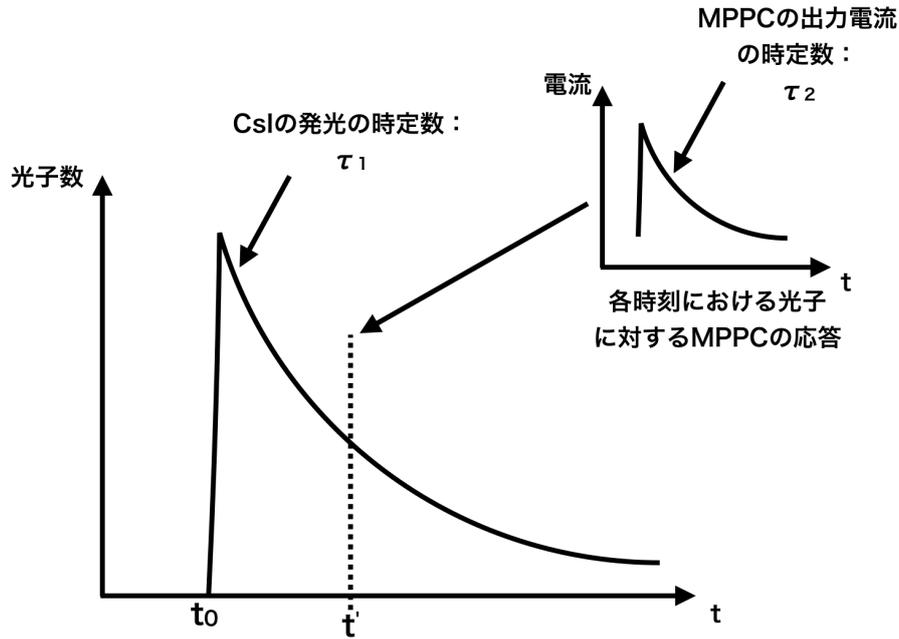


図 E.1: MPPC からの出力波形は MPPC のピクセルの時定数と CsI 結晶の発光の時定数が合わさった形となる。

そこで、CsI の発光の時定数を考慮した MPPC の出力電流  $I(t)$  の計算を式 (E.1) に示す。  $A$  は比例定数である。

$$\begin{aligned}
 I(t) &= \int_{t_0}^t A \exp\left(-\frac{t' - t_0}{\tau_1}\right) \exp\left(-\frac{t - t'}{\tau_2}\right) dt' \\
 &= A \exp\left(\frac{t_0}{\tau_1} - \frac{t}{\tau_2}\right) \int_{t_0}^t \exp\left(-\left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2}\right) t'\right) dt' \quad (\text{E.1}) \\
 &= A \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \left\{ \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau_1}\right) - \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau_2}\right) \right\}
 \end{aligned}$$

## F MPPC が検出する光子数

ここでは、5 cm 角の CsI 結晶に MPPC を 4 個装着した場合に MPPC が検出する光子数を計算する。図 F.1 に示すように 4.1 節と同様のセットアップを組み、MPPC からの信号をオシロスコープで読み出し、波形情報を記録した。

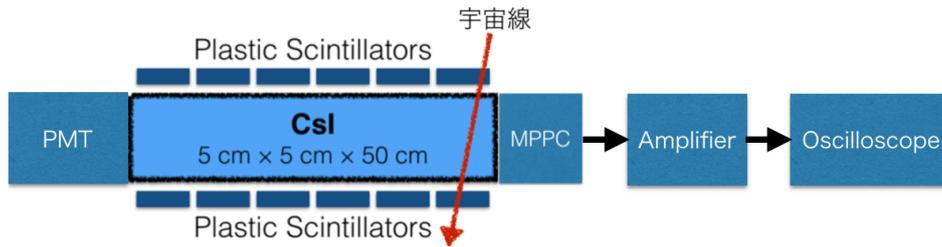


図 F.1: MPPC が検出する光子数を測定するためのセットアップ

まず、MPPC からのダークパルスセルフトリガーで測定し、MPPC が光子 1 個を検出した際の波形情報を取得した。得られた波形の平均を取った結果を図 F.2 左に示す。また、宇宙線が CsI 結晶を縦に貫通した事象の波形を取得し、その平均を取った結果を図 F.2 右に示す。これらの結果をそれぞれ式 (4.1) でフィットし、そのフィット結果を積分した値、すなわち出力波形の電荷量の総量を求めた。その結果、MPPC が光子 1 個を検出した際の実出力電荷量  $Q_{1pe}$  は  $2.94 \times 10^{-10}$  C、CsI 結晶に 28 MeV のエネルギーが落とされた際の実出力電荷量  $Q_{cosmi}$  は  $7.24 \times 10^{-8}$  C であった。よって、CsI 結晶に 1 MeV のエネルギーが落とされた時に MPPC が検出する光子数  $N_{mppc}$  は、

$$N_{mppc} = \frac{Q_{cosmi}}{Q_{1pe}} \cdot \frac{1}{28} = 8.8 \text{ p.e./MeV} \quad (\text{F.1})$$

である。

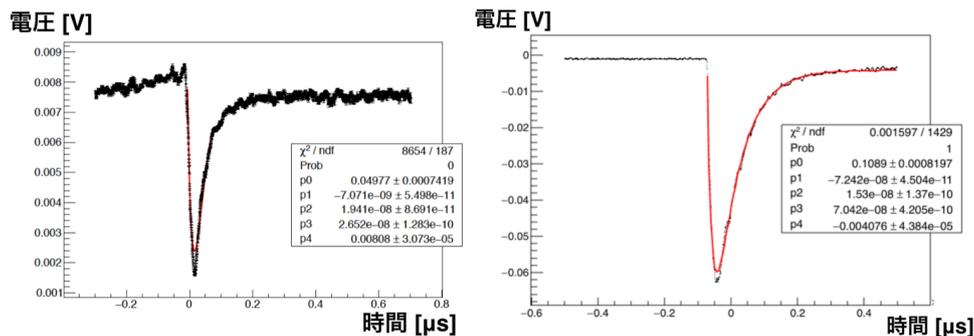


図 F.2: MPPC が光子 1 個を検出した時の出力波形 (左) と、宇宙線が CsI 結晶を貫通して 28 MeV のエネルギーを落とした時の出力波形 (右)。

## G テストパルスからの波形を見る際の事象選別

ここでは、5.2節で図5.3を作製する際に用いたカットの条件を述べる。サムアンプをテストパルス入力用回路に入れた時のサムアンプの出力波形の波高分布およびCFTimeの分布を図G.1に示す。波高分布を正規分布でフィットした際のピーク値から $2\sigma$ の範囲内にあり、かつCFTimeの分布を正規分布でフィットした際のピーク値から $2\sigma$ の範囲内にある事象を選別した。

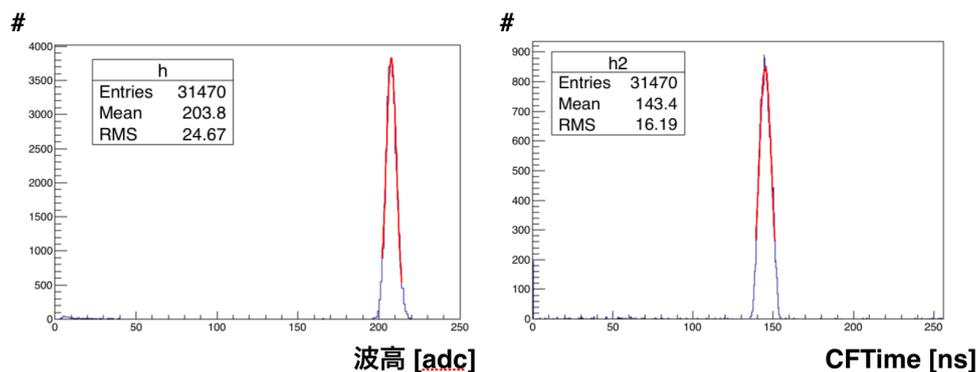


図 G.1: テストパルスをサムアンプに入力した際のサムアンプの出力波形の波高分布（左）およびCFTimeの分布（右）。

## H ADCで記録される波形のタイミング

ADC内では、図H.1に示すように8 ns周期のクロックが各チャンネルに分配されている。そのため、分配された先でクロックのタイミングが各チャンネルで僅かに異なる場合がある。これによって波形のタイミングがチャンネルごとにずれる仕組みを図H.2に示す。ADCはクロックのタイミングに合わせてアナログ信号の電圧値を読み取り、その値をデジタル値に変換する。各チャンネルでクロックが異なるとADCに入ったアナログ信号のうちサンプリングする箇所が異なるため、チャンネルごとに波形のタイミングがずれる。

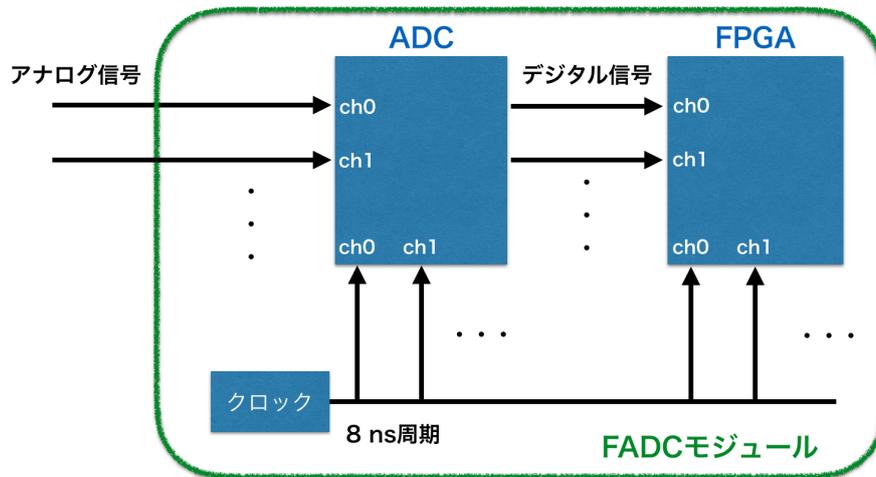


図 H.1: ADC 内のダイアグラム

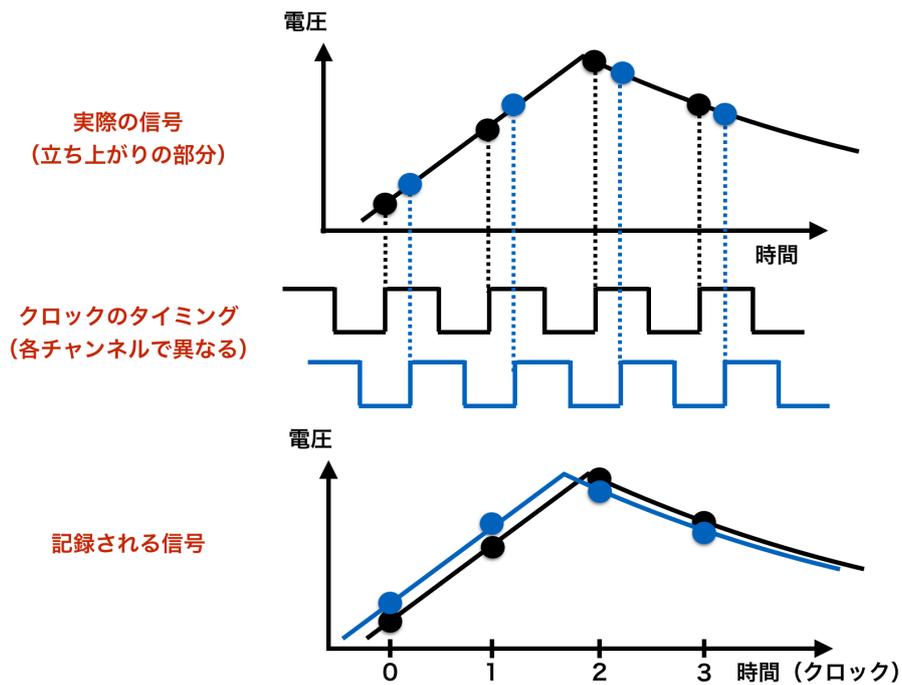


図 H.2: ADC 内で各チャンネルのクロックが異なる場合はアナログ信号のうちどの部分をサンプリングするかが異なるため (上、中)、ADC で記録される波形のタイミングがずれる (下)。

## 参考文献

- [1] Proposal for  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  Experiment at J-Parc, <http://koto.kek.jp/pub/p14.pdf>.
- [2] A. J. Buras, D. Buttazzo, J. GirrbachNoe and R. Knegjens, "  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  in the Standard Model: status and perspectives," JHEP **1511**, 033 (2015).
- [3] J. K. Ahn *et al.*, Phys. Rev. D **81**, 072004 (2010).
- [4] J. K. Ahn *et al.*, "A new search for the  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  and  $K_L \rightarrow \pi^0 X^0$  decays," PTEP **2017**, 021C01 (2017).
- [5] Y. Sugiyama, Ph. D thesis, "Pulse shape discrimination method to suppress neutron-induced background in the J-PARC KOTO experiment", Osaka University (2016).
- [6] J-PARC Web ページ, [https://www2.kek.jp/ja/news/press/2009/J-PARC\\_BL14\\_Boron.html](https://www2.kek.jp/ja/news/press/2009/J-PARC_BL14_Boron.html).
- [7] T. Masuda, Ph. D thesis, "Development and Experimental Study of the KOTO Detector System using Three  $K_L$  Neutral Decay Modes", Kyoto University (2014).
- [8] 西宮隼人 修士学位論文『J-PARC KOTO 実験における中性子背景事象削減のための新しい検出機構の性能評価』大阪大学 (2018).
- [9] 浜松ホトニクス株式会社 Web ページ, [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360\\_series\\_kapd1052j.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360_series_kapd1052j.pdf).
- [10] 浜松ホトニクス株式会社 Web ページ, <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/category/3100/4004/4113/S133606050CS/index.html>.
- [11] 小川真治 修士学位論文『MEG II 実験のための真空紫外光に感度のある大型 MPPC を用いた高精細読出し液体キセノンガンマ線検出器の開発』東京大学 (2016).
- [12] 増田孝彦 修士学位論文『KOTO 実験に用いる低消費電力型光電子増倍管ベースの開発』京都大学 (2009).

- [13] 大木正路『高電圧工学』槇書店 (1982).
- [14] 山本修・濱田昌司『高電圧工学』オーム社 (2013).
- [15] W. Weibull, "A statistical distribution function of wide applicability", J. Appl. Mech. (1951).
- [16] ヒロセ電機株式会社 Web ページ TM21R シリーズカタログ, <https://www.hirose.com/product/jp/products/TM21R>.
- [17] J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, and R. Turlay, Phys. Rev. Lett. **13**, 138 (1964).
- [18] M. Kobayashi, and T. Maskawa, "CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction", Progr. Theor. Phys. **49**, 2 (1973).